



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

# **Análise do comportamento acústico de revestimentos microperfurados**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

**Vítor Bruno Nunes dos Santos**

Orientadores

**Luís Manuel Cortesão Godinho**

**Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes**

Colaboração Institucional



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

**Coimbra, Julho, 2015**

## AGRADECIMENTOS

A presente dissertação é o culminar de um ciclo, onde consta a oportunidade certa do merecido agradecimento a todas as pessoas que ajudaram a que o sonho se torna-se real.

Tomando o meu percurso académico, começo por agradecer aos meus Professores orientadores de tese, Professor Doutor Paulo Mendes e Professor Doutor Luís Godinho pelo excelente acompanhamento no decorrer de todo o período de trabalho, acoplado ao apoio incondicional. A motivação e o incentivo manifestado foi bastante relevante para o desenvolvimento deste trabalho de investigação. O ambiente de descontração e de divertimento entre os três não será esquecido.

A ausência de materiais inviabilizaria qualquer tipo de estudo de investigação. Em virtude da cedência de material e do grande apoio bibliográfico, gratulo o Eng.º Ricardo Patraquim e a empresa Castelhana & Ferreira. A pronta disponibilidade e simpatia revelada fizeram toda a diferença. No seguimento, quero demonstrar a minha gratidão ao ITeCons, pela cedência do espaço laboratorial e de todo o equipamento essencial à realização dos ensaios necessários para a elaboração da presente dissertação. Tenho a agradecer à Eng.ª Ana Neves o constante apoio e aos ensinamentos demonstrados, bem como ao Eng.º José Nascimento e ao David Tadeu.

A todos os meus amigos, tenho a reconhecer a sua maior importância no meu percurso escolar, por todos os momentos de pura amizade, ajuda e apoio. Todas as etapas estarão gravadas para a vida! Sem citar nomes, eles sabem quem são...

Uma pessoa muito especial acompanhou-me em todo o percurso académico, desde a abertura do e-mail da colocação. A ti Telma Alves, agradeço pela admirável namorada que és, pelo apoio prestado, pelo ombro amigo, pelos conselhos dados e momentos vividos.

As últimas palavras de reconhecimento e gratidão, que serão sempre escassas, são para os meus pais, que em todos os momentos me apoiaram e protegeram. Tudo fizeram, sacrificando-se em proveito dos meus sonhos, objetivos e formação. Nunca nada me faltou, e o meu reconhecimento jamais será enorme perante tal posição. Estou grato por tudo!

*“A gratidão é o único tesouro dos humildes.” - William Shakespeare*

## RESUMO

No âmbito do presente trabalho, apresenta-se uma análise experimental do comportamento acústico de painéis microperfurados feitos em MDF. Na análise é utilizado o método do tubo de impedância (conforme a norma ISO 10534-2).

O principal objetivo será avaliar a eficiência acústica de tais soluções com diferentes dimensões dos furos, do espaçamento entre eles, a influência da caixa-de-ar no tardo dos painéis, comparando com um suporte “favo de abelha” e o efeito da utilização de lã-de-rocha cheia vs lã-de-rocha macroperfurada.

Os dados experimentais referentes à incorporação de caixa-de-ar vazia são ainda comparados com resultados de modelos teóricos. Esta última tem como objetivo calibrar um modelo credível que no futuro seja utilizado regularmente, facilitando o estudo de qualquer tipo de solução do género.

Após estudo laboratorial, concluiu-se que, no geral, os materiais microperfurados testados apresentam boa conformidade de resultados. Possuem boa absorção sonora nas baixas/médias frequências.

A comparação do método experimental com o modelo teórico mostra uma boa correlação entre resultados experimentais e resultados teóricos.

## **ABSTRACT**

In the present work, we present an experimental analysis of the acoustic behavior of micro-perforated panels made of MDF. This analysis is using the impedance tube method (ISO 10534-2).

The main objective is to evaluate the acoustic efficiency of such solutions with different dimensions of the holes, the spacing between them, the influence of the air-box in the backing of the panels compared with a bracket "honeycomb" and the effect of the stone wool vs stone wool macroperforated.

The experimental data relating to empty air-box solutions is also compared to results of theoretical models. The latter has the purpose of calibrating a reliable model that can be used regularly in the future by facilitating the study of any kind of solution.

After laboratory studies, it was concluded that, in general, micro-perforated materials tested, exhibit good compliance results. They have good sound absorption in the low / mid frequencies.

The comparison of the experimental method to the theoretical model, shows a good correlation between the experimental results and theoretical results.

---

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento Geral .....	1
1.2	Objetivos e metodologia .....	2
1.3	Organização .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Conceitos introdutórios.....	4
2.2	Coeficiente absorção sonora ( $\alpha$ ) .....	5
2.3	Materiais absorsores .....	6
2.4	Painéis perfurados.....	10
2.5	Painéis microperfurados .....	13
3	ENSAIOS LABORATORIAIS.....	17
3.1	Conceitos introdutórios.....	17
3.2	Método experimental .....	19
3.3	Amostras ensaiadas.....	24
3.3.1	Caracterização dos materiais a ensaiar .....	24
3.3.2	Configurações das amostras a ensaiar .....	30
3.3.3	Preparação dos Provetes .....	33
3.4	Ensaio.....	33
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	35
4.1	Enquadramento .....	35
4.2	Curvas de absorção sonora .....	35
4.2.1	Amostras com caixa-de-ar vazia vs suporte macroperfurado no tardo.....	35
4.2.2	Amostras com caixa-de-ar vazia vs caixa-de-ar incorporando lã-de-rocha cheia e macroperfurada.....	45
5	COMPARAÇÃO COM MODELO TEÓRICO .....	53
5.1	Objetivos.....	53
5.2	Modelo Teórico (Numérico).....	53

---

5.3	Apresentação dos provetes analisados .....	58
5.4	Resultados experimentais Vs resultados laboratoriais .....	59
5.5	Análise de resultados .....	63
6	CONCLUSÕES.....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Esquema de aplicação de uma membrana ressonante (Ferreira, 2010) .....	7
Figura 2.2-Esquema de funcionamento de um ressoador (Ferreira, 2010) .....	8
Figura 2.3- Funcionamento do ressoador de Helmholtz (Ferreira, 2010) .....	8
Figura 2.4-Esquema da cavidade e comportamento mecânico tipo pistão rígido. ....	9
Figura 2.5-Exemplos de materiais Porosos/Fibrosos: Aglomerado de cortiça, massa porosa aplicada em tetos, alcatifa de chão. ....	10
Figura 2.6-Exemplos de painéis de madeira perfurados.....	11
Figura 2.7-Ressoadores de cavidade em perfil. ....	11
Figura 2.8-Sistema de painel perfurado e suas variáveis.....	12
Figura 2.9-Esquema de exemplo de aplicação do sistema de painéis perfurados. Neste caso, está ilustrado um painel de teto. ....	13
Figura 2.10-Parâmetros geométricos dos painéis microperfurados.....	15
Figura 2.11-Curva do coeficiente de adsorção medido e calculado para a incidência difusa de som para uma dupla camada de painéis microperfurados (Helmut e Xueqin, 2006).....	15
Figura 2.12-Painéis microperfurados com dupla camada de acordo com a Figura 2.11, instalados de baixo do teto de betão de um centro desportivo em Altenkirchen (Helmut e Xueqin, 2006). ....	16
Figura 3.1-Tipos de Painéis microperfurados (perfuração circular e em fendas), (Herrin e Liu, 2011). ....	19
Figura 3.2-Tubo de impedância.....	20
Figura 3.3-Equipamento usado no Método do Tubo de Impedância .....	21
Figura 3.4-Material absorsor para calibração do modelo. ....	23
Figura 3.5- Procedimento de medição da Temperatura e Pressão atmosférica. ....	24
Figura 3.6-Amostras ensaiadas na dissertação. ....	26
Figura 3.7- Procedimento de medição da dimensão da perfuração e seu espaçamento. ....	26
Figura 3.8- Procedimento de medição da espessura das amostras (Paquímetro). ....	27
Figura 3.9-Amostras 1, 2 e 3 (Ribeiro, 2015).....	28
Figura 3.10-Amostras 4, 5 e 6 (Ribeiro, 2015).....	28
Figura 3.11-Amostras 7, 8 e 9 (Ribeiro, 2015).....	29
Figura 3.12-Amostras 10, 11 e 12 (Ribeiro, 2015).....	29
Figura 3.13-Provete com amostra e caixa-de-ar vazia (anel acrílico). ....	31
Figura 3.14-Provete com amostra e suporte (madeira MDF macroperfurada).....	31
Figura 3.15-Esquema do painel de MDF de suporte com $\varepsilon = 65\%$ .....	32
Figura 3.16-Provete com amostra e lã-de-rocha preenchida no tardoz. ....	32

---

Figura 3.17-Provete com amostra e lâ-de-rocha escavada no tardo. ....	32
Figura 4.1-Tardo do provete (Amostra + Suporte MDF) .....	36
Figura 4.2-Esquema provete Amostra + Suporte MDF (AutoCAD) .....	36
Figura 4.3- Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14 .....	38
Figura 4.4-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14 .....	39
Figura 4.5-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14 .....	41
Figura 4.6- Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL209 A/14 e ACL204 A/14 .....	42
Figura 4.7- Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14 .....	43
Figura 4.8- Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL213 A/14 e ACL212 A/14 .....	44
Figura 4.9- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada). ....	45
Figura 4.10-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada). ....	47
Figura 4.11-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada). ....	48
Figura 4.12-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL209 A/14 e ACL204 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada). ....	49
Figura 4.13-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada). ....	49
Figura 4.14-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL213 A/14 e ACL212 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada). ....	50
Figura 4.15-Pormenor da perfuração e espaçamento entre furos (ACL212 A/14) .....	51
Figura 5.1-Partilha da massa de ar na região exterior dos furos, (Patraquim, 2008). ....	55
Figura 5.2-Redução zona de corte devido ao escoamento em fase, (Patraquim, 2008). ....	55
Figura 5.3-Sistema estudado.....	57
Figura 5.4-Apresentação gráfica do modelo de cálculo. ....	57
Figura 5.5-Exemplo da caixa-de-ar utilizada laboratorialmente para simular o modelo teórico. .....	58
Figura 5.7- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14 respetivamente (Teórico Vs Laboratorial).....	59
Figura 5.8- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14 respetivamente (Teórico Vs Laboratorial).....	60
Figura 5.9-Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14 respetivamente (Teórico Vs Laboratorial).....	61

---



Figura 5.10-Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL209 A/14 e ACL204 A/14 respetivamente (Teórico Vs Laboratorial).....	61
Figura 5.11- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14 respetivamente (Teórico Vs Laboratorial).....	62
Figura 5.12- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL213 A/14 e ACL212 A/14 respetivamente (Teórico Vs Laboratorial).....	63

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento Geral

Tendo em conta a evolução da tecnologia e de toda uma panóplia de fontes geradoras de ruído, com o passar dos anos houve um aumento dos seus níveis. Naturalmente, foi necessário evoluir nas questões do condicionamento acústico dos edifícios, de forma a garantir o máximo conforto no seu interior. O conforto acústico está diretamente relacionado com a saúde da população, aumentando a qualidade de vida dos utilizadores deste tipo de “proteção acústica”.

O som é produzido por um conjunto de ondas que se propagam num suporte material, sendo que o mais comum é o ar, mas que também pode utilizar qualquer outro tipo de meio: gasoso, líquido ou sólido. Este pode ser caracterizado em três tipos: agradável, útil ou incómodo (este último é considerado ruído).

O estudo da acústica pressupõe, nomeadamente, as seguintes atividades: análise e identificação das fontes de ruído; o condicionamento acústico interior; e dimensionamento do isolamento sonoro.

O isolamento sonoro baseia-se na existência de materiais que amortecem e dissipam a energia sonora entre dois espaços, onde num se produzem estímulos sonoros e noutra se pretende que esses estímulos apresentem um nível tão baixo quanto possível.

Complementarmente, o condicionamento acústico dos recintos visa dotá-los de características adequadas à sua utilização, relativamente ao desempenho que este reproduz sobre os estímulos sonoros que são gerados no seu interior. É nesta característica que se focará mais este trabalho, visto que o condicionamento acústico de um espaço fechado depende da geometria do mesmo, do tipo de revestimentos empregues, do seu conteúdo, devendo ser concebido com a finalidade de se obter um ambiente acústico adequado ao seu volume e funções.

O presente trabalho trata de um dos três fatores do condicionamento acústico, que, a seguir ao fator geométrico, é de extrema relevância: o revestimento interior. É este que vai definir as condições do espaço tendo em conta o fim a que se destina. Assim, dentro deste fator, existe

neste momento uma imensa gama de soluções construtivas. Contudo, o aspeto visual é soberano para os utilizadores, por isso muitas vezes o espaço pode ser acusticamente eficaz mas esteticamente desagradável. Este pode ser o caso dos painéis perfurados usados em paredes ou tetos.

Deste modo, torna-se necessário dimensionar novas soluções com igual ou superior desempenho, sendo neste âmbito que entra o estudo dos painéis microperfurados. Ao reduzir-se consideravelmente as dimensões das perfurações, tornando-se estas praticamente invisíveis macroscopicamente, consegue melhorar-se o aspeto visual do espaço.

## **1.2 Objetivos e metodologia**

Como referido anteriormente, hoje em dia o bem-estar, conforto e qualidade de vida são tidos em conta na maioria dos aspetos construtivos. Por conseguinte, é imprescindível atuar nos aspetos acústicos dos edifícios, mais propriamente em torno do condicionamento acústico dos espaços.

Tornando-se necessário recorrer à investigação, a presente tratará do estudo e análise do comportamento acústico de materiais microperfurados em MDF. Em colaboração com a empresa de soluções acústicas *Castelhana & Ferreira*, pretende-se analisar a possibilidade e viabilidade, da aplicação do presente material.

O principal objetivo será analisar a eficiência acústica de algumas soluções com diferentes características: espessura, dimensão das perfurações e espaçamento das perfurações. Estas características serão complementadas com diferentes configurações de caixa-de-ar no tardo dos painéis.

Por fim, mas de relevância e importância acrescida, é conveniente a comparação dos resultados obtidos laboratorialmente com recurso ao tubo de impedância, com os modelos teóricos obtidos pelo software (algoritmo) desenvolvido em *Matlab*, para que se possa obter um modelo calibrado para análise do comportamento de soluções de revestimentos perfurados.

## **1.3 Organização**

A presente dissertação na especialidade de Construções, é composta por seis capítulos onde dos quais cinco (Capítulos 1, 2, 3, 4 e 5) são divididos em subcapítulos.

O atual capítulo (primeiro) diz respeito ao enquadramento, objetivos e estrutura da dissertação.

A revisão bibliográfica segue em segundo capítulo, onde se expõe brevemente conceitos/normas que mais tarde serão necessários à compreensão do trabalho realizado.

Como referido anteriormente, o presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a eficiência acústica de diferentes soluções com variadas características e para tal é necessário ingressar a via laboratorial, onde segundo a metodologia da norma ISO 10534-2, utilizaram-se amostras de dimensão reduzida, recorrendo ao tubo de impedância. Todo este processo de investigação para caracterização dos materiais estudados é apresentado no capítulo três.

O quarto capítulo compreende a apresentação gráfica e crítica dos resultados experimentais obtidos no decorrer do estudo.

No quinto capítulo, é descrito o modelo teórico executado com o objetivo de retratar resultados de referência e comparar com os dados obtidos experimentalmente.

O sexto capítulo é, então, constituído por uma descrição das principais conclusões, relativamente ao comportamento e ao coeficiente de absorção acústica das amostras testadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Conceitos introdutórios

Hoje em dia o projeto de condicionamento acústico é peça fundamental para um bom desempenho acústico do edifício. É no interior deste espaço fechado, onde se pressupõe que haja um ambiente agradável ao utilizador, com funções apropriadas às exigências do mesmo.

Dentro da acústica, em ambientes fechados, destacam-se elementos fulcrais, como a forma do espaço bem como os materiais que servem de revestimento das superfícies (paredes e tetos), (Teodoro e Bitencourt, 2003).

A propagação do som é dada pela variação de pressão produzida por uma fonte sonora, transmitida por um meio de propagação e detetada pelo ouvido humano. A propagação das ondas sonoras em meios descontínuos realiza-se por 3 formas distintas: reflexão, refração e difração. A reflexão envolve mudança de direção das ondas ao colidirem com um obstáculo. A refração envolve a mudança de direção das ondas ao passarem de um meio para outros. A difração diz respeito à mudança de direção das ondas ao contornar um obstáculo (Tadeu et al, 2010).

Tomando a mesma tendência, a propagação do som em espaços fechados depende fortemente da energia sonora incidente nas superfícies dos materiais, como é o caso dos revestimentos. Dessa energia sonora, parte é refletida tomando características acima descritas, outra é transmitida e ainda dissipada pelos materiais. A dissipação da energia tem um princípio de funcionamento idêntico ao da absorção (Patrício, 2008). Esta é a capacidade que os materiais possuem de transformar parte da energia sonora noutra forma de energia (Domingues, 2005). Por definição, ao haver propagação do som num meio, a absorção sonora nesse mesmo meio é a redução da potência sonora por dissipação (Domingues, 2005).

A absorção sonora depende, essencialmente, do tipo de material, densidade e espessura desse mesmo material, do ângulo de incidência das ondas sonoras na superfície do material e das condições de aplicação do sistema que o integra (Domingues, 2005).

Assim, pode-se afirmar que, quanto maior é a dissipação da energia sonora incidente por parte do material em causa, mais este tem capacidade de absorver.

É aqui que entra a definição de coeficiente de absorção sonora.

## 2.2 Coeficiente absorção sonora ( $\alpha$ )

Em espaços fechados a propagação do som decorre da interação das ondas sonoras com os materiais de revestimento. Quando aquelas atingem os materiais, uma parte da energia da onda incidente é refletida, outra é transmitida e a remanescente é dissipada para o interior dos materiais.

Caso se obtenha uma maior dissipação da energia sonora incidente, decorre um aumento de absorção da energia, onde esta é caracterizada recorrendo ao coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ).

De modo a avaliar a absorção sonora, a energia que não foi refletida é a determinante, podendo estabelecer o balanço da energia através da lei da conservação da energia (Patraquim, 2008) e (Jordão, 2011):

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (1)$$

em que:

$E_i$  - energia incidente;

$E_r$  - energia refletida;

$E_t$  - energia transmitida;

$E_a$  - energia dissipada no interior dos materiais.

Dividindo os membros pela energia incidente,  $E_i$ :

$$\frac{E_i}{E_i} = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t}{E_i} + \frac{E_a}{E_i} \quad (2)$$

Reorganizando:

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t}{E_i} + \frac{E_a}{E_i} \Leftrightarrow 1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t + E_a}{E_i} \quad (3)$$

Atendendo a que:

$$|R|^2 = \frac{E_r}{E_i} \quad (4)$$

onde R é designado por coeficiente de reflexão.

O coeficiente de absorção sonora fica assim definido:

$$\alpha = \frac{E_t + E_a}{E_i} = 1 - |R|^2 \quad (5)$$

Os termos da expressão (5),  $(E_t + E_a)$  = energia transmitida + energia dissipada no interior dos materiais, dizem respeito à energia sonora que não é refletida. Em suma, a absorção sonora considera a razão entre a energia não refletida pelo material e a energia incidente no mesmo. (Jordão, 2011).

O coeficiente de absorção sonora depende da frequência do som e do ângulo das ondas sonoras que no material incidem. Verifica-se que o coeficiente de absorção caso seja elevado, leva a um valor de R muito pequeno.

Um absorsor ideal, por exemplo, tem  $\alpha = 1$ , correspondendo a uma absorção total da onda incidente. Um material que possua coeficiente de absorção sonora nulo (zero) corresponde a um material refletor.

O conhecimento deste coeficiente fornece a informação necessária à melhor escolha dos materiais de revestimentos dos espaços. Torna-se necessário estudar e conhecer as características que o acompanham, para que seja mais eficiente a seleção dos mesmos para a utilização pretendida. Todo o material que reduza a energia acústica de uma onda sonora, através do fenómeno de absorção, é denominado por material absorsor (Jayaraman, 2005).

Assim sendo, um facto a salientar é o seguinte: um material é absorvente sonoro quando a sua principal função é criar condições de conforto acústico a partir da absorção do som (Carvalho, 2009).

### **2.3 Materiais absorsores**

Dentro da gama de materiais absorsores, existem três tipos, que diferem de acordo com a gama de frequências em que são mais eficazes e atuam: nas frequências baixas, médias ou altas. O

mecanismo que leva à transformação de energia sonora, incidente no material, num outro tipo de energia, habitualmente a energia térmica, determina a designação dos materiais ou sistemas absorventes sonoros em (Carvalho, 2009):

1) Membranas ou membranas ressonantes, isto é, material flexível capaz de dissipar a energia pela sua própria vibração quando sujeito à incidência de energia sonora. Estas dizem respeito ao grupo de materiais de absorção às baixas frequências. São constituídas por uma placa flexível separada de uma base de suporte, vertical ou horizontal, através de apoios, onde intervém a porosidade e a ressonância do sistema.

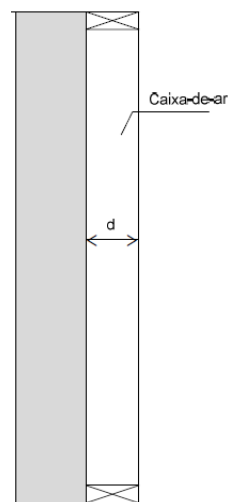


Figura 2.1-Esquema de aplicação de uma membrana ressonante (Ferreira, 2010)

2) Os ressoadores consistem na colocação de um painel perfurado a uma certa distância de um elemento de suporte, vertical ou horizontal, rígido. A onda sonora ao embater sobre o painel faz com que a massa de ar dos orifícios do mesmo entre em movimento, provocando vibrações acentuadas no ressoador, as quais, por atrito, acabam por dissipar parte da energia sonora incidente.



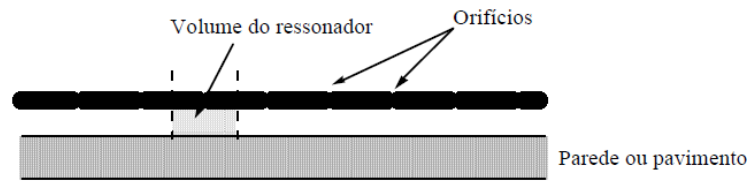


Figura 2.2-Esquema de funcionamento de um ressonador (Ferreira, 2010)

A frequência de ressonância<sup>1</sup> deste sistema depende do volume da cavidade e das restantes dimensões geométricas, sendo que a sua frequência de eficácia máxima é dada pela expressão (Ferreira, 2010):

$$f_{res} = \frac{c}{2\pi} * \frac{\sqrt{S}}{L*V} \quad (6)$$

onde:

S - Secção de abertura do orifício;

L - Comprimento do gargalo;

V – Volume da cavidade;

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s).

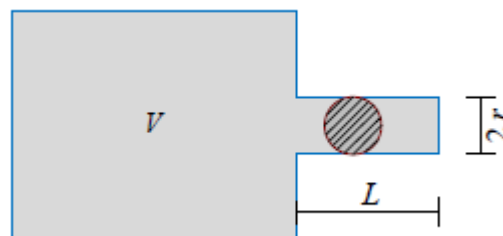


Figura 2.3- Funcionamento do ressonador de Helmholtz (Ferreira, 2010)

A simplificação feita de modo a entender este tipo de absorsores (Ressonador de Helmholtz) consiste num volume de ar onde este é limitado por paredes que se consideram rígidas, comunicando com o exterior através de um gargalo. Caso o comprimento de onda sonora seja superior a todas as dimensões do ressonador, este pode ser descrito como possuindo apenas um grau de liberdade.

1- Frequência gerada quando uma fonte emite um som de frequência igual à frequência de vibração natural de um recetor.

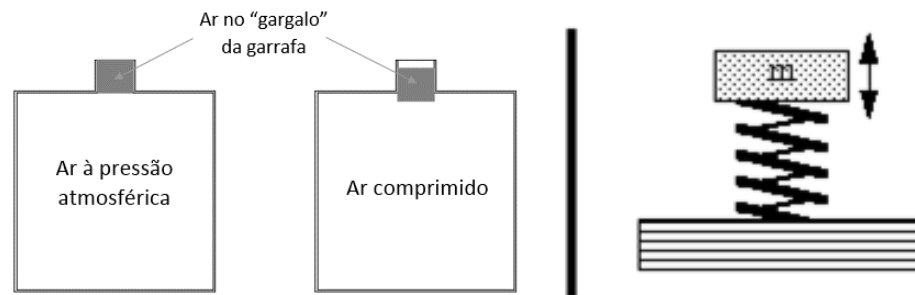


Figura 2.4-Esquema da cavidade e comportamento mecânico tipo pistão rígido.

Neste sistema, o ar do gargalo move-se em conjunto e constitui a massa do oscilador. A componente elástica deste sistema é fornecida pela presença do ar contido no interior do volume  $V$ . Dado considerar-se um sistema com um grau de liberdade, admite-se, nas condições atrás definidas, que a massa de ar do gargalo se desloca em bloco. Deste modo, não se considera a propagação de som no seu interior. O conjunto funciona como se aquele ar constituísse um pistão rígido.

Mais à frente, e como tema principal do presente estudo, irá ser abordado o comportamento e sistema do agrupamento de ressoadores, na aplicação de painéis perfurados.

3) Materiais porosos e fibrosos que seguem o funcionamento da existência de poros e interstícios. Os pequenos orifícios comunicantes entre si e que se encontram preenchidos por ar, com o auxílio do atrito sobre as paredes sólidas, desencadeiam uma degradação da energia. Consequentemente existe uma atenuação das ondas sonoras.

Existe uma vasta gama deste tipo de materiais, como são o caso dos tecidos, alcatifas, lãs minerais, aglomerados de cortiça, massas de projeção, entre outros.

A máxima eficácia no funcionamento destes sistemas é obtida com a colocação do material na posição em que a velocidade de vibração das partículas de ar é maior, permitindo, assim reduzir a energia cinética da vibração correspondente.

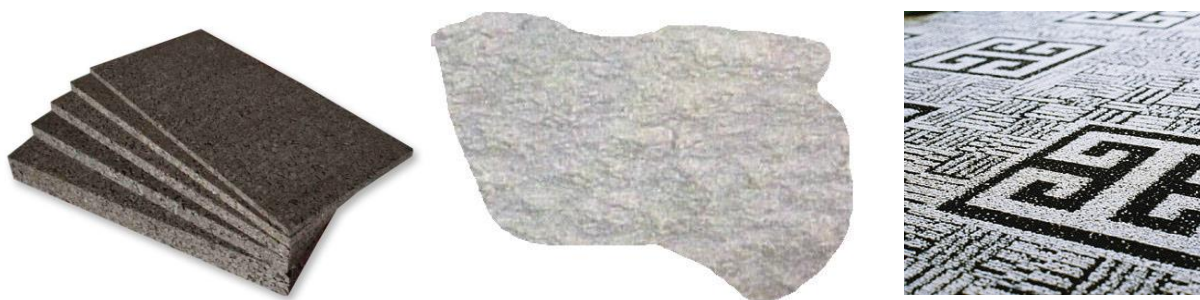


Figura 2.5-Exemplos de materiais Porosos/Fibrosos: Aglomerado de cortiça, massa porosa aplicada em tetos, alcatifa de chão.

De modo a caracterizar todos estes tipos de materiais e avaliá-los tendo em conta a sua performance acústica e melhor adequação nos espaços, há que medir o coeficiente de absorção acústica dos mesmos, onde se destacam três métodos experimentais: ensaios em Câmara Reverberante, o método do Tubo de Impedância e o Método de medição “In Situ”. Assim, é possível obter a curva de absorção sonora, que relaciona a frequência de emissão do som com o coeficiente de absorção ( $\alpha$ ). O segundo ensaio é o tratado no presente trabalho, onde as amostras são submetidas à incidência de ondas perpendiculares. No terceiro capítulo tratar-se-á mais pormenorizadamente este método, visto ter sido o utilizado neste estudo.

Visto que o objetivo principal deste trabalho corresponde ao estudo e análise do comportamento acústico de materiais microperfurados, material ainda sem aplicabilidade e com escassez bibliográfica, torna-se necessário estudar a possibilidade de usar este conceito na aplicação de painéis de derivados de madeira. Para tal, em breve exposição e com intuito introdutório, senti a necessidade de apresentar o existente na literatura e na prática, antecedendo à solução microperfurada, os perfurados.

## 2.4 Painéis perfurados

Os painéis perfurados fazem parte de um vasto leque de alternativas existentes de materiais e sistemas absorventes, sendo uma das mais correntes. Estes podem ser fabricados em madeira, gesso cartonado, plástico ou até metal, apresentando um processo de absorção do som complexo, em que se combina o comportamento dos materiais porosos e o dos ressoadores acústicos. A perfuração do painel, em conjunto com o volume total de ar normalmente existente entre o painel e o suporte, reproduz um comportamento que se assemelha a um conjunto de ressoadores de Helmholtz (Godinho et al, 2011).

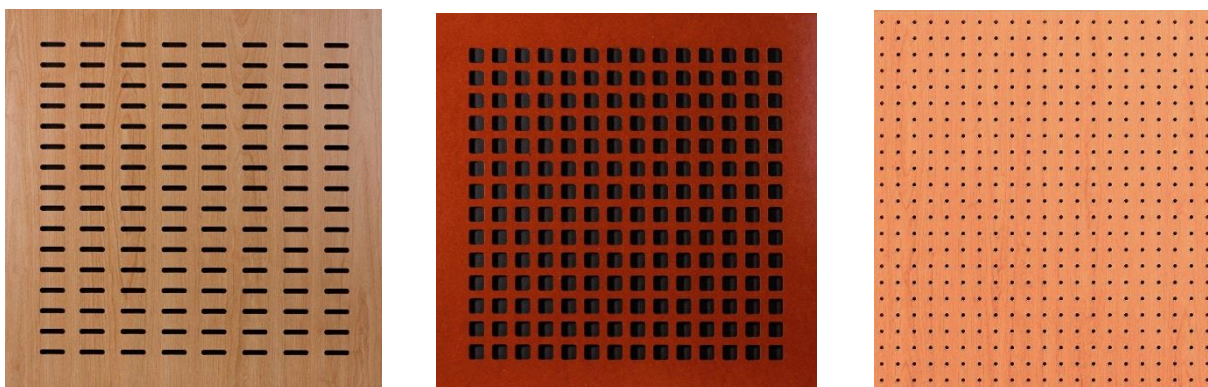


Figura 2.6-Exemplos de painéis de madeira perfurados.

Estes sistemas consistem num volume de ar no interior de uma cavidade, ligado à envolvente exterior por um pequeno volume de ar semelhante ao contido numa garrafa, chamado de “gargalo”. O ar contido nesse mesmo “gargalo” é colocado em vibração, imprimindo deslocamentos à massa de ar contida no mesmo, acompanhados de dissipação de energia devido ao atrito do ar contra as suas paredes que se consideram rígidas (Carvalho, 2009). O caso mais usual destes sistemas são os ressoadores agrupados.

A absorção sonora destes sistemas passa pela transformação da energia sonora em energia mecânica e em energia térmica. Além da simples aplicação deste material, a sua eficácia em termos acústicos pode ser alargada com a inclusão de material absorvente sonoro na caixa-de-ar (Carvalho, 2009).

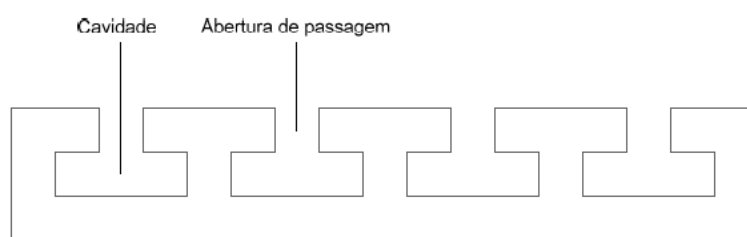


Figura 2.7-Ressoadores de cavidade em perfil.

A seguir, apresenta-se uma expressão que não se adapta a todas as formas de ressoadores de cavidade, no entanto, pode ser feita a sua adaptação aos sistemas mais correntes, e que diz respeito à frequência eficaz do painel (Henrique, 2002):

$$fr = \frac{10c}{2\pi} * \sqrt{\frac{P}{(L0+1,6R)D}} \quad (3)$$

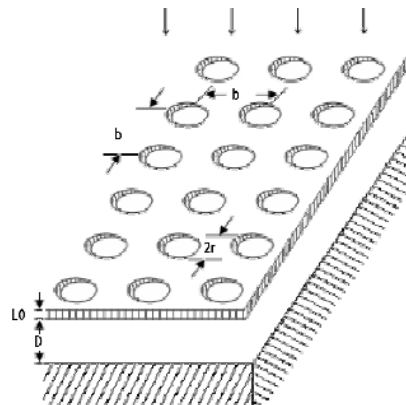


Figura 2.8-Sistema de painel perfurado e suas variáveis

onde:

P – Percentagem de perfuração (%);

L0 - Espessura da placa perfurada (cm);

R – raio de cada furo (cm);

D – Espessura da caixa-de-ar (cm);

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s).

Esta frequência diz respeito à frequência de ressonância, para a qual a absorção sonora é mais elevada, e que pode ser adaptada para as frequências críticas do espaço em estudo, para melhorar a eficácia do tratamento acústico.

Se um painel apresentar aberturas com dimensões diferentes, funcionará como um conjunto de ressoadores de cavidade, correspondendo a cada tipo de perfuração uma frequência de ressonância diferente (Ferreira, 2010).

A colocação de material poroso na cavidade do ressoador aumenta a largura de banda de eficiência dos painéis, embora reduza a absorção máxima para a frequência de ressonância (Carvalho, 2009). Assim, na realidade, é usual a colocação de material absorvedor na cavidade da caixa-de-ar.

Nas frequências baixas, a absorção é conferida pelo sistema de painel ressonante, nas frequências médias, a absorção é conseguida através da furação e das cavidades que constituem modelos de ressoadores de Helmholtz e, nas frequências altas, a absorção é função do material poroso colocado entre o painel e o elemento rígido de apoio (parede ou teto).

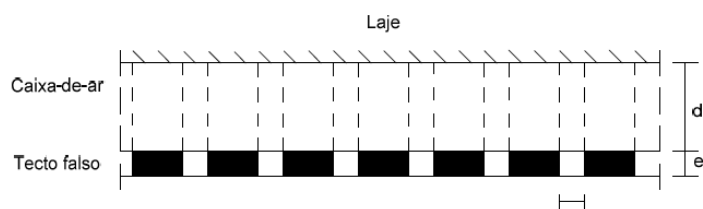


Figura 2.9-Esquema de exemplo de aplicação do sistema de painéis perfurados. Neste caso, está ilustrado um painel de teto.

## 2.5 Painéis microperfurados

Do ponto de vista funcional, os painéis perfurados estão numa excelente posição respeitante à utilização e aptidão para o efeito que lhes é administrado, embora, por vezes, o aspeto visual destas soluções não satisfaça os utilizadores dada a dimensão das perfurações. Deste modo, ao reduzirmos consideravelmente as dimensões das perfurações, estas irão tornar-se praticamente impercetíveis, quando observadas a uma certa distância pelo utilizador.

Os métodos de análise da absorção sonora de placas perfuradas baseiam-se na conversão da impedância acústica de um único furo num valor médio correspondente à área aberta do painel.

Os painéis microperfurados como absorsores acústicos estão a receber cada vez mais atenção, devido às suas características, tais como, transparência, espessura, visualmente atraentes, entre outras. Têm sido amplamente utilizados na absorção acústica e no controlo de ruído. Diversos trabalhos de investigação em curso estão a ser feitos sobre o tema, veja-se em (Shen e Wang, 2007).

O conceito teórico de microperfuração considera o painel como um conjunto de tubos curtos, de comprimento idêntico à espessura do painel, onde a fração não perfurada é feita de um material muito denso e rígido, e, portanto, perfeitamente refletor. Assume-se ainda que o comprimento de onda do som que se propaga é suficientemente grande quando comparado com a dimensão da secção transversal do tubo. Este método inclui os termos devidos à viscosidade do ar, à radiação (de um orifício num plano) e aos efeitos da reactância da caixa-de-ar.

Estes sistemas acústicos, definidos por um painel perfurado e por uma caixa-de-ar, com ou sem absorvor poroso no seu interior, são então estudados utilizando o conceito de matriz transferência, método que permite determinar a impedância acústica normal (ou superficial) de uma interface de um material, recorrendo à continuidade da velocidade da partícula (em ambos os lados da interface) e conhecendo as propriedades acústicas do meio.

No caso da existência de um material absorvedor poroso na caixa-de-ar, é importante determinar as características de propagação de ondas planas nesse meio. Na impossibilidade de o fazer, pode-se recorrer aos modelos empíricos macroscópicos, tais como o proposto por Delany e Bazley (Cox e D'Antonio, 2004).

Se os orifícios de um ressonador de Helmholtz são suficientemente pequenos, então as perdas vão ocorrer devido aos efeitos da camada limite viscosa nas perfurações. Para conseguir isso, as perfurações deve ser sub-milimétricas, de modo a que elas sejam comparáveis à espessura.

A referir, fica a noção da possibilidade de alcançar excelentes valores de absorção, sem que haja utilização de material poroso no tardo dos painéis. É uma forma de reduzir a distância do painel ao suporte e até mesmo da utilização de materiais translúcidos.

A eliminação da necessidade de uso de materiais porosos tem aplicações interessantes como, por exemplo, a absorção transparente, que combina um dispositivo que ao mesmo tempo se destina à acústica e também a fatores ligados à iluminação e estética, já que é possível fabricar tais dispositivos (placa e cavidade) em vidro/acrílico, usando microperfuração.

Segundo Maa (Godinho et al, 2011) e (Maa, 1975), este foi um dispositivo inicialmente desenvolvido no final da década de sessenta do século passado. É também conhecido pela sigla MPP (Micro Perforated Panel). Segundo Lee (Lee et al, 2005), os painéis microperfurados requerem um espaço menor quando comparados aos tradicionais absorvedores de Helmholtz e de membrana (Carneiro, 2008).

Esta integração de funções num único dispositivo representa uma significativa redução de custos.

A principal vantagem de utilizar painéis microperfurados, para além da possibilidade de múltiplas aplicações e utilidades, é de poderem apresentar uma absorção significativa nas baixas e médias frequências.

Segundo Trevor e Peter (Cox e D'Antonio, 2004) a absorção das ondas sonoras não é tão controlada quanto comparada com o modelo tradicional de Helmholtz.

Cada vez mais especialistas em acústica levam a cabo o ideal de empregar materiais não poluentes e recicláveis, conjugando com arquiteturas opticamente atraentes e eficientes. Este avanço tecnológico tem vindo a alastrar rapidamente, inovando no mercado de alta tecnologia.

Com o facto do desempenho acústico do painéis microperfurados ser (quase independentemente do material escolhido para o elemento de superfície) função dos parâmetros geométricos, de acordo com a Figura 2.10, a sua primeira aplicação real num edifício foi em 1993 sob a forma de concha transparente (Helmut e Xueqin, 2006).

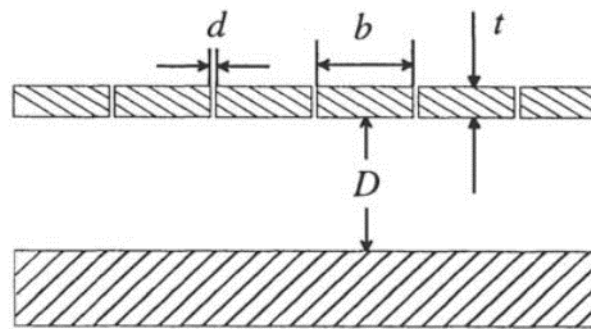


Figura 2.10-Parâmetros geométricos dos painéis microperfurados.

Elementos de superfície com painéis microperfurados normalmente exibem frequências de ressonância para baixas e médias frequências.

Estudos apontam que a absorção máxima pode ser obtida com duas folhas de painéis microperfurados montados, um por trás do outro, em frente a uma parede rígida ou teto, como representado na Figura 2.11. Este sistema foi instalado sob tetos de uma série de centros de natação e de lazer, apresentando-se por exemplo na Figura 2.12.

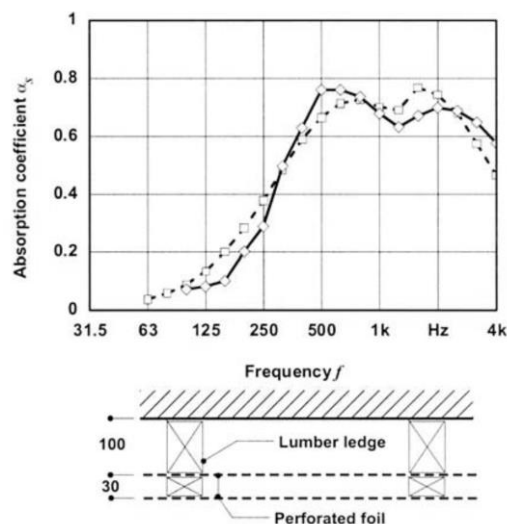


Figura 2.11-Curva do coeficiente de adsorção medido e calculado para a incidência difusa de som para uma dupla camada de painéis microperfurados (Helmut e Xueqin, 2006).





Figura 2.12-Painéis microperfurados com dupla camada de acordo com a Figura 2.11, instalados de baixo do teto de betão de um centro desportivo em Altenkirchen (Helmut e Xueqin, 2006).

A simplicidade de fabrico dos painéis perfurados passa, assim, a ser uma dificuldade, nos âmbitos fabril e económico. As técnicas usuais já são impensáveis de utilizar, sendo necessário recorrer a novas metodologias, com gastos financeiros acrescidos. A tecnologia laser tornou-se muito importante, pois esta é de alta precisão, qualidade e eficiência elevada, e pode ser aplicada a quase todo o tipo de material, se bem que os materiais rígidos são preferíveis. O processamento do sistema de raio laser é feito com auxílio de um computador que, através da definição das características pretendidas, o equipamento assim o executa. De referir que as técnicas ainda não estão aprimoradas, visto que são visíveis resíduos e manchas do processo nas amostras testadas.

A produção dos painéis microperfurados torna-se difícil e demorada, sendo uma das causas do sistema ainda não ser utilizado na maioria das aplicações, não descurando consequentemente o seu custo. Logo, é muito importante o estudo e análise do tema, como finalidade de encontrar uma forma de projetar os parâmetros dos painéis microperfurados rapidamente, de modo a reduzir custos e aumentar a sua aplicabilidade.

Atendendo ao processo de fabrico na elaboração das doze amostras analisadas no âmbito deste trabalho, a ordem de grandeza dos orifícios levou a que se adotasse a expressão “microperfurado” para designação deste tipo de painel.

De modo a fazer uma contínua investigação, para que se torne viável a aplicação e construção deste material, no terceiro capítulo, abordar-se-ão os ensaios laboratoriais e os materiais testados. Mais à frente, os mesmos serão debatidos e analisados criteriosamente.

## 3 ENSAIOS LABORATORIAIS

### 3.1 Conceitos introdutórios

Recorrendo à investigação científica, existem varias conformações a tomar. Pode ser suportada por métodos teóricos, experimentais ou por ambos. Optou-se pela última alternativa, estudando os dois métodos, que mais à frente se expõe detalhadamente.

Atendendo ao objetivo principal da presente dissertação, o processo de avaliação do desempenho acústico das amostras baseou-se no ensaio experimental de amostras de dimensão reduzida, recorrendo ao método do tubo de impedância, determinando assim a absorção acústica de cada solução.

O método utilizado não envolve grande consumo de recursos, como mão-de-obra, recursos financeiros e tempo, visto utilizar amostras de reduzidas dimensões. Assim, é possível realizar ensaios rapidamente tendo em conta a facilidade de manuseio das amostras e do respetivo material laboratorial. Os custos inerentes à aquisição do equipamento de ensaio são tidos como custos indiretos.

De forma introdutória ao tipo de material a tratar neste trabalho, é seguro afirmar que a madeira (constituente do MDF) é um dos materiais de utilização mais antigo nas construções, utilizada por todo o mundo, desde as civilizações primitivas até às mais desenvolvidas. Possui uma vasta gama de vantagens no que diz respeito às suas propriedades físicas, como sendo um produto natural, renovável, exigindo baixo consumo de energia na sua produção e sempre disponível, atendendo ao uso racional e sua replantação. De apreciar que a madeira é um material fácil de trabalhar visto ser uma matéria-prima muito polivalente que pode ser usada de forma muito variada de acordo com o tipo de aplicação pretendida. A sua capacidade isolante é um aspeto bastante importante, visto que satisfaz o isolamento térmico e acústico desempenhando-o de forma simultânea quando aplicada corretamente. Apresenta uma grande variedade de padrões, aumentando assim a sua versatilidade.

Uma das suas aplicações mais notórias diz respeito aos revestimentos de paredes e tetos, pois permite o aproveitamento das suas qualidades e vantagens que foram apresentadas previamente. A sua aplicação em interiores prevalece, onde as condições higrotérmicas são controladas.

Permite assim obter e utilizar elementos de espessura reduzida, aumentando a viabilidade económica.

Assim, dentro de uma enorme panóplia de vantagens, o interesse neste material vai aumentando gradualmente em diversas aplicações, onde ganha uma notória visibilidade no condicionamento acústico de espaços interiores (Qian et al, 2014).

Cada espaço é um caso e para tal há que estudar os materiais e soluções que devem ser empregues e que melhor desempenhem a sua função acústica, como é o caso dos painéis de madeira para este fim.

A inovação faz parte do mundo que habitamos, pelo que é essencial permanecer na vanguarda da tecnologia de modo a salvaguardar o processo de evolução que sofremos constantemente. Deste modo, no ramo da acústica, torna-se necessário desenvolver novas soluções, garantindo melhores resultados e características e mantendo a competitividade económica.

Esta dissertação tem o objetivo de analisar uma solução recente, perspetivando a sua viabilidade técnica no mercado. Esta solução diz respeito à utilização de painéis de madeira MDF microperfurados ao invés da aplicação dos tradicionais painéis perfurados. A função será a mesma (absorção acústica no condicionamento de locais fechados), ou até superior, modificando sobretudo o aspeto visual.

O conceito de painéis microperfurados como elemento absorvedor sonoro foi na década de setenta estudado por Maa (Teodoro e Bitencourt, 2003). Naquele caso, as soluções de placas eram desenvolvidas em acrílico ou metal com pequena espessura, na ordem de 1mm, onde as perfurações tinham medidas milimétricas, circulares ou em forma de fenda, (Figura 3.1). Maa (Teodoro e Bitencourt, 2003) concluiu que a principal vantagem na utilização destes painéis era de que apresentariam uma maior absorção sonora nas baixas e médias frequências.

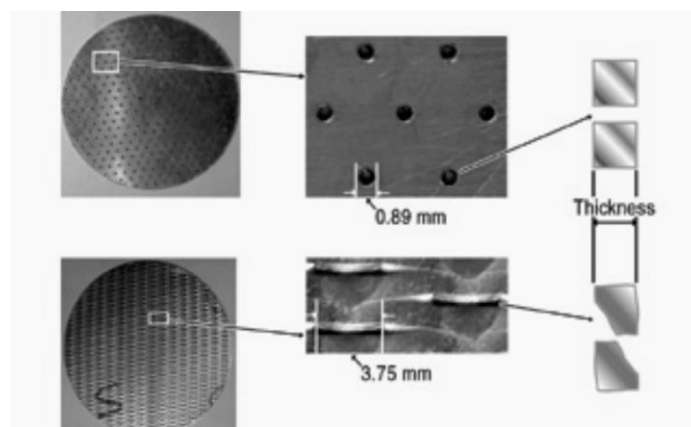


Figura 3.1-Tipos de Painéis microperfurados (perfuração circular e em fendas), (Herrin e Liu, 2011).

No presente estudo, analisa-se a possibilidade da utilização da madeira, mais concretamente MDF, na produção de painéis microperfurados. A inovação está presente na espessura do painel, bem como nos diâmetros dos furos.

Para o caso, foram analisados diferentes tipologias de painel, variando as características de perfuração, espaçamentos entre furos, dimensões das perfurações, espessura do painel, bem como da configuração do tardez de modo a estudar o seu comportamento comparativamente às soluções originais.

### 3.2 Método experimental

Procurando perceber o impacto de um novo material do ponto de vista acústico, há que determinar experimentalmente o seu coeficiente de absorção, como referido anteriormente. No presente trabalho, essa determinação foi efetuada através de amostras de dimensão reduzida recorrendo ao método do tubo de impedância, de acordo com a norma ISO 10534-2, e com a norma americana ASTM E 1050.

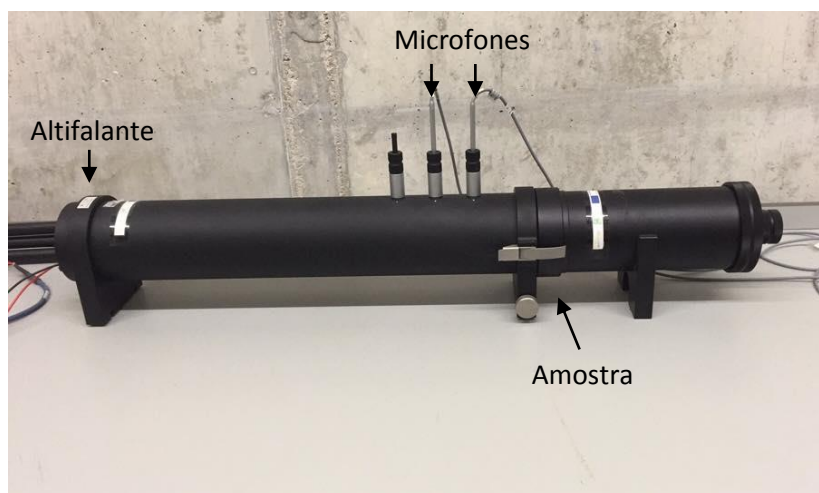


Figura 3.2-Tubo de impedância

O método do tubo de impedância consiste na emissão de um ruído de média intensidade, constante ao longo do espectro de frequências, onde em ondas planas se designa frequentemente por ruído branco. Este ruído é emitido por um altifalante auxiliado pelo respetivo amplificador. As ondas sonoras emitidas pelo altifalante, localizado numa das extremidades, percorrem o interior do tubo incidindo na amostra, na extremidade oposta do tubo. Observam-se variações de pressão resultantes da transformação de parte da energia sonora incidente em energia mecânica, notando-se um decréscimo de pressão sonora refletida. A pressão dentro do tubo é detetada por dois microfones previamente posicionados. Usualmente, utilizam-se os orifícios 2 e 3 como executado no presente trabalho. Os sinais dos dois microfones são simultaneamente processados pelo analisador digital que, após tratamento dos dados, torna possível observar a curva de absorção determinada em função da frequência do som.

O equipamento laboratorial usado foi o constante na figura seguinte (Figura 3.3) disponibilizado pelo ITeCons, Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção.

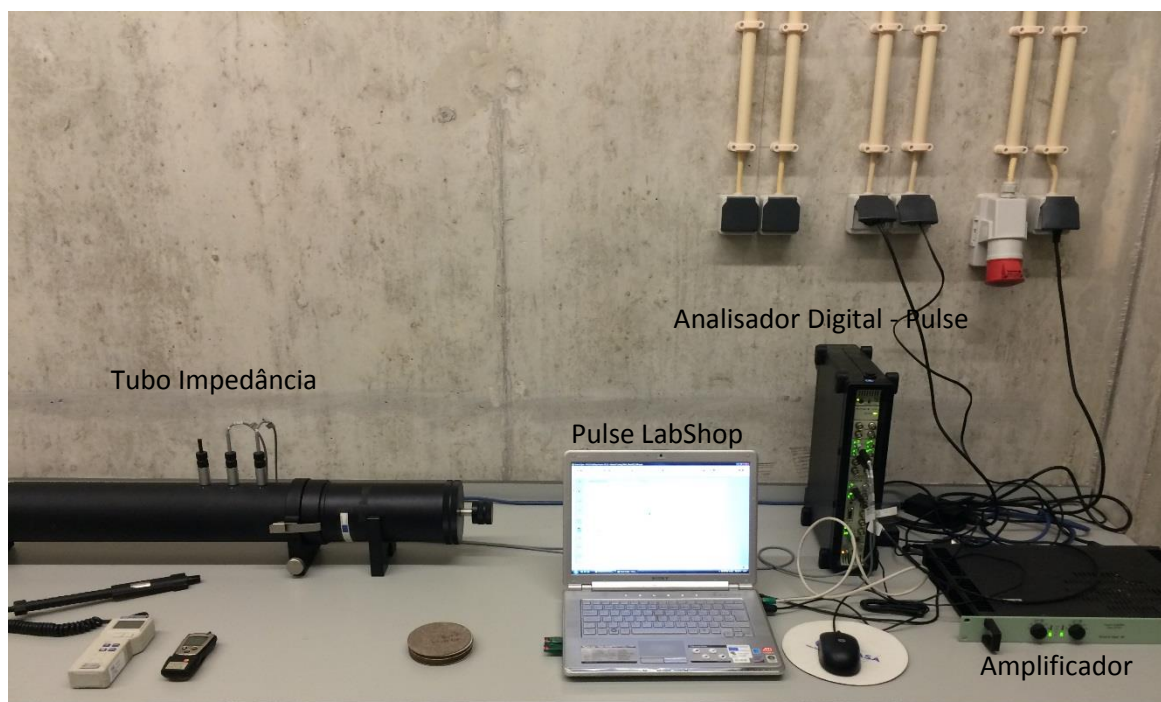


Figura 3.3-Equipamento usado no Método do Tubo de Impedância

Os ensaios foram realizados em amostras de 100mm de diâmetro, cedidas pela empresa *Castelhano & Ferreira*.

O tubo de impedância utilizado na presente investigação é do tipo 4206 (Figura 3.2), da marca Brüel & Kjaer, auxiliado por um amplificador do tipo 2716C da mesma marca (Figura 3.3). Para que seja possível haver o processamento do sinal emitido pelos microfones, torna-se indispensável o uso simultâneo de um sistema de aquisição, analisador digital (multianalisador Pulse), modelo 3560-C da Brüel & Kjaer. Foi ainda utilizado um computador portátil operando o software Pulse LabShop (versão 15.1.0) da Brüel & Kjaer. Este software permite obter e analisar os dados resultantes dos ensaios.

Como referido anteriormente, recorreu-se ao método dos dois microfones, método este proposto na norma internacional ISO 10534-2. O tubo de impedância possui três entradas de microfones, optando-se pelas posições dois e três, de acordo com o procedimento de ensaio acreditado pelo laboratório de ensaios do ITeCons. Este intervalo está diretamente relacionado com a gama de frequências que pode ser avaliada rigorosamente no ensaio (Jordão, 2011).

Tendo em conta a dimensão reduzida das amostras, 100mm de diâmetro, a gama de frequências limita-se aos 1600Hz na banda de terços de oitava. O limite é definido pela expressão (7), presente na norma americana ASTM E 1050 (Jordão, 2011):

$$F_s = \frac{K \cdot c}{\varnothing} \quad (7)$$

onde:

$F_s$  - limite superior da gama de frequências (Hz);

$K$  - constante = 0.586;

$c$  – velocidade de propagação do som no ar (m/s);

$\varnothing$  – diâmetro do tubo (m).

Quanto ao espaçamento máximo entre microfones, como anteriormente indicado, este é definido com as expressões (8) e (9), (Jordão, 2011):

$$s = 0.8 * \frac{c}{2F_s} \quad (8)$$

$$F_i \geq 0.01 * \frac{c}{s} \quad (9)$$

em que:

$s$  – espaçamento entre os microfones (m);

$c$  – velocidade de propagação do som no ar (m/s);

$F_i$  – limite inferior da gama de pressões.

Previamente aos ensaios das amostras, torna-se necessário a calibração do modelo, fazendo para tal, uma avaliação do ruído no interior do tubo de impedância, com a fonte (altifalante) ligada e posteriormente desligada. A diferença entre os níveis sonoros com a fonte ligada e desligada terá que ser igual ou superior a 10dB, para toda a gama de frequência. Ainda tomando a preparação do sistema, torna-se imprescindível a sua calibração, atendendo à correção prevista na norma ISO 10534-2, de forma a anular os erros de fase dos dois microfones. Para tal,

recorreu-se a amostras de referência, Figura 3.4, (espumas sintéticas e tecido) fornecidas pela marca do equipamento, Brüel & Kjaer.



Figura 3.4-Material absorsor para calibração do modelo.

Neste procedimento, o sinal emitido é registado com os microfones na posição invertida, ou seja, posição 3 e 2, sendo que, a seguir, se volta a colocar os mesmos na configuração inicial (posições 2 e 3).

Posteriormente e ainda na preparação do equipamento para os ensaios, torna-se necessário a medição da temperatura e da pressão atmosférica junto ao tubo de impedância. Para o efeito, utilizou-se um Termómetro e um Barómetro como é possível identificar na figura seguinte, (Figura 3.5).



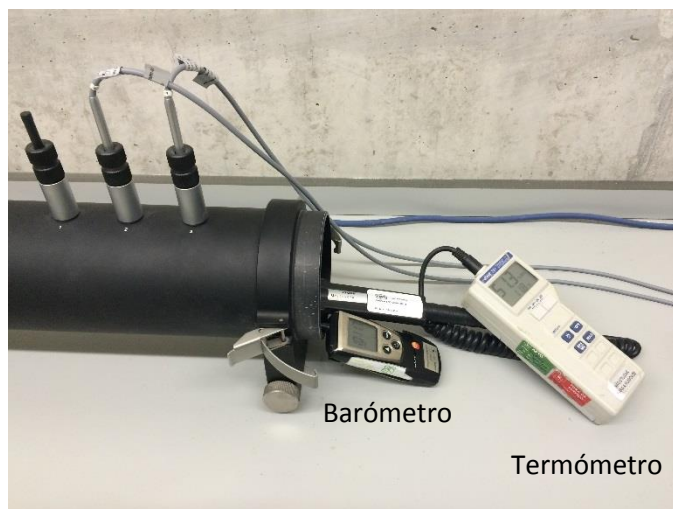


Figura 3.5-Procedimento de medição da Temperatura e Pressão atmosférica.

É de extrema relevância este procedimento, visto que estes parâmetros são tidos em conta no modelo, definindo as condições em que são propagadas as ondas sonoras para a realização dos ensaios.

Por cada sessão de ensaios é aconselhável efetuar uma calibração, comparando amostras padrão de modo a determinar a sua exatidão, recorrendo ao uso de uma amostra de lâ-de-rocha, com densidade de  $20\text{kg/m}^3$  e uma espessura de 40mm. Este rápido procedimento averigua a estabilidade do método de ensaio, visto que apresenta uma grande constância de resultados entre diferentes provetes da mesma amostra.

Após a concretização de todos os processos preparatórios, é possível partir para os ensaios propriamente ditos. Assim, depois da cuidada preparação das amostras, uma a uma, são colocadas no tubo de impedância perpendicularmente ao seu eixo. Aquando do término de cada sessão de ensaios, os dados recolhidos, são tratados de forma a serem extraídos em bandas de terço de oitava, para análise através de uma folha de Excel.

### 3.3 Amostras ensaiadas

#### 3.3.1 Caracterização dos materiais a ensaiar

No subcapítulo 3.1 foi introduzido o conceito da madeira na construção civil, bem como as suas capacidades e aplicações.

O principal objetivo do trabalho a apresentar é o de avaliar a eficiência acústica de soluções em painéis de MDF com diferentes dimensões das aberturas e espaçamentos, incorporando caixas-de-ar com diferentes características. O MDF (Medium Density Fiberboard) é um material derivado da madeira, uniforme, plano e com elevada densidade.

O material MDF é fabricado pela união de pequenas fibras de madeira com o auxílio de resinas sintéticas que as aglutinam. Para finalizar o processo, o material é curado através de um processamento calorífico que posteriormente é prensado e cortado no tamanho desejado pelo fabricante.

Tendo em conta o objetivo final, a empresa *Castelhano & Ferreira*, disponibilizou doze amostras de painéis MDF microperfurados de reduzidas dimensões, isto é, com diâmetro de 100mm. A seguir (Tabela 1-Propriedades das amostras de painéis MDF microperfurados) são apresentadas todas as características consideradas importantes à investigação. Os códigos laboratoriais dizem respeito à identificação da amostra, pré-definidos pelo laboratório de ensaios.

Tabela 1-Propriedades das amostras de painéis MDF microperfurados

Amostras Painéis Microperfurados							
Amostra	Código Laboratorial	Nº Orifícios	Áre Perfurada%	D. Equivalente (mm)	Raio Equivalente (mm)	Espaçamento Furos (mm)	Espessura (mm)
1	ACL 208 A/14	1879	20,695	1,104	0,552	2	0,75
2	ACL 206 A/14	838	3,765	0,709	0,3545	3	0,75
3	ACL 215 A/14	286	0,982	0,619	0,3095	5	0,75
4	ACL 207 A/14	297	1,471	0,744	0,372	5	0,75
5	ACL 211 A/14	297	2,565	0,978	0,489	5	0,75
6	ACL210 A/14	852	7,502	0,991	0,4955	3	0,75
7	ACL209 A/14	1239	11,444	1,011	0,5055	2,5	0,75
8	ACL204 A/14	3233	10,804	0,611	0,3055	1,5	0,75
9	ACL205 A/14	1128	3,697	0,604	0,302	2,5	0,75
10	ACL214 A/14	1134	0,396	0,186	0,093	2,5	0,75
11	ACL213 A/14	3828	9,748	0,518	0,259	1,5	3,05
12	ACL212 A/14	2561	2,532	0,316	0,158	1,5-2	3,05

Como é possível constatar, todas as amostras são diferentes, havendo alteração de dimensões de perfurações, espaçamento entre as mesmas e taxa perfurada. Existem ainda duas amostras que possuem diferente espessura das restantes.

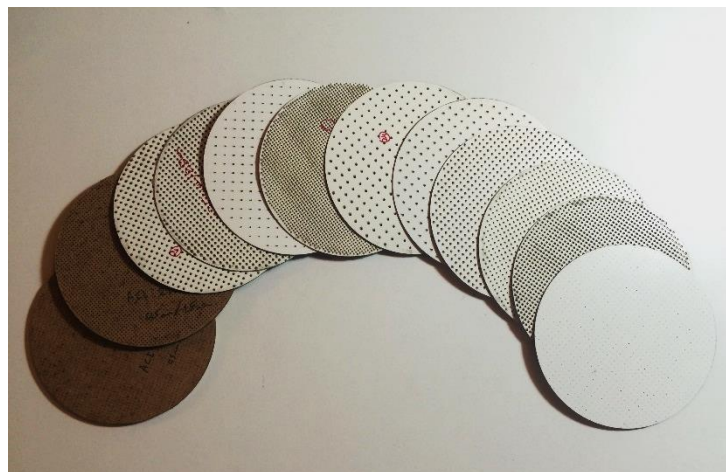


Figura 3.6-Amostras ensaiadas na dissertação.

A obtenção manual das características elencadas em cima (Tabela 1) seria muito morosa. O processamento e caracterização manual de todas as mostras, havendo essa necessidade, seria executado como se pode observar na seguinte figura:

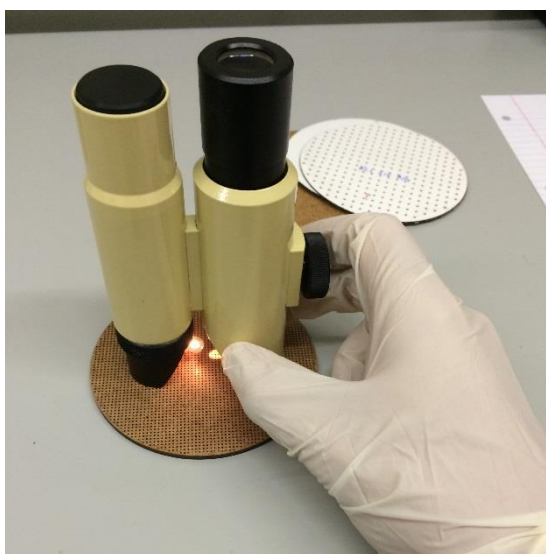


Figura 3.7-Procedimento de medição da dimensão da perfuração e seu espaçamento.

Na Figura 3.7 pode-se observar um monóculo de medição que, possuindo uma escala graduada, possibilita a avaliação milimétrica das perfurações e espaçamentos.

Como referido previamente, a avaliação manual de todas as características seria exaustiva e sem o rigor pretendido para o estudo.

Paralelamente à presente dissertação, foi realizado um trabalho no âmbito da unidade curricular de Técnicas Experimentais do curso de doutoramento em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, que possibilitou obter uma caracterização geométrica rigorosa das amostras (Ribeiro, 2015).

O trabalho foi desenvolvido tendo em conta o processamento de imagens (captadas através de um scanner com resolução máxima de 2400 ppp) das superfícies das amostras de MDF microperfuradas com dimensão reduzida. O autor (Ribeiro, 2015) recorreu a um algoritmo desenvolvido pelo mesmo para caracterizar os diâmetros mínimo e máximo, a área e as coordenadas do centróide de cada um dos orifícios presente nas imagens digitais, bem como o número de orifícios por unidade de área e a área perfurada das amostras. O referido algoritmo permitiu ainda a representação gráfica dos resultados na imagem original através da identificação do número de ordem, da fronteira, do raio máximo e mínimo de cada orifício.

A observação dos orifícios no plano da amostra resultou a possibilidade de existência de duas secções possíveis: circulares ou elípticas. Desta forma, a observação de elipses com secções quase circulares indica que os orifícios foram realizados com um alinhamento do laser perpendicular ao plano da secção e as elipses indicam que os mesmos foram realizados com alguma inclinação (Ver Cap. 2 – Revisão Bibliográfica).

Concluída a caracterização geométrica do plano da amostra, resta determinar a espessura. Para tal, recorreu-se a um paquímetro digital. Observou-se que havia apenas duas espessuras, nas doze amostras, 0.75mm para dez amostras e 3.05mm para as restantes (duas), como se pode notar na figura seguinte (Figura 3.6):



Figura 3.8- Procedimento de medição da espessura das amostras (Paquímetro).

As amostras são apresentadas no seu plano para facilmente ser perceptível a sua geometria e configuração de perfuração. Estas imagens dizem respeito às digitalizações via scanner para a caracterização automática precisa. São notórias as diferenças entre diâmetros e espaçamentos entre furações. As imagens seguintes (Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12) foram digitalizadas pelo autor da dissertação, posteriormente remetidas e tratadas no âmbito do trabalho (Ribeiro, 2015).



Figura 3.9-Amostras 1, 2 e 3 (Ribeiro, 2015).

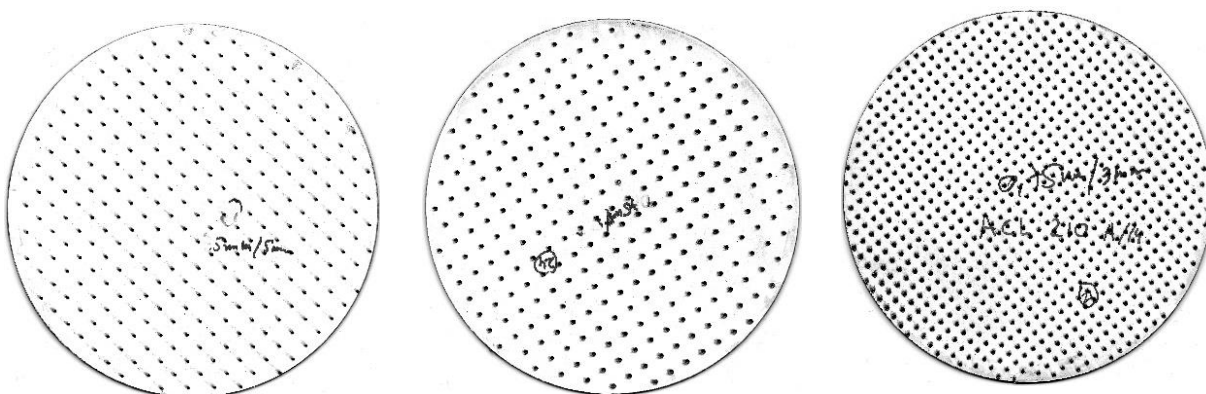


Figura 3.10-Amostras 4, 5 e 6 (Ribeiro, 2015).

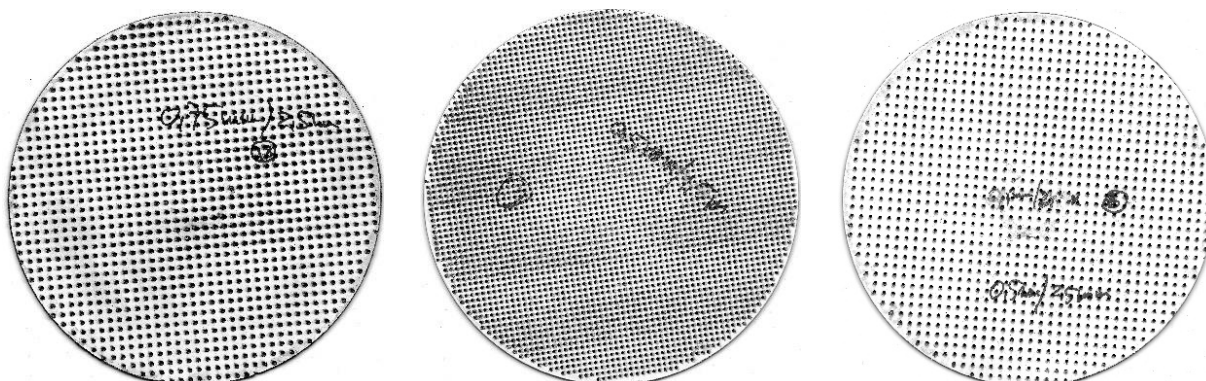


Figura 3.11-Amostras 7, 8 e 9  
(Ribeiro, 2015).



Figura 3.12-Amostras 10, 11 e 12  
(Ribeiro, 2015).

Por ultimo, não relevante para o desempenho acústico, mas sim do ponto de vista económico, há que referenciar os tempos de produção dos painéis MDF microperfurados. No processo de perfuração a laser (descrito no Capítulo 2), há o registo por parte do software, do tempo de perfuração da amostra. O mesmo dá a duração espectável para cada  $m^2$  de material.

A Tabela 2 seguinte demonstra os dados conseguidos:

Tabela 2-Tempos de produção das amostras (a negrito).

Amostras Painéis MDF Microperfurados						
Amostra	Código Laboratorial	Nº Orifícios	Espessura (mm)	Tempo de perfuração da amostra (s)	Tempo esperado de perfuração (s/m <sup>2</sup> )	Tempo esperado de perfuração
1	ACL 208 A/14	1879	0,75	<b>200</b>	<b>6366,197724</b>	<b>1h 46min 6seg</b>
2	ACL 206 A/14	838	0,75	<b>190</b>	<b>6047,887837</b>	<b>1h 40min 47seg</b>
3	ACL 215 A/14	286	0,75	<b>85</b>	<b>2705,634033</b>	<b>0h 45min 5seg</b>
4	ACL 207 A/14	297	0,75	<b>90</b>	<b>2864,788976</b>	<b>0h 47min 44seg</b>
5	ACL 211 A/14	297	0,75	<b>95</b>	<b>3023,943919</b>	<b>0h 50min 23min</b>
6	ACL210 A/14	852	0,75	<b>195</b>	<b>6207,042781</b>	<b>1h 43min 27seg</b>
7	ACL209 A/14	1239	0,75	<b>345</b>	<b>10981,69107</b>	<b>3h 3min 1seg</b>
8	ACL204 A/14	3233	0,75	-	-	-
9	ACL205 A/14	1128	0,75	<b>255</b>	<b>8116,902098</b>	<b>2h 15min 16seg</b>
10	ACL214 A/14	1134	0,75	-	-	-
11	ACL213 A/14	3828	3,05	<b>585</b>	<b>18621,12834</b>	<b>5h 10min 21seg</b>
12	ACL212 A/14	2561	3,05	<b>320</b>	<b>10185,91636</b>	<b>2h 49min 45seg</b>

### 3.3.2 Configurações das amostras a ensaiar

Tendo em conta o objetivo principal, existem doze amostras de painéis de MDF microperfurados que variam de diâmetro de perfuração, taxa de perfuração, espaçamento entre furos, bem como a espessura do material.

Além das diferenças notórias entre amostras, tornou-se necessário executar configurações distintas, isto é, adicionar combinações que ampliassem o leque de ensaios, de modo a obter melhores soluções representativas de diferentes condições de aplicação.

Para o efeito, selecionaram-se quatro configurações. A primeira centrou-se na simplicidade, a amostra com uma caixa-de-ar vazia de 20mm. Em segundo, o provete é constituído pela amostra de MDF e um suporte pelo tardoz, fixos quimicamente com recurso a uma cola convencional para madeira. Este suporte possui 19mm de espessura, diâmetro de 100mm e é fabricado em madeira aglomerada como se pode observar na Figura 3.14 e Figura 3.15 em que esta é perfurada com furos de grande dimensão, para que não altere os resultados pretendidos do material à face (painel microperfurado), mas mantendo a sua resistência para que a função seja cumprida com eficácia. Possui  $\varepsilon=65\%$ . Mais à frente irá constatar-se que, esta solução gera os chamados “furos cegos”, furos que se encontram tapados pelo suporte atrás, sem que consigam ter ligação com a caixa-de-ar.

A terceira configuração possui um material absorvedor no tardoz da amostra, lã-de-rocha da marca Knauf, com espessura aproximada de 20mm e massa volúmica de cerca de  $17,43\text{kg/m}^3$ . Por fim, o último provete apresenta-se semelhante com o anterior (terceiro), com diferença na lã-



de-rocha que, ao invés de ser totalmente preenchida, é escavada. A tabela abaixo (Tabela 3) apresenta mais sucintamente todas as características essenciais dos provetes testados:

Tabela 3- Características geométricas dos provetes ensaiados.

Provete	Características Geométricas
1	Amostra + Caixa-de-ar de 20mm
2	Amostra + Suporte de 16.8mm
3	Amostra + Lã-de-rocha preenchida de 20mm
4	Amostra + Lã-de-rocha escavada de 20mm

Todos os tipos de provetes podem ser observados nas seguintes figuras:

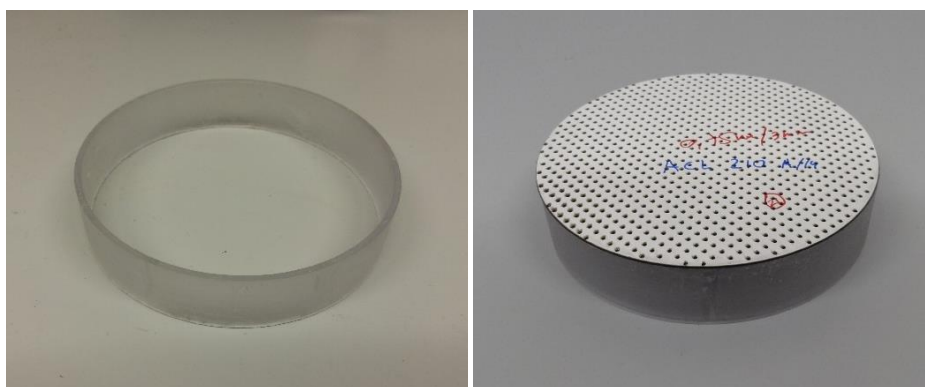


Figura 3.13- Provete com amostra e caixa-de-ar vazia (anel acrílico).



Figura 3.14- Provete com amostra e suporte (madeira MDF macroperfurada).



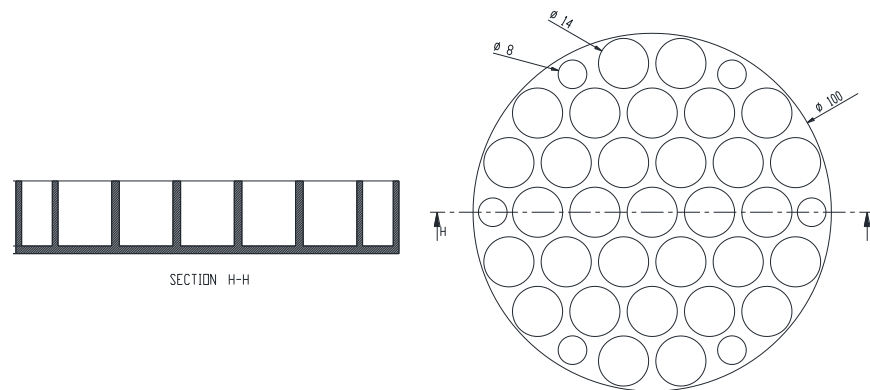


Figura 3.15-Esquema do painel de MDF de suporte com  $\varepsilon = 65\%$ .

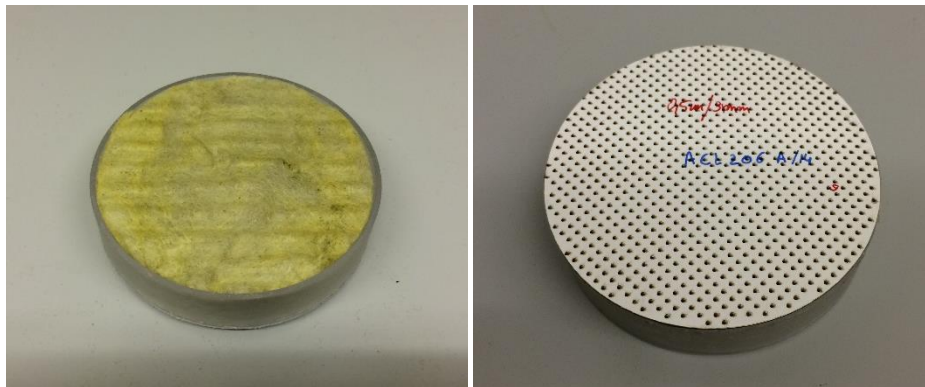


Figura 3.16-Provete com amostra e lã-de-rocha preenchida no tardoz.

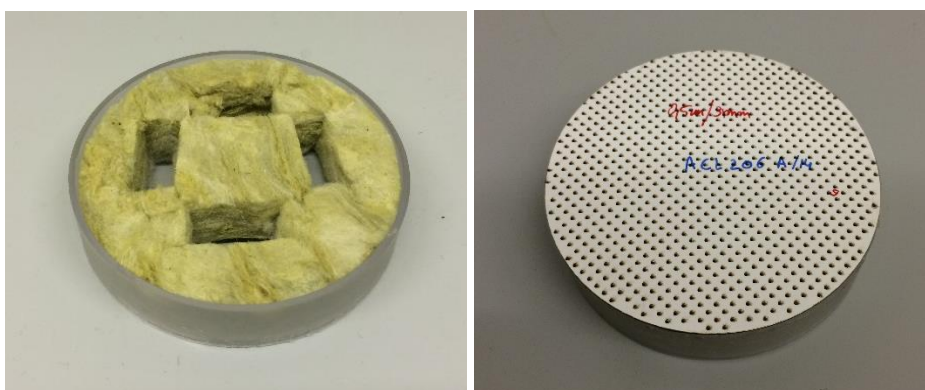


Figura 3.17-Provete com amostra e lã-de-rocha escavada no tardoz.

### 3.3.3 Preparação dos Provetes

Os provetes foram cuidadosamente montados e as amostras coladas aos diferentes tipos de materiais. Após os respectivos ensaios, as mesmas foram retiradas e descoladas com o auxílio de equipamento específico de modo a não danificar os materiais constituintes do provete.

Quanto às amostras testadas apenas com a caixa-de-ar vazia, foram coladas uniformemente ao anel acrílico com recurso a uma cola convencional. Aquelas devem ser posteriormente comprimidas enquanto a cola seca, de modo a que haja uma aderência total da amostra. Assim evita-se o seu descolamento aquando, o ensaio e mesmo as vibrações indesejadas na ligação dos dois materiais.

Os provetes do tipo dois (Amostra + Suporte de aglomerado de madeira com 16.8mm de espessura) foram montados apenas colando estrategicamente as amostras de MDF ao suporte de madeira, mantendo o procedimento acima descrito.

Para os provetes do tipo três e quatro, o procedimento foi semelhante ao do primeiro, sendo que após a colagem da amostra ao anel acrílico, seguiu-se a colocação da lã-de-rocha preenchida e escavada respetivamente.

### 3.4 Ensaio

Foram realizadas três fases de ensaios divididas por: 1) Provetes do tipo um; 2) provetes do tipo dois; 3) Provetes do tipo três e quatro.

Todas as amostras foram testadas procurando compreender qual a reprodutibilidade do ensaio quando realizado no tubo de impedância. De modo a caracterizar a reprodutibilidade do ensaio e a evitar erros e discrepâncias, os provetes foram ensaiados por três vezes e, entre cada dois ensaios foi necessário retirar e recolocar o provete no tubo de impedância. Assim, fica assegurado que se minimizou qualquer tipo de erro de introdução e encaixe no tubo de impedância. Os resultados tidos em conta são a média entre os três ensaios para cada provete, sendo que, se existisse uma grande discrepância entre qualquer um deles, seria necessário a repetição dos mesmos três ensaios. Tal situação não se verificou em nenhum tipo de provete.

Os resultados obtidos foram extraídos em formato de terço de oitava. O programa permite a exportação dos dados para uma folha Excel, para mais fácil análise e configuração de gráficos.

Os resultados dos ensaios serão mais à frente oportunamente apresentados, no próximo capítulo (Quarto).

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No âmbito deste trabalho, pretendeu-se analisar experimentalmente o comportamento de painéis microperfurados feitos em MDF. Neste capítulo serão apresentados todos os resultados dos ensaios realizados para o trabalho, onde se pretende avaliar o comportamento dos painéis microperfurados.

### 4.1 Enquadramento

O principal objetivo do presente será avaliar a eficiência acústica destas soluções, com diferentes dimensões de aberturas e espaçamentos, incorporando caixas-de-ar com diferentes dimensões e características. Os ensaios experimentais foram realizados em tubo de impedância (segundo a metodologia da norma ISO 10534-2), com recurso a amostras circulares de pequenas dimensões.

Pretende-se que os dados obtidos experimentalmente sejam analisados e comparados com resultados de modelos teóricos, disponíveis na literatura, bem como de soluções técnicas disponíveis no mercado.

### 4.2 Curvas de absorção sonora

#### 4.2.1 Amostras com caixa-de-ar vazia vs suporte macroperfurado no tardoz.

Em primeiro lugar, analisa-se a variação do coeficiente de absorção sonora do sistema, quando se considera um determinado tipo de painel, com duas configurações distintas de caixa-de-ar, ou seja, caixa-de-ar vazia e caixa-de-ar com suporte macroperfurado pelo tardoz.

Estudando apenas os comportamentos dos provetes com caixa-de-ar vazia, comparam-se amostras com diferentes taxas de perfuração. Por sua vez, quando estes provetes são comparados com os que possuem o suporte macroperfurado em MDF pelo tardoz, existem duas variáveis a modificar. A taxa de perfuração e a espessura da caixa-de-ar.

A taxa de perfuração do sistema, com a incorporação do suporte macroperfurado, muda no seu conjunto, visto que possuímos uma solução de dois painéis juntos, que são distintos, com taxas

---

de perfuração diferentes. Esta alteração deve-se ao facto de existirem os chamados “furos cegos” no painel de amostra, que se sobrepõem à zona não perfurada do suporte. Isto é, irão existir um conjunto de furos com caixa-de-ar (interseção dos furos da amostra com os furos do suporte) e furos obturados, apenas com caixa-de-ar da espessura do próprio painel.

Para uma clara compreensão, a imagem seguinte mostra, pela parte posterior do provete, a explicação a cima realizada.

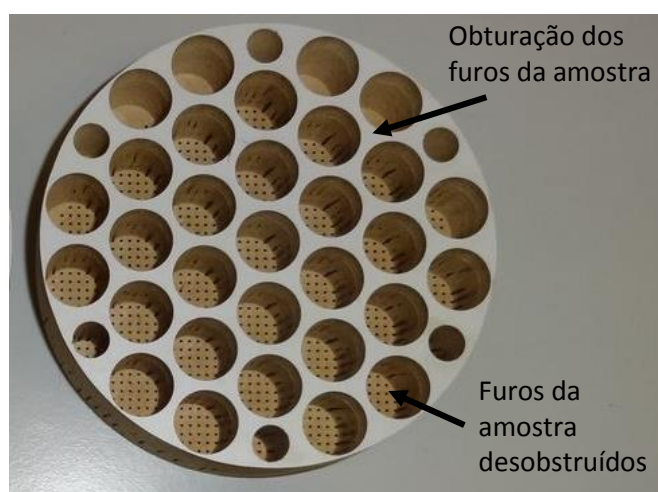


Figura 4.1-Tardoz do provete (Amostra + Suporte MDF)

Em baixo apresenta-se o esquema em modelo AutoCAD, onde são visíveis as perfurações que estão desobstruídas, não tendo a sua função lesada.

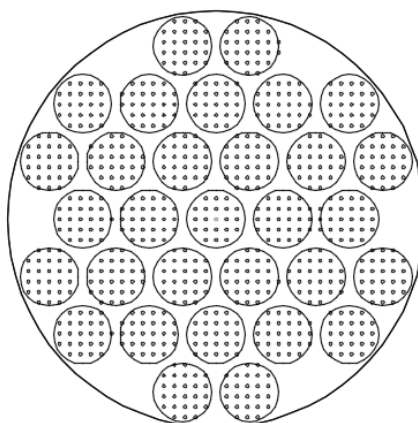


Figura 4.2-Esquema provete Amostra + Suporte MDF (AutoCAD)

A Tabela 4 seguinte apresenta as novas taxas efetivas de perfuração, devido à “eliminação” de um grande número de perfurações:

Tabela 4 - Taxas de perfuração efetiva

Material	Taxa Perfuração Efetiva					
	Area (mm <sup>2</sup> )	Area perfurada (mm <sup>2</sup> )	Taxa Perfuração (%)	Area não perfurada (mm <sup>2</sup> )	Taxa não Perfuração (%)	Taxa efetiva perfurada (%)
Suporte	7850	5102,5	65%	2747,5	35%	-
ACL 208 A/14	7850	1624,5575	20,70%	6225,4425	79%	13,5%
ACL 206 A/14	7850	295,5525	3,77%	7554,4475	96%	2,4%
ACL 215 A/14	7850	77,087	0,98%	7772,913	99%	0,6%
ACL 207 A/14	7850	115,4735	1,47%	7734,5265	99%	1,0%
ACL 211 A/14	7850	201,3525	2,57%	7648,6475	97%	1,7%
ACL210 A/14	7850	588,907	7,50%	7261,093	92%	4,9%
ACL209 A/14	7850	898,354	11,44%	6951,646	89%	7,4%
ACL204 A/14	7850	848,114	10,80%	7001,886	89%	7,0%
ACL205 A/14	7850	290,2145	3,70%	7559,7855	96%	2,4%
ACL214 A/14	7850	31,086	0,40%	7818,914	100%	0,3%
ACL213 A/14	7850	765,218	9,75%	7084,782	90%	6,3%
ACL212 A/14	7850	198,762	2,53%	7651,238	97%	1,6%

A nova taxa de perfuração ( $\epsilon$ ) será o produto da taxa de perfuração do painel de amostra ( $\epsilon_1$ ) com o valor de ( $\epsilon_2$ ), respeitante ao painel de suporte.

A variação do coeficiente de absorção sonora apresenta-se graficamente, em função da frequência, sendo estes gráficos designados, por curva de absorção sonora. Como referido anteriormente, os valores obtidos são valores médios de três ensaios para cada solução. Os três ensaios foram realizados sempre cumprindo as normas estipuladas atrás.

O método do tubo de impedância tem como teto os 1600 Hz, que, de acordo com o estipulado, seria uma média frequência. Para o presente trabalho, a frequência de 1600 Hz é tida como frequência alta, para que seja possível realizar comparações mais coerentemente, dividindo as gamas de frequências.

Do ponto de vista organizacional, houve a necessidade de agrupar gráficos, dois a dois. Esta junção respeita a sequência dos códigos laboratoriais, como se pode verificar, por exemplo, na Tabela 4 - Taxas de perfuração efetiva.

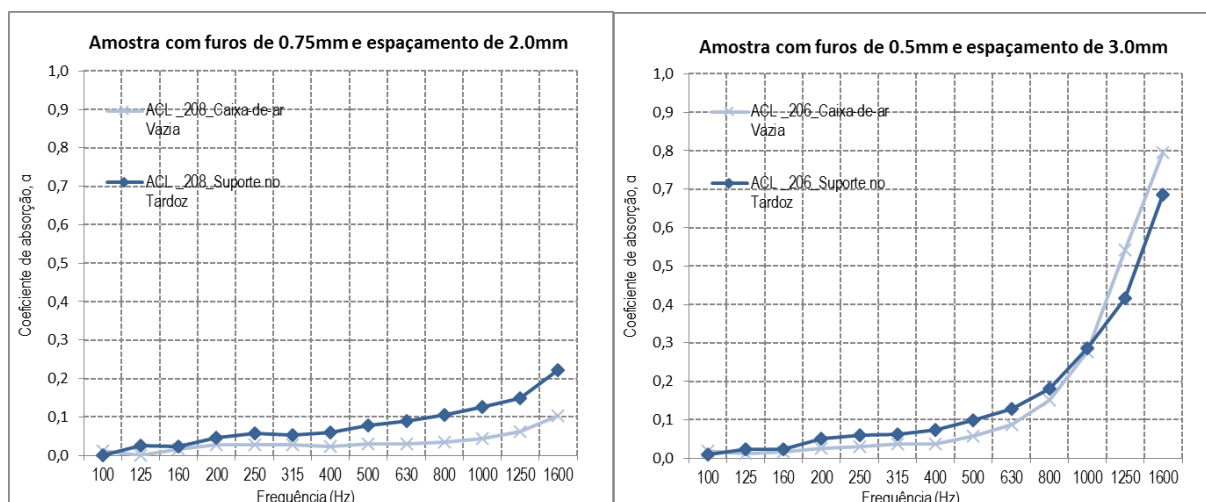


Figura 4.3- Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14 (Caixa-de-ar vazia vs Suporte no Tardoz).

Respeitando a configuração da caixa-de-ar vazia, as curvas de absorção sonora apresentadas na Figura 4.3 consideram as amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14, com 0.75mm de espessura. Considerando que cada amostra agora apresenta diferentes taxas de perfuração, estas exibem-se da seguinte forma:

ACL208 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\epsilon=20.70\%$

ACL208 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\epsilon=13.5\%$

ACL206 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\epsilon=3.77\%$

ACL206 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\epsilon=2.40\%$

É evidente a diminuição resultante no valor de  $\epsilon$  com a inserção do suporte no tardoz do painel de amostra.

À primeira vista, é de referir que a amostra ACL208 A/14 com caixa-de-ar vazia (maior taxa de perfuração –  $\epsilon$ ) aparenta usufruir de uma absorção sonora menor, comparando com a solução de suporte pelo tardoz. Tal conclusão seria precipitada. Analisando as curvas, apenas existe informação até ao limite de 1600Hz para a frequência, o que impossibilita conhecer o comportamento para além desse valor limite. Pela consulta da literatura (Patraquim, 2008), sabendo que a frequência de ressonância (frequência para a qual existe  $\alpha_{MAX}$ ) aumenta com a taxa de perfuração, não se pode afirmar qual a amostra que mais absorve. Apenas podemos afirmar que a frequência de ressonância se vai verificar fora da gama de frequências analisada, ou seja, além dos 1600Hz.

Com a apreciação das soluções da amostra ACL206 A/14, nota-se um comportamento bastante idêntico, existindo uma semelhança de resultados nas baixas frequências, que se altera para as médias frequências. Para estas últimas, observa-se que a solução ACL206 A/14\_Caixa-de-ar vazia melhora em termos de absorção nas frequências elevadas, comparativamente à solução ACL206 A/14\_Suporte no Tardoz.

Constata-se que com a diminuição da taxa de perfuração, a absorção melhora para as médias frequências. Para a configuração de caixa-de-ar vazia, o aumento foi gradual para a primeira solução, ao contrário da segunda, onde o aumento foi acentuado, atingindo o máximo para um valor de  $\alpha=0.104$  na amostra ACL208 A/14 e  $\alpha=0.795$  para a amostra ACL206 A/14, no intervalo observado.

Tendo em conta a presença do suporte no tardoz, verifica-se que, em toda a largura de banda, houve uma subida de valores da absorção, acompanhando em paralelo a curva respeitante à caixa-de-ar vazia, alcançando o máximo para a mesma frequência. Tendo em conta o intervalo definido, o maior valor de  $\alpha$  confirma-se para a frequência de 1600Hz, com valores de  $\alpha=0.22$  e  $\alpha=0.68$  respetivamente nas amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14.

A conclusão a extrair da primeira apreciação das curvas permite verificar que, para uma menor taxa de perfuração, os valores do coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) tendem a aumentar mais rapidamente.

Apenas a primeira amostra analisada comprova a melhoria da absorção sonora com a colocação do suporte pelo tardoz do painel (ACL208 A/14).

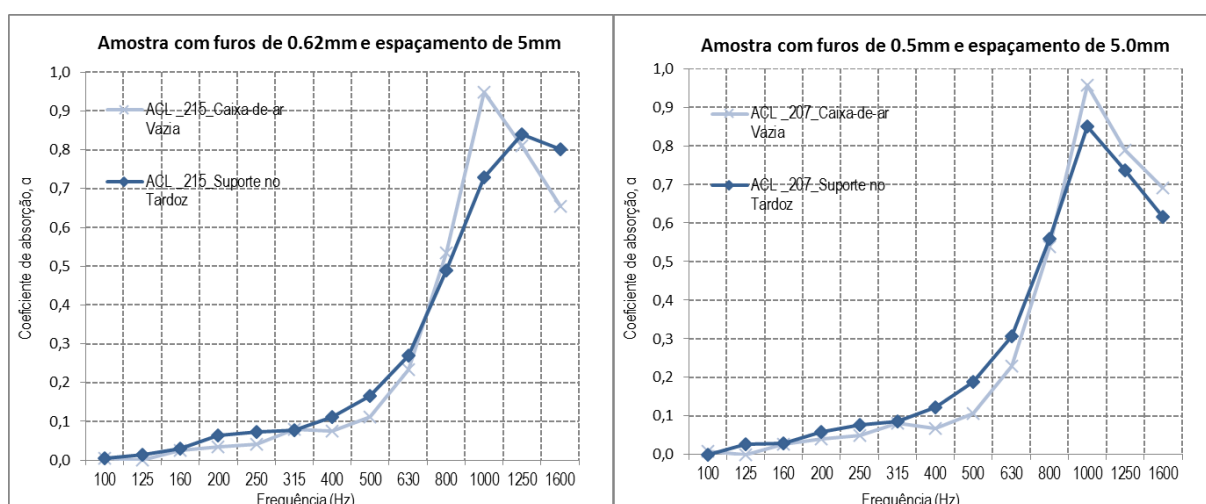


Figura 4.4-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14 (Caixa-de-ar vazia vs Suporte no Tardoz).



As curvas de absorção sonora apresentadas na Figura 4.4 dizem respeito às amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14 que possuem 0.75mm de espessura de amostra de painel MDF.

Atentando às diferentes taxas de perfuração, apresentam-se os valores respeitantes às quatro soluções:

ACL215 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\epsilon=0.98\%$

ACL215 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\epsilon=0.6\%$

ACL207 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\epsilon=1.47\%$

ACL207 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\epsilon=1.0\%$

Numa primeira observação das curvas referentes às duas amostras, é possível constatar que a análise feita anteriormente se mantém. Para taxas de perfuração menores, existe um aumento mais significativo. No caso específico das últimas duas amostras, ACL215 A/14 e ACL207 A/14, esse aumento deu-se numa maior extensão de banda de frequência analisada.

Tendo em conta uma análise pormenorizada das soluções da amostra ACL215 A/14, é de ressaltar que ambas as soluções (caixa-de-ar vazia e suporte no tardoz) obtiveram resultados quase idênticos, em que apenas se ressalva um pico aos 1000Hz registando um valor de absorção sonora de 0.95, para o provete da caixa-de-ar vazia. As curvas exibem um comportamento onde se aparenta obter resultados melhorados para a solução com o suporte no tardoz, nas altas frequências. Para comprovar tal comportamento, seria necessário recorrer ao ensaio da câmara reverberante, conseguindo aumentar o espectro de frequências analisáveis, para um limite de 5000Hz. Contudo, seria necessário recorrer a provetes de dimensões muito superiores.

A amostra ACL207 A/14 continua a apresentar um comportamento expectável, onde semelhantemente à amostra anterior (ACL215 A/14) exhibe um valor máximo de  $\alpha=0.957$  para a configuração da caixa-de-ar vazia, dentro do limite estudado. Já no caso da solução de suporte no tardoz, a curva acompanha a anterior em praticamente toda a banda de frequência, sendo que atinge um pico um pouco inferior à solução antes analisada, para  $\alpha=0.85$ .

A Figura 4.5 apresenta as curvas de absorção sonora relativas às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14, que têm uma espessura de 0.75mm.

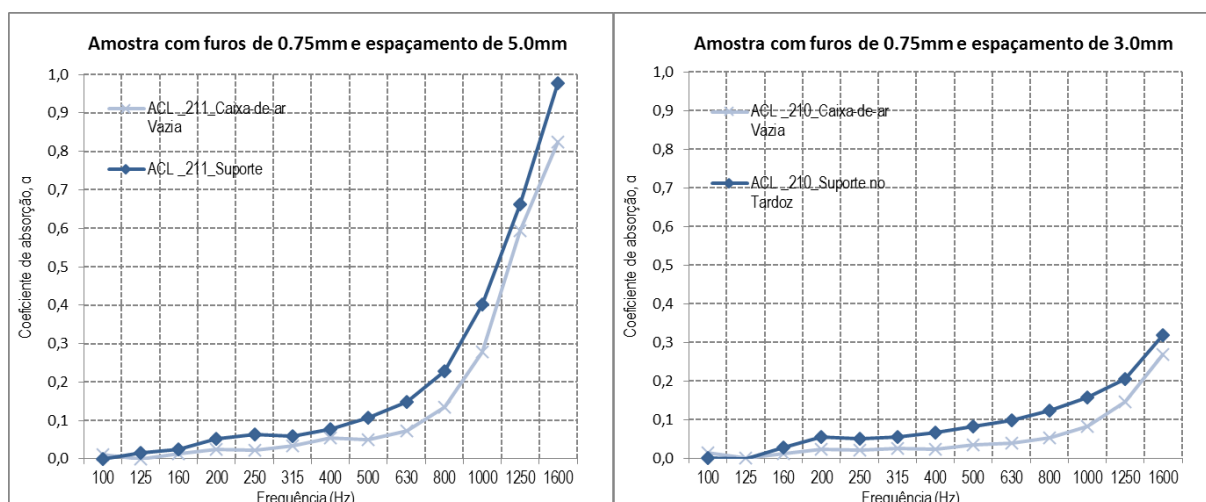


Figura 4.5-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14 (Caixa-de-ar vazia vs Suporte no Tardoz).

Atentando nas diferentes taxas de perfuração, apresentam-se os valores respeitantes às quatro soluções referidas:

ACL211 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\varepsilon=2.57\%$

ACL211 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\varepsilon=1.7\%$

ACL210 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\varepsilon=7.50\%$

ACL210 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\varepsilon=4.9\%$

A tendência tornou-se a verificar, onde é perceptível um aumento mais abrupto das curvas da amostra ACL211 A/14, coincidindo com a menor taxa de perfuração do painel da amostra. Este tipo de comportamento tem-se vindo a verificar nos ensaios analisados.

Por outro lado, repetindo-se o mesmo propósito, a amostra ACL210 A/14 apresenta curvas de desenvolvimento suave, não exibindo nenhum pico de ressonância na gama de frequências analisada.

Em ambas as amostras verificam-se melhorias com a inserção do suporte macroperfurado no tardoz do painel, criando uma curva de absorção sonora sensivelmente paralela à homóloga da solução de caixa-de-ar vazia.

A amostra ACL211 A/14 obteve valores interessantes onde, para as médias frequências existe um pico no valor do coeficiente de absorção sonora, de  $\alpha=0.98$ , na solução do suporte

macroperfurado. O provete com caixa-de-ar vazia alcançou um máximo para a mesma frequência de 1600Hz, onde o coeficiente de absorção acústica  $\alpha$  obteve o valor de 0.824.

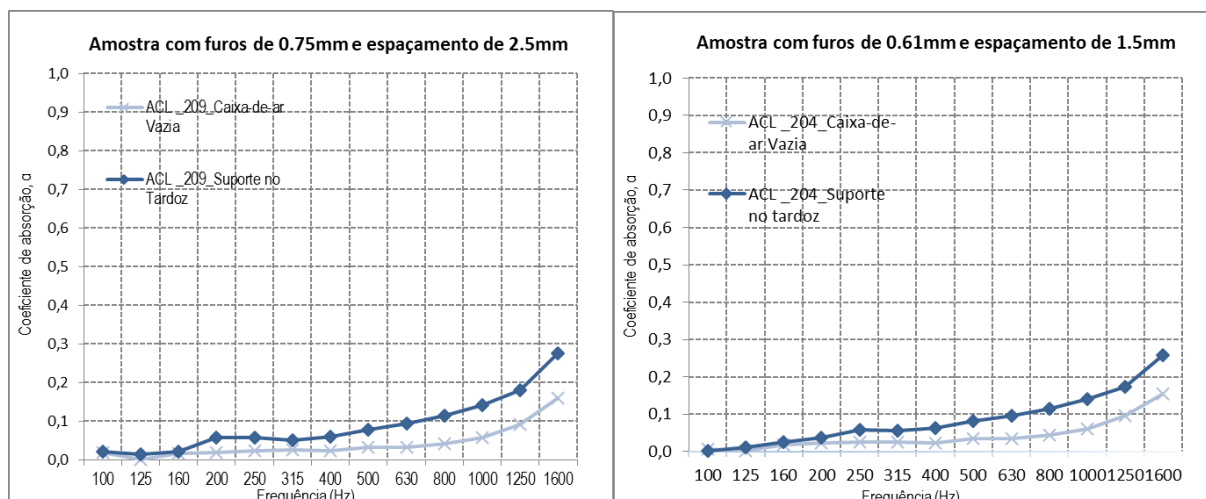


Figura 4.6- Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL209 A/14 e ACL204 A/14 (Caixa-de-ar vazia vs Suporte no Tardoz).

As curvas de absorção sonora apresentadas na Figura 4.6 dizem respeito às amostras ACL209 A/14 e ACL204 A/14, com 0.75mm de espessura do painel de amostra.

Com a solução de suporte no tardoz da amostra, como visível atrás, há alteração da taxa de perfuração, apresentando-se novamente os valores respeitantes às quatro soluções:

ACL209 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\epsilon=11.44\%$

ACL209 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\epsilon=7.4\%$

ACL204 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\epsilon=10.8\%$

ACL204 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\epsilon=7.0\%$

As curvas de absorção sonora de ambas as amostras mostram-se quase idênticas, onde a espessura permanece constante, alterando apenas a taxa de perfuração. A taxa de perfuração da amostra diminui, com as dimensões das perfurações e o espaçamento entre furos a reduzir.

Quando se estuda o comportamento de cada um dos provetes, para cada amostra, é visível uma melhoria na condição do provete com suporte macroperfurado no tardoz do painel. A curva de absorção sonora acompanha paralelamente o comportamento da curva correspondente à caixa-de-ar vazia, com valores superiores, a partir da frequência dos 160Hz.

A seguir, na Figura 4.7, apresentam-se as últimas amostras com 0.75mm de espessura.

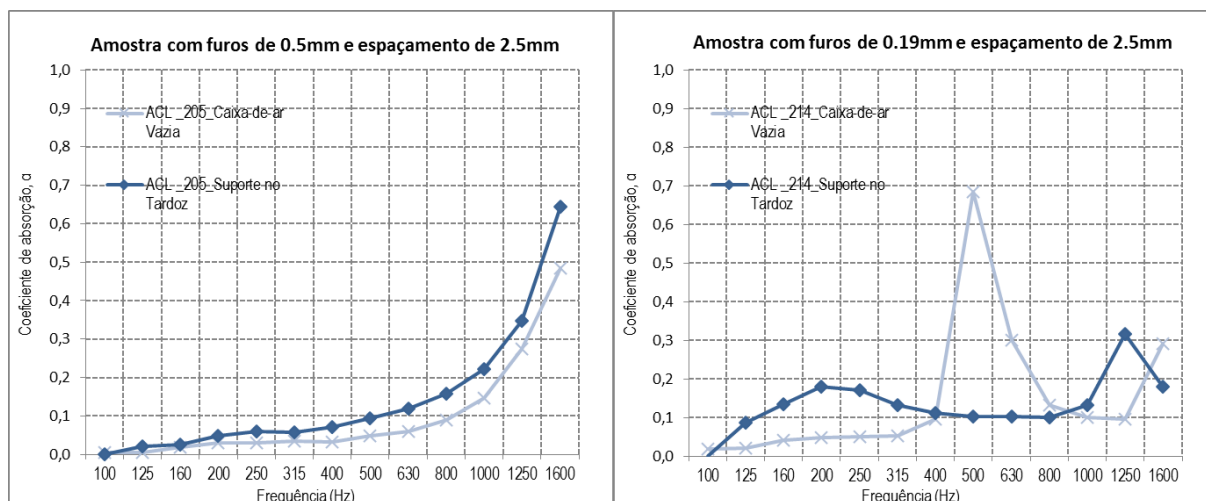


Figura 4.7- Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14 (Caixa-de-ar vazia vs Suporte no Tardoz).

As curvas de absorção sonora expostas apresentam os resultados do método do tubo de impedância nas amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14.

É de referir que a amostra ACL214 A/14 é a que apresenta a menor taxa de perfuração, como se pode verificar a seguir:

ACL205 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\varepsilon=3.70\%$

ACL205 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\varepsilon=2.4\%$

ACL214 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\varepsilon=0.40\%$

ACL214 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\varepsilon=0.3\%$

A amostra ACL205 A/14 tem uma taxa de perfuração relativamente pequena, o que se confirma com os resultados aparentes, idênticos aos que possuem amostras de  $\varepsilon$  reduzidas. O provete com a amostra + suporte no tardoz obteve um melhor desempenho na função de absorção. Ambas as curvas (caixa-de-ar vazia e suporte no tardoz), tiveram um crescimento gradual, em que nas médias frequências gozaram de uma subida mais acentuada.

Partindo agora para a análise da amostra ACL214 A/14, é visível um comportamento fora do contexto que tem vindo a ser observado. Apresenta um pico ainda nas baixas frequências, aos 500Hz, decrescendo até uma determinada frequência, voltando a aumentar os valores do coeficiente de absorção sonora. Esta situação, com furações tão reduzidas pode ser prejudicial ao comportamento do painel, para que desenvolva perfeitamente a sua função absorvedora.

Uma das suposições, que suporta a disparidade da amostra apresentada, é a observação do comportamento da curva do provete com o suporte no tardez, que não acompanhou a curva da solução anterior. O pico observou-se agora nas médias frequências, para um valor de  $\alpha$  baixo, 0.32.

Por fim, na Figura 4.8 apresentam-se as duas últimas amostras analisadas, em que estas possuem uma característica díspar das anteriores dez, a espessura. Contrariamente aos 0.75mm, as amostras ACL213 A/14 e ACL212 têm 3.05mm de espessura de painel de amostra.

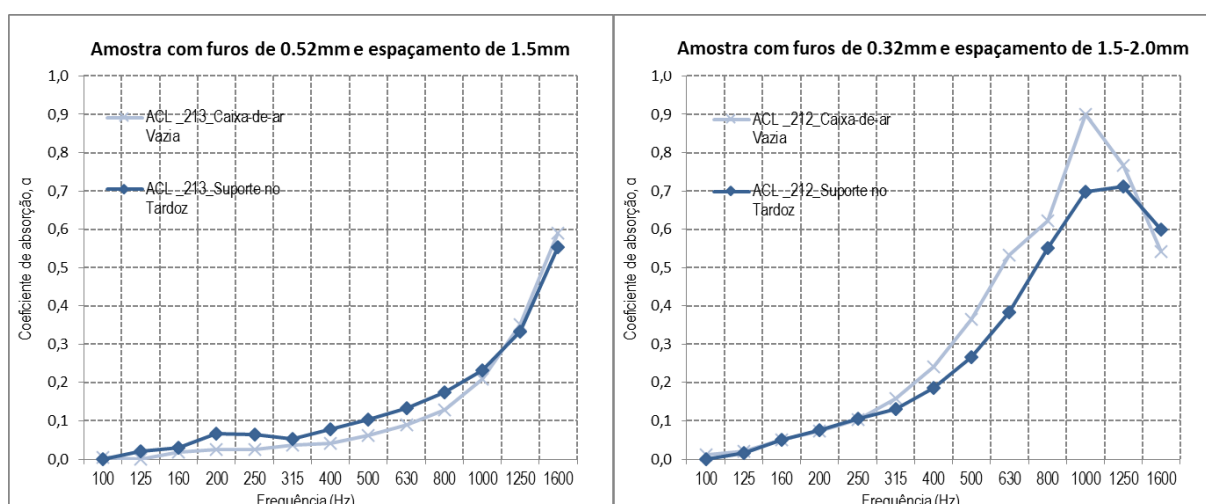


Figura 4.8- Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL213 A/14 e ACL212 A/14 (Caixa-de-ar vazia vs Suporte no Tardoz).

Em baixo apresentam-se as taxas de perfuração dos seguintes provetes:

ACL213 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\varepsilon=9.75\%$

ACL213 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\varepsilon=6.3\%$

ACL212 A/14\_Caixa-de-ar vazia com  $\varepsilon=2.53\%$

ACL212 A/14\_Suporte no Tardoz com  $\varepsilon=1.6\%$

Para as amostras apresentadas a cima, na Figura 4.8, a contribuição do painel de suporte macroperfurado instalado no tardez da amostra foi praticamente nula, não existindo qualquer tipo de melhoria nos resultados da curva de absorção sonora.

Para sintetizar, se for necessária a absorção sonora nas baixas/médias frequências é recomendável eleger um painel com baixa taxa de perfuração, se for necessário uma absorção nas altas frequências deverá utilizar-se um painel com uma taxa de perfuração mais elevada.

A incorporação do suporte de MDF macroperfurado é compensatório para os painéis de espessura de 0.75mm, visto que vai trazer maior rigidez e diminuir as vibrações quando solicitados à energia das ondas sonoras.

#### 4.2.2 Amostras com caixa-de-ar vazia vs caixa-de-ar incorporando lã-de-rocha cheia e macroperfurada

O presente ponto trata a análise da influência de introduzir lã-de-rocha na caixa-de-ar, entre o painel de MDF microperfurado e o suporte rígido (ex: parede).

Quando não se pretende a aplicação de painéis translúcidos, é possível aplicar qualquer tipo de material absorvedor pelo tardo do painel, aprimorando a absorção sonora do mesmo.

A análise paramétrica foi realizada tendo em conta 3 situações distintas: 1) Painel com caixa-de-ar vazia; 2) Painel com lã-de-rocha; 3) Painel com lã-de-rocha macroperfurada. Estas soluções foram já descritas no capítulo 3.3.2.

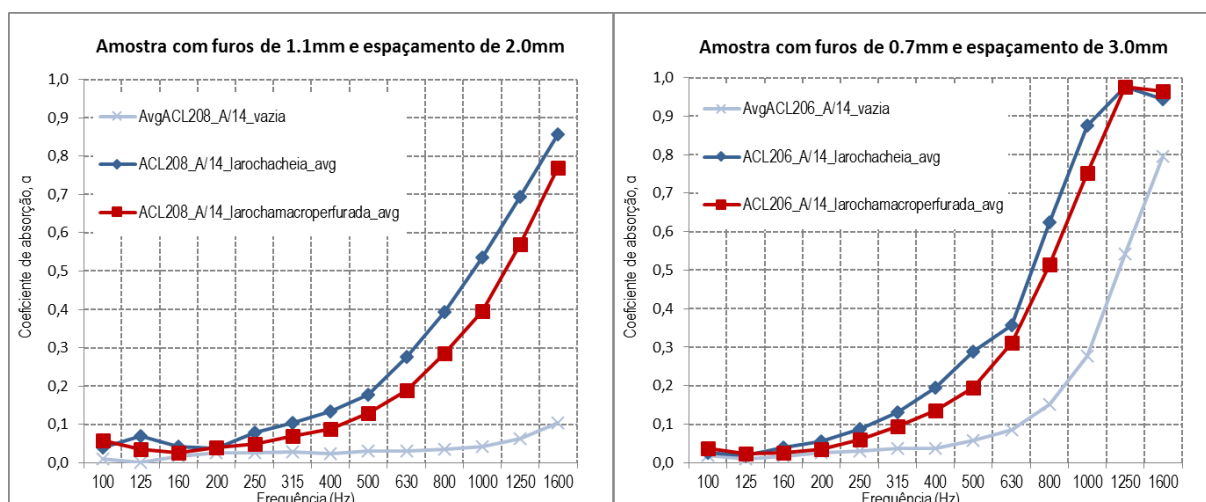


Figura 4.9- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada).

Ao incorporar a lã-de-rocha macroperfurada na investigação, estuda-se a hipótese de alcançar resultados aproximadamente equiparáveis aos da lã-de-rocha totalmente preenchida, com o intuito de adquirir um sistema complexo. Este sistema diz respeito à contribuição da lã-de-rocha como material absorvedor, bem como das cavidades da macroperfuração. Estas cavidades produzirão pequenas caixas-de-ar, no tardo do painel, resultando um sistema misto.

De seguida, apresentar-se-ão os resultados dos ensaios e, após análise cuidada, a conclusão da hipótese acima será discutida oportunamente.

As curvas de absorção sonora apresentadas na Figura 4.9 dizem respeito às amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14, que têm taxas de perfuração de  $\epsilon=20.69\%$  e  $\epsilon=3.76\%$ , respetivamente.

Para a amostra ACL208 A/14 nota-se que a introdução de lã-de-rocha na caixa-de-ar, em detrimento da mesma vazia, resultou num acréscimo considerável de absorção sonora para as baixas/médias frequências.

Dado o comportamento da curva, a ressonância dar-se-á fora da gama de frequências do tubo de impedância, 1600Hz. Observando a curva de absorção sonora, atinge-se o  $\alpha_{MAX}=0.86$  para a solução que integra lã-de-rocha cheia. A lã-de-rocha macroperfurada tem um comportamento semelhante, acompanhando a curva da anterior solução, apenas com uma pequena redução de absorção sonora na maioria das bandas de frequência.

Genericamente, a introdução de lã-de-rocha como material absorvedor obteve bons resultados, comparativamente à caixa-de-ar vazia.

Atendendo à curva de absorção sonora relativa à amostra ACL206 A/14, nota-se que a frequência de ressonância diminuiu, para as soluções com lã-de-rocha, isto é, o maior valor do coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) registou-se para frequências mais baixas.

O comportamento da solução com lã-de-rocha macroperfurada acompanhou a curva da solução com lã-de-rocha cheia, sempre com valores um pouco inferiores. Deu-se a viragem exatamente na frequência de ressonância, onde a curva aparenta a tendência de se superiorizar para as grandes frequências.

A comparação das duas situações (amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14) que possuem a mesma espessura (0.75mm), permite verificar que é bastante notória a melhoria da incorporação de lã-de-rocha para uma amostra com maior taxa de perfuração ( $\epsilon$ ), comparativamente à solução

de caixa-de-ar vazia. Até ao momento, é viável afirmar que a diferença de absorção para as duas soluções de lâ-de-rocha não é significativa.

Na Figura 4.10 apresentam-se as curvas de absorção sonora respeitantes às amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14, que apresentam  $\epsilon=0.98\%$  e  $\epsilon=1.47\%$ , respetivamente.

Para ambas as amostras nota-se uma melhoria na incorporação da lâ-de-rocha nas baixas frequências, enquanto nas médias frequências existe uma viragem das curvas, onde a solução da caixa-de-ar vazia beneficia a absorção sonora, comparativamente à inclusão de qualquer tipo de lâ-de-rocha.

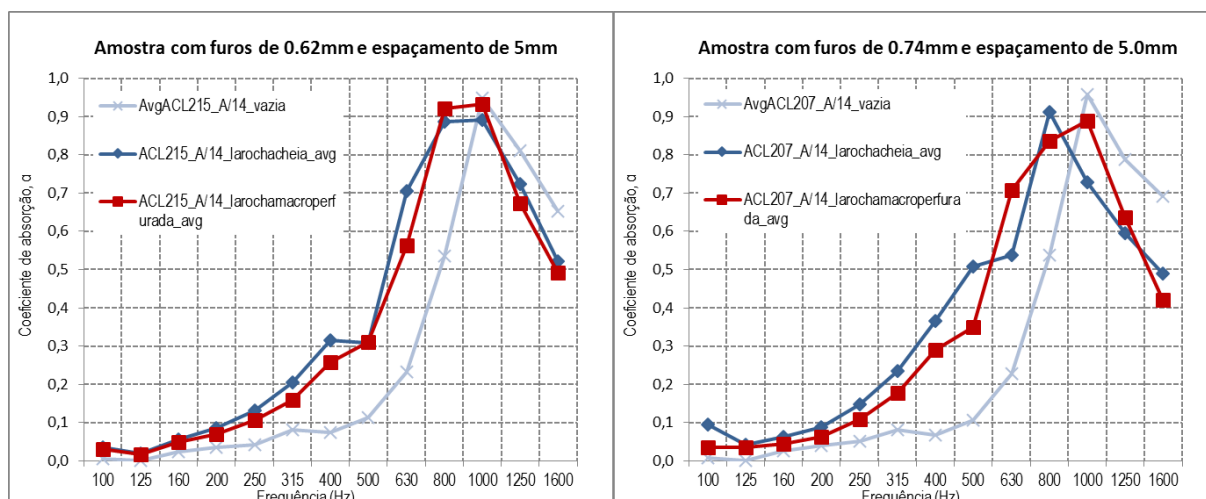


Figura 4.10-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada).

É perceptível nas duas amostras (ACL215 A/14 e ACL207 A/14) a semelhança de comportamento entre as configurações de lâ-de-rocha cheia e macroperfurada.

Deve mencionar-se que as espessuras dos painéis MDF das duas amostras é de 0.75mm.

Os factos apresentados sustentam o pressuposto de que, para taxas de perfuração baixas, não existe uma melhoria considerável por parte da lâ-de-rocha.

As curvas de absorção sonora apresentadas na Figura 4.11-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada). da seguinte página dizem respeito às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14 onde detêm  $\epsilon=2.56\%$  e  $\epsilon=7.50\%$ , respetivamente. Ambas as amostras possuem 0.75mm de espessura de painel.



Nota-se uma uniformidade de desenvolvimento entre as curvas referentes à solução de lã-de-rocha (cheia e macroperfurada) para as duas amostras, sendo que a utilização da mesma promove um aumento da absorção mais célere na gama de frequências estudada, chegando a valores superiores mais rapidamente, comparando com a solução da caixa-de-ar vazia.

Existindo apenas uma variável a alterar, a taxa de perfuração, é possível constatar que para valores de ( $\epsilon$ ) mais baixos, a frequência de ressonância dá-se antecipadamente, comparando com valores de ( $\epsilon$ ) mais altos. Tal verifica-se para as soluções que incorporam material absorvor na caixa-de-ar.

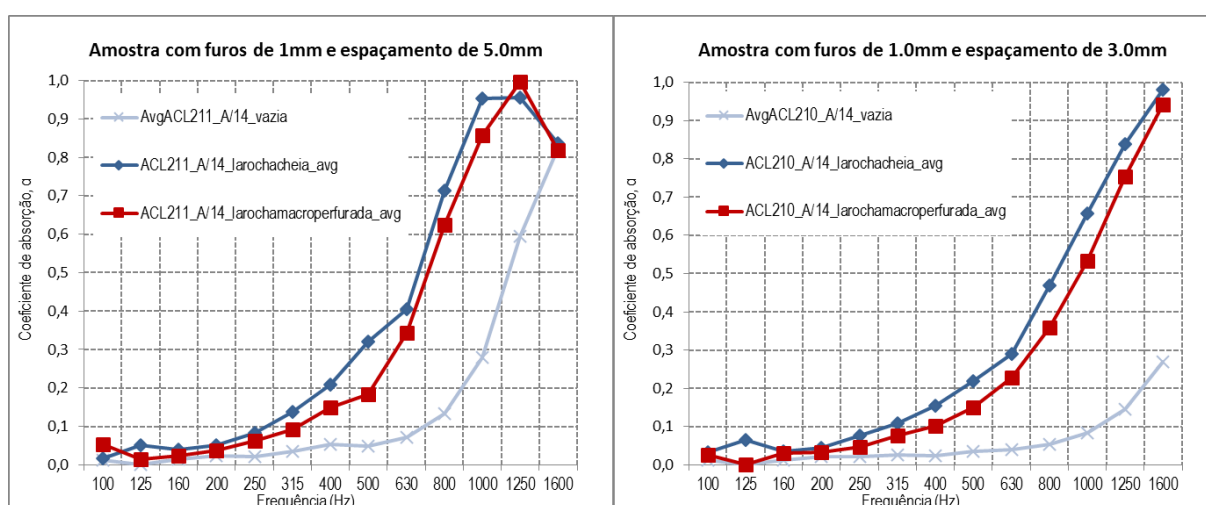


Figura 4.11-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14 respectivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada).

É de assinalar que, na amostra ACL211 A/14, para a frequência de 1600Hz, todas as soluções alcançaram um valor de absorção semelhante, não aprofundando essa tendência para frequências mais altas.

As curvas de absorção sonora apresentadas na Figura 4.12 dizem respeito às amostras ACL209 A/14 e ACL204 A/14 com taxas de perfuração de  $\epsilon=11.44\%$  e  $\epsilon=10.80\%$ , respectivamente. Ambas as amostras possuem 0.75mm de espessura.

O comportamento de ambas as amostras é bastante semelhante, para qualquer tipo de solução. Existe uma melhoria clara quando da incorporação dos materiais absorvores, sendo que um deles prevalece na qualidade da sua principal função, o sistema de lã-de-rocha cheio. Esta diferença entre os dois materiais absorvores é mais notória, quando o aumento da taxa de

perfuração. O mesmo facto verifica-se entre o sistema de caixa-de-ar vazia e as restantes soluções.

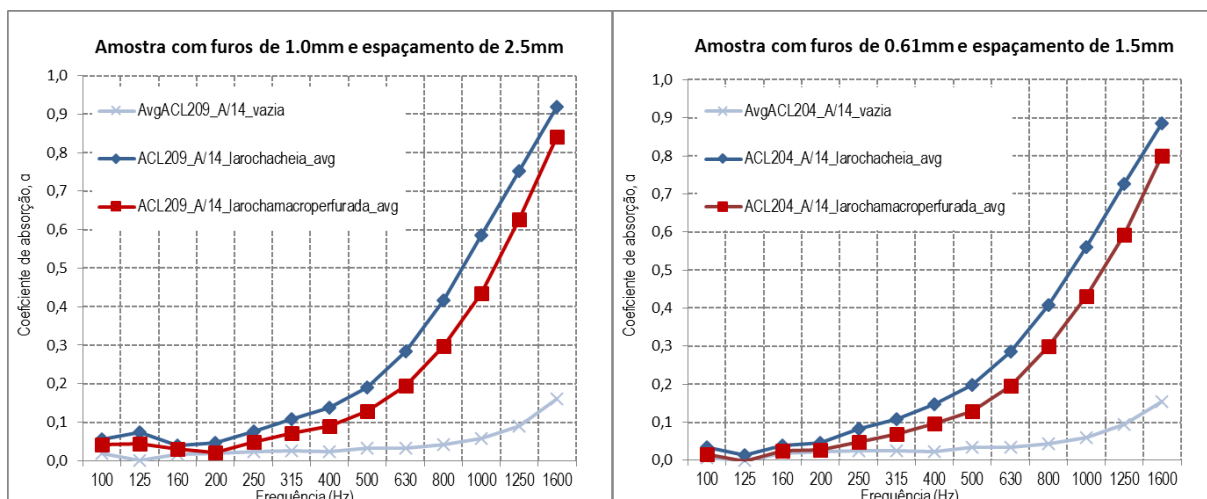


Figura 4.12-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL209 A/14 e ACL204 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada).

A seguir, na Figura 4.13 apresentam-se as curvas de absorção sonora respeitantes às amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14, que têm  $\varepsilon=3.69\%$  e  $\varepsilon=0.39\%$ , respetivamente, e 0.75mm de espessura de painel.

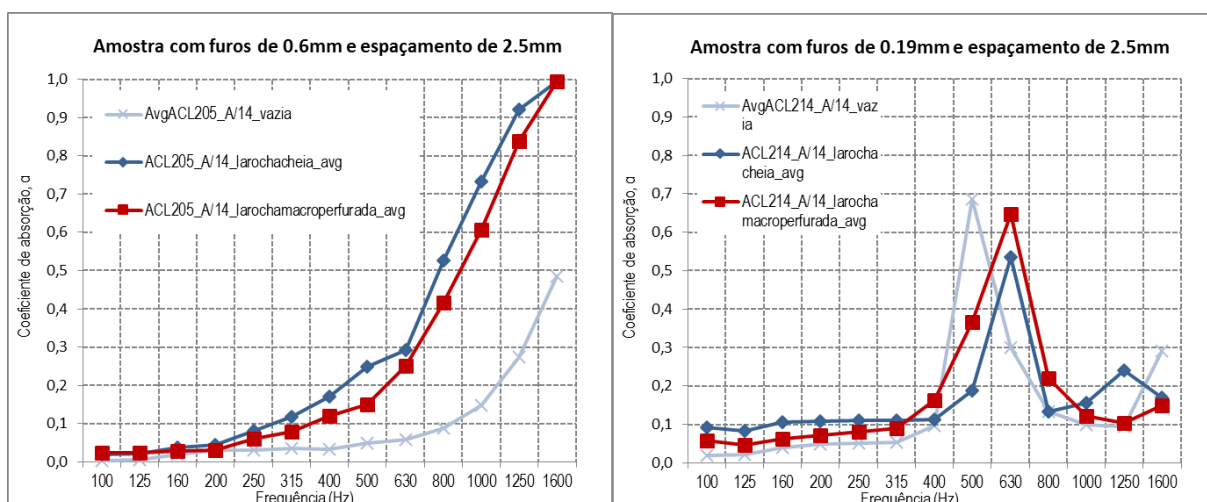


Figura 4.13-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada).

As curvas referentes à amostra ACL205 A/14 ilustram um comportamento semelhante ao dos provetes apresentados atrás. Aqui, nota-se uma melhoria para as médias frequências no caso da caixa-de-ar vazia, sendo que, como era de esperar, os resultados da lâ-de-rocha se superiorizam.

Quando houve uma redução bastante significativa de taxa de perfuração (aumento de espaçamento entre furos e diminuição expressiva do diâmetro da perfuração), verificou-se um comportamento bastante distinto. Tal situação está presente nos resultados da amostra ACL214 A/14.

Neste caso, apenas se observou um pico para frequências entre 500Hz e 630Hz, nas três soluções.

A presente amostra coincide com a que possui a menor taxa de perfuração entre as doze amostras. É também aquela que foi fabricada com o intuito de testar o mínimo diâmetro possível de fabrico. Contudo, não foi possível também obter o seu tempo de fabrico, sendo que se espera ser o mais moroso.

Assim, será de interesse acrescido uma proposta de trabalho futuro, que dê como complemento aos resultados obtidos, utilizando amostras ensaiadas em câmara reverberante, onde seja executável a análise de um espectro mais ampliado de frequências, em campo difuso. Assim, será possível contextualizar o comportamento da curva de absorção sonora dentro de todas as gamas de frequência, e não apenas nas baixas e médias.

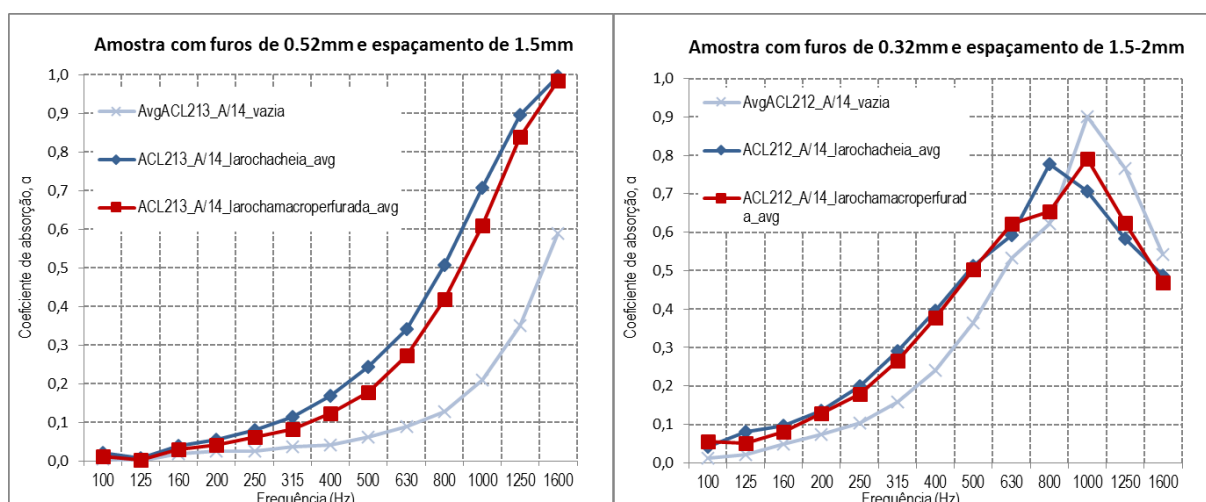


Figura 4.14-Curvas de absorção sonora referentes às amostras ACL213 A/14 e ACL212 A/14 respetivamente (Caixa-de-ar vazia; Lã-de-rocha cheia; Lã-de-rocha macroperfurada).

As curvas de absorção sonora apresentadas na Figura 4.14 têm em consideração as amostras ACL213 A/14 e ACL212 A/14, que possuem  $\varepsilon=9.74\%$  e  $\varepsilon=2.53\%$ , respetivamente. São a exceção quanto à espessura, no leque das doze amostras, tendo 3.05mm de espessura.

Para a amostra ACL213 A/14, com  $\varepsilon=9.74\%$ , o aumento de espessura do painel não influenciou consideravelmente os resultados. Existiu uma boa concordância de resultados, onde as curvas referentes aos sistemas absorvedores prevaleceram, onde, para as mesmas frequências, existe maior absorção sonora. Aponta-se que a solução de caixa-de-ar vazia tem comportamento semelhante às restantes soluções, sendo uma curva retardada, onde para se obter os mesmos valores de absorção sonora, é necessário subir na gama de frequências. Pode-se afirmar que a implementação de lã-de-rocha na caixa-de-ar melhorou significativamente os resultados do ensaio de absorção sonora.

A amostra ACL212 A/14 apresenta manchas de fabrico do tipo queimado devido ao processo de fabrico. Pelo facto da amostra ser de espessura acrescida e o diâmetro das furações ser reduzido, os orifícios apresentam-se demasiado alongados quando comparados com os orifícios das outras amostras. Esta circunstância ocorre devido à necessidade de maior intensidade do laser para a perfuração, não sendo feita exatamente na direcção perpendicular à amostra, mas com uma pequena inclinação em relação ao seu plano.

Em consequência desta lacuna, surgem diferentes valores de espaçamentos entre perfurações, como pode ser visto mais correntemente na seguinte figura:

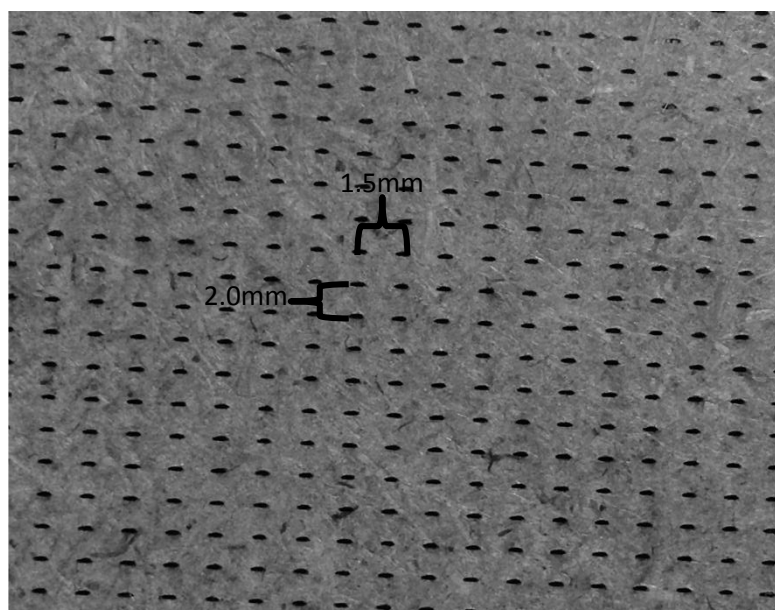


Figura 4.15-Pormenor da perfuração e espaçamento entre furos (ACL212 A/14)

O comportamento de resultados foi idêntico para as três configurações testadas. Analogamente ao que se verifica, acontece na amostra ACL214 A/14, provocando um comportamento fora do comum das curvas de absorção sonora, criando um pico em baixas frequências, em que o mesmo pico reflete valores de  $\alpha$  muito abaixo do esperado.

Pensa-se que uma possível causa apontada para o sucedido poderá ser a redução do diâmetro de furação, evidenciando os efeitos da camada limite viscosa nas perfurações e causar o comportamento constante das curvas de absorção sonora da amostra ACL212 A/14.

A inserção de lã-de-rocha no tardo do painel (caixa-de-ar) aumenta o valor de absorção sonora máxima bem como a largura da banda de frequências em que este ocorre.

Em grande maioria das amostras, é notório que existe uma melhoria na absorção sonora, que justifica a aplicação da lã-de-rocha cheia em prejuízo da lã-de-rocha macroperfurada.

É mais evidente a sua contribuição para provetes de amostras com maior taxa de perfuração.

## 5 COMPARAÇÃO COM MODELO TEÓRICO

### 5.1 Objetivos

Adicionalmente, pretende-se que os dados obtidos por via experimental sejam analisados e comparados com resultados de modelos teóricos disponíveis na literatura.

No âmbito desta etapa pretende-se obter um modelo calibrado para configuração e dimensionamento de soluções de painéis microperfurados, sem que seja necessário recorrer a métodos laboratoriais. No futuro, seria bastante favorável a utilização de tais métodos teóricos, diminuindo o tempo de análise.

### 5.2 Modelo Teórico (Numérico)

Na presente dissertação admitiu-se um modelo fundamentado nas contribuições de Maa (Patraquim, 2008), incorporando ainda as correções propostas por Morse e Ingard, (Morse e Ingard, 1986) e (Godinho et al, 2014). Este modelo foi programado em *Matlab*.

O modelo apresentado por Maa (Maa, 1998) assume a conversão da impedância acústica de um único furo ( $Z_{S_{tubo}}$ ) num valor médio ( $Z_{S_{painel}}$ ) que corresponde à área aberta do painel ou porosidade do painel ( $\varepsilon$ ), como se pode observar a seguir:

$$Z_{S_{painel}} = \frac{Z_{S_{tubo}}}{\varepsilon} \quad (10)$$

em que:  $\varepsilon = \frac{S_p}{S_h}$ , onde  $S_p$  corresponde à área do plano do painel e  $S_h$  à área da seção furada.

A impedância superficial do sistema ( $Z_{S_{sistema}}$ ) é dada pela soma do valor da impedância do painel ( $Z_{S_{painel}}$ ) com a impedância do interior da caixa-de-ar ( $Z_{S_{interior}}$ ):

$$Z_{S_{sistema}} = Z_{S_{painel}} + Z_{S_{interior}} \quad (11)$$

O presente modelo considera o painel microperfurado como sendo um conjunto de tubos curtos, com comprimento igual à espessura do painel ( $l_0$ ), onde a parte não perfurada é considerada um material muito denso e rígido, isto é, inteiramente refletor ( $R \approx 1$ ).

Assume-se ainda que o comprimento de onda do som, que se propaga, é suficientemente grande, quando comparado com a dimensão da secção transversal do tubo. Tal simplificação deve-se à investigação de Crandall, (Crandall, 1926), que considera que os tubos circulares são curtos quando comparados com o comprimento de onda ( $\lambda$ ):

$$l_0 < \lambda \quad (12)$$

Assim torna-se necessário definir a impedância específica do orifício de um tubo (Rayleigh, 1894), com base na análise da propagação do som num tubo:

$$Z_{\text{tubo}} = i\omega\rho_0 l_0 \left[ 1 - \frac{2 J_1(x\sqrt{-i})}{(x\sqrt{-i}) J_0(x\sqrt{-i})} \right]^{-1} \quad (13)$$

em que:  $x = r\sqrt{\frac{\omega\rho_0}{\eta}}$  é um parâmetro que indica a importância das forças de inércia relativamente às forças de origem viscosa e onde:

$\eta$  – viscosidade do ar  $\approx 1.84 \times 10^{-5}$  poiseuille;

$l_0$  – comprimento do tubo;

$\rho_0$  – densidade do ar =  $1.21 \text{ kg m}^{-3}$ ;

$\omega$  – frequência angular =  $2\pi f$ ;

$J_n$  – função de Bessel de ordem  $n$ .

Assumindo as simplificações propostas por Crandall, (Crandall, 1926) e (Patraquim, 2008) é possível obter as expressões simplificadas que são usualmente aplicadas à modelação de painéis perfurados.

O método contém os termos corretivos devidos à viscosidade do ar, (Ingard, 1985):

$$2\sqrt{2\omega\rho_0\eta} \quad (14)$$

à radiação acústica (Morse e Ingard, 1986):

$$\rho_0 c \pi^2 \left( \frac{2r}{\lambda} \right)^2 + i \omega \rho_0 \delta \quad (15)$$

e aos efeitos da reactância da caixa-de-ar.

Para que esteja completa a formulação, dever-se-ão tomar em conta os efeitos da interação entre furos. Segundo Melling (Melling, 1973), a correção a aplicar à componente reativa (parte imaginária) da impedância de dois orifícios separados é bastante maior do que se esta for aplicada apenas a um orifício, sendo a área igual à soma dos dois orifícios.

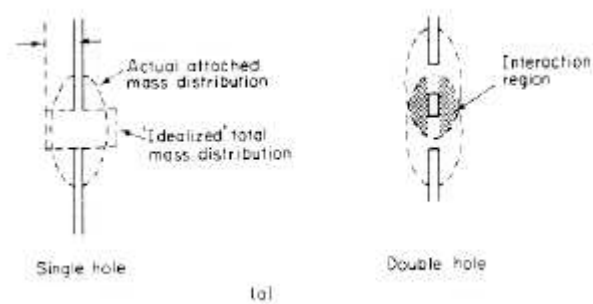


Figura 5.1-Partilha da massa de ar na região exterior dos furos, (Ptraquim, 2008).

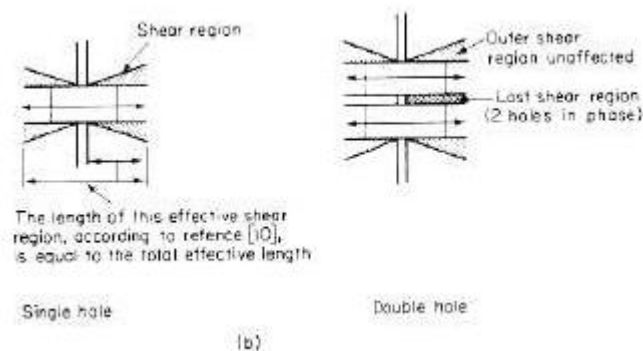


Figura 5.2-Redução zona de corte devido ao escoamento em fase, (Ptraquim, 2008).



Com a observação da Figura 5.1-Partilha da massa de ar na região exterior dos furos, (Patraquim, 2008).constata-se que dois furos situados nas proximidades um do outro partilham a mesma “massa de ar” na região exterior dos mesmos, originando a correção terminal reativa. De salientar que a massa de ar de cada furo, quando partilhada com outro na proximidade, é menor, comparada com a de um orifício único e isolado.

A Figura 5.2 mostra que dois furos próximos e submetidos a um escoamento em fase, a sua zona de corte é reduzida, diminuindo conseqüentemente os efeitos da viscosidade. Deste modo, as correções a introduzir nos termos resistivos da impedância, serão menos significativos.

Além de Ingard (Ingard, 1985), outros trabalhos foram desenvolvidos, como é exemplo o de Cremer e Muller (Cremer e Muller, 1978) e (Patraquim, 2008), desenvolvendo os seus termos corretivos devido à interação entre furos:

$$\delta = \delta^* \cdot \left( 1 - 1.47\sqrt{\varepsilon} + 0.47\sqrt{\varepsilon^3} \right) \quad (16)$$

onde:  $\delta^* = \frac{16r}{3\pi}$  é a correção clássica determinada por Rayleigh.

Neste momento é apropriado apresentar a fórmula final utilizada na modelação numérica (17), incluindo todos os pressupostos apresentados atrás. Esta diz respeito à impedância acústica de um único tubo:

$$Z_{s_{tubo}} = i\omega\rho_0 l_0 \left[ 1 - \frac{2 J_1(x\sqrt{-i})}{(x\sqrt{-i}) J_0(x\sqrt{-i})} \right]^{-1} + \left( 2\sqrt{2\omega\rho_0\eta} + \rho_0 c \pi^2 \left( \frac{2r}{\lambda} \right)^2 + i\omega\rho_0\delta \right) \quad (17)$$

Os sistemas acústicos considerados, definidos por um painel perfurado e por uma caixa-de-ar, são então estudados, utilizando o conceito de matriz transferência, método que permite determinar a impedância acústica normal (ou superficial) de uma interface de um material, recorrendo à continuidade da velocidade da partícula (em ambos os lados da interface) e conhecendo as propriedades acústicas do meio. Esta etapa é morosa e, visto não ser alvo desta dissertação, a dedução da formulação constituinte do modelo, preconiza-se que, para mais detalhes da modelação, deve consultar-se (Patraquim, 2008) e (Cox e D’Antonio, 2004).

Após esta etapa, é executado o cálculo da impedância total ( $Z_{Stotal}$ ), isto é, do painel e da cavidade de ar que o precede, onde:

$$Z_{STotal} = Z_{SPainel} - j \rho_0 c_0 \cot\left(\frac{\omega}{c_0} d\right) \quad (18)$$

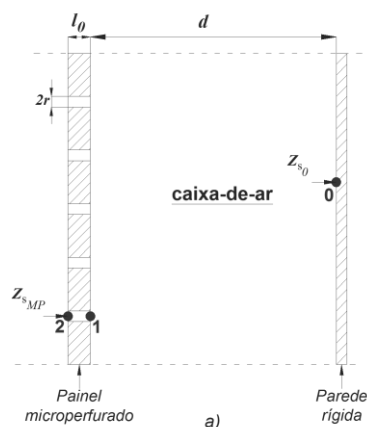


Figura 5.3-Sistema estudado.

O presente modelo apenas contempla um sistema de painel microperfurado de espessura ( $l_0$ ) e uma caixa-de-ar de profundidade ( $d$ ).

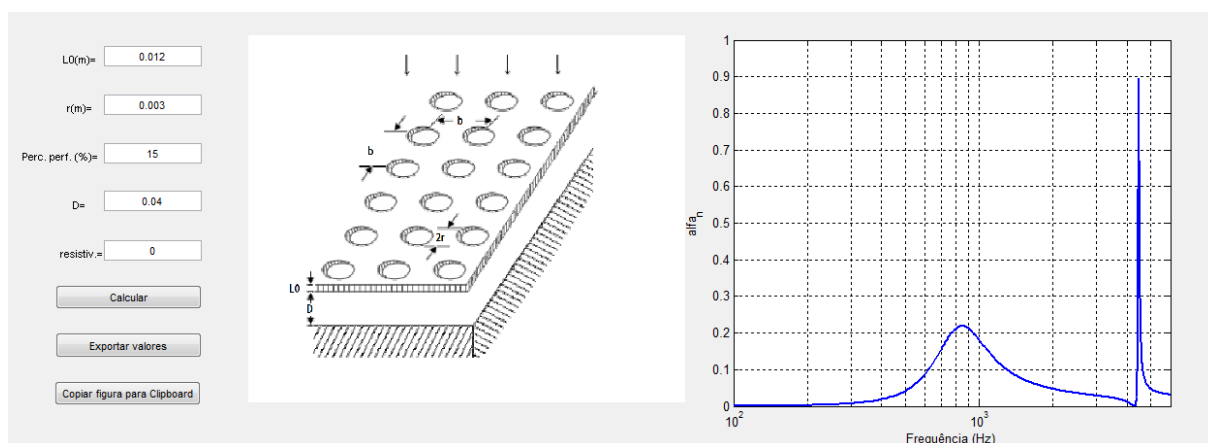


Figura 5.4-Apresentação gráfica do modelo de cálculo.

Admitindo que a superfície do material é plana e suficientemente grande (quando comparada com o comprimento de onda), a partir do conhecimento da impedância acústica, é possível determinar o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) para incidência normal, como apresentado na expressão (5). Tendo neste momento todos os dados necessários, fica a carecer apenas um termo, o coeficiente de reflexão  $R$ , não desprezando o facto que se trata de um número imaginário:

$$R = \frac{Z_s \cos \theta_i - Z_c}{Z_s \cos \theta_i + Z_c} \quad (19)$$

em que:

$Z_s$ = impedância acústica do sistema;

$\Theta_i$ = angulo de incidência da onda no painel;

$Z_c = \frac{p}{v} = c_{meio} \cdot \rho_{meio}$  é a impedância característica do meio onde:

$p$  - pressão da onda plana;

$v$  – velocidade da partícula;

$c_{meio}$  – velocidade do som no meio;

$\rho_{meio}$  – densidade do ar no meio.

### 5.3 Apresentação dos provetes analisados

Para que, fosse possível avaliar a hipótese de simular o comportamento dos painéis microperfurados, estudados no presente trabalho através do modelo teórico já descrito, tomou-se como base, um tipo de provete. A configuração do provete utilizado apresenta a caixa-de-ar vazia.

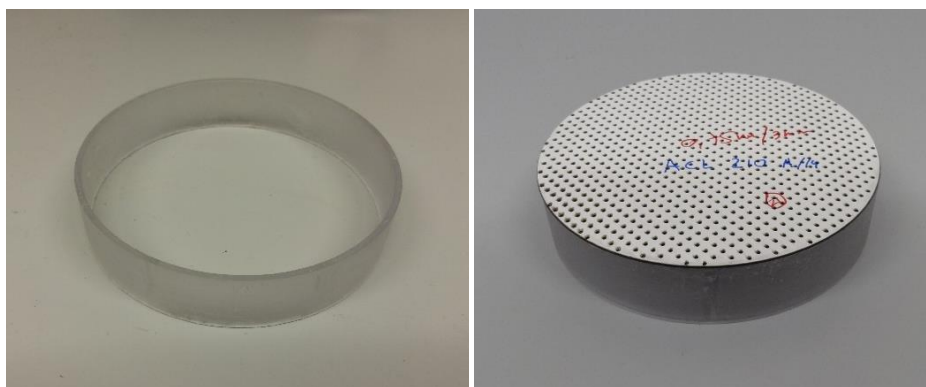


Figura 5.5-Exemplo da caixa-de-ar utilizada laboratorialmente para simular o modelo teórico.

Tabela 5- Resumo das características dos provetes

Casos	Parâmetros					
	Código Laboratorial	L0 (m)	r (m)	% perf	D (m)	Resistiv
1	ACL 208 A/14	0,00075	0,000552	20,695	0,02	0
2	ACL 206 A/14	0,00075	0,000355	3,765	0,02	0
3	ACL 215 A/14	0,00075	0,000310	0,982	0,02	0
4	ACL 207 A/14	0,00075	0,000372	1,471	0,02	0
5	ACL 211 A/14	0,00075	0,000489	2,565	0,02	0
6	ACL210 A/14	0,00075	0,000496	7,502	0,02	0
7	ACL209 A/14	0,00075	0,000506	11,444	0,02	0
8	ACL204 A/14	0,00075	0,000306	10,804	0,02	0
9	ACL205 A/14	0,00075	0,000302	3,697	0,02	0
10	ACL214 A/14	0,00075	0,000093	0,396	0,02	0
11	ACL213 A/14	0,00305	0,000259	9,748	0,02	0
12	ACL212 A/14	0,00305	0,000158	2,532	0,02	0

Com a Tabela 5 é possível observar as características dos provetes necessárias à introdução no software do modelo, como é possível observar na Figura 5.4, atrás apresentada.

#### 5.4 Resultados experimentais Vs resultados laboratoriais

A seguir são apresentados os gráficos correspondentes às curvas de absorção sonora laboratoriais e teóricas:

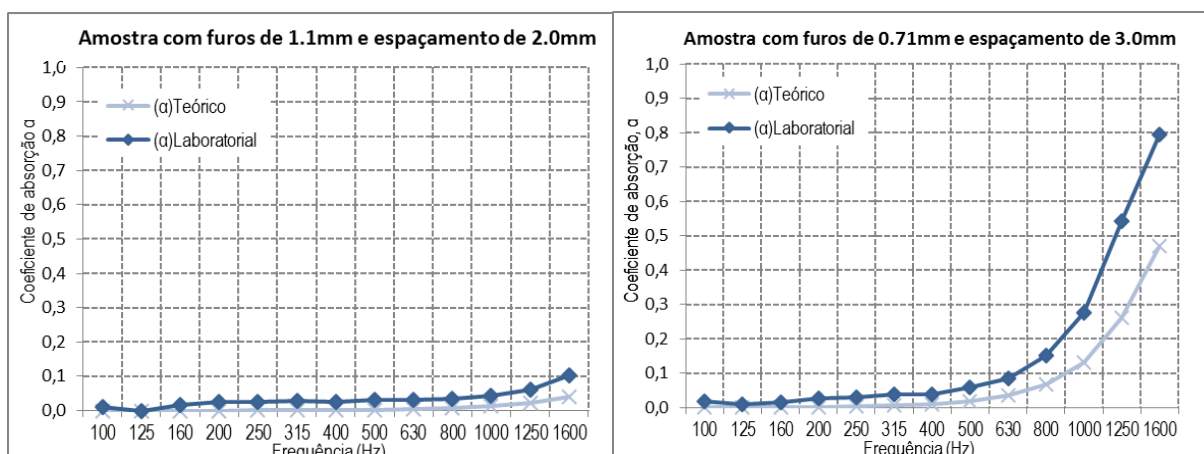


Figura 5.6- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14 respetivamente (Teórico Vs Laboratorial).

As curvas de absorção sonora apresentadas na Figura 5.6, dizem respeito às amostras ACL208 A/14 e ACL206 A/14, que contêm  $\epsilon=20.69\%$  e  $\epsilon=3.76\%$ , respectivamente, e 0.75mm de espessura.

Repara-se que, para a amostra ACL208 A/14, a concordância entre a curva de absorção sonora laboratorial e a curva de absorção sonora teórica, foi relativamente próxima. Tomando a amostra ACL206 A/14 aponta-se um comportamento quase idêntico para as baixas frequências, aumentando o desfaseamento, com o aumento dos valores de frequência.

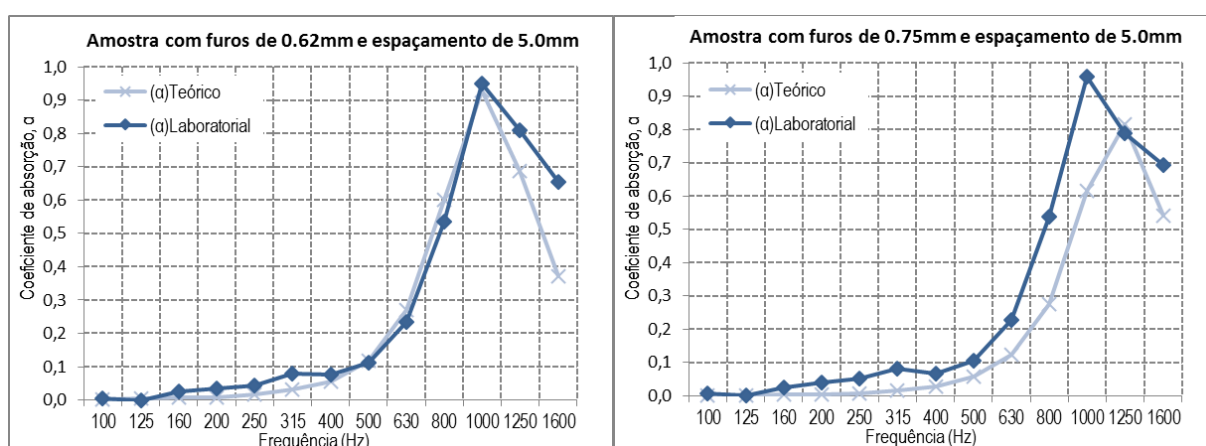


Figura 5.7- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14 respectivamente (Teórico Vs Laboratorial).

A Figura 5.7 apresenta as curvas de absorção sonora laboratorial e teórica, das amostras ACL215 A/14 e ACL207 A/14, onde cada uma possui taxas de perfuração de  $\epsilon=0.98\%$  e  $\epsilon=1.47\%$ , e 0.75mm de espessura.

A correspondência entre as duas curvas, referentes a cada amostra, é bastante aproximada, sendo que para a amostra ACL207 A/14 a curva de absorção laboratorial apresenta um pico mais elevado e para uma frequência de ressonância inferior, como se pode observar na imagem anterior. As diferenças não se apresentam muito significativas.

A Figura 5.8 apresenta os resultados teóricos e laboratoriais respeitantes à curva de absorção sonora das amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14, com taxas de perfuração de 2.56% e 7.50%, respectivamente, relembrando que ambas possuem 0.75mm na dimensão da espessura.

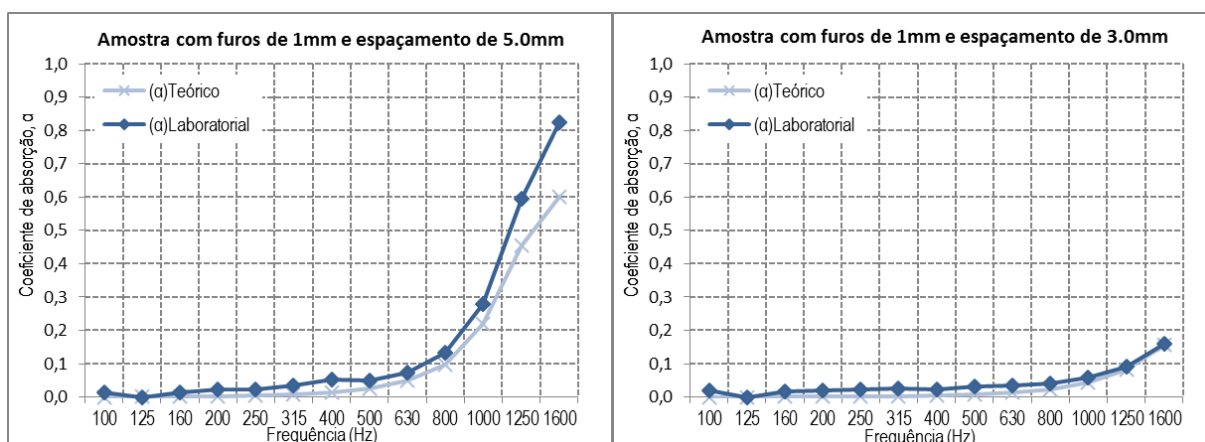


Figura 5.8-Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL211 A/14 e ACL210 A/14 respectivamente (Teórico Vs Laboratorial).

É de salientar a boa aproximação entre as curvas, sendo que a amostra ACL210 A/14 apresenta uma maior proximidade entre as duas curvas. Estas coincidem praticamente uma com a outra, mostrando a validade do método teórico. A amostra ACL211 A/14 apresenta uma pequena discrepância para as altas frequências, mas não significativa.

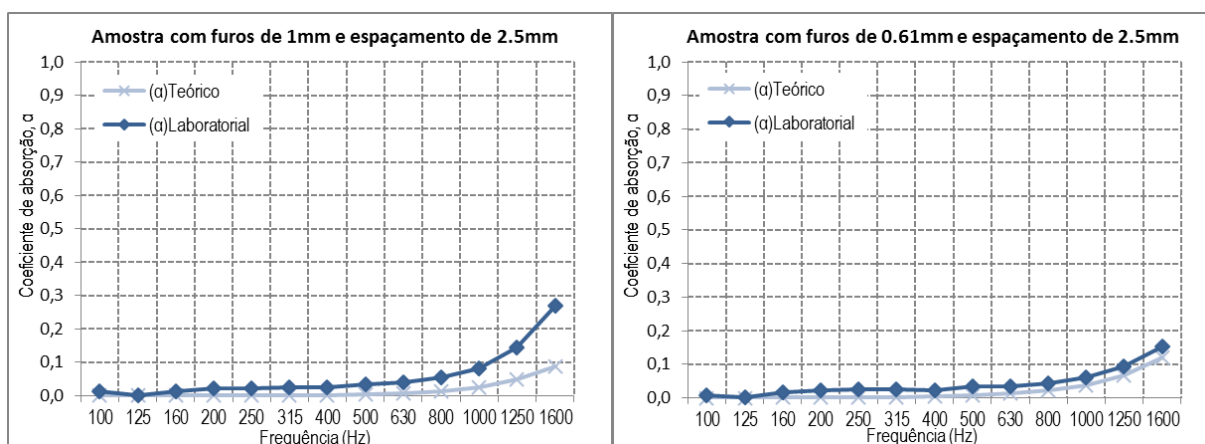


Figura 5.9-Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL209 A/14 e ACL204 A/14 respectivamente (Teórico Vs Laboratorial).

Com a Figura 5.9 a análise dos resultados indica que estamos perante amostras que exibem uma boa comparação entre métodos. Exatamente como na Figura 5.8, uma das amostras apresenta um comportamento bastante semelhante, para as duas curvas de absorção sonora, a amostra ACL204 A/14, com  $\varepsilon=10.80\%$ . A amostra ACL209 A/14 com  $\varepsilon=11.44\%$ , denota uma diferença na ordem dos 0.07 para o coeficiente de absorção sonora na frequência de 1600Hz.

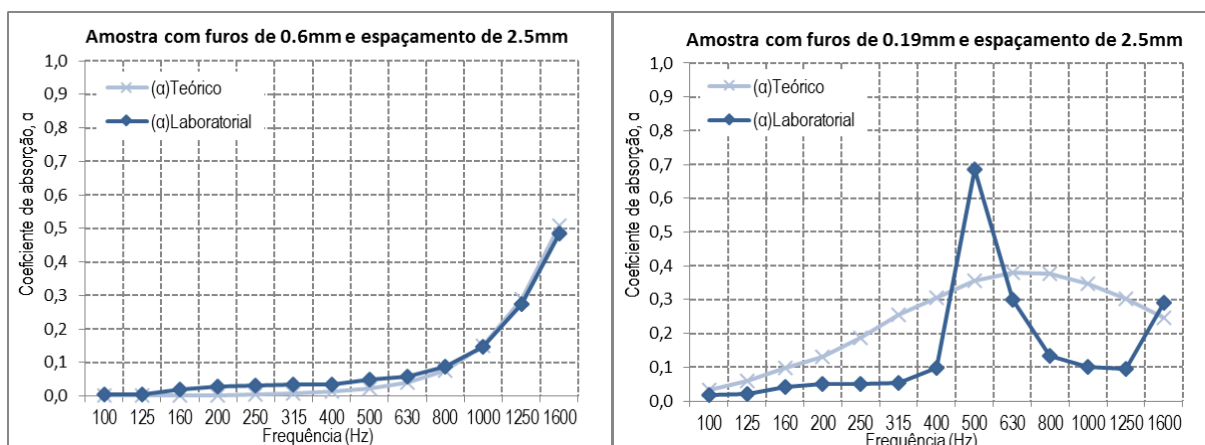


Figura 5.10- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14 respectivamente (Teórico Vs Laboratorial).

A Figura 5.10 mostra resultados das amostras ACL205 A/14 e ACL214 A/14, com taxas de perfuração de 3.69% e 0.39%, respectivamente, em que ambas possuem 0.75mm de espessura de painel.

Na amostra ACL205 A/14, podemos afirmar que, se comporta de igual forma para ambas as soluções de ensaio.

A amostra ACL214 A/14, que corresponde àquela que apresenta menor taxa de perfuração dentro do conjunto de amostras estudadas (doze amostras), é a única que exibe um comportamento fora do comum, não seguindo a tendência, sem apresentar correlação entre ambos os métodos.

Por fim faltam apresentar as amostras ACL213 A/14 e ACL212 A/14, que correspondem à exceção quanto à dimensão da espessura, possuindo 3.05mm. Quanto a taxas de perfuração, a amostra ACL213 A/14 possui  $\epsilon=9.74\%$ , e a amostra ACL212 A/14  $\epsilon=2.53\%$ .

Constata-se que, ambas as amostras apresentam coerência entre resultados teóricos e laboratoriais.

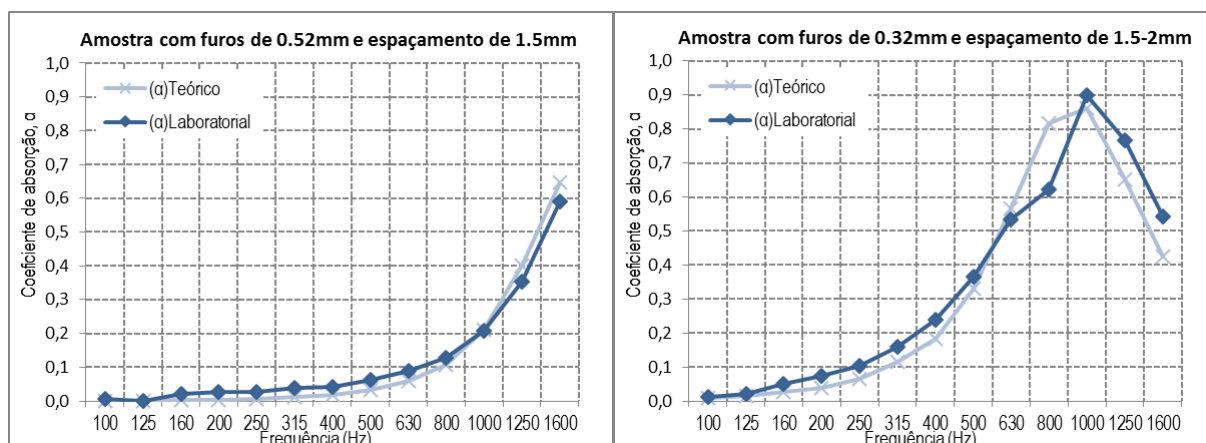


Figura 5.11- Curvas de absorção sonora referente às amostras ACL213 A/14 e ACL212 A/14 respetivamente (Teórico Vs Laboratorial).

## 5.5 Análise de resultados

Os gráficos anteriores relacionam e comparam as curvas de absorção sonora de painéis microperfurados para os ensaios laboratoriais com os resultados de um modelo teórico, para a configuração de painel com a caixa-de-ar vazia.

Da observação das figuras apresentadas no ponto 5.4, é possível constatar que, existe uma boa conformidade entre os resultados experimentais e os resultados teóricos. Existe no entanto uma exceção, quanto à amostra ACL214 A/14. Julga-se que este problema se deve às dimensões dos furos serem demasiado reduzidas, não estando o software implementado para o efeito, sendo necessário um diferente tipo de formulação e termos corretivos apresentados em (Cox e D'Antonio, 2004).

Podemos admitir que estamos perante um modelo coerente e credível.

Como referido anteriormente, o software (modelo teórico), está programado para a simulação de comportamentos das curvas de absorção sonora, para materiais perfurados e microperfurados.

Caso seja necessário modelar o comportamento de painéis, cujas perfurações sejam demasiado reduzidas, como é o caso da amostra ACL214 A/14, é necessária a aplicação de uma diferente formulação, vindo em (Cox e D'Antonio, 2004) que, apresenta formulação convergente com as características impostas.



## 6 CONCLUSÕES

No geral, as soluções e sistemas com painéis microperfurados analisados apresentam o comportamento esperado, possuindo uma boa absorção sonora nas baixas/médias frequências.

É possível que, com a rápida evolução da tecnologia, os tempos de produção sejam reduzidos.

No subcapítulo 2.5, referiu-se a possibilidade da utilização dos painéis microperfurados translúcidos, criando ambientes modernos, harmoniosos e de agradável aparência. Assim sendo, tendo em conta esta solução, os painéis microperfurados simples (sem qualquer tipo de material aglutinado) fornecem uma excelente função absorvora.

Pelo contrário, se o pretendido, for utilizar soluções de revestimento acústico opaco, a utilização de lã-de-rocha no interior da caixa-de-ar, irá melhorar consideravelmente a absorção sonora do sistema, nomeadamente em painéis com maiores taxas de perfuração. Pelos resultados apresentados, a lã-de-rocha totalmente preenchida, possui uma pequena melhoria nos resultados da absorção, comparando com a solução de lã-de-rocha macroperfurada. O uso desta última situação permite, obter uma solução mista, onde existe um sistema com material absorvora e caixa-de-ar no tardo do painel (macroperfuração).

De modo a obter uma estrutura estável, robusta e de fácil aplicabilidade, tornou-se fundamental testar uma solução que agregasse o painel microperfurado com um suporte que lhe conferisse maior rigidez. Esta necessidade surgiu, devido à dimensão reduzida da espessura do painel microperfurado, assegurando assim as propriedades mecânicas e de praticabilidade.

Da análise dos resultados das curvas de absorção sonora, podemos afirmar que a incorporação do suporte de MDF macroperfurado é vantajoso, para os painéis com espessura de 0.75mm, visto que irá oferecer uma maior rigidez e diminuir as vibrações, quando sujeitos à incidência de ondas sonoras.

Notou-se que para as baixas/médias frequências, não existe uma significativa oscilação de resultados, podendo concluir-se que a inserção do suporte no tardo do painel, não altera na generalidade, as suas propriedades absorvoras. Este facto, inicialmente, foi tido em causa, visto

que existe uma redução de taxa de perfuração do painel microperfurado, como está explícito no ponto 4.2.1.

Por fim, com a comparação do método experimental com o modelo teórico, deduziu-se que existe uma boa conformidade entre os resultados experimentais e os resultados teóricos. Podemos admitir que estamos perante um modelo coerente e credível para aplicação prática.

Em suma, verifica-se que, para uma taxa de perfuração mais reduzida, os provetes com furos menores têm maior absorção sonora. Porém, é de salientar que são mais onerosos de produzir.

De modo, a poder-se alargar o estudo, com o intuito de analisar o comportamento dos materiais para as altas frequências em campo difuso, será necessário recorrer ao método da câmara reverberante. Tal estudo, ainda não ocorreu, devido a questões de custos de produção, visto que as amostras terão que ter  $10\text{m}^2$  de área, o que seria muito oneroso produzir, sem primeiro testar o seu comportamento para amostras de dimensão reduzida.

É viável a realização de uma investigação onde se analise cuidadosamente a relação custo-benefício da solução apresentada.

Um painel não é melhor que o outro, têm comportamentos diferentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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”.

Carneiro E. Brandão (2008). “Aplicação de absorvedores tipo membrana em cavidades e filtros acústicos”. Universidade federal de santa catarina, programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Brasil, Florianópolis.

Carvalho, A. P. Oliveira de. (2009). “Texto de Apoio à Disciplina de Acústica Ambiental e de Edifícios”. FEUP, Porto.

Cox, J. Trevor; D'Antonio, Peter. (2004). “Acoustic absorbers and diffusors: Theory and design”. Spon Press.

Crandall, I.B. (1926). “Theory of vibrating systems and sound”, Van Nostrand, New York.

Cremer, L., Muller, H. (1978). “Principles and applications of room acoustics: wave theoretical room acoustics”, Applied Science Publishers.

Domingues, O. (2005). “A Acústica nos edifícios materiais e sistemas absorventes sonoros coeficiente de absorção sonora”. LNEC, Lisboa.

Ferreira, R. A. Pinto. (2010). “Comportamento acústico de componentes da construção á base de aglomerado de fibras de madeira e cimento”. FEUP, Porto.

Godinho, Luís; A. Mendes. Paulo; Patraquim. Ricardo; Neves. Ana. (2014). “Desempenho acústico de painéis microperfurados em MDF – um estudo experimental”. 45º Congresso espanhol de acústica, Múrcia.

Godinho. Luís; A. Mendes. Paulo; Patraquim. Ricardo; Jordão. A. Catarina. (2011). “Avaliação do comportamento acústico de painéis ressonantes incorporando telas acústicas”. 42º Congresso espanhol de acústica, Cáceres.

Helmut V. Fuchs, Xueqin Zha, “Micro-Perforated Structures as Sound Absorbers – A Review and Outlook”. Stuttgart, Germany, 2006

Henrique, Luís L. (2002). “Acústica musical”. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Herrin, David; Liu Jinghao (2011). “Kentucky Properties and Applications of Microperforated Panels”. University of Kentucky, Lexington.

Ingard, K.U. e Dear, T.A. (1985). “Measurement of acoustic flow resistance”, Journal of Sound and Vibration, 103, 567-572.

Jayaraman, K. A. (2005). “Acoustical Absorptive Properties of Nonwovens”.

Jordão, A. C. Vieira. (2011). “Análise experimental paramétrica do desempenho de painéis perfurados”. FCTUC, UC, Coimbra.

Lee, Y.Y.; Sun, H.Y.; Guo, X. (2005) “Effects of the panel and helmholtz resonances on a micro-perforated absorber”. JASA.

Lord Rayleigh. (1894). “Theory of sound”, McMillan, London.

Maa, D.Y. (1975). “Theory and design of microperforated panel sound absorbing constructions”. Sci Sin XVIII, 55-71.

Maa, D.Y. (1998). “Potencial of microperforated panel absorber”. J.A.S.A., 104, 2861-2866.

Melling, T.H. (1973). “The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels”, Journal of Sound and Vibration.

Morse, P.M.; Ingard, K.U. (1986). “Theoretical acoustics”, 1<sup>st</sup> Princeton University Press edition.

Norma Internacional - ISO 9053 - “Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance”.

Patraquim, Ricardo (2008). “Painéis acústicos perfurados em madeira: estudo e avaliação experimental de soluções”. Tese para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Patrício, J. (2008). “Acústica nos Edifícios”. Verlag Dashofer, Lisboa.

Ribeiro, F. (2015). “Segmentação de orifícios em amostras de painéis microperfurados com recurso a técnicas de processamento de imagem.” Técnicas Experimentais do Curso de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.

Shen, Yong; Wang, Han. (2007). “Quick Design for the Micro-perforated Sound Absorber”. 19th international congress on acoustics, Madrid.

Tadeu, António; Mateus, Diogo; António, Julieta; Godinho, Luís; A. Mendes, Paulo. (2010). Sebenta Acústica Aplicada, Área especialização Construções, FCTUC, UC, Coimbra.

Teodoro, E. Bitencourt, 15º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. “Métodos para medição do coeficiente de absorção sonora”, 2003.

Y.J. Qian; D.Y. Kong; J.T. Fei (2014). “A note on the fabrication methods of flexible ultra-micro-perforated Panels”. IOT Engineering College, HoHai University, Changzhou 213022, China; State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China