



João Samuel Ferreira Cação Ribeiro

# CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE MATERIAIS E SOLUÇÕES DE ABSORÇÃO SONORA

A CONTRIBUTION FOR THE STUDY OF SOUND ABSORPTION MATERIALS AND  
SOLUTIONS

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no Ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano,  
orientada pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes

Coimbra, 5 de março de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

João Samuel Ferreira Cação Ribeiro

# **CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE MATERIAIS E SOLUÇÕES DE ABSORÇÃO SONORA**

## **A CONTRIBUTION FOR THE STUDY OF SOUND ABSORPTION MATERIALS AND SOLUTIONS**

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no Ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano,  
orientada pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes

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

Coimbra, 5 de março de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os meus familiares, mesmo os que não estão presentes fisicamente, por terem demonstrado incessável e indefinivelmente o poder, a força e a plenitude do amor. Pelo apoio incondicional em todos os momentos.

À Mónica, por complementar a minha vida e por todo o carinho, dedicação, paciência e compreensão mas, principalmente, pelo amor que me transmitiu ao longo dos últimos anos em comum.

Ao Professor Doutor Luis Godinho e ao Professor Doutor Paulo Mendes, orientadores desta dissertação, por todas as indicações teóricas e metodológicas desde do início do trabalho, pela partilha do conhecimento e por todos os ensinamentos transmitidos.

A todos os meus amigos, por todo o apoio e por serem a minha fonte de descontração e divertimento nos momentos que necessitei.

A todos aqueles que me ajudaram a tornar possível este trabalho. Muito Obrigado...

## RESUMO

Na busca de novos sistemas de painéis acústicos, por forma a melhorar o condicionamento acústico das salas, o tecido empresarial e o público em geral têm vindo a procurar as melhores características a nível técnico e estético nestes materiais. Vários autores têm vindo a trabalhar no desenvolvimento de metodologias de previsão do comportamento acústico e na avaliação da introdução de materiais com características diferentes. Uma das soluções recentemente utilizadas no condicionamento acústico são os painéis de madeira microperfurados ou microranhurados.

No presente trabalho, realiza-se uma comparação de resultados teóricos e experimentais para a avaliação do comportamento desses painéis no sistema acústico, ao nível da absorção sonora. Foi levada a cabo uma campanha de 118 ensaios experimentais, realizados de acordo com a norma ISO 10534-2. Nesta campanha, foram avaliados vários aspetos dos sistemas acústicos: o posicionamento dos painéis, as características geométricas das perfurações do painel e os tipos de material utilizados. Foram analisados painéis microperfurados e microranhurados com diferentes características. Adicionalmente foram estudados painéis absorventes porosos (espumas e aglomerado de espumas de poliuretano) e fibrosos (lãs minerais, fibras de poliéster e aglomerado de tecidos). Através destes ensaios comparou-se o resultado do cálculo do modelo numérico e aferiu-se o algoritmo desse mesmo modelo, tendo este obtido bom resultado.

Conclui-se que existe uma maior absorção sonora nas médias frequências quando a caixa-de-ar se localiza entre os materiais. Mas, quando o seu posicionamento é junto da superfície rígida, a maior absorção sonora observa-se nas altas frequências. Importa ainda referir que os painéis perfurados que possuem formas circulares são os que apresentam melhor desempenho acústico. Os dados revelam igualmente que os materiais absorventes compostos por fibras são os que oferecem uma absorção sonora melhor.

Os resultados atingidos revelam-se promissores e detentores de grande potencial futuro na construção civil, com particular ênfase no condicionamento acústico de salas.

**Palavras-chave:** Absorção sonora, Impedância, Painéis microperfurados, Painéis microranhurados, Sistemas multicamada.

---

## ABSTRACT

In the search for new panel-based acoustic systems, to improve room acoustics conditioning, the companies and the general public have been looking for the best technical and aesthetic characteristics in these materials. Several authors have been working on the development of methodologies for predicting acoustic behavior and evaluating the introduction of materials with different characteristics. One of the recently used solutions in acoustic conditioning is the microperforated or microslited wood panels.

In this investigation, a comparison of theoretical and experimental results is made to predict the behavior of these acoustic systems in terms of acoustic absorption. A campaign of 118 experiments was carried out, in accordance with ISO 10534-2 standard. Several aspects of the acoustic systems were evaluated: the positioning of the panels, the geometric characteristics of the perforations of the panel, the types of material used. microperforated or microslited wood panels with different characteristics were analyzed. Porous absorbent panels (foams and foam agglomerates in polyurethane) and fibrous absorbent panels (mineral wool, polyester fibers and agglomerate of fabrics) were studied. Through these tests the result of the numerical model was compared and the algorithm of the model was validated, obtaining a good result.

It is concluded that there is a greater sound absorption in the medium range of frequencies when the air gap is located between the materials. But when its positioning is adjacent to the rigid surface, the highest sound absorption occurred at higher frequencies. It should also be noted that perforated panels that have circular holes have the best acoustic performance. The facts also show that absorbent materials composed of fibers provide the best acoustic absorption.

The results achieved are promising and have great future potential for civil construction, with particular emphasis on the acoustic conditioning of rooms.

**Key words:** Acoustic absorption, Impedance, Microperforated panels, Microslited panels, Multilayer systems.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE QUADROS .....	viii
ABREVIATURAS .....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral .....	2
1.2 Motivação .....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da dissertação .....	5
2 PARÂMETROS ACÚSTICOS .....	6
2.1 Conceitos gerais de propagação do som .....	6
2.1.1 Velocidade do som .....	6
2.1.2 Equação de onda.....	7
2.1.3 Impedância característica do meio .....	7
2.1.4 Ressonador de Helmholtz.....	7
2.1.5 Absorção sonora .....	8
2.1.6 Tempo de reverberação .....	9
2.2 Documentação legal e normas .....	10
3 ESTADO DA ARTE .....	12
3.1 Materiais fibrosos ou porosos .....	12
3.2 Painéis perfurados.....	13
3.3 Painéis acústicos com materiais sustentáveis .....	15
3.4 Nota final .....	16
4 METODOLOGIAS DE ANÁLISE .....	18
4.1 Avaliação teórica da absorção sonora.....	18
4.1.1 Modelo para painel perfurado .....	18
4.1.2 Modelo para painel ranhurado.....	21
4.1.3 Modelo para materiais porosos.....	22
4.1.4 Modelo para sistemas multicamada.....	22

---

4.2	Ensaio em tubo de impedância .....	24
4.3	Descrição das amostras .....	26
5	CASOS DE ESTUDO .....	30
5.1	Caracterização e descrição das combinações de amostras.....	30
5.2	Resultados do ensaio laboratorial com o tubo de impedância .....	34
5.2.1	Painel microperfurado .....	34
5.2.2	Painel microranhurado.....	37
5.2.3	Material absorvente poroso .....	40
5.2.4	Material absorvente fibroso .....	41
5.3	Resultados da aplicabilidade do modelo numérico.....	43
5.3.1	Painel microperfurado .....	43
5.3.2	Painel microranhurado.....	44
5.3.3	Desempenho do sistema de painel microperfurado com alteração da caixa-de-ar. 45	
5.3.4	Desempenho do sistema de painel microranhurado com alteração da caixa-de-ar. 47	
5.4	Discussão de resultados .....	48
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	50
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
	ANEXO .....	1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema da cavidade de ressoador de Helmholtz [3].....	8
Figura 2.2 – Comportamento mecânico do ressoador de Helmholtz [3].....	8
Figura 4.1 – Esquema da representação da interação entre furos.....	20
Figura 4.2 – Esquema do sistema de painel acústico multicamada.....	24
Figura 4.3 - Esquema genérico do ensaio em tubo de impedância.....	26
Figura 4.4 - Imagem do equipamento de ensaio.....	26
Figura 4.5 – Painéis microperfurados.....	28
Figura 4.6 - Painéis microranhurados.....	28
Figura 4.7 – Material absorvente fibroso, lã mineral. ....	29
Figura 4.8 – Material absorvente fibroso e poroso, fibra de poliéster e espumas poliuretano flexível célula aberta.....	29
Figura 4.9 – Material absorvente fibroso, aglomerados de espumas e aglomerado de fibras de tecido.....	29
Figura 5.1 – Esquema de montagem do sistema, com painel perfurado+caixa-de-ar+material absorvente. ....	31
Figura 5.2 – Esquema de montagem do sistema, com painel perfurado +material absorvente+caixa-de-ar.....	31
Figura 5.3 – Curva de absorção sonora dos materiais absorventes. ....	33
Figura 5.4 – Painel MDF com revestimento em termolaminado microperfurado com diâmetro de perfuração de $\varnothing = 0,5\text{mm}$ .....	33
Figura 5.5 – Painel MDF microperfurado com placa macroperfurada no tardo com diâmetro de $\varnothing = 8\text{mm}$ .....	33
Figura 5.6 – Painel MDF microranhurado com ranhuras com largura de $t = 0,2\text{mm}$ . ....	34
Figura 5.7 – Placa de termolaminado microranhurado com ranhuras com largura de $t = 0,5\text{mm}$ . ....	34
Figura 5.8 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “3”+caixa-de-ar+material poroso.....	35
Figura 5.9 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “3” +material poroso”+caixa-de-ar. ....	35
Figura 5.10 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “3”+caixa-de-ar+material fibroso. ....	36

---

Figura 5.11 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “3” +material fibroso”+caixa-de-ar.....	36
Figura 5.12 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “I”+caixa- de-ar+material poroso.....	38
Figura 5.13 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “I” +material poroso+caixa-de-ar.....	38
Figura 5.14 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “I”+caixa- de-ar+material fibroso. ....	39
Figura 5.15 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “I” +material fibroso”+caixa-de-ar.....	39
Figura 5.16 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painéis perfurados+caixa-de-ar+material poroso “A”. ....	40
Figura 5.17 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painéis perfurados +material poroso “A”+caixa-de-ar. ....	41
Figura 5.18 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painéis perfurados+caixa-de-ar+material fibroso “b”.....	42
Figura 5.19 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painéis perfurados +material fibroso “b”+caixa-de-ar.....	42
Figura 5.20 – Curva de absorção sonora experimental e teórica, para a configuração painel “3”+caixa-de-ar+lã mineral “b”.....	43
Figura 5.21 – Curva de absorção sonora experimental e teórica, para a configuração painel “3” +lã mineral “b”+caixa-de-ar.....	44
Figura 5.22 – Curva de absorção sonora experimental e teórica, para a configuração painel “I”+caixa-de-ar+aglomerado de espumas “A”. ....	44
Figura 5.23 – Curva de absorção sonora experimental e teórica, para a configuração painel “I” +aglomerado de espumas “A”+caixa-de-ar.....	45
Figura 5.24 – Curva de absorção sonora teórica, para a configuração painel “3”+caixa-de- ar+lã mineral “b”. ....	46
Figura 5.25 – Curva de absorção sonora teórica, para a configuração painel “3” +lã mineral “b”+caixa-de-ar. ....	46
Figura 5.26 – Curva de absorção sonora teórica, para a configuração painel “I”+caixa-de- ar+aglomerado de espumas “A”. ....	47
Figura 5.27 – Curva de absorção sonora teórica, para a configuração painel “I” +aglomerado de espumas “A”+caixa-de-ar. ....	47

---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Limites dos tempos de reverberação impostos pelo RRAE. ....	10
Quadro 4.1 – Resumo descritivo das amostras de painel microperfurado e microranhurado. ....	27
Quadro 4.2 - Resumo descritivo das amostras de material absorvente. ....	28
Quadro 5.1 – Amostragem para composição do sistema acústico a ensaiar. ....	32
Quadro A.1 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, dos materiais absorventes. ....	A.1
Quadro A.2 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com painel microperfurado “1”+caixa-de-ar+material absorvente. ....	A.1
Quadro A.3 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “2”+caixa-de-ar+material absorvente. ....	A.2
Quadro A.4 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “3”+caixa-de-ar+material absorvente. ....	A.2
Quadro A.5 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “4”+caixa-de-ar+material absorvente. ....	A.3
Quadro A.6 - - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microranhurado “I” +caixa-de-ar+material absorvente. ....	A.3
Quadro A.7 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microranhurado “II”+caixa-de-ar+material absorvente. ....	A.4
Quadro A.8 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “1”+material absorvente +caixa-de-ar. ....	A.4
Quadro A.9- Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “2”+material absorvente +caixa-de-ar. ....	A.5
Quadro A.10 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “3”+material absorvente +caixa-de-ar. ....	A.5
Quadro A.11 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “4” +material absorvente +caixa-de-ar. ....	A.6
Quadro A.12 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microranhurado “I”+material absorvente +caixa-de-ar. ....	A.6
Quadro A.13 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microranhurado “II”+material absorvente +caixa-de-ar. ....	A.7

---

Quadro A.14 – Avaliação dos resultados experimentais e teóricos, para a configuração painel microperfurado “3”+caixa-de-ar+lã mineral “b”.....	A.7
Quadro A.15 – Avaliação dos resultados experimentais e teóricos, para a configuração painel microperfurado “3” +lã mineral “b”+caixa-de-ar.....	A.8
Quadro A.16 – Avaliação dos resultados experimentais e teóricos, para a configuração painel microranhurado “I” +caixa-de-ar+aglomerado de espumas “A”. .....	A.8
Quadro A.17 – Avaliação dos resultados experimentais e teóricos, para a configuração painel microranhurado “I” aglomerado de espumas “A”+caixa-de-ar+. .....	A.9
Quadro A.18 – Avaliação da espessura de caixa-de-ar, para a configuração painel microperfurado “3”+caixa-de-ar+lã mineral “b”.....	A.9
Quadro A.19 – Avaliação da espessura de caixa-de-ar, para a configuração painel microperfurado “3” +lã mineral “b”+caixa-de-ar.....	A.10
Quadro A.20 – Avaliação da espessura de caixa-de-ar, para a configuração painel microranhurado “I” +caixa-de-ar+aglomerado de espumas “A”. .....	A.10
Quadro A.21 – Avaliação da espessura de caixa-de-ar, para a configuração painel microranhurado “I” +aglomerado de espumas “A”+caixa-de-ar.....	A.11

## **ABREVIATURAS**

ASTM – American Society for Testing & Materials.

CNC – Comando Numérico Computadorizado.

EN – European Norm.

HDF – High Density Fiberboard.

HPL – High-Pressure Laminate.

ISO – International Organization for Standardization.

MDF – Medium Density Fiberboard.

RGR – Regulamento Geral do Ruído.

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

## 1 INTRODUÇÃO

O desempenho acústico das salas assume-se cada vez mais como um importante critério de comodidade. De entre as possíveis variações do desempenho, pode-se referir as características dimensionais, o tipo de utilização da sala e os materiais presentes no seu interior.

Neste sentido, afigura-se que a adequabilidade acústica da sala, para um determinado tipo de utilização, pode ser alcançada através do revestimento das superfícies do compartimento com diferentes sistemas acústicos, onde os painéis acústicos são uma relevante opção. Este tipo de painéis assumem-se como fundamentais para limitar as reverberações produzidas no interior. Nesta linha de apreciação, os painéis acústicos podem ser difusores acústicos ou painéis absorventes. Os equipamentos e procedimentos em causa são muito variados, podendo ser realizados com materiais de diferentes naturezas, como é caso da madeira, do gesso cartonado, do policarbonato e de materiais porosos ou fibrosos (tecidos ou lã mineral, por exemplo).

Usualmente os sistemas de painéis acústicos são compostos por um primeiro painel perfurado, seguindo-se o material poroso no tardo. Esta combinação é uma boa solução para absorção sonora em várias frequências, sendo sistemas que combinam os materiais porosos, uma caixa-de-ar e os ressoadores acústicos. Neste contexto de caracterização, o material poroso pode ser, por exemplo, uma espuma de poliuretano e os ressoadores acústicos um painel perfurado [1]. O funcionamento do conjunto, painel perfurado e a caixa-de-ar, assemelha-se a uma grelha de ressoadores de Helmholtz.

No que toca à propagação das ondas sonoras, esta pode ocorrer nos três estados do meio (gasoso, líquido e sólido). Em particular, o comportamento acústico das salas é estudado através da propagação das ondas sonoras em meio gasoso. De notar que o estudo do condicionamento acústico dos compartimentos fechados pressupõe a análise das fontes de ruído, da propagação das ondas sonoras e da envolvente do compartimento. O desempenho acústico do compartimento assenta, assim, no comportamento da energia incidente nos materiais instalados na envolvente. Por outras palavras, esse comportamento acústico é determinado pela absorção ou dissipação da energia nesses materiais [2].

Neste enquadramento, é facilmente perceptível que o desempenho acústico da sala depende do seu volume, da geometria, dos revestimentos instalados no seu interior, da localização das

---

fontes sonoras e do espectro de frequências do som emitido [3], e que o condicionamento acústico procura introduzir no compartimento as características ideais à finalidade da sala. No mercado, existe uma diversa gama de soluções construtivas de painéis acústicos. A título de exemplo, podemos encontrar painéis com uma elevada absorção sonora, mas com um aspeto visual desagradável ou painéis com um bom desempenho acústico e um bom aspeto arquitetónico, porém com um elevado custo de fabrico, como é o caso dos painéis microperfurados. É neste contexto de caracterização que surge este trabalho, que visa o estudo de materiais e soluções de absorção sonora, no âmbito dos painéis acústicos microperfurados e microranhurados.

### **1.1 Enquadramento geral**

Os painéis usados no tratamento acústico de um espaço são usualmente realizados em madeira, gesso ou policarbonato. Dos três, a madeira é o material mais utilizado na carpintaria de limpos. Tradicionalmente, na construção dos edifícios, é igualmente o material que é aplicado nos revestimentos de piso, de teto e de paredes, caracterizando-se tanto pela sua fácil aplicação como pelo seu bom aproveitamento, tanto físico como estético. De facto, é um material que tem despertado o interesse da comunidade técnica e científica, uma vez que permite soluções acústicas suficientemente avançadas e competitivas a nível económico [4].

No que toca aos materiais fibrosos e porosos, estes são também materiais utilizados na construção de edifícios. Regra geral, as lãs minerais para isolamentos e os tecidos para decoração dos espaços interiores.

Como referido anteriormente, os sistemas de painéis para condicionamento acústico servem para limitar as reverberações produzidas no interior de espaços fechados. A absorção sonora oferecida pelos painéis absorventes resulta da combinação de vários tipos de comportamentos, designadamente de ressoadores acústicos, assemelhando-se a ressoadores de Helmholtz, e de materiais porosos.

Para uma melhor solução acústica, os vários tipos de absorventes acústicos podem ser dispostos em várias camadas, ou seja, utilizando diferentes combinações de posições dos diferentes tipos de material disponíveis. Desta forma, poderemos tirar proveito das características acústicas de cada tipo de material utilizado, tendo em atenção que os painéis perfurados têm uma maior absorção nas médias frequências e os materiais porosos nas altas frequências. Quanto aos aspetos estéticos desses painéis, o impacto visual é também uma característica que tem vindo cada vez mais a ser melhorada.

No condicionamento acústico dos espaços fechados, recorre-se a vários indicadores para a sua caracterização, sendo o tempo de reverberação o parâmetro mais frequente. Outros critérios de qualidade acústica são objeto de estudo dos especialistas, procurando aferir com maior rigor quais os mais indicados e os seus valores [3]. De facto, no âmbito dos estudos desenvolvidos nesta área, têm-se vindo a procurar as melhores e mais eficazes soluções. Contudo, dadas as variáveis como o tipo de construção, o local do compartimento no edificado ou os utilizadores do compartimento, torna-se por vezes difícil determinar soluções acústicas que melhorem o desempenho acústico dos espaços.

Ao nível da regulamentação interna do país, temos o Regulamento Geral do Ruído (RGR) e o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), onde são estabelecidos os zonamentos de níveis máximos de produção de ruído [5] e os limites máximos dos índices de isolamento sonoro e de tempo de reverberação no interior das salas para diferentes tipologias de edifícios [6]. Estes regulamentos não estabelecem parâmetros ou valores no que toca à absorção sonora, mas impõem um valor máximo para o tempo de reverberação. Numa linha simplificativa pode-se referir que a comodidade acústica como o condicionamento acústico no interior dos espaços fechados ficam ao critério do projetista acústico, que por sua vez nos casos mais simples se restringe ao tempo de reverberação, um parâmetro diretamente relacionado com a absorção sonora da sala.

## **1.2 Motivação**

A aplicabilidade dos painéis acústicos no mercado da construção civil é cada vez mais recorrente, assumindo uma posição de relevo no âmbito da qualidade acústica dos edifícios e, conseqüentemente, como algo muito importante para o bem-estar físico e psíquico dos indivíduos [2]. Este tipo de soluções construtivas são aplicadas em diversos espaços distintos e com diferentes finalidades.

Os painéis acústicos mais produzidos são em madeira (normalmente são painéis de aglomerado de madeira, MDF, HDF ou HPL), principalmente pelo baixo preço no mercado, pelo alcance das formas e por motivos estéticos. Seguem-se o policarbonato, os materiais fibrosos (exemplo: os tecidos) e, por fim, os materiais porosos (exemplo: as espumas flexíveis de poliuretano).

No que toca aos painéis acústicos de madeira, os perfurados e os ranhurados são os mais usuais. Neste tipo de painéis as dimensões dos entalhes podem variar entre 1 mm e 20 mm, ao passo que o espaçamento pode ir a 16 mm ou múltiplos. Esta variação de dimensões pode resultar de uma limitação decorrente do tipo de máquinas de carpintaria industrial (por exemplo: as máquinas de CNC e as respetivas ferramentas) e acarretar um aspeto visual menos agradável ao utilizador. A título de exemplo, nos painéis de madeira com perfurações de 2 mm, ou

---

superiores, a visualização do seu interior (normalmente os painéis de material poroso em lâmina mineral) como do respetivo sistema torna-o esteticamente pouco agradável. Por forma a colmatar este aspeto tem-se vindo a introduzir uma tela de tecido no tardo do painel de madeira.

Na carpintaria industrial têm-se vindo a introduzir ferramentas e maquinaria com maior precisão, podendo assim alcançar formas diferentes e mais agradáveis. Com esse avanço tecnológico é agora possível a produção de painéis com entalhes menores, ou seja com dimensões da ordem dos 0.1 mm e dos 0.2 mm.

Numa perspetiva de avaliação dos painéis microperfurados e microranhurados com entalhes com as dimensões atrás indicadas pode-se referir que, se por um lado este tipo de painéis tem a vantagem de oferecer uma boa absorção sonora, devido à semelhança dos materiais porosos e um agradável aspeto visual, por outro lado a utilização de ferramentas de alta precisão torna o custo de fabrico elevado. Por forma a minimizar este custo, recorre-se à previsão do desempenho acústico, através do cálculo numérico da determinada solução acústica.

Caraterísticas como a geometria dos painéis acústicos (o diâmetro de perfuração, a largura da ranhura, o espaçamento entre cada “vazio” do painel e a espessura do painel), a espessura da caixa-de-ar e o seu preenchimento, mas também as características da resistividade ao fluxo de ar dos materiais porosos ou fibrosos contribuem de diferentes modos para a eficiência acústica da solução construtiva do supracitado painel. Para um melhor entendimento do comportamento acústico das soluções propõe-se o desenvolvimento desta dissertação, tendo como motivação uma melhor definição do modelo numérico a utilizar como ferramenta de previsão de desempenho acústico da solução de painel. Neste trabalho, os resultados obtidos laboratorialmente nos ensaios acústicos com tubo de impedância, serão comparados com os resultados calculados através do modelo de cálculo numérico, com recurso à aplicação de um algoritmo desenvolvido e implementado no software MatLab®.

### **1.3 Objetivos**

Dependendo da finalidade da utilização da sala, a aplicação dos painéis acústicos produzirá uma maior comodidade acústica do seu utilizador. Este facto torna bem patente que existem vários parâmetros influenciadores do comportamento acústico dos painéis. Assim sendo, no presente estudo, averiguar-se-á se o painel que possui uma maior absorção sonora na gama das frequências baixas, terá também bom comportamento de absorção nas frequências mais altas.

A fim de cumprir a finalidade deste estudo expõe-se os objetivos propostos a atingir através desta dissertação:

---

- Aferição da possibilidade de modelar, recorrendo a um modelo teórico, a absorção sonora de sistemas de painéis acústicos microperfurados e microranhurados.
- Analisar esse mesmo modelo teórico do ponto de vista da avaliação da absorção sonora de sistemas de painéis em multicamada.
- Avaliar, ao nível de absorção sonora, sistemas de painéis em multicamada.
- Estimar o melhor posicionamento do material poroso ou fibroso na caixa-de-ar.
- Apreciar a melhor solução de painéis acústicos de madeira microperfurados ou microranhurados.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

Inicia-se esta dissertação com uma introdução ao tema do condicionamento acústico dos espaços fechados. Explora-se o papel da instalação de painéis acústicos no interior dos compartimentos com o alçar de melhores, ou piores, desempenhos acústicos, dependendo da finalidade determinada para esse lugar. Ainda nesta primeira parte da dissertação são apresentadas as motivações que levaram à realização deste trabalho, e os objetivos propostos a alcançar no final de desenvolvida a dissertação.

No capítulo 2 apresentam-se, de forma sintética, alguns conceitos gerais sobre acústica, assim como um enquadramento da regulamentação nacional aplicável na área o condicionamento acústico.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a problemática dos painéis de absorção sonora, um tema de crescente preocupação para a construção civil, nas vertentes do fabricante, para o construtor e, por fim, para o utilizador. Expõem-se as principais conclusões dos estudos que procuram determinar os parâmetros acústicos influenciadores do desempenho dos vários tipo de painéis acústicos.

No capítulo 4 são expostas as metodologias aplicadas neste trabalho. As normas de procedimento de ensaio de laboratório, em particular o ensaio em tubo de impedância, a norma EN ISO 10534-2 [7] e a norma ASTM E1050 [8]. Descrevem-se, igualmente, os modelos empíricos aplicados a cada solução de painel.

No capítulo 5, são expostos os resultados obtidos com a aplicação dos modelos numéricos dos diferentes casos e nos ensaios do tubo de impedância. Segue-se a discussão e interpretação desses resultados.

Finaliza-se, no capítulo 6, com a apresentação das conclusões e sugestões para futuras investigações.

---

## 2 PARÂMETROS ACÚSTICOS

Nos pontos que se seguem, apresenta-se, primeiramente, alguns conceitos gerais de acústicas, que se julga serem importantes para uma correta compreensão do presente documento. Em seguida, apresenta-se um resumo das exigências legais para espaços fechados de diferentes tipos, e posteriormente dedica-se especial atenção à temática dos painéis acústicos. Num último ponto deste capítulo apresenta-se, ainda que brevemente, alguma informação relativa à possibilidade de modelação destas soluções com recurso a métodos semi-analíticos ou numéricos.

### 2.1 Conceitos gerais de propagação do som

Nesta secção, pretende-se apresentar alguns conceitos fundamentais, com relevância para o leitor ter uma melhor perceção do restante conteúdo desta dissertação. No entanto, não é objetivo desta secção apresentar uma descrição extensa e completa de todos os conceitos de acústica, para o que se aconselha o leitor a consultar bibliografia de referência como [2] ou [9].

#### 2.1.1 Velocidade do som

A velocidade da partícula do meio é a grandeza mais importante para descrever analiticamente a onda sonora. Esta pode ser perfeitamente descrita pelo deslocamento das partículas que constituem o meio. Em meios gasosos como o ar, onde é desprezada a dissipação de energia, a propagação das ondas é realizada longitudinalmente, ou seja, as partículas movimentam-se no sentido da direção da propagação da onda.

No presente estudo, o meio a considerar será o ar onde a velocidade de propagação do som (em  $m/s$ ) tem o valor médio de  $340 m/s$ . Contudo, pode-se adotar um modelo simplificado, onde a velocidade do som depende da temperatura, sendo calculada através da expressão que se segue.

$$c = 20,1 \cdot \sqrt{\frac{273 + T}{d}} \quad (1)$$

onde:

T – temperatura ( $^{\circ}C$ ).

d – densidade do meio gasoso, em relação ao ar.

Em condições de normais, com uma temperatura de 20°C e uma pressão atmosférica normal, a velocidade do som é de 344  $m/s$  [3]

### 2.1.2 Equação de onda

Partindo das Leis básicas da Física, que relacionam as grandezas acústicas, é possível descrever a propagação das ondas sonoras e estabelecer a Equação de Onda [9].

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

onde:

$c$  – *velocidade do som* ( $m/s$ );

$p$  – *pressão sonora* ( $Pa$ );

$t$  – *tempo* (*segundos*);

$\nabla$  – *operador laplaciano*.

A equação de onda permite a representação de pequenas perturbações no meio fluido, podendo ser escrita em coordenadas cartesianas para cada ponto no espaço e no tempo. Relacionando também a variação de pressão relativamente à pressão normal do ambiente [2].

### 2.1.3 Impedância característica do meio

Relacionando a pressão sonora com a velocidade das partículas do meio numa onda plana, independente da frequência, temos a impedância característica do meio é caracterizada através da seguinte expressão. Esta propriedade do meio ostenta o valor de 416  $Ns/m^3$ , quando a pressão atmosférica é normal e a temperatura do ar é de 20 °C [9].

$$Z_c = \frac{p}{v} = c \cdot \rho_0 \quad (3)$$

onde:

$Z_c$  – *impedância acústica do meio* ( $Ns/m^3$ );

$p$  – *pressão sonora* ( $Pa$ );

$c$  – *velocidade do som* ( $m/s$ );

$v$  – *velocidade da partícula do meio* ( $m/s$ );

$\rho_0$  – *densidade do meio*.

### 2.1.4 Ressonador de Helmholtz

Os painéis denominados por ressoadores consistem em painéis, de qualquer material, perfurados. Através da incidência da onda sonora sobre o painel, resultará num movimento da massa de ar existente nos orifícios que, por atrito, parte da energia dessa onda irá dissipar-se [2]. A absorção sonora resultará não só do atrito provocado no gargalo, mas também do atrito

na cavidade do ressoador. Dependendo do volume da cavidade, a frequência de ressonância do sistema será maior ou menor [2]. Deste modo, podemos dizer que a frequência de ressonância do ressoador dependerá do volume da cavidade, do gargalo e da secção do orifício [10], sendo a definição da frequência de ressonância dada pela seguinte equação.

$$f_{ress} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{L \cdot V}} \quad (4)$$

onde:

$c$  – velocidade do som ( $m/s$ );

$S$  – secção reta do ressoador ( $m^2$ );

$L$  – comprimento do gargalo ( $m$ );

$V$  – volume da cavidade ( $m^3$ ).

Através do esquema apresentado na Figura 2.1 podemos verificar que o ressoador é passível de ser modelado simplificada por um sistema de massa mola com um grau de liberdade (Figura 2.2). Onde a componente elástica do sistema é o ar existente no ressoador que funcionará como o elemento mola e a componente do ar existente no gargalo o elemento massa.

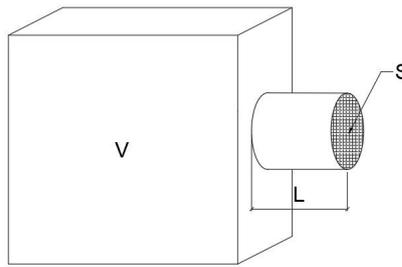


Figura 2.1 – Esquema da cavidade de ressoador de Helmholtz [3].

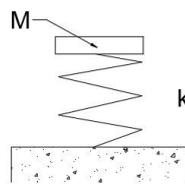


Figura 2.2 – Comportamento mecânico do ressoador de Helmholtz [3].

### 2.1.5 Absorção sonora

A absorção sonora resulta da capacidade que um determinado material tem para absorver a energia incidente (energia sonora). Ou seja, quando a energia incide no material esta irá resultar em energia refletida, energia dissipada e energia absorvida (absorvida no interior do painel). Define-se, por isso, o coeficiente de absorção sonora, que pretende quantificar a fração de energia absorvida por um dado material. Deste modo, quanto maior a energia absorvida, maior

será o coeficiente de absorção sonora de um elemento. Estabelecendo o equilíbrio da energia através da seguinte expressão [4]:

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (5)$$

onde:

$E_i$  – energia incidente;

$E_r$  – energia refletida;

$E_t$  – energia transmitida;

$E_a$  – energia dissipada no interior dos materiais.

Rearranjando a expressão através da divisão de ambos os membros por  $E_i$ , tem-se que:

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t + E_a}{E_i} \quad (6)$$

onde:

$E_t + E_a$  – energia não refletida;

Como a intensidade de uma onda plana é proporcional ao quadrado da pressão sonora, a intensidade da onda refletida é menor que a incidente de um fator  $|R^2|$  [4]. Sendo que o coeficiente de reflexão  $R$  é um número complexo temos:

$$|R^2| = \frac{E_r}{E_i} \quad (7)$$

Deste modo, deduz-se que o coeficiente de absorção sonora,  $\alpha$ , é dado por:

$$\alpha = 1 - |R^2| \quad (8)$$

Dependendo da frequência da onda sonora emitida e do ângulo de incidência no material, este terá um coeficiente de absorção sonora distinto. Estabelecendo os referenciais desse coeficiente  $\alpha$ , absorção total quando é igual a um ( $\alpha = 1$ ) e absorção nula quando é igual a zero ( $\alpha = 0$ ) [2]. Com o conhecimento deste parâmetro acústico do material torna-se possível uma tomada de decisão mais apropriada para cada caso. O aprofundamento do estudo deste parâmetro acústico dos materiais possibilitará uma seleção do material mais assertiva para a finalidade da utilização do compartimento.

### 2.1.6 Tempo de reverberação

A absorção sonora está diretamente relacionada com um dos parâmetros acústicos mais usados na caracterização de um espaço fechado: o tempo de reverberação. Este parâmetro pretende traduzir o tempo que o nível sonoro provocado por um determinado estímulo acústico gerado no interior de um dado espaço demora a decrescer 60 dB. Este parâmetro permite ter uma perspectiva clara sobre o efeito da reverberação dentro de uma sala, e é inversamente

proporcional à absorção sonora existente dentro desse espaço. A relação entre estes parâmetros pode ser compreendida através da expressão seguinte (modelo de Sabine) [3].

$$T_r = 0,161 \cdot \frac{V}{\sum_n S_n \cdot \alpha_n} \quad (9)$$

onde:

$T_r$  – tempo de reverberação (s);

$V$  – volume da sala ( $m^3$ );

$S_n$  – superfícies parciais ( $m^2$ );

$\alpha_n$  – absorção sonora das superfícies parciais.

Embora a expressão agora apresentada seja simples de compreender, e comumente aceite no domínio da acústica quando a absorção sonora é distribuída uniformemente num espaço e quando a absorção média não é elevada, esta é apenas uma aproximação, e vários outros autores propuseram expressões alternativas eventualmente de aplicação mais genérica. Uma visão mais abrangente pode ser encontrada em [9].

## 2.2 Documentação legal e normas

Há já largos anos que Portugal dispõe de legislação dedicada aos requisitos acústicos de edifícios e de espaços fechados. No âmbito da regulamentação dos requisitos acústicos dos edifícios, a regulamentação presentemente em vigor impõe limites máximos ou mínimos para os índices de isolamento a sons aéreos, a sons de percussão e para o tempo de reverberação. Uma vez que, no contexto da presente dissertação apenas será abordada a temática do condicionamento acústico, apenas se apresentam aqui, no Quadro 2.1, os tempos de reverberação limite, de acordo com a finalidade da utilização das salas [6].

Quadro 2.1 – Limites dos tempos de reverberação impostos pelo RRAE.

<i>Tipo de edifício</i>	<i>Artigo</i>	<i>Tempo de reverberação máximo</i>
Habitacional e mistos e unidades hoteleiras	5º	<i>Não aplicável</i>
Comerciais e serviços e partes similares em edifícios industriais	6º	$\begin{cases} \text{Não aplicável, se } V < 100m^3 \\ T_r \leq 0,15 \times V^{1/3}, \text{ se } V \geq 100m^3 \end{cases}$
Edifícios escolares e similares e de investigação	7º	$T_r \leq 0,15 \times V^{1/3}, \text{ se } *$
Edifícios hospitalares	8º	$\begin{cases} T_r \leq 0,15 \times V^{1/3}, \text{ se } ** \\ T_r \leq 0,12 \times V^{1/3}, \text{ se } *** \end{cases}$

Recintos desportivos	9	$\begin{cases} T_r \leq 0,15 \times V^{1/3} \\ T_r \leq 0,12 \times V^{1/3}, \text{ se } *** \end{cases}$
Estações de transporte	10°	$\begin{cases} T_r \leq 0,15 \times V^{1/3} \\ T_r \leq 0,12 \times V^{1/3}, \text{ se } *** \end{cases}$
Auditórios e salas (conferência, polivalentes e/ou cinema)	10A°	$\begin{cases} T_r \leq 0,12 \times V^{1/3}, \text{ se } V < 250m^3 \\ T_r \leq 0,32 + 0,17 \cdot \log V, \text{ se } 250 \leq V < 9000m^3 \\ T_r \leq 0,05 \times V^{1/3}, \text{ se } V \geq 9000m^3 \end{cases}$

Nota: \* salas de aula, salas polivalentes, bibliotecas, refeitório ou oficina; \*\* refeitórios ou enfermarias com  $V \geq 100m^3$ ; \*\*\* locais dotados de sistema de difusão pública de mensagens sonoras.

Estas exigências regulamentares são apenas, no entanto, valores limite para cada utilização, e não representam valores ótimos para cada situação. Alguns autores têm proposto ábacos e expressões que pretendem indicar um valor ótimo do tempo de reverberação para diferentes espaços, e mais detalhes sobre este assunto podem ser encontrados em Vigran [9] ou Patrício [2].

Para controlar o tempo de reverberação dentro de um espaço, o engenheiro acústico pode recorrer a diferentes tipos de soluções, aplicadas isoladamente ou em conjunto em diferentes localizações dentro do espaço, uma vez que o tempo de reverberação depende do condicionamento acústico de toda a sala, ou seja, da sua geometria e dos materiais instalados no interior.

Para que o engenheiro possa propor as soluções mais adequadas a cada caso, é indispensável que cada solução seja convenientemente caracterizada. Embora a forma mais usual de caracterização da absorção sonora seja através do ensaio em câmara reverberante (condições de campo difuso) através da norma ISO 354 [11], os procedimentos explanados na norma ISO 10534-2 [7], norma internacional semelhante à norma americana ASTM E1050A [8], representam uma forma mais simples de realizar essa caracterização, avaliando o coeficiente de absorção sonora em condições controladas, em tubo de impedância. Foi esta a forma empregada nos ensaios laboratoriais levados a cabo nesta dissertação, sendo esta a metodologia normalmente escolhida para a determinação da absorção sonora de amostras de reduzida dimensão. Contudo, dadas as limitações inerentes a este tipo de ensaio, não é possível obter o valor da absorção sonora ponderado  $\alpha_w$ . Para a determinação deste parâmetro são usualmente ensaiadas amostras de grandes dimensões, com área superior  $10m^2$ , e são realizados ensaios em câmara reverberante, aplicando a norma ISO 354 [11].

### 3 ESTADO DA ARTE

Os sistemas de absorção sonora usados em acústica de salas resultam, muitas vezes, da associação de um conjunto de materiais com diferentes propriedades, dependendo o seu comportamento do tipo de materiais envolvidos, da sua configuração geométrica, e do arranjo específico entre eles. Nos pontos seguintes procura-se dar uma perspetiva sobre este tópico. Note-se que, em vários trabalhos já realizados anteriormente, alguns aspetos do comportamento específico destes sistemas foram abordados de forma detalhada.

#### 3.1 Materiais fibrosos ou porosos

O avanço da tecnologia tem vindo a permitir o surgimento de novos materiais, alguns até resultantes da reciclagem ou reutilização de resíduos, o que permite que os materiais porosos ou fibrosos possam ser de várias naturezas. Estes materiais definem-se como aqueles em que a componente sólida ocupa apenas uma pequena parte do seu volume e o restante são simplesmente intervalos abertos. Caraterizam-se por uma absorção sonora que se processa por dissipação de energia devido ao atrito do ar durante a propagação das ondas no interior destes espaços vazios do material [3]. Neste caso concreto, a dissipação de energia é resultante da porosidade de cada um desses materiais, sendo aplicados para a correção acústica no domínio das frequências altas (frequências superiores a 500Hz e 630Hz) [2]. É usual admitir que o comportamento destes materiais está fortemente relacionado com as suas características macroscópicas, designadamente a porosidade, a tortuosidade e a resistência ao fluxo de ar. Este último parâmetro é particularmente relevante, uma vez que a resistividade ao fluxo de ar ( $\sigma$ ) destes materiais é utilizada em múltiplos modelos numéricos para determinação da absorção sonora. No caso destes materiais, os valores mais comuns apresentam uma grande gama de variação, podendo ir dos  $10^3 \text{ Nsm}^{-4}$  aos  $10^6 \text{ Nsm}^{-4}$  [12].

Os materiais porosos mais comuns incluem as espumas de poliuretano de célula aberta, as espumas de polietileno expandido ou o polietileno extrudido, os aglomerados de espumas, entre outros. Ainda dentro dos mencionados, cada tipo de material tem densidades diferentes, o que culmina em características diferentes a vários níveis. Por vezes, esses materiais podem ter diversas cores, oferecendo assim a possibilidade da melhoria da estética do compartimento. Numa tese de mestrado desenvolvida na FCTUC, Rodrigues [13] analisou o comportamento de espumas revestidas usando uma tecnologia de “flocagem”, que permite um acabamento

superficial das espumas com distintas colorações e com um toque mais agradável, sem comprometer o desempenho acústico.

Nos que respeita a materiais fibrosos, alguns dos mais comuns são a lã mineral (lã de rocha e lã de vidro), os aglomerados de tecidos e os tecidos (decorativos ou não decorativos). Tal como os materiais porosos, também no caso dos fibrosos estes podem apresentar densidades diferentes. Merece referência o facto de existirem hoje no mercado várias soluções de painéis acústicos com tecidos decorativos. Neste caso, não só há uma contribuição na absorção sonora como também ajuda no aspeto visual do compartimento onde está inserido. No que toca às lãs minerais, têm de estar obrigatoriamente no tardo do painel que fica visível, pois é necessário que estes materiais estejam devidamente isolados do ambiente interior do compartimento, uma vez que libertam micropartículas prejudiciais para a saúde dos utilizadores.

Ainda no que respeita aos materiais porosos e fibrosos, merece também referência o desenvolvimento de vários modelos de simulação desde há já várias décadas. Muitos desses modelos pressupõem que o comportamento destes materiais é fortemente controlado pelos designados “parâmetros macroscópicos” do próprio material, em particular a resistência ao fluxo de ar, a porosidade e a tortuosidade. A este respeito, merecem especial destaque os trabalhos de Delaney e Bazley [14] e Delany-Bazley-Miki [15], que se baseiam exclusivamente no parâmetro resistência ao fluxo de ar, e o modelo mais recente de Johnson-Champoux-Allard [16,17], que introduz os restantes parâmetros macroscópicos. Outros autores têm ainda vindo a desenvolver modelos específicos para alguns materiais, como é o caso do proposto por Ramis et al [18] para o caso específico da fibra de côco.

### 3.2 Painéis perfurados

Na sua grande maioria, os painéis acústicos são constituídos por madeira ou seus derivados. Como referido no anterior capítulo, este tipo de material é o mais utilizado na construção civil, dado ser a opção mais económica de produzir e de aplicar. Em síntese, os painéis acústicos à base de madeira podem ser realizados em MDF ou HPL, sendo revestidos decorativamente com papel melamínico, folheado de madeira ou até lacados. Obviamente, que a cada tipo de acabamento corresponderá um custo distinto.

Este tipo de material é fabricado com várias espessuras, sendo a espessura de 16mm a mais usual. Se, por um lado, nos painéis de menor espessura não é possível realizar as perfurações ideais para uma melhor absorção sonora, por outro lado espessuras superiores irão ter um mais difícil manuseamento na fábrica e posteriormente em obra. A nível económico, é a espessura de painel com maior disponibilidade no mercado, e, por esta razão, possui um custo mais reduzido. A nível arquitetónico, ou aspeto visual, o revestimento dos painéis pode ser escolhido, sendo esta uma vantagem para esta solução de painéis acústicos em madeira.

A produção de painéis perfurados está sujeita às ferramentas industriais existentes no mercado, o que leva à introdução de características quase inalteráveis. A alteração é possível apenas trabalhando manualmente a solução ou procedendo a uma alteração da ferramenta, o que não é o objetivo uma vez que torna a solução mais onerosa. Deste modo, é possível identificar painéis acústicos de madeira perfurados disponíveis no mercado com furações que variam entre  $3\text{mm}$  e os  $10\text{mm}$ , com espaçamentos entre eixos de múltiplos de  $16\text{mm}$  (espaçamentos de  $16\text{mm}$ ,  $32\text{mm}$  e  $64\text{mm}$ ). Também se verifica a existência de painéis com ranhuras, no tardo do painel ou mesmo até assumidas na face visível do painel. Contudo, também estas ranhuras estão sujeitas ao anteriormente referido, particularmente no que toca às suas dimensões.

É importante notar que nesta solução de painel, a absorção sonora depende fortemente da sua perfuração, uma vez que esta perfuração transforma o painel numa grelha de múltiplos ressoadores. Num trabalho levado a cabo nesta área de estudo do comportamento dos painéis perfurados por Patraquim [4], refere-se que se deve tirar partido desta característica, tornando-os com um efeito decorativo, independentemente das formas e dimensões das perfurações. Também nesse mesmo trabalho, o autor refere que inicialmente esta solução seria para o revestimento de paredes. Contudo, no presente, estes materiais são mais aplicados no revestimento do teto, funcionando como um teto falso. Por fim, nesse mesmo trabalho conclui-se que os painéis com maior área de abertura são os que têm maior absorção sonora nas médias e altas frequências. Também se constata que quanto maior é a caixa-de-ar melhor é o seu desempenho nas baixas frequências.

Ainda no que toca aos painéis perfurados para absorção sonora, destaca-se um estudo que assume que a dimensão da caixa de ar e o material absorvente no seu interior tem uma grande influência no desempenho do sistema de painel acústico [1]. Neste mesmo estudo, refere também que o posicionamento do material poroso na caixa-de-ar também é um aspeto importante. A sua posição, junto ao painel perfurado ou na superfície rígida introduz diferentes comportamentos no desempenho acústico do sistema [1].

No trabalho de Jordão [19], foi realizado um estudo experimental do comportamento de diferentes sistemas, procurando compreender a influência de diversos tipos de véu acústico colado no tardo de painéis perfurados. A autora conclui que as características desse véu acústico são determinantes no desempenho do sistema absorvente, podendo inibir o comportamento ressonante do painel perfurado. Abreu [20] analisou o comportamento de diferentes sistemas, procurando compreender o efeito da utilização de diferentes materiais absorventes na caixa-de-ar. Este autor estudou experimentalmente várias configurações, incluindo materiais porosos ou fibrosos na caixa-de-ar, e avaliou o efeito da resistência ao fluxo de ar do material absorvente na absorção global do sistema.

No que toca aos painéis de absorção sonora microperfurados e microranhurados, estes são um tipo de painel que tem vindo a ser estudado desde os anos 70 por Maa [21]. Inicialmente, estes painéis eram construídos a partir de placas de pequena espessura, da ordem de  $1\text{mm}$ . Eram essencialmente placas metálicas ou de policarbonato, e eram aplicadas em situações onde a aplicação de materiais porosos e fibrosos era desaconselhada [22]. No presente, estes painéis podem ser fabricados de diversos modos, nomeadamente, pelo método tradicional, com ferramentas de perfuração ou punçoamento ou pelos métodos mais avançados de perfuração a laser ou a jato de água. Usualmente, a sua relação de área aberta (perfurada) e área fechada varia entre 1% e 80% [12]. A principal vantagem deste tipo de painéis é o seu bom desempenho acústico, semelhante aos painéis com macroperfuração, acrescentando ainda o seu bom aspeto visual, pois com a microperfuração a decoração original existente no painel de madeira não se irá perder.

Estudos bastante recentes têm procurado abordar a problemática da modelação computacional do comportamento de sistemas com painéis perfurados de diferentes tipos, como, por exemplo, os trabalhos de Carbajo et al [23, 24, 25]. Em [23], os autores desenvolvem uma modelação baseada no método dos elementos finitos para simular o comportamento deste tipo de painéis, mas ao invés de usarem a modelação acústica clássica, baseada na equação de Helmholtz, partem das equações de Navier-Stokes, incorporando diretamente os efeitos das perdas visco-térmicas. Embora tenham obtido bons resultados, a complexidade de um modelo deste tipo apenas se justifica para estudos detalhados de cariz mais científico. Em [24], os autores abordam a simulação, com um método baseado em matriz de transferência, de painéis que apresentam uma perfuração distinta no tardo e na parte frontal. Os resultados que obtiveram com o modelo referido apresentaram uma excelente concordância com os de uma modelação mais detalhada recorrendo a elementos finitos. Já em [25], os mesmos autores efetuam uma análise de diferentes métodos para o estudo do comportamento de painéis com perfuração heterogénea, identificando diferentes possibilidades de modelação para esse efeito. As alternativas computacionalmente menos exigentes a uma modelação detalhada com elementos finitos revelaram-se muito interessantes, proporcionando excelentes resultados.

### **3.3 Painéis acústicos com materiais sustentáveis**

A aplicabilidade de materiais mais sustentáveis neste tipo de solução construtiva é também um aspeto interessante a vários níveis, designadamente económico, social e ambiental. Embora os painéis de madeira sejam, em si mesmos, uma solução sustentável, existem outros materiais igualmente sustentáveis e possíveis de aplicar, incluindo materiais como o aglomerado de espumas, aglomerado de fibras de tecido, aglomerado de cortiça, entre outros. Estes materiais, além de oferecerem um desempenho acústico adequado, são capazes de oferecer um bom isolamento térmico, ótimo aspeto visual e uma boa qualidade do ar [26]. Por fim, é importante referir que, para se ter uma correta perceção dos ganhos de sustentabilidade, é necessário

realizar uma análise do ciclo vida dos diferentes tipos de painéis acústicos, em particular, onde os materiais sustentáveis são introduzidos. Denota-se que os materiais desses painéis, ao substituírem os materiais convencionais de isolamento acústico e térmico, levam a uma melhoria no ciclo de vida [26], que pode ser mais ou menos significativa.

Refira-se, a este respeito, o trabalho desenvolvido por Rainho [27], no qual foram avaliados e comparados os desempenhos térmico e acústico de algumas amostras de materiais reciclados com algumas amostras de materiais correntes. As amostras recicladas foram de resíduos têxteis e de resíduos de espumas, e as amostras de referência de lã de rocha, poliuretano e *basotect*. A avaliação do desempenho foi feita através dos parâmetros condutividade térmica ( $\lambda$ ) e coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ). Pela comparação destes dois parâmetros, a autora observou que as amostras recicladas apresentam desempenhos comparáveis com os das amostras comerciais, pelo que podem constituir soluções alternativas interessantes.

A utilização dos materiais provenientes de vários tipos de matérias primas sustentáveis poderá resultar no bom desempenho acústico ao nível da absorção, pois através da reutilização desses materiais poderá ser possível uma boa absorção sonora em diferentes gamas de frequência [28]. O funcionamento deste tipo de materiais é semelhante ao dos materiais porosos, pelo que também aqui métodos de previsão do desempenho acústico (do ponto de vista da absorção sonora) como o de Delaney e Bazley [14], Delany-Bazley-Miki [15] ou Johnson-Champoux-Allard [16,17] podem ser aplicados.

### 3.4 Nota final

Atualmente, torna-se também necessário desenvolver ferramentas que possibilitem uma estimativa dos resultados de absorção sonora dos sistemas de painéis acústicos produzidos. No mercado existem várias soluções disponíveis, mas que em muitos casos não se encontram otimizadas de modo a maximizar o seu desempenho. A aplicação das ferramentas de modelação numérica poderá ser um auxiliar importante para que possa ser alcançada uma melhor solução. No contexto desta dissertação, será usada uma implementação de um modelo de previsão da impedância acústica e, conseqüentemente, da absorção sonora, fazendo uso da técnica da matriz de transferência. Para compreender a importância desse tipo de estudo, deve compreender-se que a absorção de um painel acústico depende muito da sequência de materiais que o constituem, das condições do seu fabrico e de montagem em obra, designadamente:

- Espessura da caixa-de-ar;
- Posicionamento do material poroso no interior da caixa-de-ar;
- Introdução de um material que ofereça resistência acústica na perfuração do painel;
- Interposição de um material resiliente (neopreno ou aglomerado de cortiça) entre os painéis e a estrutura de suporte;
- Variação da área aberta dos painéis e da forma dos furos.

Para que o desenvolvimento dos modelos numéricos seja possível, é necessário admitir alguns pressupostos. No caso dos modelos que representam as ondas planas incidentes nos painéis perfurados, estes apoiam-se na conversão da impedância acústica de um único de furo, num valor médio correspondente à área aberta do painel em causa. Estes modelos consideram, habitualmente, que o painel é formado por um conjunto de tubos curtos de comprimento igual à espessura do painel e a área não perfurada é composta por um material suficientemente rígido, podendo considerar-se perfeitamente refletor. Estes sistemas acústicos, definidos por um painel perfurado e por uma caixa-de-ar com ou sem material absorvente no seu interior, são então estudados utilizando o conceito de matriz transferência. Recorrendo à conservação da velocidade e conhecendo as propriedades acústicas do meio torna-se possível, através deste método, determinar a impedância acústica em cada interface entre materiais.

## 4 METODOLOGIAS DE ANÁLISE

No contexto da presente dissertação de mestrado, realiza-se uma análise ao comportamento de painéis de absorção sonora, com particular incidência nos sistemas baseados em microperfurações e microranhuradas. Este tipo específico de painel apresenta, conforme já referido, algumas vantagens arquitetónicas, uma vez que possui uma aparência menos marcada pelas perfurações, que se tornam quase invisíveis a alguma distância. Neste capítulo apresentam-se as metodologias utilizadas na sua análise, quer do ponto de vista de uma análise teórica, quer de uma análise experimental. A escolha recaiu sobre a utilização de uma técnica baseada em matrizes de transferência, para a análise teórica, e sobre uma análise a pequenas amostras em laboratório, utilizando um tubo de impedância.

### 4.1 Avaliação teórica da absorção sonora

#### 4.1.1 Modelo para painel perfurado

No âmbito da presente dissertação são estudados painéis acústicos microperfurados. O modelo numérico aplicado nestes casos considera que o painel é formado por um conjunto de tubos com secção transversal da ordem dos  $0,5\text{mm}$ , com um comprimento igual à espessura do painel  $l_0$  e que a parte não perfurada é uma superfície suficientemente rígida, para que seja considerada totalmente refletora. A formulação que de seguida se apresenta é baseada nos trabalhos de Maa [21], Crandall [29], Villamil [12] e Patraquim [4].

Com base no estudo levado a cabo por Crandall [29], pode dizer-se que a secção transversal dos tubos circulares ( $l_0$ ), constituintes do painéis perfurados, é suficientemente pequena quando comparada com o comprimento de onda ( $\lambda$ ), ou seja  $l_0 < \lambda$ .

Também segundo [29], a impedância específica de um tubo preenchido com ar pode ser obtida através da seguinte equação.

$$Z_{stubo} = i \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot l_0 \left[ 1 - \frac{2 \cdot J_2(x \cdot \sqrt{-i})}{(x \cdot \sqrt{-i}) \cdot J_1(x \cdot \sqrt{-i})} \right]^{-1} \quad (10)$$

em que:

$x = r \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_0}{\eta}}$  representa a relação entre as forças de inércia e a viscosidade do ar

onde:

$i$  – número imaginário;

$\omega$  – frequência angular ( $\text{rad/s}$ ) =  $2 \cdot \pi \cdot f$ ;

$\rho_0$  – densidade do ar ( $\text{Kg/m}^3$ );

$l_0$  – comprimento do tubo (m);

$J_1$  – função de Bessel de ordem 1;

$J_2$  – função de Bessel de ordem 2;

$r$  – raio do tubo (m);

$\eta$  – viscosidade do ar ( $1,84 \times 10^{-5}$  poiseuille).

Esta expressão é, no entanto, insuficiente para estimar de forma realista a impedância de um tubo, uma vez que não incorpora alguns efeitos físicos como os relativos à viscosidade do ar, à radiação acústica e aos efeitos da reactância da caixa-de-ar.

O termo de correção a aplicar à expressão para que a viscosidade do ar seja melhor considerada é dado pela seguinte expressão [4].

$$R_{ec} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot \eta} \quad (11)$$

Para que a radiação acústica e os efeitos da reactância da caixa-de-ar sejam tidos em conta de forma mais adequada na expressão numérica proposta, torna-se necessário aplicar ainda uma correção indicada na equação seguinte [4].

$$Z_{rad} = \rho_0 \cdot c \left[ \frac{\pi^2}{2} \cdot \left( \frac{d}{\lambda} \right)^2 + i \cdot \left( \frac{\omega \cdot \delta}{c} \right) \right] \quad (12)$$

onde:

$c$  – velocidade do som ( $\text{m/s}$ );

$d$  – diâmetro do tubo (m);

$\lambda$  – comprimento de onda (m);

$\delta$  – termo corretivo relativo à interação entre furos (m);

Para além das correções já mencionadas, de modo a considerar o facto de se estar a analisar um painel com múltiplos furos, deve ser introduzida ainda uma correção devido à interação entre furos do painel [12, 4]. Esta correção deve-se ao efeito de partilha de massa de ar no exterior dos furos, conforme ilustrado na Figura 4.1. Importa referir que, no caso da existência de vários furos, a massa de ar de cada furo ao ser partilhada será menor, comparativamente ao caso de existir apenas um furo. Com base em alguns dos trabalhos consultados ([12] e [4]), o termo corretivo para a interação entre furos a considerar será o de seguida indicado.

$$\delta = \delta' \cdot \left( 1 - 1.47 \cdot \sqrt{\varepsilon} + 0.47 \cdot \sqrt{\varepsilon^3} \right) \quad (13)$$

em que:

$\delta' = \frac{16 \cdot r}{3 \cdot \pi}$  é a correção determinada por Rayleigh.

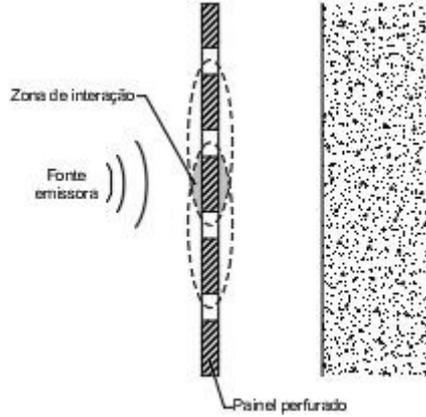


Figura 4.1 – Esquema da representação da interação entre furos.

Através da adição de todos os termos referidos anteriormente na expressão numérica, obtém-se uma expressão de aplicação simples e que constitui a base do modelo numérico utilizado no âmbito desta dissertação, no que toca a painéis perfurados e microperfurados, representada na equação (14).

$$Z_{stubo} = i \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot l_0 \left[ 1 - \frac{2 \cdot J_2(x \cdot \sqrt{-i})}{(x \cdot \sqrt{-i}) \cdot J_1(x \cdot \sqrt{-i})} \right]^{-1} + \left( 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot \eta} + \rho_0 \cdot c \cdot \pi^2 \left( \frac{d}{\lambda} \right)^2 + i \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot \delta \right) \quad (14)$$

Com base no modelo de Maa, tido como referência na presente dissertação, é considerada a conversão da impedância acústica de um único tubo, num valor médio do painel. Para tal, tem-se em conta a porosidade do painel, calculando-se a impedância através da expressão (15).

$$Z_{spainel} = \frac{Z_{stubo}}{\varepsilon} \quad (15)$$

em que:

$\varepsilon = \frac{S_h}{S_p}$  é a relação entre área aberta do painel e a área total do painel (porosidade);

onde:

$S_p$  – área do plano do painel ( $m^2$ );

$S_h$  – área da seção furada ( $m^2$ );

A soma do valor da impedância acústica do painel ( $Z_{Spainel}$ ), com a do interior da caixa-de-ar ( $Z_{Sinterior}$ ), resulta na impedância superficial do sistema ( $Z_{Ssistema}$ ).

$$Z_{Ssistema} = Z_{Spainel} + Z_{Sinterior} \quad (16)$$

#### 4.1.2 Modelo para painel ranhurado

No caso dos painéis em que os orifícios são ranhuras, a expressão de cálculo da impedância acústica do tubo é substituída pela expressão proposta por Randeberg [30], e descrita em Villamil [12]. A expressão é semelhante à equação (12), tendo no entanto os termos de correção aplicados de diferente modo.

$$Z_{Sranhura} = \frac{i \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot t'}{\varepsilon} \left[ 1 - \frac{\tanh(s \cdot \sqrt{i})}{(s \cdot \sqrt{-i})} \right]^{-1} \quad (17)$$

em que:

$s = \frac{w}{2} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho_0}{\eta}}$  representa a relação entre as forças de inércia e a viscosidade do ar

onde:

$t'$  – largura ranhura (m);

$\varepsilon$  – porosidade;

$w$  – profundidade da ranhura (m);

A correção devido à interação entre ranhuras será a indicada de seguida [12].

$$\delta = -\frac{2 \cdot w}{\pi} \cdot \ln \left[ \sin \frac{\pi \cdot w}{2 \cdot b} \right] \quad (18)$$

onde:

$b$  – distância entre ranhuras (m);

A correção para a resistividade das ranhuras é definida pela seguinte expressão [12].

$$R_s = \sqrt{2 \cdot \eta \cdot \rho_0 \cdot \omega} \cdot \frac{t + 2 \cdot w}{w^2} \quad (19)$$

Através da adição de todos os termos referidos anteriormente a expressão numérica final resultante é a que se apresenta de seguida [12].

$$Z_{Sranhu} = \frac{i \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot t'}{\varepsilon} \left[ \left[ 1 - \frac{\tanh(s \cdot \sqrt{i})}{(s \cdot \sqrt{i})} \right]^{-1} - \frac{2 \cdot w}{\pi \cdot t'} \cdot \ln \left[ \sin \left( \frac{\pi \cdot w}{2 \cdot b} \right) \right] - i \cdot \frac{d_v}{t'} \right] \quad (20)$$

em que:

$d_v = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta}{\rho_0 \cdot \omega}}$  representa a espessura da camada limite viscosa.

### 4.1.3 Modelo para materiais porosos

Como não é possível medir os parâmetros do número de onda complexo  $K_a$  nem a impedância característica complexa  $Z_{c_a}$ , recorre-se neste estudo a modelos empíricos. Existem vários modelos empíricos para determinação do comportamento das ondas sonoras nos materiais porosos. Estes modelos dependem de alguns fatores, entre eles a densidade do ar, a velocidade de propagação das ondas sonoras, a frequência da onda e da resistividade ao fluxo de ar. Todos estes fatores estão diretamente relacionados com a impedância acústica do material, que por sua vez está relacionada com a absorção sonora. Na presente dissertação será empregado o modelo semi-empírico proposto por Delany-Bazley-Miki [14, 15]. Este modelo partiu da medição de vários materiais fibrosos, de onde resultaram as expressões abaixo indicadas e que permitem estimar o número de onda complexo  $K_a$  e a impedância característica complexa  $Z_{c_a}$  em função da resistividade ao fluxo de ar.

$$\begin{cases} Z_{c_a} = \rho_0 \cdot c \cdot \left[ 1 + 5,50 \cdot \left( 10^3 \cdot \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} - i \cdot 8,43 \left( 10^3 \cdot \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \right] \\ K_a = \frac{\omega}{c} \cdot \left[ 1 + 7,81 \cdot \left( 10^3 \cdot \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} - i \cdot 11,41 \left( 10^3 \cdot \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right] \end{cases}, \text{ se } \sigma > 0 \quad (21)$$

onde:

$\sigma$  – resistividade ao fluxo de ar.

Note-se, no entanto, que esta expressão não é de aplicação universal, tendo os autores proposto uma gama de aplicação definida pelos limites da equação (22).

$$0.01 < \frac{f}{\sigma} < 1.00 \quad (22)$$

Quando o valor da resistividade é nulo, o caso limite é o de uma caixa-de-ar sem qualquer preenchimento. Neste caso, o valor da impedância do sistema é igual à impedância do meio.

$$\begin{cases} Z_{c_a} = \rho_0 \cdot c \\ K_a = \frac{\omega}{c} \end{cases}, \text{ se } \sigma = 0 \quad (23)$$

### 4.1.4 Modelo para sistemas multicamada

Os painéis acústicos normalmente comercializados são sistemas multicamada, ou seja, constituídos por várias “camadas” de materiais diferentes com características acústicas distintas. Regra geral, são formados por um painel perfurado ou ranhurado, por uma caixa-de-ar e, ainda, em algumas situações, por painéis de material poroso ou fibroso. Por forma a possibilitar a realização de uma previsão do desempenho acústico destes painéis, tendo em conta as várias camadas, aplica-se aqui o método de matriz de transferência. Este método irá permitir determinar a impedância acústica nas interfaces dos diferentes materiais constituintes

desse sistema de painel acústico. A resolução da matriz de transferência baseia-se na continuidade da velocidade das moléculas, nas duas faces da interface, conhecendo à priori as propriedades do meio de propagação das ondas sonoras. Não fazendo parte do âmbito desta dissertação a dedução da formulação do modelo numérico, sugere-se a consulta dos documentos [4] e [12].

Para o cálculo da impedância total do sistema de painel ( $Z_{STotal}$ ), isto é, do painel perfurado ou ranhurado e da cavidade de ar, faz-se uso da metodologia da matriz de transferência. Segundo esta metodologia, conhecida a impedância numa dada superfície do sistema, com o índice  $i$  ( $Z_{S_i}$ ), e sabendo que o material entre as superfícies  $i$  e  $i + 1$  tem uma impedância  $Z_c$ , que a sua constante de propagação é  $k_c$  e que a sua espessura é  $D$ , então a impedância do sistema na superfície  $i + 1$  ( $Z_{S_{i+1}}$ ) pode ser determinada com base na expressão:

$$Z_{S_{i+1}} = \frac{Z_c(Z_{S_i} + i \cdot Z_c \cdot \tan(k_c \cdot D))}{(Z_c + i \cdot Z_{S_i} \cdot \tan(k_c \cdot D))} \quad (24)$$

Juntando depois o efeito dos painéis perfurados, pode avaliar-se a impedância superficial do sistema a analisar através da expressão:

$$Z_{ST} = Z_{Spainel} + Z_S \quad (25)$$

onde:

$Z_{Spainel}$  – impedância acústica do painel;

$Z_S$  – impedância acústica no tardo do painél.

A determinação do coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) para incidência normal parte do conhecimento da impedância acústica do painel, tendo por base os pressupostos de que a superfície do material é plana e de grandes dimensões, relativamente ao comprimento de onda nele incidente. Torna-se possível, de acordo com [4], estabelecer mesmo uma expressão genérica que permite determinar a absorção sonora para diferentes ângulos de incidência das ondas sonoras, de acordo com a expressão (26).

$$\alpha = 1 - \frac{Z_{ST} \cdot \cos\theta_i - Z_c}{Z_{ST} \cdot \cos\theta_i + Z_c} \quad (26)$$

onde:

$Z_{ST}$  – impedância acústica do sistema;

$\theta_i$  – angulo de incidência da onda no painel.

$Z_c$  – impedância característica do meio;

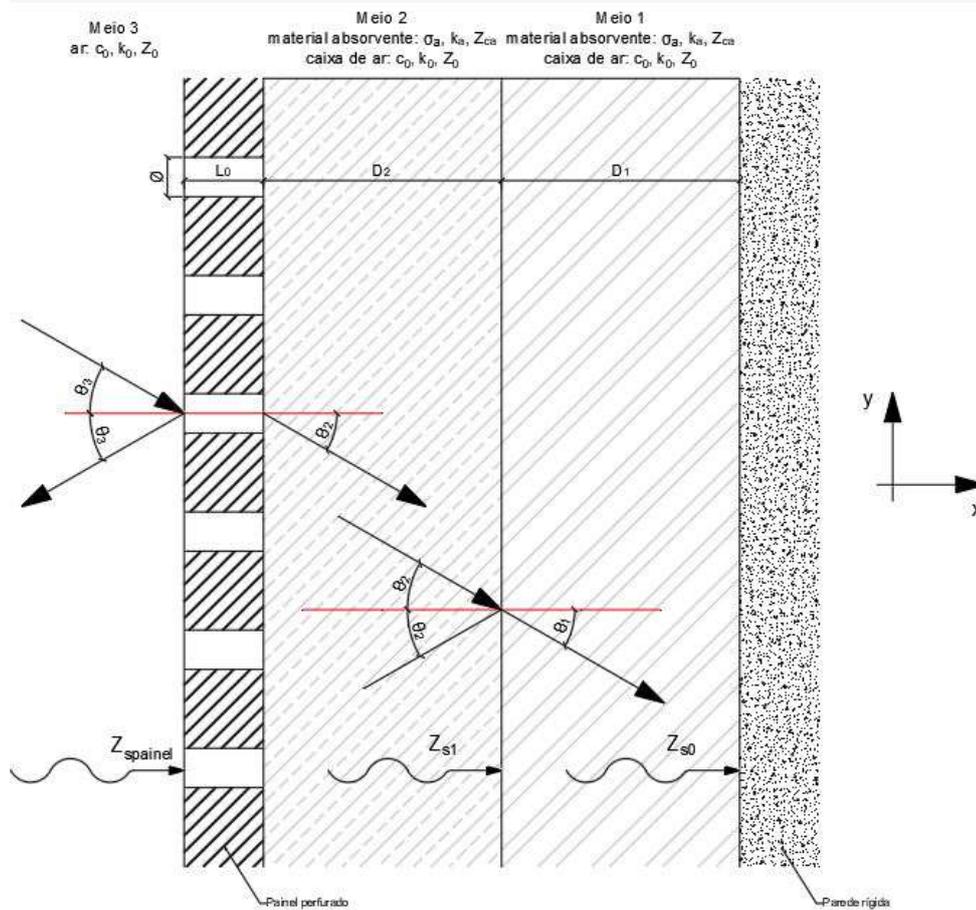


Figura 4.2 – Esquema do sistema de painel acústico multicamada.

#### 4.2 Ensaio em tubo de impedância

A componente experimental da presente dissertação foi realizada com base em ensaios em tubo de impedância, sendo as normas referidas no capítulo anterior aplicadas na avaliação do coeficiente de absorção sonora em amostras de reduzidas dimensões. Naquelas normas são descritos os procedimentos de ensaio para utilização do tubo de impedância. Fazendo uso de um amplificador e de um altifalante, colocado numa das extremidades do tubo, é emitido um ruído de intensidade média e constante ao longo do espectro de frequências (ruído branco). As ondas sonoras, ao incidirem sobre a amostra, são registadas como variações de pressão resultantes de uma quantidade de energia refletida e outra não refletida, designada por redução da pressão sonora. As flutuações de pressão são registadas por dois microfones, localizados em posições predefinidas (nas normas indicadas) ao longo do tubo de impedância. Os sinais sonoros recolhidos pelos microfones são processados e tratados por um analisador, onde

posteriormente se determinam os valores da absorção sonora na gama de frequência do som a analisar e de validade para o tubo de impedância utilizado.

No âmbito da presente dissertação, foi levada a cabo uma campanha de ensaios laboratoriais, onde se fez uso do método do tubo de impedância com dois microfones, de acordo com a norma EN ISO 10534-2 [7], para o cálculo da absorção sonora das amostras na gama de frequências entre os 100Hz e os 1600Hz. Uma representação esquemática deste ensaio encontra-se na Figura 4.3, e uma imagem do equipamento usado na Figura 4.4. Utilizou-se um tubo de impedância, realizado em aço, com diâmetro interior de 10cm, de acordo com a referida norma, e um amplificador, do tipo 2716C, da marca Brüel & Kjaer. A aquisição dos sinais captados pelos dois microfones, G.R.A.S. 46AE 1/2" CCP, espaçados de 5cm, segundo a norma e um sistema multianalisador NI USB 4431 da marca National Instruments. De acordo com a norma, o primeiro microfone encontra-se à distância de 25cm da face da amostra. Os dados recolhidos serão analisados e interpretados em bandas de 1/3 de oitava para uma melhor compreensão do desempenho acústico do sistema de painel acústico.

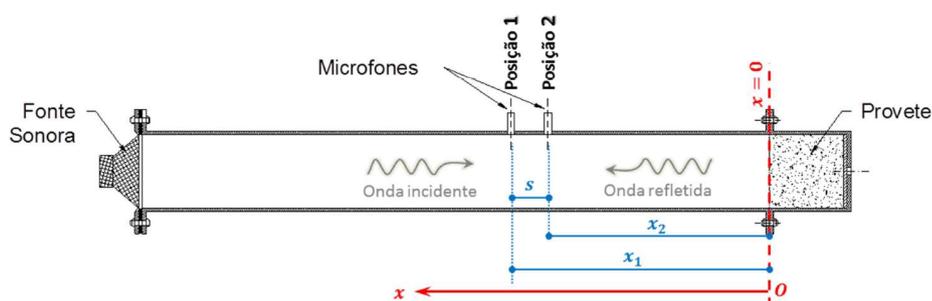


Figura 4.3 - Esquema genérico do ensaio em tubo de impedância.

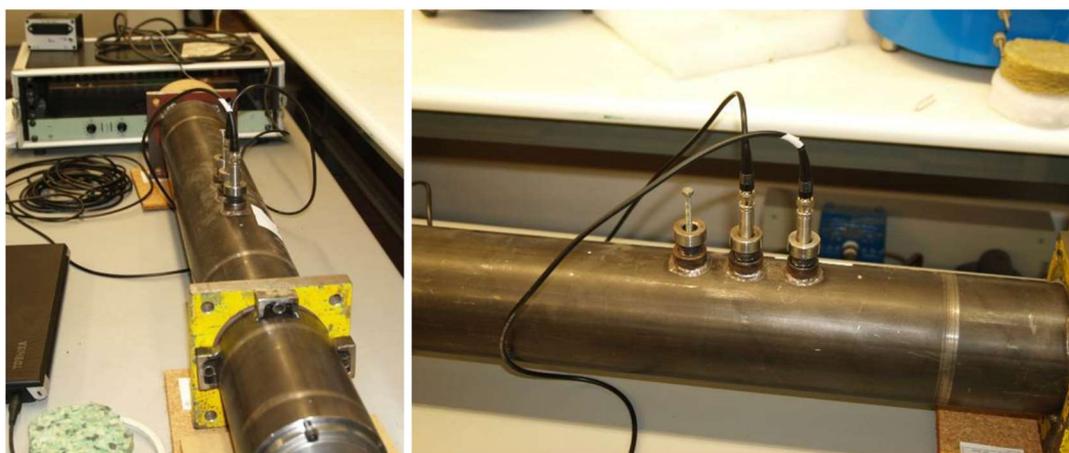


Figura 4.4 - Imagem do equipamento de ensaio.

De acordo com a norma de ensaio, no início de cada campanha de medições, são realizadas duas medições preliminares: uma referente à necessidade de se efetuar uma medição do nível sonoro no interior do tubo com a fonte sonora ligada e outra com a fonte desligada, observando-se a diferença entre níveis sonoros que deve ser superior a 10dB, ao longo de toda a gama de frequências; a segunda correspondente à realização de duas medições com recurso a uma amostra de referência, muito absorvente, sendo uma medição com microfones numa dada posição, e outra invertendo a posição entre microfones. Seguindo este procedimento torna-se possível anular o erro de fase dos microfones.

### 4.3 Descrição das amostras

Para realizar a análise do comportamento dos diferentes sistemas, foi selecionado um grupo de amostras de painéis perfurados e painéis ranhurados. Adicionalmente, selecionaram-se as amostras de materiais porosos e fibrosos para serem aplicados no tardo dos painéis mencionados anteriormente.

No que respeita a painéis perfurados, foram usadas 4 amostras de painéis acústicos de madeira microperfurados. Estes são constituídos por um painel de fibras de madeira MDF de 16mm macroperfurado, revestido na face visível por uma placa de HPL decorativo com 0,8mm microperfurado. Além deste, existem mais 3 variações deste painel base. O segundo painel apenas tem no tardo da placa de MDF um véu preto colado. No terceiro painel, além do véu preto foi adicionada uma placa de 3mm de MDF com uma diferente macroperfuração da placa de 16mm. Por fim, no quarto painel, a placa teve 3mm de MDF e uma perfuração diferente. Resumidamente, esta informação encontra-se no Quadro 4.1.

Quanto aos painéis ranhurados foram utilizados 2 tipos de placas. Por um lado, utilizou-se uma placa de HPL com 0,8mm ranhurada. Por outro lado, selecionou-se um painel de MDF de 3mm com microranhuras. Nas Figuras 4.5 e 4.6 e no Quadro 4.1 encontra-se também a descrição sucinta destes painéis.

Quadro 4.1 – Resumo descritivo das amostras de painel microperfurado e microranhurado.

<i>Painel</i>	<i>Material</i>	<i>Tipo</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Diâmetro [mm]</i>	<i>Distância [mm]</i>	<i>Taxa [%]</i>
01	Termolaminado	Microperfurado	0.8	0.5	2	4.50
	MDF	Macroperfurado	16	16	16	72.60
02	Termolaminado	Microperfurado	0.8	0.5	2	4.50
	MDF	Macroperfurado	16	16	16	72.60
	Véu acústico	Fibroso	0.8	-	-	-
03	Termolaminado	Microperfurado	0.8	0.5	2	4.50
	MDF	Macroperfurado	16	16	16	72.60
	Véu acústico	Fibroso	0.8	-	-	-
04	MDF	Macroperfurado	3	8	16	21.76
	Termolaminado	Microperfurado	0.8	0.5	2	4.50
	MDF	Macroperfurado	16	16	16	72.60
	Véu acústico	Fibroso	0.8	-	-	-
I	MDF	Macroperfurado	3	10	16	34.00
	Termolaminado	Microranhurado	0.8	0.5	5	11.46
II	MDF	Microranhurado	3	0.2	12	2.29

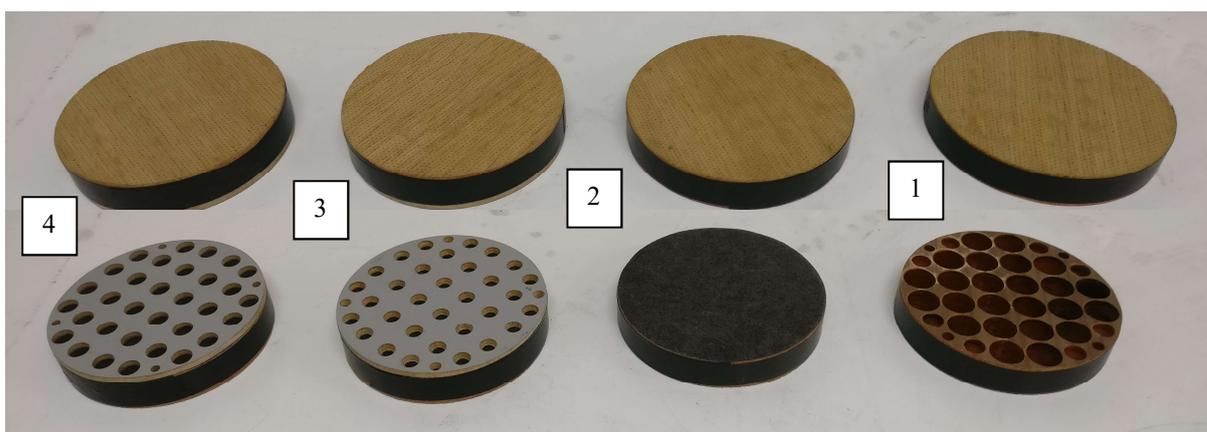


Figura 4.5 – Painéis microperfurados (vistas da face anterior, em cima, e da face posterior, em baixo).

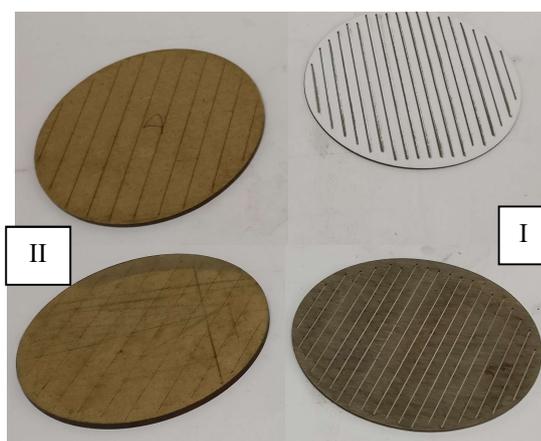


Figura 4.6 - Painéis microranhurados (vistas da face anterior, em cima, e da face posterior, em baixo).

Por fim, no que respeita aos materiais porosos ou fibrosos utilizados, foram selecionadas 10 amostras diferentes. Utilizaram-se 4 tipos de lãs minerais (lãs de rocha) com diferentes espessuras e densidades. Utilizou-se também um aglomerado de fibras de poliéster. As restantes 5 amostras são espumas, aglomerados de espumas ou tecidos com diferentes espessuras e densidades. Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 e no Quadro 4.2 encontra-se uma descrição sumária destes materiais.

Quadro 4.2 - Resumo descritivo das amostras de material absorvente.

<i>Painel</i>	<i>Material</i>	<i>Tipo</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Massa volúmica [kg/m<sup>3</sup>]</i>
a	Lã mineral	Fibroso	20	111.09
b	Lã mineral	Fibroso	40	70.31

c	Lã mineral	Fibroso	30	57.38
d	Lã mineral	Fibroso	50	22.43
e	Fibra de poliéster	Fibroso	30	21.52
A	Aglomerado de espumas flexíveis	Poroso	30	134.96
B	Aglomerado de fibras de tecido	Fibroso	20	106.44
C	Aglomerado de espumas flexíveis	Poroso	30	90.40
$\alpha$	Espuma poliuretano flexível de célula aberta	Poroso	40	26.48
$\beta$	Espuma poliuretano flexível de célula aberta	Poroso	50	12.12

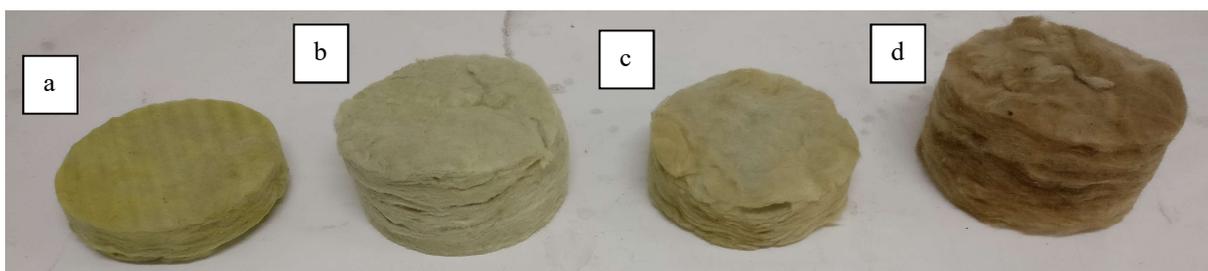


Figura 4.7 – Material absorvente fibroso, lã mineral.



Figura 4.8 – Material absorvente fibroso e poroso, fibra de poliéster e espumas poliuretano flexível célula aberta.



Figura 4.9 – Material absorvente fibroso, aglomerados de espumas e aglomerado de fibras de tecido.

## 5 CASOS DE ESTUDO

Explana a metodologia a aplicar, prossegue-se para a caracterização das amostras e demonstração dos resultados. O presente estudo visa não só a aferição do modelo numérico, através da comparação com os resultados das medições no tubo de impedância, mas também a avaliação do melhor posicionamento do material absorvente (material poroso). Esta investigação tem por base soluções construtivas ajustadas ao mercado nacional e internacional, particularmente no que toca às opções dos materiais absorventes. Para se obter uma boa compreensão das alternativas a serem estudadas neste trabalho, optou-se por realizar um estudo detalhado do efeito da alteração do tipo de material absorvente, para diferentes espessuras, e a análise de várias alternativas para painéis perfurados.

### 5.1 Caracterização e descrição das combinações de amostras

Como referido anteriormente, propõe-se avaliar o nível da absorção sonora nos vários tipos de painel perfurado de madeira disponibilizados. Por forma a alcançar os objetivos propostos, neste trabalho estabelecem-se várias configurações de sistemas de painéis acústicos, fazendo variar o posicionamento do material absorvente (material poroso ou fibroso). Para os ensaios em laboratório, recorreu-se aos sistemas com os seguintes tipos de painel, 4 painéis microperfurados, 2 placas microranhuradas e, por fim, 10 materiais porosos ou fibrosos. As diferentes combinações alcançam-se fazendo corresponder cada tipo de material absorvente a cada tipo de painel perfurado. Ainda, para um melhor entendimento da função da caixa-de-ar no desempenho acústico do sistema, propõem-se posicionamentos diferentes do material absorvente. Em primeiro lugar, colocamos o material absorvente junto à superfície rígida, criando uma caixa-de-ar intermédia. Em segundo lugar, posicionamos o material absorvente imediatamente após o painel perfurado, ficando a mesma caixa-de-ar junto da superfície rígida. Através dos esquemas apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2 e também no Quadro 5.1 é possível compreender melhor o posicionamento e as características de ambas as situações acima referidas.

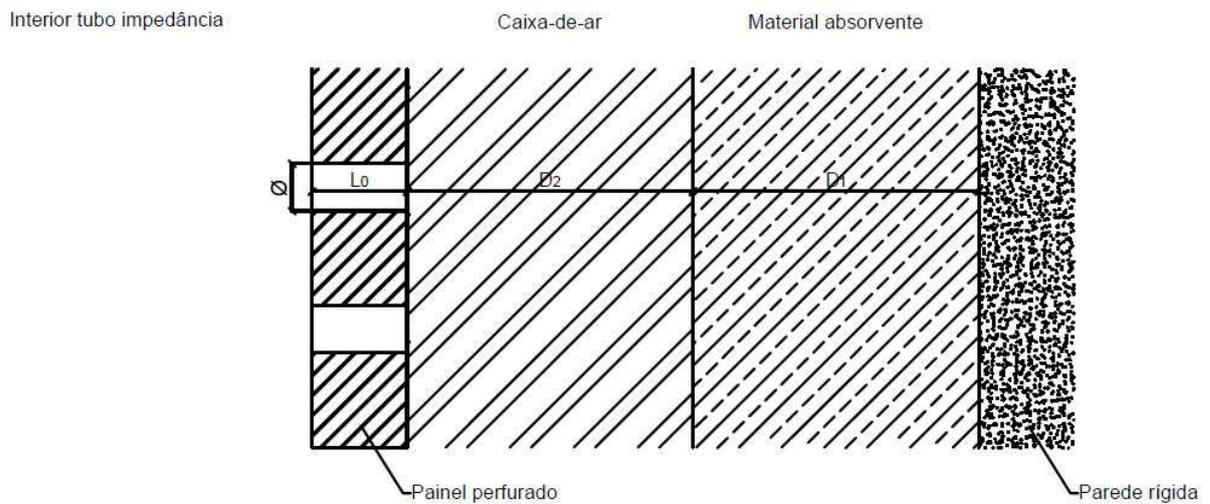


Figura 5.1 – Esquema de montagem do sistema, com painel perfurado+caixa-de-ar+material absorvente.

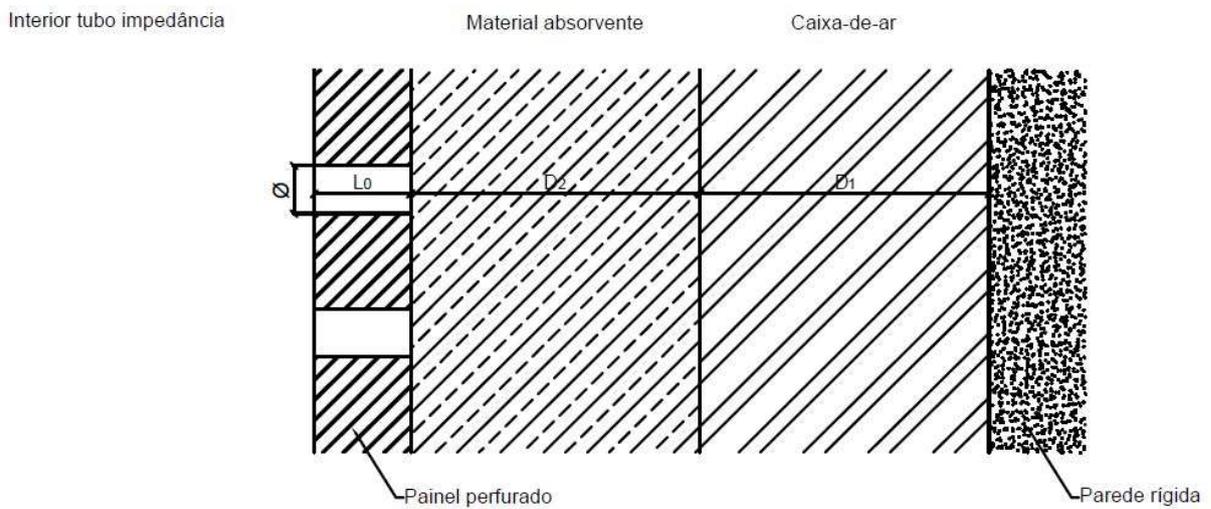


Figura 5.2 – Esquema de montagem do sistema, com painel perfurado +material absorvente+caixa-de-ar.

Com o intuito de aplicar o modelo proposto por Delaney-Bazley-Miki torna-se necessária a determinação da resistividade ao fluxo de ar dos materiais porosos e fibrosos. No Quadro 5.1 estão indicados os valores desse parâmetro. A determinação deste valor é realizada através da aproximação da curva calculada pelo modelo teórico à curva de absorção sonora medida de cada material absorvente individualmente. Foi utilizado um algoritmo genético, implementado em MatLab®, por forma a obter a melhor adaptação das curvas possíveis. Resulta no final desta aplicação o valor da resistividade do fluxo de ar. As curvas de absorção sonora de cada material absorvente estão apresentadas na Figura 5.3.

Quadro 5.1 – Amostragem para composição do sistema acústico a ensaiar.

<i>Tipo de painel</i>	<i>Simbologia</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Taxa efetiva de perfuração [%]</i>	<i>Resistividade ao fluxo de ar [N.s/m<sup>4</sup>]</i>
Microperfurado	1	16,8	3,27	-
Microperfurado	2	17,6	3,27	90000*
Microperfurado	3	20,6	0,71	90000*
Microperfurado	4	20,6	1,11	90000*
Microranhurado	I	0,8	11.46	-
Microranhurado	II	3	2.29	-
Caixa de ar	@	20	-	-
Fibroso	a	20	-	98495
Fibroso	b	40	-	42041
Fibroso	c	30	-	26554
Fibroso	d	50	-	9257
Fibroso	e	30	-	2194
Poroso	A	30	-	58740
Fibroso	B	20	-	84887
Poroso	C	30	-	32214
Poroso	$\alpha$	40	-	33576
Poroso	$\beta$	50	-	9230

\* - valor estimado com base em [19] correspondendo ao véu acústico existente no tardo do painel.

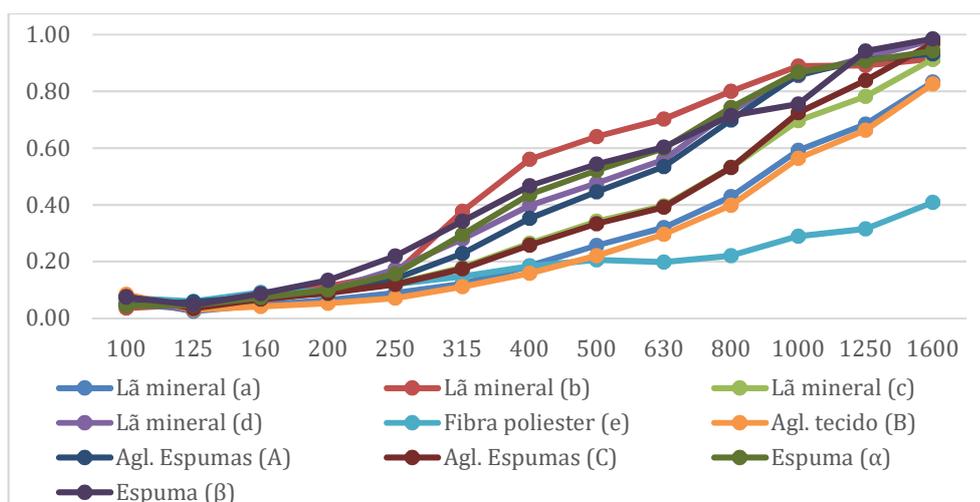


Figura 5.3 – Curva de absorção sonora dos materiais absorventes.

Através das várias combinações entre os materiais chegamos a uma campanha de ensaios experimentais com 118 ensaios a realizar. É uma dimensão de amostragem passível de responder aos objetivos propostos e, conseqüentemente, retirar conclusões.

Nas Figuras 5.4 a 5.7 procura-se mostrar os diferentes tipos de painéis perfurados estudados. Em particular, a Figura 5.4 ilustra a face “visível” do painel microperfurado em termolaminado, ou seja, a face exposta às ondas sonoras incidentes. Esta face é comum aos painéis “1”, “2”, “3” e “4”. Nos painéis “3” (Figura 5.5) observa-se a placa de MDF de 3mm macroperfurado. O painel “4” também é composto por uma placa semelhante, consistindo a diferença num diâmetro de perfuração maior. Por fim, nas Figuras 5.6 e 5.7 observam-se as placas microranhuradas utilizadas nos ensaios no tubo de impedância.



Figura 5.4 – Painel MDF com revestimento em termolaminado microperfurado com diâmetro de perfuração de  $\varnothing = 0,5mm$ .



Figura 5.5 – Painel MDF microperfurado com placa macroperfurada no tardoz com diâmetro de  $\varnothing = 8mm$ .

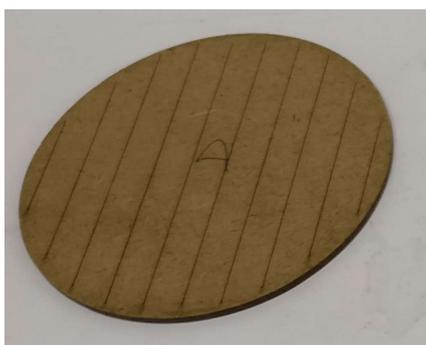


Figura 5.6 – Painel MDF microranhurado com ranhuras com largura de  $t = 0,2mm$ .

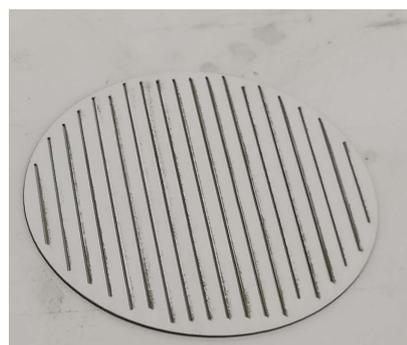


Figura 5.7 – Placa de termolaminado microranhurado com ranhuras com largura de  $t = 0,5mm$ .

## 5.2 Resultados do ensaio laboratorial com o tubo de impedância

São expostas neste subcapítulo todas as representações gráficas resultantes da campanha de ensaios no tubo de impedância. Para uma melhor compreensão, optou-se por expor graficamente os resultados. Neles observa-se a variação do coeficiente de absorção sonora em função da frequência, sendo designados por curva de absorção sonora. Os valores indicados são valores médios de três ensaios, para cada tipo de configuração. Os gráficos apresentados dizem respeito apenas às combinações dos diferentes tipos de material absorvente e posicionamento da caixa-de-ar. No entanto, restringiu-se, numa primeira fase, os resultados apenas aos registados para os sistemas com o painel microporoso “3” e a placa microranhurada “I”. Posteriormente, numa segunda fase, efetua-se uma análise aos diferentes tipos de painéis, mantendo como material absorvente o aglomerado de espumas “A” e o painel de lã mineral “b”. Como também referido nos capítulos anteriores, neste tipo de ensaios apenas será possível observar a gama de frequências entre os  $100Hz$  e os  $1600Hz$ , como indicado na norma internacional ISO 10534-2 [7], devido ao diâmetro interior do tubo de impedância utilizado.

### 5.2.1 Painel microporoso

Relativamente aos ensaios dos painéis microporosos, nesta subsecção estão expostas as análises referentes a diferentes materiais porosos. Numa primeira situação, o material absorvente é encostado à parede rígida e posteriormente o material absorvente é colocado junto ao painel perfurado (Figuras 5.8 e 5.9 respetivamente). Da mesma forma, nas Figuras 5.10 e 5.11 representam-se as análises da aplicação de materiais fibrosos.

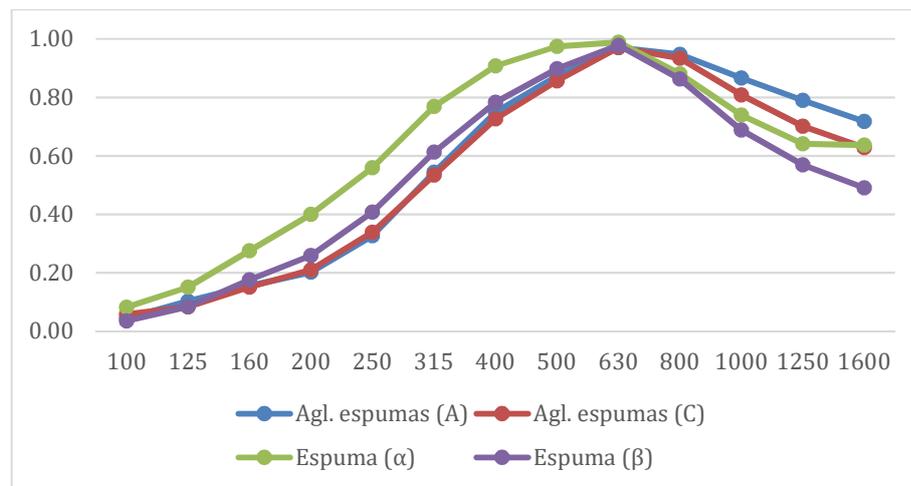


Figura 5.8 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “3”+caixa-de-ar+material poroso.

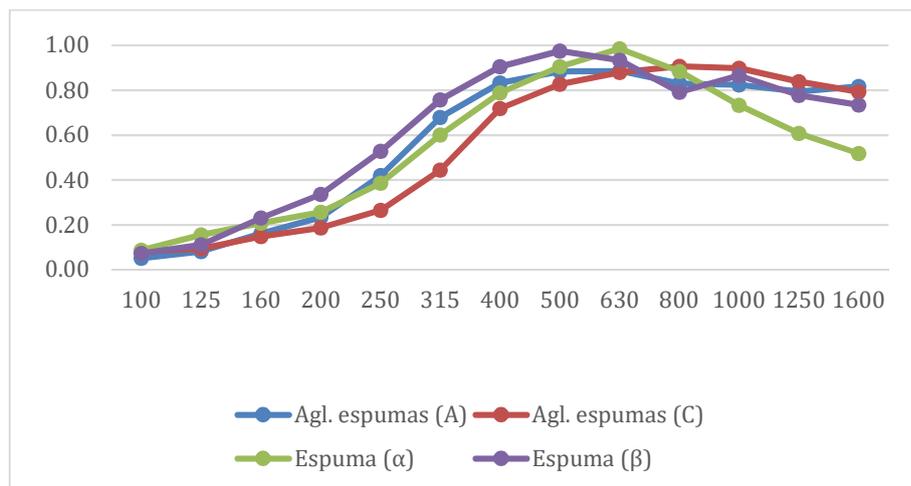


Figura 5.9 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “3” +material poroso”+caixa-de-ar.

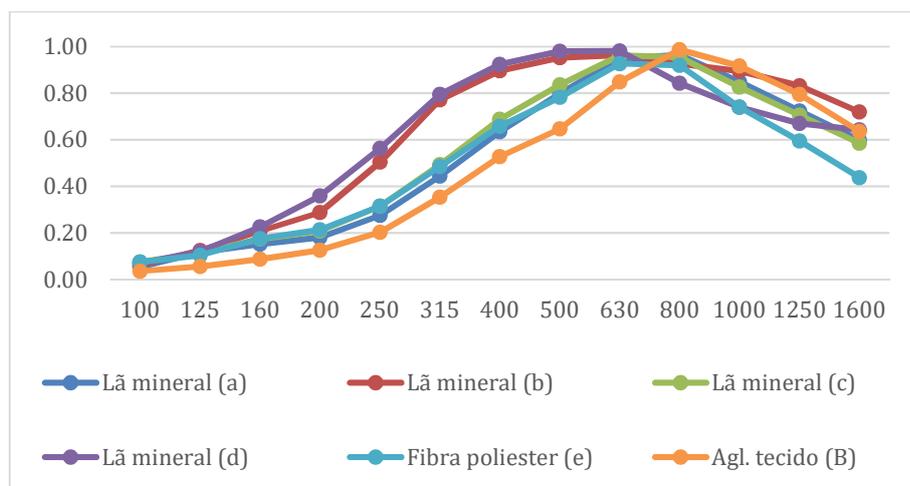


Figura 5.10 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “3”+caixa-de-ar+material fibroso.

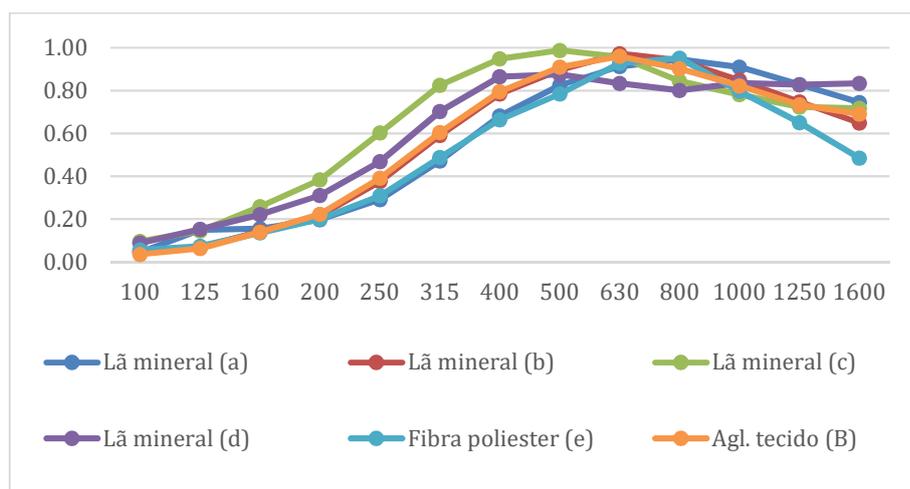


Figura 5.11 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “3”+material fibroso”+caixa-de-ar.

Nas Figuras 5.8 a 5.11 é possível constatar que os painéis microperfurados produzem um efeito favorável na absorção sonora nas frequências médias. Para a configuração composta pelo painel microperfurado “3”, com caixa-de-ar intermédia e materiais absorventes porosos, observa-se um desempenho relevante nas médias frequências. Este efeito é alterado ligeiramente para as frequências mais altas, com alteração do posicionamento da caixa-de-ar para junto da parede rígida.

A utilização da espuma “ $\alpha$ ” apresenta melhores resultados em várias frequências, ao passo que nas frequências mais altas o aglomerado de espumas “A” permite maior absorção. Na análise da Figura 5.8 e do quadro A.3, dos anexos, verifica-se que estas configurações têm a sua absorção máxima na frequência 630Hz, com o valor de 0,99, no caso que se utiliza o material “ $\alpha$ ”. No que toca à alteração do posicionamento do material absorvente (Figura 5.9 e Quadro A.10), colocando-o imediatamente após o painel perfurado, a maior absorção ocorre novamente na frequência de 630Hz.

Na análise aos gráficos das Figuras 5.10 e 5.11, onde se utilizam os materiais fibrosos, observa-se um comportamento idêntico. Entre os materiais avaliados, as lãs minerais são as que oferecem um melhor desempenho e, logicamente, uma boa absorção sonora em várias frequências. Em especial, a lã mineral “b” e “d” que são as que ostentam a maior espessura, têm uma melhor absorção sonora. Para o caso do sistema com a caixa-de-ar intermédia (Figura 5.10 e Quadro A.3), a maior absorção sonora dá-se para a frequência 500Hz, com o valor de 0,98, com a lã mineral “d”.

### 5.2.2 Painel microranhurado

Neste subcapítulo, a representação gráfica dos resultados é novamente utilizada. Neste subcapítulo serão avaliados os painéis microranhurados, tendo por base a avaliação da curva de absorção sonora. Nas Figuras 5.12 e 5.13, avaliam-se os sistemas de painéis microranhurados em conjunto com os materiais porosos. Na Figura 5.12, a caixa-de-ar do sistema localiza-se entre os materiais e, na Figura 5.13, o material absorvente localiza-se após o painel microranhurado. Da mesma forma, nas Figuras 5.14 e 5.15, expõem-se os resultados obtidos com a aplicação de materiais fibrosos.

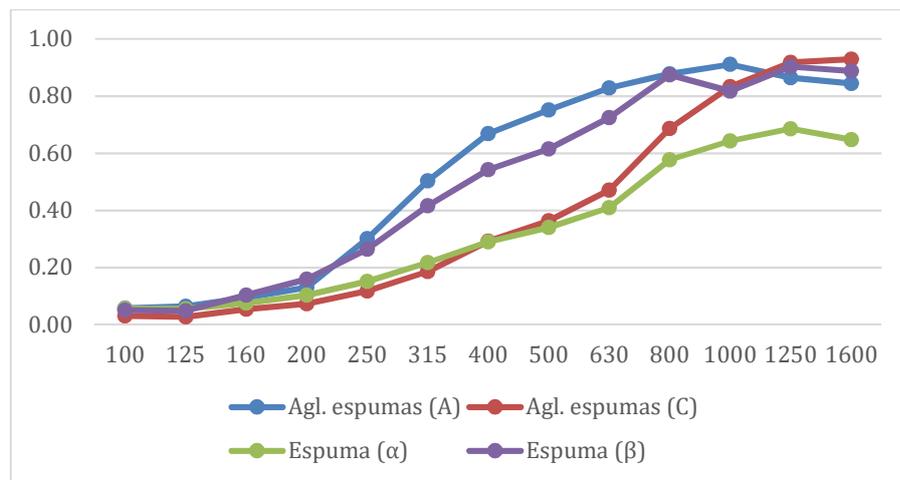


Figura 5.12 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “I”+caixa-de-ar+material poroso.

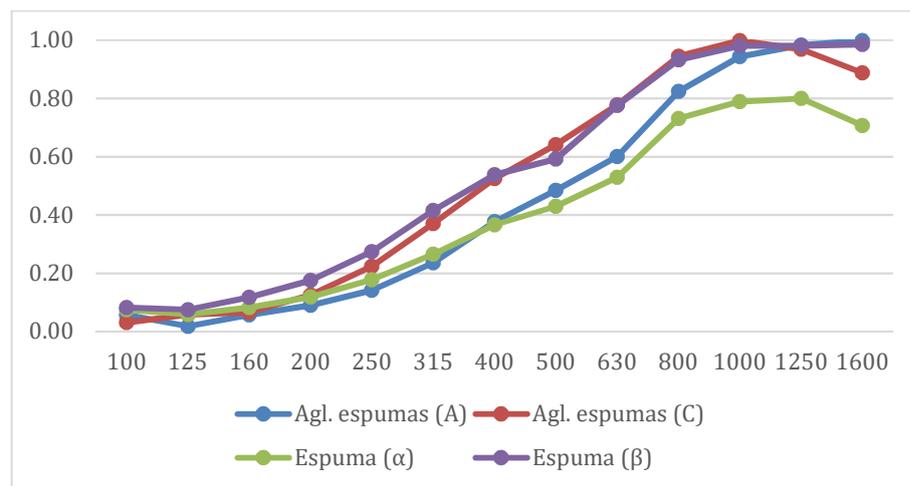


Figura 5.13 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “I” +material poroso+caixa-de-ar.

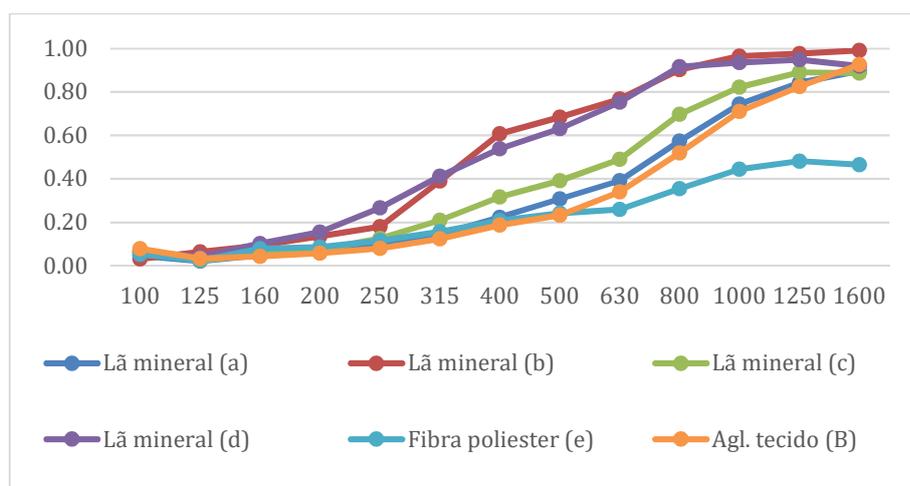


Figura 5.14 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “I”+caixa-de-ar+material fibroso.

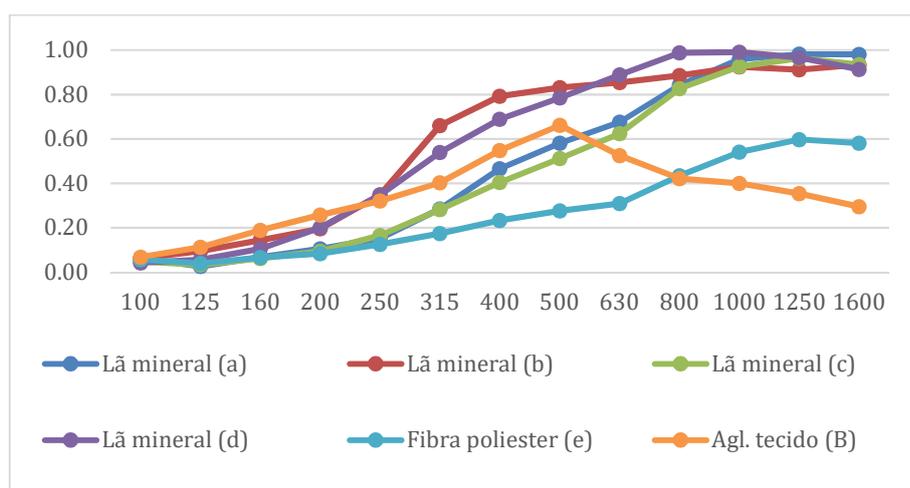


Figura 5.15 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painel “I” +material fibroso”+caixa-de-ar.

Transversalmente, nas Figuras 5.12 a 5.15, observa-se que este painel microranhurado tem uma pior absorção sonora nas baixas e médias frequências, comparativamente com o painel “3” com perfurações circulares. Esta situação deve-se sobre tudo ao fato de este painel ter uma reduzida espessura e uma maior área aberta na face visível. Contudo, no que respeita ao comportamento observado na subsecção anterior, com a utilização do painel microperfurado, alterando o posicionamento da caixa-de-ar verifica-se um ligeiro melhoramento nas altas frequências para alguns materiais.

Observa-se que a configuração do painel com caixa-de-ar intermédia e com os aglomerados de espuma, são as que têm melhor absorção sonora. A maior absorção sonora ocorre na frequência 1000Hz, com o valor de 0,91, para o caso do aglomerado de espumas “A” junto à superfície rígida. Com a caixa-de-ar junto à parede rígida e com o melhor material absorvente, o valor máximo de 1 de absorção sonora ocorre na frequência de 1600Hz.

Na análise dos materiais fibrosos constata-se uma vez mais que as lãs minerais “b” e “d” têm novamente os melhores resultados. No caso da caixa-de-ar junto à parede rígida, e com a lã mineral “d”, o valor máximo de absorção sonora ocorre na frequência de 1000Hz e com o valor de 0,99. Com a caixa-de-ar entre os materiais, a frequência de 1600Hz exhibe o valor máximo de absorção sonora.

### 5.2.3 Material absorvente poroso

Numa perspetiva de avaliação do desempenho de cada tipo de painel perfurado, efetua-se agora uma análise detalhada utilizando um material absorvente poroso, o aglomerado de espumas “A”. Na Figura 5.16 expõem-se os resultados com a caixa-de-ar entre painéis, ao passo que, na Figura 5.17, a mesma caixa-de-ar se localiza junto do painel perfurado.

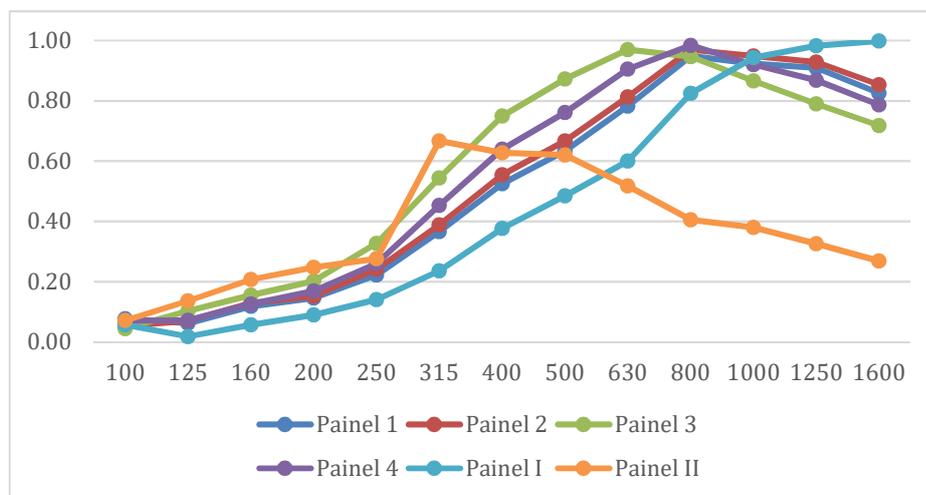


Figura 5.16 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painéis perfurados+caixa-de-ar+material poroso “A”.

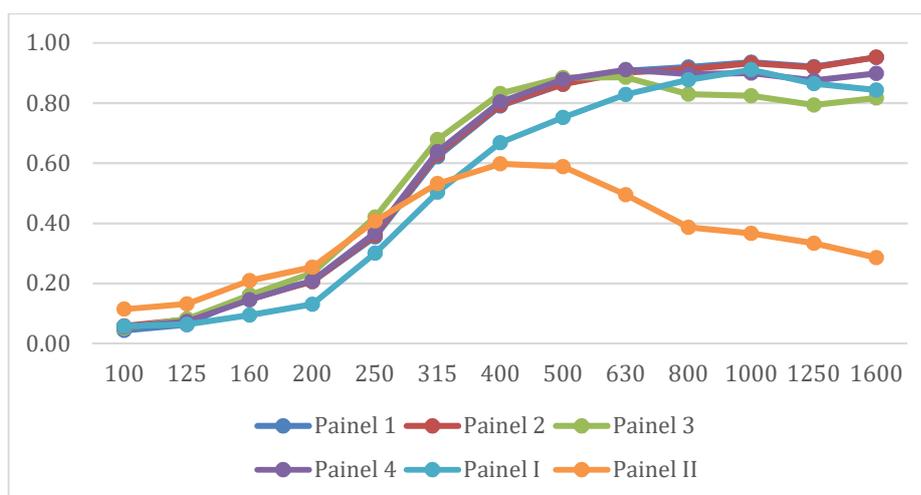


Figura 5.17 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painéis perfurados +material poroso “A”+caixa-de-ar.

Transversalmente, observa-se que todos os painéis microp perfurados apresentam uma absorção sonora com uma evolução similar. Destaca-se, em particular o painel “3” com maiores coeficientes de absorção nas frequências médias, contudo este nas altas frequências tem piores desempenhos. No que toca aos painéis microranhurados, verifica-se uma boa absorção sonora nas altas frequências no painel “I”; contrariamente, o painel “II” apenas tem um bom desempenho nas médias frequências.

Numa análise mais detalhada dos valores na situação com a caixa-de-ar intermédia, com o auxílio dos quadros em anexo, observa-se que o painel “1” obtém uma absorção máxima na frequência dos 800Hz e o painel “3” na frequência de 630Hz. Nos painéis microranhurados, o painel “I” alcança uma absorção de 1,00 na frequência de 1600Hz e o painel “II” uma absorção 0,67 nos 315Hz. Com a caixa-de-ar junto da superfície rígida, para o mesmo tipo de painéis analisados anteriormente, a absorção máxima dá-se nas frequências de 1600Hz e 630Hz, para o painel “1” e o painel “3” respetivamente. Nos microranhurados, para o painel “I” tem-se uma absorção sonora de 0,91 na frequência de 1000Hz e o painel “II” um valor 0,60 na frequência de 400Hz.

#### 5.2.4 Material absorvente fibroso

Neste subcapítulo, efetua-se uma análise detalhada de cada tipo de painel com a utilização de um material absorvente fibroso, a lã mineral “b”. As Figuras 5.18 e 5.19 procuram representar as curvas de absorção sonora para cada tipo de painel ensaiado.

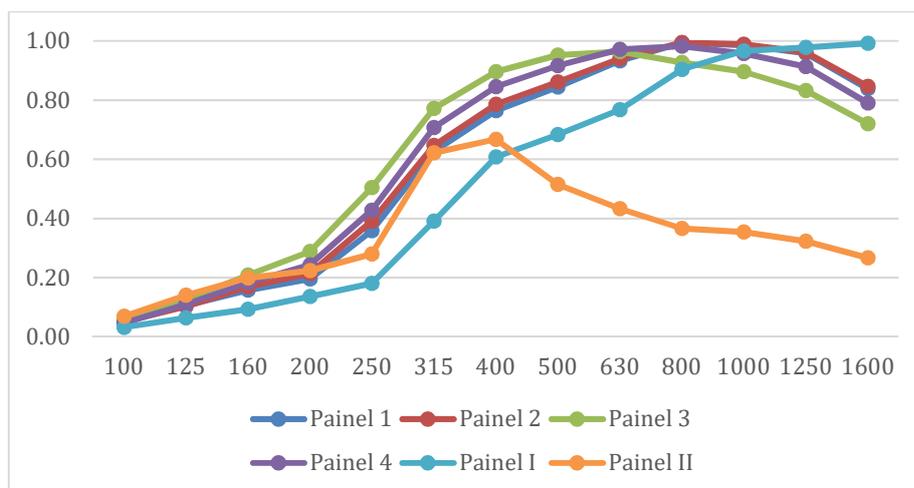


Figura 5.18 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painéis perfurados+caixa-de-ar+material fibroso “b”.

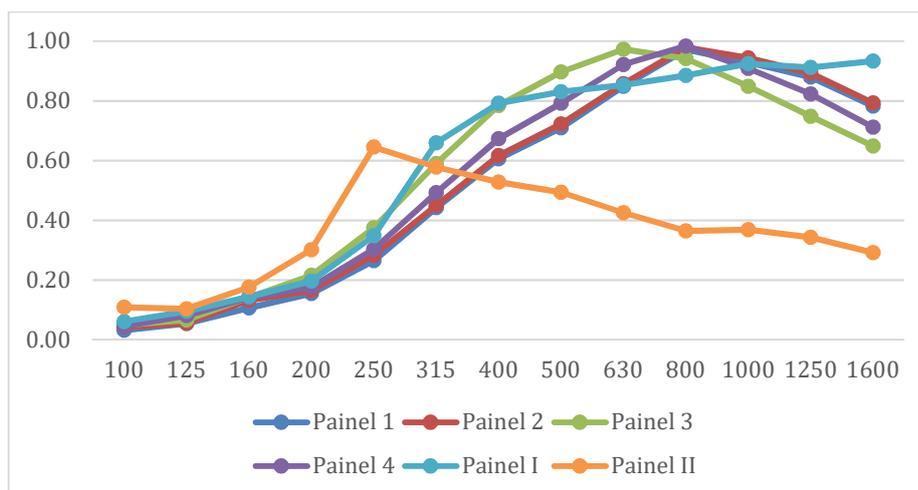


Figura 5.19 – Curva de absorção sonora experimental, para a configuração painéis perfurados +material fibroso “b”+caixa-de-ar.

De uma forma geral, as curvas de absorção sonora com este tipo de material absorvente têm um desempenho semelhante ao material poroso. Tal como em situações anteriores, os painéis microperfurados voltam a registar os melhores comportamentos.

Numa análise mais particular, podemos avaliar os valores de absorção sonora e as respetivas frequências. Numa primeira fase, quando a caixa-de-ar se localiza entre ambos os materiais, observa-se que o painel “3” tem o valor mais alto de coeficiente de absorção na frequência dos 630Hz e no painel “1” ocorre na frequência de 1000Hz. Por sua vez, o painel “I” tem o valor

máximo na frequência de 1600Hz e o painel “II” na de 400Hz. Passando para a configuração, em que a caixa-de-ar está junto da parede rígida, o painel “1” alcança uma absorção de 0,97 na frequência de 800Hz e o painel “3” também 0,97, mas numa frequência mais baixa de 630Hz. Para os painéis “I” e “II”, os valores mais elevados de absorção sonora ocorrem nas frequências de 1600Hz e 200Hz, respetivamente.

### 5.3 Resultados da aplicabilidade do modelo numérico

No que toca à aplicabilidade do modelo numérico explanado no capítulo 3, para obtenção de uma previsão da absorção sonora de diferentes sistemas, optou-se por calcular apenas algumas das configurações. Os resultados deste cálculo são também apresentados graficamente, onde as ordenadas representam a absorção sonora e as abcissas as frequências. Para que possamos comparar os mesmos resultados, consideraram-se os mesmos limites da gama de frequências a analisar.

#### 5.3.1 Painel microperfurado

Pretende-se avaliar, nas Figuras 5.20 e 5.21, os resultados obtidos experimentalmente com os resultantes do cálculo. Foram então utilizadas as configurações compostas pelo painel microperfurado “3”, onde na Figura 5.20 o material absorvente se localiza junto à parede rígida. Ao passo que na Figura 5.21, este material se encontra junto do painel perfurado.

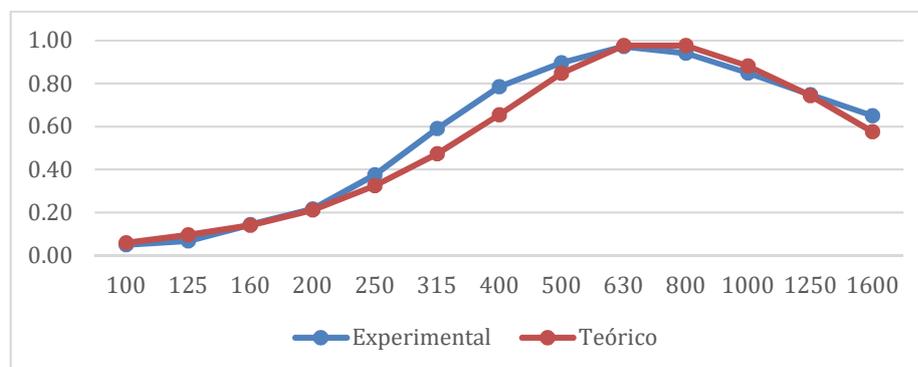


Figura 5.20 – Curva de absorção sonora experimental e teórica, para a configuração painel “3”+caixa-de-ar+lã mineral “b”.

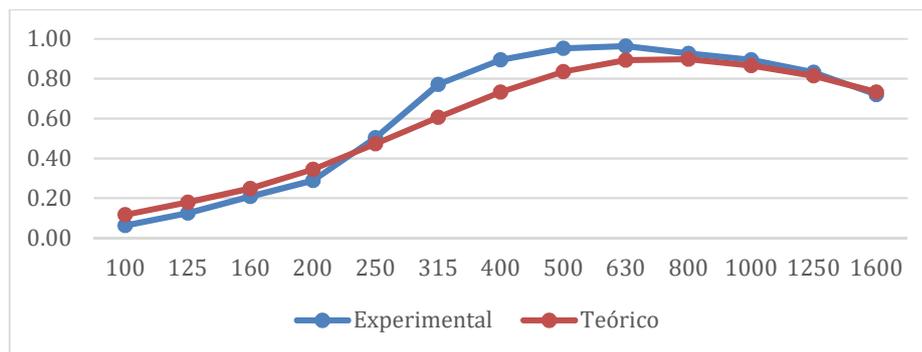


Figura 5.21 – Curva de absorção sonora experimental e teórica, para a configuração painel “3” +lã mineral “b”+caixa-de-ar.

Comprova-se que o uso do algoritmo do modelo teórico produz bons resultados para a previsão do desempenho acústico de sistemas de painel microperfurado. Por um lado, o caso da existência da caixa-de-ar entre os materiais a previsão é muito idêntica ao resultado experimental; por outro, com a alteração da caixa-de-ar o resultado experimental é ligeiramente diferente nas frequências médias.

### 5.3.2 Painel microranhurado

Para avaliação do modelo numérico, no caso dos painéis microranhurados, apresentam-se as Figuras 5.22 e 5.23, onde são avaliados os sistemas acústicos com o aglomerado de espumas “A”. Na Figura 5.22, representa-se o comportamento do sistema com a caixa-de-ar entre os materiais e, na Figura 5.23, a sua troca de posição com o material absorvente.

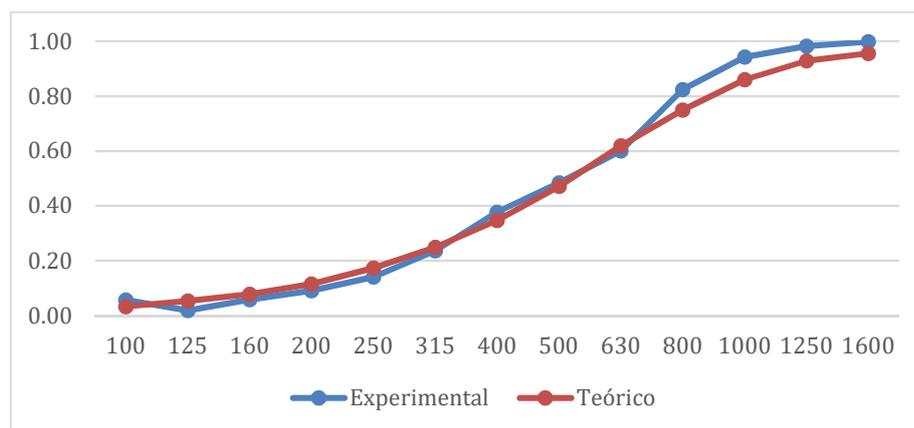


Figura 5.22 – Curva de absorção sonora experimental e teórica, para a configuração painel “I”+caixa-de-ar+aglomerado de espumas “A”.

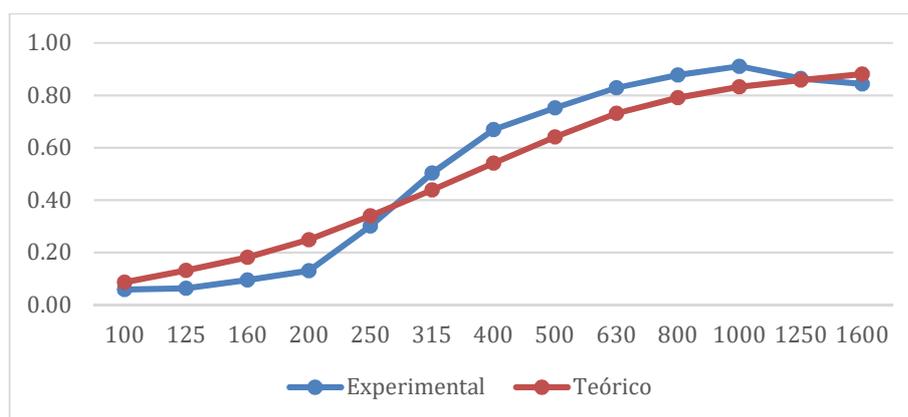


Figura 5.23 – Curva de absorção sonora experimental e teórica, para a configuração painel “I” +aglomerado de espumas “A”+caixa-de-ar.

Através da observação destes gráficos deduz-se que o modelo de previsão gera resultados muito semelhantes aos experimentais. Destaca-se a Figura 5.22, onde praticamente em todos os pontos a curva de previsão é coincidente com a curva experimental, contrariamente ao caso do sistema com o material absorvente junto do painel, representado na Figura 5.23.

### 5.3.3 Desempenho do sistema de painel microperfurado com alteração da caixa-de-ar.

Foi já visto, no subcapítulo anterior, que a aplicabilidade do modelo numérico é válida. Nesta secção, é usado o modelo de previsão da absorção sonora para analisar diferentes sistemas acústicos, fazendo variar a espessura da caixa-de-ar, e considerando caixas-de-ar de grande dimensão. O sistema é então composto pelo painel “3”, o material absorvente “b” (lã mineral) e caixa-de-ar. Nos resultados da Figura 5.24, o material absorvente localiza-se junto à parede rígida, ao passo que na Figura 5.25 esse material está junto do painel perfurado.

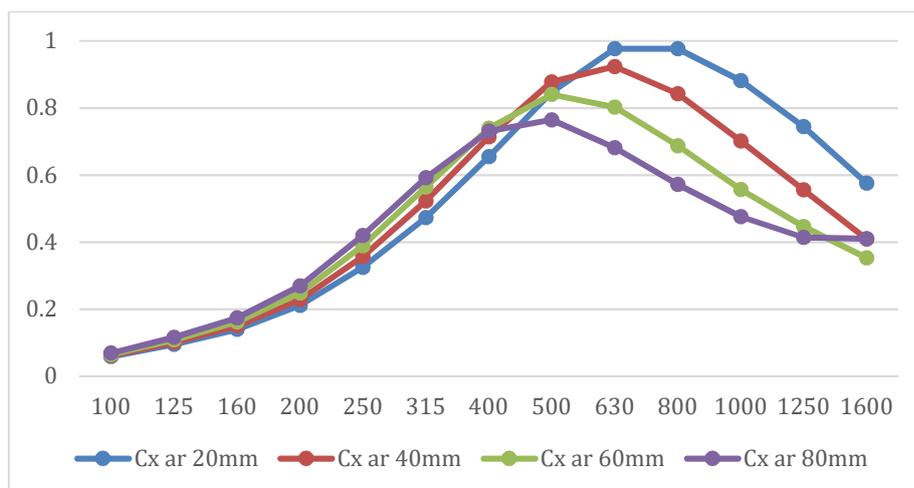


Figura 5.24 – Curva de absorção sonora teórica, para a configuração painel “3”+caixa-de-ar+lã mineral “b”.

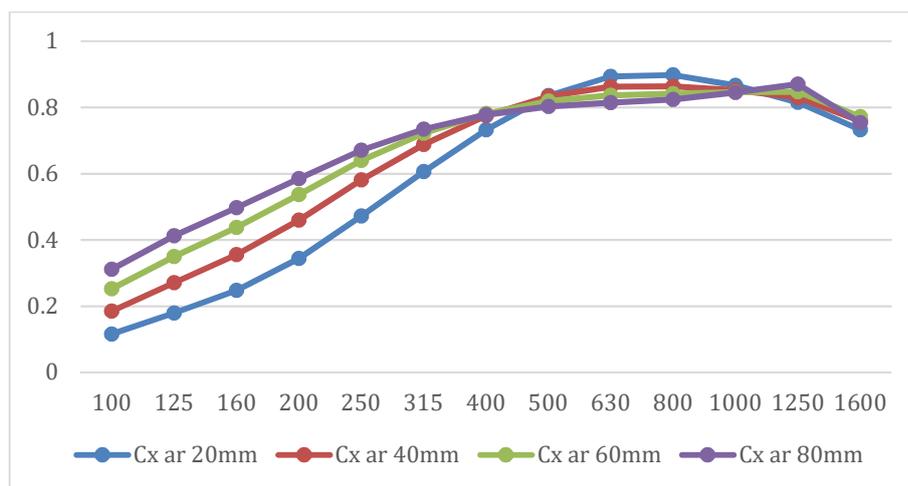


Figura 5.25 – Curva de absorção sonora teórica, para a configuração painel “3” +lã mineral “b”+caixa-de-ar.

Observa-se que o aumento da caixa-de-ar entre os materiais provoca um aumento da absorção sonora nas baixas frequências, devido à frequência de ressonância deslocar-se para estas. Em especial para uma caixa-de-ar com 20mm, a maior absorção ocorre nas frequências de 800Hz e 630Hz com o valor de 0,98. Quando o material absorvente se encontra junto ao painel perfurado observa-se que ocorrem diferentes ressonâncias nas frequências de 400Hz e 1250Hz com o aumento da espessura da caixa-de-ar. Observando o Quadro A.19, novamente com a menor espessura de caixa-de-ar, 20mm ocorre a maior absorção com o valor de 0,90.

### 5.3.4 Desempenho do sistema de painel microranhurado com alteração da caixa-de-ar.

Da mesma forma, neste subcapítulo, realizou-se o cálculo de previsão da absorção sonora do sistema de painel microranhurado. O sistema considerado é constituído pelo painel “I”, o material absorvente “A” e caixa-de-ar. Na Figura 5.26 o material absorvente localiza-se junto à parede rígida. Na Figura 5.27, esse material está junto do painel perfurado.

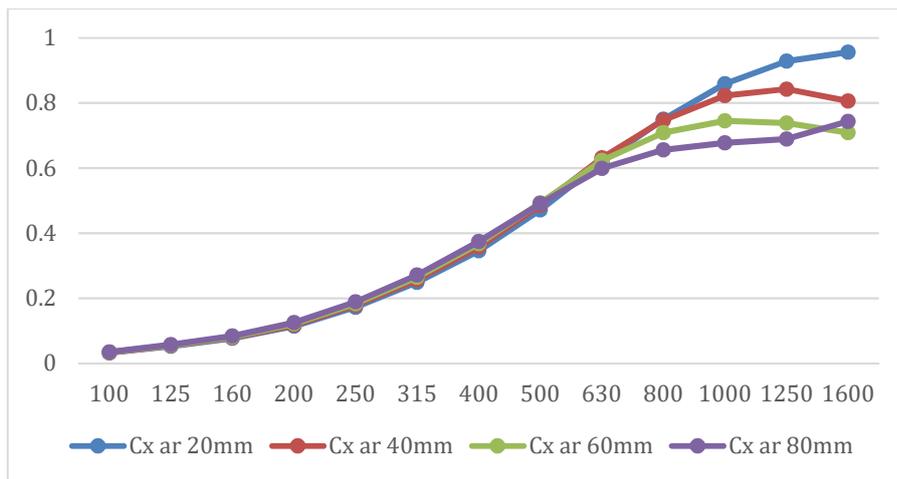


Figura 5.26 – Curva de absorção sonora teórica, para a configuração painel “I”+caixa-de-ar+aglomerado de espumas “A”.

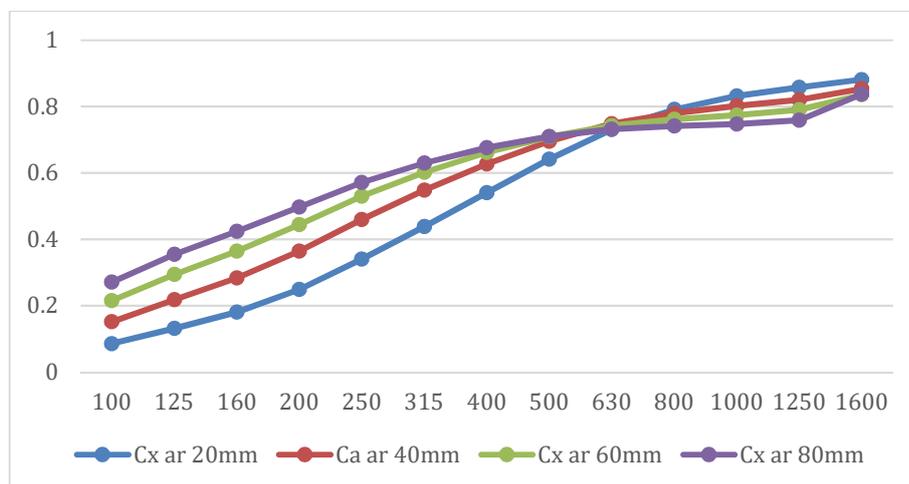


Figura 5.27 – Curva de absorção sonora teórica, para a configuração painel “I” +aglomerado de espumas “A”+caixa-de-ar.

Verifica-se que, na utilização dos painéis microranhurados com o material absorvente junto à superfície rígida, a frequência de ressonância ocorre novamente para frequências maiores.

Neste caso, a maior absorção sonora, analisando esta banda de frequências, ocorre com a utilização de uma caixa-de-ar menor. Esta conclusão poderá não ser verdadeira, pois estamos a analisar um espectro de frequências reduzido. Com a análise detalhada do Quadro A.20 destaca-se, então, o sistema com a caixa-de-ar de 20mm, onde a maior absorção ocorre na frequência 1600Hz, com o valor de 0,96. Quando o material absorvente se encontra junto ao painel absorvente, verifica-se que ocorrem alterações especialmente nas baixas frequências. Contudo, a frequência de ressonância ocorre nas frequências mais altas. Comparando com a mesma situação anterior, e estudando o Quadro A.21, a maior absorção ocorre na 1600Hz, com o valor de 0,88.

#### 5.4 Discussão de resultados

De uma forma geral, todos os sistemas de painel acústico avaliados neste trabalho produzem benefícios no condicionamento acústico. Na absorção sonora, um fator que se revelou importante é o posicionamento da caixa-de-ar no sistema. A alteração do seu posicionamento traduz-se numa absorção sonora em gamas de frequências diferentes. Deste modo, é possível dizer que uma incorreta produção ou instalação do sistema de painel (por exemplo, a deficiente colocação do material absorvente) poderá resultar numa solução acústica diferente da de projeto, o que conduz a um mau condicionamento acústico.

No presente não existem muitas empresas a nível nacional com oferta de soluções de painéis com perfurações de dimensão reduzida (microperfurados ou microranhurados). No entanto, nesta dissertação foram estudadas soluções multicamada com este tipo de painéis, onde foi possível observar um bom desempenho acústico deste tipo de sistemas. Mas, como referido anteriormente, o custo de fabrico deste tipo de painéis é mais elevado, comparativamente com os painéis perfurados convencionalmente. Tal fato deve-se ao processo de produção deste material e ao tipo de maquinaria existente em carpintarias industriais.

Na avaliação dos painéis microperfurados testados, verifica-se que os painéis que comportam o véu acústico no seu tardo (painel “2”, “3” e “4”) ofereceram melhores resultados. Por um lado, no caso deste tipo de painéis, com caixa-de-ar intermédia e lã mineral “b” ou “d”, a maior absorção sonora tem o valor aproximado de 0,98 ocorrendo na frequência de 630Hz, aproximadamente. Por outro lado, no caso do material absorvente se localizar após o painel perfurado, esta frequência aumenta ligeiramente para os 800Hz, aproximadamente.

No caso dos painéis microranhurados avaliados, em especial na utilização do painel “II”, devido à sua reduzida taxa de perfuração os resultados da absorção sonora dos sistemas foi baixo. Através da utilização deste tipo de painel, com caixa-de-ar intermédia e o aglomerado de espumas “A”, apenas obtivemos uma absorção sonora máxima de 0.67, dada na frequência de

315Hz. Se trocarmos de posição o material absorvente, a maior absorção sonora ocorre numa frequência ligeiramente maior na de 400Hz.

Da análise dos materiais absorventes utilizados, os materiais fibrosos, em ambas as configurações da posição da caixa-de-ar, são os que oferecem melhor absorção sonora. Destaca-se que a lã mineral “b” e “d” teve uma boa absorção sonora no espectro de frequências analisado. Na utilização do painel microperfurado, com a lã mineral “b” e a caixa-de-ar intermédia, a maior absorção é dada na frequência de 800Hz. No que concerne à utilização de materiais porosos, o aglomerado de espumas “A” é também uma boa solução acústica, pois no espectro de frequências avaliado, também ofereceu uma boa absorção. Na situação do uso do painel microperfurado, com o aglomerado de espuma “A” e caixa-de-ar intermédia, a maior absorção é dada na frequência de 800Hz.

Os dados revelam que a aplicabilidade do algoritmo do modelo numérico para a determinação de uma previsão de desempenho acústico dos sistemas produzem bons resultados, mostrando-se possível afirmar que existe uma boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados do cálculo numérico. Não é demais referir que neste trabalho apenas se analisa uma gama de frequências reduzida, dos 100Hz aos 1600Hz, como determinado a partir da norma internacional ISO 10534-2 [7]. É nessa gama que se constata esta concordância.

Verifica-se ainda um benefício no aumento de espessura da caixa-de-ar. Este obtém-se mais eficazmente quando este se localiza entre os materiais, devendo-se este fato à ocorrência da frequência de ressonância em frequências mais baixas. Contudo, este benefício na absorção sonora apenas se verifica até determinada espessura, enquanto para espessuras maiores a absorção sonora começa a diminuir. Observa-se também uma maior absorção sonora nas baixas frequências quando a colocação desse material absorvente é feita junto do painel perfurado, sendo este efeito mais notório quando é utilizado um painel microranhurado.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação de Mestrado abordou-se uma questão de grande relevância no contexto prático da engenharia acústica, relacionada com o desempenho, do ponto de vista da absorção sonora, de diferentes sistemas multicamada usados em condicionamento acústico de espaços fechados.

Os resultados da aplicação dos possíveis sistemas de painéis acústicos indicam que a metodologia utilizada nesta investigação permite obter a sensibilidade dos materiais introduzidos e determinar melhor o posicionamento do material poroso ou fibroso na caixa-de-ar.

Através desta investigação consegue-se aferir que o modelo de previsão produz bons resultados, pois a curva de absorção sonora resultante do cálculo numérico é coincidente com alguns dos resultados das várias configurações dos sistemas, embora restrito a uma gama de frequências reduzida, dos 100Hz aos 1600Hz. Para uma avaliação mais conclusiva, propõe-se um estudo mais detalhado numa gama mais alargada de frequências. Considera-se que, com o recurso a esta ferramenta, técnicos e projetistas poderão desenvolver sistemas acústicos mais eficazes e adequados a cada situação, e, sobretudo, compreender melhor o comportamento de cada sistema.

Relativamente ao posicionamento do material absorvente na caixa-de-ar, a absorção sonora é melhorada nas baixas e médias frequências, se este se localizar imediatamente após o painel perfurado. Pelo contrário, se o absorvente se localizar junto da parede rígida, o pico de ressonância ocorre nas altas frequências. No que concerne à opção entre materiais porosos ou fibrosos, nos casos estudados, conclui-se que os materiais compostos por fibras são os que produzem melhores resultados acústicos. Por fim, alcança-se também uma sensibilidade aos diferentes posicionamentos e dimensões da caixa-de-ar.

É de referir também que o aumento da espessura da caixa-de-ar influencia o desempenho acústico dos sistemas de painel. Por outras palavras, quanto maior foi a dimensão da caixa-de-ar, melhor é a absorção sonora numa gama de frequências mais alargada. Esta proporcionalidade permite que ocorra em mais frequências, porém, o aumento de espessura é limitado e o benefício que pode oferecer ao sistema dessa absorção é menor.

---

Ao avaliar os tipos de painel microperfurados e os tipos de painéis microranhurados testados nesta investigação, podemos dizer que os que oferecem melhor desempenho acústico são os painéis que apresentam microperfurações circulares. Contudo, esta conclusão é restrita às amostras estudadas, uma vez que a variabilidade das espessuras desses painéis poderão se traduzir-se em resultados bastantes dispare. Assim, a partir destes resultados, estudos posteriores permitirão tecer conclusões mais sólidas relativamente às espessuras desses painéis e ao seu desempenho acústico.

Foram identificadas algumas limitações nesta investigação. Estas foram consideradas e assumidas na aquisição dos resultados. Entre as diversas limitações, salientam-se duas bastante pertinentes e que merecem uma reflexão particular: a qualidade da montagem do equipamento de medição laboratorial e a dificuldade em obter amostras de painel microperfurado ou microranhurado.

Relativamente à montagem, regista-se uma dificuldade significativa na montagem das amostras de forma absolutamente controlada (do ponto de vista de dimensões da caixa-de-ar, por exemplo) no equipamento de medição (tubo de impedância). Por outro lado, o porta-amostras do tubo, onde é realizada essa montagem, apresentava algumas imperfeições que necessitam de correção. Esta dificuldade provoca erros inerentes à medição laboratorial e introduz alguns erros significativos nas baixas frequências. O número limitado de amostras disponibilizadas é por si só também uma limitação. De fato, quanto maior for o número de amostras, melhor será a aferição do algoritmo implementado no software MatLab®.

A continuação deste tipo de estudos torna-se indispensável, de modo a que possam contribuir para um aperfeiçoamento da metodologia e dos resultados obtidos neste tipo de painéis, mas, também, explorar outros tipos de painéis. Neste trabalho, as perfurações tinham um nível de design reduzido. Crê-se que a própria evolução de painéis acústicos culminará num design mais apelativo, onde as perfurações poderão ter uma correlação de simetria com o revestimento do painel de madeira e até poderá ser possível a introdução de vários diâmetros de microperfurações na mesma face, melhorando a absorção sonora em diferentes frequências. Dados os custos de produção desses materiais na construção civil, considera-se que seria interessante efetuar, no futuro, estudos económicos que determinem o custo ótimo entre o desempenho acústico e a rentabilidade económica. Nesta ordem de ideias, seria igualmente interessante realizar um estudo dos ciclos de vida económica dos materiais e equipamentos.

Acresce referir que não se analisou o desempenho acústico dos painéis acústicos nas altas frequências nem em campo difuso, devido aos elevados custos laboratoriais dos ensaios em

câmara reverberante e ao cumprimento da norma ISO 354 [9], que implica que as amostras tenham mais de  $10m^2$  de área.

De um ponto de vista conclusivo e, inserindo-se a presente investigação no Mestrado de Especialização Avançada MEAECS, é importante sublinhar o papel atual, relevante e preponderante, da construção sustentável ao nível social, económico e ambiental. A construção civil, como em qualquer outra área da indústria, deverá ter em consideração esses níveis, por forma a salvaguardar a reutilização e/ou a reabilitação dos painéis acústicos (ou partes destes) e a potenciar a minimização dos desperdício dos materiais de construção. Só assim será possível garantir o alcance de uma melhor solução a médio e longo prazo, tanto no aspeto mecânico como na natureza dos materiais aplicados nos sistemas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Godinho, L., Amado Mendes, P., Patraquim, R., Jordão, A. (2011). “Avaliação do comportamento acústico de painéis ressonantes incorporando telas acústicas”. 42º Congresso espanhol de acústica, Cáceres.
- [2] Patrício, J. (2008). “Acústica nos Edifícios”. Verlag Dashofer. Lisboa.
- [3] Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Amado Mendes, P. (2010). “Sebenta Acústica Aplicada”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [4] Patraquim, R. (2008). “Painéis acústicos perfurados em madeira: estudo e avaliação experimental de soluções”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [5] Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de janeiro. “Regulamento Geral do Ruído (RGR)”. In Diário da República, I Série, nº 12, 17 de janeiro de 2007, Lisboa.
- [6] Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de junho. “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)”. In Diário da República, I Série, nº 110, 9 de junho de 2008, Lisboa.
- [7] ISO 10534-2 (1998). “Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method”. International Organization for Standardization.
- [8] ASTM E 1050 (1998). “Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System”. American Society for Testing and Materials, USA.
- [9] Vigran, E. (2008). “Building acoustics”, Taylor & Francis Ltd.
- [10] Ferreira, R. A. (2010). “Comportamento acústico de componentes da construção á base de aglomerado de fibras de madeira e cimento”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.
-

- [11] ISO 354 (2003). “Measurement of sound absorption in a reverberation room”. International Organization for Standardization.
- [12] Villamil, H. (2012). “Acoustic properties of microperforated panels and their optimization by simulated annealing”. Tese de Doutorado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid.
- [13] Rodrigues, D. S. (2013). “Análise do comportamento acústico de painéis revestidos por “flocagem”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [14] Delany, M. E., Bazley, E. N. (1970). “Acoustical properties of fibrous absorbent materials”. *Applied Acoustics*, 3, pp. 105-116.
- [15] Miki, Y. (1990), “Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models”. *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*. 11(1), pp. 19-24.
- [16] Champoux, Y., Allard, J. F. (1991). “Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media”. *J. Appl. Phys.* 70, pp. 1975-1979.
- [17] Johnson, D. L., Koplik, J., Dashen, R. (1987). “Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media”. *J. Fluid Mech.* 176, 1987, pp. 379-402.
- [18] Ramis, J., del Rey, R., Alba, J., Godinho, L., Carbajo, J. (2014). “Un modelo para materiales absorbentes acústicos derivados de la fibra de coco”. *Materiales de Construcción*, 64(313), <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00513>.
- [19] Jordão, A.C. (2011), “Análise Experimental Paramétrica do Desempenho de Painéis Perfurados”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [20] Abreu, M. P. (2017). “Influência das características do material de enchimento da caixa-de-ar no desempenho acústico de painéis perfurados”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [21] D. Y, Maa (1975). “Theory and design of microperforated-panel sound-absorbing construction”. *Sci. Sin.* XVIII, pp. 55-71.

- [22] Patraquim, R., Godinho, L., A. Mendes, P., Neves, A. (2014). “Desempenho acústico de painéis microperfurados em MDF – um estudo experimental”. 45º Congresso espanhol de acústica, Múrcia.
- [23] Carbajo, J., Ramis, J., Godinho, L., Amado-Mendes, P., Alba, J. (2015). “A finite element model of perforated panel absorbers including viscothermal effects”. *Applied Acoustics*, 90, pp. 1-8.
- [24] Carbajo, J., Ramis, J., Godinho, L., Amado-Mendes, P. (2017). “Modeling of grooved acoustic panels”. *Applied Acoustics*, 120, pp. 9-14.
- [25] Carbajo, J., Ramis, J., Godinho, L., Amado-Mendes, P. (2018). “Assessment of methods to study the acoustic properties of heterogeneous perforated panel absorbers”. *Applied Acoustics*, 133, pp. 1-7.
- [26] Asdrubali, F., Schiavoni, S., Horoshenkov, V. (2012). “A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications”. *Building Acoustics*, 19, pp. 283-312.
- [27] Rainho, L. P. (2013). “A utilização de materiais reciclados na construção para melhoria do desempenho térmico e acústico”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [28] Berardi, U., Iannace, G. (2015). “Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications”. *Building and Environment*, 94, pp. 840-852.
- [29] Crandall, I. B. (1926). “Theory of vibrating systems and sound”. Van Nostrand, New York.
- [30] Randeberg, R. T. (2000). Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design. Ph. D. thesis, NTNU, Norway, 2000.

## ANEXO

Quadro A.1 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, dos materiais absorventes.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.07	0.04	0.06	0.05	0.07	0.05	0.08	0.08	0.04	0.07
125	0.02	0.05	0.04	0.03	0.06	0.06	0.03	0.03	0.05	0.05
160	0.05	0.08	0.07	0.06	0.09	0.08	0.04	0.07	0.07	0.09
200	0.06	0.11	0.09	0.10	0.10	0.09	0.05	0.09	0.10	0.13
250	0.09	0.16	0.12	0.17	0.12	0.14	0.07	0.12	0.16	0.22
315	0.12	0.38	0.18	0.28	0.15	0.23	0.11	0.17	0.30	0.34
400	0.18	0.56	0.27	0.40	0.18	0.35	0.16	0.26	0.44	0.47
500	0.26	0.64	0.34	0.48	0.21	0.45	0.22	0.33	0.52	0.54
630	0.32	0.70	0.40	0.56	0.20	0.53	0.30	0.39	0.60	0.60
800	0.43	0.80	0.53	0.73	0.22	0.70	0.40	0.53	0.74	0.71
1000	0.59	0.89	0.70	0.86	0.29	0.86	0.56	0.73	0.87	0.76
1250	0.68	0.89	0.78	0.92	0.32	0.91	0.66	0.84	0.91	0.94
1600	0.83	0.91	0.91	0.98	0.41	0.93	0.83	0.97	0.94	0.99

Quadro A.2 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com painel microperfurado “1”+caixa-de-ar+material absorvente.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.04	0.05	0.08	0.04	0.11	0.08	0.05	0.10	0.08	0.06
125	0.05	0.11	0.12	0.12	0.09	0.06	0.05	0.12	0.12	0.06
160	0.09	0.16	0.14	0.18	0.15	0.12	0.08	0.13	0.21	0.12
200	0.09	0.20	0.16	0.25	0.16	0.15	0.09	0.15	0.30	0.17
250	0.15	0.36	0.21	0.39	0.21	0.22	0.14	0.22	0.41	0.25
315	0.25	0.63	0.32	0.57	0.31	0.37	0.22	0.34	0.57	0.36
400	0.36	0.76	0.45	0.69	0.39	0.53	0.32	0.47	0.69	0.46
500	0.44	0.84	0.55	0.77	0.43	0.63	0.38	0.56	0.77	0.53
630	0.62	0.93	0.70	0.89	0.52	0.78	0.53	0.72	0.88	0.67
800	0.83	0.99	0.86	0.90	0.67	0.95	0.78	0.88	0.91	0.76
1000	0.86	0.99	0.82	0.81	0.59	0.92	0.84	0.83	0.76	0.63
1250	0.82	0.96	0.75	0.78	0.50	0.91	0.83	0.79	0.74	0.56
1600	0.69	0.84	0.64	0.77	0.34	0.83	0.70	0.74	0.77	0.51

Quadro A.3 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “2”+caixa-de-ar+material absorvente.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.05	0.05	0.08	0.06	0.08	0.05	0.09	0.06	0.08	0.04
125	0.05	0.10	0.10	0.09	0.11	0.07	0.04	0.08	0.13	0.07
160	0.08	0.17	0.14	0.18	0.15	0.13	0.07	0.12	0.22	0.13
200	0.11	0.21	0.16	0.27	0.17	0.15	0.09	0.15	0.31	0.18
250	0.17	0.39	0.23	0.42	0.23	0.24	0.15	0.24	0.43	0.27
315	0.28	0.65	0.35	0.61	0.33	0.39	0.25	0.38	0.61	0.40
400	0.41	0.79	0.49	0.73	0.43	0.55	0.36	0.51	0.73	0.52
500	0.49	0.86	0.59	0.81	0.49	0.67	0.43	0.61	0.80	0.60
630	0.67	0.94	0.74	0.92	0.60	0.81	0.58	0.76	0.91	0.74
800	0.88	0.99	0.90	0.92	0.76	0.97	0.83	0.91	0.94	0.83
1000	0.89	0.99	0.86	0.83	0.68	0.95	0.88	0.86	0.80	0.70
1250	0.85	0.96	0.79	0.80	0.58	0.93	0.85	0.82	0.77	0.62
1600	0.71	0.85	0.67	0.79	0.41	0.85	0.72	0.76	0.78	0.54

Quadro A.4 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “3”+caixa-de-ar+material absorvente.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.05	0.06	0.08	0.07	0.08	0.05	0.04	0.06	0.08	0.04
125	0.12	0.12	0.11	0.12	0.10	0.10	0.06	0.08	0.15	0.08
160	0.15	0.21	0.17	0.23	0.18	0.16	0.09	0.15	0.28	0.18
200	0.18	0.29	0.21	0.36	0.21	0.20	0.13	0.21	0.40	0.26
250	0.28	0.50	0.32	0.56	0.32	0.33	0.20	0.34	0.56	0.41
315	0.44	0.77	0.49	0.79	0.48	0.54	0.35	0.53	0.77	0.61
400	0.63	0.90	0.69	0.92	0.66	0.75	0.53	0.73	0.91	0.78
500	0.80	0.95	0.84	0.98	0.78	0.87	0.65	0.86	0.97	0.90
630	0.95	0.96	0.96	0.98	0.93	0.97	0.85	0.97	0.99	0.98
800	0.96	0.93	0.95	0.84	0.92	0.95	0.99	0.93	0.88	0.86
1000	0.85	0.90	0.83	0.74	0.74	0.87	0.92	0.81	0.74	0.69
1250	0.72	0.83	0.71	0.67	0.59	0.79	0.80	0.70	0.64	0.57
1600	0.60	0.72	0.59	0.64	0.44	0.72	0.64	0.63	0.64	0.49

Quadro A.5 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “4”+caixa-de-ar+material absorvente.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.05	0.05	0.08	0.07	0.10	0.07	0.03	0.07	0.05	0.06
125	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.07	0.05	0.08	0.14	0.06
160	0.14	0.18	0.15	0.22	0.17	0.13	0.10	0.14	0.26	0.14
200	0.16	0.24	0.18	0.30	0.19	0.17	0.11	0.18	0.35	0.20
250	0.23	0.43	0.27	0.48	0.26	0.26	0.18	0.28	0.50	0.33
315	0.35	0.71	0.41	0.69	0.39	0.45	0.29	0.44	0.68	0.49
400	0.50	0.85	0.57	0.82	0.52	0.64	0.43	0.61	0.82	0.63
500	0.64	0.92	0.70	0.90	0.62	0.76	0.52	0.73	0.90	0.74
630	0.82	0.97	0.86	0.97	0.76	0.91	0.70	0.88	0.97	0.88
800	0.95	0.98	0.96	0.89	0.87	0.98	0.93	0.95	0.93	0.88
1000	0.88	0.96	0.86	0.78	0.72	0.92	0.92	0.84	0.77	0.70
1250	0.78	0.91	0.75	0.73	0.58	0.87	0.84	0.76	0.69	0.59
1600	0.64	0.79	0.62	0.71	0.40	0.79	0.67	0.68	0.70	0.49

Quadro A.6 - - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microranhurado “I” +caixa-de-ar+material absorvente.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.05	0.03	0.06	0.07	0.05	0.06	0.08	0.03	0.06	0.05
125	0.02	0.06	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.06	0.05
160	0.05	0.09	0.05	0.10	0.08	0.06	0.04	0.05	0.08	0.10
200	0.06	0.14	0.07	0.15	0.09	0.09	0.06	0.07	0.10	0.16
250	0.09	0.18	0.13	0.27	0.11	0.14	0.08	0.12	0.15	0.26
315	0.14	0.39	0.21	0.41	0.16	0.24	0.12	0.19	0.22	0.42
400	0.22	0.61	0.32	0.54	0.21	0.38	0.19	0.29	0.29	0.54
500	0.31	0.68	0.39	0.63	0.24	0.48	0.23	0.36	0.34	0.62
630	0.39	0.77	0.49	0.75	0.26	0.60	0.34	0.47	0.41	0.73
800	0.57	0.90	0.70	0.92	0.36	0.82	0.52	0.69	0.58	0.87
1000	0.74	0.97	0.82	0.94	0.44	0.94	0.71	0.83	0.64	0.82
1250	0.84	0.98	0.89	0.95	0.48	0.98	0.83	0.92	0.69	0.90
1600	0.90	0.99	0.89	0.92	0.47	1.00	0.93	0.93	0.65	0.89

Quadro A.7 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microranhurado “II”+caixa-de-ar+material absorvente.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.04	0.07	0.06	0.15	0.09	0.07	0.06	0.10	0.06	0.13
125	0.13	0.14	0.11	0.13	0.13	0.14	0.09	0.16	0.17	0.18
160	0.20	0.20	0.13	0.30	0.21	0.21	0.16	0.22	0.40	0.26
200	0.28	0.22	0.37	0.58	0.26	0.25	0.20	0.28	0.55	0.31
250	0.36	0.28	0.63	0.62	0.28	0.28	0.24	0.33	0.60	0.36
315	0.40	0.62	0.61	0.63	0.53	0.67	0.54	0.40	0.63	0.42
400	0.59	0.67	0.66	0.65	0.71	0.63	0.77	0.76	0.63	0.80
500	0.72	0.52	0.65	0.58	0.74	0.62	0.70	0.66	0.58	0.61
630	0.56	0.43	0.52	0.48	0.54	0.52	0.56	0.54	0.53	0.47
800	0.46	0.37	0.43	0.39	0.41	0.41	0.43	0.42	0.44	0.38
1000	0.38	0.35	0.37	0.36	0.38	0.38	0.41	0.36	0.36	0.35
1250	0.33	0.32	0.33	0.32	0.33	0.33	0.35	0.32	0.32	0.31
1600	0.26	0.27	0.26	0.26	0.25	0.27	0.27	0.25	0.25	0.26

Quadro A.8 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “1”+material absorvente +caixa-de-ar.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.06	0.03	0.07	0.08	0.04	0.04	0.06	0.05	0.10	0.08
125	0.12	0.06	0.13	0.13	0.06	0.06	0.03	0.11	0.14	0.09
160	0.15	0.11	0.21	0.20	0.11	0.16	0.11	0.16	0.18	0.18
200	0.18	0.16	0.29	0.26	0.14	0.21	0.17	0.17	0.20	0.24
250	0.25	0.27	0.47	0.39	0.21	0.36	0.30	0.22	0.29	0.38
315	0.39	0.44	0.68	0.66	0.30	0.62	0.49	0.38	0.41	0.55
400	0.58	0.61	0.81	0.85	0.40	0.79	0.66	0.64	0.53	0.69
500	0.72	0.71	0.90	0.89	0.46	0.86	0.78	0.75	0.62	0.76
630	0.83	0.85	0.98	0.89	0.56	0.91	0.91	0.83	0.76	0.85
800	0.97	0.97	0.96	0.91	0.73	0.92	0.99	0.95	0.85	0.92
1000	0.99	0.93	0.91	0.96	0.66	0.94	0.94	0.99	0.72	0.99
1250	0.96	0.88	0.88	0.97	0.58	0.92	0.89	0.97	0.65	0.94
1600	0.89	0.78	0.87	0.97	0.42	0.95	0.85	0.95	0.58	0.86

Quadro A.9- Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “2”+material absorvente +caixa-de-ar.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.05	0.04	0.09	0.09	0.06	0.06	0.03	0.09	0.11	0.06
125	0.10	0.06	0.13	0.14	0.06	0.08	0.06	0.11	0.14	0.11
160	0.16	0.13	0.20	0.20	0.11	0.15	0.12	0.14	0.19	0.18
200	0.18	0.16	0.29	0.26	0.15	0.21	0.17	0.17	0.21	0.26
250	0.25	0.28	0.49	0.41	0.22	0.36	0.33	0.23	0.29	0.39
315	0.39	0.45	0.71	0.66	0.34	0.63	0.51	0.38	0.44	0.58
400	0.58	0.62	0.84	0.85	0.44	0.79	0.68	0.65	0.57	0.72
500	0.71	0.72	0.92	0.89	0.51	0.86	0.80	0.76	0.66	0.80
630	0.83	0.86	0.98	0.89	0.63	0.90	0.92	0.84	0.81	0.89
800	0.97	0.98	0.96	0.91	0.80	0.91	0.99	0.95	0.89	0.92
1000	1.00	0.94	0.91	0.95	0.73	0.93	0.95	0.99	0.77	0.98
1250	0.97	0.89	0.88	0.97	0.65	0.92	0.89	0.97	0.69	0.94
1600	0.90	0.79	0.87	0.97	0.47	0.95	0.85	0.94	0.60	0.86

Quadro A.10 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “3”+material absorvente +caixa-de-ar.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.04	0.05	0.10	0.09	0.06	0.05	0.04	0.08	0.09	0.07
125	0.15	0.07	0.15	0.15	0.07	0.08	0.06	0.10	0.15	0.11
160	0.16	0.14	0.26	0.22	0.14	0.16	0.14	0.15	0.21	0.23
200	0.20	0.22	0.38	0.31	0.20	0.23	0.22	0.19	0.26	0.34
250	0.29	0.38	0.60	0.47	0.31	0.42	0.39	0.27	0.39	0.53
315	0.47	0.59	0.83	0.70	0.49	0.68	0.60	0.44	0.60	0.76
400	0.68	0.79	0.95	0.87	0.66	0.83	0.80	0.72	0.79	0.91
500	0.82	0.90	0.99	0.88	0.78	0.88	0.91	0.83	0.91	0.97
630	0.91	0.97	0.96	0.83	0.93	0.89	0.96	0.88	0.98	0.93
800	0.95	0.94	0.84	0.80	0.95	0.83	0.90	0.91	0.88	0.79
1000	0.91	0.85	0.78	0.84	0.80	0.82	0.82	0.90	0.73	0.87
1250	0.83	0.75	0.72	0.83	0.65	0.79	0.73	0.84	0.61	0.78
1600	0.74	0.65	0.72	0.83	0.48	0.82	0.69	0.79	0.52	0.73

Quadro A.11 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microperfurado “4” +material absorvente +caixa-de-ar.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i><math>\alpha</math></i>	<i><math>\beta</math></i>
100	0.06	0.05	0.08	0.07	0.05	0.06	0.04	0.06	0.10	0.05
125	0.11	0.08	0.14	0.13	0.07	0.07	0.05	0.09	0.15	0.11
160	0.17	0.14	0.23	0.22	0.13	0.15	0.12	0.14	0.22	0.20
200	0.18	0.18	0.33	0.28	0.17	0.21	0.19	0.17	0.23	0.29
250	0.26	0.30	0.54	0.42	0.26	0.37	0.34	0.24	0.33	0.46
315	0.41	0.49	0.77	0.69	0.39	0.64	0.53	0.39	0.50	0.67
400	0.61	0.67	0.90	0.88	0.52	0.80	0.72	0.66	0.66	0.82
500	0.76	0.79	0.97	0.90	0.62	0.88	0.84	0.77	0.77	0.90
630	0.87	0.92	0.99	0.89	0.77	0.91	0.95	0.86	0.91	0.92
800	0.98	0.98	0.92	0.88	0.90	0.90	0.97	0.95	0.91	0.87
1000	0.97	0.91	0.85	0.92	0.78	0.90	0.90	0.96	0.75	0.94
1250	0.91	0.82	0.80	0.92	0.66	0.87	0.82	0.93	0.64	0.86
1600	0.82	0.71	0.79	0.92	0.47	0.90	0.77	0.88	0.55	0.80

Quadro A.12 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microranhurado “I”+material absorvente +caixa-de-ar.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i><math>\alpha</math></i>	<i><math>\beta</math></i>
100	0.06	0.06	0.05	0.04	0.06	0.06	0.07	0.03	0.08	0.08
125	0.03	0.10	0.03	0.06	0.04	0.06	0.11	0.06	0.06	0.08
160	0.07	0.14	0.06	0.11	0.07	0.09	0.19	0.07	0.08	0.12
200	0.11	0.20	0.09	0.20	0.08	0.13	0.26	0.13	0.12	0.18
250	0.15	0.35	0.17	0.35	0.13	0.30	0.32	0.22	0.18	0.27
315	0.29	0.66	0.28	0.54	0.17	0.50	0.40	0.37	0.27	0.42
400	0.47	0.79	0.41	0.69	0.23	0.67	0.55	0.53	0.37	0.54
500	0.58	0.83	0.51	0.78	0.28	0.75	0.66	0.64	0.43	0.59
630	0.68	0.85	0.62	0.89	0.31	0.83	0.53	0.78	0.53	0.78
800	0.84	0.88	0.83	0.99	0.44	0.88	0.42	0.94	0.73	0.93
1000	0.96	0.92	0.92	0.99	0.54	0.91	0.40	1.00	0.79	0.98
1250	0.98	0.91	0.96	0.97	0.60	0.86	0.35	0.97	0.80	0.98
1600	0.98	0.93	0.93	0.91	0.58	0.84	0.29	0.89	0.71	0.98

Quadro A.13 - Medição da absorção sonora em 1/3 oitava, com o sistema do painel microranhurado “II”+material absorvente +caixa-de-ar.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	$\alpha$	$\beta$
100	0.06	0.11	0.08	0.15	0.08	0.11	0.07	0.10	0.13	0.13
125	0.12	0.10	0.14	0.17	0.14	0.13	0.11	0.14	0.21	0.15
160	0.19	0.18	0.22	0.25	0.21	0.21	0.19	0.23	0.27	0.20
200	0.23	0.30	0.25	0.29	0.27	0.25	0.26	0.30	0.55	0.34
250	0.30	0.65	0.46	0.33	0.32	0.41	0.32	0.36	0.56	0.61
315	0.54	0.58	0.71	0.45	0.52	0.53	0.40	0.51	0.59	0.69
400	0.64	0.53	0.74	0.70	0.80	0.60	0.55	0.73	0.66	0.63
500	0.66	0.49	0.65	0.62	0.69	0.59	0.66	0.65	0.59	0.54
630	0.52	0.43	0.53	0.49	0.54	0.49	0.53	0.54	0.49	0.45
800	0.41	0.36	0.43	0.37	0.43	0.39	0.42	0.43	0.40	0.35
1000	0.40	0.37	0.39	0.35	0.39	0.37	0.40	0.38	0.37	0.37
1250	0.35	0.34	0.35	0.32	0.34	0.33	0.35	0.33	0.32	0.33
1600	0.29	0.29	0.27	0.26	0.27	0.29	0.29	0.27	0.26	0.27

Quadro A.14 – Avaliação dos resultados experimentais e teóricos, para a configuração painel microperfurado “3”+caixa-de-ar+lã mineral “b”.

Absorção sonora [ $\alpha$ ]	Experimental	Teórico
100	0.05	0.05
125	0.07	0.07
160	0.14	0.14
200	0.22	0.22
250	0.38	0.38
315	0.59	0.59
400	0.79	0.79
500	0.90	0.90
630	0.97	0.97
800	0.94	0.94
1000	0.85	0.85
1250	0.75	0.75
1600	0.65	0.65

Quadro A.15 – Avaliação dos resultados experimentais e teóricos, para a configuração painel microperfurado “3” +lã mineral “b”+caixa-de-ar.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>Experimental</i>	<i>Teórico</i>
100	0.06	0.17
125	0.12	0.24
160	0.21	0.31
200	0.29	0.39
250	0.50	0.49
315	0.77	0.59
400	0.90	0.67
500	0.95	0.73
630	0.96	0.77
800	0.93	0.75
1000	0.90	0.69
1250	0.83	0.58
1600	0.72	0.43

Quadro A.16 – Avaliação dos resultados experimentais e teóricos, para a configuração painel microranhurado “I” +caixa-de-ar+aglomerado de espumas “A”.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>Experimental</i>	<i>Teórico</i>
100	0.06	0.06
125	0.06	0.12
160	0.09	0.21
200	0.13	0.29
250	0.30	0.50
315	0.50	0.77
400	0.67	0.90
500	0.75	0.95
630	0.83	0.96
800	0.88	0.93
1000	0.91	0.90
1250	0.86	0.83
1600	0.84	0.72

Quadro A.17 – Avaliação dos resultados experimentais e teóricos, para a configuração painel microranhurado “I” aglomerado de espumas “A”+caixa-de-ar+.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>Experimental</i>	<i>Teórico</i>
100	0.06	0.09
125	0.02	0.13
160	0.06	0.18
200	0.09	0.25
250	0.14	0.34
315	0.24	0.44
400	0.38	0.54
500	0.48	0.64
630	0.60	0.73
800	0.82	0.79
1000	0.94	0.83
1250	0.98	0.86
1600	1.00	0.88

Quadro A.18 – Avaliação da espessura de caixa-de-ar, para a configuração painel microperfurado “3”+caixa-de-ar+lã mineral “b”.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>cx 20mm</i>	<i>cx 40mm</i>	<i>cx 60mm</i>	<i>cx 80mm</i>
100	0.06	0.06	0.06	0.07
125	0.10	0.10	0.11	0.12
160	0.14	0.15	0.16	0.17
200	0.21	0.23	0.25	0.27
250	0.32	0.36	0.39	0.42
315	0.47	0.52	0.56	0.59
400	0.66	0.71	0.74	0.73
500	0.85	0.88	0.84	0.76
630	0.98	0.92	0.80	0.68
800	0.98	0.84	0.69	0.57
1000	0.88	0.70	0.56	0.48
1250	0.74	0.56	0.45	0.41
1600	0.58	0.41	0.35	0.41

Quadro A.19 – Avaliação da espessura de caixa-de-ar, para a configuração painel microperfurado “3” +lã mineral “b”+caixa-de-ar.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>cx 20mm</i>	<i>cx 40mm</i>	<i>cx 60mm</i>	<i>cx 80mm</i>
100	0.12	0.19	0.25	0.31
125	0.18	0.27	0.35	0.41
160	0.25	0.36	0.44	0.50
200	0.34	0.46	0.54	0.59
250	0.47	0.58	0.64	0.67
315	0.61	0.69	0.72	0.73
400	0.73	0.77	0.78	0.78
500	0.84	0.83	0.82	0.80
630	0.89	0.86	0.84	0.82
800	0.90	0.86	0.84	0.82
1000	0.87	0.85	0.85	0.85
1250	0.82	0.83	0.85	0.87
1600	0.73	0.76	0.77	0.75

Quadro A.20 – Avaliação da espessura de caixa-de-ar, para a configuração painel microranhurado “I” +caixa-de-ar+aglomerado de espumas “A”.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>cx 20mm</i>	<i>cx 40mm</i>	<i>cx 60mm</i>	<i>cx 80mm</i>
100	0.03	0.03	0.03	0.04
125	0.05	0.06	0.06	0.06
160	0.08	0.08	0.08	0.08
200	0.12	0.12	0.12	0.13
250	0.17	0.18	0.18	0.19
315	0.25	0.26	0.27	0.27
400	0.35	0.36	0.37	0.37
500	0.47	0.49	0.49	0.49
630	0.62	0.63	0.62	0.60
800	0.75	0.75	0.71	0.66
1000	0.86	0.82	0.75	0.68
1250	0.93	0.84	0.74	0.69
1600	0.96	0.81	0.71	0.74

Quadro A.21 – Avaliação da espessura de caixa-de-ar, para a configuração painel microranhurado “I” +aglomerado de espumas “A”+caixa-de-ar.

<i>Absorção sonora [<math>\alpha</math>]</i>	<i>cx 20mm</i>	<i>cx 40mm</i>	<i>cx 60mm</i>	<i>cx 80mm</i>
100	0.09	0.15	0.22	0.27
125	0.13	0.22	0.29	0.35
160	0.18	0.28	0.37	0.42
200	0.25	0.36	0.44	0.50
250	0.34	0.46	0.53	0.57
315	0.44	0.55	0.60	0.63
400	0.54	0.63	0.66	0.68
500	0.64	0.70	0.71	0.71
630	0.73	0.75	0.74	0.73
800	0.79	0.78	0.76	0.74
1000	0.83	0.80	0.77	0.75
1250	0.86	0.82	0.79	0.76
1600	0.88	0.85	0.84	0.84