



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

# Estudo da absorção acústica de soluções para tetos

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

Autor

**Rui Miguel Soares Marques**

Orientador

**Professor Doutor António José Barreto Tadeu**

**Professora Doutora Julieta Maria Pires António**

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, 2013**

Colaboração Institucional

---



**ITeCons**

Instituto de Investigação e Desenvolvimento  
Tecnológico em Ciências da Construção

## AGRADECIMENTOS

Quero nesta breve página agradecer a todos aqueles que de uma forma direta ou indireta fizeram parte da concretização deste caminho, deste percurso no alcançar de um sonho e objetivo de vida.

Em particular não posso deixar de mencionar os meus orientadores, Professor Doutor António José Barreto Tadeu e Professora Doutora Julieta Maria Pires António pela sua particular atenção, orientação e partilha de conhecimentos em todo o decorrer desta dissertação. Toda a rapidez, vontade, disponibilidade e amabilidade de me atenderem e acompanharem foi uma mais-valia que não esquecerei. Deixo um especial agradecimento à Engenheira Ana Isabel, ao Engenheiro Igor Castro e ao Engenheiro José Nascimento por toda a ajuda que me deram nos ensaios experimentais durante a elaboração desta dissertação. Foram excecionais.

Não posso deixar de referir todos os meus colegas e amigos que conheci e com os quais vivi este curso. Em particular o Jorge Daniel Rodrigues da Silva por me ter lembrado o quão divertido e interessante pode ser estudar engenharia civil.

Não me podia esquecer de todas as pessoas que viveram comigo a Quantunna, onde todos aprendemos que na vida tudo pode ser bom, quando levado da forma certa. Em especial a Catarina Rebelo, a Maria Coelho, o Mário Correia, o Ricardo Zuna, o João Carreira e a Tânia Costa.

Sem a minha família não seria possível ter alcançado este sonho. Não me posso esquecer de agradecer ao meu tio Francisco pela sua incondicional ajuda e pelo seu sorriso mesmo quando nem tudo está bem. Ao meu pai... Sem tudo o que me ensinou na vida, nenhum curso me seria possível... Por fim, à minha mãe... A verdadeira mulher de armas... A ela agradeço tudo o que me deu (dá) e pelo fato de nunca termos caído em todos os tropeções...

*“... não há quem conte a história de ter voltado ileso desse ermo tão Dantesco e cruel... E a viagem hercúlea da nau Catrineta, naufraga sobre os rasgos da pele...”*

Anaquim

## RESUMO

Ao longo dos anos têm sido crescentes as exigências de conforto nos edifícios a vários níveis. O conforto acústico não é exceção.

Na grande maioria dos espaços fechados ocupados por pessoas a comunicação é imprescindível. É importante que nesses espaços se verifique uma adequada inteligibilidade da palavra. A inteligibilidade da palavra está relacionada com o tempo de reverberação do espaço. Dependendo da tipologia de uso de um determinado espaço, existem tempos de reverberação mais adequados para a garantia do conforto. Assim sendo, segundo a tipologia de uso, a absorção tem que ser trabalhada de modo a obter-se o tempo de reverberação adequado ao uso, geralmente diminuindo o tempo de reverberação do espaço.

A obtenção do tempo de reverberação pretendido requer, muitas vezes, a aplicação de certos materiais com características de absorção sonora. Por certas restrições de aplicação (estéticas e/ou de limpeza, por exemplo) muitas vezes é difícil trabalhar a absorção a nível das paredes e pavimento. Como tal resta trabalhá-la ao nível do teto.

A tipologia de teto usada depende do espaço em questão. Como tal, é vulgar encontrarem-se vários tipos de soluções para tetos, como tetos falsos e tetos abertos.

Esta dissertação consiste na caracterização da absorção sonora de soluções de painéis de espuma absorvente suspensos e lamelas de aço com espuma absorvente para tetos utilizando ensaios de câmara reverberante segundo a norma NP EN ISO 354:2007. Nos ensaios com painéis absorventes variaram-se parâmetros como o número de alinhamentos de painel. Nos ensaios com lamelas variaram-se parâmetros como a altura da caixa-de-ar, o espaçamento entre filas de elementos e a altura do elemento.

Com base nos resultados experimentais pode concluir-se que os elementos estudados apresentam boas propriedades quanto à absorção sonora. Combinando os vários parâmetros analisados pode obter-se uma solução que satisfaz simultaneamente vários requisitos, como estéticos e qualidade de absorção.

## **ABSTRACT**

Over the years the demands over comfort in buildings have increased. The acoustic comfort is no exception.

In most enclosed spaces occupied by people communication is essential. It is important that an adequate speech intelligibility is found on those spaces. The speech intelligibility is related to the reverberation time of the room. Depending on the type of use of a certain space, there are reverberation times more suited to guarantee comfort. According to the type of use, the absorption has to be worked so as to obtain the reverberation time suitable to that use, generally reducing the reverberation time of the space.

Obtaining the desired reverberation time often requires the application of certain materials with sound absorption properties. For certain application restrictions (aesthetic and / or cleaning, for example) is often difficult to work absorption at the walls and floor. As such, its work remains to the ceiling level.

The type of ceiling used depends on the space in question. As such, it is common to find several kinds of solutions for ceilings, such as false ceilings and open ceilings.

This dissertation consists on the characterization of the sound absorption of suspended absorbent foam panels solutions and steel plates with absorbent foam for ceilings using tests in the reverberation chamber according to the NP EN ISO 354:2007 standard. In tests with absorbent panels parameters are varied such as the number of rows for panels. In tests with plates parameters are varied such as the height of the air-box, the spacing between elements rows and the height of the element.

Based on the experimental results it can be concluded that the studied elements provide good sound absorption properties. By combining the various analyzed parameters a solution that simultaneously satisfies several conditions: esthetic and financial absorbing quality can be obtained.

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Índice .....	iv
Índice de figuras .....	vi
Índice de quadros.....	ix
Índice de expressões matemáticas .....	x
Índice de gráficos.....	xi
Simbologia.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do tema .....	1
1.2 Objetivo .....	3
1.3 Estrutura da Dissertação .....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Nota introdutória.....	5
2.2 Conceitos teóricos.....	5
2.2.1 O som e a sua propagação .....	5
2.2.2 Absorção Sonora .....	6
2.2.3 Impedância acústica.....	7
2.2.4 Tempo de Reverberação .....	8
2.2.5 Campo reverberado e campo direto.....	10
2.2.6 Materiais e sistemas para absorção sonora .....	11
2.3 Legislação e normas aplicáveis.....	15
2.3.1 Legislação Portuguesa correntemente em vigor.....	15
2.3.2 Normalização aplicada .....	15
2.4 O “Estado da Arte” .....	16
2.4.1 O estado da técnica quanto ao equipamento.....	16
2.4.2 O estado da técnica em termos experimentais.....	17
3 DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	22
3.1 As instalações experimentais .....	22
3.2 Câmaras horizontais.....	22
3.3 Metodologias experimentais utilizadas.....	25
3.4 Sistema de aquisição de dados.....	25

3.5	Amostras ensaiadas .....	27
3.6	Descrição da montagem dos provetes e dos ensaios.....	29
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	38
4.1	Processo geral de cálculo da absorção sonora .....	38
4.2	Metodologia de cálculo para as soluções de painéis absorventes.....	40
4.3	Metodologia de cálculo para as soluções de lamelas.....	42
4.4	Verificação das áreas de absorção sonora equivalente máximas.....	47
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	48
5.1	Comparação de resultados dos provetes de painéis absorventes .....	48
5.2	Comparação de resultados dos provetes de lamelas com espuma .....	53
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	59
6.1	Conclusões .....	59
6.2	Perspetivas de trabalhos futuros.....	61
	Bibliografia.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Movimentos harmónicos e a sua soma ( de C. Oliveira 2008) .....	5
Figura 2.2 - Efeito do contato de ondas sonoras com um elemento (Tecniwood 2010) .....	6
Figura 2.3 - Tempo de reverberação (Tadeu et al. 2010) .....	9
Figura 2.4 - Tempo de reverberação aparente (Tadeu et al. 2010).....	9
Figura 2.5 – Exemplos de materiais (Sotecnisol 2013), (Arquitetura 2013), (Alibaba.com 2013).....	12
Figura 2.6 – Associação de ressoadores (Tadeu et al. 2010).....	12
Figura 2.7 – Funcionamento de um ressoador adaptado de (Tadeu et al. 2010) .....	13
Figura 2.8 – Esquema de uma membrana (Tadeu et al. 2010) .....	14
Figura 2.9 – Câmaras horizontais do ITeCons (Tadeu et al. 2008).....	16
Figura 2.10 - Tubo de impedância .....	17
Figura 3.1 - Câmaras horizontais em corte (Tadeu et al. 2008) .....	24
Figura 3.2 - Sistema de movimentação da câmara horizontal (Tadeu et al. 2008) .....	24
Figura 3.3 - Painel de controlo da câmara horizontal móvel .....	23
Figura 3.4 – Amplificador (em baixo) e equalizador (em cima) .....	26
Figura 3.6 - Fonte sonora omnidirecional .....	26
Figura 3.5 - Gerador/transdutor de sinais .....	26

Figura 3.9 - Microfone de captação .....	27
Figura 3.10 - Estação giratória .....	27
Figura 3.12 - Comando de rotação da estação giratória .....	27
Figura 3.7 - Sala de controlo no decorrer de um ensaio .....	26
Figura 3.8 - Calibrador .....	26
Figura 3.13 - Painel de espuma absorvente perfurado .....	28
Figura 3.14 - Elemento lamela de aço com espuma absorvente .....	28
Figura 3.15 - Moldura .....	29
Figura 3.16 - Moldura para ensaio dos painéis com uma área de 15 m <sup>2</sup> para ensaios com 2 alinhamentos (Figura da esquerda) e 3 alinhamentos de painel (Figura da direita)	30
Figura 3.17 - Planta da montagem tipo “J” envolvida por uma barreira não absorvente segundo a norma (adaptado) (IPQ 2007) .....	30
Figura 3.18 - Montagem com 2 alinhamentos de painel .....	31
Figura 3.19 - Montagem com 3 alinhamentos de painel .....	31
Figura 3.20 – Painel A 40 mm .....	32
Figura 3.21 – Painel A 60 mm .....	32
Figura 3.22 – Painel B – 40 mm .....	32
Figura 3.23 - Lamelas L150 perfuradas. a) vista da face metálica. b) vista da face absorvente	33
Figura 3.24 - Lamelas L150 lisas. a) vista da face metálica. b) vista da face absorvente ....	33



Figura 3.25 - Lamelas L100 lisas. a) vista da face metálica. b) vista da face absorvente .... 33

Figura 3.26 - Lamelas L100 perfuradas. a) vista da face metálica. b) vista da face absorvente  
34

Figura 3.27 - Moldura para ensaio das lamelas ..... 34

Figura 3.28 - Montagem para ensaio de lamelas ..... 35

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Algumas velocidades referência de propagação do som em diferentes meios... 2	
Quadro 3.1 - Lista de provetes ensaiados .....	36
Quadro 3.1 - Lista de provetes ensaiados (Continuação) .....	36
Quadro 4.1 - Bandas de terços de oitava segundo a norma (IPQ 2007) .....	38
Quadro 4.2 - Resultados dos ensaios com provetes de painéis de espuma absorvente .....	41
Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios com lamelas de aço de 100 mm de altura com espuma absorvente .....	43
Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios com lamelas de aço de 100 mm de altura com espuma absorvente (Continuação) .....	44
Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios com lamelas de aço de 150 mm de altura com espuma absorvente .....	45
Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios com lamelas de aço de 150 mm de altura com espuma absorvente (Continuação) .....	46
Quadro 4.5 - Áreas de absorção sonora máximas para câmara vazia por frequência .....	47

## ÍNDICE DE EXPRESSÕES MATEMÁTICAS

Expressão [1] - Cálculo da energia absorvida .....	7
Expressão [2] - Cálculo do coeficiente de absorção sonora .....	7
Expressão [3] - Cálculo da impedância acústica .....	7
Expressão [4] - Fórmula de Sabine .....	10
Expressão [5] - Cálculo da área equivalente de Sabine .....	10
Expressão [8] - Cálculo da frequência de um ressoador .....	13
Expressão [9] - Cálculo da frequência de máxima absorção das membranas .....	14
Expressão [6] - Nível de pressão sonora perceptível num ponto de distância $r$ .....	11
Expressão [7] - Cálculo da constante da sala .....	11
Expressão [10] - Área de absorção equivalente para a câmara reverberante vazia .....	38
Expressão [11] - Cálculo do coeficiente de atenuação devido ao ar .....	39
Expressão [12] - Velocidade de propagação do som no ar .....	39
Expressão [13] - Área de absorção equivalente da câmara reverberante com provete .....	39
Expressão [14] - Área de absorção sonora equivalente .....	39
Expressão [15] - Coeficiente de absorção sonora de objetos distribuídos regularmente .....	42

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico G.1 - Curvas da área de absorção sonora para todos os painéis absorventes .....	40
Gráfico G.4 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para 2 alinhamentos .....	49
Gráfico G.5 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para 3 alinhamentos .....	50
Gráfico G.6 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para o Painel A – 40 mm ....	51
Gráfico G.7 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para o Painel A – 60 mm ....	52
Gráfico G.8 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para o Painel B – 40 mm ....	52
Gráfico G.2 - Curvas de $\alpha_s$ para todos os provetes em caixa-de-ar com 10 cm de altura ....	46
Gráfico G.3 - Curvas de $\alpha_s$ para todos os provetes em caixa-de-ar com 30 cm de altura ....	47
Gráfico G.9 - Curvas de $\alpha_s$ para todos os provetes de lamelas com 100 mm de altura .....	54
Gráfico G.10 - Curvas de $\alpha_s$ para todos os provetes de lamelas com 150 mm de altura .....	55
Gráfico G.11 - Curvas de $\alpha_s$ para todos os provetes com 50 mm de espaçamento entre filas de lamelas .....	56
Gráfico G.12 - Curvas de $\alpha_s$ para todos os provetes com 100 mm de espaçamento entre filas de lamelas .....	56
Gráfico G.13 - Curvas de $\alpha_s$ para todos os provetes com 150 mm de espaçamento entre filas de lamelas .....	57
Gráfico G.14 - Curvas de $\alpha_s$ para todos os provetes com 200 mm de espaçamento entre filas de lamelas .....	57

## SIMBOLOGIA

A – Área de absorção equivalente

$A_1$  – Área de absorção equivalente para a câmara reverberante vazia na norma NP EN ISO 354:2007

$A_2$  – Área de absorção equivalente para a câmara reverberante com provete na norma NP EN ISO 354:2007

$A_{obj}$  – Área de absorção equivalente por cada elemento discreto

$A_T$  – Área de absorção sonora equivalente na norma NP EN ISO 354:2007

Amp – Amplitude

$c$  - Velocidade de propagação do som no ar

DEC – Departamento de Engenharia Civil

$E$  - Energia

EN – “*European Norm*”

dB – Decibel

$f$  - Frequência

Hz - Hertz

ISO – International Organization for Standardization

$L_w$  – Nível de potência sonora emitido por uma fonte

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

m – Metro

$m^2$  – Metro quadrado

$m^3$  - Metro cúbico

m/s – Metro por segundo

NP – Norma portuguesa

Pa.s/m – Pascal vezes segundo por metro

OL1GL – Oscilador linear de um grau de liberdade

Q – Coeficiente de direccionalidade

R – Contante da sala

rayl – Unidade de medida da impedância. Traduz [Pa.s/m]

RGR – Regulamento Geral do Ruído

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos em Edifícios

s – Segundos

$S_i$  – Área da superfície  $i$

$T_r$  – Tempo de Reverberação

$V$  – Volume

$\alpha$  - Coeficiente de absorção

$\alpha_i$  – Coeficiente de absorção do material  $i$

$\lambda$  – Comprimento de Onda

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do tema

Tendo em conta que as exigências de conforto têm aumentado ao longo dos anos, é fundamental que o progresso e o avanço da técnica ajudem a implementar no mercado um maior e mais vasto conjunto de soluções que façam frente às ditas exigências. No que diz respeito ao tema da acústica isto é bem verdade quando se observa toda a panóplia de legislação recentemente implementada no direito português sobre acústica. É de notar que são coisas bem distintas ter-se uma crescente exigência de qualidade e conforto vinda de clientes individuais e empresas que pretendam vingar no mercado ou ter-se um tipo de exigência de tal valor que leva a lei a contemplar esta temática. Toda esta importância dada ao conforto acústico deve-se ao conhecimento dos efeitos nefastos para a saúde, bem como efeitos contra produtivos no trabalho, causados pelo ruído existente nos espaços devido ao mau condicionamento acústico dos edifícios, presentes no dia-a-dia das pessoas.

Estas exigências levam à abordagem da acústica em edifícios de diferentes formas. É estudado o comportamento a sons aéreos, a sons de percussão e o condicionamento acústico de espaços fechados. Em termos de sons aéreos estuda-se a forma como o som se propaga no meio fluído (ar) e formas de isolar compartimentos de um edifício tanto relativamente ao som produzido no exterior, como no interior. Relativamente a sons de percussão estuda-se a propagação do som por via sólida através dos vários elementos construtivos do edifício em questão. A nível de condicionamento acústico de espaços fechados estuda-se o tempo de reverberação do espaço e o coeficiente de absorção dos elementos presentes nesse espaço, sendo que estas grandezas estão diretamente relacionadas.

Como esta dissertação incide sobretudo no estudo da absorção sonora e é, portanto, mais ligada ao condicionamento acústico, é sobre esta abordagem que os conceitos teóricos no capítulo seguinte vão incidir. Importa, assim, referir que todas estas abordagens à temática da acústica em edifícios implicam estudos perfeitamente distintos e dizem respeito a comportamentos do som bem distintos. Em breve nota deixam-se os valores de referência de velocidades de propagação presentes no Quadro 1.1 para ilustrar o que foi referido:

Quadro 1.1 – Algumas velocidades de referência de propagação do som em diferentes meios.

Propagação do som	Velocidade aproximada de propagação m/s
Aéreo (meio fluído)	340
Via sólida (betão armado, por exemplo)	3000

Em termos de condicionamento acústico é importante referir que as respetivas exigências previstas na lei estão contempladas no Decreto-Lei 96/2008 e que contém o Regulamento dos Requisitos Acústicos em Edifícios (RRAE). O condicionamento acústico depende preponderantemente de alguns aspetos que serão abordados no capítulo seguinte.

Em (Coentro 2011) é feita uma observação bastante interessante sobre o uso de tetos como elementos de absorção acústica: por motivos lógicos, o pavimento terá que exibir características que permitam a sua fácil limpeza e que normalmente coincidem com superfícies propícias à reflexão sonora sendo, por vezes, difícil de melhorar o condicionamento acústico do espaço intervindo a nível do pavimento. As paredes facilmente incorporam materiais que permitam absorção mas por vezes pode não ser o suficiente. Surge então a necessidade de se intervir ao nível do teto por este contemplar uma área muito significativa. Trabalhar acusticamente um teto exige a construção de um teto falso. Manifestada a necessidade, e citando (Coentro 2011) “... deu-se início à procura de materiais e configurações que melhorassem as características absorventes desta solução construtiva”.

Os espaços com grandes volumes que contenham materiais de revestimento com características refletoras são propícios à ocorrência de reverberações significativas e que contribuem para a presença de níveis de ruído elevados e para a falta de inteligibilidade do discurso. A correção do comportamento acústico destes espaços é executada através de elementos com a propriedade de absorver o som. Uma solução que geralmente é de fácil execução é a aplicação dos elementos de absorção ao nível do teto. Intervenções a este nível podem ser soluções muito práticas para muitos tipos de espaços diferentes, como escritórios do tipo “*open-space*”, refeitórios, centros comerciais, fábricas, etc. Outros espaços com práticas de oralidade mais específica como auditórios (de discurso, música e ópera) exigem cuidados adicionais em relação à localização dos elementos de absorção e mesmo relativamente a outros elementos que se destinem à difusão do som, sendo que, muito deste tratamento mais exigente, é também feito a nível do teto.



Existe no mercado uma vasta gama de produtos para esta finalidade e dos quais o projetista se pode servir para obter os resultados exigidos. Para o projetista é importante conhecer as características acústicas dos materiais de forma a conseguir atingir o conforto acústico pretendido para determinado espaço em questão. No entanto, em locais onde a estética não é um parâmetro preponderante podem colocar-se elementos discretos, com espaçamento entre si e que não ocultam totalmente a laje e as instalações técnicas. O uso destes elementos pode contribuir para a obtenção de uma ventilação adequada do espaço em questão. Estes elementos podem, por exemplo, ser painéis suspensos na vertical (“*Baffles*”) ou lamelas.

Em locais com acabamentos onde haja uma manifesta necessidade de ocultar elementos construtivos como a canalização inerente ao edifício em questão, cablagem, etc., recorre-se vulgarmente a tetos falsos. Estas são soluções geralmente económicas e que podem ser benéficas em várias vertentes como a estética, a térmica e a acústica.

A absorção apresentada pelas soluções aplicadas ao nível do teto pode ser quantificada através de ensaios em câmara reverberante segundo a norma NP EN ISO 354:2007.

No âmbito dos trabalhos de investigação desta dissertação caracterizaram-se em laboratório, soluções para absorção acústica em tetos, ainda não estudadas. As condições mais adequadas de montagem dos provetes foram definidas segundo a norma mencionada e foram realizados vários ensaios fazendo variar alguns parâmetros como as distâncias entre elementos e alturas de caixas-de-ar.

## **1.2 Objetivo**

Esta dissertação resulta de um trabalho experimental com o objetivo de caracterizar várias soluções para aplicações em tetos no que diz respeito à sua absorção sonora. Estas soluções são compostas por lamelas lisas ou perfuradas com espuma absorvente embutida numa das faces e por painéis perfurados constituídos por espuma absorvente. Pretende-se comparar os resultados em função da variação de alguns parâmetros como a caixa-de-ar e o espaçamento entre elementos. Este trabalho foi realizado nas instalações do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons). Todos os ensaios seguiram os procedimentos expostos na norma NP EN ISO 354:2007.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 1 é feita uma introdução geral do trabalho científico, são definidos os seus objetivos e estrutura.

No Capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica. Este capítulo encontra-se dividido em subcapítulos contemplando conceitos teóricos, a legislação e normalização aplicável e em vigor, bem como o “Estado da arte” por forma a enquadrar esta dissertação na atualidade da técnica científica. O subcapítulo relativo ao “Estado da arte” vai de encontro ao que outros autores fizeram dentro da temática da dissertação. É importante referir que neste capítulo são detalhados alguns dos principais aspetos relativamente à norma NP EN ISO 354:2007 visto ser a base que rege os procedimentos experimentais desta dissertação. É também feita uma breve análise do enquadramento legal que diz respeito à temática da acústica.

No Capítulo 3 é feita uma descrição de todos os procedimentos experimentais. Esta descrição inclui todos os detalhes sobre as instalações experimentais do ITeCons, bem como toda a listagem do equipamento usado nos trabalhos que serviram de base à produção deste trabalho científico. São ainda listados todos os provetes ensaiados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais e explicados os processos de cálculo dos parâmetros de interesse: área de absorção sonora equivalente no caso de elementos discretos e coeficiente de absorção sonora no caso de elementos regularmente distribuídos.

No Capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos dos ensaios experimentais e comparados os vários provetes relativamente a vários parâmetros analisados relativamente à sua influência na absorção sonora. Esta análise é feita a partir de gráficos sendo que os respetivos resultados tabelados se encontram também tabelados. Os gráficos são apresentados fixando um parâmetro e variando os outros por forma a concluir-se quais os parâmetros de maior influência no comportamento relativamente à absorção sonora de cada provete.

No Capítulo 6 são resumidas todas as conclusões sobre esta dissertação experimental deixando, ainda, algumas referências a possíveis trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Nota introdutória

Em Portugal tornou-se habitual o uso de tetos falsos como solução em edifícios. As razões desse uso são diversas e as suas diferentes aplicações e configurações podem resultar de objetivos diferentes a atingir. Por exemplo, é bastante vulgar encontrarem-se tetos falsos em equipamentos relativamente recentes que são usados com o propósito de ocultar quaisquer canalizações relativas a instalações técnicas e que passam em altura. Outro exemplo é o da facilidade que existe em embutir acessórios nestas soluções como a iluminação. Outra possível aplicação de soluções de tetos falsos é no que diz respeito à temática da acústica. É neste ramo que esta dissertação se debruça e no qual toda a pesquisa bibliográfica relativa ao “Estado da Arte” se baseia.

### 2.2 Conceitos teóricos

#### 2.2.1 O som e a sua propagação

Pode definir-se som como sendo uma variação da pressão relativamente à pressão normalmente instalada no meio (Tadeu et al. 2010). Esta variação de pressão provoca uma agitação das partículas do meio que ao colidirem entre si desenvolvem uma série de movimentos de partículas em onda e que podem ser sempre decompostos em vários movimentos harmónicos como está ilustrado na Figura 2.1. Esses movimentos descritos por funções sinusoidais podem ser caracterizados por vários parâmetros como a amplitude (Amp), o período (T), a frequência ( $f$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ).

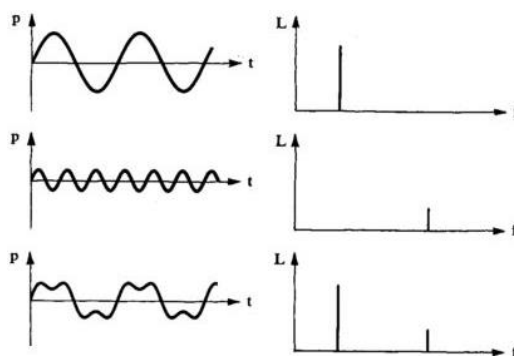


Figura 2.1 - Movimentos harmónicos e a sua soma ( de C. Oliveira 2008)

Define-se por frequência o número de variações de pressão provocadas por uma determinada fonte sonora por unidade de tempo. Assim, segundo o sistema internacional (S.I.), essa medição é feita por segundo e a unidade que representa a frequência é o Hertz (Hz) (Tadeu et al. 2010).

O som pode propagar-se por meios sólidos (estrutura de um edifício que pode ser em aço, ou betão armado), líquidos (pode ser o oceano através do qual se propaga um sismo), ou fluído (como é o caso do ar).

Quando se estuda qualquer aspeto temático da acústica de um espaço é preciso sempre ter em conta a sua origem (fonte sonora), a sua forma de propagação (o meio por onde o som se propaga) e do próprio recetor (pode ser uma pessoa). Quando se considera o meio de propagação das ondas sonoras como sendo o ar, considera-se que se está a estudar as vibrações provocadas pelo som num meio elástico.

### 2.2.2 Absorção Sonora

Quando as ondas sonoras atingem uma superfície de um determinado elemento, parte da energia é transmitida através desse elemento, outra parte é refletida e outra parte é dissipada no interior desse mesmo elemento (Tadeu et al. 2010).

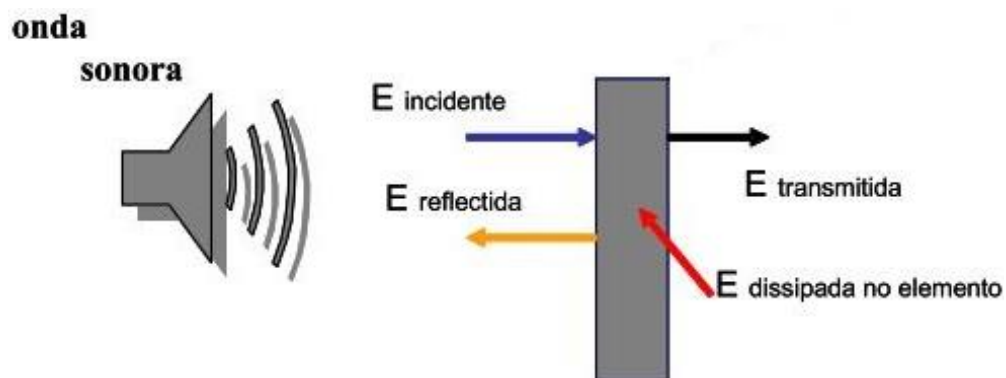


Figura 2.2 - Efeito do contato de ondas sonoras com um elemento (Tecniwood 2010)

Como pode ser observado na Figura 2.2, a quantidade de energia ( $E$ ) absorvida pelo elemento (que corresponde à energia dissipada no interior desse elemento mais a energia transmitida) seria:

---

$$E_{Absorvidada} = E_{Incidente} - E_{Refletida} \quad [1]$$

A absorção sonora conferida pelo elemento depende de parâmetros como as características da superfície do elemento (se é liso ou rugoso), as propriedades do material, do ângulo de incidência das ondas sonoras sobre a superfície e da frequência do som que atinge o elemento. Desta forma é possível definir o coeficiente de absorção  $\alpha$  que caracteriza a percentagem de energia sonora que o elemento consegue dissipar. Traduz-se matematicamente pela seguinte igualdade:

$$\alpha = E_{Absorvida} / E_{Incidente} \quad [2]$$

O coeficiente de absorção de qualquer material varia para diferentes frequências do som que sobre ele incide. Torna-se, então, de grande importância proceder ao estudo do som relativamente à sua frequência (Tadeu et al. 2010).

### 2.2.3 Impedância acústica

A impedância acústica é um parâmetro que está relacionado com a absorção sonora. Traduz a relação entre a pressão sonora numa onda plana num determinado ponto e a velocidade de propagação de uma partícula dentro dessa mesma onda plana (Tadeu et al. 2010), (P. D. P. S. Oliveira 2009). Esta grandeza acústica pode ser determinada pela seguinte expressão matemática:

$$Z_c = \frac{p}{v} = c \cdot \rho \quad [3]$$

A unidade da impedância, rayl, toma o mesmo significado de Pa.s/m. Nesta expressão  $p$  representa a pressão sonora expressa em Pascal,  $\rho$ , a massa volúmica do meio em kg/m<sup>3</sup>,  $v$  a velocidade em m/s e  $c$  representa a velocidade de propagação das ondas sonoras no meio (Kingsley et al. 1982). Embora este conceito seja complexo e uma abordagem extensa a nível físico e matemático saia do âmbito do presente texto, a noção de impedância acústica é importante visto ser possível fazer uma previsão laboratorial da absorção sonora de um material em análise através da teoria da impedância acústica aplicada aos meios que uma qualquer onda sonora atravessa (P. D. P. S. Oliveira 2009).

## 2.2.4 Tempo de Reverberação

Um som gerado por uma fonte situada no interior de um espaço fechado, como um compartimento de um edifício, tem tendência a expandir e a preencher esse espaço. Quando o som atinge uma superfície desse compartimento ou de um qualquer objeto no seu interior as ondas sonoras podem sofrer transformações de reflexão, absorção e difração.

Fenómenos como a reflexão e a difração fazem com que as ondas sonoras permaneçam no interior do compartimento, enquanto a absorção dissipa a energia sonora sob a forma de calor. Dependendo do uso que determinado espaço fechado terá após a sua construção, essa permanência do som no compartimento em questão pode ser mais ou menos desejada (Long 2006). A caracterização do campo sonoro em espaços fechados não é facilmente obtida pois trata-se de uma quantificação muito complexa física e matematicamente. Embora sejam conhecidas três formas de abordagem a essa quantificação, esta exposição teórica apenas contemplará uma que, sendo a mais comum e de mais simples aplicação, é também a de mais simples compreensão. São, no entanto, a título de interesse académico, mencionadas as três:

- Metodologia baseada na teoria ondulatória;
- Metodologia baseada na teoria geométrica dos espaços;
- Metodologia baseada na teoria estatística;

A abordagem feita neste capítulo é exclusivamente relativa à teoria estatística.

Uma outra noção importante a reter no que diz respeito ao condicionamento acústico é a noção de Tempo de Reverberação ( $T_r$ ). O tempo de reverberação pode ser definido como o tempo (em segundos) necessário para ser registado um decaimento do nível sonoro em um milhão de vezes, o que corresponde a um decaimento de 60 dB, após a fonte sonora ser desligada. O valor de  $T_r$  depende de vários fatores, como o volume do compartimento, o revestimento da envolvente e o recheio existente no interior do compartimento.

Dependendo dos objetivos acústicos do espaço em questão pode haver a necessidade de alterar os valores de  $T_r$ . Pode obter-se o resultado pretendido alterando a geometria/volume do espaço e/ou modificando as propriedades de absorção de todo o recheio do compartimento (Tadeu et al. 2010). Assim, se o interior do espaço fechado for muito refletor teremos uma maior permanência de um determinado som no compartimento. A Figura 2.3 pretende ilustrar graficamente o decaimento sonoro no tempo.

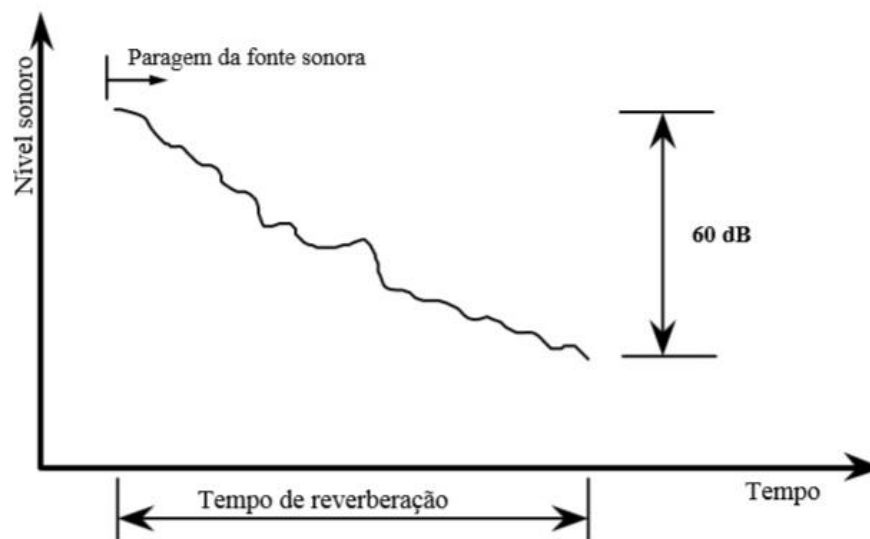


Figura 2.3 - Tempo de reverberação (Tadeu et al. 2010)

Na prática, nem sempre é fácil obter uma medição correta do tempo de reverberação. Se o ruído de fundo for originalmente alto não se consegue medir um decaimento de 60 dB (Figura 2.4). Assim sendo, o que é feito habitualmente é medir o valor do tempo para um decaimento de 20 dB ou 30 dB e seguidamente extrapolar para 60 dB. Esta é uma metodologia perfeitamente válida, embora se use a simplificação de extrapolar linearmente o decaimento.

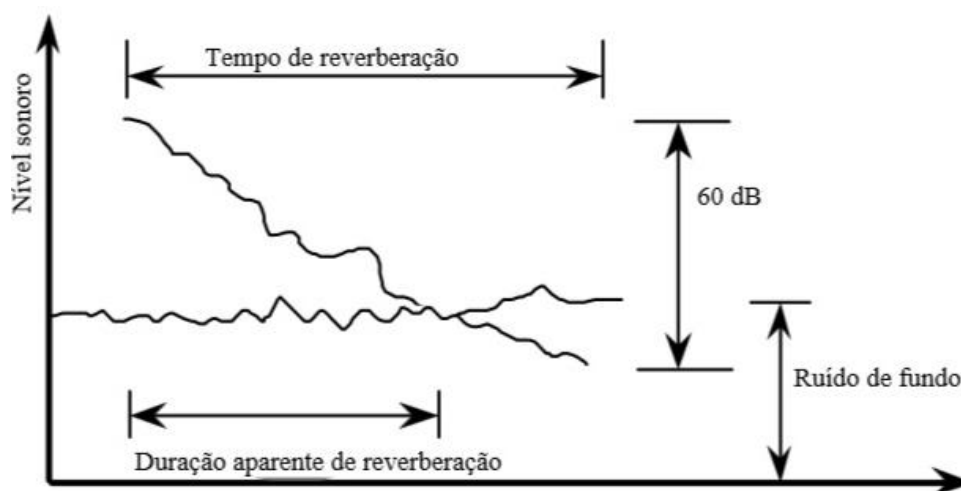


Figura 2.4 - Tempo de reverberação aparente (Tadeu et al. 2010)

Conclui-se, então, que o  $Tr$  é uma grandeza através da qual a qualidade acústica de um espaço fechado pode ser avaliada (Tadeu et al. 2010). Existem várias formulações matemáticas desenvolvidas por diferentes investigadores, entre as quais se destacam as fórmulas de Eyring, de Millington e de Sabine (Tadeu et al. 2010). A formulação que aqui será apresentada será a formulação de Sabine, que sendo o pioneiro nesta temática, define o  $Tr$  como sendo:

$$Tr = 0,163 \frac{V}{A} \quad [4]$$

Consideram-se as seguintes unidades nesta expressão:

$V$  em  $m^3$ ,  $A$  em  $m^2$  e  $Tr$  em s.

A partir do  $Tr$  é possível obter outra grandeza de extrema importância, especialmente no que diz respeito à caracterização acústica de materiais. Essa grandeza é o coeficiente de absorção ( $\alpha$ ). Todos os materiais apresentam a capacidade de absorver energia sonora em maior ou em menor quantidade.  $\alpha$  vai traduzir essa capacidade. Quanto mais próximo da unidade for o valor de  $\alpha$ , maior será a absorção proporcionada pelo material. Será então trivial que quanto maior for a área de um determinado material em contato com as ondas sonoras, maior será a energia absorvida por esse material. Assim sendo  $A$  (área de absorção equivalente) pode ser obtido através da seguinte igualdade matemática:

$$A = \sum S_i \alpha_i \quad [5]$$

$S_i$  representa a área da superfície do material em exposição às ondas sonoras em  $m^2$  e  $\alpha_i$  representa a absorção do material numa grandeza adimensional. A grandeza  $A$  vem então expressa em  $m^2$  (Tadeu et al. 2010).

### 2.2.5 Campo reverberado e campo direto

No interior de um espaço fechado encontram-se dois campos sonoros que se sobrepõem e que são estritamente diferentes um do outro. Tratamos por campo direto o campo sonoro que chega ao recetor sem sofrer mudanças da sua trajetória. O campo reverberado é originado por múltiplas reflexões nos elementos confinantes do espaço fechado, bem como em todo o seu recheio até, eventualmente, atingir o recetor (Tadeu et al. 2010). Se estes campos sonoros forem analisados separadamente verifica-se que para o campo direto há uma diminuição da pressão sonora com o aumento da distância à fonte enquanto para o campo reverberado o nível de pressão sonora se mantém aproximadamente constante admitindo que a soma de todas as reflexões se mantém constante no tempo. O campo direto depende, ainda, do coeficiente de direccionalidade  $Q$  e do nível de potência da fonte ( $L_w$ ). É importante referir



que  $Q$  toma o valor unitário quando a fonte em questão é omnidirecional. Sendo que os dois campos se sobrepõem e sendo  $r$  a distância do ponto em análise à fonte sonora, pode-se determinar o nível de pressão sonora perceptível nesse ponto através da igualdade matemática (Kingsley et al. 1982):

$$L_1 = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi \cdot r^2} + \frac{1}{R} \right) \text{ dB} \quad [6]$$

$R$  é a denominada constante da sala e o seu valor expresso em  $\text{m}^2$  pode ser calculado através de:

$$R = \frac{A}{(1 - \alpha_{\text{médio}})} \quad [7]$$

Torna-se intuitivo que o campo direto se encontra nas zonas mais próximas da fonte sonora e que o campo reverberado é mais relevante à medida que a distância à fonte aumenta. É ainda necessário ter em conta que o campo sonoro reverberado é menos significativo em melhores condições de absorção sonora por parte dos materiais da envolvente ( de C. Oliveira 2008).

Segundo a norma NP EN ISO 354:2007, os ensaios em câmara reverberante (como o próprio nome indica) requerem uma distribuição de som no interior da câmara de maneira a formar um campo reverberado. Para tal, são neste capítulo expostas algumas formas de obter um campo difuso. É frequente recorrer-se ao uso de objetos com superfícies que descrevem curvaturas com o intuito de expandir o som pela câmara da forma pretendida. Esta expansão depende do raio de curvatura dos elementos e a forma como este efeito é surtido depende do tipo dessa curvatura (se é côncava ou convexa) (Heinrich & Technischen 1981).

Um outro fator importante a considerar é a frequência ou a gama de frequências que compõem o campo sonoro no espaço fechado. A absorção dos materiais é variável consoante a frequência do som que incide sobre o material. Assim sendo, torna-se de vital importância proceder a uma caracterização detalhada em frequência do campo sonoro para se perceber em quais frequências é necessário atenuar o som e quais os materiais ou sistemas de materiais que devem ser aplicados para o efeito.

### 2.2.6 Materiais e sistemas para absorção sonora

Existem três categorias de materiais/sistemas de materiais em termos de absorção segundo gamas de frequência:

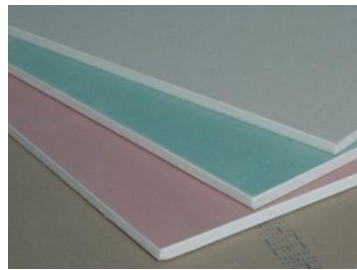
- Materiais porosos e fibrosos (mais eficazes em altas frequências  $\approx 1600$  Hz a  $6400$  Hz);

- Membranas (mais eficazes em frequências baixas  $\approx 100$  Hz a 1600 Hz);
- Ressonadores (mais eficazes em frequências médias  $\approx 400$  Hz a 1600 Hz);

Na Figura 2.5 podem ser observados exemplos de materiais/sistemas de materiais utilizados na absorção sonora e/ou desenvolvimento de sistemas para absorção sonora:



Materiais fibrosos e porosos  
(Lã de rocha)



Membranas



Ressonador

Figura 2.5 – Exemplos de materiais (Sotecnisol 2013), (Arquitetura 2013), (Alibaba.com 2013)

Como será de esperar, estes grupos de materiais absorventes têm características diferentes e o seu comportamento perante as ondas sonoras apresenta também mecânicas diferentes (Tadeu et al. 2010).

Os materiais fibrosos são caracterizados por possuir apenas uma parte do seu volume composto por material sólido e fibroso enquanto o resto do volume são cavidades cheias de ar que têm a particularidade de poderem comunicar entre si e com o exterior (Tadeu et al. 2010). A viscosidade do material fibroso permite que a energia sonora se dissipe na forma de calor quando as ondas sonoras entram em contato com o elemento. É importante referir que o aumento da espessura deste material não tem significado na absorção acústica em frequências altas, embora promova um ligeiro aumento na absorção em baixas frequências.

O conceito de ressonador implica o uso de uma caixa-de-ar entre o painel e o suporte. Fisicamente, um ressonador pode ser modelado como um oscilador linear de um grau de liberdade (OL1GL) (Tadeu et al. 2010).

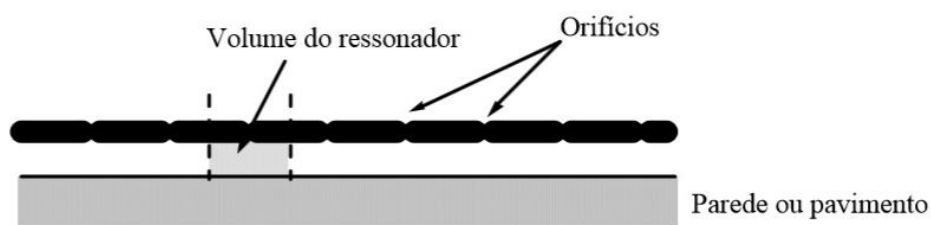


Figura 2.6 – Associação de ressonadores (Tadeu et al. 2010)

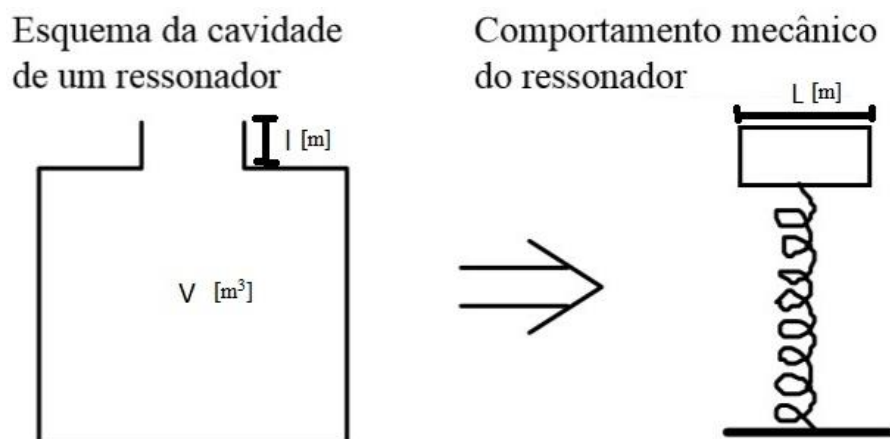


Figura 2.7 – Funcionamento de um ressonador adaptado de (Tadeu et al. 2010)

Quando a energia sonora penetra num ressonador põe em movimento a massa de ar do seu orifício. A mola modela a massa de ar dentro do recipiente com volume  $V$  expresso em  $m^3$ . A Figura 2.7 traduz este funcionamento (ver também Figura 2.6). Quando a frequência do som é próxima da frequência própria do ressonador a velocidade e a amplitude do movimento do ressonador aumentam por efeito de amplificação. Como os movimentos são de maior amplitude a dissipação da energia sonora também é maior (Tadeu et al. 2010). Este efeito acontece predominantemente para as frequências médias. Para um ressonador estima-se a frequência de ressonância através da seguinte igualdade matemática:

$$f = \frac{c}{2\pi} \times \sqrt{\frac{L}{V \cdot l}} \quad [8]$$

Nesta expressão as variáveis correspondem às dimensões da Figura 2.7,  $c$  é a velocidade do som expressa em m/s e a frequência vem expressa em Hz.

Os ressoadores têm grande aplicação em espaços fechados destinados ao discurso. Este tipo de materiais tem apresentado significativas melhorias na inteligibilidade da palavra em auditórios, salas de aula, entre outros tipos de espaços fechados.

No que diz respeito às baixas frequências, muitos espaços fechados criam ondas estacionárias em frequências específicas, por se formarem modos próprios de vibração. Este fenómeno acontece vulgarmente em espaços fechados cujas dimensões se assemelhem ao comprimento de onda das ondas sonoras que percorrem o espaço. Esses modos próprios de vibração irão provocar ressonâncias no compartimento que criarão um certo desconforto auditivo aos utilizadores do espaço causado pela amplificação de ondas sonoras devido à ressonância (P.

D. P. S. Oliveira 2009). O funcionamento das membranas é baseado na vibração de uma placa flexível (ver Figura 2.8). É a vibração da placa que promove a dissipação da energia sonora. Quanto maior for a vibração da placa maior a absorção. As frequências que permitem uma maior vibração da placa são as frequências associadas aos modos próprios de vibração do corpo. Os modos próprios de vibração surgem, geralmente, em gamas de frequências mais baixas. Em termos de teoria dinâmica sabe-se que os modos próprios de vibração dependem da massa e da rigidez do corpo em análise (Tadeu et al. 2010).

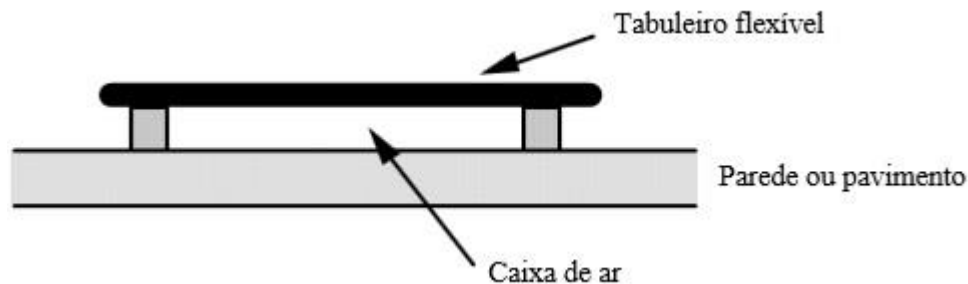


Figura 2.8 – Esquema de uma membrana (Tadeu et al. 2010)

A frequência para a qual ocorre a absorção máxima conferida pelas membranas pode ser estimada através da igualdade:

$$f = \frac{c}{2\pi} \times \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}} \text{ [Hz]} \quad [9]$$

Nesta expressão matemática  $\rho$  representa a massa volúmica do ar expressa em  $\text{kg/m}^3$ ,  $m$ , a massa superficial do elemento expressa em  $\text{kg/m}^2$  e  $d$  a altura da caixa-de-ar expressa em m. Note-se que o bom funcionamento em absorção das membranas acontece para uma gama de frequências bastante reduzida. Muitas vezes os projetistas optam por conceber soluções de materiais absorventes mistos, ou seja com propriedades de cada um dos três grupos de materiais absorventes aqui apresentados por forma a ter em conta uma vasta gama de frequências sonoras. Um sistema muitas vezes utilizado é o uso de ressoadores com material fibroso no seu interior. Este sistema permite alargar a gama de frequências em que a absorção é eficaz.

É necessário em projeto ter-se em consideração que no espaço fechado em análise poderão encontrar-se outros elementos discretos, como mobiliário. Acontece que qualquer corpo absorve energia sonora. É sempre necessário fazer uma estimativa da utilização do espaço e de que forma essa mesma utilização poderá influenciar o condicionamento acústico e ter em conta este efeito no estudo do condicionamento do espaço fechado em análise.

## 2.3 Legislação e normas aplicáveis

### 2.3.1 Legislação Portuguesa correntemente em vigor

As crescentes exigências dos utilizadores dos espaços e descobertas científicas sobre a influência do ruído na saúde humana levaram a constituição portuguesa a contemplar o ruído na sua lei.

Como uma das principais ferramentas legais relativamente ao ruído, pode nomear-se o RRAE. O RRAE foi aprovado e transcrito para a constituição portuguesa pelo Decreto-Lei nº129/2002. Este foi revogado pelo correntemente em vigor Decreto-Lei nº96/2008. Quando o Decreto-Lei nº129/2002 foi aprovado pretendia trazer a noção de diferentes utilizações de espaços fechados. O Decreto-Lei nº 98/2008 altera o Decreto-lei nº129/2002 no seu Artigo 1º, alínea *a*), acrescentando e/ou alterando os tipos de espaços definidos. O RRAE, para além de outros requisitos relativamente a sons aéreos e a sons de percussão, estabelece valores máximos para os tempos de reverberação em função do tipo de espaço fechado em análise. Para estes espaços fechados, o RRAE estabelece que o  $T_r$  a ser comparado com o regulamentar terá que ser obtido fazendo a média aritmética dos tempos de reverberação das frequências 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz (R.R.A.E. 2008).

Outro documento legal de relevo é o Decreto-Lei nº 292/2000 que foi revogado pelo Decreto-Lei nº9/2007 que é a atual ferramenta legal conhecida por Regulamento Geral do Ruído (RGR). O R.R.A.E. é um documento legal que trata a acústica dos edifícios, enquanto o R.G.R. trata o ruído ambiente. Correntemente, com as alterações feitas a cada uma das ferramentas legais (RRAE e RGR), estas são perfeitamente compatíveis (R.G.R. 2007).

### 2.3.2 Normalização aplicada

Em termos da normalização aplicada, os procedimentos experimentais usados durante a realização desta dissertação têm como base a norma NP EN ISO 354:2007 (IPQ 2007). Esta norma diz respeito a ensaios de medição dos tempos de reverberação em câmara reverberante usando provetes que permitam representar corretamente a realidade. Esta norma especifica várias formas de montagem do provete na câmara, bem como as dimensões do mesmo. Define, ainda, dimensões de câmara reverberante e fórmulas corretivas no caso da câmara reverberante em questão não apresentar exatamente as mesmas dimensões. No subcapítulo anterior foi mencionado o conceito de campo reverberado. A norma NP EN ISO 354:2007 estabelece que o campo sonoro criado, para se proceder às medições dos tempos de reverberação nos ensaios dos provetes, deve ser reverberante (campo sonoro difuso). Esta

norma descreve também a metodologia que deve ser usada no cálculo do coeficiente de absorção do material ensaiado com base nos tempos de reverberação medidos. Prevê o cálculo de  $\alpha$  para elementos discretos bem como para superfícies de absorção.

## 2.4 O “Estado da Arte”

Este subcapítulo é reservado a uma análise do estado atual da técnica. É uma análise ao que tem sido feito no âmbito da temática desta dissertação. O conteúdo aqui expresso será mais baseado na análise de artigos científicos e outras publicações importantes com caráter experimental e considerados de relevância no tema.

### 2.4.1 O estado da técnica quanto ao equipamento

Embora este seja um aspeto que ficará melhor descrito no capítulo seguinte, é importante começar por tratar a técnica dissecando o que é o equipamento mais atual e mais poderoso a nível nacional em termos de ensaios acústicos em câmaras. Em Portugal, apenas o ITeCons contém câmaras acústicas móveis (Tadeu et al. 2008).

O ITeCons possui câmaras horizontais onde são realizados ensaios a sons aéreos e medidos tempos de reverberação.

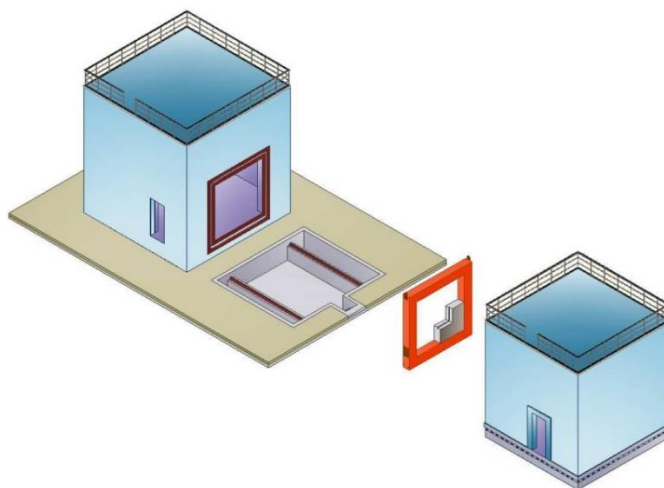


Figura 2.9 – Câmaras horizontais do ITeCons (Tadeu et al. 2008)

As duas câmaras acústicas horizontais do ITeCons são utilizadas para realizar ensaios de isolamento a sons aéreos (ver Figura 2.9). Porém, para ensaios de absorção sonora, apenas a câmara fixa é usada nas medições. Nesse caso, a câmara móvel é apenas usada para pressionar a parede de referência contra a câmara fixa.

Embora os ensaios realizados no âmbito desta dissertação sejam exclusivamente realizados na câmara acústica horizontal fixa, existe neste instituto de investigação outro método de caracterização de materiais quanto à sua absorção sonora. É o método do tubo de impedância. O tubo de impedância tem a vantagem de tornar possível a realização de ensaios com amostras de material de dimensão muito reduzida. Na Figura 2.10 podem observar-se as reduzidas dimensões do tubo de impedância. O ensaio no tubo de impedância é particularmente vantajoso para saber se um tipo de material ou um tipo de aglomerado de vários materiais combinados merece ou não ser trabalhado experimentalmente em termos de absorção sonora para provetes com áreas mais representativas da realidade. Quando nada se sabe sobre o comportamento em absorção sonora de um material o tubo de impedância torna-se um ponto de partida para o estudo, pois se nada se sabe sobre o comportamento do material pode vir a revelar-se um desperdício de recursos a produção de provetes com áreas para ensaio em câmara reverberante. É, no entanto, necessário ter noção que a dimensão do provete é muito pequena e pode não ser suficiente para simular de uma forma representativa o material/sistema. Por exemplo, os ensaios com lamelas absorventes com diferentes espaçamentos e diferentes caixas-de-ar seriam impraticáveis no tubo de impedância.

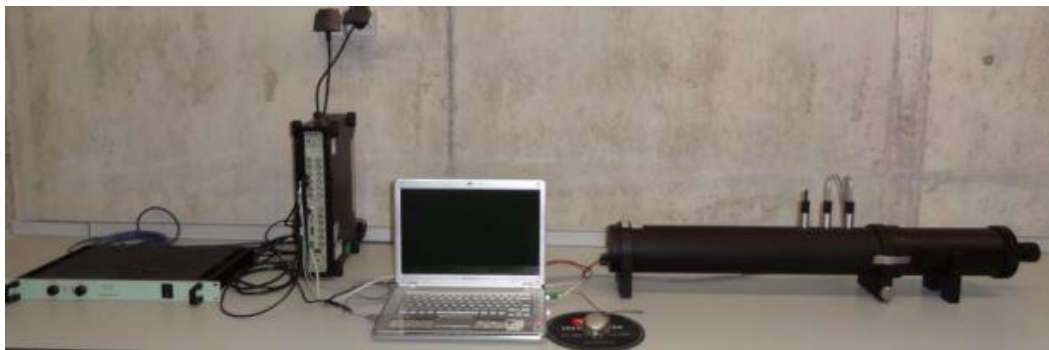


Figura 2.10 - Tubo de impedância

Refira-se que no tubo de impedância apenas é possível simular a propagação de ondas planas perpendiculares à amostra. Esta é uma das desvantagens do tubo de impedância, uma vez que apenas se determina a absorção sonora do material em relação a ondas planas normais à amostra. Na câmara reverberante, em contrapartida, gera-se um campo difuso com ondas que se propagam em todas as direções e a absorção sonora é determinada nestas condições mais próximas da realidade.

#### 2.4.2 O estado da técnica em termos experimentais

No âmbito dos estudos da absorção sonora de materiais, os primeiros trabalhos são realizados por Sabine em finais do século XIX (P. D. P. S. Oliveira 2009). Em 1940 são publicados trabalhos realizados por Morse em materiais fibrosos (Morse et al. 1940), onde se tenta relacionar a impedância sonora com a absorção acústica. Anos mais tarde, surge um estudo do

---

comportamento de painéis perfurados em absorção acústica (Bolt 1947). Neste trabalho, Bolt identifica os parâmetros que influenciam a absorção sonora, a frequência de ressonância dos elementos painel, bem como a influência provocada pela variação dos mesmos parâmetros.

É Kingsley que, em 1950, publica um trabalho notável desenvolvendo métodos para determinar coeficientes de absorção sonora a partir da noção de impedância acústica (Kingsley et al. 1982). Este trabalho explica de uma forma muito mais física e matemática a propagação do som (P. D. P. S. Oliveira 2009). Na mesma década, são testados laboratorialmente, quanto à absorção acústica, ressoadores perfurados. Mediram-se as frequências de ressonância dos painéis e/ou sistemas de painéis (Sacerdote & Gigli 1951). Este trabalho incluiu ainda comparações feitas com outros métodos de previsão numéricos. Paralelamente a este trabalho, Ingard & Bolt experimentavam materiais porosos absorventes e materiais porosos absorventes usados simultaneamente com ressoadores. Trabalharam, para além da acoplação de sistemas para obtenção de maior gama de frequências em absorção, um parâmetro fundamental que é a caixa-de-ar assumida no sistema (Ingard & Bolt 1951).

Anos mais tarde, também Ingard realiza um trabalho experimental onde são calculadas correções para os resultados da absorção acústica em ressoadores em função das furações (P. D. P. S. Oliveira 2009). Ingard & Bolt fizeram também comparações entre o trabalho experimental e métodos analíticos e numéricos.

Em 1953 é feito um estudo relevante em termos de aprofundamento de materiais e sistemas acoplados de materiais fibrosos. A forma como a densidade do material poroso afeta a absorção acústica, a percentagem de furação dos ressoadores e o efeito da variação da caixa-de-ar, foram os principais parâmetros em conta nesse estudo (Callaway & Ramer 1952). Em (Harris & Molloy 1952) encontra-se um apanhado do “Estado da Arte” na matéria de absorção sonora. Neste artigo, faz-se grande referência aos ressoadores e comenta-se a falta de garantia na boa simulação das condições de fronteira quando definidas através da impedância dos materiais. Ainda na mesma década, o dimensionamento de ressoadores é alvo de estudo. Pretendia-se determinar experimentalmente formas de dimensionar ressoadores eficazes nas baixas frequências (Mikeska & Lane 1956). Nesse estudo foram tidos em conta uma grande quantidade de parâmetros respeitantes aos ressoadores, como a espessura do painel, a caixa-de-ar, a percentagem de furação, bem como o diâmetro dos furos e o tipo de material poroso de enchimento.

Em 1973 é elaborada uma publicação de grande importância a nível de conhecimento em acústica no que diz respeito à física e matemática deste tema. Esta obra conta já com quatro edições e envolve um extenso desenvolvimento do conceito de impedância acústica relativamente à absorção sonora (Kuttruff 2000).



Em 1978 é publicado um artigo resultante de experimentações e modelações em absorção acústica no interior de tubagens de ar (Canevet 1978). É nesta década que em Portugal se dão os primeiros passos nas grandes contribuições publicadas em acústica com (Silva 1978), onde é compilado o estado do conhecimento em acústica até então, acrescentando as conclusões tiradas dos seus estudos. Silva publica ainda um outro livro importante que resulta de procedimentos experimentais em materiais para sistemas absorventes (Silva 1984).

No início da década de oitenta, decorre um estudo experimental sobre o decaimento em câmaras reverberantes munidas de difusores (Heinrich & Technischen 1981). Sendo que, para densidades relativamente baixas de difusores no interior de uma câmara, pode ser desprezada a reverberação dos próprios difusores, para densidades altas, conclui-se que esse efeito não é desprezável.

Os estudos sobre os parâmetros que influenciam a absorção acústica nos ressoadores, como as furações e respetivos diâmetros, entre outros, continuaram a ser conduzidos por vários autores. Destaca-se a obra de Meisser (Meisser 1986). No ano de 2001 é realizado um trabalho sobre o uso de certos materiais na absorção acústica. Este estudo incidiu, sobretudo, no uso desses materiais em sistemas já conhecidos e em uso, como por exemplo em “*Baffles*” (Fuchs 2001).

Anos mais tarde é publicada outra obra extremamente valiosa no âmbito dos painéis perfurados e seus parâmetros influentes (Cox & D’Antonio 2004). Cox & D’Antonio estudaram sobretudo a influência da variação das taxas de perfurações no coeficiente de absorção. Em (Domingues 2005) encontram-se os resultados de um estudo particularmente interessante pelo fato de ter culminado no estabelecimento de um coeficiente de absorção sonora para materiais correntes (P. D. P. S. Oliveira 2009).

No ano de 2007, Probst e Wolfgang realizam um trabalho com painéis suspensos (“*Baffles*”) onde concluem que o espaçamento entre filas de painéis tem influência preponderante na área de absorção sonora equivalente por elemento (W. Probst et al. 2007). O mesmo estudo é continuado e em 2013 Probst estabelece um *software* que permite modelar a influência do espaçamento e altura do painel suspenso na sua absorção (F. Probst 2013).

Nos inícios do século XXI o estudo do condicionamento acústico tem vindo a adquirir grande importância no dimensionamento de espaços. Essa importância tem levado vários autores ao longo dos anos a estudar experimentalmente parâmetros que podem influenciar os estudos de absorção acústica (De Godoy et al. 2006). A forma como os provetes são montados e os parâmetros associados a essa montagem, como por exemplo a existência de aberturas entre painéis, provaram ser fatores a ter em consideração no que diz respeito a medições de tempos de reverberação, de tal forma que a normalização concebida para o efeito se tem vindo a tornar cada vez mais objetiva e rigorosa. Graças a estes estudos de vital importância foi

---

possível detetar quais as condições de montagem que conduzem a alterações significativas nas medições e quais as que não produzem efeitos significativos sobre os resultados. A norma que foi utilizada foi a norma ISO 354:2003. Note-se que a norma base deste trabalho científico é a norma NP EN ISO 354:2007 que resulta da transcrição da norma anterior. Já no ano de 2008, é feito um estudo em painéis absorventes perfurados de madeira (Patraquim 2008). Este autor experimenta a introdução de vários materiais na caixa-de-ar, como por exemplo cartão. É também feita a modelação destes sistemas e a comparação com outras soluções.

Em 2010 é publicado um artigo referente a espaços do tipo “open-plan” com conclusões importantes, nomeadamente o fato de neste tipo de espaços ser insuficiente contabilizar apenas o tempo de reverberação para a caracterização acústica deste tipo de espaço. A disposição interior e as distâncias compreendidas nestes espaços mostraram ter grande influência (Nilsson & Hellström 2010).

No ano seguinte é desenvolvido um estudo sobre a forma como o ruído de passos é transmitido através dos chamados “*wood floor-ceiling*” (Hu & Migneron 2011). Torna importante as alternativas à madeira que apresentando bons resultados a nível de absorção, conclui-se que a nível de transmissão é propícia a problemas de transmissões marginais.

Esta revisão bibliográfica não é exaustiva e existem muitos outros estudos que por questões de brevidade não são aqui citados.

Dado o historial de evolução da técnica e da experimentação neste âmbito, encontra-se presentemente o tema da absorção acústica em espaços fechados como algo vasto. Isto deve-se ao fato de existirem muitas tipologias de espaços fechados destinados a diferentes tipos de utilização. Desta forma é possível encontrar na vasta bibliografia sobre o assunto aproximações diferentes em termos de procedimentos experimentais quando se estuda a absorção acústica. É importante ter noção que, presentemente, nem toda a gama de estudos laboratoriais relativamente à absorção acústica tem o mesmo fim. Existem, por exemplo, estudos de absorção acústica com o intuito de caracterizar um determinado material. Estes estudos são muitas vezes solicitados em laboratórios por empresas que pretendam catalogar soluções que introduzem no mercado. Algumas destas empresas chegam a fazer publicações de catálogos, não só com a caracterização dos seus produtos, mas também com a teoria que proporcionou a dita caracterização (Castilhano & Ferreira 2011).

Outro tipo de estudos é, por exemplo, o estudo de um material específico cuja contribuição para a absorção acústica é desconhecida. Caso prove um bom material absorvente poderá então ser introduzido em elementos destinados à aplicação num espaço fechado por forma a diminuir os tempos de reverberação desse mesmo espaço. Neste contexto todos os estudos supracitados relativamente à impedância acústica são de grande importância. No caso da

---

presente dissertação, toda a experimentação é feita em câmara reverberante. Grandes superfícies comerciais e/ou industriais, exigem que se mantenha uma certa ventilação natural constante. Por outro lado estas superfícies requerem também um certo conforto acústico. É possível combinar estas duas situações introduzindo o conceito de tetos falsos abertos. Estes tetos falsos abertos permitem a circulação de ar pelas ditas aberturas, conferindo alguma absorção acústica através de material absorvente exposto às ondas sonoras. Torna-se imperativo estudar o comportamento destes elementos que constituem o teto aberto. Parâmetros como o espaçamento entre as ditas aberturas e a respetiva caixa-de-ar são fatores importantes no comportamento dos elementos (Mook 2007).

Recentemente, outros autores testaram quais as potencialidades, em termos de ventilação, do uso de painéis perfurados para espaços fechados com volumes relativamente pequenos (salas e pequenos auditórios). Fazendo medições para uma temperatura ambiente de 20 °C e variando as correntes de ar, concluíram que existe conforto a nível térmico e de ventilação quando usados painéis perfurados (Hviid & Svendsen 2013). Isto toma uma extrema importância quando se tem em conta que o uso dos painéis perfurados vai melhorar o condicionamento acústico do espaço fechado. Em caso de maiores necessidades de ventilação, outros tipos de soluções poderiam apresentar melhores resultados por permitirem maiores espaçamentos que permitam ventilação, como poderia ser o caso da solução de lamelas com espuma absorvente, uma das soluções em estudo na presente dissertação.

### **3 DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

É importante começar por referir que todos os procedimentos experimentais foram realizados nas instalações do ITeCons. Os procedimentos experimentais baseados na normalização europeia (também transcrita como normalização portuguesa) e as ditas instalações com os ensaios acreditados, tornam o ITeCons uma entidade perfeitamente apta a realizar ensaios acreditados.

#### **3.1 As instalações experimentais**

Como o ITeCons é um instituto de investigação em ciências da construção, as suas instalações não se limitam a acolher equipamento sofisticado dedicado à acústica. É um instituto que pode abranger a componente experimental de uma vasta gama de campos das construções, como por exemplo a térmica e a resistência dos materiais. Como seria extenso e sairia do âmbito do presente texto, a descrição das instalações contempla exclusivamente o material que diz respeito ao trabalho experimental realizado nesta dissertação.

#### **3.2 Câmaras horizontais**

Os ensaios para determinação dos tempos de reverberação são realizados exclusivamente nas câmaras horizontais. Como já foi referido, uma destas câmaras horizontais é móvel, enquanto a outra permanece fixa, o que permite agilizar a execução dos ensaios devido a ser possível fazer a preparação de alguns provetes fora das câmaras. O sistema móvel funciona através de um módulo hidráulico que garante um controlo de alta precisão da aplicação da carga que vai permitir a movimentação da câmara à velocidade desejada. Estas velocidades são também ajustáveis (Tadeu et al. 2008).



Figura 3.3 - Painel de controlo da câmara horizontal móvel

O painel de controlo da Figura 3.3 ligado ao módulo hidráulico permite controlar de uma forma fácil e rápida a força de aperto entre as câmaras (ver Figura 3.1 e Figura 3.2). A câmara móvel aperta contra um dos aros metálicos propositadamente desenhados e dimensionados para este equipamento específico. Estes aros podem conter provetes para ensaiar o isolamento a sons aéreos, ou o aro que contém a parede refletora que fecha a câmara reverberante. Esta parede refletora é usada nos ensaios de absorção sonora e como tal foi usada nos trabalhos experimentais relativos a esta dissertação, sendo que as suas propriedades refletoras contribuíram para a obtenção do campo difuso dentro da câmara que é exigido pela própria norma. É de notar que a dita força de aperto não é puramente horizontal entre câmara móvel e câmara fixa transmitida pelo aro metálico. O aro fica apoiado, verticalmente, sobre dois apoios nas extremidades recebendo posteriormente o aperto pela câmara (ver Figura 2.9). É importante referir que as câmaras possuem um material resiliente onde apoia o aro garantindo total vedação. A espessura desse material foi dimensionada para que a força de aperto requerida pelas normas não danifique esse material resiliente durante o uso (Tadeu et al. 2008).

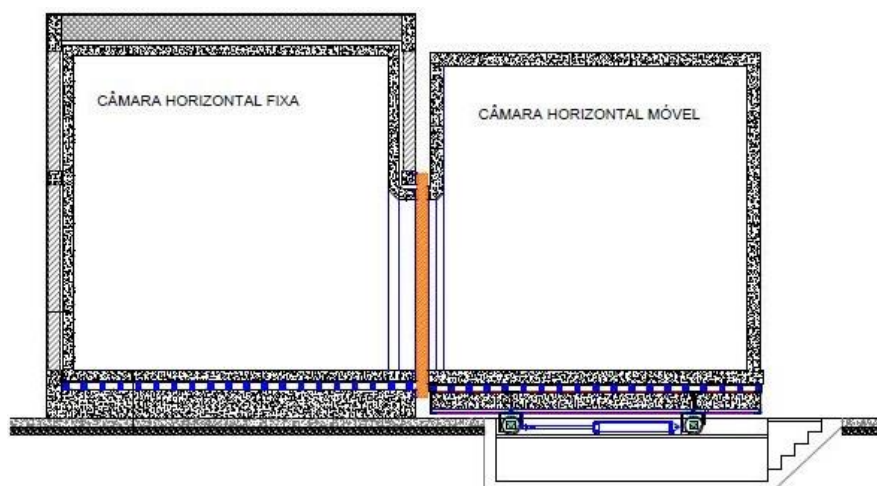


Figura 3.1 - Câmaras horizontais em corte (Tadeu et al. 2008)

O módulo hidráulico que pode ser observado na Figura 3.1 permite ainda o aperto da câmara com a pressão desejada.

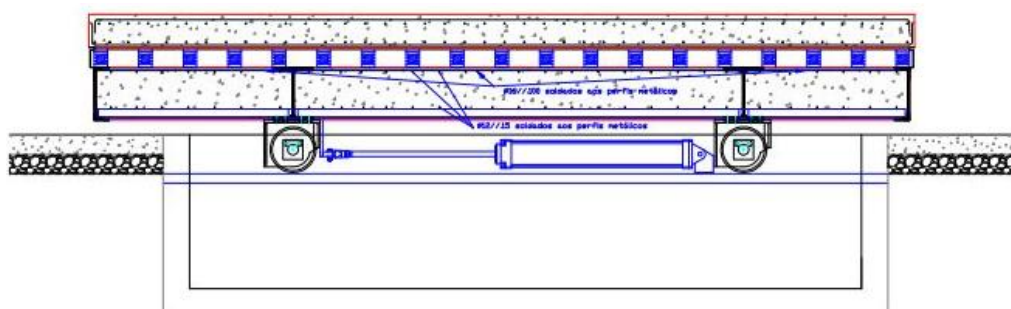


Figura 3.2 - Sistema de movimentação da câmara horizontal (Tadeu et al. 2008)

A entrada nas câmaras é feita com um sistema de duas portas maciças e que tiveram como exigência um isolamento mínimo de 54 dB a cada uma das duas portas. O sistema foi construído desta forma para evitar possíveis pontos fracos a nível da abertura das portas pois é sabido que o isolamento é sempre condicionado pelo ponto mais fraco do sistema. Para além disso, entre as duas portas existe um material resiliente nas partes laterais (Tadeu et al. 2008). A câmara acústica, para ensaios de absorção, está equipada com painéis difusores, refletores de policarbonato com espessura de 5 mm a fim de obter um campo reverberante. Estes encontram-se suspensos no teto das câmaras por cabos de aço a trabalhar à tração sob a ação do peso próprio dos painéis. Os cabos estão esticados com diferentes comprimentos e cada painel apresenta um raio de curvatura variável que permite a definição de superfícies côncavas e convexas que permitem produzir o campo reverberado pretendido (Tadeu et al. 2010).

Para os trabalhos no âmbito da absorção acústica apenas a câmara horizontal fixa é usada. No total, esta câmara apresenta um volume de 200,2 m<sup>3</sup>.

### 3.3 Metodologias experimentais utilizadas

A norma NP EN ISO 354:2007 prevê dois métodos para a medição de curvas de decaimento: o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva integrada (IPQ 2007).

Neste trabalho científico apenas o método do ruído interrompido foi utilizado na medição das curvas de decaimento. A base deste método consiste no uso de uma fonte omnidirecional normalizada para a emissão de um ruído na câmara reverberante. Ao fim de um dado tempo (suficiente para se estabelecer um campo difuso homogéneo) esse ruído é interrompido e é medido o decaimento do nível sonoro na câmara. O resultado desta metodologia é uma curva de decaimento com carácter estatístico. A validade estatística advém do fato de se fazer a média de várias curvas de decaimento medidos em condições de semelhança e num número de vezes adequado (IPQ 2007).

### 3.4 Sistema de aquisição de dados

No que diz respeito à aquisição de dados é importante referir que todo o sistema foi projetado para funcionar o mais remotamente possível. Todo o equipamento de cablagem foi pensado em fase de projeto. Assim, o equipamento de captação pode ser ligado diretamente a uma caixa que transmite os dados através de cabos para a sala de controlo (Figura 3.7 e Figura 3.11). Todo este equipamento destinado a aquisição de dados é da marca “*Brüel & Kjaer*”. Nele são conectados o microfone com a girafa rotativa usados dentro das câmaras, bem como a fonte sonora omnidirecional do modelo “*OMNIPower 4292*” (ver Figura 3.6). É importante perceber que quando uma ordem é dada à fonte omnidirecional no sentido de produzir um som, essa ordem é dada através de um computador e passa por um amplificador (ver Figura 3.4 e Figura 3.5) antes de ser reproduzida na fonte sonora. O equipamento que faz a aquisição do sinal é um sistema de aquisição multianalisador “*Pulse*” do modelo “*3560-C-T46*” e que contém cinco canais. Com um microfone do modelo “*4190*” montado na estação giratória faz-se a captação do sinal (ver Figura 3.9). Para confirmar o correto funcionamento da captação do microfone em cada ensaio, é usado um calibrador de sonómetro modelo “*4231*” (ver Figura 3.8). A estação giratória tem a propriedade de rodar 120° de cada vez que é acionada (ver Figura 3.12). Isto permite ao técnico operador controlar as posições de microfone durante o ensaio sem ter que se deslocar da sala de controlo à câmara e diminui as probabilidades de erro angular na rotação do microfone (ver Figura 3.10). Isto tem ainda a vantagem de diminuir as variações de humidade e temperatura dentro das câmaras pois permite diminuir o número de vezes que as portas são abertas em cada ensaio. O operador apenas tem que se deslocar ao interior da câmara para mudar a posição da fonte. Para além das vantagens que existem em termos técnicos de ensaio, isto permite diminuir o risco de dano no manuseamento do equipamento. Todo este material é de grande sensibilidade e possui um custo elevado.



Figura 3.4 – Amplificador (em baixo) e equalizador (em cima)



Figura 3.5 - Gerador/transdutor de sinais



Figura 3.6 - Fonte sonora omnidirecional



Figura 3.7 - Sala de controlo no decorrer de um ensaio



Figura 3.8 - Calibrador





Figura 3.9 - Microfone de captação



Figura 3.10 - Estação giratória



Figura 3.11 - Caixa de receção da sala de controlo



Figura 3.12 - Comando de rotação da  
estação giratória

### 3.5 Amostras ensaiadas

Foram ensaiados dois tipos de solução para tetos. A primeira solução era composta por painéis de espuma absorvente perfurados e dispostos formando alinhamentos. Estes painéis podem ser usados em tetos, como elementos discretos absorventes. Neste trabalho foi estudada a absorção destes painéis com espessuras diferentes. A outra solução era composta por elementos lamelares espaçados entre si. Foram ensaiadas lamelas perfuradas e lamelas lisas. As lamelas são metálicas e numa das faces são revestidas por espuma absorvente. Na

Figura 3.13 é apresentado um painel de espuma e na Figura 3.14 é apresentado um elemento lamela onde se observa a face revestida de espuma absorvente.

As amostras ensaiadas foram as seguintes:

- *Painel A – 40*: painel de espuma com 40 mm de espessura e dimensões (em metros) 1,2\*0,6;
- *Painel A – 60*: painel de espuma com 60 mm de espessura e dimensões (em metros) 1,2\*0,6;
- *Painel B – 40*: painel de espuma com 40 mm de espessura e dimensões (em metros) 1,2\*0,6.

Nota: Todos os painéis de espuma eram perfurados.

- *L 100 Lisas*: lamelas metálicas lisas, com espuma absorvente numa das faces, com 100 mm de altura;
- *L 100 Perfuradas*: lamelas metálicas perfuradas, com espuma absorvente numa das faces, com 100 mm de altura;
- *L 150 Lisas*: lamelas metálicas lisas, com espuma absorvente numa das faces, com 150 mm de altura;
- *L 150 Perfuradas*: lamelas metálicas perfuradas, com espuma absorvente numa das faces, com 150 mm de altura;

Nota: Todas as lamelas exibiam um comprimento de 2 m e uma espessura de 0,05 m.

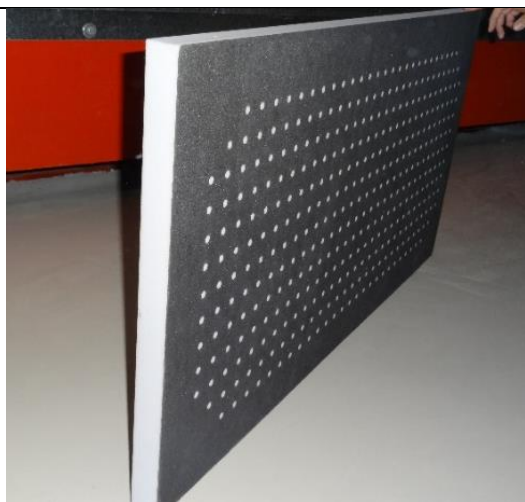


Figura 3.13 - Painel de espuma absorvente perfurado



Figura 3.14 - Elemento lamela de aço com espuma absorvente

Para os ensaios relativos a cada provete foram variados alguns parâmetros por forma não só a caraterizar o produto, como também a avaliar em que circunstâncias de aplicação se obteriam os melhores resultados em termos de absorção.

### 3.6 Descrição da montagem dos provetes e dos ensaios

Para os ensaios dos materiais em questão foi necessário o uso de uma moldura para simular o teto, como pode ser observado na Figura 3.15. Esta moldura é adaptável e pode formar duas áreas diferentes para o assentamento de material consoante as dimensões dos lados que se assumam.



Figura 3.15 - Moldura

A norma prevê a simulação do teto ensaiando os provetes no chão caso não seja possível a suspensão ou esta se torne inexecutável. No caso do ITeCons, uma das complicações neste aspeto é o fato de o teto da câmara acústica conter difusores necessários à obtenção do campo reverberado exigido pela norma.

As características de absorção de um material dependem da forma como este está disposto (IPQ 2007). Como tal, a norma prevê várias disposições possíveis para os ensaios dos provetes que podem ser adotadas.

No caso dos painéis de espuma absorvente (“*Baffles*”) adotou-se a montagem do tipo “J”, (indicado pela norma) que permite tratar os painéis como elementos discretos (IPQ 2007). A moldura e os respetivos alinhamentos de painel foram montados com as dimensões presentes na Figura 3.16 e seguindo as indicações da norma de acordo com o esquema da Figura 3.17.

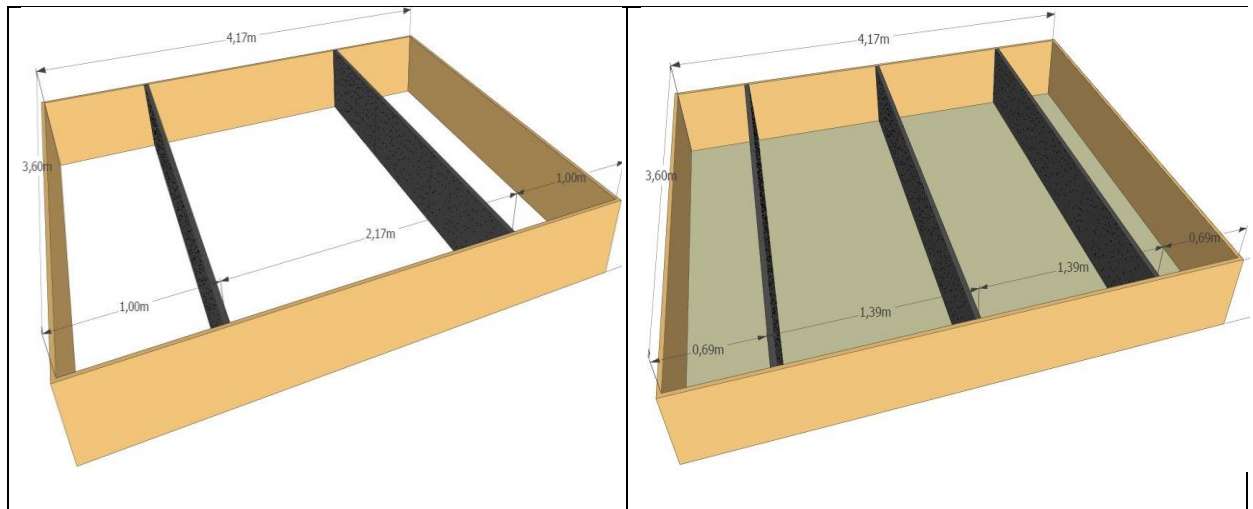


Figura 3.16 - Moldura para ensaio dos painéis com uma área de 15 m<sup>2</sup> para ensaios com 2 alinhamentos (Figura da esquerda) e 3 alinhamentos de painel (Figura da direita)

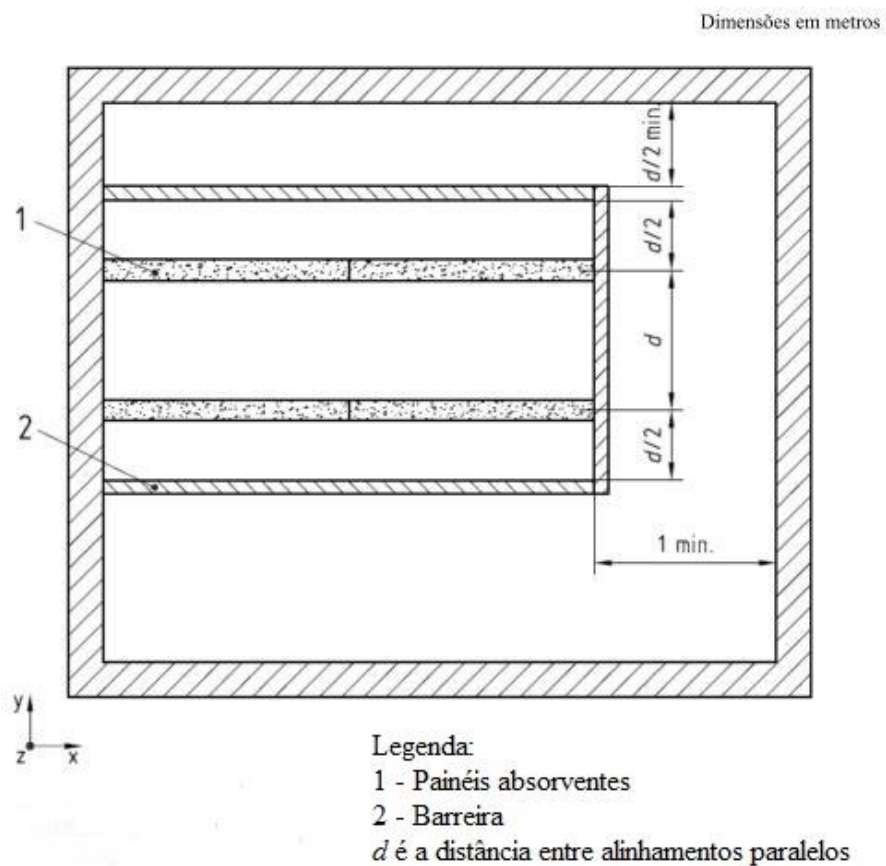


Figura 3.17 - Planta da montagem tipo “J” envolvida por uma barreira não absorvente segundo a norma (adaptado) (IPQ 2007)



Segundo a norma NP EN ISO 354: 2007 a configuração do tipo “J” prevê a possibilidade de usar dois lados da moldura encostados à parede da câmara ou apenas um (IPQ 2007). Para além disso é necessário garantir uma área de provete compreendida entre os 10 m<sup>2</sup> e os 15 m<sup>2</sup>. Como pode ser observado na Figura 3.18 e na Figura 3.19, optou-se por usar a moldura encostada apenas a um lado da câmara. Nestes ensaios o parâmetro que se fez variar foi o número de filas de painéis absorventes. A norma prevê montagens com dois e três alinhamentos de painéis. A área da moldura para estes ensaios foi de 15 m<sup>2</sup>. É de notar que o espaçamento entre alinhamentos de painel assume valores bastante distintos para 2 alinhamentos de painel e 3 alinhamentos de painel.



Figura 3.18 - Montagem com 2 alinhamentos de painel



Figura 3.19 - Montagem com 3 alinhamentos de painel

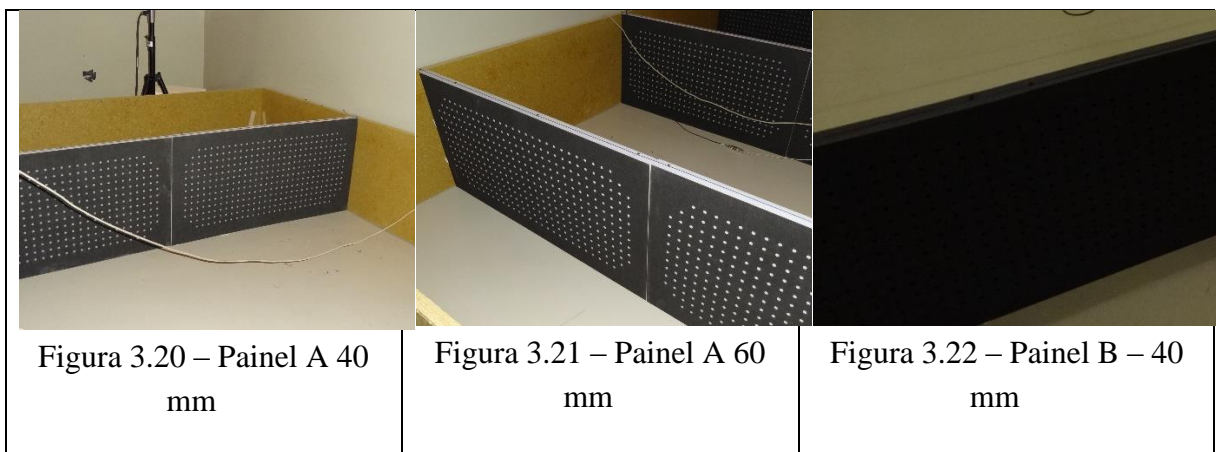
Previamente à execução dos ensaios a câmara reverberante foi aquecida por forma a obter-se uma temperatura superior a 15 °C e uma humidade relativa entre os 30% e os 90% (IPQ 2007). Foi sempre tido em conta que os ensaios da câmara vazia e com o provete tinham que ser realizados em condições semelhantes. Como o cálculo da área de absorção sonora equivalente é obtido utilizando os tempos de reverberação obtidos na câmara com e sem o provete (ensaio de câmara vazia), para garantir a validade da semelhança nos procedimentos, era imperativo grande cuidado com os ensaios de câmara vazia, tendo sempre em conta as grandes flutuações térmicas diárias. Assim, para cada dia em que eram realizados ensaios, um novo ensaio de câmara vazia era realizado. Os cubos de betão armado que podem ser observados nas figuras suprajacentes foram usados nos ensaios com o simples propósito de obter a altura prevista na norma para o microfone. Assim sendo, era apenas necessário garantir que os blocos de betão permanecessem nos ensaios de câmara vazia para poderem ser contabilizados nas diferenças de tempos de reverberação.

Cada ensaio contempla três medições (decaimentos) para cada posição de microfone, três posições de microfone rodadas de 120° entre si e quatro posições de fonte sonora. Foram

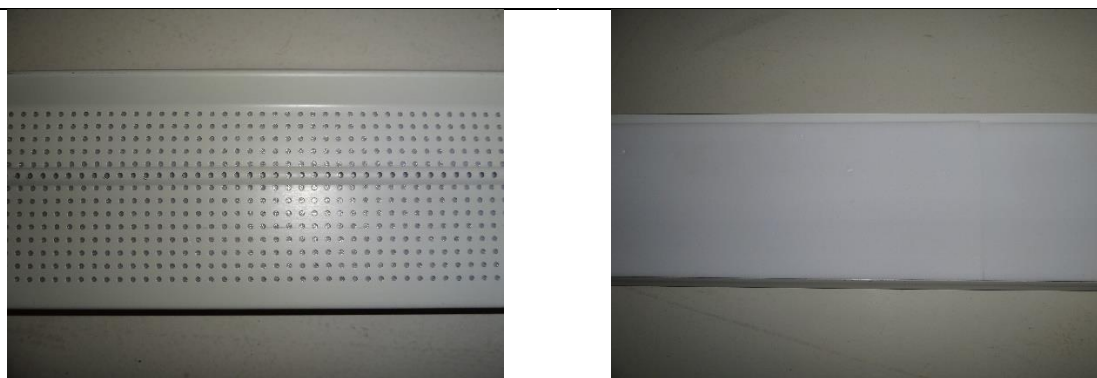
medidos, no total, trinta e seis decaimentos por cada ensaio. O mesmo procedimento de ensaio foi executado para os dois e três alinhamentos de painéis. A montagem do tipo “J” permite o tratamento de elementos discretos, sendo por isso importante referir que cada alinhamento possui três painéis. Assim, nos ensaios com dois alinhamentos de painéis foram usados seis painéis e nos ensaios de três alinhamentos de painéis foram usados nove. Para os provetes do tipo painel absorvente perfurado podem ser observados nas Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 todos os modelos ensaiados. Não houve qualquer espaço de ar entre cada painel de cada alinhamento. Caso isso acontecesse haveria o risco de estar a ser aumentada a área de absorção criando resultados menos reais em termos de absorção.

A lista de todos os ensaios realizados com os provetes do tipo “*Baffle*” é a seguinte:

- Painel A - 40 mm com 3 alinhamentos de painéis;
- Painel A - 40 mm com 2 alinhamentos de painéis;
  
- Painel A - 60 mm com 3 alinhamentos de painéis;
- Painel A - 60 mm com 2 alinhamentos de painéis;
  
- Painel B - 40 mm com 3 alinhamentos de painéis;
- Painel B - 40 mm com 2 alinhamentos de painéis.



Em termos de provetes do tipo lamela de aço com espuma absorvente os modelos ensaiados foram os que constam nas Figuras 3.23 a 3.26, inclusive:



a)

b)

Figura 3.23 - Lamelas L150 perfuradas. a) vista da face metálica. b) vista da face absorvente



a)

b)

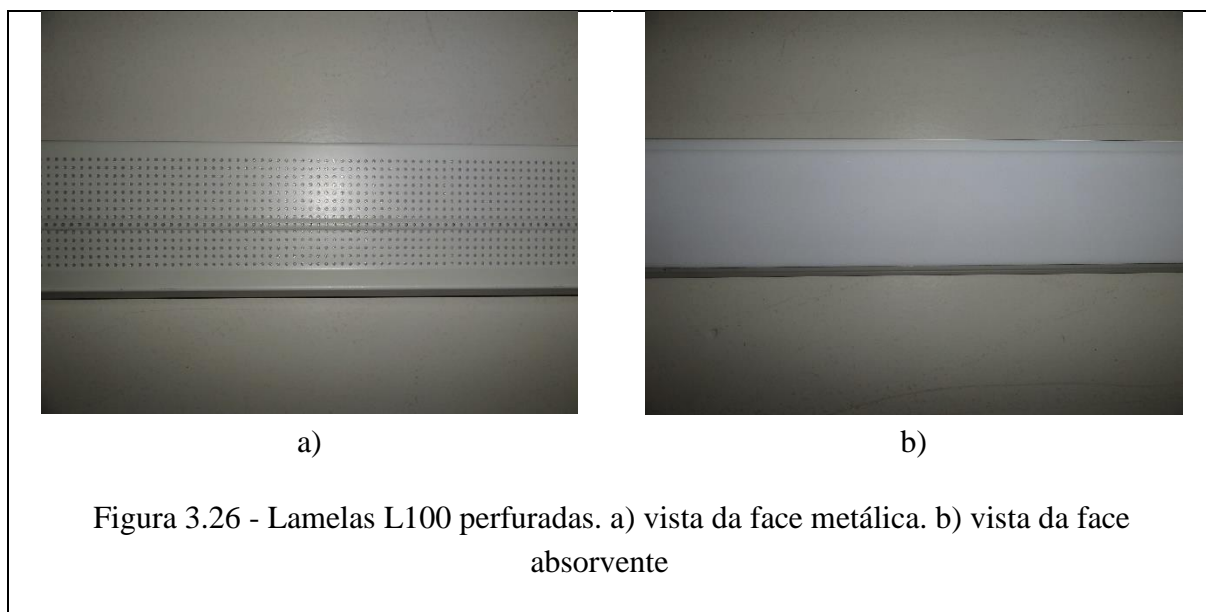
Figura 3.24 - Lamelas L150 lisas. a) vista da face metálica. b) vista da face absorvente



a)

b)

Figura 3.25 - Lamelas L100 lisas. a) vista da face metálica. b) vista da face absorvente



Embora se tenha usado o sistema de moldura onde se fixaram as lamelas através de perfis de aço, as dimensões usadas para a moldura foram modificadas relativamente aos “*Baffles*”, para obter uma configuração com uma área de  $12 \text{ m}^2$  de acordo com a Figura 3.27. O tipo de montagem usado nestes ensaios foi o “tipo E”, de acordo com a norma NP EN ISO 354:2007, para se obter um coeficiente de absorção sonora por unidade de área como se obtém para tetos falsos (IPQ 2007).

É importante ter em consideração que para este tipo a obtenção do seu coeficiente de absorção sonora não foi feita tratando as lamelas como elementos discretos (como no caso dos “*Baffles*”) mas sim tratando o provete contendo uma determinada área de absorção total utilizada para computar o valor do coeficiente de absorção sonora do material.

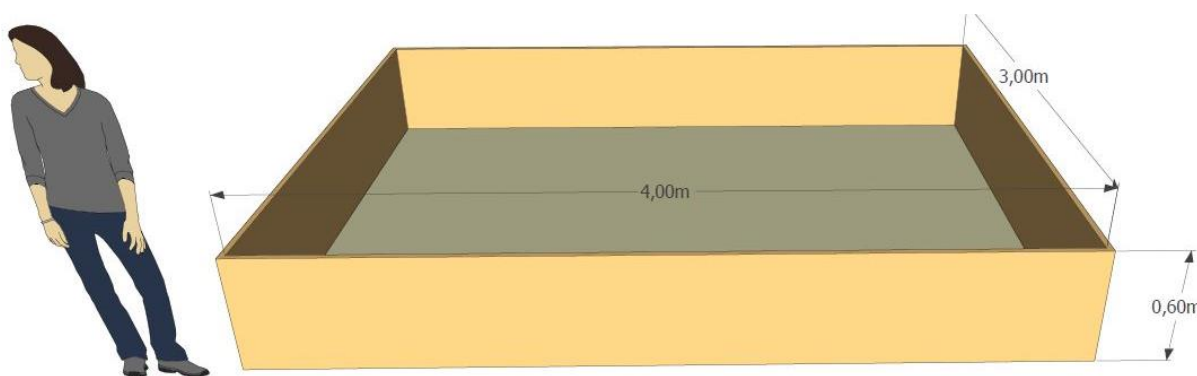


Figura 3.27 - Moldura para ensaio das lamelas

Para os ensaios destes provetes variaram-se dois parâmetros:



- O tamanho da caixa-de-ar;
- O espaçamento entre filas de lamelas.

A Figura 3.28 serve como exemplo fotográfico de uma montagem executada para ensaios de lamelas.



Figura 3.28 - Montagem para ensaio de lamelas

Para proceder à montagem dos materiais a ser ensaiados na moldura, foi necessário proceder à fixação dos perfis em aço que servem de suporte às lamelas. Esses perfis são desenvolvidos pela própria empresa e foram fornecidos para que os ensaios fossem o mais fiáveis possível. Para fixar os perfis foram cortados com a máxima precisão blocos de madeira com alturas de dez e trinta centímetros. Estas foram as diferentes alturas de caixa-de-ar experimentadas. Como os provetes para simular o teto foram montados no chão, a caixa-de-ar correspondia exatamente à altura do chão a que as lamelas estavam montadas. Para obter a montagem da forma pretendida foram fixados os blocos de madeira à moldura e os perfis. Para garantir estabilidade à montagem, introduziram-se blocos a meio vão onde se aparafusaram os perfis. Estes blocos serviram apenas como apoio a trabalhar à compressão sob o peso próprio da estrutura de aço com as lamelas e não estavam fixos ao chão da câmara. As lamelas estavam viradas para cima a partir do perfil para simular a mesma orientação em relação ao perfil relativamente à montagem real. Também nestes ensaios se garantiu a altura do microfone apoiando a estação giratória em blocos de betão que permaneceram na câmara em todos os ensaios. Para todos os ensaios com os diferentes espaçamentos entre lamelas foi garantida a perfeita exposição da área de espuma absorvente. A moldura foi colocada no meio da câmara reverberante e rodada para que a distância mínima ao ponto mais próximo das paredes da câmara fosse de 1,04 m.

Em termos de medições, em cada ensaio foram contempladas três medições para cada posição de microfone, três posições de microfone rodadas de 120° entre si e quatro posições de fonte sonora. Foram, portanto, medidos no total, trinta e seis decaimentos por cada ensaio. Este procedimento foi usado para todos os ensaios de lamelas.

A lista de todos os ensaios realizados com lamelas é a seguinte:

Quadro 3.1 - Lista de provetes ensaiados

Referência	Altura da lamela mm	Espaçamento entre elementos mm	Altura da caixa-de-ar cm	Superfície
L100e50c10L	100	50	10	Lisa
L100e50c10P	100	50	10	Perfurada
L100e100c10L	100	100	10	Lisa
L100e100c10P	100	100	10	Perfurada
L150e100c10L	150	100	10	Lisa
L150e100c10P	150	100	10	Perfurada
L100e150c10L	100	150	10	Lisa
L100e150c10P	100	150	10	Perfurada
L150e150c10L	150	150	10	Lisa
L150e150c10P	150	150	10	Perfurada
L100e200c10L	100	200	10	Lisa
L100e200c10P	100	200	10	Perfurada

Quadro 3.1 - Lista de provetes ensaiados (Continuação)

Referência	Altura da lamela mm	Espaçamento entre elementos mm	Altura da caixa-de-ar cm	Superfície
L150e50c30L	150	50	30	Lisa
L150e50c30P	150	50	30	Perfurada
L100e100c30L	100	100	30	Lisa
L100e100c30P	100	100	30	Perfurada
L150e100c30L	150	100	30	Lisa
L150e100c30P	150	100	30	Perfurada
L100e150c30L	100	150	30	Lisa
L100e150c30P	100	150	30	Perfurada
L150e150c30L	150	150	30	Lisa
L150e150c30P	150	150	30	Perfurada

Destes ensaios, foi possível obter uma caracterização da absorção dos produtos, comparar as diferentes soluções e analisar de que forma é que os parâmetros que foram feitos variar nos ensaios influenciam o comportamento das soluções.

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Na norma utilizada para os ensaios de câmara reverberante, está estipulado que os resultados das medições acústicas em câmara reverberante devem ser apresentados nas seguintes bandas de um terço de oitava com as frequências centrais indicadas no Quadro 4.1 (IPQ 2007):

Quadro 4.1 - Bandas de terços de oitava segundo a norma (IPQ 2007)

Bandas de terços de oitava Hz					
100	125	160	200	250	315
400	500	630	800	1000	1250
1600	2000	2500	3150	4000	5000

### 4.1 Processo geral de cálculo da absorção sonora

O sistema de aquisição da câmara reverberante que foi anteriormente descrito permite a obtenção dos tempos de reverberação efetuando-se medições com a câmara sem provete (câmara vazia) e com provete procedendo-se, posteriormente, ao cálculo da área de absorção sonora equivalente referente a cada situação. O valor obtido representa o tempo de reverberação associado somente ao provete de material em análise. Torna-se agora possível obter os parâmetros de interesse na caracterização da absorção sonora do material em questão. Trata-se da área de absorção sonora equivalente por elemento no caso dos provetes ensaiados como elementos discretos (“*Baffles*”) e do coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) no caso dos elementos distribuídos (lamelas). A norma NP EN ISO 354:2007 exige que o cálculo feito para a área de absorção equivalente para a câmara reverberante vazia utilizada nos ensaios seja obtida através da seguinte expressão:

$$A_1 = \frac{53,3 V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad [10]$$

Onde  $A_1$  representa a área de absorção equivalente para a câmara reverberante vazia em  $m^2$ ,  $V$  representa o volume da câmara reverberante vazia em  $m^3$ ,  $c$  é a velocidade de propagação do som no ar em m/s,  $T_1$  é representada o tempo de reverberação da câmara vazia em s e  $m_1$  é o coeficiente de atenuação devido à presença do ar em metros recíprocos (IPQ 2007).

Este coeficiente pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$m = \frac{\alpha}{10 \cdot \log e} \quad [11]$$

Note-se que nesta expressão  $\alpha$ , não representa o coeficiente de absorção sonora mas sim o coeficiente de atenuação atmosférica.

A velocidade de propagação do ar é obtida pela seguinte expressão:

$$c = (331 + 0,6t \text{ /}^\circ\text{C}) \quad [12]$$

Note-se que a velocidade de propagação do som no ar obtida por esta expressão vem em m/s e apresenta como limites de aplicabilidade a condição de  $t$  (temperatura do ar em  $^\circ\text{C}$ ) se encontrar num intervalo entre  $15^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$  (IPQ 2007).

De modo análogo, a norma estipula que o cálculo da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante contendo o provete de ensaio deve ser feito através da expressão:

$$A_2 = \frac{53,3 V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad [13]$$

Onde  $A_2$  representa a área de absorção equivalente para a câmara reverberante com o provete de ensaio em  $\text{m}^2$ ,  $V$  representa o volume da câmara reverberante vazia em  $\text{m}^3$ ,  $c$  é a velocidade de propagação do som no ar em m/s,  $T_1$  representa o tempo de reverberação da câmara reverberante com o provete de ensaio em s e  $m_2$  é o coeficiente de atenuação devido à presença do ar em metros recíprocos. Aqui  $m_2$  é calculado da mesma forma que  $m_1$  e, por conseguinte, a velocidade de propagação do som no ar é calculada da mesma forma que anteriormente foi descrita (IPQ 2007).

O cálculo da área de absorção sonora equivalente é previsto na norma NP EN ISO 354:2007 pela seguinte expressão:

$$A_T = A_2 - A_1 = 53,3 V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad [14]$$

Onde  $c_1$  é a velocidade do som no ar à temperatura  $t_1$  em  $^\circ\text{C}$ ,  $c_2$  é a velocidade do som no ar à temperatura  $t_2$  calculadas através da expressão [12] e  $A_2$ ,  $A_1$ ,  $V$ ,  $m_2$ ,  $m_1$ ,  $T_1$  e  $T_2$  tomam o mesmo significado que nas expressões [10], [11] e [13] (IPQ 2007).

## 4.2 Metodologia de cálculo para as soluções de painéis absorventes

Como foi referido anteriormente, para os painéis absorventes, foi utilizada uma montagem “tipo J”, segundo a norma NP EN ISO 354:2007. Este tipo de montagem permite que os painéis absorventes sejam tratados como elementos discretos (ver ponto 6.2.2.1 da norma) (IPQ 2007).

Este tipo de montagem e análise do provete permite executar de uma forma muito prática o cálculo da área de absorção sonora equivalente de cada elemento discreto. Segundo a norma, o resultado obtido para elementos discretos, que é o caso aplicável aos painéis absorventes, deve ser expresso em termos de área de absorção sonora equivalente por cada elemento discreto ( $A_{obj}$ ) (IPQ 2007). Para obter este resultado divide-se  $A_T$  pelo número de elementos utilizados no ensaio.

Para os provetes tratados como elementos discretos (painéis absorventes) foram obtidos os resultados experimentais que podem ser observados no Quadro 4.2.

Dos resultados apresentados no Quadro 4.2 construiu-se o Gráfico G.1 no qual constam as curvas de absorção sonora para todos os provetes ensaiados.

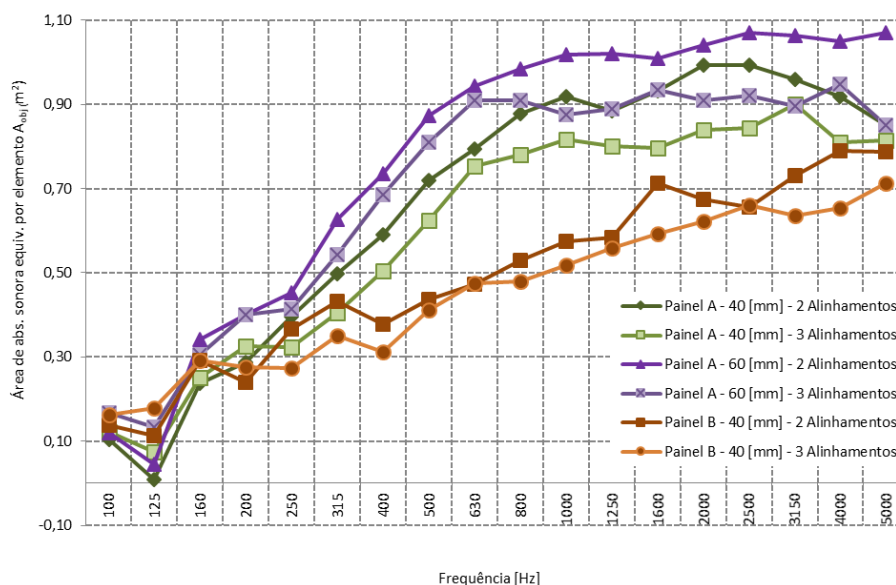


Gráfico G.1 - Curvas da área de absorção sonora para todos os painéis absorventes

Quadro 4.2 - Resultados dos ensaios com provetes de painéis de espuma absorvente

Freq. Hz	Painel A - 40 mm						Painel A - 60 mm						Painel B - 40 mm					
	2 Alinhamentos		3 Alinhamentos		3 Alinhamentos		2 Alinhamentos		3 Alinhamentos		3 Alinhamentos		2 Alinhamentos		3 Alinhamentos		3 Alinhamentos	
	T1 [s]	T2 [s]	A <sub>obj</sub>	T1 [s]	T2 [s]	A <sub>obj</sub>	T1 [s]	T2 [s]	A <sub>obj</sub>	T1 [s]	T2 [s]	A <sub>obj</sub>	T1 [s]	T2 [s]	A <sub>obj</sub>	T1 [s]	T2 [s]	A <sub>obj</sub>
100	9,74	8,23	0,1	9,37	7,14	0,12	9,74	8,03	0,12	9,37	6,55	0,17	9,37	7,58	0,14	9,37	6,61	0,16
125	9,09	8,95	0,01	9,33	7,84	0,07	9,09	8,46	0,04	9,33	6,97	0,13	9,33	7,83	0,11	9,33	6,43	0,18
160	7,44	5,64	0,24	7,64	5,01	0,25	7,44	5,09	0,34	7,64	4,67	0,3	7,64	5,43	0,29	7,64	4,75	0,29
200	6,22	4,7	0,29	6,09	3,95	0,33	6,22	4,29	0,4	6,09	3,66	0,4	6,09	4,81	0,24	6,09	4,18	0,27
250	6,14	4,26	0,4	6,09	3,96	0,32	6,14	4,08	0,45	6,09	3,61	0,41	6,09	4,33	0,37	6,09	4,19	0,27
315	5,94	3,86	0,5	5,99	3,6	0,41	5,94	3,54	0,63	5,99	3,18	0,54	5,99	4,07	0,43	5,99	3,81	0,35
400	6,94	3,97	0,59	6,79	3,51	0,5	6,94	3,6	0,73	6,79	2,99	0,69	6,79	4,63	0,38	6,79	4,3	0,31
500	7,51	3,79	0,72	7,44	3,28	0,63	7,51	3,42	0,87	7,44	2,82	0,81	7,44	4,68	0,44	7,44	4,06	0,41
630	7,61	3,63	0,79	7,72	2,99	0,75	7,61	3,3	0,94	7,72	2,65	0,91	7,72	4,64	0,47	7,72	3,87	0,47
800	7,25	3,36	0,88	6,99	2,81	0,78	7,25	3,15	0,99	6,99	2,56	0,91	6,99	4,18	0,53	6,99	3,65	0,48
1000	6,72	3,16	0,92	6,69	2,69	0,82	6,72	2,99	1,02	6,69	2,58	0,88	6,69	3,93	0,58	6,69	3,44	0,52
1250	6,06	3,07	0,88	5,99	2,59	0,8	6,06	2,85	1,02	5,99	2,44	0,89	5,99	3,66	0,58	5,99	3,13	0,56
1600	5,48	2,84	0,93	5,53	2,51	0,8	5,48	2,73	1,01	5,53	2,3	0,93	5,53	3,22	0,71	5,53	2,92	0,59
2000	4,71	2,55	0,99	4,66	2,25	0,84	4,71	2,49	1,04	4,66	2,16	0,91	4,66	2,96	0,67	4,66	2,6	0,62
2500	3,67	2,21	0,99	3,67	1,99	0,84	3,67	2,14	1,07	3,67	1,91	0,92	3,67	2,55	0,66	3,67	2,21	0,66
3150	2,94	1,94	0,96	2,93	1,7	0,9	2,94	1,87	1,06	2,93	1,71	0,9	2,93	2,11	0,73	2,93	1,94	0,64
4000	2,46	1,74	0,92	2,5	1,61	0,81	2,46	1,67	1,05	2,5	1,52	0,95	2,5	1,84	0,79	2,5	1,73	0,65
5000	1,95	1,5	0,85	1,97	1,37	0,82	1,95	1,42	1,07	1,97	1,35	0,85	1,97	1,54	0,79	1,97	1,42	0,71
A <sub>obj</sub> Max m <sup>2</sup>			0,99			0,9			1,07			0,95			0,79			0,71
A <sub>obj</sub> Min m <sup>2</sup>			0,01			0,07			0,04			0,13			0,11			0,16

### 4.3 Metodologia de cálculo para as soluções de lamelas

Relativamente aos provetes de lamelas, segundo a norma NP EN ISO 354:2007 estes são tratados como elementos regularmente distribuídos. Como já foi referido anteriormente, a montagem que foi utilizada para os ensaios destes provetes foi do “tipo E”.

Para os elementos absorventes planos ou para os elementos regularmente distribuídos (é o caso aplicável nos provetes de lamelas) é calculado o coeficiente de absorção sonora (IPQ 2007). Após a aplicação das expressões [10], [11], [12], [13] e [14] obteve-se o coeficiente de absorção sonora para os provetes de lamelas através da seguinte expressão:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad [15]$$

Onde  $A_T$  é a área de absorção sonora equivalente obtida através da Expressão [14] expressa em  $m^2$  e  $S$  é a área do provete ensaiado expressa em  $m^2$  (IPQ 2007).

Para os provetes tratados como elementos distribuídos regularmente (lamelas com espuma absorvente) foram obtidos os resultados experimentais que podem ser observados nos Quadros 4.3 a 4.4 (Continuação)

Dos resultados apresentados nos Quadros 4.3 a 4.4 (Continuação) construíram-se os Gráficos G.2 e G.3 onde constam as curvas de absorção sonora para os provetes com caixa-de-ar de 10 cm e de 30 cm, respetivamente.



Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios com lamelas de aço de 100 mm de altura com espuma absorvente

Freq. Hz	L100e50c10L		L100e50c10P		L100e100c10L		L100e100c10P		L100e150c10L		L100e150c10P				
	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$			
100	11,09	10,16	0,02	9,78	10,15	0,00	9,60	8,23	0,05	11,09	9,91	0,03	9,78	9,97	0,00
125	10,81	8,11	0,08	9,88	9,38	0,01	8,87	8,04	0,03	8,87	8,61	0,07	9,88	9,47	0,01
160	8,17	6,86	0,06	8,27	7,02	0,06	7,24	6,70	0,03	7,24	7,64	0,02	8,27	7,47	0,04
200	7,07	5,41	0,12	6,73	5,79	0,07	6,61	5,84	0,06	6,61	6,33	0,05	6,73	6,02	0,05
250	6,81	5,14	0,13	6,41	4,92	0,13	6,37	5,66	0,05	6,37	5,68	0,08	6,41	5,34	0,09
315	6,68	4,71	0,17	6,39	4,75	0,15	6,10	5,27	0,07	6,10	5,72	0,07	6,39	5,69	0,05
400	7,77	4,84	0,22	7,38	4,76	0,21	7,42	5,43	0,14	7,42	6,45	0,07	7,38	5,97	0,09
500	8,20	4,92	0,22	7,81	4,86	0,21	7,90	5,90	0,12	7,90	6,35	0,10	7,81	6,05	0,10
630	8,04	4,74	0,24	7,73	4,67	0,23	7,54	5,90	0,10	7,54	6,15	0,11	7,73	6,13	0,09
800	7,38	4,24	0,28	6,96	4,27	0,25	7,02	5,34	0,12	7,02	5,66	0,11	6,96	5,60	0,10
1000	6,80	3,75	0,33	6,48	3,65	0,33	6,75	4,62	0,19	6,75	5,10	0,13	6,48	4,98	0,13
1250	5,99	3,07	0,44	6,20	3,03	0,47	6,24	3,80	0,28	6,24	4,16	0,20	6,20	3,90	0,26
1600	5,19	2,65	0,51	5,39	2,57	0,56	5,44	3,17	0,36	5,44	3,32	0,30	5,39	3,41	0,30
2000	4,64	2,30	0,60	4,65	2,29	0,61	4,82	2,60	0,49	4,82	3,03	0,32	4,65	3,01	0,32
2500	3,65	1,88	0,71	3,75	1,88	0,73	3,93	2,11	0,61	3,93	2,27	0,46	3,75	2,21	0,51
3150	2,93	1,66	0,72	3,08	1,67	0,76	3,28	1,89	0,62	3,28	1,93	0,49	3,08	1,92	0,54
4000	2,40	1,45	0,75	2,66	1,47	0,84	2,79	1,70	0,63	2,79	1,69	0,48	2,66	1,74	0,55
5000	1,95	1,28	0,74	2,17	1,33	0,80	2,34	1,54	0,61	2,34	1,45	0,49	2,17	1,52	0,54
$\alpha_s$ Max			0,75			0,84			0,63			0,49			0,55
$\alpha_s$ Min			0,02			0,00			0,03			0,02			0,00

Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios com lamelas de aço de 100 mm de altura com espuma absorvente (Continuação)

Freq. Hz	L100e200c10L		L100e200c10P		L100e100c30L		L100e100c30P		L100e150c30L		L100e150c30P				
	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$			
100	11,09	10,28	0,02	9,78	9,77	0,00	9,56	8,85	0,02	10,03	9,99	0,00	10,03	9,02	0,03
125	10,81	9,56	0,03	9,88	9,80	0,00	8,86	7,35	0,06	8,36	7,47	0,04	8,36	8,26	0,00
160	8,17	7,77	0,02	8,27	7,40	0,04	7,15	6,85	0,02	7,03	6,59	0,03	7,03	6,74	0,02
200	7,07	6,51	0,03	6,73	6,05	0,05	6,88	5,96	0,06	6,47	6,27	0,01	6,47	6,06	0,03
250	6,81	5,85	0,07	6,41	5,21	0,10	6,38	5,91	0,03	6,42	6,08	0,02	6,42	5,95	0,03
315	6,68	6,00	0,05	6,39	5,79	0,05	6,13	5,64	0,04	6,17	5,81	0,03	6,17	5,82	0,03
400	7,77	6,18	0,09	7,38	6,24	0,07	7,26	5,91	0,09	7,26	5,65	0,11	6,98	6,14	0,05
500	8,20	6,62	0,08	7,81	6,27	0,09	7,65	6,01	0,10	7,65	5,66	0,13	7,46	6,18	0,08
630	8,04	6,38	0,09	7,73	6,40	0,07	7,69	5,17	0,17	7,72	5,86	0,12	7,72	5,74	0,12
800	7,38	5,89	0,09	6,96	5,72	0,09	7,52	4,82	0,21	7,09	5,38	0,13	7,09	5,16	0,15
1000	6,80	5,18	0,13	6,48	5,02	0,12	6,93	4,43	0,22	6,68	4,91	0,15	6,68	4,74	0,17
1250	5,99	4,25	0,19	6,20	4,15	0,22	6,09	3,89	0,25	6,11	4,10	0,23	6,11	3,90	0,26
1600	5,19	3,53	0,25	5,39	3,56	0,26	5,54	3,41	0,31	5,45	3,38	0,32	5,45	3,30	0,33
2000	4,64	3,00	0,32	4,65	3,03	0,32	4,74	2,81	0,40	4,78	3,12	0,32	4,78	2,95	0,36
2500	3,65	2,43	0,38	3,75	2,47	0,38	3,80	2,25	0,50	3,89	2,41	0,45	3,89	2,26	0,51
3150	2,93	2,03	0,42	3,08	2,05	0,45	3,17	1,91	0,57	3,23	2,07	0,49	3,23	2,01	0,52
4000	2,40	1,75	0,43	2,66	1,86	0,45	2,70	1,72	0,59	2,79	1,80	0,57	2,79	1,77	0,57
5000	1,95	1,52	0,40	2,17	1,62	0,43	2,23	1,52	0,58	2,31	1,68	0,46	2,31	1,64	0,49
$\alpha_s$ Max			0,43			0,45			0,59			0,60			0,57
$\alpha_s$ Min			0,02			0,00			0,02			0,02			0,00

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios com lamelas de aço de 150 mm de altura com espuma absorvente

Freq. Hz	L150e50c30L		L150e50c30P		L150e100c30L		L150e100c30P		L150e150c30L		L150e150c30P				
	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$	T1 [s]	T2 [s]	$\alpha_s$			
100	10,10	9,97	0,00	10,10	9,35	0,02	9,56	9,30	0,01	9,56	8,81	0,02	10,03	9,15	0,03
125	9,63	8,49	0,04	9,63	8,65	0,03	8,86	7,97	0,03	8,86	7,13	0,08	8,36	7,69	0,03
160	7,92	6,01	0,11	7,92	5,95	0,12	7,15	6,90	0,01	7,15	6,23	0,06	7,03	6,50	0,03
200	6,85	5,01	0,15	6,85	5,03	0,15	6,88	5,65	0,09	6,88	5,73	0,08	6,47	5,93	0,04
250	6,36	4,90	0,13	6,36	4,48	0,18	6,38	5,11	0,11	6,38	4,95	0,12	6,42	5,62	0,06
315	6,44	4,54	0,18	6,44	4,41	0,20	6,13	5,20	0,08	6,13	4,90	0,11	6,17	5,36	0,07
400	7,13	4,35	0,25	7,13	4,34	0,25	7,26	5,43	0,13	7,26	5,25	0,15	6,98	5,70	0,09
500	7,45	4,20	0,29	7,45	4,41	0,26	7,65	5,26	0,16	7,65	5,04	0,19	7,46	5,52	0,13
630	7,39	3,68	0,38	7,39	3,52	0,41	7,69	4,63	0,24	7,69	4,54	0,25	7,72	5,13	0,18
800	6,95	3,43	0,41	6,95	3,29	0,44	7,52	4,19	0,29	7,52	4,14	0,30	7,09	4,72	0,19
1000	6,49	2,88	0,53	6,49	2,99	0,50	6,93	3,87	0,31	6,93	3,86	0,32	6,68	4,19	0,25
1250	5,97	2,56	0,62	5,97	2,54	0,62	6,09	3,36	0,37	6,09	3,30	0,38	6,11	3,51	0,33
1600	5,24	2,32	0,66	5,24	2,31	0,67	5,54	2,72	0,52	5,54	2,75	0,51	5,45	2,87	0,46
2000	4,61	2,18	0,67	4,61	2,12	0,70	4,74	2,41	0,56	4,74	2,39	0,57	4,78	2,50	0,53
2500	3,68	1,83	0,76	3,68	1,80	0,78	3,80	1,97	0,67	3,80	1,94	0,69	3,89	2,07	0,62
3150	3,08	1,62	0,81	3,08	1,60	0,82	3,17	1,81	0,65	3,17	1,73	0,72	3,23	1,80	0,68
4000	2,57	1,45	0,83	2,57	1,49	0,77	2,70	1,64	0,66	2,70	1,59	0,72	2,79	1,70	0,64
5000	2,11	1,34	0,75	2,11	1,38	0,69	2,23	1,45	0,67	2,23	1,43	0,69	2,31	1,54	0,60
$\alpha_s$ Max			0,83			0,8			0,67			0,72			0,60
$\alpha_s$ Min			0,00			0,02			0,01			0,02			0,01

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios com lamelas de aço de 150 mm de altura com espuma absorvente (Continuação)

Freq. Hz	L150e100c10L		L150e100c10P		L150e150c10L		L150e150c10P	
	T1 [s]	T2 [s]	T1 [s]	T2 [s]	T1 [s]	T2 [s]	T1 [s]	T2 [s]
100	9,60	8,05	9,60	8,27	10,94	9,13	10,94	9,19
125	8,87	8,05	8,87	8,76	9,55	8,55	9,55	8,61
160	7,24	6,39	7,24	6,41	7,74	7,06	7,74	6,90
200	6,61	5,28	6,61	5,22	6,72	5,75	6,72	5,61
250	6,37	5,20	6,37	4,87	6,21	5,67	6,21	5,46
315	6,10	5,12	6,10	4,95	6,30	5,53	6,30	5,56
400	7,42	5,35	7,42	5,24	7,65	5,62	7,65	5,61
500	7,90	5,52	7,90	5,49	7,93	6,25	7,93	6,08
630	7,54	5,36	7,54	5,23	7,63	5,81	7,63	5,75
800	7,02	4,59	7,02	4,51	7,29	5,28	7,29	5,10
1000	6,75	3,94	6,75	3,86	6,93	4,44	6,93	4,30
1250	6,24	3,45	6,24	3,29	6,33	3,67	6,33	3,65
1600	5,44	2,83	5,44	2,71	5,60	3,09	5,60	3,02
2000	4,82	2,34	4,82	2,35	4,88	2,73	4,88	2,72
2500	3,93	1,97	3,93	1,97	3,92	2,22	3,92	2,12
3150	3,28	1,82	3,28	1,79	3,29	1,94	3,29	1,85
4000	2,79	1,64	2,79	1,59	2,79	1,80	2,79	1,70
5000	2,34	1,48	2,34	1,46	2,29	1,53	2,29	1,54
$\alpha_s$ Max	0,69		0,75		0,60		0,65	
$\alpha_s$ Min	0,03		0,00		0,03		0,03	

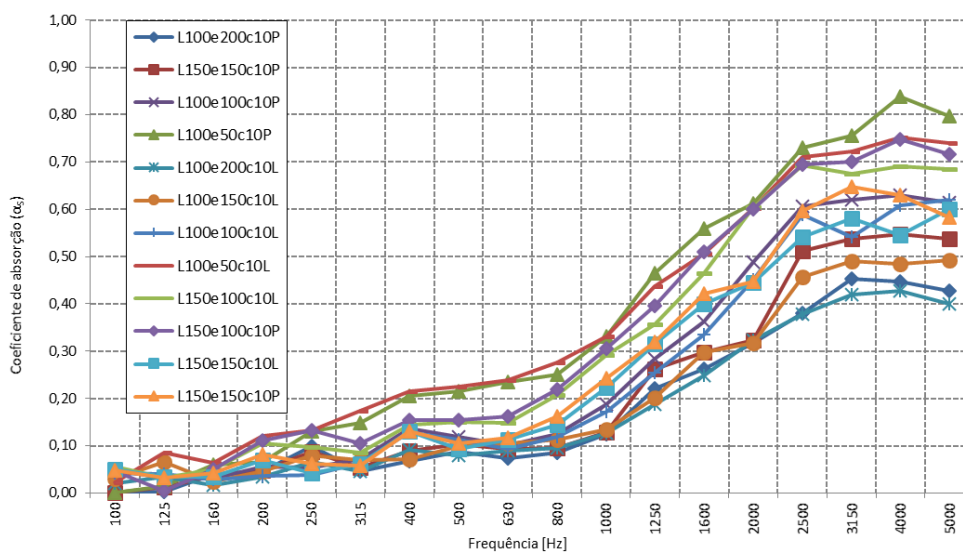
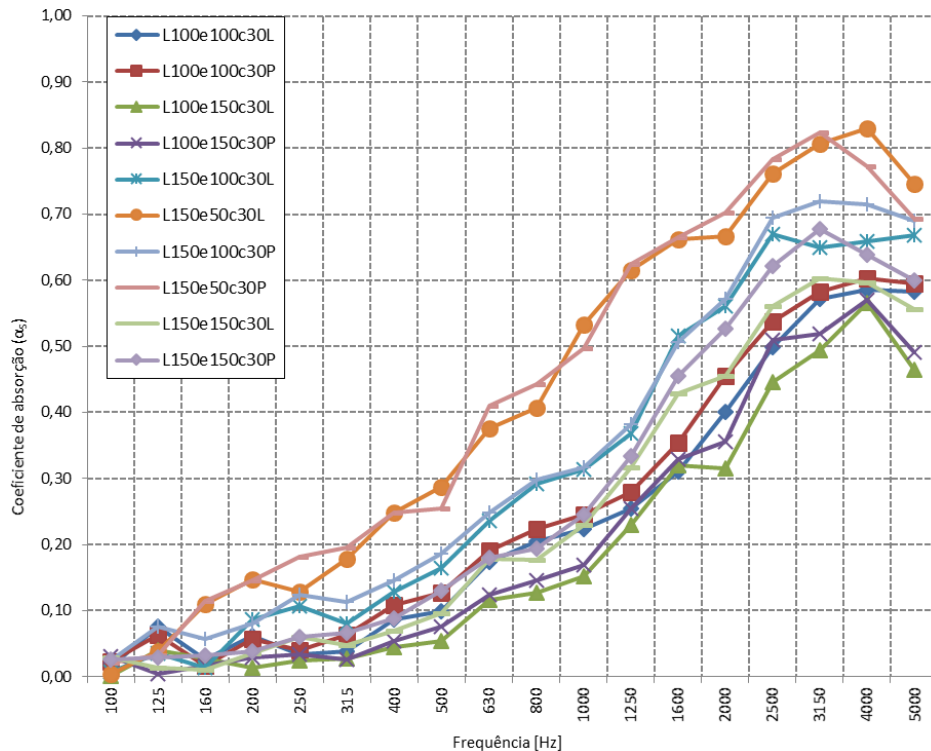


Gráfico G.2 - Curvas de  $\alpha_s$  para todos os provetes em caixa-de-ar com 10 cm de altura

Gráfico G.3 - Curvas de  $\alpha_s$  para todos os provetes em caixa-de-ar com 30 cm de altura

#### 4.4 Verificação das áreas de absorção sonora equivalente máximas

A norma NP EN ISO 354:2007 estipula, na sua secção 6.1.4 áreas de absorção sonora máximas para a câmara reverberante vazia, por frequência. Pode ser observado o seguinte:

Quadro 4.5 - Áreas de absorção sonora máximas para câmara vazia por frequência

Frequência Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$A_1 m^2$	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	7,0	7,5	8,0	9,5	10,5	12,0	13,0	14,0

É importante referir que  $A_1$  é o valor obtido pela Expressão [10] e que no caso da câmara reverberante possuir um volume diferente de  $200 m^3$ , os valores presentes no Quadro 4.2 devem ser multiplicados pelo parâmetro seguinte:

$$\left(\frac{V}{200}\right)^{2/3}$$

Onde  $V$  é o volume da câmara reverberante em  $m^3$ . (IPQ 2007).

Todas as especificações da norma relativamente às áreas de absorção máximas para a câmara vazia foram cumpridas na realização dos ensaios.

---

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados e comparados os resultados apresentados no capítulo 4. A análise é feita com base na discussão da análise de gráficos.

### 5.1 Comparação de resultados dos provetes de painéis absorventes

O Gráfico G.1 apresenta todas as curvas relativas a todos os ensaios com painéis absorventes dispostos nas duas formas de alinhamento mencionadas. Uma observação mais global de todas as curvas sobrepostas num gráfico permite observar uma maior importância de absorção no domínio das altas frequências com uma absorção também considerável nas médias frequências. É de notar um forte aumento de área de absorção equivalente do elemento em todos os tipos de painel em frequências superiores a 250 Hz. No geral, nota-se uma certa similaridade no desenvolvimento de cada curva à medida que se vai aumentando a frequência. O que difere fortemente entre algumas das curvas não é a sua progressão em frequência mas sim a magnitude dos valores da área de absorção equivalente. Pode ainda ser observado que os provetes de Painel A – 60 mm são os que apresentam os maiores valores de área de absorção equivalente contrariamente aos resultados dos provetes de Painel B – 40 mm que apresentam os menores valores. É de notar que na frequência de valor 125 Hz praticamente não se regista absorção em nenhum dos provetes ensaiados. É possível observar o forte decaimento do valor da área de absorção equivalente correspondente a esta frequência para todos os painéis nos diferentes tipos de alinhamento de painel. Note-se que os valores máximos de área de absorção equivalente para o Painel A – 40 mm ocorrem para frequências mais baixas que o Painel A – 60 mm e o Painel B – 40 mm, embora a magnitude dos valores máximos seja diferente.

É pertinente fazer uma análise mais pormenorizada de cada tipo de painel relativamente ao mesmo tipo de alinhamento de painel utilizado. O Gráfico G.4 é bastante elucidativo relativamente ao comportamento de cada tipo de painel na montagem com 2 alinhamentos de painel.

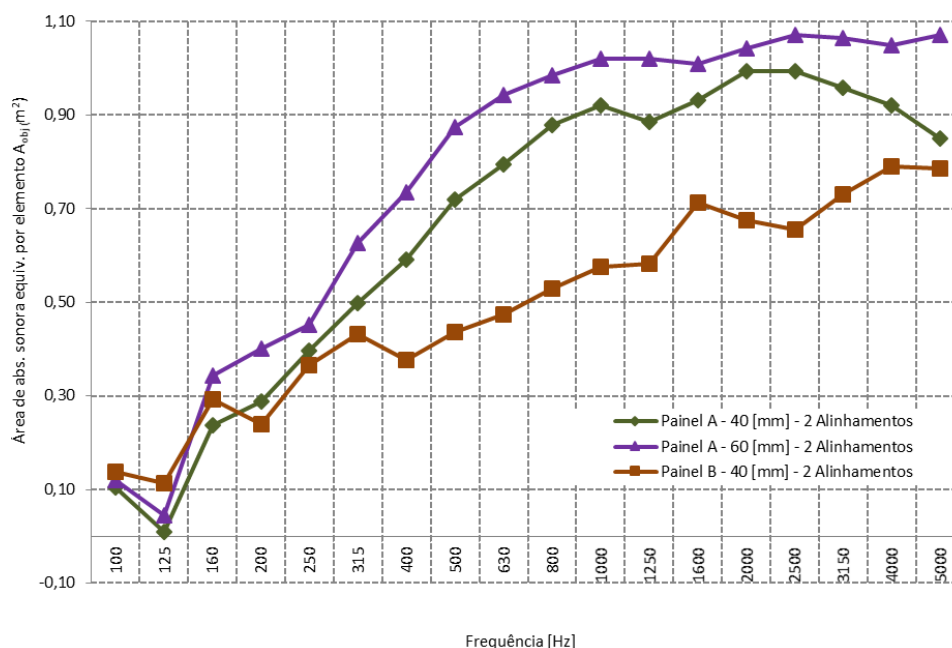


Gráfico G.4 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para 2 alinhamentos

Como é possível observar, o Painel A – 60 mm apresenta os valores mais altos de área de absorção equivalente em quase todas as frequências. Apenas nos 125 Hz o Painel B – 40 mm apresenta valores superiores de área de absorção equivalente, quer relativamente ao Painel A – 40 mm, quer relativamente ao Painel A – 60 mm. Para 2 alinhamentos de painel, é no Painel B – 40 mm que pode ser observado o menor decaimento de área de absorção sonora equivalente na frequência dos 125 Hz. É de notar que no caso do Painel A – 60 mm a tendência para aumentar a área de absorção equivalente mantém-se na generalidade da curva enquanto no caso do Painel A – 40 mm a partir dos 2000 Hz a curva torna-se decrescente. No caso do Painel B – 40 mm notam-se três pontos de decaimento distintos aos 200 Hz, aos 400 Hz e aos 2500 Hz. Para o Painel A – 40 mm o valor mais elevado registado ocorre para os 2000 Hz e 2500 Hz. Para o Painel A – 60 mm o valor máximo acontece para os 2500 Hz e para os 5000 Hz. Para o Painel B – 40 mm o maior valor da área de absorção sonora equivalente regista-se nos 4000 Hz e nos 5000 Hz. Verifica-se que para painéis do mesmo tipo (Painel A) a absorção melhora com o aumento da espessura. Comparando os painéis com a mesma espessura e constituição diferente (Painel A – 40 mm e Painel B – 40 mm), verifica-se que o Painel B é o que apresenta pior desempenho.

Analisando, agora os mesmos provetes mas para 3 alinhamentos de painel, observe-se o Gráfico G.5.

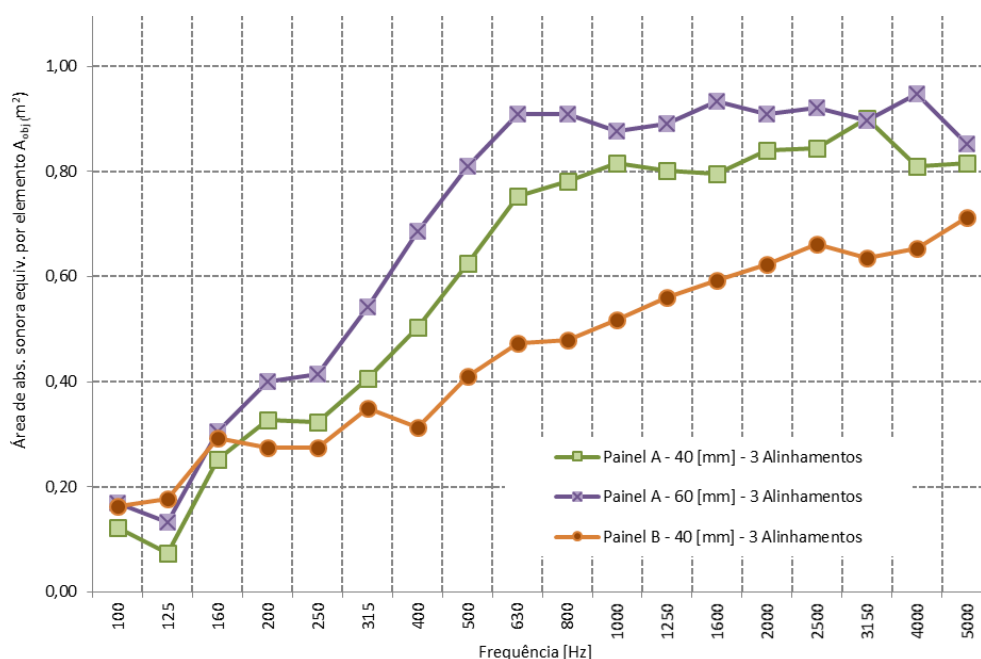


Gráfico G.5 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para 3 alinhamentos

Como se pode concluir ao observar o Gráfico G.5, o Painel A – 60 mm apresenta, no geral, os valores mais elevados de área de absorção equivalente para 3 alinhamentos de painel. Para a frequência de 125 Hz verifica-se o decaimento no valor da área de absorção sonora equivalente, sendo este o único ponto do gráfico onde o Painel B – 40 mm apresenta valores da área de absorção sonora equivalente superiores aos outros dois tipos de painel. Para o Painel A – 40 mm e para o Painel A – 60 mm verifica-se um aumento acentuado da área de absorção sonora equivalente entre os 250 Hz e os 630 Hz. Para o Painel B – 40 mm verifica-se um aumento mas menos acentuado que os anteriores entre os 800 Hz e os 2500 Hz. No caso do Painel A – 40 mm o valor máximo para a área de absorção sonora equivalente é atingido aos 3150 Hz. Para o Painel A – 60 mm o maior valor da área de absorção sonora equivalente regista-se para os 4000 Hz. No caso do Painel B – 40 mm o valor máximo da área de absorção sonora equivalente verifica-se nos 5000 Hz.

É também interessante observar o comportamento em termos de absorção do mesmo tipo de painel disposto nos diferentes alinhamentos de painel. Observe-se o Gráfico G.6 onde se encontram representadas as curvas para o Painel A – 40 mm nos diferentes alinhamentos de painel.



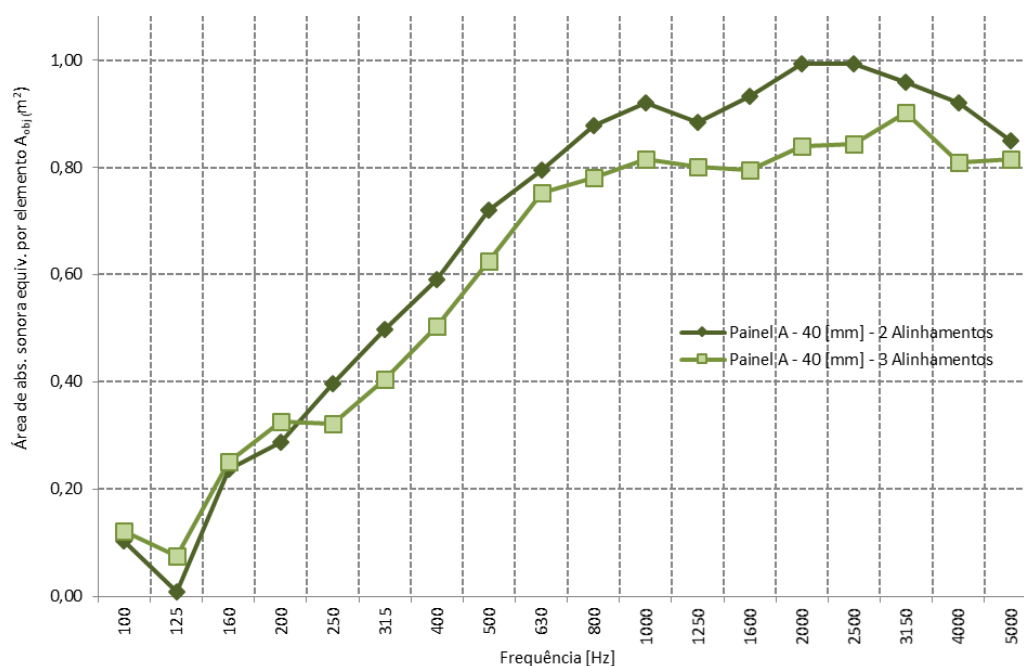


Gráfico G.6 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para o Painel A – 40 mm

Verifica-se que a curva relativa aos 3 alinhamentos de painel descreve uma trajetória em valores mais baixos de área de absorção sonora equivalente do que a curva que representa os 2 alinhamentos de painel. Apenas até aos 200 Hz, ou seja, nas baixas frequências, a curva de 3 alinhamentos de painel apresenta valores superiores de área de absorção sonora equivalente que a curva relativa aos 2 alinhamentos de painel. Este resultado pode parecer algo contraditório uma vez que ao usar-se maior quantidade de área por serem acrescentados três elementos painel, também se divide a área de absorção sonora por um maior número de elementos, sugerindo que o resultado final deveria ser semelhante utilizando 2 ou 3 alinhamentos de painel. O fator que propicia estes resultados é a distância entre os alinhamentos de painel que é superior no caso dos ensaios com 2 alinhamentos de painel. Este fato permite concluir que, embora a quantidade de área superficial exposta às ondas sonoras seja um fator muito importante na absorção sonora, não é o único fator a pesar nos resultados finais e que os espaçamentos entre alinhamentos de painel é também um fator de peso no que diz respeito aos valores finais da área de absorção sonora equivalente. Quando existem 3 alinhamentos os painéis estão mais próximos e existe uma maior interferência entre eles relativamente à propagação das ondas sonoras. A absorção para um sistema de “*Baffles*” não apresenta um espectro fixo como no caso de uma placa absorvente horizontal, mas depende do espaçamento dos elementos. Daqui conclui-se que os valores catalogados referem-se a um determinado espaçamento usado nas medições e que na prática não se verificará se forem usados espaçamentos diferentes.

Com o Gráfico G.7 pretende-se apresentar o mesmo tipo de análise feita no Gráfico G.6 mas relativamente ao Painel A – 60 mm.

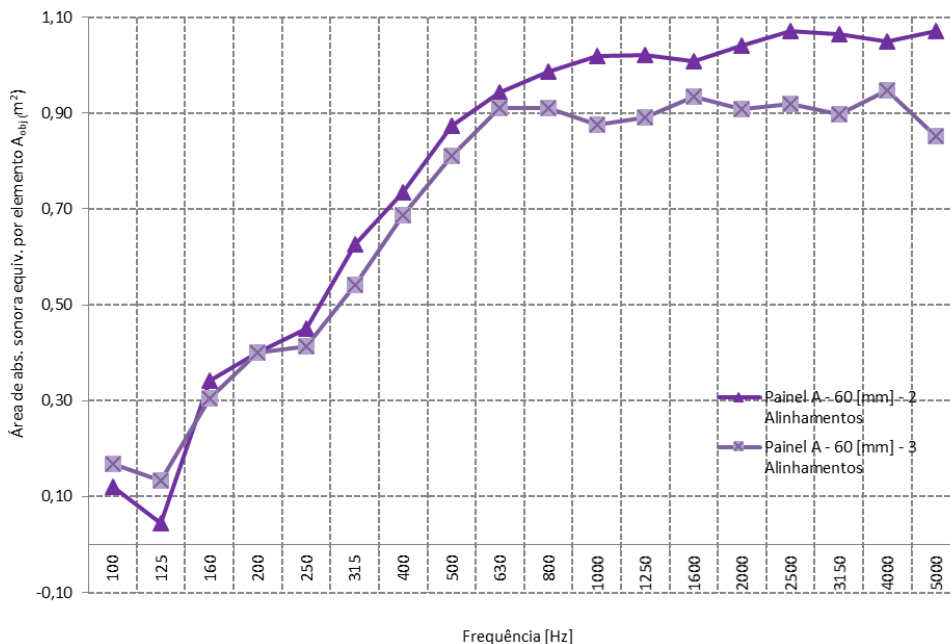


Gráfico G.7 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para o Painel A – 60 mm

Para o Gráfico G.7 a análise é semelhante à do Gráfico G.6. Embora a magnitude dos valores de área de absorção sonora equivalente seja maior no caso do Painel A – 60 mm, as curvas relativamente aos 2 e 3 alinhamentos de painel comportam-se de forma semelhante às mesmas curvas mas relativas ao Painel A – 40 mm. No presente caso apenas até aos 160 Hz a curva dos 3 alinhamentos de painel anda acima da curva dos 2 alinhamentos de painel.

No gráfico G.8 apresentam-se as curvas de 2 e 3 alinhamentos de painel relativamente ao tipo de painel absorvente Painel B – 40 mm.

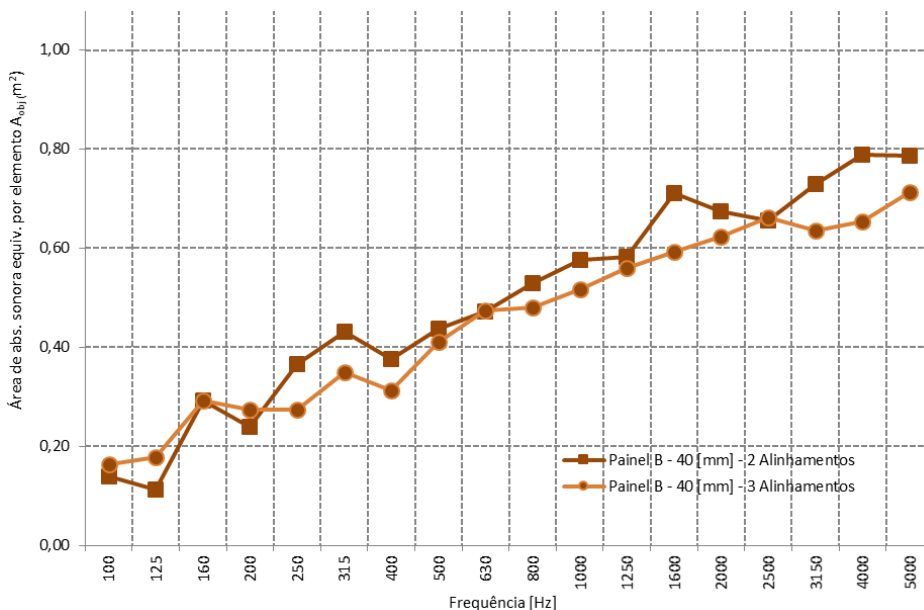


Gráfico G.8 - Curvas da área de absorção sonora equivalente para o Painel B – 40 mm

Analogamente ao caso dos outros dois tipos de painel, o Painel B – 40 mm apresenta valores de área de absorção sonora equivalente superiores no caso dos 2 alinhamentos de painel com exceção das baixas frequências. A partir dos 160 Hz a curva dos 2 alinhamentos de painel mantém-se acima da curva dos 3 alinhamentos de painel. Aos 630 Hz e aos 2500 Hz as duas curvas intercetam-se.

Em todos os provetes ensaiados, para a frequência dos 125 Hz verifica-se que a absorção sonora é praticamente nula em todos os tipos de painel, mas ligeiramente superior nos ensaios com 3 alinhamentos de painel. Este fenómeno deve-se ao fato dos painéis vibrarem de uma forma específica. Em frequências muito baixas e devido ao comprimento de onda, os painéis têm muita dificuldade em absorver. No caso dos 3 alinhamentos de painel há mais elementos a vibrar da mesma forma propiciando maior absorção numa frequência baixa.

## 5.2 Comparação de resultados dos provetes de lamelas com espuma

No caso dos provetes de lamelas, os ensaios foram muito extensos e fez-se variar um número considerável de parâmetros. Assim sendo, a quantidade enorme de informação obtida nos resultados experimentais requer uma organização dos dados para que sejam perceptíveis as conclusões a tirar. Os parâmetros de maior relevância aqui testados são o espaçamento entre filas de lamelas e a altura da caixa-de-ar. Como já foi referido anteriormente foram testadas duas alturas de caixa-de-ar (10 cm e 30 cm) e quatro espaçamentos de filas de lamelas (50 mm, 100 mm, 150 mm e 200 mm).

Os resultados obtidos para estes ensaios são apresentados em função de um coeficiente de absorção sonora.

Nos Gráficos G.2 e G3 e G9 a G.14 apresentam-se as curvas de absorção sonora para os provetes de lamelas ensaiados onde se fixa um parâmetro variando os outros. Assim, para uma escolha de um parâmetro fixo em particular é possível concluir qual o provete que apresenta melhor desempenho.

Observem-se os Gráficos G.2 e G.3 onde estão representadas todas as curvas referentes aos ensaios com altura de caixa-de-ar de 10 cm e 30 cm, respetivamente:

Nos Gráficos G.2 e G.3 pretende-se analisar o panorama geral de desenvolvimento das curvas do coeficiente de absorção sonora para o mesmo tipo de caixa-de-ar e perceber entre que valores estão as curvas dos provetes com melhor e pior desempenho. No caso da caixa-de-ar de 10 cm (Gráfico G.2) não existe nenhum provete cuja curva esteja sempre acima de todas as outras. Porém é de ter em conta que as duas curvas que atingem os valores mais elevados de  $\alpha_s$  são as curvas que dizem respeito aos provetes de lamelas L100e50c10P e aos provetes de

lamelas L100e50c10L, cuja única diferença é o acabamento da superfície. Ao observar-se o Gráfico G.3 verifica-se que as curvas que apresentam os valores mais elevados de  $\alpha_s$  são as curvas relativas aos provetes de lamelas L150e50c30P e L150e50c30L. Pela análise apenas dos Gráficos G.2 e G.3 pode concluir-se que, variando a altura da caixa-de-ar, a altura das lamelas tem influência na absorção sonora na medida em que quando a caixa-de-ar é aumentada as lamelas que apresentam valores superiores de  $\alpha_s$  são as lamelas com maior altura (L150) e menor espaçamento entre filas de lamelas (e50).

Torna-se agora pertinente a análise de gráficos onde são variados outros parâmetros. Observe-se o Gráfico G.9 onde estão representadas todas as curvas de absorção sonora obtidas para os ensaios com provetes de lamela com altura vertical de lamela de 100 mm (L100).

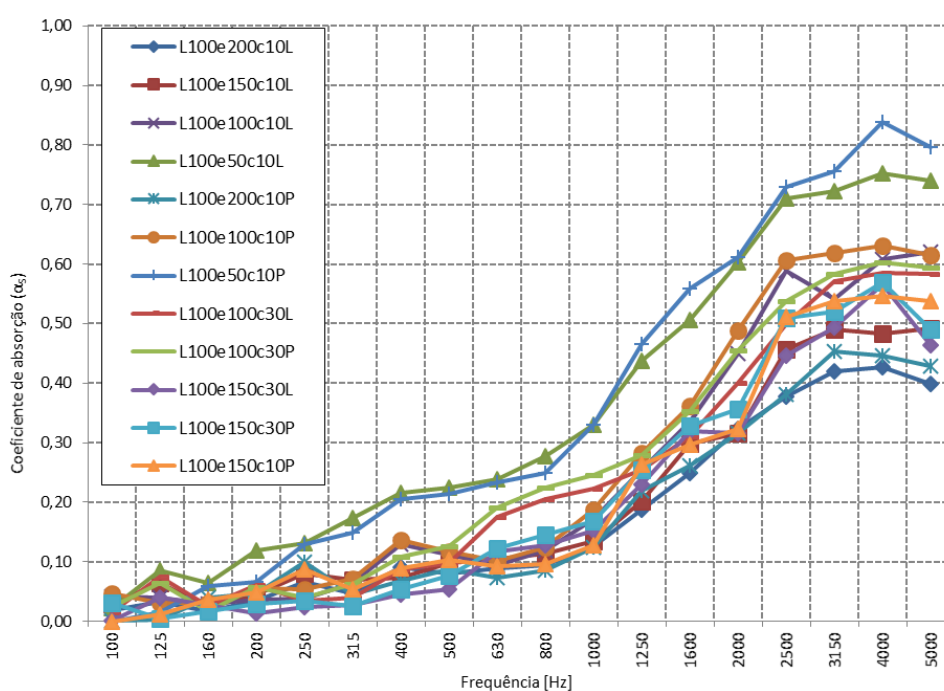


Gráfico G.9 - Curvas de  $\alpha_s$  para todos os provetes de lamelas com 100 mm de altura

Como o parâmetro fixo agora é a altura vertical de cada lamela analisem-se as curvas tendo em conta o espaçamento entre filas de lamelas, o acabamento da superfície das lamelas e a altura da caixa-de-ar. Seguindo o desenvolvimento das curvas em função do aumento da frequência, encontram-se os maiores valores de  $\alpha_s$  para os provetes de lamelas L100e50c10P e L100e50c10L. Embora comparativamente com os outros provetes presentes no Gráfico G.9 estes dois apresentem claramente um melhor desempenho, a comparação do desempenho entre eles depende da frequência em questão, pois enquanto numa gama de frequência o provete L100e50cP apresenta valores de  $\alpha_s$  superiores aos do provete L100e50cL, noutras frequências verifica-se o oposto. Uma escolha entre estes dois provetes requer uma análise mais meticulosa das condições sonoras em frequência a que iria estar sujeito o espaço fechado de aplicação do material. Como seria de esperar os melhores resultados acontecem quando se

tem menor espaçamento entre filas de lamelas (50 mm), uma vez que temos mais elementos a absorver por unidade de área. Por outro lado, o fato da lâmina metálica ser lisa ou perfurada não apresenta diferenças significativas. Verifica-se que os sistemas que apresentam valores de absorção mais baixos são aqueles com maior afastamento entre filas de lamelas (200 mm), uma vez que existe menos material por unidade de área.

Observe-se o Gráfico G.10 que representa as curvas de absorção sonora onde o parâmetro fixo é a altura vertical das lamelas (150 mm).

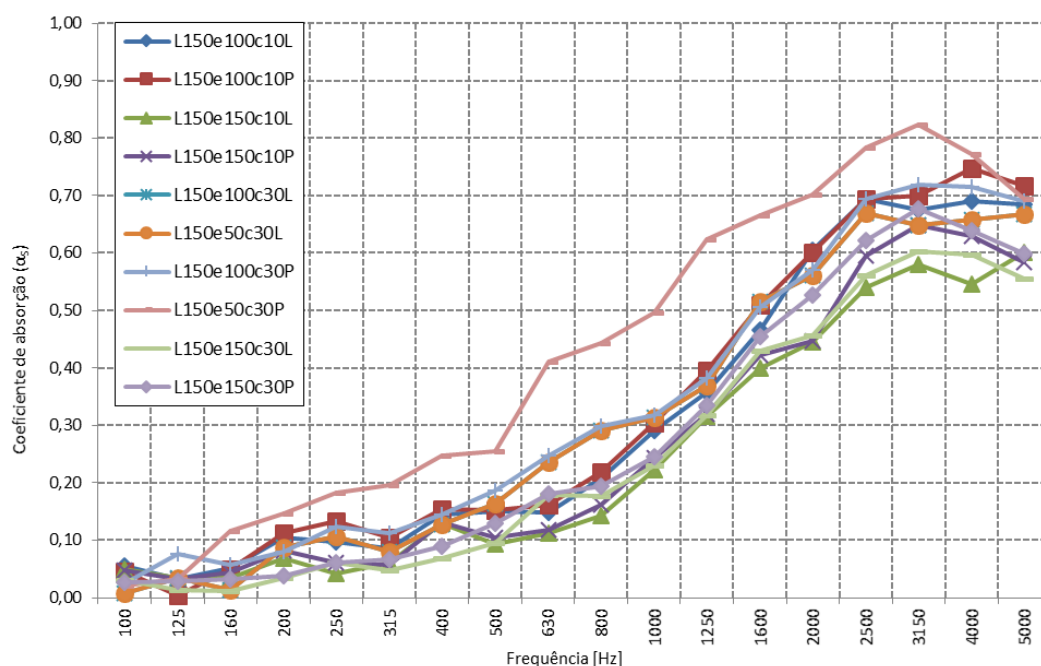


Gráfico G.10 - Curvas de  $\alpha_s$  para todos os provetes de lamelas com 150 mm de altura

Como já tinha sido concluído anteriormente, quando se aumenta a altura da caixa-de-ar as lamelas que terão maior tendência a apresentar maiores coeficientes de absorção sonora serão as lamelas com maior altura vertical (150 mm) e menor espaçamento entre filas de lamelas (50 mm). Assim será de esperar que o provete que apresenta maior coeficiente de absorção sonora para lamelas de altura vertical de 150 mm sejam os provetes L150e50c30P e L150e50c30L. Embora isto se verifique, relativamente ao provete L150e50c30P que apresenta o melhor desempenho neste caso, o provete L150e50c30L apresenta desempenhos próximos de outros provetes onde variam outros parâmetros como o espaçamento entre filas de lamelas e a altura da caixa-de-ar. Pode, no entanto, concluir-se que se o objetivo for utilizar lamelas com 150 mm de altura os maiores valores de  $\alpha_s$  são obtidos no provete de lamelas L150e50c30P.

Os Gráficos G.11, G.12, G.13 e G.14 representam as curvas de absorção sonora onde o parâmetro fixo é o espaçamento entre filas de lamelas e em cada gráfico estão expostos, respetivamente, espaçamento de 50 mm, espaçamento de 100 mm, espaçamento de 150 mm e espaçamento de 200 mm.

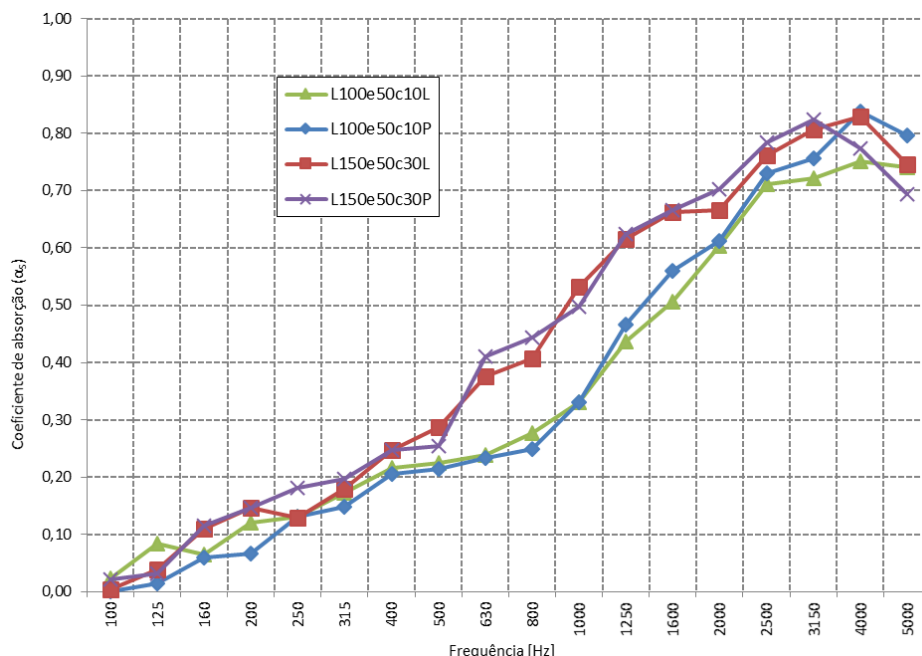


Gráfico G.11 - Curvas de  $\alpha_s$  para todos os provetes com 50 mm de espaçamento entre filas de lamelas

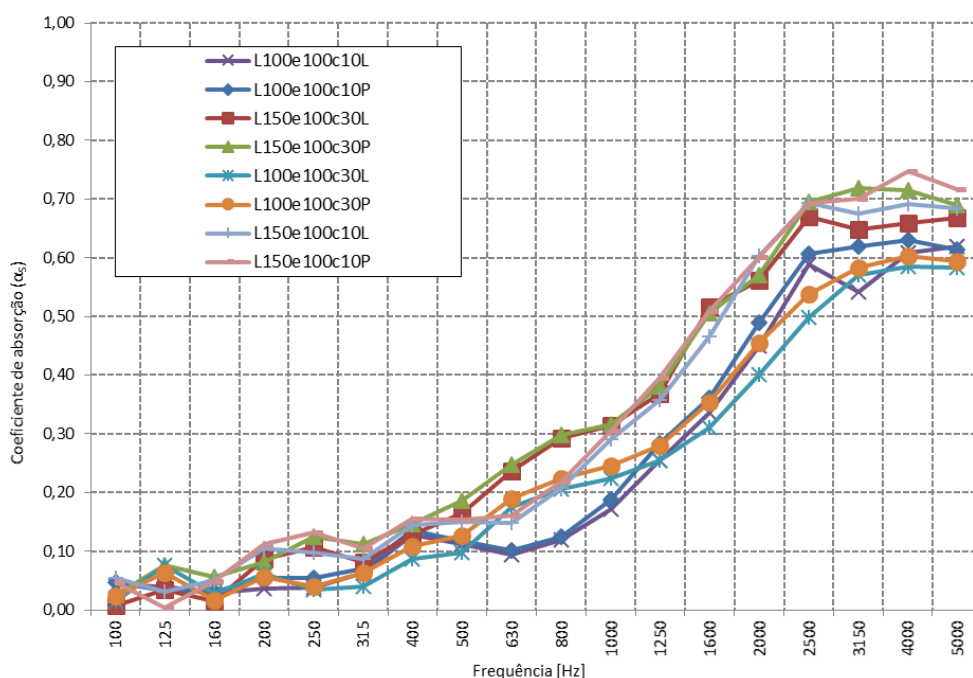


Gráfico G.12 - Curvas de  $\alpha_s$  para todos os provetes com 100 mm de espaçamento entre filas de lamelas

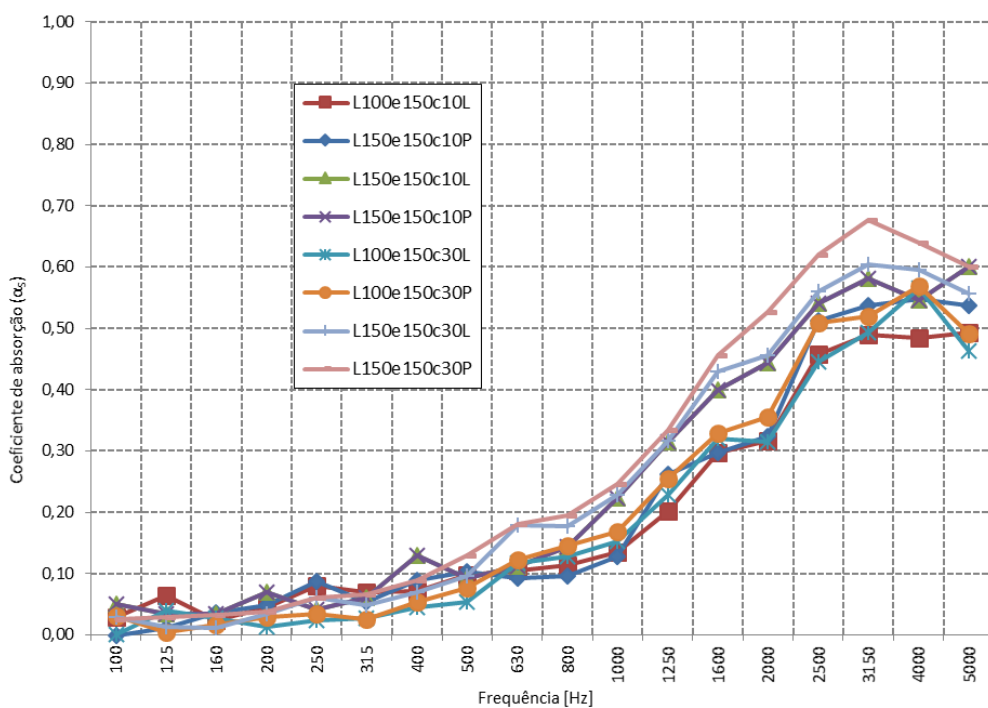


Gráfico G.13 - Curvas de  $\alpha_s$  para todos os provetes com 150 mm de espaçamento entre filas de lamelas

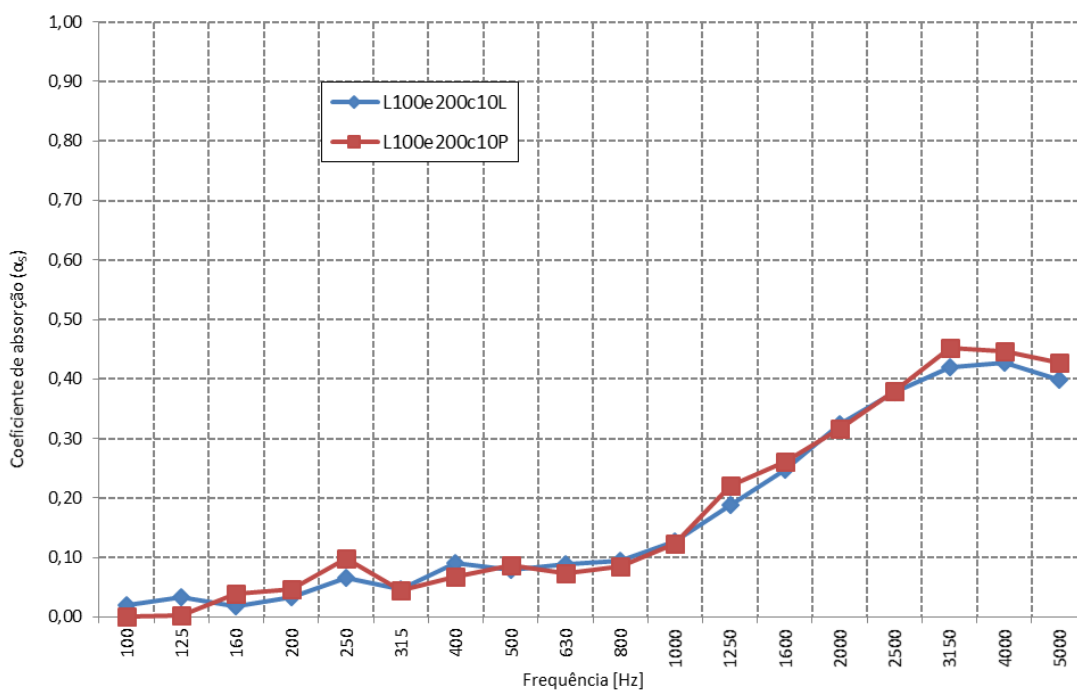


Gráfico G.14 - Curvas de  $\alpha_s$  para todos os provetes com 200 mm de espaçamento entre filas de lamelas

---

Observando os Gráficos G.11, G.12, G.13 e G.14 é de notar que em cada um deles as curvas de absorção sonoras são similares quer em termos de desenvolvimento em função da frequência, quer em termos de magnitude dos valores do coeficiente de absorção sonora. Pode concluir-se que o parâmetro fixo nestes quatro casos (espaçamento entre filas de lamelas) é um parâmetro de grande relevo relativamente ao comportamento do material quanto à absorção sonora. Se nos Gráficos G.11, G.12, G.13 e G.14 se fixarem todos os parâmetros à exceção do acabamento superficial de cada lamela, pode concluir-se que os comportamentos das curvas relativas ao acabamento liso e perfurado, são semelhantes e a magnitude dos valores também é muito semelhante. Em termos de grandeza dos valores de  $\alpha_s$  os provetes com espaçamento entre filas de lamelas de 50 mm apresentam os valores mais elevados. Os valores mais baixos encontram-se nos provetes com espaçamento de 200 mm entre filas de lamelas sendo este o parâmetro de maior influência na magnitude dos valores do coeficiente de absorção sonora. Isto deve-se ao fato de se diminuir significativamente o valor da área de material absorvente quando se aumenta o espaçamento entre filas de lamelas dentro da mesma área de moldura (diminui a quantidade de lamelas).

É de notar que toda esta diferenciação de resultados por variação dos parâmetros pode ser de grande utilidade. Embora o objetivo final seja obter a absorção sonora desejada para um determinado espaço há, por vezes, outros requisitos a ter em conta. Embora sejam os provetes que onde o espaçamento entre filas de lamelas é de 50 mm os que apresentam maiores magnitudes de absorção sonora, o menor espaçamento obriga ao uso de um maior número de elementos lamela para cobrir a mesma área de teto, relativamente ao uso de espaçamentos maiores. Um maior número de lamelas traduzir-se-á, obviamente, num custo superior. Cabe ao projetista ponderar todos os fatores e fazer a sua opção.

Refira-se que não foram ensaiadas todas as combinações possíveis de altura de lamela, espaçamento e caixa-de-ar. As combinações em falta requeriam um número de ensaios que não foi possível realizar. No entanto, com esses ensaios, poderiam ser feitas comparações adicionais que permitiriam consolidar melhor as conclusões deste trabalho.



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se caracterizar algumas soluções de absorção sonora para tetos que não estavam caracterizadas. Foram ensaiados em câmara reverberante painéis absorventes para serem utilizados como painéis suspensos (tipo “*Baffles*”) e lamelas metálicas (de face perfurada e face lisa) com espuma absorvente numa das faces. Para os painéis fez-se variar o número de alinhamentos de painel ensaiados, bem como a espessura e para as lamelas fez-se variar a altura das mesmas, o espaçamento entre filas de lamelas e a altura da caixa-de-ar.

Este trabalho experimental permitiu retirar algumas conclusões que serão descritas de seguida.

Relativamente aos provetes de painéis de espuma absorvente, numa perspetiva mais generalista, conclui-se que apresentam os seus melhores valores de absorção no domínio das altas e das médias frequências, abrangendo uma vasta gama de frequências com bons valores de área de absorção equivalente. Em todos os tipos de painel podem ser observados grandes aumentos no valor da área de absorção sonora a partir dos 250 Hz.

Para todos os ensaios e em todos os tipos de painel, a absorção sonora aos 125 Hz é praticamente nula.

O Painel A - 60 mm é o que apresenta melhor desempenho atingindo o seu valor máximo de área de absorção sonora equivalente aos 2500 Hz e 5000 Hz, registando para ambas as frequências o valor de 1,07 m<sup>2</sup> nos ensaios com 2 alinhamentos de painel e aos 4000 Hz registando o valor de 0,95 m<sup>2</sup> no caso dos ensaios com 3 alinhamentos de painel. Contrariamente, o Painel B - 40 mm apresenta os valores mais baixos de área de absorção sonora equivalente. Para este painel os valores máximos são atingidos nas frequências de 4000 Hz e 5000 Hz atingindo uma área de absorção sonora equivalente de 0,79 m<sup>2</sup> no caso dos ensaios com 2 alinhamentos de painel. Para os ensaios com 3 alinhamentos de painel o Painel B - 40 mm registou o valor mais alto de área de absorção sonora equivalente aos 5000 Hz com 0,71 m<sup>2</sup>. A solução de Painel A - 40 mm é uma solução que mostra resultados melhores que o intermédio entre os outros tipos de painel. Para 2 alinhamentos de painel esta

solução registou os valores máximos de área de absorção sonora equivalente aos 2000 Hz e aos 2500 Hz de 0,99 m<sup>2</sup>. No caso de 3 alinhamentos de painel os valores máximos de área de absorção sonora atingem os 0,90 m<sup>2</sup> para os 3150 Hz. Conclui-se que o Painel A - 40 mm apresenta os seus valores máximos para frequências mais baixas que o Painel A - 60 mm e o Painel B - 40 mm, embora todos os tipos de painel apresentem magnitudes dos valores máximos de área de absorção equivalente diferentes.

Em cada tipo de painel, a curva correspondente aos ensaios com 2 alinhamentos de painel apresenta, no geral, valores superiores de área de absorção sonora equivalente, relativamente aos dos ensaios com 3 alinhamentos de painel. Este resultado pode parecer algo contraditório uma vez que ao usar-se maior quantidade de área por serem acrescentados três elementos painel, também se divide a área de absorção sonora por um maior número de elementos. O fator que propicia estes resultados é a distância entre os alinhamentos de painel que é superior no caso dos ensaios com 2 alinhamentos de painel.

Apenas na frequência dos 125 Hz as curvas dos ensaios com 2 alinhamentos de painel têm valores inferiores de área de absorção sonora equivalente relativamente às curvas dos ensaios com 3 alinhamentos de painel.

Embora a norma NP EN ISO 354:2007 permita realizar o ensaio com 2 ou 3 alinhamentos de painel, verifica-se que o resultado da área de absorção equivalente é diferente nas duas situações. Verifica-se que o espaçamento entre alinhamentos de painel é um fator importante na área de absorção sonora equivalente por elemento. Deste modo, se na prática se colocarem os painéis com espaçamentos entre alinhamentos de painel diferentes dos ensaiados, o resultado da absorção “*in situ*” será diferente do obtido em laboratório.

Relativamente aos provetes de lamelas de aço com espuma, é possível concluir que o coeficiente de absorção sonora máximo atingido acontece para o provete L100e50c10P e atinge o valor de 0,84 para os 4000 Hz. O valor mínimo acontece para os provetes L100e200c10P aos 100 Hz e 125 Hz, L150e150c10P aos 100 Hz, L100e50c10P, L150e50c30L, L150e100c10P, L100e150c30L, aos 100 Hz e L100e150c30P aos 125 Hz, registando para todos o valor de 0,00.

Para os provetes com caixa-de-ar de 10 cm não existe nenhum provete cuja curva de absorção sonora esteja sempre acima de todas as outras sendo por isso necessário ter em conta a gama de frequências das ondas sonoras que se preveem ser predominantes no espaço fechado em questão.

A altura das lamelas tem influência na absorção sonora, na medida em que quando a caixa-de-ar é aumentada as lamelas que apresentam valores superiores de  $\alpha_s$  são as lamelas com maior altura (L150) e menor espaçamento entre filas de lamelas (e50).

Quando se fixam todos os parâmetros e se varia o acabamento superficial da lamela (liso ou perfurado), pode concluir-se que o comportamento das curvas relativas ao acabamento liso e perfurado, são semelhantes e a magnitude dos valores também é muito semelhante.

Em termos de grandeza dos valores de  $\alpha_s$  os provetes com espaçamento entre filas de lamelas de 50 mm apresentam os valores mais elevados. Os valores mais baixos encontram-se nos provetes com espaçamento de 200 mm entre filas de lamelas sendo este o parâmetro de maior influência na magnitude dos valores do coeficiente de absorção sonora, como seria de esperar. Um maior espaçamento resulta na aplicação de menos material absorvente por unidade de área.

## 6.2 Perspetivas de trabalhos futuros

No caso dos painéis de espuma absorvente poderão ser testados outros tipos de espessura de painel, especialmente no caso do painel tipo A. A diferença entre as espessuras (Painel A- 40 mm e Painel A- 60 mm) revelou diferenças significativas no comportamento em absorção sonora do material. Para o Painel B, poderiam testar-se, também, outras espessuras como, por exemplo, 60 mm e comparar a diferença de resultados entre Painel B – 40 mm e Painel B - 60 mm com a diferença Painel A - 40 mm e Painel A - 60 mm. Para efeitos de investigação seria interessante ensaiar os painéis com diferentes distâncias entre alinhamentos de painel para além das permitidas pela norma NP EN ISO 354:2007.

No caso das lamelas de aço com espuma absorvente, numa primeira fase, era importante ensaiar as combinações em falta. Seria interessante ensaiar, também, um maior número de combinação de parâmetros, como alturas diferentes de lamelas, outras alturas de caixa-de-ar, outras opções de espaçamento entre filas de lamelas. Isto poderia permitir melhores hipóteses de combinações de parâmetros por parte dos projetistas para obter a absorção sonora desejada tendo em conta as condições impostas pelo dono de obra, como sejam a estética, o custo, a eficácia da solução. Teria também interesse ensaiar o comportamento das lamelas quanto à absorção sonora nos vários espaçamentos entre filas de lamelas mas mantendo a área exposta, visto que nos ensaios realizados quando se variou o espaçamento entre filas de lamelas o número de lamelas alterou pois a moldura foi sempre a mesma. Refira-se, no entanto, que este fato iria alterar a área em planta e poderia estar-se a trabalhar com áreas fora do intervalo permitido pela norma NP EN ISO 354:2007.

Poderia ser igualmente interessante experimentar outros materiais absorventes.

---

## BIBLIOGRAFIA

- Alibaba.com, 2013. [www.portuguese.alibaba.com](http://www.portuguese.alibaba.com).
- Arquitetura, C., 2013. Clique Arquitetura. Available at: <http://www.cliquearquitetura.com.br/>.
- Bolt, R.H., 1947. On the Design of Perforated Facings for Acoustic Materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 19, pp. 917–921.
- Callaway, D.B. & Ramer, L.G., 1952. The Use of Perforated Facings in Designing Low Frequency Resonant Absorbers. *Journal of the Acoustical Society of America*, 24(3), pp. 309–312.
- Canevet, G., 1978. Active sound absorption in an air conditioning duct. *Journal of Sound and Vibration*, 58(3), pp.333–345. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X7880042X>.
- Castilhano & Ferreira, 2011. *Acústica XXI - Catálogo*, Lisboa.
- Coentro, F.J.D., 2011. *Dissertação para obtenção do grau de Mestrado - Análise do comportamento acústico de materiais fibrosos em tetos absorventes - DEC, FCTUC, Coimbra*.
- Cox, T.J. & D’Antonio, P., 2004. *Acoustic Absorbers and Diffusers - Theory, Design and Application*, London: Spon Press.
- Domingues, O., 2005. *A Acústica nos Edifícios - Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, Lisboa: LNEC.
- Fuchs, H. V., 2001. Alternative Fibreless Absorbers – New Tools and Materials for Noise Control and Acoustic Comfort. , pp. 414–422.
- De Godoy, M., Barry, P.J. & Bistafa, S.R., 2006. A study of the influence of mounting conditions on the measured sound absorption in laboratory tests of suspended ceilings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(1), pp. 33.
- Harris, C.M. & Molloy, C.T., 1952. The Theory of Sound Absorptive Materials. *Journal of the Acoustical Society of America*, 24(1), pp. 1–7.
- Heinrich, K. & Technischen, A. Der, 1981. Sound decay in reverberation chambers with diffusing elements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 69(6), pp. 1716–1723.
- Hu, L. & Migneron, J., 2011. Vibration and low-frequency impact sound generated by normal human walking in lightweight wood-joisted floor-ceiling assemblies. *Canadian Acoustics*, 39(3), pp. 66–67.
- Hviid, C.A. & Svendsen, S., 2013. Experimental study of perforated suspended ceilings as diffuse ventilation air inlets. *Energy and Buildings*, 56, pp.160–168. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778812004604> [Accessed January 29, 2013].

- Ingard, K.U. & Bolt, R.H., 1951. Absorption Characteristics of Acoustic Materials with Perforated Facings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 23(3), pp. 533–540.
- IPQ, Instituto Português da Qualidade, 2007. NP EN ISO 354 - Medição da absorção sonora em câmara reverberante.
- Kingsley, E.L. et al., 1982. *Fundamentals of Acoustics - Third Edition I*. John Wiley & Sons, ed., New York.
- Kuttruff, H., 2000. *Room Acoustics* Fourth Edi., London: Spon Press.
- Long, M., 2006. *Architectural Acoustics* First Edit., Burlington: Elsevier Academic Press.
- Meisser, M., 1986. *La Correction Acoustique des Locaux*, Paris: CATED.
- Mikeska, E.E. & Lane, R.N., 1956. Measured Absorption Characteristics of Resonant Absorbers. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(5), pp. 987–992.
- Mook, Z.H., 2007. 19 th International congress on acoustics Madrid , 2-7 September 2007 Absorption of open ceilings. , (September), pp. 1–5.
- Morse, P.M., Bolt, R.H. & Brown, R.L., 1940. Acoustic Impedance and Sound Absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 12(2), pp. 217–227.
- Nilsson, E. & Hellström, B., 2010. 10ème Congrès Français d ' Acoustique. , pp. 1–4.
- Oliveira, de C., 2008. *Acústica ambiental e de edifícios v7.0*, FEUP.
- Oliveira, P.D.P.S., 2009. Dissertação para obtenção do grau de Mestrado - Desenvolvimento e caracterização acústica de elementos autoportantes para absorção sonora em espaços do tipo “open space” - FEUP.
- Patraquim, R., 2008. *Paineis Acústicos Perfurados em Madeira: Estudo e Avaliação Experimental de Soluções*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Mecânica, Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Probst, F., 2013. Noise reduction in working areas by the application of absorbing baffle-systems. , 19, pp.040135–040135. Available at: <http://link.aip.org/link/PMARCW/v19/i1/p040135/s1&Agg=doi> [Accessed June 10, 2013].
- Probst, W., Gmbh, A. & Greifenberg, D.-, 2007. Sound Absorption of Baffle Systems.
- R.G.R., 2007. R.G.R. - “Regulamento Geral do Ruído”, aprovado pelo Decreto-Lei nº 9/2007 de 17/01.
- R.R.A.E., 2008. RRAE - “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios”, aprovado pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06.
- Sacerdote, G.G. & Gigli, A., 1951. Absorption of Sound by Resonant Panels. *Journal of the Acoustical Society of America*, 23(3), pp. 349–352.
- Silva, P.M., 1978. *Acústica de Edifícios*, Lisboa: LNEC.
- Silva, P.M., 1984. *Condicionamento Acústico de Edifícios - Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, Lisboa: LNEC.
- Sotecnisol, 2013. [www.sotecnisol.com](http://www.sotecnisol.com).
- Tadeu, A. et al., 2010. *Acústica Aplicada (Condicionamento Acústico De Espaços Fechados) - DEC, FCTUC, Coimbra*.

Tadeu, A. et al., 2008. “Câmaras Móveis ITeCons para a Realização de Ensaios Acústicos: Parte I – Descrição e Projecto das Câmaras”, Actas Acústica 2008, V Congreso Ibérico de Acústica, XXXIX Congreso Español de Acústica Tecniacústica 2008, Acoustics European Symposium de Acústica.

Tecniwood, 2010. Algumas noções de acústica - Catálogo. , pp. 1–11.