

COMPÓSITOS DE CORTIÇA EM SISTEMAS MULTICAMADA PARA REVESTIMENTOS DE PAREDE COM ELEVADO DESEMPENHO DE ABSORÇÃO SONORA

ÂNGELA MARTA ALVES MAZAU

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JUNHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Dedico este trabalho à minha família, especialmente em homenagem ao meu pai,

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.

Madre Teresa de Calcutá

AGRADECIMENTOS

Sou grata primeiramente à Deus, pelo dom da vida, saúde e por ser a razão da minha força interior nos momentos de adversidades.

Venho por este meio expressar o meu mais profundo reconhecimento à esta instituição (FEUP) que me acolheu nos últimos anos e permitiu-me adquirir conhecimentos essenciais, fazer novas amizades e evoluir em muitos aspetos.

Agradeço também a todos os docentes pelo apoio e estímulo sempre presentes, pela paciência, a transmissão de conhecimentos e a vontade de preparar-me para a minha vida profissional futura.

Ao meu professor e orientador, António Carvalho, pela disponibilidade, competência e auxílio prestados desde o início do trabalho até a concretização do mesmo.

Ao Engenheiro António Eduardo Costa, por toda a assistência durante e após a realização dos ensaios.

À empresa corticeira e todos os intervenientes da mesma, pelo acolhimento durante o estágio e pelo fornecimento das amostras analisadas neste projeto com todas as informações associadas às mesmas.

Sou muito grata a minha família que sempre foi um alicerce para mim, especialmente aos meus pais e irmãos, pois contribuíram para a minha formação e à eles dedico toda as minhas lutas e conquistas. O seu amor e apoio incondicional foram a motivação que precisei para nunca desistir dos meus objetivos.

Ao Vítor Tiago, pelos 3 anos de amor, companheirismo, carinho, apoio, ensinamentos, aventuras e momentos especiais.

Aos meus amigos e colegas, Baptista Zumba, Gabriel Ribeiro, Francisca Gonçalves, Hélder Silva, Gabriela Teixeira, Paulo Almeida, Diamantino Amaro, Yulle Mucache, Rita Madeira, Salomé Bessa, Cátia Vanessa, Rui Magalhães, Diogo Parracho e outros, por toda a ajuda, pelos momentos que passamos juntos, pela amizade e por ouvirem as minhas preocupações académicas e não só.

E por último, mas não menos importante, agradeço à todas as pessoas não mencionadas, mas que são igualmente especiais e cuja ajuda ao longo do curso não será esquecida. Sinto-me sortuda por ter recebido muito amor, confiança e suporte da parte de todos.

Obrigada.

RESUMO

A construção tem sofrido muitas alterações ao longo dos últimos tempos e com isso surge a necessidade de estudar diversas formas de abordagens e desenvolver novas soluções.

A acústica é uma das ciências que tem permitido uma revolução no setor da construção através da caracterização sonora dos espaços e dos materiais utilizados para correção acústica.

No presente trabalho é avaliada a eficiência da absorção sonora da cortiça, em conjugação com outros materiais dispostos em multicamada, de modo a obter uma solução com desempenho acústico melhorado para painéis de revestimento de paredes.

O estudo está assente na caracterização acústica de sete amostras tendo em conta o material, o tipo de formatos, espessuras, relevos, áreas e profundidade de perfurações, e o respetivo impacto destas variações no desempenho do revestimento. É também objetivo deste projeto obter um painel interessante do ponto de vista estético e o mais “natural” possível.

Os sistemas estudados dividem-se em três grupos principais: painéis sem perfurações (SP), com perfurações circulares (PC) e com perfurações em forma de ranhura (PR).

Determinou-se o coeficiente de absorção sonora através de ensaios em câmara reverberante de acordo com as normas em vigor.

Realizou-se uma análise dos resultados e concluiu-se que os painéis perfurados absorvem o som de uma forma mais eficiente que os painéis não perfurados. Os painéis perfurados PC e PR tiveram a mesma taxa de 18% de perfuração, porém, a forma dos furos (circulares e em ranhura) permitiram que para os painéis PR, a área de abertura fosse maior em relação aos do tipo PC, favorecendo a absorção sonora.

O aglomerado negro de cortiça e a espuma à base de poliuretano colocados na caixa de ar foram os materiais que garantiram o desempenho mais eficiente dos sistemas estudados, apesar de terem sido utilizados outros materiais como fibra de coco e aglomerado de fibra de madeira.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Absorção Sonora, Cortiça, Desempenho, Metodologia.

ABSTRACT

Construction has been changing over the last few years, which induce the development of new solutions and studies of different forms of approaches.

Acoustics is one of the sciences that has allowed a revolution in the construction sector through the sound characterization of spaces and materials used for acoustic correction.

In the present work, the sound absorption efficiency of cork is evaluated, in conjunction with other materials arranged in multilayer, to obtain a solution with improved acoustic performance for indoor decorative panels.

The study is based on the acoustic characterization of seven samples, knowing the material, the type of shapes, thicknesses, reliefs, areas and depth of perforations, and the respective impact of these variations on the coating performance. It is also the objective of this project to obtain a panel that is aesthetically interesting from a decorative point of view and as “natural” as possible.

The systems studied are divided into three main groups: panels without perforations (SP), with circular perforations (PC) and with slot-shaped perforations (PR).

The sound absorption coefficient was determined through tests in a reverberant chamber in accordance with current standards.

Considering analysis ‘results, it was possible to conclude that perforated panels absorb sound more efficiently than non-perforated panels. The PC and SP perforated panels had the same 18% perforation rate, however, the shape of the holes (circular and slotted) allowed that for the PR panels the opening area was greater compared to the PC type, favoring absorption sound.

The black agglomerate of cork and the polyurethane-based foam placed in the air box were the materials that ensured the most efficient performance of the studied systems, although other materials such as coconut fiber and wood fiber agglomerate were used.

KEYWORDS: Acoustics, Sound Absorption, Cork, Performance, Decorative panels.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE QUADROS	XV
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2. CONCEITOS TEÓRICOS.....	3
2.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.2. SOM E RUÍDO.....	3
2.3. PROPAGAÇÃO SONORA.....	4
2.3.1. PRESSÃO SONORA.....	4
2.3.2. PRESSÃO EFICAZ.....	5
2.3.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	6
2.3.4. ESCALA DECIBEL	6
2.3.4.1. Definição	6
2.3.4.2. Níveis de pressão, potência e intensidade sonora.....	7
2.3.5. FREQUÊNCIA.....	8
2.3.5.1. Definição	8
2.3.5.2. Bandas de frequência	9
2.3.5.3. Curvas de ponderação	10
2.3.6. ANÁLISE TEMPORAL	11
2.4. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS	12
2.4.1. INTRODUÇÃO	12

2.4.2. ABSORÇÃO SONORA	13
a) Método do tubo de ondas estacionárias.....	14
b) Método da câmara reverberante.....	14
2.4.3. REVERBERAÇÃO	15
2.4.4. MECANISMOS DE ABSORÇÃO SONORA	17
2.4.4.1. Porosos e Fibrosos	17
2.4.4.2. Ressonadores	18
2.4.4.3. Membranas	19
3. ESTADO DA ARTE	21
3.1. INTRODUÇÃO.....	21
3.2. BREVE EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	21
3.3. A CORTIÇA NA CONSTRUÇÃO.....	22
3.3.1. BREVE INTRODUÇÃO HISTÓRICA	22
3.3.2. CARACTERÍSTICAS DA CORTIÇA.....	23
3.3.3. AGLOMERADOS DE CORTIÇA.....	24
3.4. MATERIAIS DE COMBINAÇÃO	25
3.4.1 MATERIAIS TRADICIONAIS.....	25
3.4.2 LEVANTAMENTO DE ESTUDOS EFETUADOS	28
4. METODOLOGIA DOS ENSAIOS	37
4.1. CRITÉRIOS DE ABORDAGEM.....	37
4.2. ENSAIO EM CÂMARA REVERBERANTE- NP EN ISO 354	38
4.2.1. METODOLOGIA	38
4.2.1.1. Considerações gerais.....	38
4.2.1.2. Processo de cálculo	41
4.2.2. CARACTERIZAÇÃO DA CÂMARA REVERBERANTE E DOS EQUIPAMENTOS DA FEUP	42
4.2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	43
5. RESULTADOS	51
5.1. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA.....	51
5.2. ANÁLISE GERAL.....	55
5.2.1. PAINÉIS DO TIPO SP	55

5.2.2. PAINÉIS DO TIPO PC	57
5.2.3. PAINÉIS DO TIPO PR	58
6. CONCLUSÕES	61
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXOS A	63
ANEXOS B	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Propagação sonora como função sinusoidal, bem como evidências das zonas de compressão e rarefação durante a propagação do som no meio. Adaptado de [5]	4
Fig. 2.2 – Exemplo de espectro sonoro do mesmo ruído em bandas de 1/1 oitavas e 1/3 de oitavas [2]	10
Fig. 2.1 – Curvas de ponderação (filtros) A, B, C e D [2]	11
Fig. 2.2 – Exemplo de tudo de Kundt [13]	14
Fig. 2.3 – Exemplo de ensaio (determinação do α) em câmara reverberante com amostra sobre o piso [2].....	15
Fig. 2.4 – Definição do tempo de reverberação TR. Adaptado de [5].....	16
Fig. 2.5 – Exemplo de sonómetros da marca Brüel & Kjaer [15].....	16
Fig. 2.6 – Exemplo da interação dos poros e das fibras, representando a dissipação da energia através deles [16].....	18
Fig. 2.9 – Esquema da cavidade de um ressoador de Helmholtz [18]	18
Fig. 7.10 – Exemplo de mecanismo de absorção do tipo membrana. Adaptado de [16].....	19
Fig. 3.1 – (Esq.) Sobreiro e representação do corte A-A' feito para esclarecimento da figura 3.2. Adaptado de [26].....	23
Fig. 3.2 – (Dir.) Sobreiro e sua constituição em camadas: a) lenho, b) entrecasca e c) cortiça. Adaptado de [24].....	23
Fig. 3.3 – Aglomerado negro de cortiça [25].....	25
Fig. 3.4 – Aglomerado composto de cortiça [25].....	25
Fig. 3.5 – Aglomerado negro de cortiça combinado com fibra de coco [24].....	26
Fig. 3.6 – Estrutura de uma placa de <i>celenit</i> (fibra de madeira) [31].....	27
Fig. 3.7 – Exemplo de painéis de madeira perfurados e ranhurados [32].....	28
Fig. 3.8 – Coeficiente de absorção para energia de incidência normal de uma camada de material fibroso com 2,5 cm e 5,0 cm de espessura [33].....	29
Fig. 3.9 – Coeficiente de absorção sonora da fibra de coco natural, em função da frequência, para uma espessura de 20 mm (esquerda) e de 30 mm (direita). Adaptado de [44]	31
Fig. 3.10 – Coeficiente de absorção sonora de um sistema com placa perfurada colocada antes da fibra de coco (50 mm) e da caixa de ar (35 mm) com 1% e 20% de perfuração (esq.) e quando a mesma placa perfurada é colocada entre a fibra de coco (50 mm) e caixa de ar (35 mm) com 1 e 20% de perfuração (dir.) [48].....	32
Fig. 3.11 – Geometria de painéis com superfícies absorventes, difusas, refletoras e híbridas que remetem para um desempenho acústico completo. Adaptado de [49].....	32
Fig. 3.12 – Exemplo de uma das amostras em aglomerado negro de cortiça e madeira, que foi utilizada para avaliar a influência da geometria e do material em relação as propriedades híbridas, refletoras, absorventes e difusas [49].....	33
Fig. 3.13 – Coeficiente de absorção sonora em função da frequência para todos os painéis perfurados estudados por Patraquim [32].....	33

Fig. 3.14 – Posicionamento de amostras de junco para ensaio longitudinal e transversal, respetivamente [52].....	34
Fig. 4.1 – Esquema representativo dos procedimentos necessários para materializar a metodologia experimental.....	37
Fig. 4.2 – Esboço do painel do tipo SP constituído por: 1- Placa de compósito de cortiça não perfurada ($e=1,5$ cm), 2- material poroso (espuma a base de poliuretano $e=1$ cm e 2 cm conforme SP 1 e SP 2), 3- material fibroso (fibra de coco $e=2$ cm) e 4-placa rígida de suporte (MDF $e=0,3$ cm).....	43
Fig. 4.3 – Esquema do painel do tipo SP com as diferentes combinações SP 1 e SP 2, onde um dos materiais da caixa de ar varia a espessura de 1 para 2 cm, mantendo-se constante os restantes materiais do sistema e as suas respetivas espessuras.....	44
Fig. 4.4 – Esboço do painel do tipo PC constituído por 1- Placa de compósito de cortiça ($e=1,5$ cm) perfurada (18%) com orifícios circulares, 2- caixa de ar vazia ($e=1$ cm), 3- material poroso ou fibroso (conforme PC c, PC n e PC m, $e=2$ cm) e 4-placa rígida de suporte (MDF $e=0,3$ cm).....	44
Fig. 4.5 – Esquema do painel do tipo PC com as diferentes combinações PC c, PC n e PC m, onde o material em contacto com a caixa de ar varia entre fibra de coco, aglomerado negro de cortiça e fibra de madeira, mantendo-se constante os restantes materiais do sistema e as suas respetivas espessuras.....	45
Fig. 4.6 – Esboço do painel do tipo PR constituído por 1- Placa de compósito de cortiça ($e=1,5$ cm) perfurada (18%) com orifícios em forma de ranhura com extremos semicirculares, 2- caixa de ar vazia ($e=1$ cm), 3- material poroso ou fibroso (conforme PR p e PR n, $e=2$ cm) e 4-placa rígida de suporte (MDF $e=0,3$ cm).....	45
Fig. 4.7 – Esquema do painel do tipo PR com as diferentes combinações diferentes combinações PR p e PR n, onde apenas se substitui a espuma de poliuretano pelo aglomerado negro de cortiça, mantendo-se constante os restantes materiais do sistema e as suas respetivas espessuras.....	46
Fig. 4.8 – (Esq.) Colocação das amostras por camada de material do sistema tipo SP, sendo possível visualizar a placa MDF, a fibra de coco, a espuma de poliuretano e o compósito de cortiça. [foto da autora].....	48
Fig. 4.9 – (Dir.) Sistema do tipo SP montado dentro da câmara reverberante. [foto da autora].....	48
Fig. 4.10 – Esboço da posição da amostra dentro da câmara reverberante R1, bem como das combinações entre as posições do microfone e da fonte sonora.....	49
Fig. 4.11 – Montagem do microfone e da fonte sonora nas respetivas posições indicadas na Fig. 4.10. [Foto da autora].....	49
Fig. 5.1 – Curvas dos coeficientes de absorção sonora α_{propto} para cada uma das amostras ensaiadas.....	55
Fig. 5.2 – Comparação das curvas de absorção sonora dos painéis SP 1 e SP 2.....	56
Fig. 5.3 – Comparação das curvas de absorção sonora dos painéis PC c, PC n e PC m.....	57
Fig. 5.4 – Comparação das curvas de absorção sonora dos painéis PR p e PR n.....	58
Fig. 5.5 – Comparação global dos sistemas estudados neste trabalho.....	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Relação entre Pressão, Intensidade e Nível sonoro. Adaptado de [6].....	8
Quadro 3.1 – Alguns modelos de cálculo de impedância e seus respectivos parâmetros. Adaptado de [38].....	30
Quadro 3.2 – Valores dos coeficientes de absorção sonora máximos obtidos para os diversos sistemas multicamada compostos por fibra de coco e espuma “acústica”. Adaptado de [47]....	31
Quadro 3.3 – Valores dos coeficientes de absorção sonora de sistemas multicamada constituídos por junco e cânhamo e para materiais fibrosos como algodão, lã, cânhamo, fibra de madeira, juta, linho, rami e sisal, lidos para uma frequência de 500 Hz. Os materiais fibrosos foram ensaiados em tubo de ondas estacionárias e os não fibrosos em câmara reverberante. Adaptado de [52].....	34
Quadro 4.1 – Frequências centrais das bandas de terço de oitava, definidas pela norma ISO 266, para medição do tempo de reverberação em câmara reverberante. Adaptado de [53].....	38
Quadro 4.2 – Valores de absorção sonora equivalente máximos corrigidos para 200 m ³ . Adaptado de [53].....	39
Quadro 4.3 – Valores de absorção sonora equivalente máximos corrigidos para o volume real da câmara reverberante da FEUP. Adaptado de [53].....	42
Quadro 4.4 – Características dos vários materiais que constituem os sistemas de revestimento de paredes.....	46
Quadro 4.5 – Quadro resumo de todos os sistemas e suas respectivas características para cada combinação.....	47
Quadro 5.1 – Condições termo-higrométricas de cada um dos sistemas em função da data de medição do tempo de reverberação na câmara reverberante e verificação face aos valores previstos na norma.....	51
Quadro 5.2 – Valores dos tempos de reverberação de referência (para câmara vazia) e para cada amostra, em função da frequência.....	52
Quadro 5.3 – Valores das áreas de absorção sonora equivalentes A_n em função da frequência, para cada uma das amostras e verificação face aos valores máximos previstos na norma.....	53
Quadro 5.4 – Valores dos coeficientes de absorção sonora α para cada uma das amostras ensaiadas.....	54

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α - Coeficiente de absorção sonora
 α' - coeficiente de atenuação atmosférica
 ω - velocidade angular
 θ - Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
 λ - Comprimento de onda (m)
 ρ - Massa volúmica (kg/m^3)

A - Área de Absorção sonora equivalente (m^2)
c - Celeridade (m/s)
d - Espessura da caixa de ar, em m.
e - Espessura (cm)
f - Frequência (Hz)
I - Intensidade sonora (W/m^2)
 L_I - Nível de intensidade sonora (dB)
 L_p - Nível de pressão sonora (dB)
 L_W - Nível de potência sonora (dB)
l - Comprimento (m)
m - Massa superficial do painel (kg/m^2)
 m_n - Coeficiente de atenuação devido à presença do ar, em metros recíprocos
p - Pressão, pressão atmosférica (Pa)
r - Distância (m) / raio de perfuração (cm)
S - Área de superfície da amostra (m^2)
t - Temperatura do ar (K)
TR - Tempo de reverberação (s)
T - Período (s)
V - Volume (m^3)
W - Potência sonora (W)

DEC - Departamento de Engenharia Civil

DL - Decreto lei

EN - European Norm.

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

ISO - International Organization for Standardization.

MDF - Medium density fiberboard

NRC - Noise reduction coefficient

RGR - Regulamento Geral do Ruído.

RMS - Root mean square

RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

O sector da construção é um dos que mais tem influenciado o aumento dos problemas ambientais, principalmente devido aos gastos excessivos de energia e emissão de gases de efeito estufa. Neste sentido é imprescindível recorrer ao conceito de sustentabilidade na construção, que preconiza o uso eficiente das fontes renováveis, a utilização de materiais naturais e de técnicas que permitissem uma coexistência equilibrada entre a construção e o meio ambiente.

Dentro do ramo de construção, a acústica tem ocupado uma posição relevante devido à crescente exigência no nível de desempenho e conforto.

O estudo da acústica de interiores permite proceder a uma análise em termos de correção acústica e/ou aplicação de isolamentos sonoros. O estudo feito no presente trabalho será direcionado ao primeiro caso por se pretender a atenuação do ruído produzido no local de colocação da solução construtiva desenvolvida (painéis acústicos).

A resolução desta problemática resume-se na aplicação de materiais ou sistemas absorventes dos quais: porosos e fibrosos, membranas e ressoadores. O principal componente a ser utilizado neste trabalho é a cortiça, que para além de ser um material do grupo dos porosos e fibrosos, com características de absorção sonora, é também de origem natural e, portanto, favorece a desejada sustentabilidade na construção.

O objetivo principal desta dissertação é o estudo e criação de uma espécie de quadro estético, com desempenho acústico, a ser colocado sobre paredes de ambientes sociais como receções de hotéis, escritórios, salas de reuniões, etc., de modo a reduzir o ruído produzido nesses espaços e permitindo uma melhor concentração no trabalho e comunicação entre os intervenientes nesses locais. Interessa então fazer uma seleção de materiais que possam ser agrupados com a cortiça, e que, introduzindo particularidades como perfurações, relevos e/ou variações de espessuras e formatos, possam conferir ao painel as características de absorção sonora pretendidas.

São utilizadas soluções existentes e comercializadas por uma Corticeira e protótipos produzidos de acordo com as necessidades de aperfeiçoamento. Para cada uma das amostras com composição total ou parcial em cortiça, serão quantificados os valores dos coeficientes de absorção sonora (α), obtidos através de ensaios em câmara reverberante e/ou tubo de ondas estacionárias.

De forma resumida, pretende-se especificamente:

- Fazer uma análise dos vários materiais existentes usados para correção acústica;
- Produzir amostras de compósitos de cortiça em multicamada com e/ou sem conjugação de outros materiais;
- Estudar o comportamento acústico dessas amostras em termos de absorção sonora;
- Realizar uma análise comparativa entre as amostras estudadas;
- Selecionar melhor solução e tirar conclusões.

1.2. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

De modo a facilitar a leitura e compreensão do trabalho, o mesmo foi organizado em seis capítulos conforme a seguinte descrição:

- Capítulo 1- Introdução: Breve contextualização do tema e esclarecimento dos objetivos pretendidos, assim como uma pequena síntese dos procedimentos adotados;
- Capítulo 2- Conceitos teóricos: Definição de termos, parâmetros e conceitos necessários ao entendimento do presente trabalho;
- Capítulo 3- Estado da arte: Revisão bibliográfica relacionada a estudos de materiais absorventes sonoros, utilização da cortiça na construção, medição da absorção sonora, sistemas em multicamada e outros, apresentando assim uma base de informações científicas e relevantes para abordagem do tema;
- Capítulo 4- Metodologia dos ensaios: Caracterização das amostras, descrição dos equipamentos e métodos de ensaios utilizados para obtenção do coeficiente de absorção sonora, bem como breve menção das normas aplicadas;
- Capítulo 5- Resultado dos ensaios: Apresentam-se os valores dos coeficientes de absorção obtidos para cada amostra e faz-se uma análise comparativa entre as mesmas;
- Capítulo 6- Conclusões: O trabalho finaliza com algumas deduções gerais e específicas e são mencionadas algumas perspectivas de desenvolvimento futuro.

2

CONCEITOS TEÓRICOS

2.1. INTRODUÇÃO

O ser humano desenvolveu-se de tal forma que lhe permitiu adaptar os seus sentidos às suas necessidades e ao meio onde estava inserido. Os sentidos adaptados e que estão relacionados com o som, são a audição e a fala. Foi indispensável o surgimento da acústica para caracterização destes fenómenos, uma aprofundação dos “segredos” da comunicação e dos casos associados à incomodidade.

A acústica é o ramo da física que estuda as oscilações que ocorrem em meios elásticos e cujas frequências são percebidas pelo ouvido humano como “som”. O seu objetivo é fazer o controlo da emissão, transmissão, receção e reprodução de fenómenos acústicos [1].

Os primeiros estudos propriamente ditos sobre acústica de edifícios foram feitos e aprofundados pelo físico americano Wallace. C. Sabine no início do século XX. Este fez a correlação dos volumes, materiais e do tempo de reverberação dos espaços [2].

Uma vez que a análise deste trabalho se baseia em princípios acústicos, serão expostos alguns conceitos e definições para melhor compreensão do mesmo.

2.2. SOM E RUÍDO

O som é formado por ondas, e estas são uma variação espacial causadas pelo transporte de energia [3].

Se se entender o som como energia de vibração das partículas dos materiais em que se propaga, à luz da lei da conservação da energia (que estipula que a energia não pode ser criada ou destruída, pode apenas mudar a sua forma) sempre que o som é emitido e se desvanece está-se perante a emissão de energia vibrátil e dissipação da mesma no meio [4] *apud* [5].

O ruído é um som indesejável ou sem significado para o ouvinte. Porém a definição é bastante relativa e abstrata porque um determinado som pode ser desagradável para alguns e para outros não [2],[6].

O ruído pode ser bastante prejudicial pois pode gerar incómodos no dia a dia como: dificuldades de compreensão oral, alterações comportamentais relacionadas ao nervosismo, sensação de cansaço mental, baixa produtividade relacionada à fraca capacidade de concentração e em casos graves pode originar o desenvolvimento de doenças de risco. Daí a importância de agir de forma a minimizar ou extinguir o efeito do ruído nos espaços.

2.3. PROPAGAÇÃO SONORA

2.3.1. PRESSÃO SONORA

É imprescindível a existência de um meio físico para que o som se propague. Neste caso particular, o meio em análise é o ar.

Uma fonte sonora produz uma vibração que se assemelha a uma “esfera pulsante”. Esta vibração é transmitida através do choque entre as partículas existentes no meio e essa excitação das moléculas circundantes altera a posição das mesmas, originando zonas de compressão e rarefação, quando as partículas estão mais próximas ou mais afastadas umas das outras respetivamente [2],[7].

A variação de pressão toma como referência a pressão atmosférica normal que é cerca de 10^5 Pa [2]. Essa variação traduz-se numa função sinusoidal para qualquer ponto. (Figura 2.1).

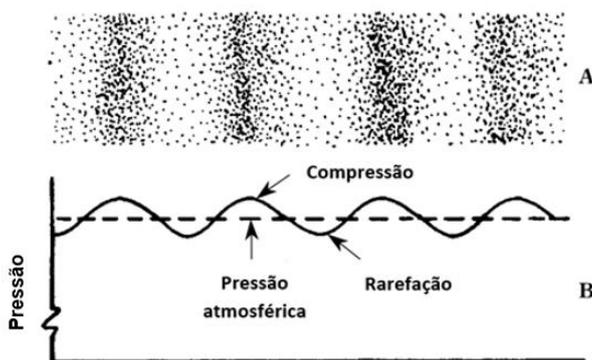


Fig. 2.1 – Propagação sonora como função sinusoidal, bem como evidências das zonas de compressão e rarefação durante a propagação do som no meio. Adaptado de [5]

Recorrendo a princípios da mecânica aplicados a um meio ilimitado, homogéneo, isotrópico e não dissipativo, é possível escrever matematicamente a equação que traduz a “lei fundamental de propagação das ondas de pressão sonora” (2.1) em função da celeridade (c) que por sua vez varia com a temperatura (T) [2].

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.2)$$

$$T = 273,15 + \theta \quad (2.3)$$

Em que:

p - Pressão sonora (Pa);

t - Tempo (s);

c - Celeridade (m/s);

T - Temperatura (K);

θ - Temperatura ($^{\circ}$ C).

2.3.2. PRESSÃO EFICAZ

A pressão eficaz ou RMS (*root mean square*), como o nome indica, é dada pela raiz quadrada da média aritmética dos quadrados das pressões, uma vez que a pressão varia significativamente com o tempo. Este valor é na verdade aquele que é utilizado quando se refere a pressão [2].

$$p_{eficaz}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.4)$$

Os sons puros, compostos por um único tipo de frequência, têm a sua pressão eficaz definida em função da pressão máxima.

$$p_{eficaz} = \frac{P_{máxima}}{\sqrt{2}} \approx 0,71 P_{máxima} \quad (2.5)$$

2.3.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A intensidade sonora (I) é uma espécie de taxa média de energia sonora por unidade de tempo e de área, transportada perpendicularmente à direção de propagação da onda [8]. Faz a avaliação da componente direcional do som de forma vetorial [2].

A potência sonora (W) é a quantidade de energia que atravessa uma onda esférica fictícia de raio r , centrada na fonte. A potência sonora é uma característica exclusiva da fonte sonora e não depende do meio [2].

A intensidade de ondas esféricas pulsantes e progressivas, a uma distância r a partir da fonte é dada por uma equação relacionada com a área superficial da esfera e a potência sonora. Porém, é possível apresentar a equação em função da pressão eficaz [8].

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.6)$$

Onde:

I - Intensidade sonora (W/m^2);

W - Potência sonora (W);

r - Distância (m);

p - Pressão sonora (Pa);

ρ - Massa Volúmica (kg/m^3);

c - Celeridade (m/s) ≈ 340 m/s.

2.3.4. ESCALA DECIBEL

2.3.4.1. Definição

A escala decibel é utilizada como medida do nível de pressão sonora. Corresponde a uma escala logarítmica que representa números de grandeza muito variável em escala linear e que permite adaptar as flutuações de pressão à percepção do ouvido humano. Esta variação de pressão equivale à uma faixa entre o limiar da audição e limiar da dor que correspondem a 10^{-5} e 100 Pa, respetivamente [8],[9].

2.3.4.2. Níveis de pressão, potência e intensidade sonora

O nível de pressão sonora relaciona logarithmicamente a pressão sonora e a pressão sonora de referência. O valor de pressão sonora de referência em decibel (dB) para a percepção do ouvido humano na frequência de 1000 Hz é de 2×10^{-5} Pa [9].

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (2.7)$$

O nível de pressão sonora não é o único nível medido em decibel (dB). Existem ainda o nível de potência sonora, que representa a energia de uma fonte sonora “som emitido”, e o nível de intensidade sonora que caracteriza o “som ouvido” [2].

Assim, o nível de intensidade e de pressão sonora são dados sucessivamente por:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.8)$$

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (2.9)$$

Os valores de referência para estes níveis são: $I_0 = 10^{-12}$ W/m² e $W_0 = 10^{-12}$ W.

Na escala decibel, a soma de níveis não é materializada de forma algébrica [2]. Sendo assim, a quantificação é feita pela expressão:

$$L_{soma} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.10)$$

Segundo esta expressão, a adição de dois níveis idênticos corresponde a um acréscimo de 3 dB, ao contrário do dobro do valor, que era de esperar numa equação linear.

$$L_{soma} = 10 \log(10^{\frac{L_i}{10}} + 10^{\frac{L_i}{10}}) = 10 \log 2 + 10 \log(10^{\frac{L_i}{10}}) = 3 + L_i \quad (2.11)$$

Apresenta-se um quadro de modo a ser possível verificar a não linearidade entre a variação da pressão sonora (μ Pa) e o nível sonoro em escala logarítmica (dB). (Quadro 2.1)

Quadro 2.1 – Relação entre Pressão, Intensidade e Nível sonoro. Adaptado de [6]

Pressão sonora (μPa)	Intensidade Sonora (10^{-12} W/m^2)	Nível Sonoro (dB)
20	1	0
	10	1
200	100	20
	1.000	30
2000	10.000	40
	100.000	50
20.000	1.000.000	60
	10.000.000	70
200.000	100.000.000	80
	1.000.000.000	90
2.000.000	10.000.000.000	100
	100.000.000.000	110
20.000.000	1.000.000.000.000	120
	10.000.000.000.000	130
200.000.000	100.000.000.000.000	140

2.3.5. FREQUÊNCIA

2.3.5.1. Definição

Anteriormente, no ponto 2.3.1, viu-se que a variação da pressão em função do tempo tem uma representação sinusoidal. Quando ocorre um ciclo completo dessa variação, esse intervalo de tempo recebe o nome de período (T), cuja unidade é o segundo (s).

Em acústica é comum usar a frequência (f) medida em hertz (Hz), que é o inverso do período (T) (equação 2.12). Assim sendo, a frequência é uma “propriedade” que caracteriza sons e as suas respectivas fontes sonoras devido à particularidade de cada um deles emitir frequências específicas [2].

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.12)$$

A gama de frequências audíveis pelos seres humanos está compreendida entre os 20 e os 20.000 Hz, sendo que a primeira pertence à classe dos sons graves e a segunda à dos sons agudos. Os valores inferiores e superiores a esse intervalo denominam-se infrassons e ultrassons, respetivamente [2].

A frequência também pode ser caracterizada a partir do comprimento de onda (λ), que simboliza a distância entre dois pontos consecutivos e situados na mesma posição de uma onda periódica [2].

$$\lambda = c \cdot T \quad (2.13)$$

Então:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.14)$$

Sendo:

λ - Comprimento de onda (m);

c- Celeridade (m/s);

T- Período (s);

f- Frequência (Hz).

O comprimento de onda é utilizado em situações de correção acústica, mas também é muitas vezes aplicado em estudos do comportamento do som quando existem obstáculos ou orifícios. Um exemplo dessa aplicação são as barreiras acústicas [2].

2.3.5.2. Bandas de frequência

A gama de frequências é muito ampla, e por isso fazer um estudo detalhado sobre cada uma delas seria complicado, razão pela qual surgiu o conceito de “bandas”, onde os ruídos são agrupados por grupos de frequências de dimensão normalizada [2].

Cada “banda” possui um limite inferior (f_1), superior (f_2) e um valor médio central f_0 .

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (2.15)$$

O valor da largura de banda (B) é dado pela subtração entre os limites de frequência superior e inferior. De entre as diversas larguras de bandas existentes, as que são empregues em acústica são as de 1/1 oitava e 1/3 oitava. (Figura 2.2)

$$B = f_2 - f_1 = \frac{2^k - 1}{\sqrt{2^k}} f_0 \quad (2.16)$$

Onde k é uma constante cujo valor varia de acordo com a banda utilizada, ou seja, $k=1$ se a banda for 1/1 oitava e $k=1/3$ se for 1/3 oitava.

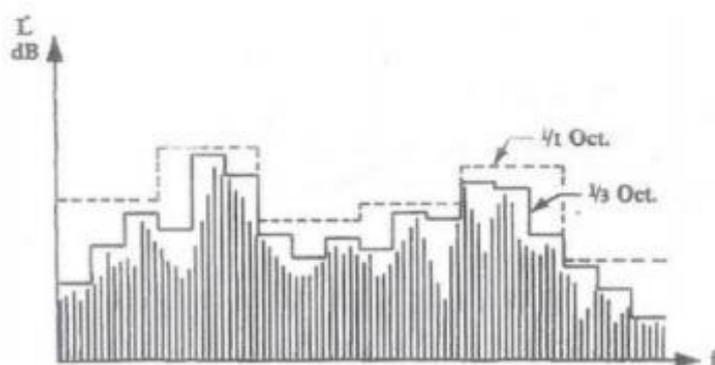


Fig. 2.2 – Exemplo de espectro sonoro do mesmo ruído em bandas de 1/1 oitavas e 1/3 de oitavas [2].

2.3.5.3. Curvas de ponderação

Os sonómetros, os microfones e outros equipamentos, apresentam a mesma sensibilidade para qualquer tipo de frequência enquanto o ouvido humano tem sensibilidade pouco regular, que varia de forma diferente quer para frequências altas quer para as baixas [2],[9].

Além da variação de sensibilidade depender da frequência, também depende da intensidade sonora do som, razão pela qual existem as curvas de igual percepção da intensidade sonora

A subjetividade do ouvido humano face ao ruído “obriga” à “correção” da sensibilidade dos equipamentos de modo que haja semelhança entre resultados numéricos e percepção subjetiva. Essa “correção” é efetuada através de filtros eletrónicos inseridos nos aparelhos. As curvas de ponderação são as que representam essas correções em função das frequências do som captado (figura 2.3), e estas curvas são aproximadamente o inverso das curvas de igual sensibilidade auditiva [2].

De todos os filtros apresentados na Figura 2.3, o filtro A é o que é usado frequentemente.

Os valores numéricos correspondentes à “correção” introduzida são adicionados algebricamente aos valores dos níveis de pressão sonora em dB para cada frequência. O resultado global total do nível sonoro é dado pela soma logarítmica dos valores obtidos anteriormente por banda de frequência e exprimem-se em $L_A = \dots \text{dB}$ ou $L = \dots \text{dB(A)}$ [2].

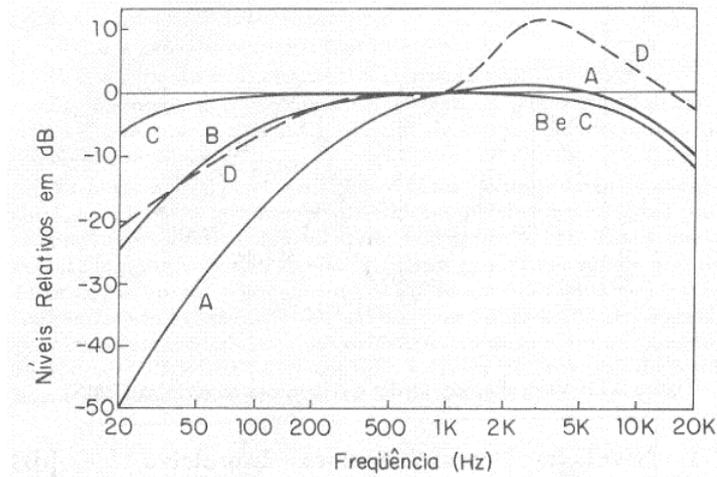


Fig. 2.3 – Curvas de ponderação (filtros) A, B, C e D [2].

2.3.6. ANÁLISE TEMPORAL

Importa agora avaliar o tempo a que as pessoas estão sujeitas ao ruído, pois as consequências serão distintas para ruídos de curta duração ou de longa duração.

A descrição de um fenómeno sonoro ao longo do tempo é feita através de um “descriptor energético” que denomina-se nível de pressão sonora contínuo equivalente L_{eq} e traduz o nível que se atuasse constante num dado intervalo de tempo, teria a mesma energia que o som que se pretende analisar [2].

A expressão que permite obter o L_{eq} em dB é dada por:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.17)$$

Existem ainda os “parâmetros estatísticos” associados a quantis de densidade de probabilidade. Neste grupo está inserido o L_N que se define como sendo o nível que é excedido N% da duração temporal do intervalo em estudo. Por exemplo, o L_{50} representa uma mediana, enquanto L_{eq} é uma média [2].

2.4. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

2.4.1. INTRODUÇÃO

A acústica de edifícios é uma área de estudo da engenharia que se ocupa do som e do ruído num certo ambiente bem como os meios necessários para dissipar ou eliminar o ruído. As duas formas de atuação mais utilizadas são a correção acústica e o isolamento sonoro [2].

A presente dissertação tem como foco o primeiro tipo de atuação, uma vez que se pretende fazer o controle do ruído no local onde este é emitido e onde estarão situadas as placas de revestimento em multicamada a desenvolver neste trabalho.

Durante muitos anos o conceito de conforto na construção esteve mais associado ao bom desempenho térmico das habitações, e mais tarde, a correção acústica e o isolamento sonoro surgiram como um complemento devido às preocupações de bem-estar associadas ao aumento dos níveis de poluição sonora.

Já é sabido que o desconforto acústico interfere no uso eficiente das capacidades humanas e conseqüentemente no nível de produtividade das atividades. Assim sendo, há uma enorme preocupação de caráter preventivo e/ou reativo face a proteção acústica dos edifícios e a segurança dos trabalhadores envolvidos em ofícios mais ruidosos.

Assuntos que envolvem questões acústicas são muitas vezes ignorados durante os estudos prévios das construções, levando ao surgimento e/ou constatação de problemas durante a fase de utilização e muitas vezes esses problemas já apresentam complicações com elevada dificuldade de resolução, restringindo as formas de atuação sobre a edificação [10].

A implementação legal da acústica de edifícios em Portugal já tem mais de 30 anos com a sucessão das seguintes publicações: DL 251/87, DL 129/2002 e DL 96/2008 [10].

Apesar das normas e regulamentos acústicos (RGR e RRAE) estabelecerem exigências mínimas de conforto acústicos para os edifícios, é aconselhável que se continue com o objetivo de assegurar boas condições acústicas, tanto em edifícios novos como reabilitados, para que o nível de desempenho sirva de informação relevante para futuros utilizadores ou compradores do imóvel. Além disso, os usuários das habitações têm sido cada vez mais rigorosos em relação ao comportamento acústico desejado nos seus lares e locais de trabalho [11].

Então, para além da construção nova, a acústica de edifícios deveria estar mais presente nos projetos de reabilitação dos edifícios antigos, uma vez que estes não foram concebidos tendo em atenção as atuais exigências acústicas. A fundamentação da necessidade do cumprimento dos requisitos acústicos

para esses casos é feita com base em caracterização experimental das condições existentes ou recorrendo à programas de cálculo com respetiva verificação final, permitindo obter resultados conclusivos [11].

Neste trabalho, a caracterização do comportamento acústico será avaliada através de parâmetros como o tempo de reverberação e o coeficiente de absorção sonora. Adiante serão esclarecidos os seus conceitos e meios de obtenção dos mesmos, bem como, tipos de materiais que facilitam o alcance de bons resultados para os parâmetros mencionados.

2.4.2. ABSORÇÃO SONORA

2.4.2.1 Definição

O fenómeno associado à transformação de uma parte da energia sonora incidente sobre um material, em qualquer outro tipo de energia é a absorção sonora [2].

O controlo do ruído num determinado ambiente depende da capacidade que os materiais do revestimento do local possuem para dissipar a energia sonora. A esta capacidade de absorção dá-se o nome de coeficiente de absorção sonora (α) e depende de várias propriedades físicas dos materiais como estrutura, densidade, porosidade e outras [8].

A formulação matemática do coeficiente de absorção sonora é dada pela razão entre a quantidade de energia absorvida por um certo material e a energia incidente sobre o mesmo [2].

$$\alpha = \frac{E \text{ absorvida}}{E \text{ incidente}} \quad (2.18)$$

Os valores do coeficiente de absorção sonora estão compreendidos entre 0 e 1, sendo que para um $\alpha > 0,5$, o material já é considerado absorvente.

Define-se ainda o coeficiente de redução sonora (NRC), como sendo a média aritmética dos valores dos coeficientes de absorção sonora nas bandas de oitava com frequências compreendidas entre os 250 e os 2000 Hz.

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.19)$$

Segundo a norma EN ISO 11654, há um outro parâmetro médio designado por α_w que é obtido por um ajuste ponderado de uma curva de referência em bandas de oitava entre os 250 e os 4000 Hz. É feito o traçado da curva dos valores de α por banda e determina-se a soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel e os valores reais. O valor de α_w é obtido por leitura para os 500 Hz na

curva ajustada com a soma dos desvios positivos inferior a 0,10, mas com o máximo valor possível (múltiplos de 0,05). Quando o coeficiente de absorção ultrapassa o valor de referência em 0,25 ou mais, usam-se indicadores de forma entre parênteses (L- *low*, M- *medium* ou H- *high*) caso surjam nos intervalos de frequências 250-500, 1000-2000, ou 2000-4000 respectivamente [2].

2.4.2.2 Avaliação do coeficiente de absorção sonora

c) Método do tubo de ondas estacionárias

O tubo de ondas estacionárias ou tudo de Kundt (Figura 2.4) é metálico e possui uma extremidade onde é colocada a amostra de 5 cm de raio a ensaiar e outra extremidade que possui um altifalante. Este pequeno altifalante possui um orifício perfurado no meio do magneto, onde passa uma vareta metálica que liga a um microfone que desliza sobre rodas num recipiente. A criação de ondas estacionárias dá-se com a ligação do microfone, devido à interação da onda incidente com a onda refletida da amostra. A absorção sonora do material é deduzida a partir da forma da onda obtida [2].

Um método melhorado é o do tubo de impedância que é composto por uma parede metálica, é desmontável e divide-se em cerca de três segmentos: amplificador, fonte sonora e os microfones (dois) [12].



Fig. 2.4 – Exemplo de tudo de Kundt [13]

d) Método da câmara reverberante

Uma câmara reverberante é uma sala fechada (apenas possui porta acústica) e é feita de paredes espessas de betão, planas e não paralelas. Devido às paredes com baixa absorção sonora, as ondas

sonoras são refletidas e isso gera um campo reverberante. A estrutura da câmara reverberante é construída sobre amortecedores [14].

A dimensão das amostras a serem utilizadas neste ensaio (10 a 12 m²) são significativamente maiores em relação às que são utilizadas no método do tudo de Kundt (amostra circular de 5 cm de raio). Após medição do tempo de reverberação com a amostra colocada no solo, faz-se a medição sem amostra e compara-se com o resultado anterior. Recorrendo à “fórmula de Sabine” obtém-se o coeficiente de absorção sonora do material em estudo para cada banda de frequências. Este método é regido pela EN ISO 354 [2].

Sabe-se que a distribuição das ondas sonoras em espaços fechados é alargada e com ângulos imprevisíveis, por isso, como precaução, exige-se que as ondas se distribuam o mais uniforme possível. Se a intensidade sonora for independente da localização espacial, diz-se a distribuição do som é em campo difuso. Numa câmara reverberante, o campo sonoro deve ser difuso ou o mais semelhante a este e para isso são usados difusores suspensos ou rotativos (Figura 2.5) [4], [14].

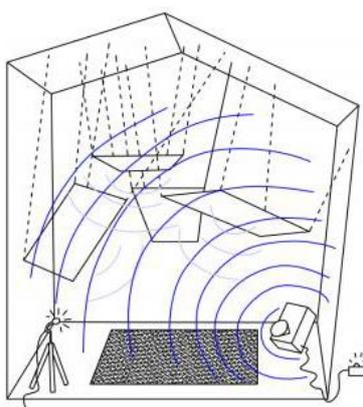


Fig. 2.5 – Exemplo de ensaio (determinação do α) em câmara reverberante com amostra sobre o piso. [2]

O método da câmara reverberante é mais eficaz que o do tudo de Kundt porque este só faz o estudo para ondas incidentes perpendicularmente à amostra, enquanto na câmara reverberante o som atinge a amostra de todos os ângulos devido ao campo difuso existente [2].

2.4.3. REVERBERAÇÃO

Se se considerar uma sala com uma fonte sonora a emitir som continuamente, cria-se um campo sonoro com fenómenos de reflexões sonoras. Quando se desliga a fonte sonora, o som da sala demora um certo tempo a dissipar-se por completo e a este fenómeno dá-se o nome de Reverberação [4].

O Tempo de Reverberação é o intervalo de tempo que o som demora a desaparecer na sua totalidade e mede-se em segundos (s). É por definição, o tempo que o nível de pressão sonora demora a reduzir 60 dB a partir do instante em que a fonte sonora emitiu o som (Figura 2.6) [2].

Na prática, é difícil medir diretamente o decaimento dos 60 dB devido ao ruído de fundo que se sobrepõe ao som emitido pela fonte sonora. Nestes casos, obtém-se o decaimento para 20 ou 30 dB e determina-se o tempo de reverberação por extrapolação obtendo-se valores de TR20 ou TR30 [2].

Este conceito de extrapolação é válido porque num meio completamente difuso, o decaimento é linear [4].

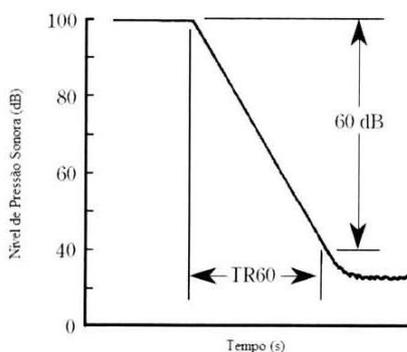


Fig. 2.6 – Definição do tempo de reverberação TR. Adaptado de [5]

O tempo de reverberação é determinado recorrendo ao uso de uma fonte sonora com energia potente para que o decaimento esteja acima do ruído de fundo. Os altifalantes, pistolas de pólvora seca, balões, etc, são exemplos de algumas fontes sonoras [2].

Após a emissão procede-se a medição do decaimento do rasto sonoro. Normalmente esta medição é feita com um sonómetro (Figura 2.7).



Fig. 2.7 – Exemplo de sonómetros da marca Brüel & Kjær [15]

O tempo de reverberação é importante porque tem efeitos significativos para valores relativamente altos. Um dos efeitos desagradáveis é o facto de haver sobreposição de sons refletidos sobre o som direto, provocando redundâncias. Por outro lado, o tempo de reverberação é benéfico em casos em que se pretende aumentar o nível sonoro para facilitar a audição do som [2].

Analicamente, o tempo de reverberação é previsível pela “fórmula de Sabine”, nome este que foi dado em honra do seu criador Wallace Clemente Sabine.

$$TR = \frac{0,16.V}{A} \quad (2.20)$$

Em que:

TR- Tempo de reverberação (s);

V- Volume do compartimento (m³);

A- Absorção sonora equivalente (m²).

A absorção sonora equivalente pode ser dada por:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (2.21)$$

α_i - Coeficiente de absorção sonora do material (adimensional);

S_i - Superfície real do material (m²).

A fórmula de Sabine tem uma boa precisão em lugares com campos sonoros difusos e com coeficientes de absorção sonora média inferior a 0,20. Para situações distintas da mencionada, existem outras fórmulas de previsão, mas no contexto atual será utilizada a “fórmula de Sabine”.

2.4.4. MECANISMOS DE ABSORÇÃO SONORA

2.4.4.1. Porosos e Fibrosos

Os materiais porosos e fibrosos são os que possuem grande potencial para serem usados em aplicações de absorção sonora. Estes materiais são mais eficientes nas altas frequências e o seu mecanismo de absorção sonora consiste na existência de poros e intervalos entre ligações dos materiais. Estes poros e interstícios são os responsáveis pela dissipação da energia no seu interior (Figura 2.8) [2].

Os materiais fibrosos possuem a capacidade de transferir parte da energia incidente ao movimento das fibras que resistem por fricção entre elas (Figura 2.8). É necessário que as fibras não sejam muito concentradas para não impedir a penetração do som no material [2].

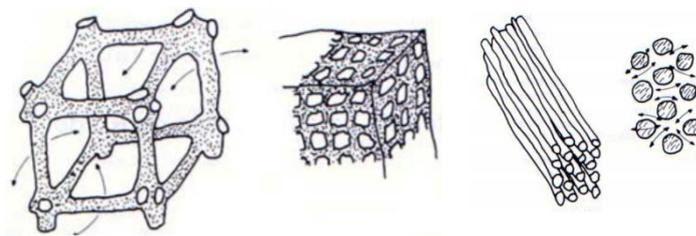


Fig. 2.8 – Exemplo da interação dos poros e das fibras, representando a dissipação da energia através deles [16].

Os materiais porosos e fibrosos estão inseridos nos seguintes grupos:

- Tecidos e alcatifas;
- Massas porosas;
- Aglomerados de fibras de madeira;
- Fibras minerais (mantas e painéis);
- Materiais plásticos como espumas (XPS, EPS, etc);
- Aglomerados de cortiça.

Neste grupo, estão inseridos os aglomerados de cortiça que são o principal objeto de estudo neste trabalho.

2.4.4.2. Ressonadores

Os ressoadores ou ressoadores de Helmholtz possuem um volume de ar (V) dentro de uma cavidade que interage com o ar do ambiente através de uma pequena abertura (S) (Figura 2.9). Estes elementos são agrupados e constituídos normalmente por painéis perfurados e por uma caixa de ar vazia, e são geralmente mais eficazes em frequências médias (entre 400 e os 1000 Hz) [2], [17].

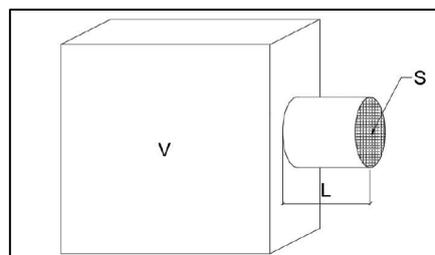


Fig. 2.9 – Esquema da cavidade de um ressoador de Helmholtz [18].

Onde,

S - Secção de abertura do orifício;

L - Comprimento do gargalo;

V – Volume da cavidade;

Nestes elementos ressoadores pode se variar as espessuras e a taxa de furação. [2] Essa característica “moldável” pode ser utilizada como uma possível aplicação em combinação com os materiais porosos e fibrosos mencionados anteriormente.

2.4.4.3. Membranas

Outra classe de mecanismos de absorção sonora são as membranas ou painéis vibrantes. Este mecanismo é composto por material flexível de espessura reduzida, capaz de dissipar a energia sonora incidente através da vibração da sua estrutura [2].

As membranas são eficientes na absorção em baixas frequências e são constituídas por uma placa flexível e uma base de suporte vertical ou horizontal, separadas através de uma ligação de apoio (Figura 2.10). No espaço entre a membrana e a placa de suporte pode haver um material absorvente, se desejado, para favorecer à absorção [2], [19].

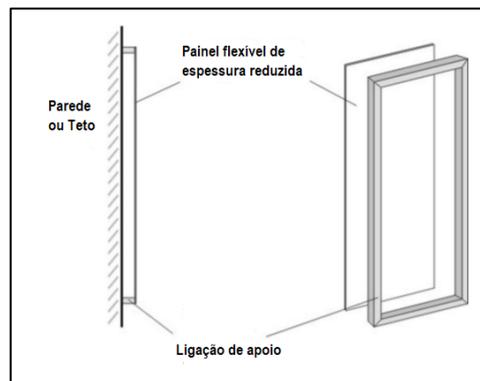


Fig. 2.10 – Exemplo de mecanismo de absorção do tipo membrana. Adaptado de [16].

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}} \quad (2.22)$$

em que:

c – velocidade de propagação do som no ar, em m/s;

ρ – massa volúmica do ar, em Kg/m³;

m – massa superficial do painel, em Kg/m²;

d – espessura da caixa de ar, em m.

Porém, para o trabalho em causa este tipo de mecanismo não será objeto de estudo.

ESTADO DA ARTE

3.1. INTRODUÇÃO

Pretende-se reunir informações já existentes que sirvam de base para a materialização dos painéis a desenvolver neste trabalho.

Neste capítulo importa contextualizar a evolução histórica da acústica e dos usos da cortiça, bem como as características que podem tornar a cortiça um material absorvente sonoro. Apresenta-se uma breve listagem de alguns materiais que têm sido utilizados na indústria da construção por possuírem características de absorção sonora, para que sejam selecionados os materiais que irão constituir as amostras dos painéis em multicamada a serem ensaiados posteriormente no âmbito deste trabalho.

3.2. BREVE EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA ACÚSTICA

A fundamentação da Acústica está assente na produção do som, a propagação do som no meio e a sua receção.

O estudo do som iniciou-se na antiga Grécia, onde Pitágoras começou a fazer experimentações relacionadas com a vibração das cordas esticadas no século VI a.C. Já no século IV a.C., Aristóteles buscou explicar que o som era uma espécie de movimentação do ar produzida por uma fonte sonora.

No século XVI, Robert Boyle deu continuidade a um estudo iniciado por Athanasius Kircher e Otto von Guericke, chegando à conclusão de que o som não se propagava no vácuo, mas através do ar. Também deduziu que existiam outros meios de transmissão do som. Mais tarde, durante a época do renascimento, Leonardo da Vinci verificou que a velocidade do som era finita, observando o fenómeno do eco, porém foi Martin Mersenne que conseguiu calcular a velocidade do som com base no tempo de retorno do eco [20], [21]. Por volta do século XVII, Galileu Galilei efetuou estudos sobre o movimento oscilatório. Ainda neste século, a acústica como ciência dos sons teve o seu nome definido por Joseph Sauveur [22].

A maior parte dos primeiros trabalhos efetuados sobre a análise das ondas sonoras aconteceram durante o século XIX depois da definição do teorema de Fourier definido por Joseph Fourier. Jean Baptiste Biot realizou experiências para definir a velocidade de propagação do som num sólido e Augusto Kundt procedeu a mesma medição, mas no ar e em outros diversos gases. Devido a todos esses desenvolvimentos, surgiram instrumentos de medição, amplificação e transmissão do som como a sirene, o microfone, o fonógrafo, o telefone, entre outros. Posteriormente, Hermann von Helmholtz procedeu à avaliação do meio recetor (ouvido humano) e como resultado o seu nome foi dado aos ressoadores, hoje conhecidos como ressoadores de Helmholtz [20], [23].

John Rayleigh publicou a obra *The Theory of Sound*, contendo temas relacionados com ressonância, propagação das ondas e vibrações. Heinrich Hertz descobriu o efeito fotoelétrico e o seu nome é utilizado como unidade de frequência pelo seu contributo para a teoria das ondas eletromagnéticas [22], [23].

Na transição do século XIX para o século XX, Wallace Sabine assume o título de “pai da acústica arquitetónica” devido aos seus estudos e projetos de salas para concertos musicais, declaradas como das melhores já feitas. Foi este projeto que lhe permitiu descobrir a hoje denominada “fórmula de Sabine” utilizada para calcular o tempo de reverberação [20], [23].

Desde então, pesquisas relacionadas a parâmetros acústicos continuaram a ser efetuadas e hoje existem as bases necessárias para realizar projetos inovadores nesta área.

3.3. A CORTIÇA NA CONSTRUÇÃO

3.3.1. BREVE INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Há indícios de que o sobreiro já existia durante a formação da bacia do mediterrâneo, ou seja, há cerca de 60 milhões de anos. Mais tarde surgiu a era glacial que acabou por extinguir grande parte das espécies existentes, porém, o sobreiro resistiu devido às características térmicas da sua casca (cortiça) que lhe conferiu proteção [24].

O aparecimento do sobreiro em Portugal determinou-se pela descoberta de um fragmento de cortiça encontrado na bacia do Tejo, datado de há cerca de 10 milhões de anos atrás. Adiante, no antigo Egito e na Pérsia (≈ 3000 a.C.), a cortiça era utilizada em utensílios domésticos, de pesca e sobretudo na vedação de vasilhas e barris [22]. No século IV a.C., os romanos usavam palmilhas de cortiça para o calçado e já era um material aplicado em telhados como isolante térmico [24].

Durante o século XIII, na era de D. Dinis, surgiram as primeiras leis para a proteção do sobreiro e da azinheira. Mais à frente, nos séculos XV e XVI, a cortiça foi utilizada em naus e caravelas que os portugueses usaram para navegar pelo mundo. Os Romanos já usavam a cortiça como um vedante para as garrafas de vinho e, posteriormente, a indústria da rolha de cortiça expande a sua fabricação na Europa [24].

A cortiça foi introduzida em muitos equipamentos militares durante a II Guerra Mundial. E em seguida passou a ser introduzida em correias de transmissão e pneus, já nos anos de 1990 [24].

Hoje em dia, a cortiça está presente no setor da construção, aeronáutica, aeroespacial, em indústrias de automóvel, de moda, decoração e outras, permitindo a inovação nessas áreas e dando respostas aos requisitos exigidos [24], [25].

3.3.2. CARATERÍSTICAS DA CORTIÇA

Ao invólucro do sobreiro dá-se o nome de cortiça (Figuras 3.1 e 3.2). Essa casca é totalmente natural e regenera-se com o tempo. A sua estrutura microscópica tem a forma de um prisma e se assemelha à uma colmeia [24], [25].

A sua extração não prejudica o desenvolvimento da espécie. Toda a cortiça extraída é aproveitada na sua totalidade por transformação. Quando esta já não serve para o fim destinado pode ser reciclada através de um processo de trituração e assim, retorna à fase de produção de aglomerados de cortiça ou serve como combustível (pó de cortiça) [25].

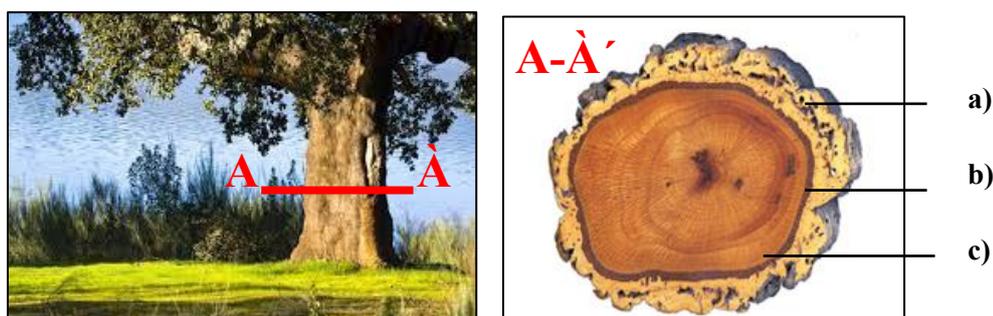


Fig. 3.1 – (Esq.) Sobreiro e representação do corte A-A' feito para esclarecimento da figura 3.2. Adaptado de [26].

Fig. 3.2 – (Dir.) Sobreiro e sua constituição em camadas: a) lenho, b) entrecasca e c) cortiça. Adaptado de [24].

A cortiça é quimicamente composta por:

- 45% Suberina;
- 27% Lenhina;
- 12% Polissacáridos;
- 6% Taninos;
- 6% Ceróides;
- 4 % Outros.

A suberina é um dos componentes principais responsável pelas boas propriedades da cortiça, uma vez que é uma espécie de “cera natural” que envolve as paredes das células da cortiça e a torna impermeável e insolúvel [24].

A cortiça é um material único pelas suas propriedades [24], [25]. As principais são:

- Elasticidade, compressibilidade e boa condutibilidade térmica: asseguradas pela quantidade de gás existente e que não se dissipa;
- Leveza e suavidade: Como a cortiça é composta maioritariamente por gases, é bastante leve e suave ao toque;
- Impermeabilidade aos líquidos e aos gases: característica dada pela quantidade de suberina na cortiça;
- Excelente resistência ao fogo e a altas temperaturas;
- Elevada resistência ao atrito;
- Isolante térmico e acústico;
- Hipoalergénicas.

3.3.3. AGLOMERADOS DE CORTIÇA

A cortiça pura é aquela que é utilizada na produção de rolhas. Existe ainda a cortiça aglomerada que surgiu para combater os desperdícios e dar utilidade à cortiça de qualidade inferior à desejada na produção de rolhas [27]. Os aglomerados de cortiça estão divididos em dois grupos:

- Aglomerado negro (Figura 3.3);
- Aglomerado composto (Figura 3.4).

O aglomerado negro é fabricado por aglutinação de granulados de cortiça 100% naturais e de durabilidade ilimitada. O seu processo de transformação industrial não inclui aditivos e o consumo energético para a produzir é reduzido [24]. Após a trituração, faz-se a limpeza das impurezas e depois procede-se a cozedura e por fim, são feitos os acabamentos [25].

O aglomerado composto (ou branco), surge da mistura dos granulados de cortiça com outros materiais como resina, cola, borracha, plástico, asfalto, gesso e outros, aumentando a gama de diversidade de materiais. Os passos até à limpeza são semelhantes ao caso anterior, porém a mistura neste caso é feita sob ação combinada de temperatura, pressão e agente aglutinante. Os passos seguintes são a coloração e a moldação. Quando as amostras são desmoldadas, passam por um processo de arrefecimento/estabilização e seguidamente são laminadas. Por último, faz-se a lixagem para acertar a espessura das amostras e procede-se à decoração de acordo com os diversos fins a dar ao produto. Os produtos defeituosos são rejeitados [25], [27].



Fig. 3.3 – Aglomerado negro de cortiça [25].



Fig. 3.4 – Aglomerado composto de cortiça [25].

3.4. MATERIAIS DE COMBINAÇÃO

3.4.1 MATERIAIS TRADICIONAIS

O desenvolvimento da economia e das tecnologias construtivas introduziu a inovação no setor da construção. Os diferentes tipos de materiais usados são um exemplo dessa inovação, pois existe uma variedade infinita deles e de possíveis combinações entre eles.

Apesar das particularidades associadas às preferências dos consumidores e às empresas de produção, há uma tendência de uso comum de certos materiais que se podem chamar “tradicionais”. Neste subcapítulo é apresentada uma listagem de materiais absorventes acústicos mais usados no setor da construção, uma breve caracterização geral dos mesmos e estudos feitos sobre o desempenho destes em termos de absorção sonora. Enfatiza-se o facto de que esta listagem não representa um levantamento robusto e completo, servindo apenas como orientação na escolha dos constituintes das amostras que se pretendem fabricar.

Assim sendo, os materiais absorventes sonoros mais usados fazem parte das seguintes categorias:

- Tecidos e mantas minerais;
- Fibras naturais, como a de coco;
- Madeira e seus derivados;
- Espumas e aglomerados.

Dentro do grupo dos tecidos e mantas, os materiais mais usuais são a lã de rocha e a lã de vidro. A lã de rocha provém de rochas basálticas e calcário, fundidas a temperaturas que rondam os 1500 °C. Este material pode ser produzido com várias densidades e espessuras, dependendo do grau de compactação. A relação custo-benefício da lã de rocha é muito boa devido às suas características de elevada absorção sonora, bom isolamento térmico, incombustibilidade (Euro classe A1), resistência à água, estrutura estável, não é prejudicial à saúde durante a utilização, sendo classificado como um material não cancerígeno e acima de tudo é reciclável. Um dos pontos negativos a salientar é a emissão de dióxido de carbono durante o processo de fabricação da lã de rocha e o outro é a libertação de partículas no ar se as juntas dos painéis de lã não forem isoladas com alumínio [28], [29].

A lã de vidro é feita através da mistura de sódio, sílica e resinas em fornos de alta pressão e assemelha-se à lã de rocha em termos de vantagens por ser reciclável, não é prejudicial à saúde, serve de isolamento térmico e acústico, não favorece o desenvolvimento de fungos e bactérias, é resistente ao fogo e é compressível [29].

Na categoria das fibras naturais destaca-se a fibra de coco que possui uma estrutura aleatória e muitos espaços vazios. A porosidade da fibra de coco é cerca de 0,92 e é relativamente próxima a porosidade da lã de rocha [30].

A fibra de coco é um material ecológico e reciclável, porém, devido à sua característica de resistência, não é fácil fazer os cortes nas mantas de fibra de coco com equipamentos convencionais e acrescenta-se o facto deste material ser combustível, razão pela qual é muitas vezes combinado com aglomerados de cortiça (Figura 3.5) [30].

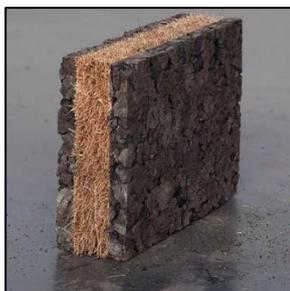


Fig. 3.5 – Aglomerado negro de cortiça combinado com fibra de coco [24].

A madeira e seus derivados são usados frequentemente no setor da construção desde os primórdios por serem de fácil acesso, manuseio e possuírem um custo relativamente baixo.

O *celenit* é um isolamento natural constituído por 65% de fibra de madeira e 35% de ligantes minerais como cimento *Portland* (Figura 3.6). Apesar das fibras passarem por vários procedimentos durante a produção, o produto final consegue manter as propriedades mecânicas da madeira. O cimento *Portland* é o responsável por garantir ao painel resistência à flexão, compressão, água e gelo. Os espaços vazios entre as fibras facilitam a redução sonora tanto na regulação (absorção) como na transmissão (isolamento). Outras vantagens deste produto estão associadas à sua durabilidade quase ilimitada, resistência ao fogo e a compatibilidade em associação com outros materiais [31].



Fig. 3.6– Estrutura de uma placa de *celenit* (fibra de madeira) [31].

Existem também os painéis acústicos de madeira que são correntemente feitos em MDF, HPL e outros, sendo necessário revestir com algum material de acabamento. Normalmente a espessura das placas é da ordem dos 16 mm e as perfurações circulares têm os diâmetros compreendidos entre 3 e 10 mm, com espaçamentos entre os eixos de 16 mm, 32 mm e 64 mm, embora em algumas situações possam ser de 10 mm e 20 mm. As perfurações têm formas variadas: circulares, quadradas, ovais, etc. Além de painéis com perfurações completas existem também painéis ranhurados (Figura 3.7) [32].

Os painéis em madeira facilitam a inserção de formas e relevo, dependendo da espessura, o que é uma vantagem a ter em conta nas exigências arquitetónicas

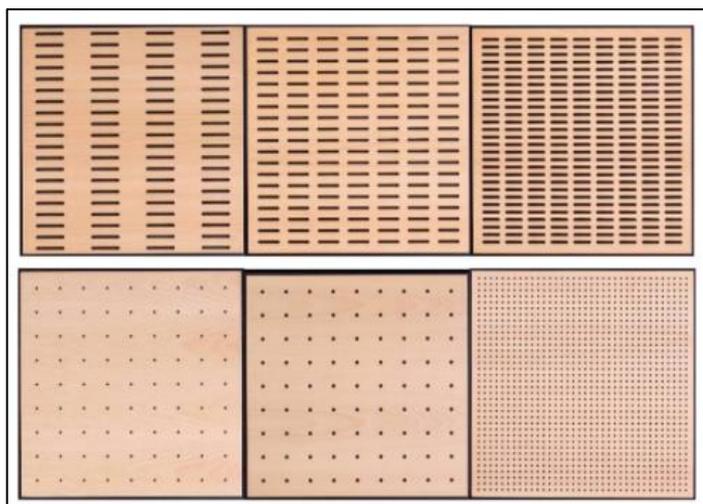


Fig. 3.7– Exemplo de painéis de madeira perfurados e ranhurados [32].

As espumas mais conhecidas são as de poliestireno expandido moldado (EPS), extrudido (XPS) e espumas rígidas de poliuretano (PUR). Os três tipos de espumas mencionados são derivados do petróleo e possuem boas características de resistência mecânica, leveza, durabilidade e não são propícios à criação de bolores. Estes materiais não podem estar sujeitos à radiação solar devido ao mau comportamento em relação ao fogo. É de realçar a capacidade que as espumas de poliuretano têm em reduzir os ruídos de percussão (impactos) [17].

3.4.2 LEVANTAMENTO DE ESTUDOS EFETUADOS

O comportamento dos materiais porosos e fibrosos está associado a um conjunto de propriedades das quais a porosidade e a resistência ao fluxo de ar, assim defendem muitos modelos de simulação, especialmente os desenvolvidos por Delany e Bazley [33], Miki-Delany-Bazley [34] Johnson [35] e Mechel [36]. Nos modelos definidos em [33] e [34] são realizadas análises a um conjunto de materiais absorventes, onde se mediram a impedância e o coeficiente de propagação do som dos materiais, valores esses normalizados a partir da sua relação com a razão entre a frequência e a resistência ao fluxo de ar. No final o coeficiente de absorção sonora foi estimado de acordo com a espessura dos diversos materiais em causa.

Apresentam-se os gráficos com os coeficientes de absorção de camadas de material com material absorvente sonoro de 2,5 e 5 cm de espessura, e para cada uma delas fez-se variar a resistência ao fluxo do material (Figura 3.8)

Concluiu-se também que o tamanho da fibra e a densidade aparente são os principais fatores que têm influência significativa na resistência ao fluxo dos materiais fibrosos, e pode dizer-se que para uma certa espessura de material fibroso, a relação entre a densidade aparente e a resistência ao fluxo se aproxima muito de uma lei de exponencial. De um modo geral, para a mesma espessura de material, quanto maior a resistência ao fluxo, maior a absorção.

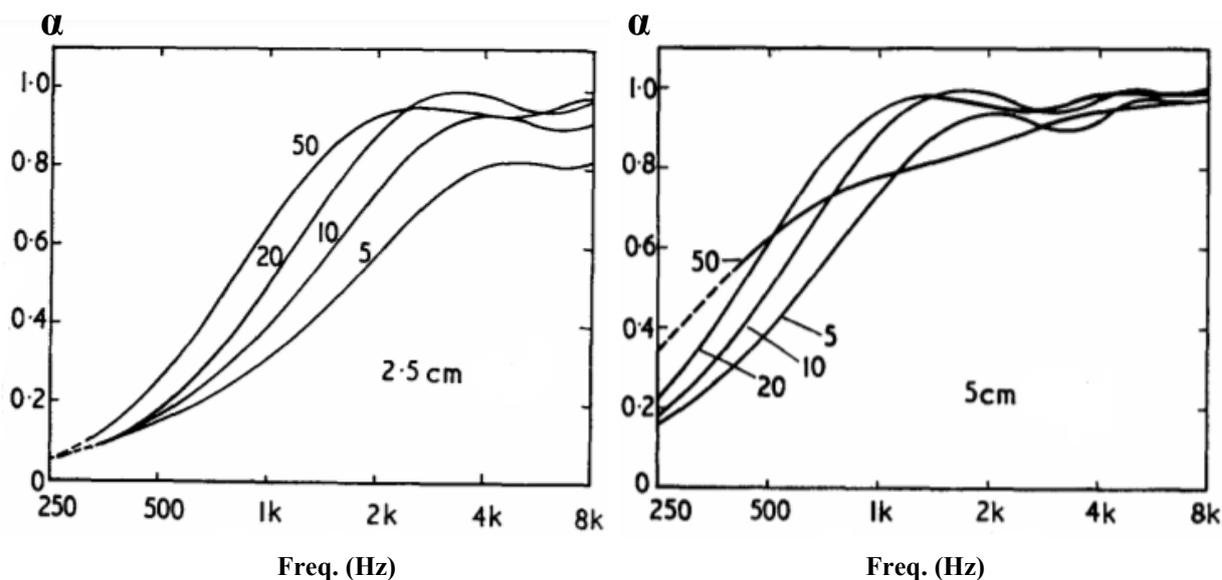


Fig. 3.8 - Coeficiente de absorção para energia de incidência normal de uma camada de material fibroso com 2,5 cm e 5,0 cm de espessura [33].

Mechel [36] assumiu que de acordo com a gama de frequências (baixas, médias e altas), as expressões matemáticas deveriam ser distintas para cada um dos casos, complementando o estudo feito por Delany e Bazley.

Dos modelos mencionados anteriormente, o de Johnson é o mais complexo por exigir uma quantidade elevada de variáveis para que seja possível determinar o coeficiente de absorção sonora. Aos parâmetros já mencionados (por exemplo: porosidade e resistência ao fluxo do ar) são acrescentados outros que caracterizam os poros do material: *characteristic viscous length* e *characteristic thermal length* e ainda a espessura e a tortuosidade [35], [37] Existem ainda outros modelos analíticos (Quadro3.1), contudo, o presente trabalho baseia-se numa aplicação mais prática.

Quadro 3.1 – Alguns modelos de cálculo de impedância e seus respectivos parâmetros. Adaptado de [38]

Modelo	Número de parâmetros	Parâmetros
Delany e Bazley [33], [38]	1	Resistência ao fluxo efetivo
Porosidade variável [38], [39]	2	Resistência ao fluxo efetivo e taxa de variação da porosidade com a profundidade
Zwikker e Kosten [38], [39], [40]	3	Resistência ao fluxo, porosidade e fator de estrutura fenomenológico
Veronina [38]	3	Dimensão média dos grãos, número de grãos por unidade de volume e densidade dos grãos.
Attenborough [38], [40]	4	Resistência ao fluxo, porosidade, tortuosidade e fator de forma dos poros
Johnson/Allard/Umnova [35], [37], [38], [41], [42], [43]	4	Resistência ao fluxo, porosidade, tortuosidade e comprimento característico viscoso
Johnson/ Allard [35], [37], [38], [41], [42], [43]	5	Resistência ao fluxo, porosidade, tortuosidade, viscosidade e comprimentos caraterísticos térmicos
Johnson/ Alaard/ Lafarge [35], [37], [38], [41], [42], [43]	6	Resistência ao fluxo, porosidade, tortuosidade, comprimentos caraterísticos térmicos e viscosos e permeabilidade térmica
Johnson/Allard/ Pride [35], [37], [38], [41], [42], [43]	7	Resistência ao fluxo, porosidade, tortuosidade, comprimentos caraterísticos térmicos e viscosos, permeabilidade térmica e fator de correção de baixa frequência

Dentro dos materiais fibrosos, a fibra de coco tem sido alvo de curiosidade e já aparece em muitos estudos efetuados, nomeadamente na análise de Fouladi *et al.* [44]. e no modelo incrementado por Ramis *et al.* [45]. Fouladi *et al.*, analisaram dois tipos de fibra de coco, uma delas é de material fresco e a outra é industrializada e com adição de aglutinante. Neste estudo também se fazem presentes as teorias dos modelos analíticos de Delany e Bazley, mencionados anteriormente, e de Biot e Allard. No final, através de ensaios feitos com recurso ao tubo de ondas estacionárias, concluiu-se que a fibra de coco fresco (20 mm de espessura) teve um coeficiente de absorção sonora médio de 0,8 nos 1360 Hz e que à medida que se aumenta a espessura, a absorção sonora nas frequências mais baixas é melhorada (Figura 3.9). De acordo com os resultados, também foi possível verificar que o modelo de Delany e Bazley serviu para analisar ambos os tipos de fibra, enquanto o método de Biot e Allard apenas se mostrou relevante na análise da fibra industrializada [44].

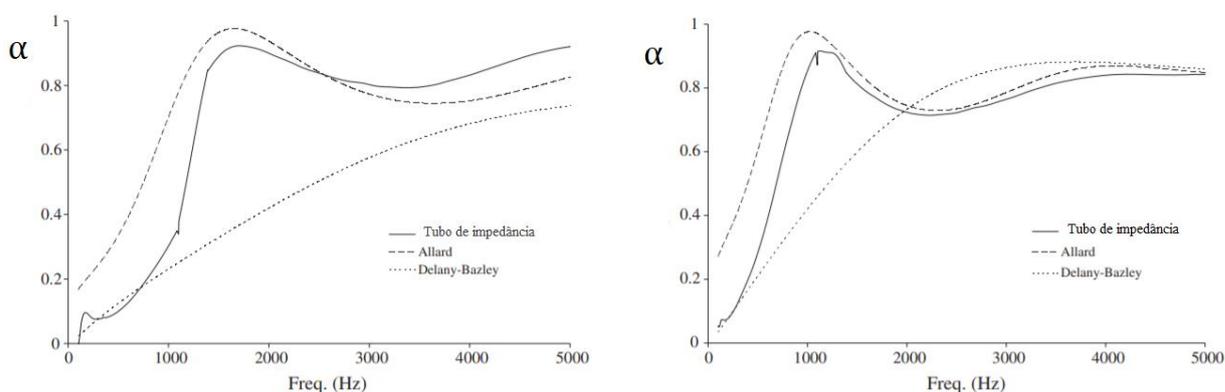


Fig. 3.9 – Coeficiente de absorção sonora da fibra de coco natural, em função da frequência, para uma espessura de 20 mm (esquerda) e de 30 mm (direita). Adaptado de [44]

Silva *et al.* [46] *apud* [47] comparam sistemas em multicamada (painéis sanduíches) de fibra de coco e espuma “acústica”, constatando que a adição da espuma teve impacto no acréscimo significativo de absorção sonora. (Quadro 3.2). Também é possível notar que a posição da espuma face à fibra de coco influencia o resultado, sendo que a melhor solução obtida consistiu na colocação da espuma (não especificada) em cima da fibra de coco.

Quadro 3.2 – Valores dos coeficientes de absorção sonora máximos obtidos para os diversos sistemas multicamada compostos por fibra de coco e espuma “acústica”. Adaptado de [47]

Sistema	Materiais absorventes do sistema	Coeficiente de absorção sonora máximo	Frequência de leitura (Hz)
I	Fibra de coco (e=4 cm)	0,74	1700
II	Espuma (e=0,3 cm) Fibra de coco (e=4 cm)	0,91	1480
III	Fibra de coco (e=4 cm) Espuma (e=0,3 cm)	0,78	1660
IV	Espuma (e=0,3 cm) Fibra de coco (e=4 cm) Espuma (e=0,3 cm)	0,93	1400

Outro estudo de Flouladi *et al.* [48] assente em sistemas multicamada de fibra de coco com painéis perfurados, permitiu mostrar que a percentagem de aberturas condiciona a capacidade de absorção em baixas frequências, principalmente se o painel perfurado estiver à frente do sistema de fibra de coco e não entre a fibra de coco e a caixa de ar. É possível verificar a relação das duas condições extremas de 20% e 1% de perfuração para os dois casos estudados (Figura 3.10).

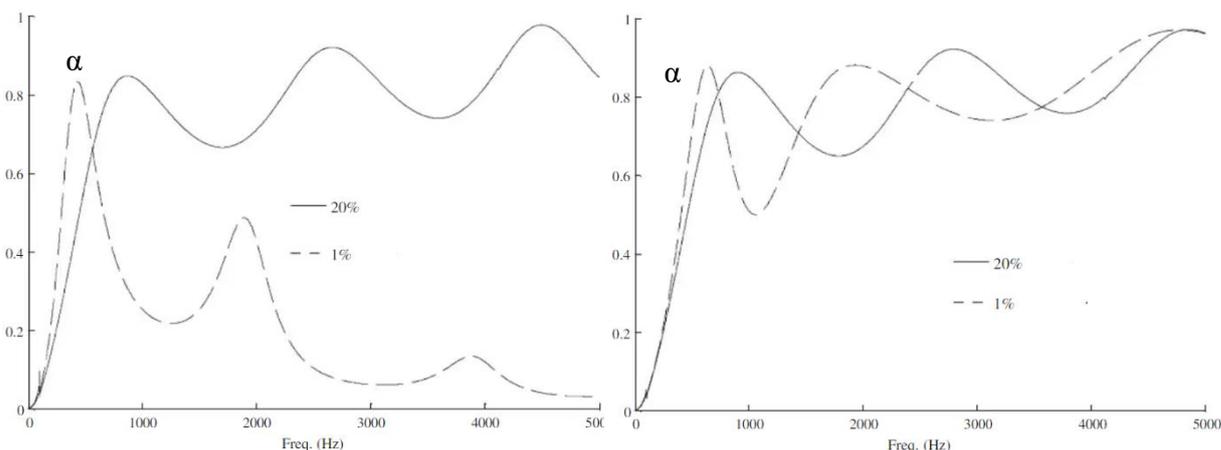


Fig. 3.10 - Coeficiente de absorção sonora de um sistema com placa perfurada colocada antes da fibra de coco (50 mm) e da caixa de ar (35 mm) com 1% e 20% de perfuração (esq.) e quando a mesma placa perfurada é colocada entre a fibra de coco (50 mm) e caixa de ar (35 mm) com 1 e 20% de perfuração (dir.) [48].

Em 2020, O Grupo Amorim e o Politécnico de Milão desenvolveram uma pesquisa sobre painéis de compósitos de madeira e cortiça. O principal objetivo foi a criação de superfícies absorventes, difusivas e híbridas utilizando um algoritmo multi-escalar que permite desenvolver superfícies acústicas com geometrias complexas (figura 3.11). As capacidades de absorção, difusão e reflexão dependiam da geometria e do material aplicado no tratamento da superfície responsável por cada uma dessas três propriedades (figura 3.12). Tentou-se compreender a influência das variações de espessura da camada, perfuração e profundidade da cavidade de ar e no final valida-se a otimização do desempenho para a combinação da cortiça e da madeira [49]. Porém o modelo analítico é complicado e a sua validade restringe-se à existência de todas as parcelas (absorção, difusão e reflexão), enquanto no presente projeto pretende-se focar numa solução cuja propriedade mais importante é a capacidade de absorção sonora.

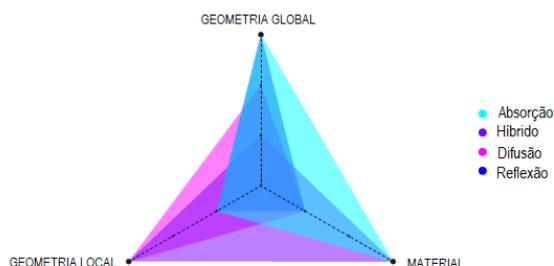


Fig. 3.11 – Geometria de painéis com superfícies absorventes, difusas, refletoras e híbridas que remetem para um desempenho acústico completo. Adaptado de [49].



Fig. 3.12 – Exemplo de uma das amostras em aglomerado negro de cortiça e madeira, que foi utilizada para avaliar a influência da geometria e do material em relação as propriedades híbridas, refletoras, absorventes e difusas [49].

Patraquim [32] mostrou que os sistemas de painéis de madeira perfurados funcionam como uma grelha de múltiplos ressoadores e que para além desses painéis serem visualmente atrativos, dão margem para variar as formas, profundidades e dimensões das perfurações, gerando uma infinidade de alternativas. Verificou-se que uma maior área de perfuração (entre 19,5 e 20%) permitia absorver melhor nas frequências médias e altas, comparando com os painéis cuja taxa variava de 4,4 a 11,8% (Figura 3.13). Além disso, a espessura da caixa de ar, o material absorvente que lá se encontra e o posicionamento que ocupa junto ao painel perfurado ou ao painel rígido, constituem um parâmetro pertinente [50].

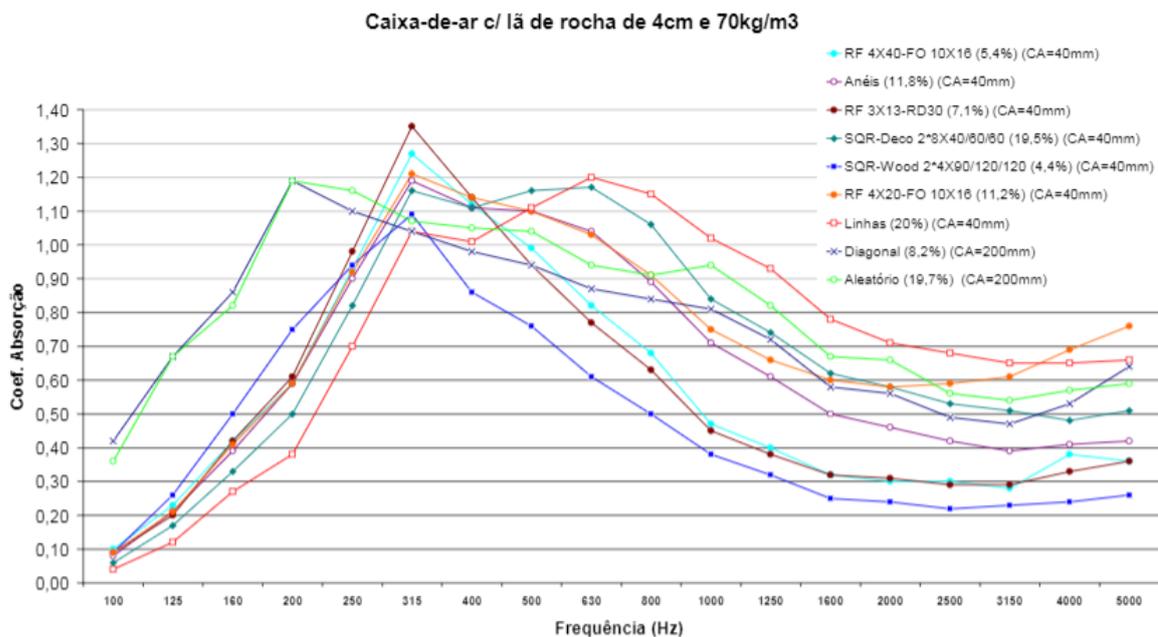


Fig. 3.13 – Coeficiente de absorção sonora em função da frequência para todos os painéis perfurados estudados por Patraquim [32].

Também tem sido recorrente a substituição de material tradicional por aglomerados reciclados de vários materiais. A comparação do desempenho térmico e acústico de amostras recicladas de resíduos têxteis e de espumas com amostras de referência, nomeadamente o poliuretano, lã de rocha e *basotect*, revelou que todas as amostras recicladas apresentavam valores de coeficientes de absorção sonora próximos dos materiais tradicionais e o desempenho térmico em alguns casos foi melhor que o esperado. Deste modo, é promissor apostar em aproveitamento de resíduos para criação de materiais absorventes sonoros [51].

Oldham *et al.* [52] selecionam uma gama de materiais em forma de fibras orgânicas e de materiais não fibrosos (junco) e exploraram a capacidade de absorção de cada um deles em câmara reverberante (para os não fibrosos) e no tubo de impedância (para os fibrosos). Os resultados mostraram a eficácia de algumas fibras como absorventes (Quadro 3.3). Também foi validada a utilização de materiais em forma de canudos ou palhetas, posicionados de forma distinta (Figura 3.11) para absorção em baixas frequências. Quando foram combinados os materiais fibrosos com os materiais em forma de canudos (sistema multicamada) constatou-se um excelente desempenho ao nível de toda a gama de frequências, com o valor máximo do coeficiente de absorção sonora de 1,0 obtido para os 500 Hz (Quadro 3.3).

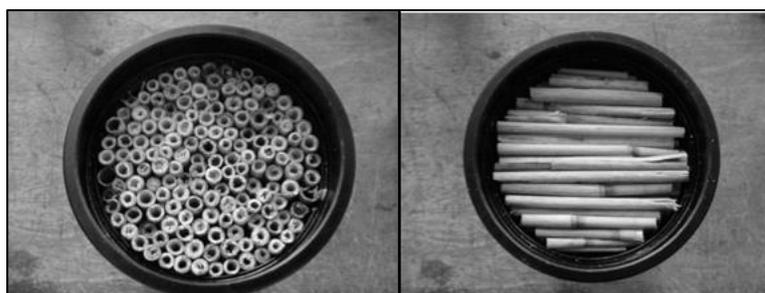


Fig. 3.14 – Posicionamento de amostras de junco para ensaio longitudinal e transversal, respetivamente [52].

Quadro 3.3 – Valores dos coeficientes de absorção sonora de sistemas multicamada constituídos por junco e cânhamo e para materiais fibrosos como algodão, lã, cânhamo, fibra de madeira, juta, linho, rami e sisal, lidos para uma frequência de 500 Hz. Os materiais fibrosos foram ensaiados em tubo de ondas estacionárias e os não fibrosos em câmara reverberante. Adaptado de [52].

Materiais	Coefficiente de absorção sonora para $f=500$ Hz
Sistemas multicamada	
Junco (5 cm) + Cânhamo (7 cm)	1,00
Junco (10 cm) + Cânhamo (7 cm)	1,00

Quadro 3.3 (Continuação) – Valores dos coeficientes de absorção sonora de sistemas multicamada constituídos por junco e cânhamo e para materiais fibrosos como algodão, lã, cânhamo, fibra de madeira, juta, linho, rami e sisal, lidos para uma frequência de 500 Hz. Os materiais fibrosos foram ensaiados em tubo de ondas estacionárias e os não fibrosos em câmara reverberante. Adaptado de [52]

Materiais	Coeficiente de absorção sonora para f=500 Hz
Não fibrosos	
Junco (15 cm) conf. longitudinal	0,98
Junco (5 cm) conf. transversal	0,85
Fibrosos	
Algodão	0,75
Chumaços de lã	0,35
Chumaços de cânhamo	0,45
Fibra de madeira	0,22
Juta (fibra têxtil vegetal)	0,30
Linho (planta herbácea cuja semente é a linhaça)	0,62
Rami (erva da China)	0,65
Sisal (planta de origem mexicana)	0,05

Dos estudos apresentados neste subcapítulo, algumas informações foram relevantes para a criação dos sistemas propostos, nomeadamente:

- Seleção de materiais: aglomerado composto de cortiça, aglomerado negro de cortiça, fibra de coco, fibra de madeira, espuma de poliuretano e MDF;
- Posicionamento dos materiais absorventes dentro da caixa de ar: sugere-se que os materiais porosos sejam posicionados em frente (por cima) dos materiais fibrosos;
- Uso de sistema ressonante: painéis perfurados associados à uma caixa de ar absorvem melhor em médias e altas frequências;
- Taxa de perfuração: valores entre 15 e 20% de perfuração apresentam melhores resultados, comparativamente à taxas mais baixas.

4

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

4.1. CRITÉRIOS DE ABORDAGEM

O procedimento adotado para a criação de revestimentos de parede com boa absorção sonora (Figura 4.1) consistiu previamente na escolha e caracterização dos sistemas construtivos, tanto em termos de dimensões como do tipo de painel principal e material existente na caixa de ar.

O método experimental utilizado, consistiu na avaliação de várias amostras produzidas pela empresa corticeira, após uma investigação assente em materiais já inseridos no mercado.

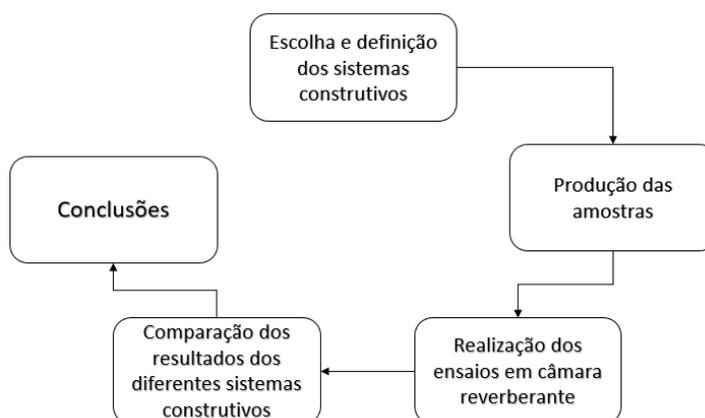


Fig. 4.1 – Esquema representativo dos procedimentos necessários para materializar a metodologia experimental.

Os diversos sistemas construtivos são ensaiados em câmara reverberante à luz da NP EN ISO 354. A norma em questão faz referência a outras normas devido ao facto destas serem um “modelo” para determinação de alguns parâmetros de cálculos e/ou para estipular condições inerentes à realização dos ensaios. Essas normas são:

- ISO 266, *Acoustics- Preferred frequencies*;
- ISO 9613-1, *Acoustics - attenuation of sound during propagation outdoors- Part 1: calculation of the absorption of sound by the atmosphere*;
- IEC 61260, *Electroacoustics -octave band and fractional octave band filters*.

4.2. ENSAIO EM CÂMARA REVERBERANTE SEGUNDO A NORMA NP EN ISO 354.

4.2.1. METODOLOGIA

4.2.1.1. Considerações gerais

A absorção sonora das superfícies da envolvente, do ar e dos objetos existentes na sala, é a principal responsável pela forma como se dá o decaimento do nível de pressão sonora no local. A norma indica que a distribuição das ondas sonoras na sala seja considerada uniformemente distribuída, ou seja, que se garanta a existência de um campo sonoro difuso.

A medição do tempo de reverberação é feita em duas fases, com e sem a amostra presente na câmara. Posteriormente calcula-se a área de absorção sonora equivalente, A , recorrendo à fórmula de Sabine.

De forma a obter valores mais fiáveis, as medições serão feitas em bandas de terço de oitava centradas nas frequências apresentadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Frequências centrais das bandas de terço de oitava, definidas pela norma ISO 266, para medição do tempo de reverberação em câmara reverberante. Adaptado de [53]

Banda de frequências (Hz)		
100	400	1600
125	500	2000
160	630	2500
200	800	3150
250	1000	4000
315	1250	5000

O volume mínimo recomendado para uma câmara reverberante é de 150 m³ para construções existentes e 200 m³ para construções novas. Para volumes superiores a 500 m³ a precisão dos valores obtidos para as altas frequências é afetada pela grande interferência da absorção sonora do ar.

A condição que deve ser cumprida para verificar à conformidade da forma geométrica da câmara reverberante é dada pela equação 4.1.

$$l_{max} < 1,9V^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

Sendo que, l_{max} (m) representa o comprimento da maior linha reta contida nos limites da câmara e V (m³) o volume da câmara.

Os valores da área de absorção sonora equivalente, A , para um volume de 200 m³ estão limitados superiormente pelos valores indicados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Valores de absorção sonora equivalente máximos corrigidos para 200 m³. Adaptado de [53]

Frequência (Hz)	Área máx. de absorção sonora equivalente (m ²)	Frequência (Hz)	Área máx. de absorção sonora equivalente (m ²)
100	6,5	800	6,5
125	6,5	1000	7,0
160	6,5	1250	7,5
200	6,5	1600	8,0
250	6,5	2000	9,5
315	6,5	2500	10,5
400	6,5	3150	12,0
500	6,5	4000	13,0
630	6,5	5000	14,0

Sempre que o volume da câmara reverberante for diferente de 200 m³, os valores apresentados anteriormente devem ser multiplicados por $(V/200)^{\frac{2}{3}}$.

O tamanho das amostras a ensaiar deve estar entre 10 e 12 m². Mas se o volume da câmara reverberante for superior a 200 m³, o limite superior deve ser multiplicados por $(V/200)^{\frac{2}{3}}$. Quanto ao formato, as amostras devem ser retangulares com uma relação entre lados entre 0,7 a 1, e colocadas a uma distância máxima recomendada de 1 m em relação às paredes da câmara.

Outros fatores relevantes a ter em conta durante a medição do tempo de reverberação é o controlo das variações de temperatura e humidade relativa. Quer o ensaio seja efetuado em câmara vazia ou com a amostra lá dentro, deve-se garantir que as condições de temperatura e humidade relativa sejam similares, de modo a ter uma temperatura de pelo menos 15°C e humidade relativa entre 30% e 90%.

A norma define dois métodos para avaliar o tempo de reverberação: o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva integrada.

a) Método do ruído interrompido:

Este método tem como base um processo estatístico que calcula a média de várias curvas de decaimento ou tempos de reverberação medidos para uma certa posição de fonte/microfone, assegurando assim uma repetibilidade.

b) Método da resposta impulsiva integrada:

Este método utiliza uma função determinística, mais precisa. No entanto, devido a isso, são necessários equipamentos e métodos de processamento de dados aprimorados.

As posições dos microfones devem estar afastadas de pelo menos 1,5 m entre si, 2 m da fonte sonora e 1 m dos limites da câmara e da amostra. Salienta-se que o microfone tem de ser omnidirecional. Quanto às fontes, estas devem assumir posições distanciadas entre si de 3 m no mínimo. O número de combinações entre as posições do microfone e as posições da fonte deve ser de pelo menos 12 (sendo que o número mínimo de posições para o microfone é de três e o da fonte é de dois).

Uma vez que existem desvios estatísticos, é imprescindível que se façam várias medições em cada uma das posições da fonte e do microfone, sabendo que o número mínimo é de três. O cálculo da média dos valores medidos pode ser efetuado pela aplicação da expressão (4.2).

$$L_p(t) = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad (4.2)$$

Sendo:

$L_p(t)$ - Nível de pressão sonora médio, no instante t, calculado opara o número total de decaimentos N;

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

4.2.1.2. Processo de cálculo

A medição dos valores do tempo de reverberação é feita para cada banda de frequências com e sem a amostra na câmara. Estes valores médios representam-se por T_1 e T_2 e devem apresentar duas casas decimais.

De seguida determinam-se as áreas de absorção sonora equivalentes para os mesmos dois casos referidos anteriormente. Assim, n toma o valor de 1 ou 2 para os respetivos tempos de reverberação T_1 e T_2 .

$$A_n = \frac{55,3V}{c.T_n} - 4Vm_n \quad (4.3)$$

Sendo:

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

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

T_n - Tempo de reverberação da câmara vazia ($n=1$) e com a amostra inserida no seu interior ($n=2$) (s);

m_n - Coeficiente de atenuação devido à presença do ar, em metros recíprocos.

A velocidade de propagação do som e o coeficiente de atenuação devido à presença do ar podem ser definidos pelas expressões (4.4) e (4.5).

$$c=(331+0,6t) \quad (4.4)$$

$$m = \frac{\alpha'}{10.\log(e)} \quad (4.5)$$

A expressão (4.4) só é válida para temperaturas do ar compreendidas entre 15 e 30 °C e α' é o coeficiente de atenuação atmosférica definido na ISO 9613-1.

A área de absorção sonora equivalente A_T é dada pela diferença entre A_2 e A_1 .

$$A_T = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (4.6)$$

Por fim, obtêm-se os valores dos coeficientes de absorção sonora de Sabine α_s da seguinte forma:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (4.7)$$

A_T - Área de absorção sonora equivalente da amostra de ensaio (m^2);

S- Área da amostra de ensaio (m^2).

4.2.2. CARATERIZAÇÃO DA CÂMARA REVERBERANTE E DOS EQUIPAMENTOS DA FEUP

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Acústica da FEUP, na câmara reverberante denominada *RI*. A câmara tem as seguintes dimensões irregulares aproximadas:

- Largura mínima de 5,60 m;
- Largura máxima de 6,15 m;
- Comprimento mínimo de 7,00 m;
- Comprimento máximo de 7,50 m;
- Altura de 4,65 m;
- Volume de 208 m³.

De forma a garantir um campo sonoro difuso, a câmara é dotada de difusores suspensos no teto.

Devido ao facto do volume ser superior à 200 m³, os valores da área máxima de absorção sonora equivalente corrigidas passam a ser expostos no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Valores de absorção sonora equivalente máximos corrigidos para o volume real da câmara reverberante da FEUP. Adaptado de [53]

Frequência (Hz)	Área máx. de absorção sonora equivalente (m ²)	Frequência (Hz)	Área máx. de absorção sonora equivalente (m ²)
100	6,7	800	6,7
125	6,7	1000	7,2
160	6,7	1250	7,7
200	6,7	1600	8,2
250	6,7	2000	10,8
315	6,7	2500	12,4
400	6,7	3150	12,4
500	6,7	4000	13,4
630	6,7	5000	14,4

O limite superior da dimensão da amostra afetado pelo fator de correção passou a ser de 12,7 m³.

Apresenta-se uma listagem dos equipamentos mínimos necessários à realização dos ensaios:

- Termo higrómetro digital modelo 4600;
- Fonte sonora Brüel & Kjaer modelo 4224;
- Sonómetro Brüel & Kjaer modelo 2260;
- Microfone Brüel & Kjaer modelo 4189.

4.2.3. CARATERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram escolhidos três tipos de sistemas de painéis absorventes:

- Tipo SP- Sem perfuração;
- Tipo PC- Perfuração circular;
- Tipo PR- Perfuração em ranhura.

Dentro destes, há sistemas com caixa de ar total e parcialmente preenchidas.

- a) Painel tipo SP: Sistema composto por uma placa não perfurada de compósito de cortiça (1,5 cm de espessura), mas de densidade inferior à do painel, possui caixa de ar totalmente preenchida com material poroso e fibroso, seguido de uma placa rígida de espessura reduzida para suporte (Figura 4.2).

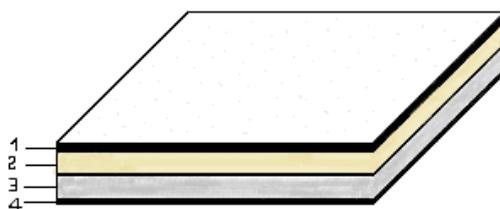


Fig. 4.2 – Esboço do painel do tipo SP constituído por: 1- Placa de compósito de cortiça não perfurada ($e=1,5$ cm), 2- material poroso (espuma à base de poliuretano $e=1$ cm e 2 cm conforme SP 1 e SP 2), 3- material fibroso (fibra de coco $e=2$ cm) e 4-placa rígida de suporte (MDF $e=0,3$ cm).

Neste sistema é avaliada a eficácia da alteração de espessura de um dos materiais colocados na caixa de ar, neste caso a espuma à base de poliuretano e também se de facto a junção destes dois materiais absorventes na caixa de ar potencia o desempenho do painel como um todo. Apresentam-se, na Figura 4.3, as combinações para este sistema específico.

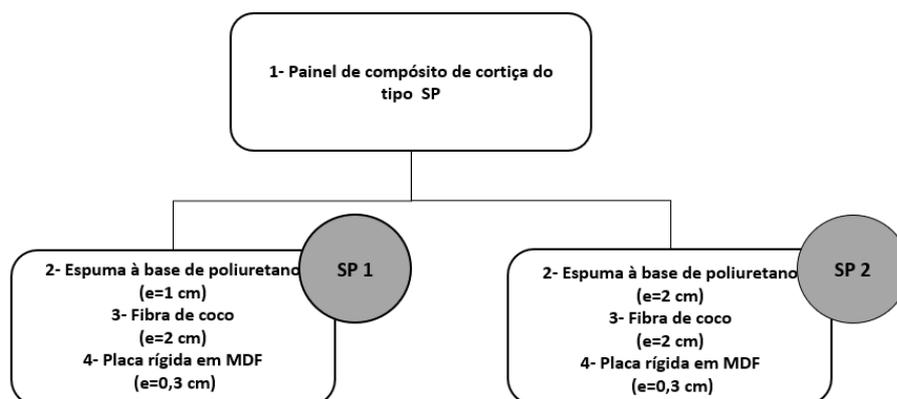


Fig. 4.3 – Esquema do painel do tipo SP com as diferentes combinações SP 1 e SP 2, onde um dos materiais da caixa de ar varia a espessura de 1 para 2 cm, mantendo-se constante os restantes materiais do sistema e as suas respetivas espessuras.

- b) Painel tipo PC: Sistema composto por uma placa perfurada de compósito de cortiça (1,5 cm de espessura), caixa de ar parcialmente preenchida com material poroso ou fibroso (conforme as várias combinações) e placa rígida de espessura reduzida para suporte (Figura 4.4).

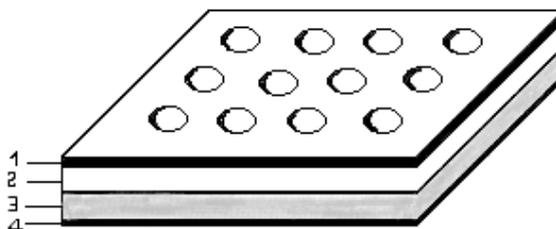


Fig. 4.4 – Esboço do painel do tipo PC constituído por 1- Placa de compósito de cortiça (e=1,5 cm) perfurada (18%) com orifícios circulares, 2- caixa de ar vazia (e=1 cm), 3- material poroso ou fibroso (conforme PC c, PC n e PC m, e=2 cm) e 4-placa rígida de suporte (MDF e=0,3 cm).

A placa perfurada vinha previamente com 103,0 x 53,0 x 2,5 cm de dimensão, porém foi recortada para 50 x 50 x 2,5 cm, em que a espessura corresponde a 1,5 cm para perfuração + 1 cm para caixa de ar embutida. A taxa de perfuração é de aproximadamente 18 %, totalizando 576 furos circulares de 1 cm de diâmetro, distribuídos em 24 filas por cada placa. O espaçamento entre furos é de 0,95 cm e o espaçamento entre os bordos e os furos é de 2 cm.

Na Figura 4.5 apresentam-se as várias combinações ensaiadas, cujo sistema de base é do tipo do painel PC, alterando apenas o material entre a caixa de ar e o painel de suporte.

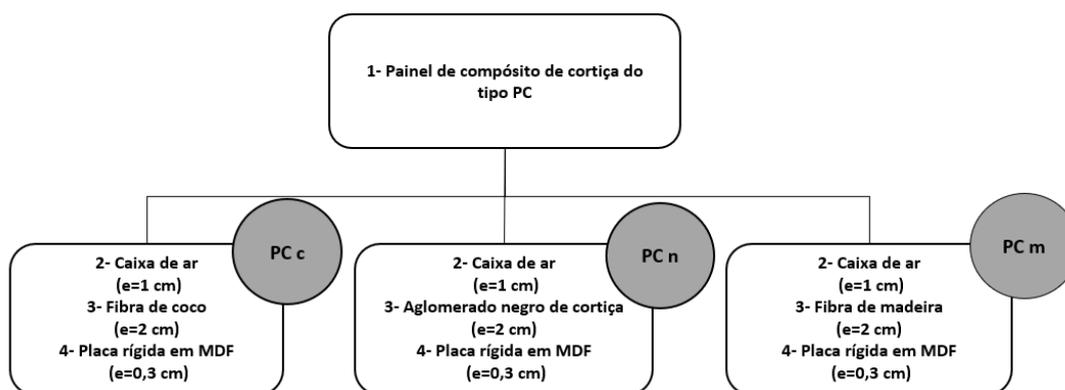


Fig. 4.5 – Esquema do painel do tipo PC com as diferentes combinações PC c, PC n e PC m, onde o material em contacto com a caixa de ar varia entre fibra de coco, aglomerado negro de cortiça e fibra de madeira, mantendo-se constante os restantes materiais do sistema e as suas respetivas espessuras.

- c) Painel tipo PR: Sistema semelhante ao tipo PR, pois também é constituído por uma placa perfurada de compósito de cortiça com 1,5 cm de espessura. De igual modo também possui caixa de ar parcialmente preenchida com material poroso ou fibroso e uma placa rígida (Figura 4.6).

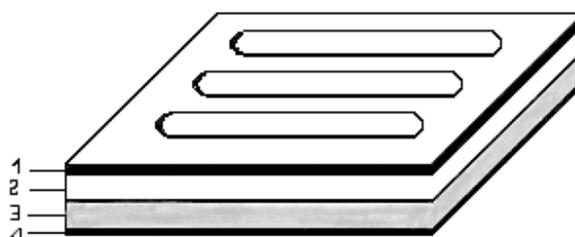


Fig. 4.6– Esboço do painel do tipo PR constituído por 1- Placa de compósito de cortiça (e=1,5 cm) perfurada (18%) com orifícios em forma de ranhura com extremos semicirculares, 2- caixa de ar vazia (e=1 cm), 3- material poroso ou fibroso (conforme PR p e PR n, e=2 cm) e 4-placa rígida de suporte (MDF e=0,3 cm).

De forma a facilitar a comparação entre os dois tipos de placas perfuradas, as dimensões tinham de ser iguais, ou seja, 50 x 50 x 2,5 cm, idem para a taxa de perfuração. Os furos são em linha com 46 cm de comprimento incluindo a extremidade redonda cujo raio do semicírculo é de 0,5 cm. Há no total 10 filas de furos por cada placa. O espaçamento entre furos é de 4 cm e o espaçamento entre os bordos e os furos é de 2 cm.

As combinações para este sistema estão descritas abaixo (Figura 4.7).

O Quadro 4.4 indica os materiais a usar e as suas respetivas propriedades.

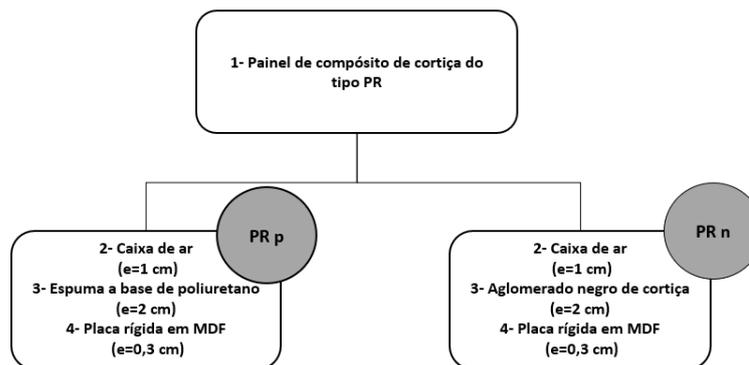


Fig. 4.7 – Esquema do painel do tipo PR com as diferentes combinações diferentes combinações PR p e PP n, onde apenas se substitui a espuma de poliuretano pelo aglomerado negro de cortiça, mantendo-se constante os restantes materiais do sistema e as suas respetivas espessuras.

Quadro 4.4– Características dos vários materiais que constituem os sistemas de revestimento de paredes.

Material	Referência do produto	Espessura (cm)	Massa volúmica (kg/m ³)	Resistência à tração (kPa)	Condutividade térmica (W/mK)	Resistência à compressão (kPa)
Compósito de cortiça	8405	1,5	210-270	> 400	-	-
	8004		210-280	> 500	-	-
Espuma à base de poliuretano	5385	1,0	274	207	0,055	-
Aglomerado de fibra de madeira	81978496	2,0	600	-	-	-
MDF	11190914	0,3	735	-	-	-
Fibra de coco	74000019	2,0	100-140	-	0,045	120
Aglomerado negro de cortiça	70012632	2,0	110	45	0,039	100

A diferença entre os dois materiais de compósito de cortiça é o facto do primeiro (8405) ter sido usado para o sistema com painéis perfurados (PC e PR) e o segundo (8004) para o sistema sem perfuração (SP). Foi feita essa seleção tendo em conta que o painel perfurado estaria sujeito ao corte por jato de água e por isso teria de possuir uma massa volúmica que não permitisse que o mesmo fosse desfeito durante o processo. Apesar de só estar especificado o intervalo de valores de massa volúmica, foi garantido que para o primeiro caso esse valor fosse superior em relação ao segundo, ainda que não especificado pela empresa que produziu os painéis. Nota-se que a fibra de coco e o aglomerado negro

de cortiça possuem massas volúmicas mais baixas, ou seja, são mais leves e também apresentam boas características de isolamento térmico.

A espuma à base de poliuretano, como o nome indica, não é uma espuma “pura” pois fazem parte da sua constituição materiais reciclados e outros compostos. Justamente por ser um material modificado, se pretende a sua caracterização acústica. Tanto o aglomerado de fibra de madeira como o MDF foram fornecidos por uma outra entidade, razão pela qual não foram disponibilizados os valores dos parâmetros de resistência e de condutividade térmica.

Apresenta-se no Quadro 4.5 a globalidade das soluções, permitindo visualizar melhor os três tipos de sistemas e as suas diferentes combinações.

Quadro 4.5– Quadro resumo de todos os sistemas e suas respectivas características para cada combinação.

Tipo de sistema	Combinação	Revestimento Principal	Caixa de ar	Material absorvente dentro da caixa de ar	Suporte
SP	SP 1	Compósito de cortiça 8004 e=1,5 cm	Totalmente preenchida e=3,0 cm	Espuma a base de poliuretano e=1,0 cm fibra de coco e=2,0 cm	MDF e=0,3 cm
	SP 2		Totalmente preenchida e=4,0 cm	Espuma a base de poliuretano e=2,0 cm fibra de coco e=2,0 cm	
PC	PC c	Compósito de cortiça 8405 e=1,5 cm	Parcialmente preenchida e=3,0 cm	Espaço de ar e=1,0 cm fibra de coco e=2,0 cm	MDF e=0,3 cm
	PC n			Espaço de ar e=1,0 cm Aglomerado negro de cortiça e=2,0 cm	
	PC m			Espaço de ar e=1,0 cm fibra de madeira e=2,0 cm	
PR	PR p	Compósito de cortiça 8405 e=1,5 cm	Parcialmente preenchida e=3,0 cm	Espaço de ar e=1,0 cm Espuma a base de poliuretano e=2,0 cm	MDF e=0,3 cm
	PR n			Espaço de ar e=1,0 cm Aglomerado negro de cortiça e=2,0 cm	

É possível verificar pelo Quadro 4.5 que as soluções não seguem o mesmo padrão estrutural. A razão para esta ocorrência é o facto de se ter estudado diferentes variantes, realizando uma análise não monótona. Assim sendo, fez-se variar a espessura de um dos materiais absorvente do sistema SP, no sistema PC mudou-se o tipo de material existente na caixa de ar para avaliar a eficiência de cada um e para o sistema PR fez-se a alteração de um material em comum com o sistema PC (aglomerado negro de cortiça) e a espuma à base de poliuretano, para que fosse possível verificar a influência da forma do orifício nos sistemas PC e PR, mas também caracterizar acusticamente a espuma à base de poliuretano.

As amostras foram colocadas sobre o piso da câmara reverberante, por camadas de material, até completar a composição do sistema em estudo (Figuras 4.8 e 4.9). As dimensões finais das amostras foram de 2,5 x 4,0 m totalizando os 10 m².

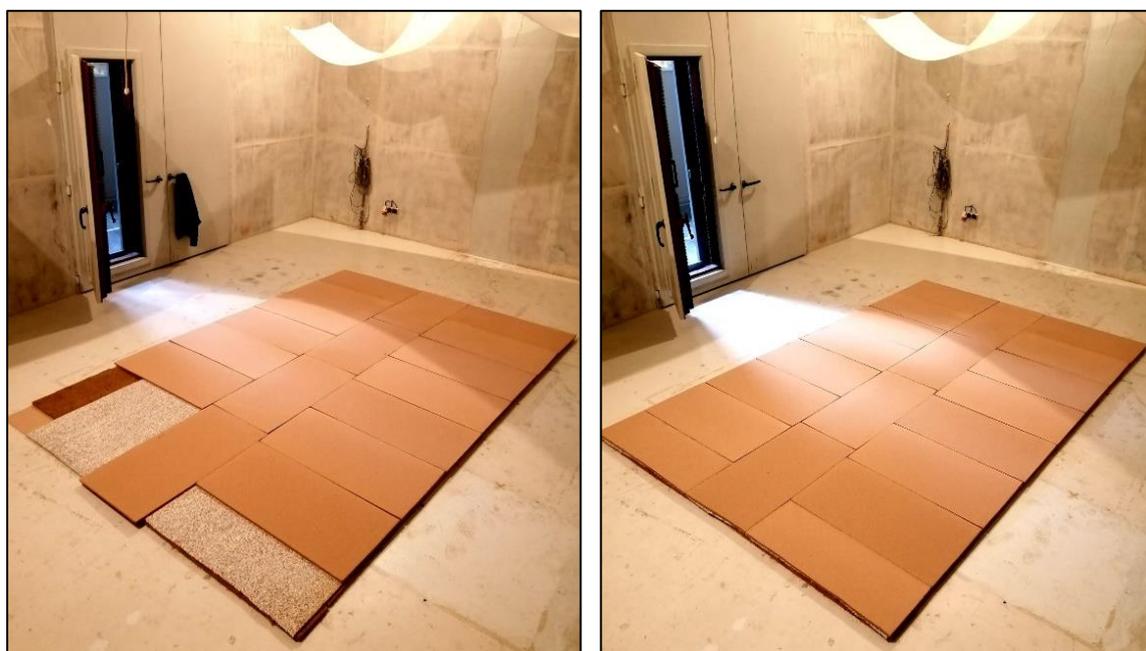


Fig. 4.8 – (Esq.) Colocação das amostras por camada de material do sistema tipo SP, sendo possível visualizar a placa MDF, a fibra de coco, a espuma de poliuretano e o compósito de cortiça [foto da autora].

Fig. 4.9 – (Dir.) Sistema do tipo SP montado dentro da câmara reverberante. [foto da autora]

Salienta-se que para este sistema em específico, as placas não foram recortadas com a mesma dimensão das placas dos sistemas PC e PR, ou seja, 50 x 50 cm. As dimensões *standard* destas placas permitiram o ajuste para a dimensão final da amostra, porém, a disposição das mesmas não favoreceu

5

RESULTADOS

5.1. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA.

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições termo-higrométricas (Quadro 5.1):

Quadro 5.1– Condições termo-higrométricas de cada um dos sistemas em função da data de medição do tempo de reverberação na câmara reverberante e verificação face aos valores previstos na norma.

Tipo de sistema	Combinação	Data de medição	Temperatura	Humidade	Verificação
SP	SP 1	04-06	19 °C	56%	OK
	SP 2	07-06		57%.	
PC	PC c	18-06	19 °C	60%	OK
	PC n	21-06	20 °C		
	PC m	18-06	19 °C		
PR	PR p	21-06	20 °C	60%	OK
	PR n	21-06			

Para cada um dos sistemas, obtiveram-se os valores dos tempos de reverberação com a câmara vazia e com as amostras dentro da câmara (Quadro 5.2).

Quadro 5.2 – Valores dos tempos de reverberação de referência (para câmara vazia) e para cada amostra, em função da frequência.

Frequência (Hz)	TR referência	TR sistema SP		TR sistema PC			TR sistema PR	
		SP 1	SP 2	PC c	PC n	PC m	PR p	PCPR n
100	14,23	10,96	9,51	12,12	12,41	12,81	12,43	12,49
125	11,53	7,80	6,79	8,19	10,04	9,96	10,23	10,07
160	11,20	5,50	4,43	8,07	10,10	10,23	9,79	9,77
200	10,94	4,44	3,74	7,35	9,18	9,57	8,95	9,25
250	10,22	3,66	3,78	6,74	8,37	8,33	8,04	8,39
315	10,66	3,47	3,72	6,09	7,78	7,75	7,39	7,72
400	11,39	3,96	4,18	5,89	7,71	7,42	7,10	7,60
500	11,31	4,22	4,21	5,18	6,63	6,71	5,85	6,48
630	10,69	4,41	4,35	4,49	5,39	6,15	4,66	5,17
800	9,71	4,52	4,27	3,80	4,20	5,72	3,60	3,96
1000	8,78	4,37	4,11	3,12	2,88	4,98	2,63	2,74
1250	7,81	4,11	3,99	2,76	2,45	4,23	2,31	2,46
1600	6,90	3,89	3,77	2,86	2,40	3,38	2,42	2,54
2000	6,04	3,60	3,53	3,06	2,33	2,92	2,59	2,53
2500	5,37	3,34	3,28	3,10	2,27	2,80	2,64	2,42
3150	4,59	2,99	2,96	3,02	2,19	2,70	2,54	2,29
4000	3,59	2,54	2,57	2,74	2,19	2,57	2,31	2,25
5000	2,82	2,08	2,13	2,25	2,03	2,30	1,98	1,99

Os valores acima foram exportados para uma folha de cálculo programada com as fórmulas descritas no capítulo 4 da presente dissertação. Calculou-se a velocidade de propagação do som (c) em função da temperatura (t) e estimaram-se os coeficientes de atenuação atmosférica (α') por interpolação dos valores apresentados na ISO 9613-1. Após a obtenção desses valores, determinaram-se os coeficientes de atenuação devido à presença do ar (m) em função da frequência e conseqüentemente, a quantificação das áreas de absorção sonora equivalentes A_n (Quadro 5.3), já com a verificação dos valores de referência face aos valores máximos exigidos pela norma ISO 354-2007.

Quadro 5.3 – Valores das áreas de absorção sonora equivalentes A_n em função da frequência, para cada uma das amostras e verificação face aos valores máximos previstos na norma.

Frequência (Hz)	A_n referência	Verificação	A_n sistema SP		A_n sistema PC			A_n sistema PR	
			SP 1	SP 2	PC c	PC n	PC m	PR p	PCPR n
100	2,31	OK	3,01	3,48	2,72	2,65	2,57	2,65	2,64
125	2,84	OK	4,23	4,87	4,03	3,27	3,30	3,20	3,25
160	2,88	OK	5,99	7,47	4,05	3,21	3,17	3,31	3,32
200	2,90	OK	7,40	8,81	4,41	3,49	3,35	3,58	3,46
250	3,05	OK	8,94	8,65	4,75	3,77	3,80	3,94	3,76
315	2,83	OK	9,37	8,71	5,20	3,99	4,02	4,22	4,03
400	2,54	OK	8,08	7,63	5,29	3,93	4,12	4,30	4,00
500	2,46	OK	7,45	7,47	5,97	4,52	4,49	5,20	4,66
630	2,53	OK	7,00	7,10	6,86	5,57	4,84	6,54	5,86
800	2,72	OK	6,70	7,13	8,09	7,21	5,13	8,54	7,72
1000	2,94	OK	6,81	7,29	9,88	10,72	5,85	11,83	11,35
1250	3,22	OK	7,09	7,33	11,09	12,58	6,86	13,41	12,55
1600	3,49	OK	7,26	7,53	10,38	12,60	8,58	12,48	11,84
2000	3,73	OK	7,50	7,69	9,20	12,62	9,72	11,18	11,47
2500	3,71	OK	7,52	7,73	8,40	12,38	9,56	10,31	11,42
3150	3,67	OK	7,59	7,75	7,67	11,96	8,99	9,85	11,19
4000	3,97	OK	7,84	7,77	7,21	10,45	8,02	9,65	9,85
5000	3,80	OK	8,04	7,79	7,35	9,26	7,03	9,68	9,27

Conhecidos os valores de A_n para a câmara vazia e para a câmara com cada um dos sistemas ensaiados, determinou-se o parâmetro A global através da equação (4.6) e por fim determinou-se o valor do coeficiente de absorção sonora da amostra por bandas de 1/3 de oitava, de acordo com a equação (4.7). Os resultados obtidos com base no tempo de reverberação médio e na área das amostras de ensaio são apresentados no Quadro 5.4 e Figura 5.1. Salienta-se que para as áreas das amostras foram consideradas as superfícies laterais dos sistemas, pois devido a aplicação que se pretende fazer destes revestimentos (pendurar em paredes), esta componente é relevante.

Quadro 5.4 – Valores dos coeficientes de absorção sonora α para cada uma das amostras ensaiadas.

Frequência (Hz)	α sistema SP		α sistema PC			α sistema PR	
	SP 1	SP 2	PC c	PC n	PC m	PR p	PCPR n
100	0,07	0,11	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03
125	0,13	0,19	0,11	0,04	0,04	0,03	0,04
160	0,29	0,43	0,11	0,03	0,03	0,04	0,04
200	0,43	0,55	0,14	0,06	0,04	0,06	0,05
250	0,56	0,52	0,16	0,07	0,07	0,08	0,07
315	0,62	0,55	0,22	0,11	0,11	0,13	0,11
400	0,52	0,48	0,26	0,13	0,15	0,17	0,14
500	0,47	0,47	0,33	0,20	0,19	0,26	0,21
630	0,42	0,43	0,41	0,29	0,22	0,38	0,32
800	0,38	0,41	0,51	0,42	0,23	0,55	0,47
1000	0,37	0,41	0,66	0,74	0,28	0,84	0,79
1250	0,37	0,39	0,74	0,89	0,34	0,96	0,88
1600	0,36	0,38	0,65	0,86	0,48	0,85	0,79
2000	0,36	0,37	0,52	0,84	0,57	0,70	0,73
2500	0,36	0,38	0,44	0,82	0,55	0,62	0,73
3150	0,37	0,38	0,38	0,78	0,50	0,58	0,71
4000	0,37	0,35	0,31	0,61	0,38	0,54	0,56
5000	0,40	0,37	0,34	0,52	0,31	0,56	0,52

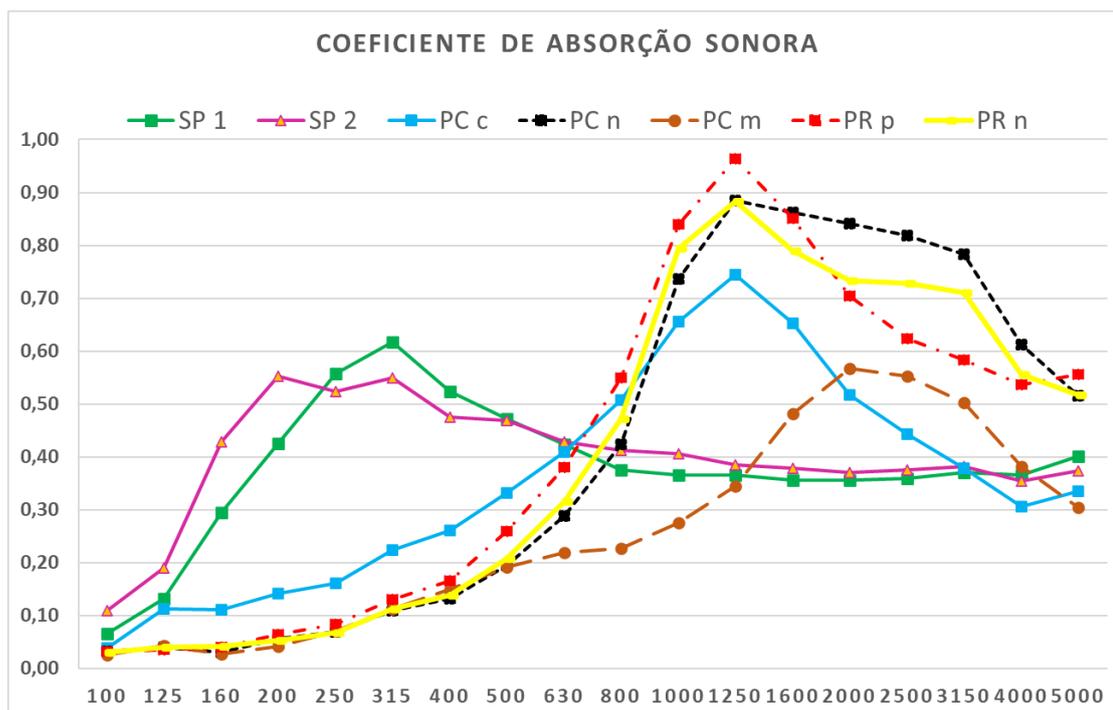


Fig. 5.1 – Curvas dos coeficientes de absorção sonora α para cada uma das amostras ensaiadas.

5.2. ANÁLISE GERAL

Neste subcapítulo são apresentadas as ilustrações gráficas resultantes da realização dos ensaios em câmara reverberante dos sistemas propostos. Os gráficos variam de acordo com o parâmetro a comparar desde mudança de material, espessura, tipo de painel principal e a quantidade de material absorvente na caixa de ar.

Os resultados aparecem na mesma ordem da apresentação dos sistemas, ou seja, primeiro é feita a análise dos painéis sem perfuração e depois dos painéis perfurados.

5.2.1. PAINÉIS DO TIPO SP

Neste sistema, optou-se por aumentar a espessura da espuma à base de poliuretano de 1 para 2 cm. Para além deste material absorvente na caixa de ar também foi inserido fibra de coco para potencializar a absorção sonora nas altas frequências.

Nota-se que, embora os materiais absorventes sejam da classe dos materiais porosos e fibrosos, o sistema como um todo funciona bem na absorção sonora em baixas e médias frequências como é possível observar na Figura 5.2 As possíveis razões para esta ocorrência seriam a influência da placa rígida de MDF usada para suporte, a própria composição dos vários materiais dispostos em camadas

ou o facto destes painéis terem vindo com pequenas deformações nos bordos, impossibilitando o encaixe perfeito entre as placas e favorecendo a vibração dos painéis devido a esses pequenos espaços vazios.

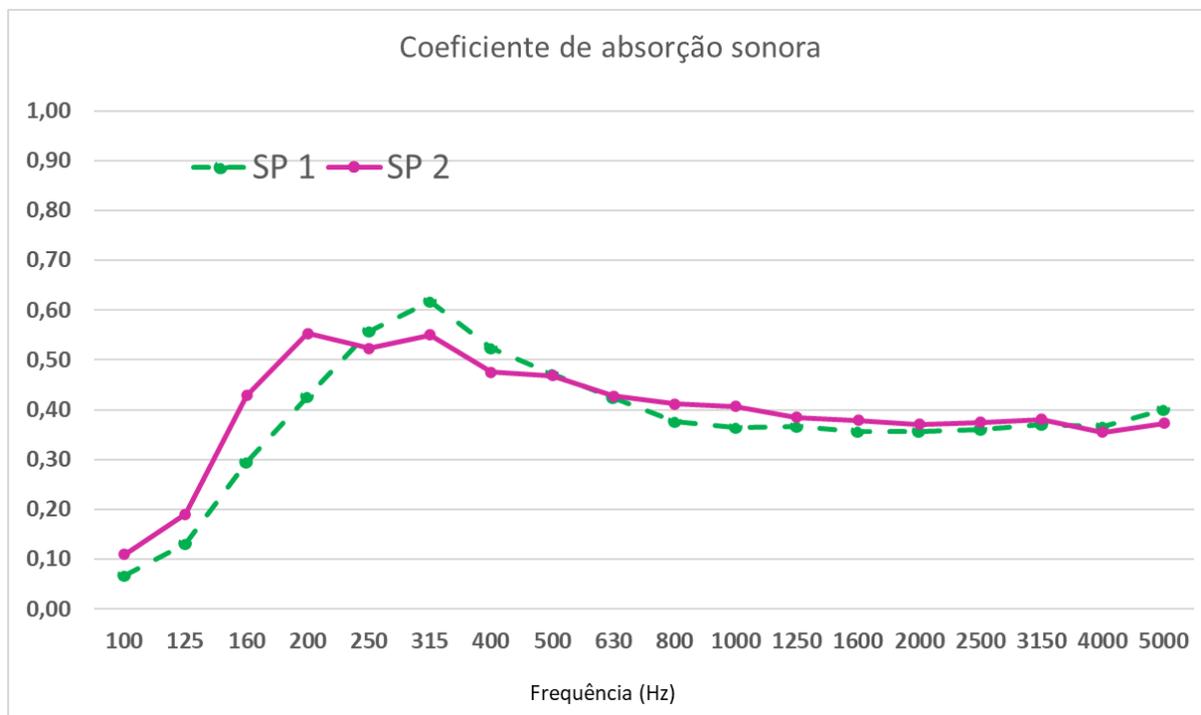


Fig. 5.2 – Comparação das curvas de absorção sonora dos painéis SP 1 e SP 2.

A absorção máxima para o sistema SP 1 foi de 0,62 atingida para os 315 Hz e a partir dos 100 Hz o coeficiente de absorção sonora toma valores muito próximos uns dos outros.

A colocação de mais espuma na caixa de ar fez com que o valor mais alto descesse para 0,55 em comparação com o primeiro sistema.

Verifica-se que o comportamento sonoro é bastante semelhante, ou seja, para ambos sistemas há uma elevada absorção nas baixas frequências e uma redução nas altas frequências. Esta redução pode ser devido à diferença de densidades entre o painel de revestimento, a espuma e a fibra de coco, uma vez que materiais com menor densidade atuam melhor em altas frequências.

Ao comparar estes sistemas, verifica-se de um modo geral que o sistema SP 2 teve um melhor desempenho a partir dos 500 Hz devido ao dobro da quantidade de material poroso. Porém, a diferença não é muito significativa porque o aumento de espessura pode ter tido uma intervenção positiva na absorção sonora, mas também culminou no aumento da área da amostra uma vez que as superfícies laterais foram contabilizadas.

5.2.2. PAINÉIS DO TIPO PC

Estes tipos de painéis foram criados com intuito de obter um sistema cuja variedade de materiais atuasse de forma eficiente em quase todas as gamas de frequências, assim, as placas perfuradas funcionam como ressoadores, na caixa de ar são usados materiais porosos e fibrosos e a placa de suporte simboliza uma espécie de membrana.

Os resultados obtidos são bastante satisfatórios e as curvas são maioritariamente características do comportamento em frequência dos ressoadores. Os dois primeiros painéis (PC c e PC n) cujos materiais na caixa de ar são a fibra de coco e o aglomerado negro de cortiça, atingiram os seus valores máximos para os 1250 Hz, cujos coeficientes de absorção sonora foram 0,74 e 0,89 respetivamente (Figura 5.3). No caso do PC m, houve uma menor evolução da curva de absorção, onde os valores não ultrapassaram os 0,57 e a redução dos mesmos deu-se a partir dos 2000 Hz.

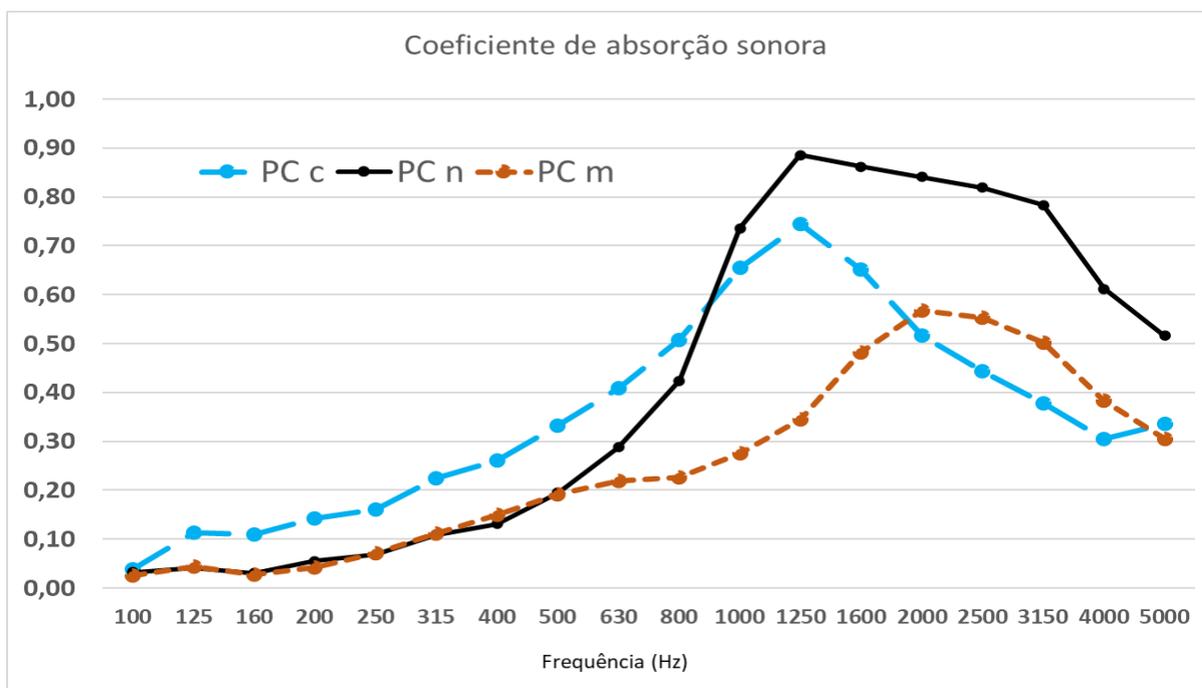


Fig. 5.3 – Comparação das curvas de absorção sonora dos painéis PC c, PC n e PC m.

Dos três sistemas analisados, o PC n teve o melhor desempenho de modo geral. Já era previsto que assim fosse visto que o aglomerado negro possui excelentes qualidades acústicas e térmicas.

A colocação da fibra de madeira na caixa de ar fez com que os valores do coeficiente de absorção sonora decaíssem devido à elevada massa volúmica do material que ronda os 600 kg/m^3 . No entanto, a partir dos 2000 Hz, este sistema apresentou uma absorção mais favorável que o sistema com a fibra

de coco pois para este caso as fibras são mais afastadas entre si, dificultando a dissipação da energia em forma de calor.

Comparando o PC c com o PC n, verifica-se que o material fibroso liderou na absorção até aos 900 Hz aproximadamente. Logo após esse instante o aglomerado negro destacou-se significativamente nas médias e altas frequências.

5.2.3. PAINÉIS DO TIPO PR

Este último sistema foi o que apresentou valores de absorção máximos mais próximos da unidade pelo facto da área de abertura ser superior em relação ao sistema perfurado apresentado anteriormente (Figura 5.4). Ainda comparando estes dois tipos de sistemas perfurados, nota-se que houve um pequeno aumento de desempenho nas baixas e médias frequências para os painéis tipo PR.

Os gráficos do PR p e do PR c são bastante semelhantes em forma, havendo pequenas diferenças que acabam por ser complementadas ao longo das várias bandas de frequências.

Desta vez, foi usando o aglomerado negro de cortiça que se obteve a absorção máxima mais alta deste tipo de painéis, alcançando um valor de 0,96 para uma frequência de 1250 Hz.

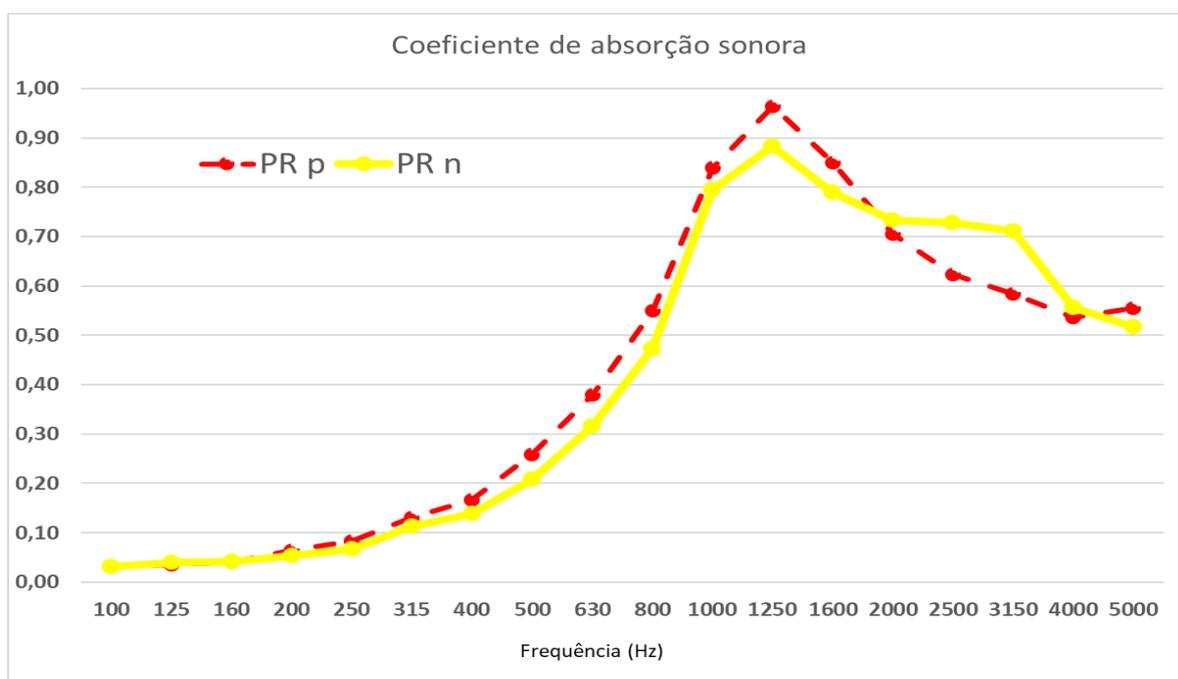


Fig. 5.4 – Comparação das curvas de absorção sonora dos painéis PR p e PR n.

Fazendo a comparação de todos os sistemas (Figura 5.5), é possível concluir que os melhores comportamentos absorventes foram garantidos pelos sistemas PC n, PR n e PR p. Este último (PR p) mostrou-se mais vantajoso para a absorção em baixas e médias frequências, já os dois primeiros (PC n e PR n) são muito mais eficientes em altas frequências quando comparados com o PR p.

Os sistemas não perfurados tiveram um crescimento de absorção mais acentuado nas baixas frequências, porém, são os que menos garantiram uma boa taxa de absorção em quase todas as gamas de frequências.

Dos painéis perfurados, o painel com aglomerado de fibras de madeira apresentou uma curvatura um pouco distinta das demais. Ao todo a sua absorção apresentou algum destaque depois da gama dos 1600 Hz.

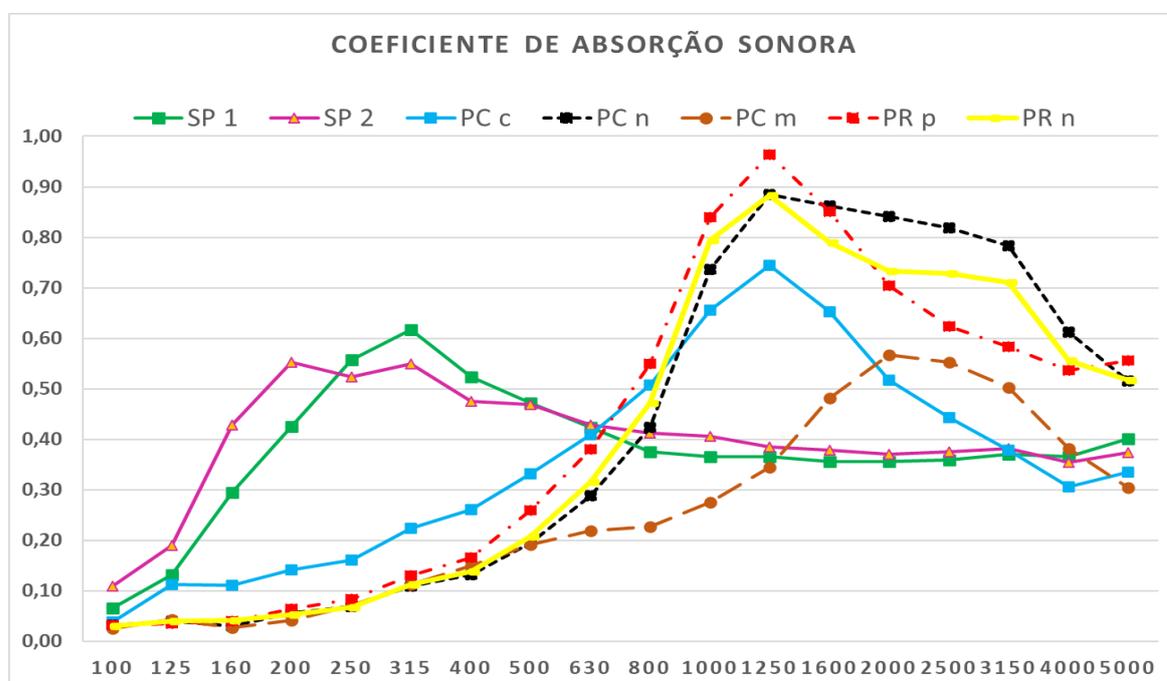


Fig. 5.5 – Comparação global dos sistemas estudados neste trabalho.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução da civilização humana fez com que a sua integração no meio envolvente fosse cada vez mais “harmoniosa”. Deste modo, há um equilíbrio a ser mantido ao nível dos sentidos sensoriais, principalmente o que concerne a audição. Cada vez mais torna-se notória as influências negativas do ruído nos diversos meios de socialização, o que contribuiu para a evolução da Acústica como a ciência que estuda o som, as suas formas de propagação e os procedimentos de isolamento e correção acústica.

Neste trabalho procurou-se realçar a importância do tratamento de espaços do ponto de vista da correção acústica usando materiais de origem o mais natural possível, dando ênfase à cortiça e aos seus derivados compostos.

Do estudo levantado no estado de arte, verificou-se que existem muitas abordagens simplistas ao nível de sistemas absorventes, ou seja, há análises sobre diversos materiais e formas de placas, porém poucos estudos estavam assentes em sistemas com mais de três camadas de material, o que deixa margem para explorar as diversas combinações multicamadas que podem ser feitas, associando-as a um *design* inovador. Contudo, destacou-se a dificuldade de produzir placas perfuradas, por ser um processo demorado e detalhista.

Quanto aos sistemas ensaiados, estes foram projetados para estarem pendurados numa parede à vista e com isso surgiu a necessidade de escolher bem os materiais, tendo em atenção as suas características acústicas térmicas e de resistência. Também foram concebidos para que a absorção fosse o mais uniforme possível, daí a junção de um painel ressonante na camada frontal dos painéis para atuar nas frequências baixas, a perfuração dos painéis que favorece o desempenho nas médias frequências e a colocação de materiais porosos e fibrosos para facilitar a absorção em altas frequências.

Relativamente ao sistema não perfurado, o comportamento das duas amostras foi bastante semelhante, como se previa, mas não é o suficiente para afirmar qual dos dois sistemas seria o mais indicado, pois como a principal diferença foi ao nível da espessura de um dos materiais, o mais certo seria fazer uma análise económica que permita concluir se o acréscimo de material tem uma relação custo-benefício melhor que no outro caso.

De uma forma geral, os sistemas perfurados analisados apresentaram um desempenho superior às placas não perfuradas, remetendo para um melhor equilíbrio de absorção em todas as gamas de frequências. Os materiais porosos e fibroso inseridos na caixa de ar do sistema perfurado, aumentam a eficiência da absorção, contudo reduzem a absorção máxima para a tal conhecida frequência de ressonância.

Entre os dois tipos de sistemas perfurados PC e PR, o segundo é acusticamente melhor porque apesar de terem a mesma taxa de perfuração, a sua área de abertura é maior, favorecendo a incidência direta do som sobre o material absorvente localizado na caixa de ar. Porém essa vantagem não se verificou para todas as frequências, visto que a absorção de sons mais agudos foi assegurada pelo sistema PC n.

Em suma, é difícil selecionar o “melhor sistema de todos” uma vez que todos têm comportamentos diferentes, adaptados para as necessidades do local onde serão montados os sistemas, isto é, depende da gama de frequências onde se pretende garantir a máxima absorção. Contudo, de forma genérica, os sistemas perfurados com caixa de ar parcialmente preenchida com material poroso ou fibroso, especificamente aglomerado negro de cortiça e espuma à base de poliuretano são os mais promissores.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho incidiu sobre 7 amostras. As diversas dificuldades na aquisição dos materiais e na produção das amostras atrasaram o processo de análise dos resultados, não permitindo estudar outros parâmetros e soluções.

Assim sendo, ficam enumeradas algumas sugestões para abordagens futuras complementares:

- Analisar painel perfurado com orifícios de diferentes dimensões para que se verifique a influência para as várias frequências de ressonância;
- Proceder a avaliação dos materiais estudados recorrendo à modelos teóricos/matemáticos, alguns deles mencionados neste trabalho, para comparação da eficiência dos vários métodos existentes com a abordagem prática efetuada;
- Avaliar o efeito da variação da densidade de um material, mantendo a sua espessura constante e as mesmas condições de ensaio;
- Analisar painéis com relevos e profundidades de perfurações diferentes;
- Realizar uma análise térmica e económica para um estudo mais completo do desempenho dos sistemas;
- Proceder a montagem dos sistemas em ambiente social e proceder a sua medição num contexto de aplicação real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Acústica - <https://www.castelhano-ferreira.pt/blog/2013/o-que-e-a-acustica>. Acedido em 18 de fevereiro de 2021.
- [2] Carvalho, A.P.O. *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, edição nº 8.16, Porto, 2020.
- [3] Som - <https://frahm.com.br/acustica/>. Acedido em 21 de fevereiro de 2021.
- [4] Gonçalves, A.S. *Caraterização acústica de espumas de poliuretano-absorção sonora*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [5] Everest, F.A. *The master handbook of acoustics*, TAB books, edição nº 4, 2001.
- [6] Oliveira, R.C. *Análise das condições acústicas de unidades de suporte móveis: um enfoque na saúde do trabalhador*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2014.
- [7] Propagação do som - <http://www.fq.pt/som/propagacao-do-som>. Acedido em 23 de fevereiro de 2021.
- [8] Gerges, S.N.Y. *Ruído: fundamentos e controle*. Edição nº 1, Florianópolis, Brasil, 1992.
- [9] Níveis de pressão sonora, intensidade e potência sonora - <https://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0278/Aulas/AUT0278%20Aula%2004%20-%20dB%20Press%C3%A3o%20Pot%C3%Aancia%20Intensidade.pdf>. Acedido em 24 de fevereiro de 2021.
- [10] Acústica de edifícios - <http://www.construcaomagazine.pt/noticias/acustica-nos-edificios/>. Acedido em 1 de março de 2021.
- [11] Acústica na reabilitação - <http://www.construcaomagazine.pt/noticias/acustica-na-reabilitacao/>. Acedido em 1 de março de 2021.
- [12] Gomes, C.V.S. *Comportamento acústico de materiais absorventes em multicamada*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2015.
- [13] Tubo de ondas estacionárias - https://en.wikipedia.org/wiki/Kundt%27s_tube#/media/File:Tubo_de_Kundt.jpg. Acedido em 4 de março de 2021.
- [14] Mattos, M.G. *Difusividade do campo sonoro de câmara reverberante para medição de absorção sonora*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1999.
- [15] Imagem sonómetro - <https://www.specman.pt/novidades---eventos.html>. Acedido em 4 de março de 2021.

- [16] Mecanismos de absorção sonora porosos, fibrosos e membranas - https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4445901/mod_resource/content/0/05%20b%20-%20Absor%C3%A7%C3%A3o%20-%20Materiais%20absorventes.pdf.
- [17] Pinheiro, P.B. *Desenvolvimento de um sistema fibroso em multicamada para reabilitação urbana de edifícios*. Dissertação de Mestrado em Sustentabilidade do Ambiente Construído, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, 2015.
- [18] Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Amado Mendes, P. *Sebenta Acústica Aplicada*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2010.
- [19] Domingues, O. *Acústica nos edifícios, materiais e sistemas absorventes sonoros coeficientes de absorção sonora*. Lisboa: LNEC, 2005.
- [20] Henrique., Luís L. *Acústica musical*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002.
- [21] Pierce, Allan D., *Acoustics: An Introduction of Its Physical Principles and Applications*. Acoustical Society of America, 1989.
- [22] Strutt, J.W. e Rayleigh, B. *The theory of sound*. Dover Publications, edição nº 2, Nova Iorque, 1945.
- [23] Corticeira Amorim, S.GPS., S.A. *A arte da cortiça*. Corticeira Amorim, edição nº 2, Mozelos, 2014.
- [24] Barron, F. Randall, *Industrial Noise Control and Acoustics*. Technical University of Louisiana, 2003.
- [25] História da cortiça, aglomerados de cortiça - <https://www.apcor.pt/cortiça/factos-curiosidades/historia/>. Acedido em 8 de março de 2021.
- [26] Árvore sobreiro- <https://www.museubiodiversidade.uevora.pt/elenco-de-especies/biodiversidade-actual/plantas/angiospermas/quercus-suber/>. Acedido em 30 de março de 2021.
- [27] Fortes, M.A., Rosa, M.E. e Pereira, H. *a Cortiça*. Edição nº 1, IST Press, Lisboa, 2004.
- [28] Fibras naturais, lã de rocha e de vidro - <https://www.knaufinsulation.pt/sustentabilidade/produto/la-de-vidro-ou-rocha>. Acedido em 12 de março de 2021.
- [29] Características da lã de rocha e de vidro e suas vantagens - <https://amplitudeacustica.com.br/la-de-vidro-ou-la-de-rocha-qual-melhor-manta-acustica/>. Acedido em 12 de março de 2021.
- [30] Fibra de coco - <https://www.archiexpo.com/pt/prod/amorim-isolamentos-sa/product-89328-863904.html>. Acedido em 12 de março de 2021.
- [31] Fibra de madeira/Celenit - <http://www.lusomatec.pt/pt/produtos/celenit/sobre>. Acedido em 13 de março.
- [32] Patraquim, R. *Painéis acústicos perfurados em madeira: estudo e avaliação experimental de soluções*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto superior Técnico, Lisboa, 2008.
- [33] Delany, M. E. e Bazley, E. N. *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*. Applied

Acoustics, 3, pg. 105-116, 1970.

[34] Miki, Y. *Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models*. J. Acoust. Soc. Jpn (E). 11(1), pg. 19-24, 1990.

[35] Johnson, D. L., Koplik, J. e Dashen, R. *Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media*. J. Fluid Mech. 176, pg. 379-402, 1987.

[36] Mechel, F.P. *Design charts for sound absorber layers*. Journal of the Acoustic Society of America 83, pg. 1002-1013, 1988.

[37] Allard, J.F. *Propagation of Sound in porous media. Modeling sound absorbing materials*. London, Nova Iorque: Elsevier Applied Science, 1993.

[38] Attenborough, K., Bashir, I. e Taherzadeh, S. *Outdoor ground impedance models*. The Journal of the Acoustical Society of America, 129(5), pg. 2806-2819, 2011.

[39] Attenborough, K e Ver, I. *Noise and Vibration Control Engineering*. Edição nº 3, Cap. 8, Nova Yorque, 2008.

[40] Attenborough, K, Li, K. M. e Horoshenkov, K. *Predicting Outdoor Sound*. Taylor and Francis, Cap. 2, 3, 10 e 11, Londres, Reino Unido, 2007.

[41] Champoux, Y. e Stinson, M. R. *Acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors*. Journal of the Acoustic Society of America 92, pg. 1120-1131, 1992.

[42] Biot, M. A. *Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid II High-frequency range*. Journal of the Acoustic Society of America 28, pg.168-178, 1956.

[43] Wilson, D. K. *Relaxation-matched modeling of propagation through porous media including fractal pore structure*. Journal of the Acoustic Society of America 94, pg. 1136-1145, 1993.

[44] Fouladi, M. H., Ayub, M. e Nor, M. J. M. *Analysis of coir fiber acoustical characteristic*. Applied Acoustics 72, pg. 35-42, 2011.

[45] Ramis, J., del Rey, R., Alba, J. e Godinho, J. *Un modelo para materiales absorbentes acústicos derivados de la fibra de coco*. - https://www.researchgate.net/publication/263766862_A_model_for_acoustic_absorbent_materials_derived_from_coconut_fiber. Acedido em 17 de março de 2021.

[46] Silva, G. M. S., Magalhães, M. C. e Gumieri, A. G. *Comparative Study of Sound Absorption System Composed of Multilayered Panels*. ICSV 17, julho, Cairo, 2010.

[47] Asdrubali, F., Schiavoni, S e Horoshenkov, K. V. *A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications*. Building Acoustics 19(4) pg. 283-312, 2012.

[48] Fouladi, M. H., Nor, M. J. M., Ayub, M. e Leman, Z. A. *Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel*. Applied Acoustics 71, pg. 241-249, 2010.

- [49] Departamento de arquitetura, Ambiente e Engenharia de construção do Politécnico de Milão, Amorim Cork Composities. *Ecosustainable innovative surfaces for tailored acoustics*. 14/01/2021.
- [50] Godinho, L., Amado Mendes, P., Patraquim, R. e Jordão, A. *Avaliação do comportamento acústico de painéis ressonantes incorporando telas acústicas*. 42º Congresso Espanhol de Acústica, Cáceres, 2011.
- [51] Rainho, L. P. T. *A utilização de materiais reciclados na construção para melhoria do desempenho térmico e acústico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2013.
- [52] Oldham, D. J., Egan, C. A. e Cookson, R. D. *Sustainable acoustic absorbers from the biomass*. *Applied Acoustics* 72, pg. 350-363, 2011.
- [53] NP EN ISO 354, *Acústica. Medição da absorção sonora em câmara reverberante*. Portugal, 2007.

ANEXOS - A

FREQ	TR ref.	TR SP		TR PC			TR PR	
		SP 1	SP 2	PC c	PC n	PC m	PR p	PR n
100	14,23	10,96	9,51	12,12	12,41	12,81	12,43	12,49
125	11,53	7,80	6,79	8,19	10,04	9,96	10,23	10,07
160	11,20	5,50	4,43	8,07	10,10	10,23	9,79	9,77
200	10,94	4,44	3,74	7,35	9,18	9,57	8,95	9,25
250	10,22	3,66	3,78	6,74	8,37	8,33	8,04	8,39
315	10,66	3,47	3,72	6,09	7,78	7,75	7,39	7,72
400	11,39	3,96	4,18	5,89	7,71	7,42	7,10	7,60
500	11,31	4,22	4,21	5,18	6,63	6,71	5,85	6,48
630	10,69	4,41	4,35	4,49	5,39	6,15	4,66	5,17
800	9,71	4,52	4,27	3,80	4,20	5,72	3,60	3,96
1k	8,78	4,37	4,11	3,12	2,88	4,98	2,63	2,74
1,25k	7,81	4,11	3,99	2,76	2,45	4,23	2,31	2,46
1,6k	6,90	3,89	3,77	2,86	2,40	3,38	2,42	2,54
2k	6,04	3,60	3,53	3,06	2,33	2,92	2,59	2,53
2,5k	5,37	3,34	3,28	3,10	2,27	2,80	2,64	2,42
3,15k	4,59	2,99	2,96	3,02	2,19	2,70	2,54	2,29
4k	3,59	2,54	2,57	2,74	2,19	2,57	2,31	2,25
5k	2,82	2,08	2,13	2,25	2,03	2,30	1,98	1,99
		s	s	s			s	
		10,58	10,70	10,58			10,58	

A 1 – Valores do tempo de reverberação para cada amostra.

Temperatura t	18,7	18,7	18,9	19	20	19	20	20
Humidade	56,3	56,3	56,9	60	60	60	60	60
Volume V	208							
celeridade C	342,22	342,22	342,34	342,4	343	342,4	343	343

A 2 – Valores das condições termo-higométricas, volume da câmara reverberante e da celeridade.

Coef de atenuação (dB/km)																
15 °			20°			19 °	15 °			20°			19 °	20 °	19 °	
50%	60%	56%	50%	60%	56%		50%	60%	57%	50%	60%	57%		60%	60%	
0.326	0.285	0.301	0.284	0.252	0.265	0.272	0.326	0.285	0.297	0.284	0.252	0.262	0.269	0.252	0.259	
0.479	0.426	0.447	0.445	0.386	0.410	0.417	0.479	0.426	0.442	0.445	0.386	0.404	0.411	0.386	0.394	
0.681	0.621	0.645	0.660	0.582	0.613	0.620	0.681	0.621	0.639	0.660	0.582	0.605	0.612	0.582	0.590	
0.930	0.874	0.896	0.960	0.858	0.899	0.898	0.930	0.874	0.891	0.960	0.858	0.889	0.889	0.858	0.861	
1.220	1.180	1.196	1.320	1.230	1.266	1.252	1.220	1.180	1.192	1.320	1.230	1.257	1.244	1.230	1.220	
1.530	1.530	1.530	1.750	1.680	1.708	1.672	1.530	1.530	1.530	1.750	1.680	1.701	1.667	1.680	1.650	
1.870	1.910	1.894	2.230	2.210	2.218	2.153	1.870	1.910	1.898	2.230	2.210	2.216	2.152	2.210	2.150	
2.240	2.310	2.282	2.730	2.790	2.766	2.669	2.240	2.310	2.289	2.730	2.790	2.772	2.675	2.790	2.694	
2.690	2.750	2.726	3.270	3.400	3.348	3.224	2.690	2.750	2.732	3.270	3.400	3.361	3.235	3.400	3.270	
3.290	3.310	3.302	3.890	4.050	3.986	3.849	3.290	3.310	3.304	3.890	4.050	4.002	3.862	4.050	3.902	
4.160	4.060	4.100	4.660	4.800	4.744	4.615	4.160	4.060	4.090	4.660	4.800	4.758	4.624	4.800	4.652	
5.490	5.170	5.298	5.750	5.780	5.768	5.674	5.490	5.170	5.266	5.750	5.780	5.771	5.670	5.780	5.658	
7.550	6.860	7.136	7.370	7.170	7.250	7.227	7.550	6.860	7.067	7.370	7.170	7.230	7.197	7.170	7.108	
10.800	9.500	10.020	9.860	9.250	9.494	9.599	10.800	9.500	9.890	9.860	9.250	9.433	9.524	9.250	9.300	
15.900	13.600	14.520	13.700	12.500	12.980	13.288	15.900	13.600	14.290	13.700	12.500	12.860	13.146	12.500	12.720	
23.800	20.100	21.580	19.800	17.500	18.420	19.052	23.800	20.100	21.210	19.800	17.500	18.190	18.794	17.500	18.020	
36.200	30.300	32.660	29.400	25.400	27.000	28.132	36.200	30.300	32.070	29.400	25.400	26.600	27.694	25.400	26.380	
55.400	46.200	49.880	44.400	37.900	40.500	42.376	55.400	46.200	48.960	44.400	37.900	39.850	41.672	37.900	39.560	
						SP1								SP2	PCn, PRp e PRn	PCc e PCm

A 3 – Cálculo dos valores do coeficiente de atenuação por interpolação de acordo com as condições termo-higométricas.

Freq. Hz	TR ref.	m						
		SP 1	SP 2	PC c	PC n	PC m	PR p	PR n
100	6,2658E-05	6,266E-05	6,188E-05	5,954E-05	5,803E-05	5,954E-05	5,803E-05	5,954E-05
125	9,60455E-05	9,605E-05	9,471E-05	9,072E-05	8,888E-05	9,072E-05	8,888E-05	9,072E-05
160	0,000142659	1,427E-04	1,409E-04	1,358E-04	1,340E-04	1,358E-04	1,340E-04	1,358E-04
200	0,000206846	2,068E-04	2,047E-04	1,983E-04	1,976E-04	1,983E-04	1,976E-04	1,983E-04
250	0,000288284	2,883E-04	2,864E-04	2,809E-04	2,832E-04	2,809E-04	2,832E-04	2,809E-04
315	0,000385085	3,851E-04	3,838E-04	3,799E-04	3,868E-04	3,799E-04	3,868E-04	3,799E-04
400	0,000495793	4,958E-04	4,956E-04	4,951E-04	5,089E-04	4,951E-04	5,089E-04	4,951E-04
500	0,000614606	6,146E-04	6,160E-04	6,203E-04	6,424E-04	6,203E-04	6,424E-04	6,203E-04
630	0,000742262	7,423E-04	7,449E-04	7,529E-04	7,829E-04	7,529E-04	7,829E-04	7,529E-04
800	0,000886312	8,863E-04	8,894E-04	8,985E-04	9,325E-04	8,985E-04	9,325E-04	8,985E-04
1000	0,00106269	1,063E-03	1,065E-03	1,071E-03	1,105E-03	1,071E-03	1,105E-03	1,071E-03
1250	0,001306488	1,306E-03	1,306E-03	1,303E-03	1,331E-03	1,303E-03	1,331E-03	1,303E-03
1600	0,001664125	1,664E-03	1,657E-03	1,637E-03	1,651E-03	1,637E-03	1,651E-03	1,637E-03
2000	0,002210299	2,210E-03	2,193E-03	2,141E-03	2,130E-03	2,141E-03	2,130E-03	2,141E-03
2500	0,003059677	3,060E-03	3,027E-03	2,929E-03	2,878E-03	2,929E-03	2,878E-03	2,929E-03
3150	0,004386888	4,387E-03	4,327E-03	4,149E-03	4,030E-03	4,149E-03	4,030E-03	4,149E-03
4000	0,006477637	6,478E-03	6,377E-03	6,074E-03	5,849E-03	6,074E-03	5,849E-03	6,074E-03
5000	0,009757441	9,757E-03	9,595E-03	9,109E-03	8,727E-03	9,109E-03	8,727E-03	9,109E-03

A 4 – Cálculo dos valores do coeficiente de atenuação devido a presença do ar, m.

FREQ	TR ref.	A						
		SP 1	SP 2	PC c	PC n	PC m	PR p	PR n
100	2,31	3,01	3,48	2,72	2,65	2,57	2,65	2,64
125	2,84	4,23	4,87	4,03	3,27	3,30	3,20	3,25
160	2,88	5,99	7,47	4,05	3,21	3,17	3,31	3,32
200	2,90	7,40	8,81	4,41	3,49	3,35	3,58	3,46
250	3,05	8,94	8,65	4,75	3,77	3,80	3,94	3,76
315	2,83	9,37	8,71	5,20	3,99	4,02	4,22	4,03
400	2,54	8,08	7,63	5,29	3,93	4,12	4,30	4,00
500	2,46	7,45	7,47	5,97	4,52	4,49	5,20	4,66
630	2,53	7,00	7,10	6,86	5,57	4,84	6,54	5,86
800	2,72	6,70	7,13	8,09	7,21	5,13	8,54	7,72
1k	2,94	6,81	7,29	9,88	10,72	5,85	11,83	11,35
1,25k	3,22	7,09	7,33	11,09	12,58	6,86	13,41	12,55
1,6k	3,49	7,26	7,53	10,38	12,60	8,58	12,48	11,84
2k	3,73	7,50	7,69	9,20	12,62	9,72	11,18	11,47
2,5k	3,71	7,52	7,73	8,40	12,38	9,56	10,31	11,42
3,15k	3,67	7,59	7,75	7,67	11,96	8,99	9,85	11,19
4k	3,97	7,84	7,77	7,21	10,45	8,02	9,65	9,85
5k	3,80	8,04	7,79	7,35	9,26	7,03	9,68	9,27

A 5 – Cálculo dos valores da área de absorção sonora equivalente, A.

FREQ	TR ref.	Absorção sonora equivalente As total						
		SP 1	SP 2	PC c	PC n	PC m	PR p	PR n
100	2,31	0,70	1,17	0,41	0,34	0,26	0,34	0,33
125	2,84	1,39	2,03	1,19	0,43	0,46	0,37	0,42
160	2,88	3,11	4,58	1,17	0,33	0,29	0,43	0,44
200	2,90	4,50	5,91	1,51	0,59	0,45	0,68	0,56
250	3,05	5,89	5,60	1,70	0,72	0,75	0,89	0,71
315	2,83	6,53	5,88	2,37	1,16	1,19	1,38	1,20
400	2,54	5,54	5,09	2,75	1,39	1,58	1,76	1,46
500	2,46	4,99	5,01	3,51	2,06	2,03	2,74	2,20
630	2,53	4,48	4,58	4,33	3,04	2,31	4,02	3,33
800	2,72	3,97	4,40	5,37	4,48	2,40	5,82	5,00
1k	2,94	3,86	4,35	6,93	7,78	2,91	8,89	8,40
1,25k	3,22	3,87	4,12	7,87	9,36	3,64	10,19	9,33
1,6k	3,49	3,77	4,05	6,90	9,11	5,09	9,00	8,35
2k	3,73	3,77	3,97	5,47	8,89	6,00	7,45	7,75
2,5k	3,71	3,80	4,01	4,69	8,66	5,85	6,59	7,71
3,15k	3,67	3,92	4,08	4,00	8,29	5,32	6,18	7,52
4k	3,97	3,87	3,80	3,23	6,47	4,04	5,68	5,88
5k	3,80	4,24	3,99	3,55	5,46	3,23	5,88	5,47

A 6 – Cálculo dos valores da área de absorção sonora equivalente total, As.

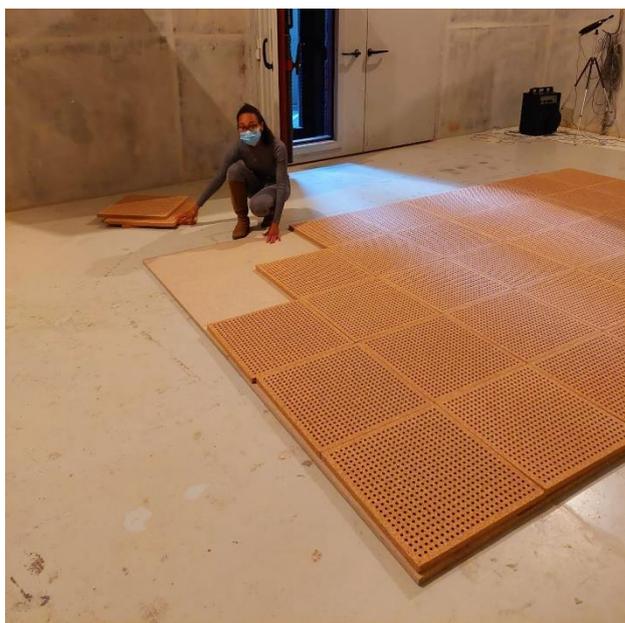
FREQ	Coeficiente absorção sonora alpha						
	SP 1	SP 2	PC c	PC n	PC m	PR p	PR n
100	0,07	0,11	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03
125	0,13	0,19	0,11	0,04	0,04	0,03	0,04
160	0,29	0,43	0,11	0,03	0,03	0,04	0,04
200	0,43	0,55	0,14	0,06	0,04	0,06	0,05
250	0,56	0,52	0,16	0,07	0,07	0,08	0,07
315	0,62	0,55	0,22	0,11	0,11	0,13	0,11
400	0,52	0,48	0,26	0,13	0,15	0,17	0,14
500	0,47	0,47	0,33	0,20	0,19	0,26	0,21
630	0,42	0,43	0,41	0,29	0,22	0,38	0,32
800	0,38	0,41	0,51	0,42	0,23	0,55	0,47
1000	0,37	0,41	0,66	0,74	0,28	0,84	0,79
1250	0,37	0,39	0,74	0,89	0,34	0,96	0,88
1600	0,36	0,38	0,65	0,86	0,48	0,85	0,79
2000	0,36	0,37	0,52	0,84	0,57	0,70	0,73
2500	0,36	0,38	0,44	0,82	0,55	0,62	0,73
3150	0,37	0,38	0,38	0,78	0,50	0,58	0,71
4000	0,37	0,35	0,31	0,61	0,38	0,54	0,56
5000	0,40	0,37	0,34	0,52	0,31	0,56	0,52

A 7 – Determinação do coeficiente de absorção sonora, α .

ANEXOS - B



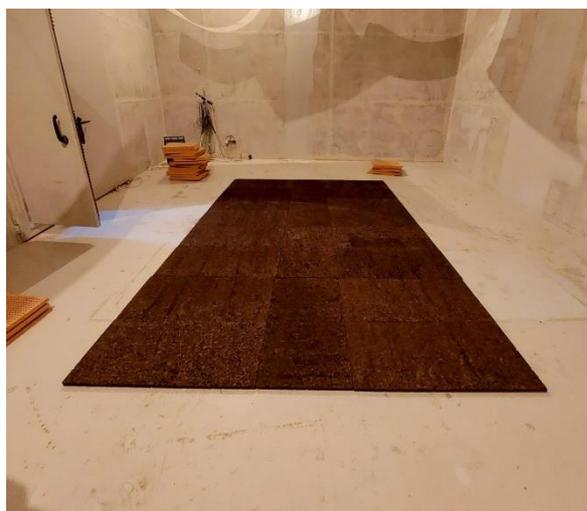
B 1 e 2 – Amostra sem perfuração e sua respectiva montagem por camadas.



B 3 e 4 – Amostra com perfuração circular e sua respectiva montagem por camadas.



B 5 e 6 – Amostra com perfuração em ranhura e sua respectiva montagem por camadas.



B 7 e 8 – Montagem das camadas de fibra de coco e aglomerado negro de cortiça.