



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

Análise do comportamento acústico de painéis revestidos por “flocagem”.

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

Autor

Daniel Silva Rodrigues

Orientador

Luís Godinho e Paulo Amado Mendes

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, Março, 2013

AGRADECIMENTOS

Durante a elaboração da minha tese de Mestrado, várias foram as pessoas e entidades que me prestaram apoio e informação, facilitando a realização da mesma. Desta forma fica aqui um enorme agradecimento aos que mais contribuíram.

Primeiro, quero agradecer aos meus orientadores Luís Godinho e Paulo Amado Mendes por todo o acompanhamento, disponibilidade e partilha de conhecimento, não deixando de sublinhar também a boa disposição de ambos, que foi fundamental para a realização de todo este trabalho.

De seguida gostava também de prestar os meus agradecimentos a Castelhana & Ferreira, pela cedência de todo o material de ensaio e de alguma bibliografia, fundamental para a execução desta tarefa.

Agradeço também ao ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção da Universidade de Coimbra, por ter disponibilizado as instalações e respetivo equipamento necessário para a realização de todos os ensaios, assim como agradeço também ao Engenheiro José Nascimento toda a disponibilidade e simpatia prestada durante a fase de ensaios.

Tenho também de agradecer a todos os meus amigos e ao grupo de construções em geral, não podendo deixar de sublinhar o nome da Ana Pereira que esteve sempre presente na fase de ensaios, mas também aos meus amigos Diogo Silva, Luís Girão, Maria Inês, Paulo Zacarias, Paula Santos, Tiago Silva, entre outros que não em recordo agora, mas que deveriam ser referenciados pela constante disponibilidade que me prestaram.

Por fim mas não menos importante, agradeço a minha família, Pai, Mãe, Irmã, Cunhado e Sobrinho, pois sem eles nada disto teria sido possível, um profundo e sincero muito obrigado.

RESUMO

A acústica de espaços fechados apresenta desafios muito diferentes, consoante o tipo de espaços a tratar e as exigências da sua utilização. Espaços como estúdios de rádio ou “home-cinemas” apresentam, usualmente, pequenas dimensões mas elevadas exigências do ponto de vista do comportamento acústico.

Uma tecnologia que é atualmente usada pela indústria automóvel (entre outras) no controlo de vibrações consiste na introdução de revestimentos com micropartículas, coladas à superfície do suporte, e que, por ação de cargas elétricas, se dispõem de modo uniforme e homogéneo. Esta tecnologia, designada por “flocagem”, permite obter um acabamento agradável ao toque, visualmente apelativo e eficaz no controlo de ruídos parasitas. Pretende-se, com este trabalho, verificar a viabilidade de aplicação desta técnica de revestimento a soluções acústicas, como painéis perfurados ou espumas sintéticas absorventes, de forma a conjugar o elevado desempenho acústico destes sistemas, conferindo-lhe, ainda, um aspeto estético adequado. Foram testadas em laboratório, no âmbito desta dissertação, amostras de pequenas dimensões (diâmetros de aproximadamente 10 cm e 2.9 cm, para baixas e altas frequências, respetivamente), com diferentes perfurações e três tipos de configuração (sem caixa-de-ar, com caixa-de-ar de 4 cm não preenchida e com a mesma configuração mas com material absorvente da mesma espessura no seu interior). O método de ensaio utilizado na realização deste trabalho é o do Tubo de Impedância, tendo estes ensaios o objetivo de compreender a influência que este tipo de revestimento apresenta no desempenho acústico destes sistemas. Foi também utilizado um modelo numérico programado em Matlab que permite a modelação da absorção sonora em painéis perfurados e que servirá como ferramenta para uma melhor compreensão do comportamento acústico dos diferentes sistemas no que respeita à influência de algumas variáveis (espessura de caixa-de-ar, percentagem de furação, espaçamento entre furo, entre outras).

ABSTRACT

Closed spaces acoustics presents several different challenges, according to the space being treated and the requirements of its usage. Spaces like radio studios or home cinemas, are generally small in dimension but with high demands regarding their acoustic behavior.

A technology that is currently used by the automotive industry (among others) in vibration control, consists in applying coatings with microparticles in the support surface, which under action of electric charges, arrange the microparticles in an uniform and homogeneous fashion. This technology, known as flocking, provides a finishing pleasant to the touch, visually appealing and efficient in controlling parasitic noise. Within the scope of this thesis, it is intended to verify the feasibility of this coating technique in acoustic solutions, such as perforated acoustic panels or absorbing acoustic foams, in order to combine the high acoustic performance of these systems with an appropriate aesthetic look. Small sized samples (diameters of 10 cm and 2.9 cm for low and high frequencies, respectively) were tested with different perforations and three different configurations (without air-box, with an empty 4cm air-box and with a 4cm air-box filled with an absorbent material). The test method used in this work was the Impedance Tube, being the purpose of this study to achieve a better understanding how flocking influence the performance of the systems under consideration. A numerical model, programmed in Matlab, was also used to model the sound absorption in perforated panels. This model was used to evaluate how some variables (such as air-box thickness, spacing between holes, drilling percentage, among others...) influence the systems acoustic behavior.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	ix
SIMBOLOGIA	x
ABREVIATURAS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da Tese	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Descrição de Soluções Convencionais.	13
2.1.1 Materiais Porosos	13
2.1.2 Sistemas Ressonantes	16
2.1.3 Soluções Mistas	18
2.1.4 “Flocagem”.....	19
3 MODELAÇÃO DA ABSORÇÃO DO SOM.....	20
3.1 Formulação	20
3.2 Influência das características do painel na absorção sonora.....	22
3.2.1 Descrição da aplicação informática.....	23
3.2.2 Resultados Observados.....	24
4 ENSAIOS LABORATORIAIS	29
4.1 Câmara Reverberante.....	29
4.2 Tubo de Impedância.....	31
4.2.1 Norma ISO 10534-2 e procedimento de ensaio.....	33
4.3 Descrição das Amostras	35
4.3.1 Provetes Flocados	35
4.3.2 Provetes Lisos.....	38
4.3.3 Lã de Rocha	39
5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAINÉIS PERFURADOS	40
5.1 Modelação Vs. Ensaios laboratoriais.....	40
5.1.1 Resultados Obtidos	41

5.2	Ensaio laboratoriais - painéis flocados.....	43
5.2.1	Influência da Caixa-de-ar	43
5.2.2	Influência da Lã de Rocha na Caixa-de-ar	45
5.2.3	Percentagem de Furação e sua Influência.....	47
5.2.4	Influência do Tipo de cola	48
5.2.5	Influência da Espessura da Espuma Aplicada.	50
5.2.6	Influência da Tela nos Provetes.....	52
5.3	Influência do revestimento por “flocagem”	54
6	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Propagação do som através do ar (Carvalho, 2009)	6
Figura 2.2 - Descrição geométrica da chegada do som direto e indireto ao recetor.....	8
Figura 2.3 - Tempo de reverberação.....	8
Figura 2.4- Materiais porosos e respetivo comportamento	10
Figura 2.5- Materiais fibrosos e respetivo comportamento	11
Figura 2.6- Esquema de um ressoador “tipo Helmholtz”	11
Figura 2.7 - Esquemas de um painel ressonador ou membrana	12
Figura 2.8 - Tablier de um automóvel “flocado”, e fibras têxteis de vários tons	12
Figura 2.9- Aumento da absorção associado ao aumento de espessura	15
Figura 2.10- Aumento da absorção do material poroso/fibroso, originado pela maior distância ao suporte.....	15
Figura 2.11 – Coeficiente de absorção de um ressoador	16
Figura 2.12 – Mecanismo de um ressoador	17
Figura 2.13- Coeficiente de absorção de um sistema misto	18
Figura 2.14- Exemplo de uma máquina de flocar	19
Figura 3.1 – Esquema do sistema absorvente para a modelação.....	21
Figura 3.2- Aplicação para cálculo do coeficiente de absorção sonoro de painéis perfurados. Modelo programado em Matlab	23
Figura 3.3 – Esquema com os parâmetros considerados na modelação	23
Figura 3.4 – Curva de absorção do provete de referência obtida por cálculo	24
Figura 3.5 – Consequência do aumento de espessura do painel.....	25
Figura 3.6 – Efeito do aumento da espessura da caixa-de-ar	25
Figura 3.7 – Resultado do aumento de área aberta do painel	26
Figura 3.8 – Mudança da absorção, originada pelo aumento do tamanho dos orifícios	27
Figura 3.9 – Resultado do aumento da resistividade do material absorvente, colocado na caixa-de-ar.	27
Figura 4.1 – Fonte sonora e microfone montado em girafa giratória. Painéis de policarbonato	30
Figura 4.2 – Esquema do funcionamento de um tubo de impedância.....	32

Figura 4.3 – Tubo de impedância com êmbolo para baixas frequências e altas frequências .	32
Figura 4.4 - Sistema multianalisador Pulse. Computador portátil com o software Pulse LabShop versão 15.1.0	33
Figura 4.5 - Amplificador do tipo 2716C.....	33
Figura 4.6 – Exemplo de provetes flocados com 10 cm de diâmetro.....	36
Figura 4.7 – Exemplo de provetes flocados com 2.9 cm de diâmetro.....	37
Figura 4.8 – Aumento da resistividade da lã de rocha, originado pela variação da densidade da mesma	39
Figura 4.9 – Lã de rocha.....	39
Figura 5.1 – Comparação entre os resultados obtidos na modelação e os ensaios laboratoriais para o provete A1. Duas configurações, com caixa-de-ar de 4 cm e com caixa-de- ar e lã de 4 cm.....	41
Figura 5.2 - Comparação entre os resultados obtidos na modelação e os ensaios laboratoriais para o provete B1. Duas configurações, com caixa-de-ar de 4 cm e com caixa-de- ar e lã de 4 cm.....	42
Figura 5.3- Comparação entre os resultados obtidos na modelação e os ensaios laboratoriais para o provete C1. Duas configurações, com caixa-de-ar de 4 cm e com caixa-de- ar e lã de rocha com 4 cm.	43
Figura 5.4 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com e sem caixa-de-ar, para as baixas frequências. Provede: ACU163A_12 e ACU193A_12.	44
Figura 5.5 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com e sem caixa-de-ar, para as altas frequências. Provede: ACU168A_12 e ACU198A_12.	44
Figura 5.6 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com e sem lã de rocha, para as baixas frequências. Provede: ACU166A_12 e ACU167A_12.	45
Figura 5.7 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com e sem lã de rocha, para altas frequências. Provede: ACU171A_12 e ACU172A_12.	46
Figura 5.8 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente percentagem de perfuração e para as baixas frequências. Provede: ACU213A_12 e ACU216A_12.	47
Figura 5.9 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente percentagem de perfuração e para altas frequências. Provede: ACU218A_12 e ACU221A_12.	47
Figura 5.10 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente forma de colagem e para baixas frequências. Provede: ACU186A_12 e ACU216A_12.	49
Figura 5.11 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente forma de colagem e para altas frequências. Amostra: ACU191A_12 e ACU221A_12.	49

Figura 5.12 - Fotografias de provetes, com diferentes formas de colagem e respetiva “malha” da espuma autoadesiva. Amostra: ACU186A_12 e ACU216A_12 50

Figura 5.13 - Gráfico e fotos das respetivas amostras, com diferente espessuras de espuma e para as baixas frequências. Amostra: ACU184A_12 e ACU194A_12. 51

Figura 5.14 - - Gráfico e fotos das respetivas amostras, com diferente espessuras de espuma e para as altas frequências. Amostra: ACU189A_12 e ACU199A_12..... 51

Figura 5.15 - Gráfico e fotos das respetivas amostras, com diferença na utilização de tela e para as baixas frequências. Provede: ACU173A_12 e ACU193A_12..... 52

Figura 5.16- Gráfico e fotos das respetivas amostras, com diferença na utilização de tela e para altas frequências. Provede: ACU178A_12 e ACU198A_12. 53

Figura 5.17 – Curva de absorção para painel liso e flocado em duas configurações distintas. Provede: B1 e ACU177A_12. 54

Figura 5.18 - Curva de absorção para painel liso e flocado em duas configurações distintas. Provede: B1 e ACU187A_12. 55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características dos provetes de 10 cm de diâmetro.....	36
Tabela 4.2 - Características dos provetes de 2.9 cm de diâmetro.....	37
Tabela 4.3- Características dos provetes liso de 10 cm de diâmetro.	38

SIMBOLOGIA

- V Volume do compartimento (m^3), [equação (1)]
- A Área de absorção equivalente (m^2), [equação (1)]
- T Tempo de Reverberação (segundos), [equação (1)]
- α Coeficiente de Absorção, [equação (2)]
- $E_{Absorvida}$ Energia absorvida, [equação (2)]
- $E_{Incidente}$ Energia Incidente, [equação (2)]
- d Espessura do painel, [Figura 2.6]
- D Espessura da caixa-de-ar, [Figura 2.6]
- r Raio dos orifícios, [Figura 2.6]
- Z_{ca} Impedância característica, (Material Poroso/Fibroso), [Figura 3.1]
- k_a Constante de propagação, [Figura 3.1]
- Z_{s_0} Impedância característica, ponto 0, [Figura 3.1]
- ρ_0 Densidade do ar, [equação (6)]
- ω Frequência angular, [equação (6)]
- l_0 Espessura do painel, [equação (6)]
- r Raio dos orifícios, [equação (6)]
- η Coeficiente de viscosidade do ar, [equação (6)]
- λ Comprimento de onda, [equação (6)]
- J_n Ordem n da função de Bessel, [equação (6)]
- k_s Número de onda Stokes, [equação (6)]

ABREVIATURAS

EPS — Poliestireno Expandido

ITeCons — Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção da Universidade de Coimbra

MDF — Medium Density Fiberboard – Painéis de fibras de densidade média

NRC — Coeficiente de Redução de Ruído

PUR — Elastómeros de poliuretano

Tr — Tempo de Reverberação

XPS — Poliestireno extrudido

Nos gráficos:

- S/ Caixa — Configuração do Pannel: Encostado ao êmbolo
- C/ Caixa-de-ar — Configuração do Pannel: Afastado 4 cm do êmbolo
- C/ Caixa + Lã — Configuração do Pannel: Afastado 4 cm do êmbolo, com lã de 4 cm de espessura entre o pannel e o êmbolo.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Durante a maior parte dos dias, seja em lazer, trabalho ou outro tipo de atividades, o som e/ou ruído, têm uma presença constante nos edifícios. É também sabido que a existência de um ambiente acústico inadequado nesses espaços provoca aos seus utilizadores falta de concentração, dificuldades na comunicação, stress, cansaço, entre outros problemas. Sendo assim, é importante a existência de um ambiente cómodo, acolhedor e com um tratamento acústico adequado à sua função.

Como foi dito, todos os espaços interiores necessitam de uma acústica adequada à sua função. Estas necessidades, que são agora impostas por regulamentos cada vez mais restritivos, impõem a esses espaços níveis de conforto acústico elevados através da implementação de limites para alguns parâmetros acústicos, como é exemplo o tempo de reverberação, entre outros. Assim estas exigências têm estimulado uma investigação por parte da indústria, originando o aparecimento de novas soluções, capazes de satisfazer as leis às quais estão submetidas e através dessa evolução cumprir as necessidades da sociedade.

Muitas vezes, quando se concebe um edifício ou sala, não é dada a devida relevância a diferentes aspectos que podem condicionar a perceção do som e a qualidade do ambiente sonoro interior. Deste modo, é importante perceber os fenómenos envolvidos, pois a perceção de um som é obtida através da combinação de um som direto e da reflexão do som proveniente das restantes superfícies da sala. Assim, e como todos os espaços têm uma finalidade distinta, é imprescindível efetuar uma adequada caracterização dos mesmos, para que posteriormente se possam empregar as técnicas e materiais apropriados para a obtenção de um ambiente acústico condigno com a sua funcionalidade.

Uma técnica a que geralmente se recorre para melhorar a absorção sonora dos espaços consiste na aplicação de revestimentos com painéis de madeira ranhurados ou perfurados, podendo ou não apresentar uma caixa-de-ar no tardo dos mesmos. Esses sistemas podem ser melhorados através da inclusão de materiais porosos ou fibrosos na caixa-de-ar, ou através da aplicação desses mesmos materiais, na frente ou nos orifícios dos painéis. Este trabalho surge, precisamente, no âmbito do aparecimento de uma técnica de revestimento, designada por

“flocagem”, e cuja aplicação pode ser feita em diferentes tipos de superfície. É objetivo desta dissertação perceber a influência desta solução quando aplicada em painéis de madeira perfurados, assim como estudar a influência de diferentes configurações, identificando de entre estas, algumas que se possam revelar adequadas para uma aplicação prática.

Ainda neste trabalho, será feita uma avaliação sobre as variáveis físicas e geométricas que alteram o comportamento destes sistemas no que diz respeito à absorção sonora. Nesta análise, será utilizado um modelo numérico, implementado em Matlab, que permitirá de forma mais clara perceber os fenómenos envolvidos, assim como verificar o comportamento de diferentes sistemas quando as suas características são alteradas. Através desse modelo será ainda realizada uma comparação entre os resultados teóricos e os resultados experimentais obtidos no Tubo de impedância, e verificar-se-á a proximidade entre os mesmos.

1.2 Objetivos

Consciente de que o conforto acústico assume um papel importante no tratamento dos edifícios, contribuindo para o bem-estar de todos os seus utilizadores, esta investigação propõe-se a avaliar e perceber o comportamento de alguns painéis revestidos através da técnica de “flocagem”, compreendendo a influência deste tipo de revestimento na absorção sonora dos diversos painéis.

Deste modo, os objetivos deste trabalho visam:

- Analisar o coeficiente de absorção sonora de diversos sistemas em tubo de impedância;
- Verificar a influência na absorção sonora, originada pela existência de caixa-de-ar no tardo dos painéis;
- Averiguar a diferença de absorção, provocada pelas diferentes colas utilizadas;
- Aclarar o efeito da aplicação da lã de rocha na caixa-de-ar dos painéis;
- Investigar as diferenças na absorção provocadas pela diferente percentagem de furação de painéis;
- Perceber qual a influência da tela na absorção sonora dos painéis;
- Comparar os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais, com os resultados teóricos obtidos por modelação.

1.3 Estrutura da Tese

No presente subcapítulo é apresentado um resumo sobre a informação que se encontra em cada um dos capítulos da dissertação. Assim, esta encontra-se dividida em 6 capítulos, em que se faz uma exposição sobre os seguintes temas:

- Capítulo 1: Neste espaço, é realizado um enquadramento sobre o tema ao qual este trabalho se destina, sendo também enumerados os objetivos e a sua estrutura.
- Capítulo 2: No segundo capítulo, é feito um levantamento sobre vários conceitos fundamentais para o entendimento da temática tratada (revisão bibliográfica), estando contido no mesmo, um subcapítulo (2.1), onde foi efetuada de forma mais detalhada uma descrição e caracterização de alguns produtos e soluções utilizados no tratamento do condicionamento acústico de edifícios.
- Capítulo 3: No capítulo 3 serão enunciados conceitos teóricos sobre a modelação e avaliação experimental da absorção sonora de painéis de madeira perfurados, realizando-se também um estudo baseado num modelo programado em Matlab, que permite visualizar as mudanças no comportamento destes painéis, quando as suas características são alteradas. Ainda neste capítulo encontra-se um subcapítulo com a descrição da aplicação (modelo programado em Matlab) utilizada, assim como um outro onde se podem visualizar gráficos e um registo de todas as alterações observadas aquando da alteração das características dos painéis.
- Capítulo 4: Este capítulo é destinado aos ensaios laboratoriais e encontra-se dividido em 3 subcapítulos. No primeiro, reside uma breve descrição sobre o ensaio realizado em câmara reverberante (características, normas e procedimentos). O segundo e terceiro subcapítulos destinam-se, respetivamente, ao ensaio em tubo de impedância e aos provetes testados na realização deste trabalho. Visto o ensaio em tubo de impedância ter sido o utilizado para se obter o coeficiente de absorção dos painéis, a descrição deste foi feita de forma mais detalhada. No subcapítulo destinado à caracterização dos provetes, encontram-se tabelas e fotos onde se expõem as características dos mesmos e se identificam as configurações utilizadas nos ensaios.
- Capítulo 5: Neste capítulo é feita uma avaliação do comportamento dos painéis. O mesmo está dividido em três subcapítulos, onde se pode observar uma comparação das várias soluções testadas. As comparações efetuadas neste capítulo procuram perceber as diferenças entre:

- Modelação vs Ensaio laboratoriais. (Neste subcapítulo encontra-se uma comparação feita com base em 3 painéis perfurados lisos. Estes painéis foram testados em tubo de impedância e também no modelo programado em Matlab. O intuito é verificar a proximidade entre resultados obtidos e assim perceber se os resultados obtidos correspondem aos teoricamente previstos.);
 - Ensaio laboratoriais. (Neste subcapítulo é feita uma comparação entre as várias soluções testadas, procurando descobrir quais as vantagens da aplicação desta nova técnica (“flocagem”) nos painéis, bem como a melhor forma de se aplicarem. Este está dividido em outros seis subcapítulos, onde se efectua uma comparação de amostras, nomeadamente, sobre temas como a utilização ou não de caixa-de-ar, a aplicação de lã de rocha nesta caixa, a percentagem de furação das amostras, a influência do tipo de cola utilizada para aplicação das espumas, a espessura dessas mesmas espumas e utilização de tela entre a espuma e o MDF.);
 - Efeito do revestimento por “flocagem”. (Aqui é feita uma observação sobre os ensaios laboratoriais realizados em três painéis perfurados com as mesmas características, no que diz respeito à percentagem de perfuração, raio dos orifícios e espessura do painel. A diferença entre estes painéis está em que um dos painéis é liso, sendo formado apenas pelo MDF, enquanto os outros contêm espumas flocadas na sua constituição.).
- Capítulo 6: Por fim, no último capítulo, encontra-se a conclusão, onde se efetua uma análise a todo o estudo realizado, sendo também incluído no mesmo uma proposta para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A acústica de um espaço depende do tipo de som ou ruído que se desenvolve nesse local. O que acontece quando um som se propaga através do ar, é a formação de uma perturbação do meio que se estende ao longo do mesmo de forma periódica, afastando-se do local onde foi gerado o estímulo sonoro. Esse fenómeno, denominado de onda de pressão, é caracterizado como uma alteração da pressão atmosférica acima ou abaixo da sua posição de equilíbrio, que provoca nas moléculas do ar um movimento periódico ao longo da direção de propagação da onda (Carvalho, 2009).

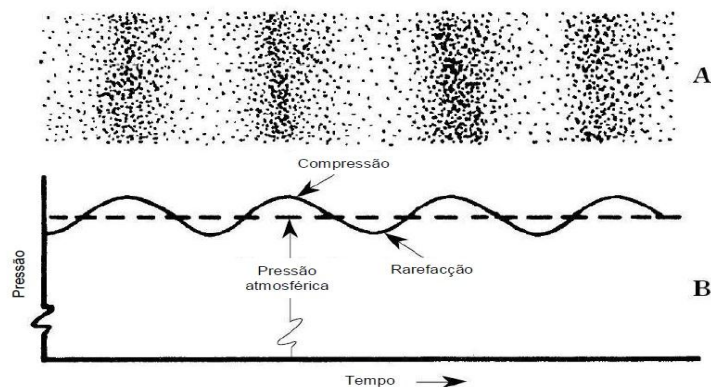


Figura 2.1-Propagação do som através do ar (Carvalho, 2009).

No estudo acústico de um edifício ou sala, há que ter em conta três situações distintas de propagação do som:

- o som que se transmite entre dois compartimentos diferentes, que é tratado através de isolamento acústico;
- o som que se propaga por via sólida (som de percussão);
- e o som no interior de espaços fechados, a que este trabalho se dedica e que tem como ferramenta de tratamento o chamado condicionamento acústico (Tadeu et al, 2010).

O condicionamento acústico de um espaço tem como finalidade dotar o local de características adequadas à obtenção de um ambiente acústico apropriado ao seu uso. Para que isso se efetue com êxito, deve ser precedido de uma análise das características do campo sonoro existente, tendo-se em conta a forma do espaço (nomeadamente a sua geometria), o volume e o tipo de superfícies que esse local contém. Esse estudo deverá realizar-se nas fases iniciais do projeto, não devendo ser universalizado, pois cada caso é um caso, e se assim não for, os resultados desejados podem ficar comprometidos (Carvalho, 2009; Tadeu et al, 2010; Leão, 1994).

Para que se obtenha um espaço com uma adequada distribuição de som, sem ecos e sem ruídos de fundo, deve-se ter em conta alguns parâmetros caracterizadores do comportamento acústico de espaços fechados. Esses parâmetros são hoje obtidos através de ferramentas cada vez mais eficazes, que permitem ao projetista realizar uma caracterização do espaço de forma mais precisa e prover, a posteriori, essas áreas de soluções apropriadas.

Embora nos últimos tempos se tenha verificado um grande avanço no que toca ao desenvolvimento de novas soluções para a melhoria da acústica dos edifícios, a realidade é que o tratamento do som não é uma tarefa simples, pois depende de inúmeros fatores como referido anteriormente. Outro conceito a ter em conta no dimensionamento de uma sala, é que a propagação do som em espaços fechados não resulta apenas da energia sonora diretamente incidente (ondas com trajetória mais curta, mais intensa, sendo estas as primeiras a chegar ao recetor), mas sim da soma desta energia, com a energia refletida por todos os obstáculos presentes nesse mesmo espaço. Uma outra noção importante, consiste no decréscimo do nível sonoro em de cerca de 6 dB, sempre que a distância à fonte de ruído se duplica (espaços abertos). No entanto, este decaimento de som nunca é tão elevado, pois as ondas sonoras ao percorrerem um espaço fechado, encontram no seu percurso obstáculos onde a energia é reflectida (Carvalho, 2009; Tadeu et al, 2010).

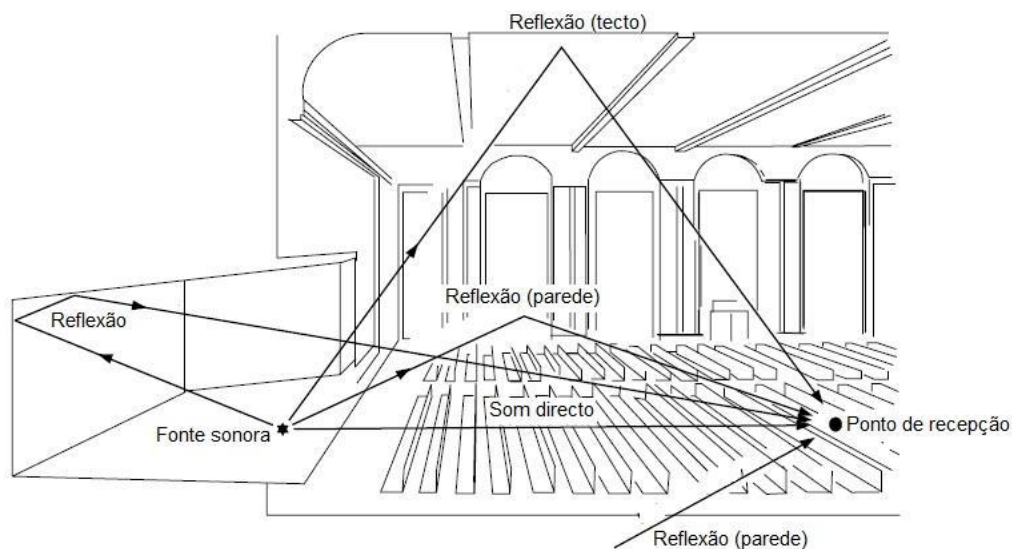


Figura 2.2 - Descrição geométrica da chegada do som direto e indireto ao recetor (Isbert, 1998).

Um dos parâmetros mais utilizado na caracterização acústica de edifícios é o tempo de reverberação (T_r). Este parâmetro é de fácil utilização, eficaz e traduz-se como sendo o intervalo de tempo, em segundos, necessário para se verificar um decréscimo do nível sonoro em 60dB (redução de 1 milionésimo de vezes da sua intensidade sonora inicial), após paragem da fonte sonora (Long, 2006; Patraquim, 2007).

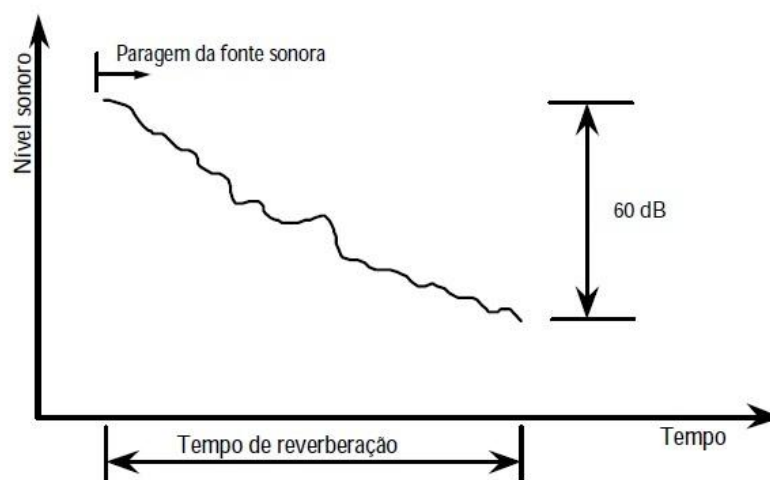


Figura 2.3 - Tempo de reverberação (Tadeu et al, 2010).

O tempo de reverberação é de fácil manipulação, porque na realidade depende de fatores que se podem facilmente modificar. As variáveis deste parâmetro são o volume da sala, a frequência do som, o revestimento da envolvente e o recheio existente no interior do espaço. Existem vários modelos que fazem o relacionamento entre os fatores atrás referidos (por ex. Sabine, Millington e Eirynng), sendo o mais conhecido e simples o modelo de Sabine. Este relaciona o tempo de reverberação com a área de absorção equivalente (A) e com o volume do compartimento (V), sendo a fórmula dada por:

$$T = 0.163 * \frac{V}{A} \quad (1)$$

Todos os materiais provocam a reflexão do som e contribuem para o campo sonoro de um espaço. No entanto, a contribuição desses materiais para o campo sonoro, depende diretamente das características da sua superfície. Se uma superfície for demasiado lisa, opaca ou pesada e rija (o que geralmente sucede com as superfícies de maior dimensão das nossas salas, paredes, tetos e janelas), o campo sonoro criado é reverberante, ou seja, a energia sonora incidente é refletida quase na sua totalidade. Ao invés disso, se as superfícies forem preenchidas na sua totalidade por materiais porosos, a energia incidente é quase toda absorvida, obtendo-se assim um espaço denominado de “Surdo”, onde se tem um decréscimo do nível de pressão sonora muito próximo dos 6 dB enunciados anteriormente, pois o único som a chegar ao recetor é o som que provém diretamente da fonte. À relação entre a energia absorvida e a energia incidente, designa-se de Coeficiente de Absorção (α). A sua expressão é dada por (Tadeu et al, 2010):

$$\alpha = E_{Absorvida} / E_{Incidente} \quad (2)$$

A qualidade acústica de um espaço pode ser, então, avaliada através do tempo de reverberação que, como foi dito anteriormente, depende de diversos factores. A forma mais fácil de manusear o Tr é através das superfícies. Assim há que prover essas mesmas áreas de materiais com coeficientes de absorção adequados à sua utilização. Se o que se pretende é uma superfície muito refletora, os materiais a utilizar têm de possuir um coeficiente de absorção muito reduzido ($\alpha \approx 0$). Ao invés, se o pretendido for uma superfície muito absorvente, os materiais a utilizar têm de ter um coeficiente de absorção elevado ($\alpha \approx 1$), o que, na prática, é muito difícil, pois para que isso suceda, tem de se verificar a impedância (relação entre pressão sonora e a velocidade da partícula de uma onda plana), ou seja, a impedância da superfície onde a onda embate tem de ser o mais próxima possível da impedância do ar e por outro lado, o amortecimento da onda tem de ser elevado. Na maioria dos casos, para se obter um espaço com um bom condicionamento acústico (tempo de reverberação ideal) há que

conjugar no mesmo mais do que um tipo de soluções (sistemas mistos), como se explica mais adiante (Tadeu et al, 2010; Long, 2006; Leão, 1994; Patraquim, 2007).

Como referido anteriormente, todas as superfícies absorvem e refletem as ondas, no entanto, um material não possui a mesma capacidade de absorver energia em toda a gama de frequências. Devido a essa particularidade, a escolha de um material deve ter em conta a frequência à qual está dirigida. Assim, foi efetuada uma divisão das frequências em três grupos baixas, médias e altas frequências, para os quais existem soluções mais adaptadas. Também devido a essa especificidade, criou-se um parâmetro que permite a comparação entre materiais distintos, sendo esse parâmetro chamado Coeficiente de Redução de Ruído (NRC). Este traduz a média de absorção sonora, de um determinado produto, para as bandas de frequência centradas nos 250, 500, 1000 e 2000 Hz (Leão, 1994).

Compreendida a complexidade do som no que diz respeito ao tratamento da sua absorção, abordam-se, de seguida, as características dos diferentes materiais e sistemas existentes, efetuando-se depois, uma explicação mais pormenorizada das soluções utilizadas hoje em dia no condicionamento acústico de edifícios.

Para o tratamento das altas frequências são usualmente utilizados os materiais porosos e fibrosos que são caracterizados como tendo uma parte sólida que ocupa apenas algum do seu volume e uma outra parte constituída por vazios que podem ou não comunicar entre si. Nestes sistemas, a variação da pressão atmosférica, gera movimentos no ar, que ao passar entre os orifícios do material cria atrito devido a viscosidade do mesmo. Por outro lado, existe também um mecanismo de fricção entre partículas que se dá aquando do impacto da onda sonora na superfície, resultando deste processo, a redução da energia sonora e a geração de calor.

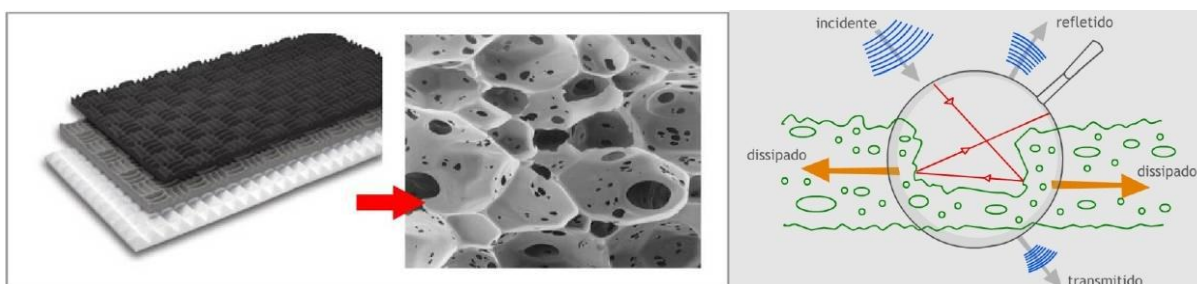


Figura 2.4- Materiais porosos e respetivo comportamento (reproduzido de Portela, s.d).

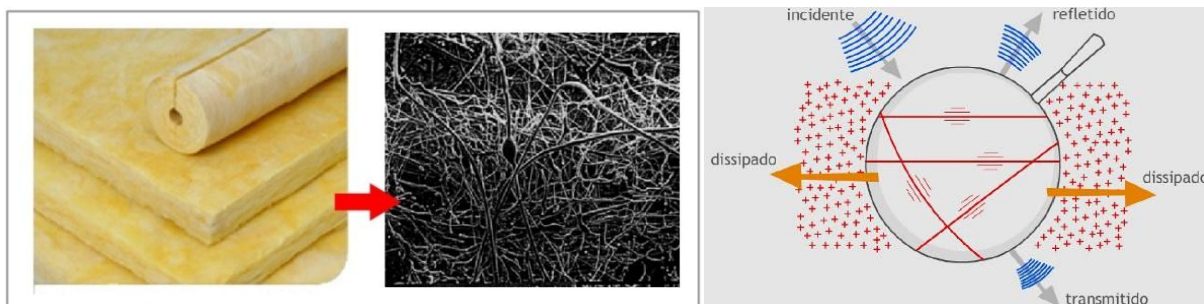


Figura 2.5- Materiais fibrosos e respetivo comportamento (reproduzido de Portela, s.d).

Um segundo tipo de sistema absorvente corresponde aos sistemas ressonantes, que podem dividir-se em dois tipos: ressoadores e painéis ressonantes ou membranas. Estes sistemas possuem propriedades ótimas na resolução das médias e baixas frequências, respetivamente, sendo quase sempre conjugados quando aplicados. O ressoador mais conhecido e utilizado é o ressoador de Helmholtz, sendo geralmente reproduzido por um painel perfurado afastado do seu suporte (simulando o agrupamento de várias garrafas “ressoador de Helmholtz”, com o fundo encostado à parede e o gargalo virado de forma a receber as ondas). Estes sistemas interagem com o ar através dos seus orifícios, pois ao serem atingidos pelas ondas criam um movimento da massa de ar existente no seu interior, provocando vibrações e a consequente diminuição da energia sonora, originada pelo atrito que se verifica entre as paredes e o ar. Do mesmo modo, o ar contido no corpo do ressoador (caixa-de-ar por detrás do painel perfurado) entra em movimento provocando assim, um acréscimo ainda maior da redução da energia sonora devido ao seu funcionamento tipo mola (Portela, s.d; Patraquim, 2007).

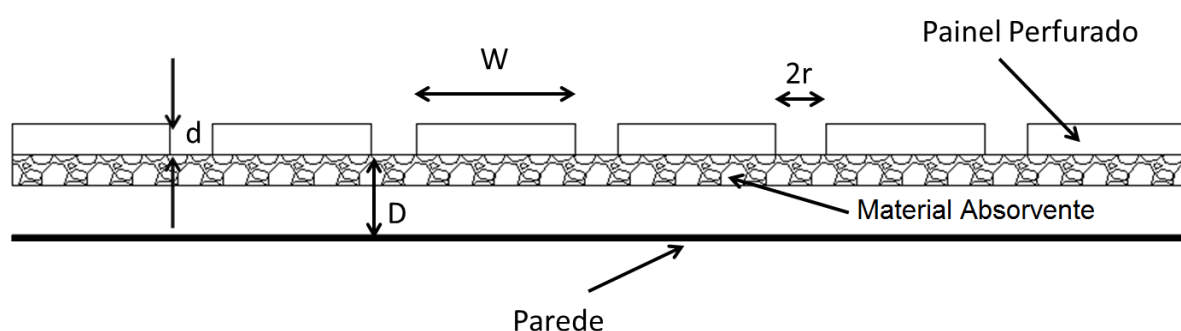


Figura 2.6- Esquema de um ressoador “tipo Helmholtz” (adaptado de Portela, s.d).

Para as baixas frequências são particularmente eficazes os painéis ressonantes ou membranas, que têm como particularidade a sua elevada dimensão e baixa espessura que, aliadas à grande distância entre apoios, provocam vibrações na estrutura aquando do impacto da onda sonora,

gerando, assim, uma redução da intensidade sonora e perdas de calor originadas pela fricção das fibras do material, quando este entra em flexão (Portela, s.d; Patraquim, 2007).

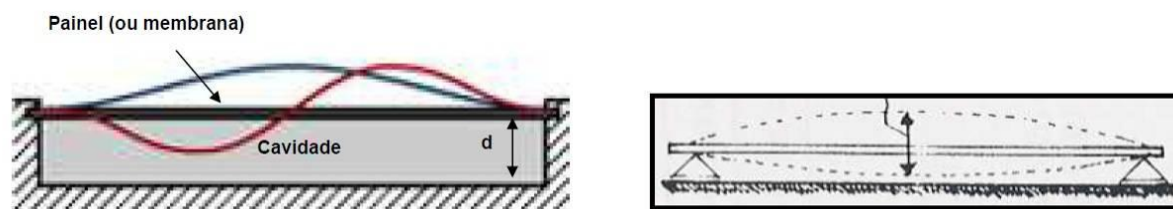


Figura 2.7 - Esquemas de um painel ressonador ou membrana (Patraquim, 2007).

O número de soluções existentes no mercado para a acústica de edifícios é enorme e tende a aumentar com a pesquisa ativa que tem sido feita por parte da indústria. A chegada desses novos produtos ao mercado tem de ter em conta outros fatores além da acústica, pois as normas e exigências existentes nos dias de hoje tendem a melhorar as características desses mesmos edifícios em vários campos, como é o caso da térmica e da estética, entre outros. Na busca de produtos cada vez mais eficientes, surgiu um novo produto na área dos revestimentos que, apesar de não ser muito conhecido, já se pode encontrar aplicado em alguns artigos decorativos e peças de automóveis. Esse produto, obtido através de uma técnica de colagem denominada de “flocagem”, apresenta um aspeto visual e tátil agradável, sendo também reconhecido pela sua eficácia no controlo de vibrações. O processo de produção deste material consiste na aplicação direta de pequenas fibras têxteis em qualquer substrato onde se tenha aplicado um adesivo (cola), sendo estas coladas perpendicularmente à superfície a “flocar”, através da intervenção de um campo electrostático aplicado sobre as mesmas (ibflock@).



Figura 2.8 - Tablier de um automóvel “flocado” (à esquerda), e fibras têxteis de vários tons (foto da direita) (forum.autoportal.iol@; produto.mercadolivre@).

Para que se possa avançar com o processo de fabrico de um novo produto, devem conhecer-se as características do mesmo relativamente ao assunto que se pretende tratar. Assim, para obter um conhecimento prévio dos materiais no que diz respeito à absorção acústica, existem várias metodologias de ensaio disponíveis, como, por exemplo, a realização de ensaios através do tubo de impedância ou de uma câmara reverberante. Esses ensaios laboratoriais encontram-se bem definidos em normas de ensaio, designadamente nas normas ISO 10534-2 e NP EN ISO 354 para tubo de impedância e câmara reverberante, respectivamente; mais adiante neste documento pode encontrar-se uma descrição mais detalhada de cada um dos ensaios.

O ensaio de absorção acústica realizado através do tubo de impedância torna-se mais expedito e até mais económico do que o ensaio em câmara reverberante, uma vez que é feito a partir de amostras de pequena dimensão (circulares, com 10 cm de diâmetro, para cálculo dos 50 aos 1600 Hz e com 2.9 cm, para altas frequências, 1600 Hz aos 6300 Hz) e permite obter resultados próximos acerca da sua absorção. No entanto, neste ensaio as ondas incidem sempre de forma perpendicular à amostra, o que não traduz o que realmente acontece numa sala. Assim, após estudar as amostras de pequena dimensão, deve-se proceder a uma escolha das mesmas (por exemplo através dos resultados obtidos em tubo de impedância) e, de seguida, proceder-se ao fabrico de amostras de maiores dimensões com uma área de 10 m² a 12 m². Posteriormente, estas amostras de grandes dimensões devem ser testadas em câmara reverberante, pois neste ensaio é possível obter-se um campo sonoro mais próximo do existente nas salas (campo difuso) (Godinho et al, 2011; Patraquim et al, 2012; Jordão, 2011).

2.1 Descrição de Soluções Convencionais.

2.1.1 Materiais Porosos

Após Sabine ter realizado os primeiros estudos na área da acústica, entre os séculos XIX e XX, Morse et al, em 1940, realizaram um estudo em materiais porosos onde se relacionou a absorção sonora com a impedância acústica. Mais tarde, em 1951 Ingard e Bolt, efetuaram uma análise em materiais do mesmo tipo, colocando-os afastados de uma parede rígida, utilizando dois tipos de configuração (expostos diretamente as ondas sonoras e com um painel perfurado na frente). No ano seguinte, Callaway et al investigaram o tema, percebendo qual a influência da densidade do material na sua absorção sonora, aquando da incidência de ondas sonoras normais em superfície exposta. Depois destes, vários foram os autores que realizaram estudos acerca destes materiais de forma isolada e conjugada, procurando descobrir quais as formas e locais mais adequados para se estes materiais (Morse et al, 1940; Ingard et al, 1951; Callaway et al, 1952).

Dentro da gama de materiais porosos e fibrosos, existem muitas soluções e sistemas, sendo que alguns produtos são utilizados de forma oculta e outros expostos (apresentando uma dupla função, acústica e estética). Os mais utilizados no tratamento da absorção acústica são entre outros:

- tecidos e cortinas;
- aglomerados de cortiça;
- materiais plásticos (EPS, PUR, XPS....);
- aglomerados de fibra de madeira;
- massas porosas para projeção;
- mantas ou painéis de fibra mineral.

Estes materiais, conhecidos pelo seu elevado desempenho na absorção das altas frequências, realizam o seu trabalho devido à existência de espaços de ar no seu interior. Ao se dar uma perturbação da pressão atmosférica, a energia de vibração do ar é diferida às fibras que resistem entre elas, originando calor e dissipando, assim, parte da energia sonora incidente. Fator crucial na absorção destes materiais é o tamanho dos seus poros, pois se os mesmos forem demasiado grandes a vibração das fibras é menor, originando pouca redução de energia. Por outro lado, se os poros forem muito fechados ou as fibras demasiado rígidas, a redução de energia sonora também será pequena, pois as ondas não penetram no material, nem haverá vibração das fibras, originando uma baixa redução na absorção. Desta forma, deve-se escolher um material intermédio, sendo também importante que não se utilizem materiais como tintas ou outros que possam causar a obstrução dos poros e reduzir as suas capacidades.

Outro fator a ter em conta quando se utiliza este tipo de material é que a sua absorção aumenta de forma ascendente na gama de frequências, atingindo um patamar máximo nas altas frequências (≈ 2000 Hz, mantendo-se, geralmente, elevado nas restantes gamas). No entanto, verifica-se que a sua espessura pode influenciar o seu comportamento. A um aumento de espessura destes sistemas corresponde, geralmente, um aumento de absorção nas baixas e médias frequências. Desta forma, e visto o patamar máximo de absorção ocorrer nas altas frequências, a utilização de um material mais espesso pode antecipar o pico de absorção e melhorar o seu comportamento, Figura 2.9 (Oliveira, 2009).

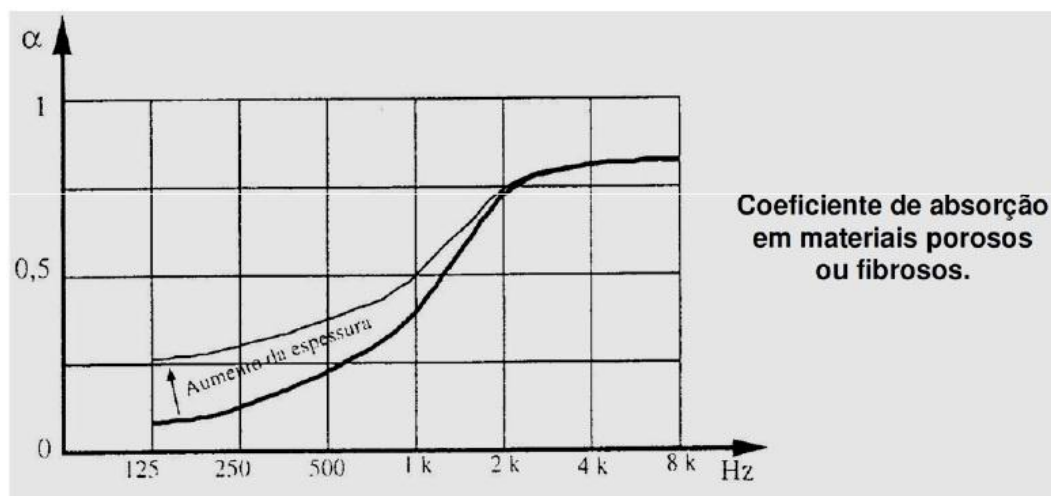


Figura 2.9- Aumento da absorção associado ao aumento de espessura (Oliveira, 2009).

Outra forma de melhorar estes sistemas é afastando o material do seu suporte criando uma caixa-de-ar no seu tardo. Para se retirar todo o potencial dos materiais porosos/fibrosos, estes devem ser colocados onde a velocidade de vibração das partículas do ar é máxima, reduzindo assim, a energia cinética de vibração correspondente. A colocação do material absorvente deve ser feita a distância de $1/4\lambda$ (timberacoustic@).

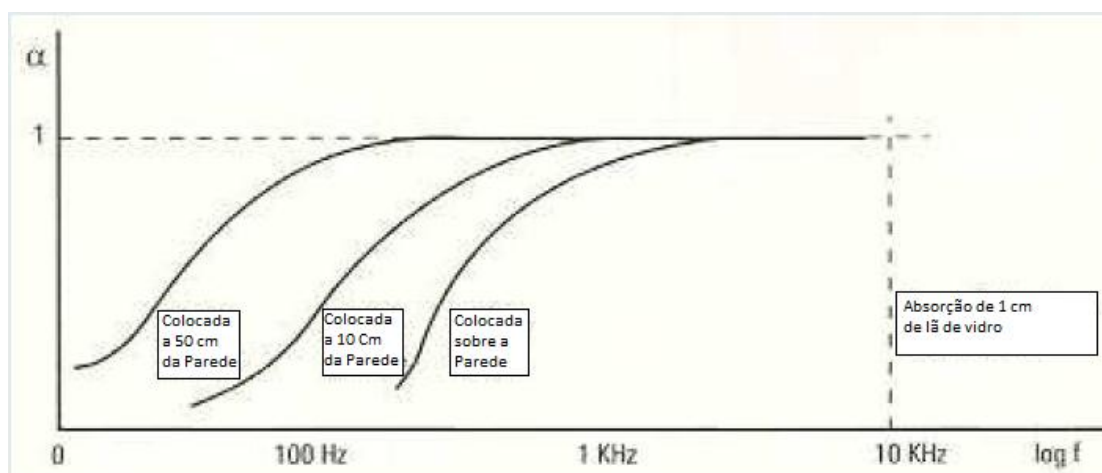


Figura 2.10- Aumento da absorção do material poroso/fibroso, originado pela maior distância ao suporte (timberacoustic@).

2.1.2 Sistemas Ressonantes

2.1.2.1 Membranas

Em 1956, Mikeska et al, realizaram um estudo sobre ressoadores para baixas frequências. Para isso, introduziram variações nos mesmos, alterando, por exemplo, os materiais porosos existentes na caixa-de-ar, o tamanho dos orifícios e a espessura do painel. Alguns anos depois Beranek e Vér prosseguiram com as investigações, aprofundando o conhecimento sobre estes sistemas. Desde então, a busca por soluções capazes de melhorar a absorção nas baixas frequências nunca mais parou (Mikeska et al, 1956; Beranek et al, 1992).

Os sistemas do tipo membrana, são conhecidos pela sua capacidade de absorção sonora nas baixas frequências. A dissipação de energia, por parte destes sistemas, dá-se devido a oscilação destes painéis aquando do impacto da onda sonora (a oscilação cria fricção entre as fibras do material, reduzindo, assim, a energia). Estes sistemas são geralmente constituídos por painéis de um material rígido, com espessura reduzida, colocados afastados da parede de suporte e com os seus apoios consideravelmente afastados, permitindo assim oscilações do material. A frequência de ressonância deste tipo de sistemas pode ser alterada através da espessura do painel, da espessura da caixa-de-ar e do tipo de material. Por exemplo, a uma redução da espessura da caixa-de-ar, corresponde um aumento da frequência de ressonância. Já a inserção de um material poroso na caixa-de-ar destes sistemas reduz o pico de absorção dos mesmos, mas aumenta a amplitude de frequências onde existe absorção. Caso se aplique um material poroso nos mesmos, deve-se afastar o material da “membrana” de forma a não restringir o movimento oscilatório do painel (timberacoustic@; Portela, s.d; Oliveira, 2009).

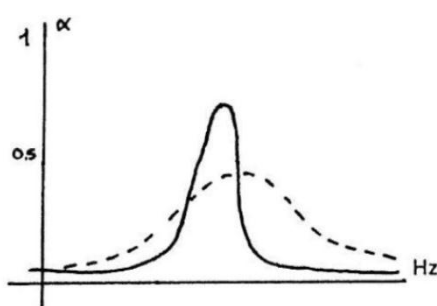


Figura 2.11 – Coeficiente de absorção de um ressonador. A cheio, sem lã mineral, a tracejado, com lã (adaptado de Meisser, 1986).

2.1.2.2 Ressonadores

Foi em 1947, que Bolt apresentou os seus primeiros estudos sobre absorção sonora em painéis perfurados. Nestes sistemas, que funcionam como ressoadores, verificou que a absorção sonora e frequência de ressonância, podiam ser modificadas através da alteração das suas características (espessura do painel, raio dos furos, nº de furos). Bolt descobriu que, através do aumento do raio dos furos, a frequência de ressonância de pico diminuía e que, com o aumento do nº de furos (taxa de furação/percentagem de furos), a frequência de ressonância do sistema aumentava (Bolt, 1947).

O ressoador de Helmholtzs ou ressoador de cavidade é reproduzido utilizando-se um painel perfurado, afastado da parede de suporte, simulando, assim, o agrupamento de vários ressoadores de Helmholtzs. Estes ressoadores geram a redução de energia sonora através do seu sistema de vibração tipo massa/mola, sendo o ar contido no orifício a massa e a cavidade por detrás do painel a mola, como indica a Figura 2.12. O sistema pode ser afinado para uma determinada frequência, alterando o tamanho do orifício, a espessura da caixa-de-ar, a espessura do painel ou a percentagem de furação (Kuttruff, 2000).

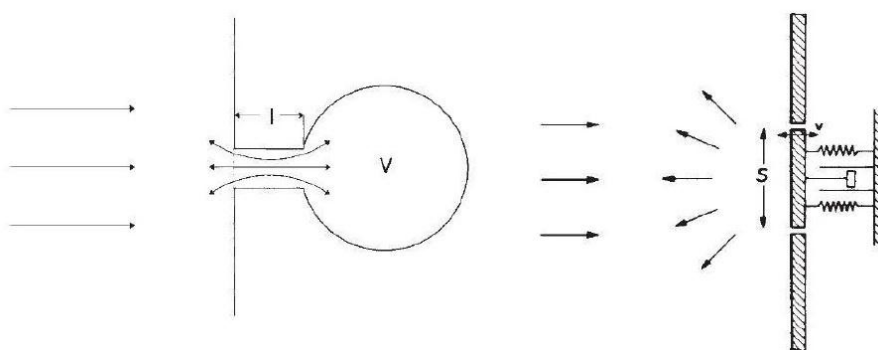


Figura 2.12 – Mecanismo de um ressoador (Kuttruff, 2000).

Nos ressoadores, assim como nas membranas, a absorção sonora máxima dá-se na frequência de ressonância do sistema, diminuindo rapidamente nas restantes. Contudo, pode-se aumentar a gama de frequências onde se verifica a absorção, através da colocação de materiais porosos ou fibrosos no interior da caixa-de-ar. No entanto, existe um custo associado que se traduz na redução do pico de absorção. A colocação destes materiais porosos deve ser feita imediatamente a seguir ao orifício, pois estes sistemas funcionam melhor para velocidades mais reduzidas do ar. Assim, ao se colocar o material poroso imediatamente depois do orifício, consegue-se uma redução de velocidade do ar aumentando a eficiência do sistema (Oliveira, 2009).

Como foi dito anteriormente, o aumento da taxa de furação gera aumento da frequência de ressonância e o aumento da espessura do painel ou do raio dos orifícios provoca uma diminuição da frequência de ressonância. Assim, e de forma a se obter uma redução de energia sonora mais elevada, podem-se utilizar painéis com diferentes raios de perfuração ou diferentes espessuras de painel e/ou caixa-de-ar, originando uma maior gama de frequências absorvidas.

2.1.3 Soluções Mistas

Como se verificou anteriormente, a absorção do som é um fenómeno complexo, sendo muito difícil criar uma superfície capaz de absorver a energia sonora em toda a gama de frequências. Desta forma, a solução mais adequada para a resolução destes problemas, será a associação de materiais porosos/fibrosos, membranas e ressoadores. Com a utilização destes três sistemas em simultâneo é possível criar uma superfície com coeficiente de absorção elevado em toda a gama de frequência (baixas, médias e altas), tal como indica a Figura 2.13.

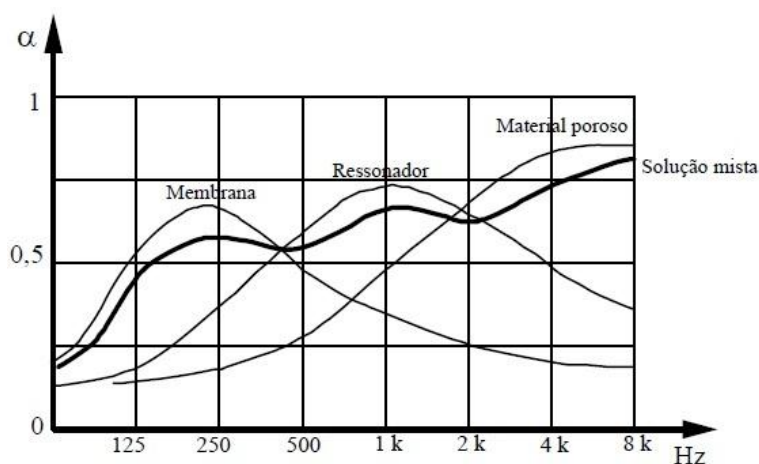


Figura 2.13- Coeficiente de absorção de um sistema misto (Tadeu et al, (2010)).

2.1.4 “Flocagem”

A “flocagem” é uma técnica que consiste em aplicar pequenas fibras têxteis ($\approx 2.5\text{mm}$ de comprimento), numa superfície onde se tenha colocado previamente um adesivo/cola. As fibras ficam coladas perpendicularmente à superfície através da aplicação de um campo electrostático que gera uma polarização dos flocos. Esta técnica é já muito utilizada em produtos como bijutarias, esponjas, têxteis e na indústria automóvel, pois tem um aspeto agradável, servindo, também como redutor de vibrações. Para além desta característica, apresenta ainda uma boa resistência à abrasão e humidade, melhorando o aspeto táctil dos materiais. As suas propriedades, no que diz respeito à absorção sonora, foram ainda pouco estudadas, sendo um dos objetivos deste trabalho perceber qual a influência desta técnica na absorção de painéis perfurados.



Figura 2.14- Exemplo de uma máquina de flocar (flockcolor@).

3 MODELAÇÃO DA ABSORÇÃO DO SOM

3.1 Formulação

Para os investigadores no ramo da acústica, a chegada de computadores e softwares cada vez mais eficientes ao mercado, facilitou o desenvolvimento de novas soluções, uma vez que permitem com algum rigor prever o comportamento do campo sonoro, dentro dos edifícios. Ao modelar a propagação do som, é possível calcular, de forma aproximada, qual a absorção de um determinado sistema e evitar alguns custos associados à escolha de soluções inadequadas.

Os painéis de madeira ou gesso perfurados são já há muito utilizados nos edifícios para condicionar a absorção sonora. Como já referido, a gama de frequências à qual se destinam depende das suas características. Para modelar a impedância acústica destes sistemas, tem então de se ter em conta as características do painel (tamanho dos orifícios, espessura de caixa-de-ar e do painel...) e, caso se aplique um material poroso/fibroso, deve-se também ter em atenção a porosidade e a espessura de material aplicado.

Um sistema de painéis perfurados pode considerar-se como uma associação de vários ressoadores de Helmholtz, ou seja, o agrupamento de vários orifícios e suas cavidades. O método de modelação destes sistemas consiste em considerar a conservação da impedância acústica de um único orifício num valor médio correspondente à área aberta de painel. Para isso, considera-se que a frente do painel é perfeitamente refletora e que a espessura do painel é igual ao comprimento de cada um dos pequenos tubos. Assume-se também que o comprimento de onda do som é maior do que a dimensão transversal do orifício. Termos como o efeito da reactância da caixa-de-ar ou viscosidade do ar são igualmente incluídos neste método.

O conceito de matriz de transferência é utilizado no estudo dos painéis perfurados, pois permite determinar a impedância acústica ao longo do sentido normal a uma interface de um material, recorrendo a continuidade da velocidade das partículas em ambos os lados do painel e às propriedades acústicas do meio. Caso exista um material poroso/fibroso na caixa-de-ar, é necessário conhecer a sua impedância característica Z_{ca} e a constante de propagação k_a .

Através do conhecimento da impedância acústica do material é possível determinar qual o coeficiente de absorção sonora do mesmo e estimar também o seu valor de absorção para campo difuso.

A configuração do sistema absorvente é a que se encontra representado na figura seguinte (Figura 3.1). Considerando que o sistema reage “localmente” (na zona do orifício numerado) e admitindo a incidência de ondas normais ao plano, tem-se:

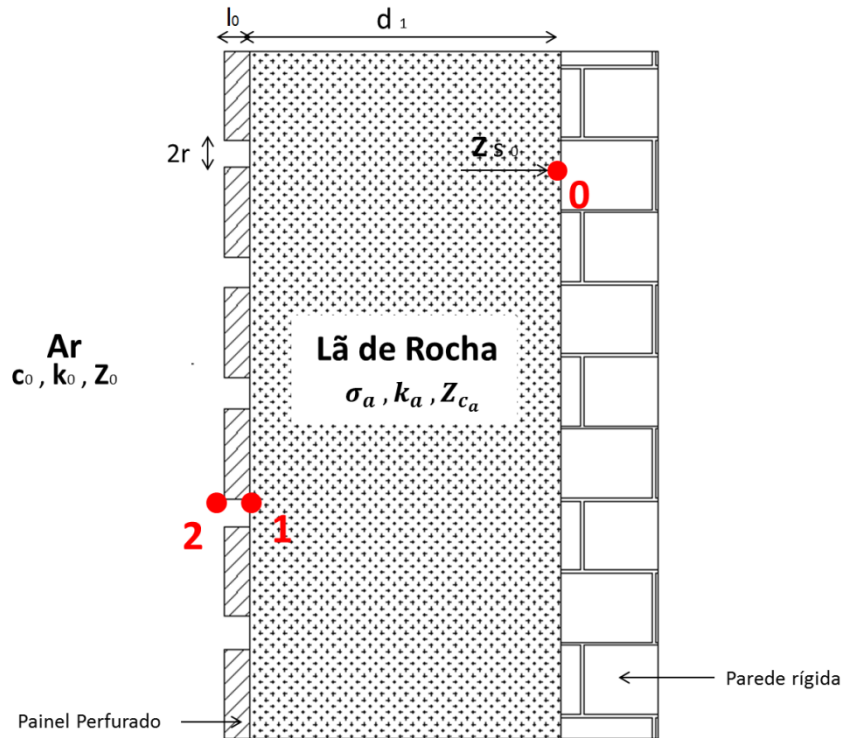


Figura 3.1 – Esquema do sistema absorvente para a modelação (adaptado de Patraquim et al, 2011).

No ponto 0, a impedância da superfície às ondas normais é infinita ($Z_{S_0} = \infty$), uma vez que se trata de uma superfície 100% refletora. A impedância do sistema no ponto 1 é dada então por:

$$Z_{S_1} = -iZ_{c_a} \cot(k_a d_1) \quad (3)$$

onde Z_{c_a} é a impedância característica da lã de rocha e k_a é a constante de propagação. Para se usar esta expressão é necessário que a lã de rocha esteja devidamente caracterizada em relação a estes dois aspectos e, tal como indica Cox e D’Antonio [8], pode também usar-se uma previsão empírica a partir de análises de regressão dos dados medidos.

Sendo a impedância acústica no ponto 1 dada pela expressão (3), a impedância no ponto 2 será então dada por,

$$Z_{S_2} = Z_{S_{painel}} + Z_{S_1} \quad (4)$$

onde a impedância normal da superfície do painel perfurado corresponde a um único furo. Para se converter a impedância para a totalidade do painel tem de se utilizar a média de impedância de um tubo, que é dada por,

$$Z_{S_{painel}} = \frac{Z_{S_{tube}}}{\varepsilon} \quad (5)$$

De acordo com Crandall, a impedância da totalidade dos furos para incidência de ondas normais é dada por,

$$Z_{S_{tube}} = i \omega \rho_0 l_0 \left[1 - \frac{2 J_1(k_s r)}{(k_s r) J_0(k_s r)} \right]^{-1} + \left(2\sqrt{2\omega\rho_0\eta} + \rho_0 c_0 \pi^2 \left(\frac{2r}{\lambda}\right)^2 + i \omega \rho_0 \delta \right) \quad (6)$$

onde ρ_0 é a densidade do ar, ω é a frequência angular, l_0 é a espessura do painel perfurado, r é o raio da circunferência do orifício, η é o coeficiente de viscosidade do ar, λ é o comprimento de onda, J_n é a ordem n da função de Bessel e $k_s = \sqrt{-i \omega \rho_0 / \eta}$ é o número de onda Stokes (Patraquim et al, 2011).

3.2 Influência das características do painel na absorção sonora

Neste subcapítulo é utilizado um modelo programado em Matlab que se baseia nas equações descritas anteriormente, adotadas no trabalho de (Patraquim et al, 2011). Com esta aplicação pretende-se observar de forma mais clara as alterações no coeficiente de absorção dos painéis perfurados. Desta forma, serão inseridas separadamente variações nas características dos painéis, registando-se as alterações de comportamento observadas.

3.2.1 Descrição da aplicação informática

Tal como foi descrito anteriormente, a absorção acústica de um painel perfurado depende das características do mesmo. A aplicação informática que se vai utilizar permite alterar características como, a espessura do painel (L_0), o raio dos orifícios (r), a distância entre o centro geométrico das circunferências dos vários orifícios (percentagem de perfuração) (b), a espessura da caixa-de-ar (D) e a resistividade do material poroso aplicado na mesma. Depois de inseridos os dados correspondentes às características do painel, é possível calcular a curva de absorção sonora do mesmo ao longo de uma gama de frequências e observá-la num gráfico. Será feito uso desta aplicação no subcapítulo seguinte, para observar as alterações provocadas na absorção dos painéis, aquando da modificação das principais características dos mesmos.

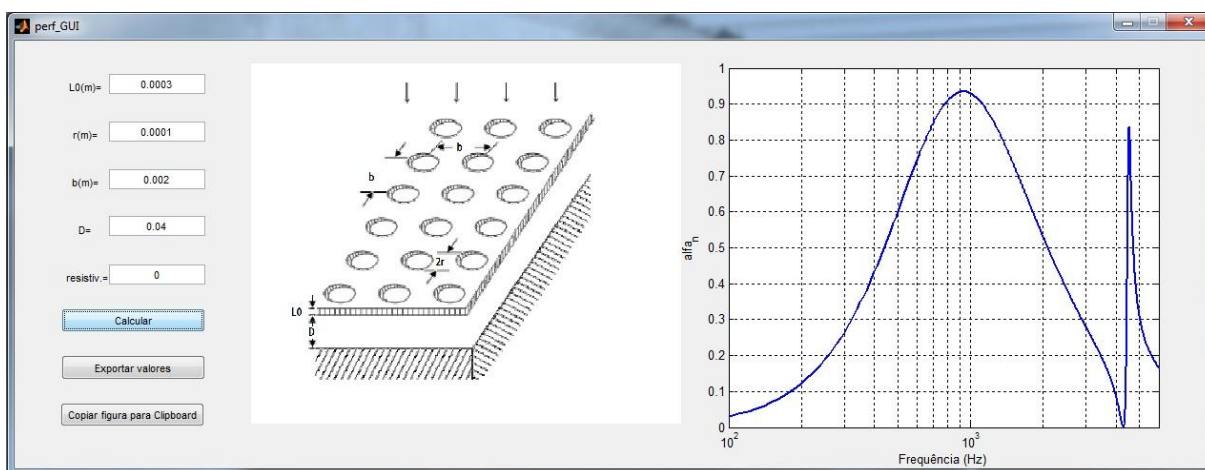


Figura 3.2- Aplicação para cálculo do coeficiente de absorção sonora de painéis perfurados. Modelo programado em Matlab.

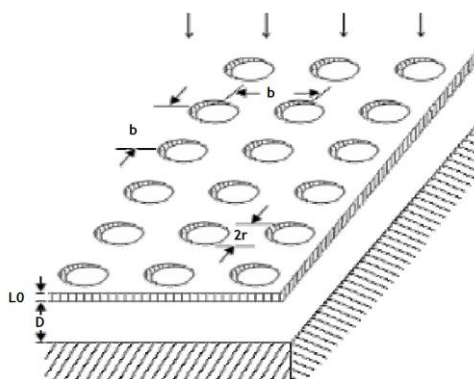


Figura 3.3 – Esquema com os parâmetros considerados na modelação.

3.2.2 Resultados Observados

Para a realização deste estudo paramétrico foi escolhida uma configuração do sistema que inclui um painel perfurado com 12mm de espessura, 11 orifícios com 5 mm de raio; que perfaz uma área aberta de 11.1% e 40 mm de caixa-de-ar. O sistema inclui também um material poroso na sua caixa-de-ar com uma resistividade de 10000 Pa.s/m^2 . Esta configuração serviu de base para o estudo de modelação, tendo sido introduzidas alterações em cada uma das suas características e registadas as alterações observadas na curva do coeficiente de absorção obtidas, através do modelo programado em Matlab.

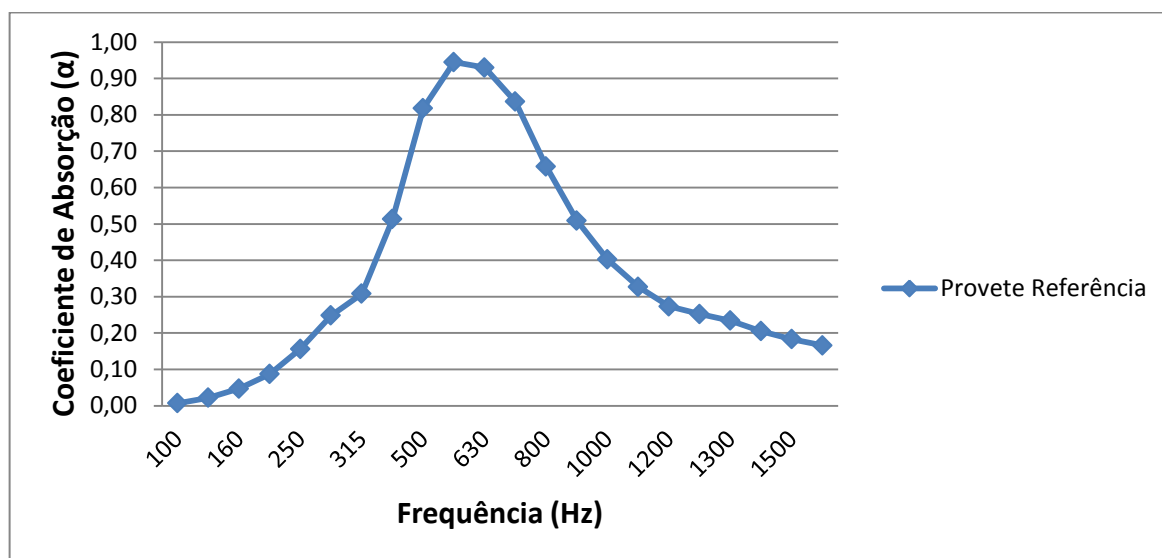


Figura 3.4 – Curva de absorção do provede de referência obtida por cálculo.

Como podemos verificar na Figura 3.4, o provede de referência apresenta uma banda de frequências absorvidas considerável, tendo um coeficiente de absorção superior a 0,5 entre os 500 e os 1000 Hz. O pico de ressonância do provede dá-se aproximadamente nos 630 Hz e tem um valor cerca de 0,95.

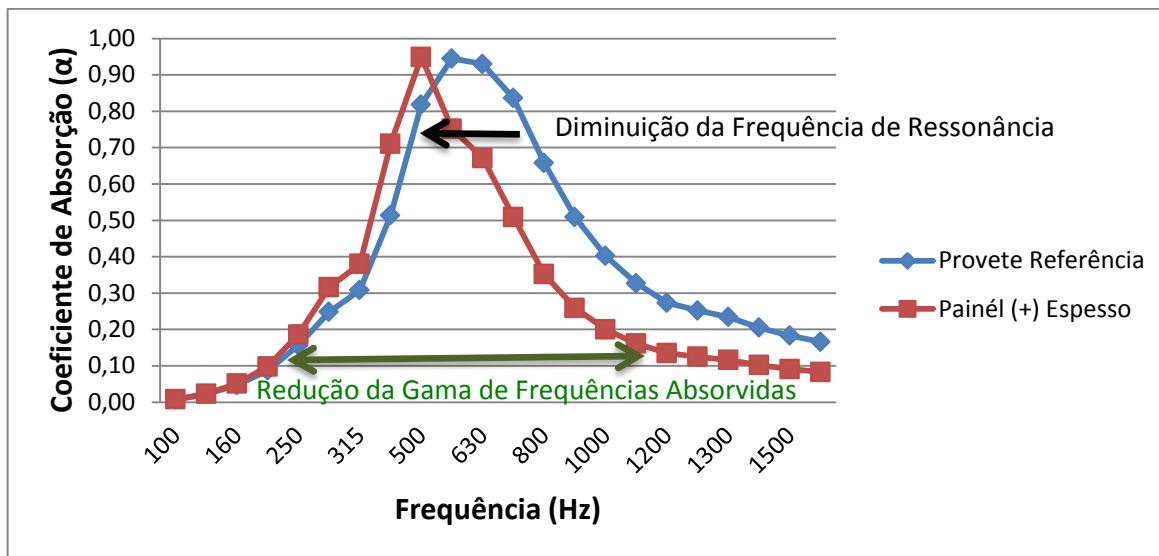


Figura 3.5 – Consequência do aumento de espessura do painel.

Na Figura 3.5 podemos observar as alterações provocadas à curva de absorção, aquando da modificação da espessura do painel, mudando a mesma de 12 mm para 20 mm;

Da observação da Figura 3.5, verifica-se que o aumento da espessura do painel ou seja o aumento do comprimento do tubo do ressonador, provoca uma redução na gama de frequências absorvida e uma diminuição da frequência de ressonância do sistema absorvente.

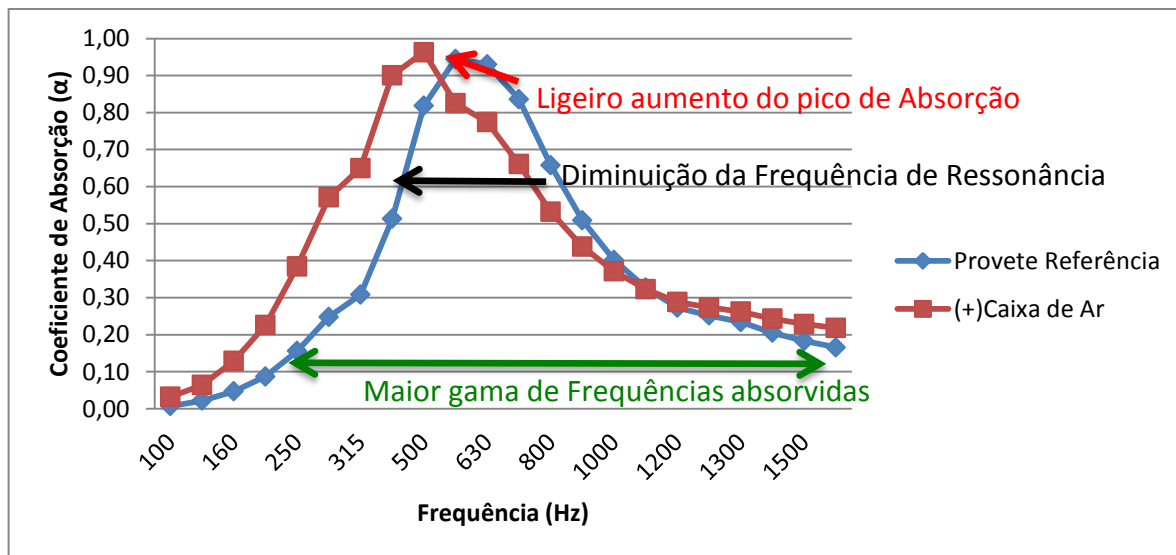


Figura 3.6 – Efeito do aumento da espessura da caixa-de-ar.

Seguidamente, analisam-se as alterações no comportamento do painel quando a espessura da caixa-de-ar é aumentada de 40 mm para 60mm.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 3.6, verifica-se que um aumento da profundidade da caixa-de-ar causa uma redução na frequência de ressonância do painel, mas amplia a banda de frequências absorvidas pelo sistema absorvente, aumentando ligeiramente o pico de absorção do mesmo (aumento da absorção sonora máxima).

Agora, pretende-se observar a influência de uma maior área de orifícios (isto é, um aumento da % de área aberta, de 11.1% para 25%), na absorção sonora destes sistemas.

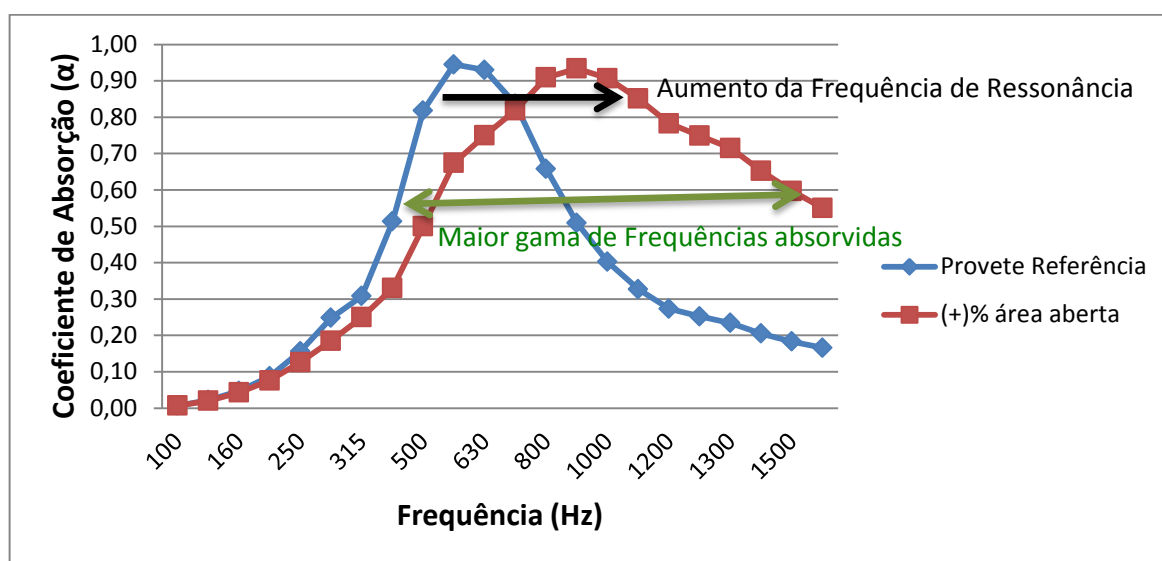


Figura 3.7 – Resultado do aumento de área aberta do painel.

Através da observação do gráfico da Figura 3.7, regista-se que, através da aplicação de um painel com maior percentagem de perfuração, se obtêm aumentos tanto na frequência de ressonância como na banda de frequências absorvida.

De seguida, analisa-se o efeito do aumento do raio dos orifícios, mantendo-se a percentagem de área aberta, ou seja, seria necessário reduzir o número de orifícios existentes no provete. Neste caso, o raio dos orifícios aumentou de 5mm para 8mm.

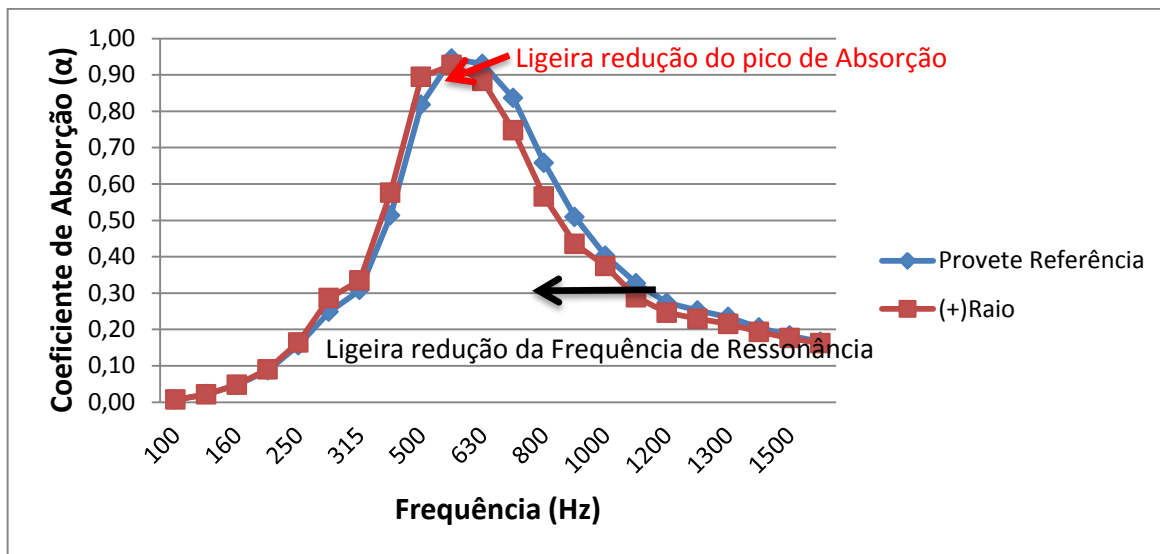


Figura 3.8 – Mudança da absorção, originada pelo aumento do tamanho dos orifícios. Percentagem de perfuração mantém o mesmo valor.

A partir da análise da Figura 3.8, pode registrar-se que, com um aumento do raio, se observa no gráfico uma ligeira redução na frequência de ressonância e também uma redução na absorção máxima do sistema absorvente.

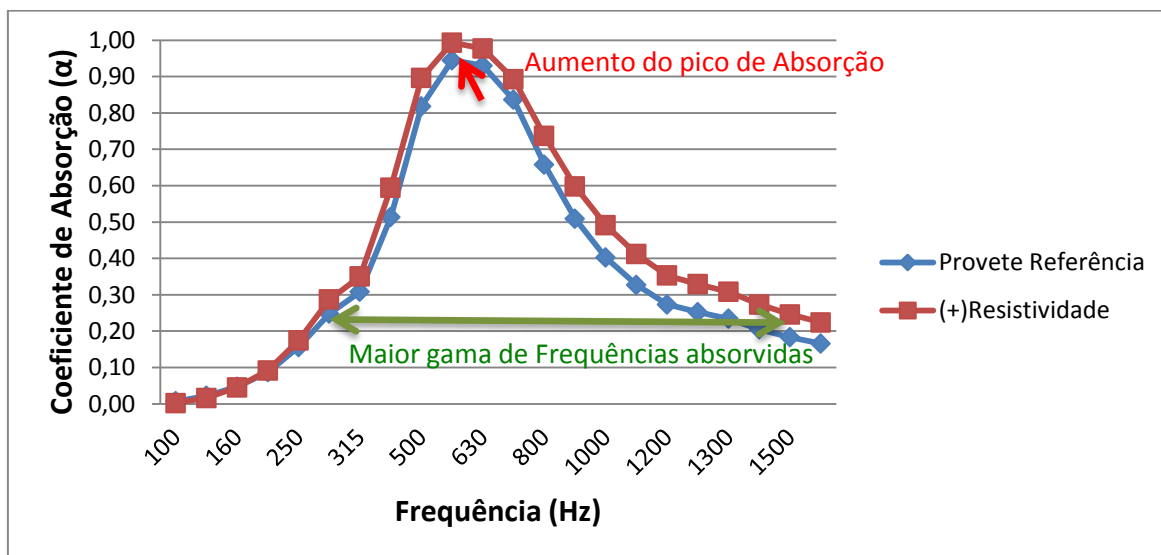


Figura 3.9 – Resultado do aumento da resistividade do material absorvente, colocado na caixa-de-ar.

Por fim, última análise corresponde a um aumento da resistividade do material absorvente utilizado na caixa-de-ar do sistema. Assim a configuração do painel é a normal, com a com 20000 Pa.s/ m², em vez de 10000 Pa.s/ m².

A partir da observação do gráfico da Figura 3.9, observamos uma melhoria no comportamento do sistema, uma vez que o aumento de resistividade se manifesta através da ampliação da banda de frequências absorvida e também do aumento do pico de absorção deste painel.

Este capítulo, baseado num estudo paramétrico com base no modelo analítico, permitiu observar as variações na absorção sonora dos painéis perfurados originadas pelas diferentes características de cada um dos painéis. A partir do mesmo, foi possível verificar que através dessas alterações é possível aumentar a gama de frequências absorvidas ou aumentar o pico de absorção de um determinado painel.

4 ENSAIOS LABORATORIAIS

Para efetuar a caracterização de um material em relação à sua absorção sonora existem dois métodos normalizados. As principais diferenças entre os mesmos consistem no campo sonoro que incide no provete durante o ensaio e no tamanho da amostra ensaiada. O ensaio mais expedito e económico é o que se realiza em tubo de impedância, uma vez que apenas requer provetes com 10 ou 2.9 cm de diâmetro, para as baixas e altas frequências respectivamente. Neste ensaio o campo sonoro é Normal ao provete e as regras para a sua realização estão bem definidas na norma ISO 10534-2:2001 e na norma americana ASTM E 1050. Por outro lado, o ensaio em câmara reverberante é mais dispendioso já que obriga à utilização de provetes com uma área superior a 10 m². Estes provetes são mais dispendiosos não só pelo tamanho, mas também por exigirem mão-de-obra especializada e cuidados redobrados aquando da sua aplicação. No entanto, o campo sonoro incidente na amostra é difuso, obtendo-se a partir deste resultados mais próximos dos que se verificam em condições de aplicação realistas, como nos edifícios. As regras para a realização de ensaios com este equipamento encontram-se estabelecidas na norma NP EN ISO 354.

4.1 Câmara Reverberante

A câmara reverberante existente no ITeCons tem as características exigidas na norma NP EN ISO 354; a sua dimensão em planta é de 5.85*5.85 metros e tem um pé direito de 5.85 metros. A área das superfícies refletoras existentes dentro do seu volume ($\approx 204\text{m}^3$) é de aproximadamente 212m² e é constituída na sua maioria por betão. Foram também incluídos no espaço painéis de policarbonato com 5 mm de espessura e dimensões variadas para melhorarem a difusão do campo sonoro existente; estes painéis, de geometrias côncavas e convexas, foram suspensos no teto da câmara e têm uma área de 30m² (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Fonte sonora e microfone montado em girafa giratória, (à esquerda). Painéis de policarbonato, (à direita) (Jordão, 2011).

Para realizar os ensaios, sem se perturbar o campo existente, o manuseamento do equipamento necessário à realização do mesmo é feito a partir de uma sala de controlo. Aí, o técnico pode manusear o equipamento (mudar a posição do microfone e ligar/desligar a fonte) e observar os resultados obtidos, precisando apenas de entrar na câmara para alterar a posição da fonte sonora. Os provetes testados têm de ter uma área superior a 10 m^2 .

O equipamento existente no ITeCons, para a realização do ensaio em câmara acústica é o seguinte:

- sistema de aquisição multianalisador Pulse, modelo 3560-C-T46, da marca Brüel&Kjaer;
- calibrador acústico tipo 4231, da mesma marca;
- fonte de ruídos aéreos, do tipo OMNIPOWER 4292 (Figura 4.1);
- termohigrómetro calibrado THR06;
- computador com Programa Pulse, Versão 12.5.0 da Brüel&Kjaer;
- microfone 1/2 “, tipo 4190, montado em girafa giratória do tipo 3923, também da marca Brüel&Kjaer (Figura 4.1) (Jordão, 2011; Patraquim et al, 2012).

A realização de ensaios com este tipo de equipamento, exige alguns cuidados aquando da utilização do mesmo (norma NP EN ISSO 354); de seguida enumera-se os mais importantes.

Um dos cuidados exigidos pela norma foca-se no número de medições realizadas a cada amostra. A norma recomenda um número mínimo de 4 posições de microfone e 3 posições de fonte sonora, perfazendo um mínimo de 12 medições para cada amostra.

Devido ao grande volume da câmara, a área da amostra deve ser de 10 a 12m^2 , pois de contrário os tempos de reverberação, com provete e sem provete na sala, seriam muito próximos, o que não permitiria obter o coeficiente de absorção com o rigor desejado.

No momento do ensaio é também imprescindível saber qual a temperatura, a humidade relativa e a pressão atmosférica dentro da câmara de ensaio.

O coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante é obtido através da teoria de Sabine. A base do ensaio consiste em efetuar duas medições do tempo de reverberação, sendo uma das medições feita com a câmara vazia e a outra com o provete no seu interior. Para o cálculo dos tempos de reverberação existem dois métodos disponíveis; o primeiro consiste em excitar o espaço com um ruído branco durante algum tempo de forma a se obter uma pressão sonora estável dentro da câmara, depois a fonte é desligada e o decaimento é registado. É importante que o nível sonoro entre o menor nível medido e o ruído de fundo tenha uma diferença de 15 dB. O segundo método é o do ruído interrompido e como o nome indica o som emitido é aleatório e “pontual”. Após a emissão do ruído o decaimento da pressão sonora é registado.

4.2 Tubo de Impedância

O tubo de impedância é uma ferramenta que serve para medir o coeficiente de absorção e a impedância acústica dos materiais. Através da emissão de um ruído de intensidade média, constante ao longo do espectro de frequências (ruído branco), em ondas sonoras planas, origina-se um campo onde as ondas são refletidas e absorvidas pelo provete. Essas ondas enviadas por um altifalante (auxiliado por um amplificador) são recebidas por dois microfones contidos dentro do interior do tubo (como ilustrado na Figura 4.2) que, por estarem a uma distância pré-definida um do outro, conseguem decifrar quais as ondas sonoras incidentes e quais as refletidas. Depois, a informação captada pelos microfones é enviada para um analisador digital que a processa obtendo-se o coeficiente de absorção. Para a realização dos ensaios foram utilizadas duas terminações; uma para amostras de 10 cm de diâmetro (permite avaliar a absorção sonora dos 50 aos 1600 Hz, baixas frequências) e outra para amostras de 2.9 cm (registra a absorção dos 400 aos 6300 Hz, altas frequências). A mudança do êmbolo tem de ser complementada com a alteração da posição dos microfones e também com a alteração de alguns parâmetros no programa Pulse LabShop versão 15.1.0 (Lamounier, 2008).

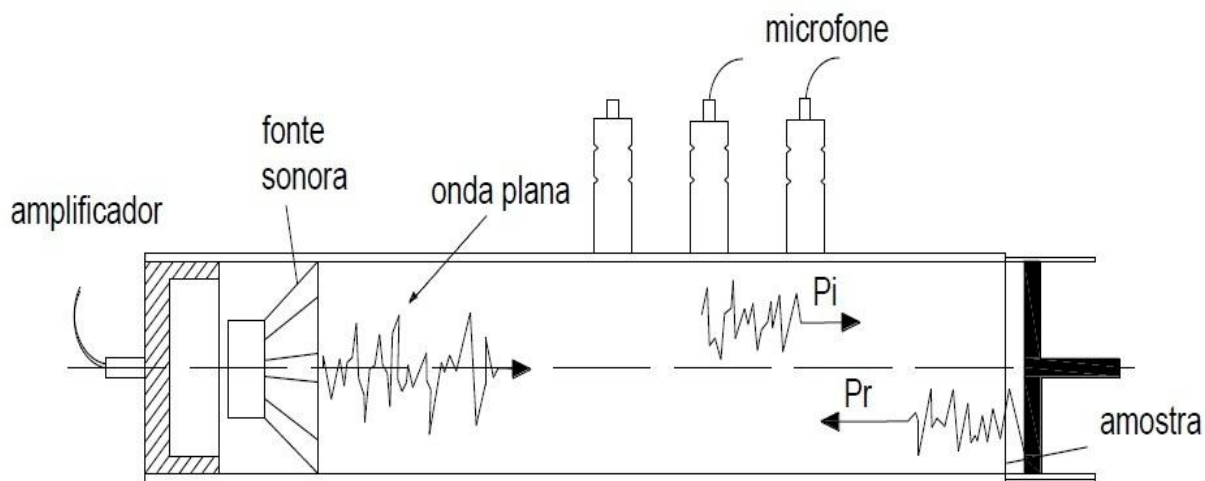


Figura 4.2 – Esquema do funcionamento de um tubo de impedância (bksv@).

O equipamento existente no ITECons para realizar o ensaio em tubo de impedância consiste em:

- tubo de impedância do tipo 4206, da marca Brüel&Kjaer (Figura 4.3);
- amplificador do tipo 2716C, da mesma marca (Figura 4.5);
- sistema multianalisador Pulse, do tipo 3560-C, marca Brüel&Kjaer (Figura 4.4);
- computador portátil para utilizar o software Pulse LabShop versão 15.1.0 (Figura 4.4);
- 2 microfones de $1/4$ " para captarem o sinal sonoro dentro do tubo;
- “terminações/êmbolo” para amostras de 10 e 2.9 cm de diâmetro.



Figura 4.3 – Tubo de impedância com êmbolo para baixas frequências (à esquerda), e altas frequências (à direita).



Figura 4.4 - Sistema multianalisador Pulse (à esquerda). Computador portátil com o software Pulse LabShop versão 15.1.0 (à direita).



Figura 4.5 - Amplificador do tipo 2716C.

4.2.1 Norma ISO 10534-2 e procedimento de ensaio

Para a realização de qualquer ensaio, tem de se verificar os instrumentos utilizados e as condições no momento de ensaio. Assim, segundo as normas, o equipamento necessário a realização do ensaio em tubo de impedância é:

- Tubo de Impedância, de acordo com as exigências da norma ISO 10534-2;
- Calibrador acústico tipo 1, conforme definido na norma IEC 942;
- Equipamento de aquisição de sinal (Pulse);
- Termómetro, com uma classe de exatidão de 0.5°C;
- Barómetro, com uma classe de exatidão de 0.5 kPa.

Antes da realização do ensaio deve proceder-se à verificação dos instrumentos, ou seja, verificar se os microfones estão calibrados e se as ligações estão operacionais. De seguida, deixa-se a fonte sonora ligada durante alguns minutos e regista-se a temperatura e a pressão

dentro do tubo de impedância, pois estes dados são necessários para executar o programa Pulse LabShop.

O passo seguinte consiste na calibração do sistema; dados como a temperatura e a pressão atmosférica são introduzidos (têm influência na velocidade do som) e de seguida procede-se à verificação do ruído dentro do tubo com a fonte sonora ligada e desligada, tendo a diferença entre estes níveis sonoros de ser superior a 10 dB, em toda a gama de frequências. Para se anularem os erros de fase dos dois microfones, procede-se à correção prevista na norma ISO 10534-2, colocando-se uma amostra de referência fornecida pela marca do tubo e correndo o “aplicativo” durante uns segundos. Nessa correção é feita uma troca de posição dos microfones, voltando os mesmos à posição inicial após a correção. Depois, o equipamento encontra-se pronto para o ensaio das amostras.

Para a realização do ensaio propriamente dito, insere-se o provete dentro do tubo de forma cuidada, ajustando-se de seguida a sua posição com o auxílio do êmbolo. Cada amostra deve ser testada pelo menos 4 vezes para cada configuração, tendo de ser retirada e colocada de novo no tubo, a cada ensaio. Desta forma, consegue-se anular os erros devido à má colocação do provete.

Por fim, escolhe-se, no programa Pulse LabShop, quais os dados a tratar e a banda de frequências desejada, exportando-os para uma folha de Excel. Através destes é possível obter uma representação em gráficos e analisar qual o comportamento do material.

4.3 Descrição das Amostras

4.3.1 Provetes Flocados

O interesse por parte das empresas, em encontrar novas soluções para o condicionamento acústico, levou ao aparecimento de um novo material. Esta solução consiste em aplicar, na frente dos painéis perfurados (em MDF com 12mm de espessura), uma espuma coberta por pequenas fibras têxteis através da técnica de "flocagem". Este material tem uma aparência tátil e visual agradável, podendo ser aplicado em pequenos espaços tais como, home cinemas ou estúdios de rádio.

Para realizar o estudo sobre este produto foram testados vários provetes em tubo de impedância com o intuito de determinar o seu coeficiente de absorção. Para isso, foram ensaiadas várias configurações sobre os mesmos, tentando perceber qual a forma mais correta e eficiente de se aplicarem. Estas amostras foram testadas nas baixas e altas frequências através de provetes com 10 cm e 2.9 cm de diâmetro, respetivamente.

Todas as amostras foram testadas em três configurações diferentes:

- provete encostado ao êmbolo (sem caixa-de-ar);
- provete afastado 4 cm do êmbolo (caixa-de-ar vazia);
- e provete afastado 4 cm do êmbolo com lã de rocha da mesma espessura no seu interior (caixa-de-ar preenchida com lã de rocha).

As amostras têm todas o mesmo aspeto quando observadas de frente, sendo as diferenças entre elas ao nível de:

- a percentagem de furação;
- a espessura da espuma aplicada;
- o tipo de cola utilizado para aplicação das espumas;
- e a utilização ou não de tela entre o painel e a espuma.

É importante referir também, que uma pequena falha no contorno do provete pode influenciar significativamente a absorção sonora do mesmo. Algumas amostras precisaram de ser afinadas antes dos ensaios, mas, no geral, todas entraram de forma justa no equipamento de teste sendo assim de esperar bons resultados das mesmas.

De seguida, expõem-se fotos representativas de algumas amostras (Figura 4.6 e 4.7) e dois quadros com as características de todas elas (tabela 4.1 e 4.2).



Figura 4.6 – Exemplo de provetes flocados com 10 cm de diâmetro.-

Referência	Diâmetro (cm)	% de Furação	Tela	Esp. da Espuma Folcada (mm)	Tipo de Cola
ACU161A/12	10	0	N	3	M
ACU162A/12	10	0	N	5	M
ACU173A/12	10	25	S	3	M
ACU174A/12	10	35	S	3	M
ACU175A/12	10	50	S	3	M
ACU176A/12	10	50	S	3	M
ACU177A/12	10	11.52	S	3	M
ACU163A/12	10	25	S	5	M
ACU164A/12	10	35	S	5	M
ACU165A/12	10	50	S	5	M
ACU166A/12	10	50	S	5	M
ACU167A/12	10	11.52	S	5	M
ACU193A/12	10	25	N	3	M
ACU194A/12	10	35	N	3	M
ACU195A/12	10	50	N	3	M
ACU196A/12	10	50	N	3	M
ACU197A/12	10	11.52	N	3	M
ACU183A/12	10	25	N	5	M
ACU184A/12	10	35	N	5	M
ACU185A/12	10	50	N	5	M
ACU186A/12	10	50	N	5	M
ACU187A/12	10	11.52	N	5	M
ACU203A/12	10	25	S	3	A
ACU204A/12	10	35	S	3	A
ACU205A/12	10	50	S	3	A
ACU206A/12	10	50	S	3	A
ACU207A/12	10	11.52	S	3	A
ACU213A/12	10	25	N	5	A
ACU214A/12	10	35	N	5	A
ACU215A/12	10	50	N	5	A
ACU216A/12	10	50	N	5	A
ACU217A/12	10	11.52	N	5	A
Legenda:			Tela: S (Sim tem tela), N (Não tem tela)		
			Tipo de Cola: M (Aplicada manualmente), A (Autoadesiva)		

Tabela 4.1 – Características dos provetes de 10 cm de diâmetro.

4.3.2 Provetes Lisos

Foram testados em tubo de impedância também neste trabalho mais 3 provetes em duas configurações diferentes: com caixa-de-ar de 4 cm e com caixa-de-ar e lã de rocha no seu interior.

Estes provetes servirão para comparar os valores obtidos nos ensaios laboratoriais com os da modelação (ambos os provetes são constituídos apenas por MDF (12 mm de espessura) perfurado, residindo a diferença entre eles no tamanho e quantidade dos orifícios, como indica o quadro seguinte).




Provete	Nº de Furos	Raio (mm)	Área de 1 Orifício (mm ²)	Área d/Aberturas (mm ²)	Área Total (mm ²)	% de Perfuração	Imagem
A1	9	4	5.03E-01	4.52	78.54	5.76	
B1	32	3	2.83E-01	9.05	78.54	11.52	
C1	114	2	1.26E-01	14.33	78.54	18.24	

Tabela 4.3- Características dos provetes lisos de 10 cm de diâmetro.

4.3.3 Lã de Rocha

Para os ensaios realizados em tubo de impedância, foi utilizada uma amostra de lã de rocha existente no ITeCons; essa amostra tem o diâmetro do tubo de impedância (10 cm) e 4 cm de espessura. Para o cálculo da curva de absorção dos provetes A1, B1 e C1 através do modelo programado em Matlab, foi necessário introduzir a resistividade da lã utilizada. Para isso, foi utilizado um gráfico (Figura 4.8) que permite ver o aumento de resistividade da lã originado pelo aumento da densidade (a lã-de-rocha existente no ITeCons têm uma densidade de 40 kg/m^3) da mesma. Do gráfico, obtemos uma resistividade de aproximadamente 15 kPa.s/m^2 , para a lã de rocha utilizada.

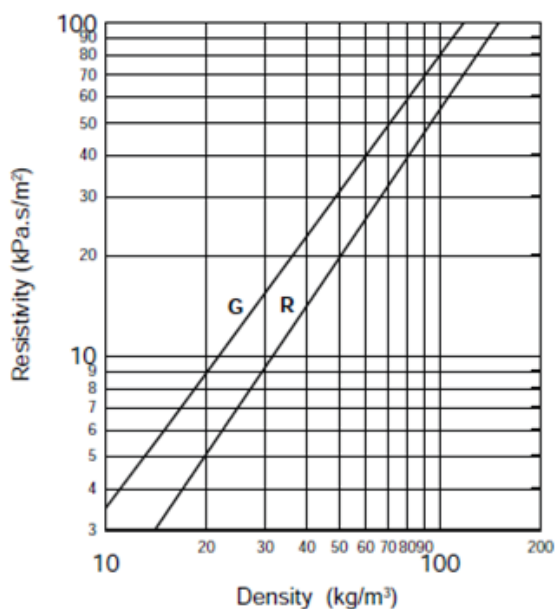


Figura 4.8 – Aumento da resistividade da lã de rocha, originado pela variação da densidade da mesma (Vigran, 2008).



Figura 4.9 – Lã de rocha (frasmil@).

5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAINÉIS PERFURADOS

Neste trabalho, foram testadas várias amostras, com o intuito de compreender se as soluções são viáveis ou não. Este capítulo encontra-se dividido em três subcapítulos. No primeiro, encontra-se uma comparação entre os resultados obtidos através da modelação e os resultados dos ensaios laboratoriais. Este é o primeiro subcapítulo e nele são utilizados, para a comparação, três provetes perfurados constituídos apenas por MDF. O motivo da não utilização dos painéis flocados é que o modelo utilizado não inclui espumas, não sendo assim possível perceber a influência desta espuma na configuração do painel. No entanto, e uma vez que no capítulo 3 se conseguiu retirar conhecimentos importantes para a compreensão destes sistemas, faz sentido o aparecimento desta comparação neste subcapítulo, pois permite verificar a proximidade entre resultados previstos e a veracidade dos mesmos. O segundo subcapítulo destina-se aos provetes flocados sendo o objectivo do mesmo, perceber qual a influência das características destes no seu coeficiente de absorção. Este vai dividir-se em outros seis subcapítulos, que focam especialmente uma característica do provete. O estudo realiza-se com a informação obtida nos ensaios laboratoriais de 2 amostras distintas para cada subcapítulo. Cada um contém gráficos alusivos à característica em foco, fotografias dos provetes em estudo e uma descrição das alterações observadas. Será feita também uma breve comparação entre os resultados obtidos e os teoricamente esperados. Por fim, no terceiro subcapítulo, é feita uma comparação entre três provetes que têm MDF com a mesma espessura e a mesma furação do provete liso utilizado, sendo que, na constituição destes provetes, foi aplicada uma espuma flocada, e num deles uma tela.

5.1 Modelação Vs. Ensaios laboratoriais

Neste subcapítulo será feita uma comparação entre os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de 3 amostras e os resultados teóricos obtidos através do modelo analisado descrito no capítulo 3. O intuito desta comparação não é perceber os fenómenos que advêm das características dos painéis por si só, mas sim a sua influência na proximidade dos resultados obtidos. Ambos os provetes foram testados em duas configurações, com caixa-de-ar de 4 cm e com a mesma caixa-de-ar, mas com lã de rocha da mesma espessura no seu interior. A diferença das amostras reside no raio dos orifícios 4, 3 e 2 mm e no número de

orifícios 9, 32 e 114, para os provetes A1, B1 e C1 respetivamente. Consequentemente a percentagem de perfuração também se altera de 5.76% para 11.52 % e de 11.52 para 18.24%, respetivamente. Os provetes são constituídos apenas por MDF com 12 mm de espessura, não apresentando mais nenhum material na sua constituição.

5.1.1 Resultados Obtidos

De seguida apresentam-se os gráficos com os ensaios laboratoriais e resultados obtidos na modelação para cada uma das amostras. Depois dos gráficos será executada uma descrição sobre os mesmos, identificando se existe proximidade nos valores observados e tentar-se-á chegar a algumas conclusões.

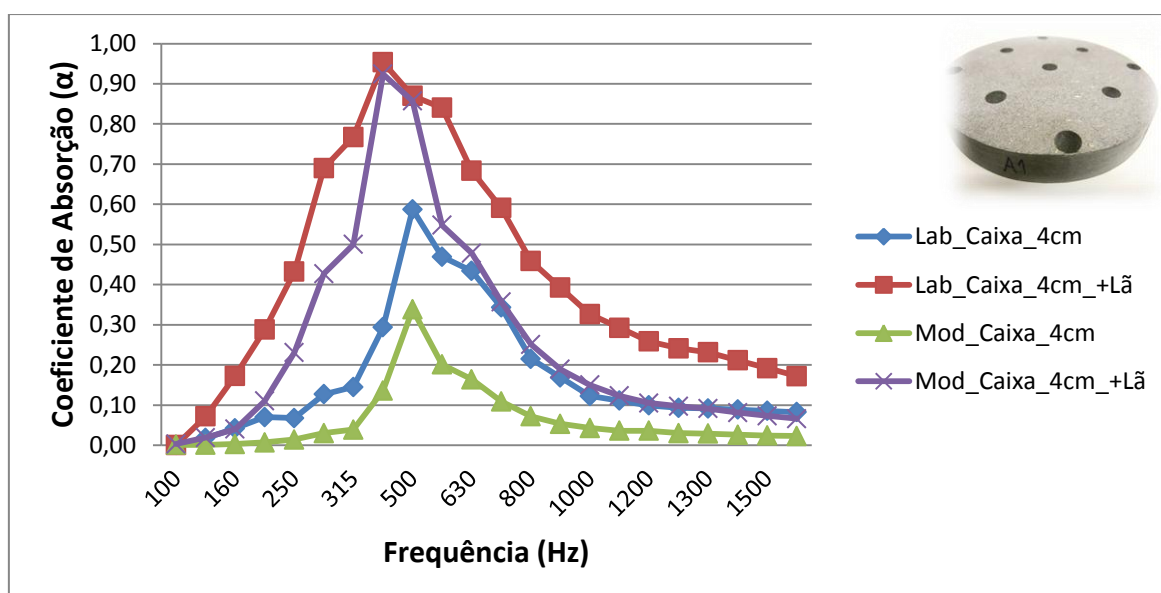


Figura 5.1 – Comparação entre os resultados obtidos na modelação e os ensaios laboratoriais para o provete A1. Duas configurações, com caixa-de-ar de 4 cm e com caixa-de-ar e lã de 4 cm.

De acordo com a Figura 5.1, verifica-se que a curva de absorção conseguida através da modelação para o provete A1, tem o mesmo comportamento que a obtida nos ensaios laboratoriais, ou seja segue um trajecto idêntico. No entanto, constata-se através do gráfico que, tanto para a configuração com caixa-de-ar de 4 cm como para a com caixa-de-ar e lã, a absorção obtida pela modelação tem sempre valores inferiores aos obtidos no tubo de impedância. Na configuração sem lã, observa-se um pico de absorção menor na modelação, tendo também os ensaios laboratoriais uma maior abrangência nas bandas de frequências absorvidas. Para a outra configuração, os resultados obtidos para a absorção máxima são muito próximos, notando-se apenas uma menor gama de frequências absorvida na modelação, tal como se verificou para a outra configuração.

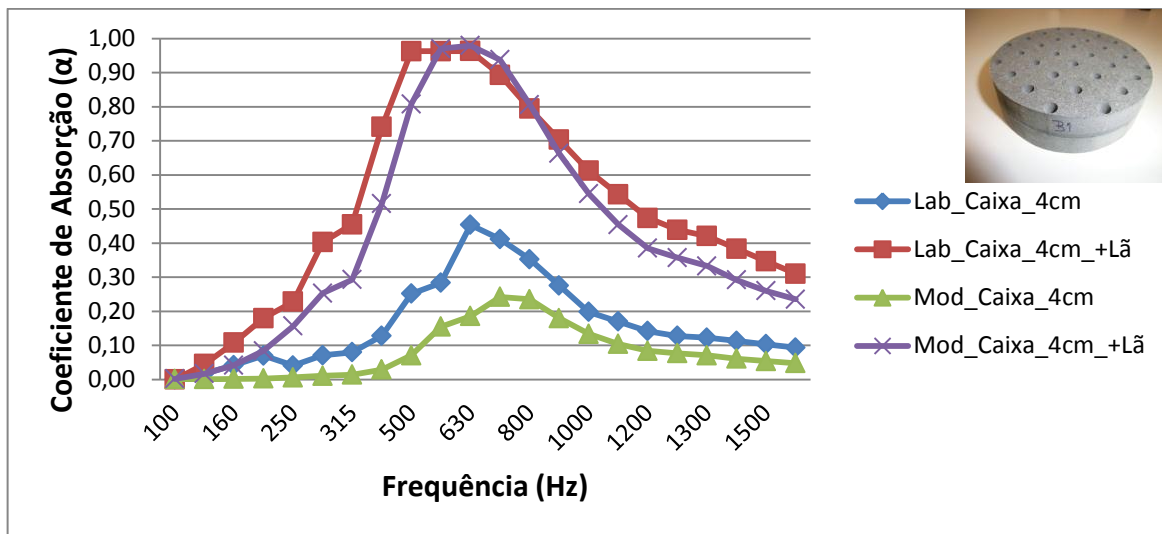


Figura 5.2 - Comparação entre os resultados obtidos na modelação e os ensaios laboratoriais para o provete B1. Duas configurações, com caixa-de-ar de 4 cm e com caixa-de-ar e lã de 4 cm.

Na Figura 5.2 verifica-se que a amostra (provete B1) tem um comportamento na modelação que segue o rumo da curva de absorção obtida através dos ensaios laboratoriais, tal como no provete A1. No entanto, neste provete, a proximidade entre curvas parece maior do que no anterior, continuando-se a notar maior discrepância entre ensaios para a configuração sem lã de rocha na caixa-de-ar. Através da observação do gráfico deste provete, fica a ideia de que, a um aumento de percentagem de perfuração, corresponde uma maior proximidade entre resultados.

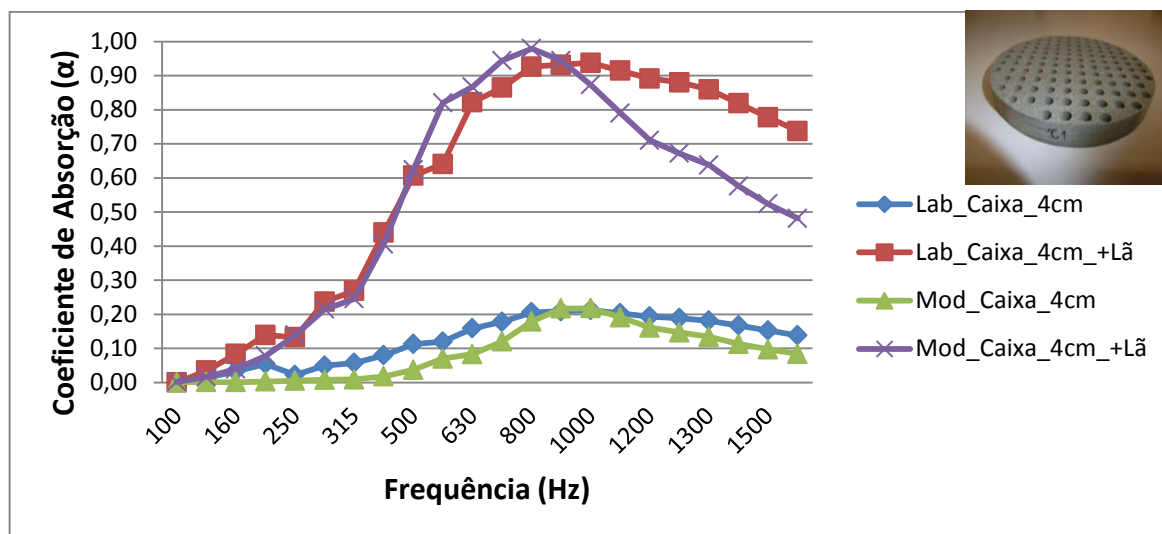


Figura 5.3- Comparação entre os resultados obtidos na modelação e os ensaios laboratoriais para o provete C1. Duas configurações, com caixa-de-ar de 4 cm e com caixa-de-ar e lã de rocha com 4 cm.

A observação do gráfico da Figura 5.3 leva mais uma vez à ideia de que um aumento de área aberta conduz a uma maior proximidade entre os resultados. Neste provete C1, constata-se que as curvas quase caminham juntas em ambas as configurações, verificando-se neste uma maior distância entre resultados na configuração que contém lã (a partir dos 1000Hz). Pode-se também fazer um reparo em relação às características do painel pois da observação dos gráficos podemos ver facilmente que, com o aumento da percentagem de furos, obtivemos uma redução e um aumento da absorção sonora máxima para a configuração sem lã, e com lã respectivamente. Já em relação a gama de frequências absorvidas verifica-se um aumento para ambas as configurações aquando do aumento da percentagem de furos do painel.

Este estudo permitiu observar que o comportamento dos painéis perfurados, segue uns padrões relativamente conhecidos, sendo possível prever de forma aproximada qual a absorção sonora de um determinado painel.

5.2 Ensaios laboratoriais - painéis flocados

5.2.1 Influência da Caixa-de-ar

Neste subcapítulo o tema em foco é a colocação de uma caixa-de-ar no tardo do painel. Nele serão comparadas 2 amostras distintas e verificar-se-á as diferenças provocadas pela caixa-de-ar nas mesmas, tanto nas baixas como altas frequências.

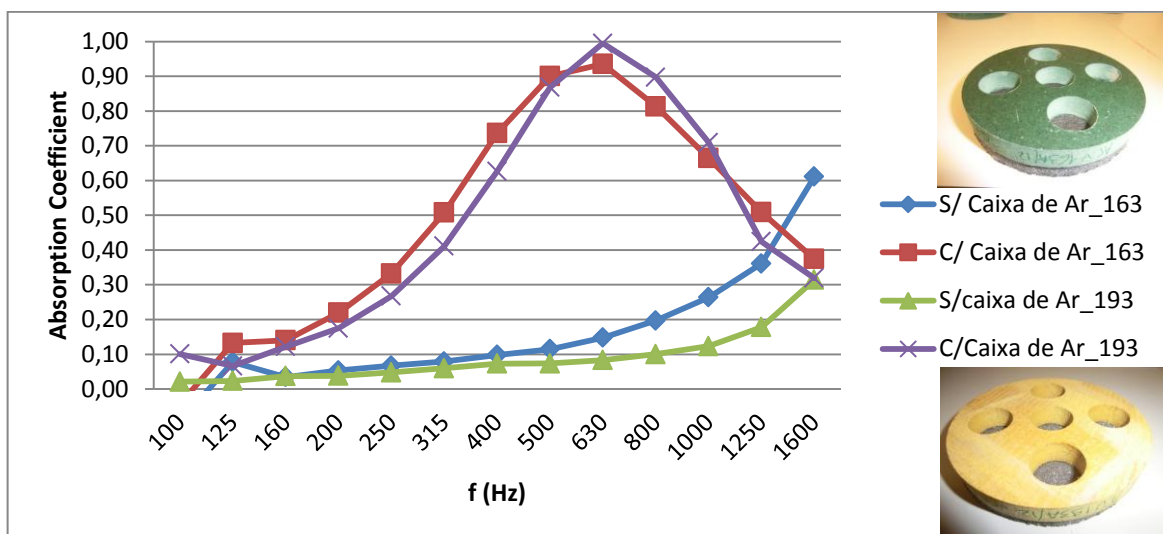


Figura 5.4 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com e sem caixa-de-ar, para as baixas frequências. Provete: ACU163A_12 e ACU193A_12.

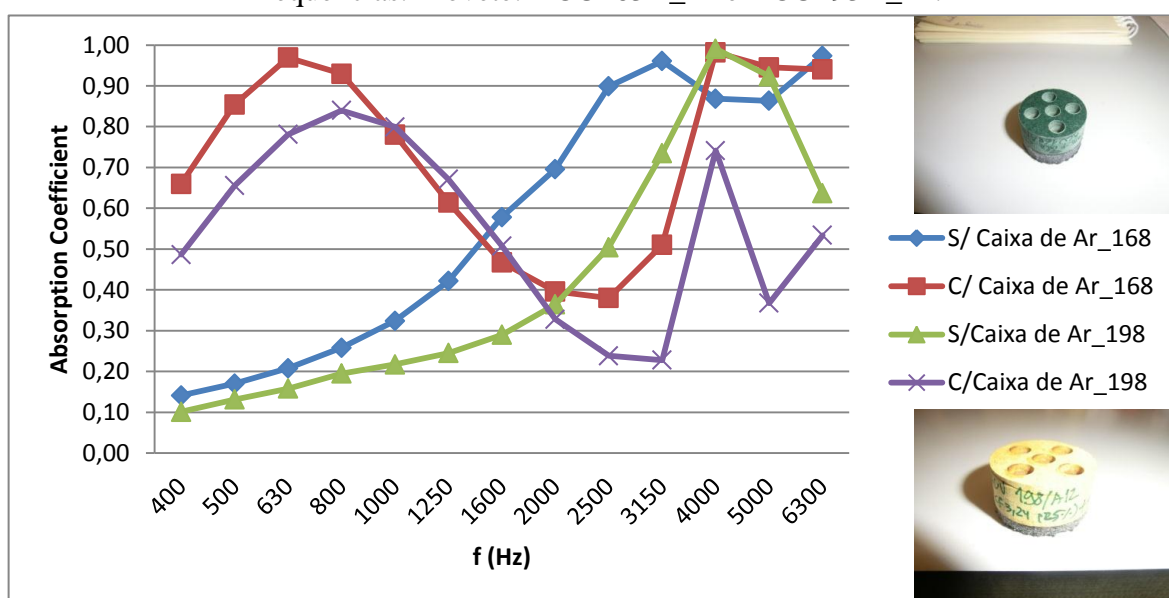


Figura 5.5 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com e sem caixa-de-ar, para as altas frequências. Provete: ACU168A_12 e ACU198A_12.

Os provetes escolhidos para este confronto têm a mesma percentagem de furação (25%) e o mesmo tipo de cola a unir a espuma ao MDF (cola aplicada manualmente). A diferença entre os dois está na espessura da espuma utilizada (5mm para a verde e 3mm para a amarela) e na utilização de uma tela entre a espuma e o MDF nos provetes verdes.

No que diz respeito ao comportamento nas baixas frequências, pode-se verificar que as amostras têm um comportamento quase idêntico ao longo da gama. No provete com tela e

maior espessura de espuma, constata-se um incremento substancial do coeficiente de absorção quando o mesmo é aplicado sem caixa-de-ar, verificando-se uma maior proximidade entre os dois provetes ao inserir-se a caixa-de-ar. No que diz respeito a caixa-de-ar, verifica-se, em ambos os provetes, uma redução da frequência de ressonância do sistema absorvente e um aumento da absorção sonora máxima. Esse pico de absorção é atingido em ambas as amostras, perto dos 700 Hz. Já nas altas frequências, verifica-se a existência de picos de absorção mais elevados nas amostras que não possuem caixa-de-ar, mantendo-se o provete com tela com um melhor comportamento durante uma maior faixa de frequências. O coeficiente de absorção sonoro de ambos os provetes sofre uma redução substancial entre os 1200 e 2500 Hz quando os mesmos possuem caixa-de-ar, tomando valores relativamente elevados para as restantes frequências.

A espuma (material poroso) realiza a sua função absorvente nas altas frequências, verificando-se também um aumento superior de absorção no painel com maior espessura deste material. A colocação de uma caixa-de-ar faria com que o painel funcionasse como ressoador, ou seja, melhoraria o seu comportamento nas médias frequências, o que se verificou. Os resultados experimentais revelaram-se de acordo com o esperado.

5.2.2 Influência da Lã de Rocha na Caixa-de-ar

Pretende-se agora verificar a diferença de comportamento na absorção sonora originada pela colocação da lã de rocha (material poroso), dentro da caixa-de-ar do sistema.

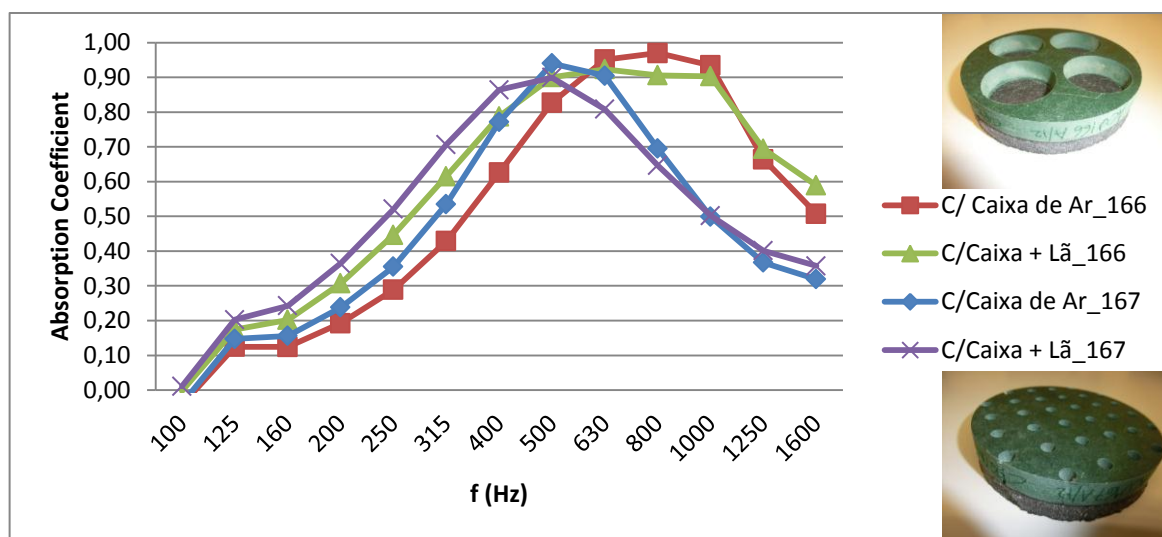


Figura 5.6 - Gráfico e fotos das respetivas amostras, com e sem lã de rocha, para as baixas frequências. Proвете: ACU166A_12 e ACU167A_12.

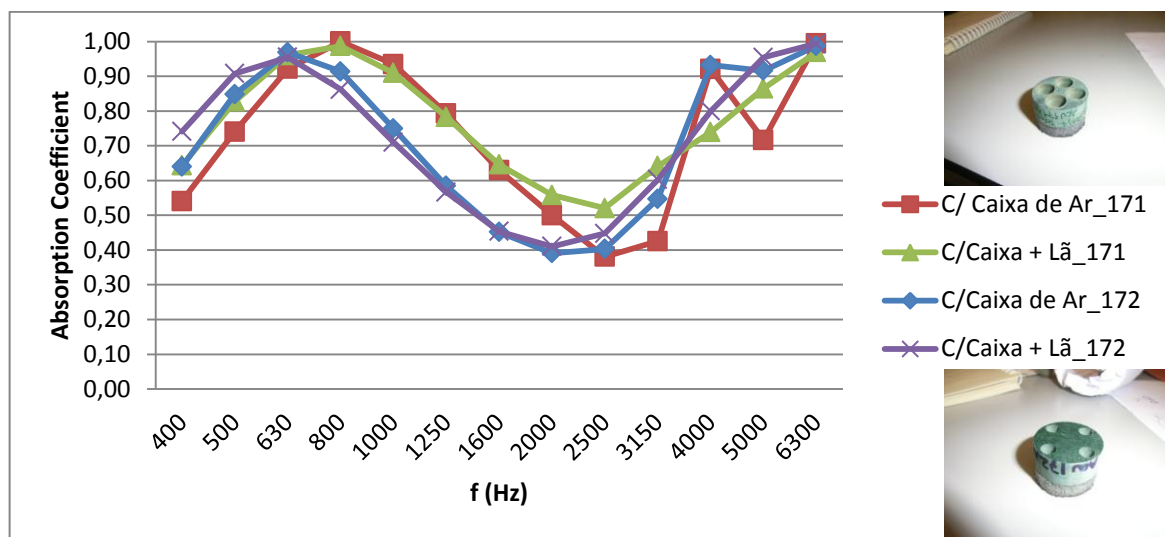


Figura 5.7 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com e sem lã de rocha, para altas frequências. Provete: ACU171A_12 e ACU172A_12.

As amostras escolhidas para este subcapítulo são muito idênticas, o tipo de cola, espessura de espuma e tela são iguais em ambas as amostras. A diferença existente entre os provetes está na percentagem de perfuração, que é muito maior num provete do que no outro (50% vs. 11,52%).

No gráfico para as baixas frequências, a primeira diferença observável acerca da percentagem de furação, é que a frequência de ressonância é menor para o painel com menor percentagem de perfuração. Já no que diz respeito à utilização de lã de rocha, pode-se verificar uma pequena diminuição do pico de ressonância e um ligeiro aumento da gama de frequências absorvidas, dando para se visualizar também que a absorção sonora se começa a verificar mais cedo quando se caminha de forma ascendente na gama de frequências. Já nas altas frequências, o sistema com lã de rocha apresenta maior coeficiente de absorção, em quase toda a gama alta, verificando-se apenas um pico superior para ambas as amostras sem lã junto aos 4500Hz. Também se pode verificar que o provete com menor percentagem de perfuração tem um coeficiente de absorção superior ao outro, a partir dos 3500Hz, quando o sistema possui lã de rocha no seu interior.

Tal como esperado, a lã de rocha (material poroso), provoca um aumento de absorção nas altas frequências, no entanto, seria de esperar um aumento mais significativo nessas gamas, facto que não se verificou. Este fenómeno pode ter sido originado pela existência da tela em ambos os provetes, fazendo com que o papel da lã de rocha não seja tão visível. Também era de esperar um aumento da frequência de ressonância originado pela maior percentagem de perfuração do painel.

5.2.3 Percentagem de Furação e sua Influência

Aqui o tema em foco é a percentagem de perfuração. Serão analisados 2 provetes com características iguais, exceto na percentagem de aberturas. Esta análise será feita em altas e baixas frequências e para os 3 sistemas possíveis (sem caixa-de-ar, com caixa-de-ar e com caixa-de-ar e lã de rocha).

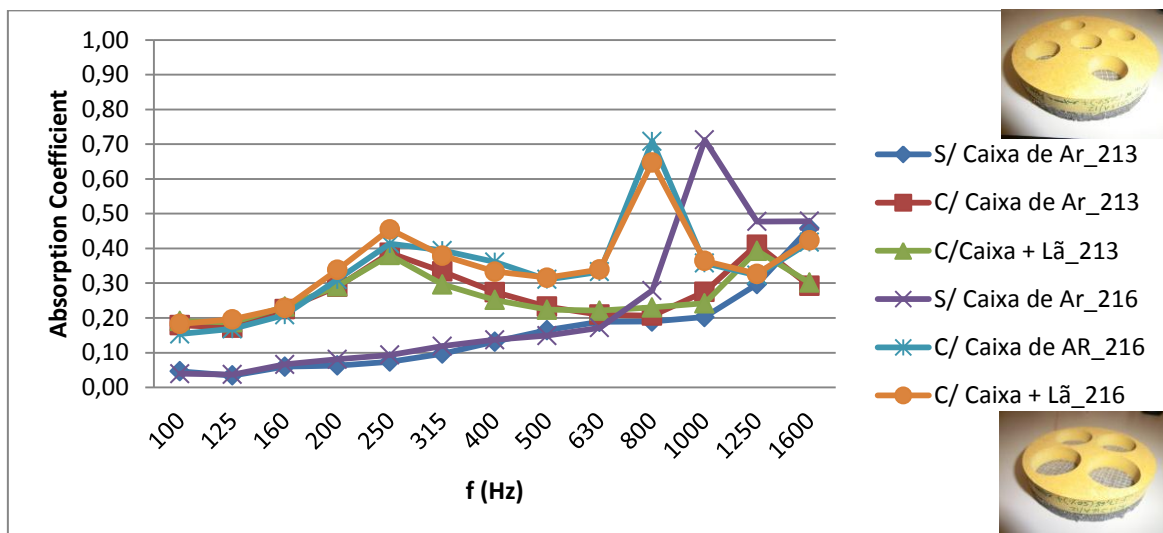


Figura 5.8 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente percentagem de perfuração e para as baixas frequências. Provetes: ACU213A_12 e ACU216A_12.

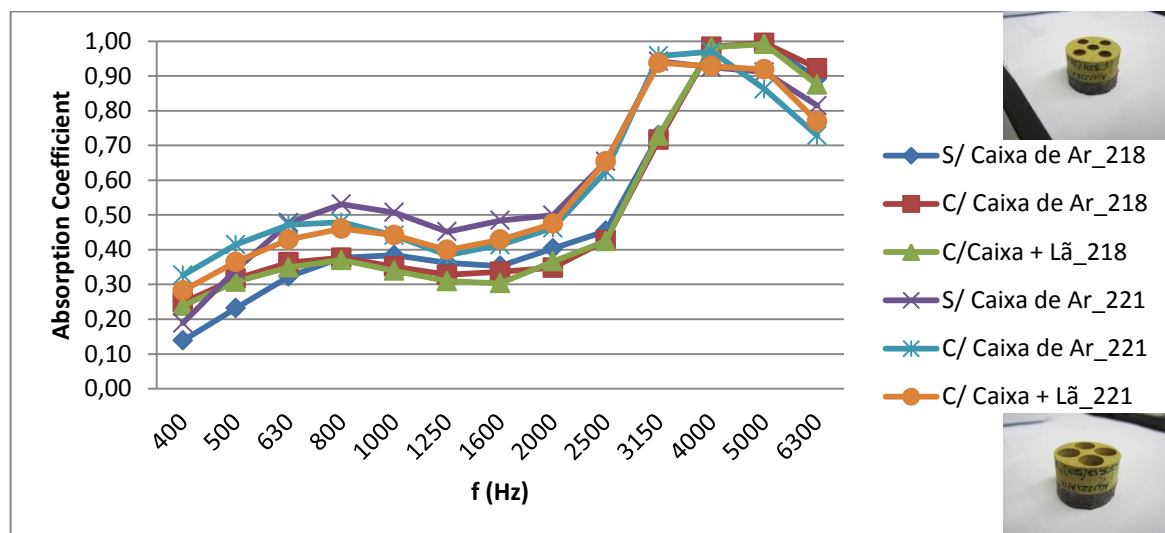


Figura 5.9 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente percentagem de perfuração e para altas frequências. Provetes: ACU218A_12 e ACU221A_12.

Os provetes escolhidos têm como única distinção a percentagem de aberturas (25% para o primeiro e 50% para o segundo). As suas restantes características são iguais, ou seja ambos possuem uma espuma de 5 mm, colada com cola autoadesiva e nenhum dos provetes contém tela acústica.

Verifica-se, pela observação do gráfico da Figura 5.8 que o comportamento de cada um dos provetes (individualmente) nas baixas frequências é muito idêntico quer se utilize lã de rocha na caixa-de-ar ou não; no entanto, ambos os provetes registam uma melhoria na absorção nas baixas frequências quando a caixa-de-ar é introduzida. O pico de absorção do provete com maior percentagem de perfuração mantém o mesmo valor quando se utiliza a caixa-de-ar, mas regista-se para um valor de frequência mais baixo. Em relação a percentagem de perfuração, pode-se verificar facilmente que o provete com maior percentagem de aberturas tem um coeficiente de absorção superior ao provete com menor percentagem para todos os sistemas, ou seja, no sistema sem caixa-de-ar verifica-se uma maior absorção a partir dos 630 Hz para o provete com maior percentagem de furos, e para os outros dois sistemas (com caixa-de-ar e com caixa-de-ar e lã de rocha), a absorção deste provete também é superior em quase toda a gama. Já nas altas frequências, os dois provetes mostram pouca alteração no seu comportamento, aquando da aplicação da caixa-de-ar e lã, podendo verificar-se também uma absorção superior do provete com maior percentagem de perfuração até cerca dos 4000 Hz, registando-se depois uma quebra de absorção em relação ao provete com 25% de aberturas na restante gama.

Era de esperar uma melhoria da absorção nas altas frequências quando o sistema inclui material poroso na sua caixa-de-ar, mas isso não se verificou. Já o aumento de absorção nas baixas frequências originado pela caixa-de-ar era de esperar, bem como um maior coeficiente de absorção do painel mais perfurado em relação ao menos perfurado.

5.2.4 Influência do Tipo de cola

No processo de fabrico destes provetes foram utilizadas duas metodologias de colagem. Numa aplicou-se cola de forma manual no painel e de seguida colocou-se a espuma, na outra foi utilizada uma espuma autoadesiva para fazer a adesão entre o painel e a espuma. O objetivo deste subcapítulo é perceber se o tipo de colagem influencia a absorção sonora do painel.

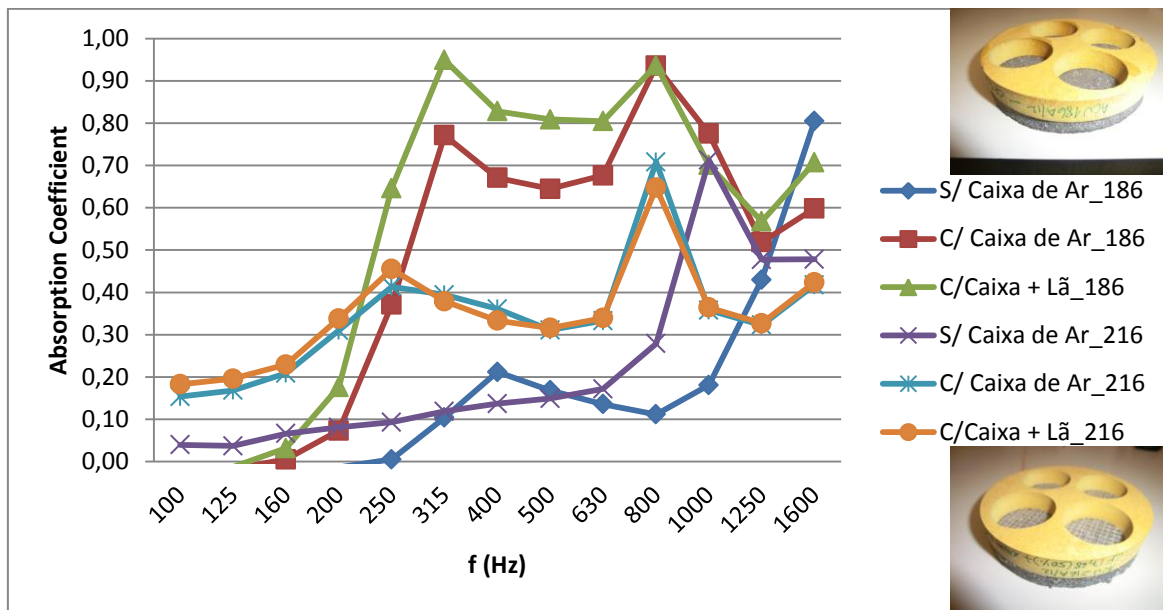


Figura 5.10 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente forma de colagem e para baixas frequências. Provete: ACU186A_12 e ACU216A_12.

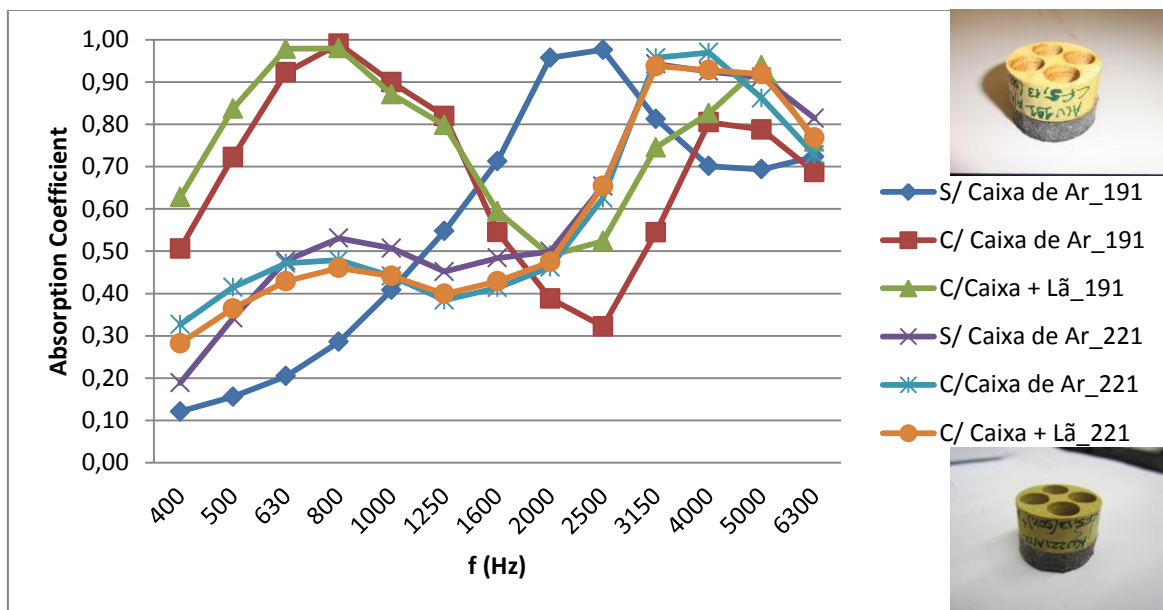


Figura 5.11 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente forma de colagem e para altas frequências. Amostra: ACU191A_12 e ACU221A_12.

Os provetes utilizados para este estudo têm a mesma percentagem de perfuração, a mesma espessura de espuma e não possuem tela. A única diferença encontra-se na forma como as espumas foram aplicadas, uma com cola aplicada manualmente e outra com espuma autoadesiva.

No que diz respeito às baixas frequências e na configuração sem caixa-de-ar, verifica-se uma maior absorção do provete com espuma autoadesiva em quase toda a faixa (100 a 1600Hz), observando-se um pico do provete sem cola autoadesiva na zona dos 400 Hz. Já na configuração com caixa-de-ar e com caixa e lã de rocha, o provete que tem espuma autoadesiva apresenta um coeficiente de absorção inferior logo a partir dos 200 Hz. A utilização de lã de rocha melhora o sistema com cola manual, não provocando grandes alterações no outro provete. A partir dos 1600 Hz, observa-se que o provete com espuma autoadesiva tem um coeficiente de absorção superior em relação ao outro provete, para as configurações com caixa-de-ar e caixa-de-ar e lã de rocha. Para a configuração sem caixa-de-ar a amostra que não tem espuma autoadesiva tem uma absorção superior dos 1400 aos 3000 HZ.

Visto os provetes terem a mesma constituição, alterando-se apenas a forma de colagem, era de esperar uma maior proximidade entre os resultados. Da observação dos gráficos da Figura 5.10 e 5.11, bem como de outros, verifica-se que esta discrepância se encontra em mais amostras. Não existe fundamento teórico para o tema da cola, no entanto, pela observação das amostras nota-se um material tipo tela nos provetes com espuma autoadesiva. Talvez seja essa malha e não a cola em si a provocar esta alteração nos resultados.



Figura 5.12 - Fotografias de provetes, com diferentes formas de colagem e respetiva “malha” da espuma autoadesiva. Amostra: ACU186A_12 e ACU216A_12

5.2.5 Influência da Espessura da Espuma Aplicada.

Neste subcapítulo pretende-se observar o que sucede ao coeficiente de absorção, quando a espessura da espuma flocada que cobre o painel é alterada.

Os provetes escolhidos para esta comparação (Figura 5.13 e 5.14) têm ambos 35% de área aberta, não possuem tela acústica na sua constituição e a espuma não é autoadesiva. A

diferença nos provetes encontra-se na espessura das espumas, tendo a mais espessa 5 mm e a menos espessa 3 mm.

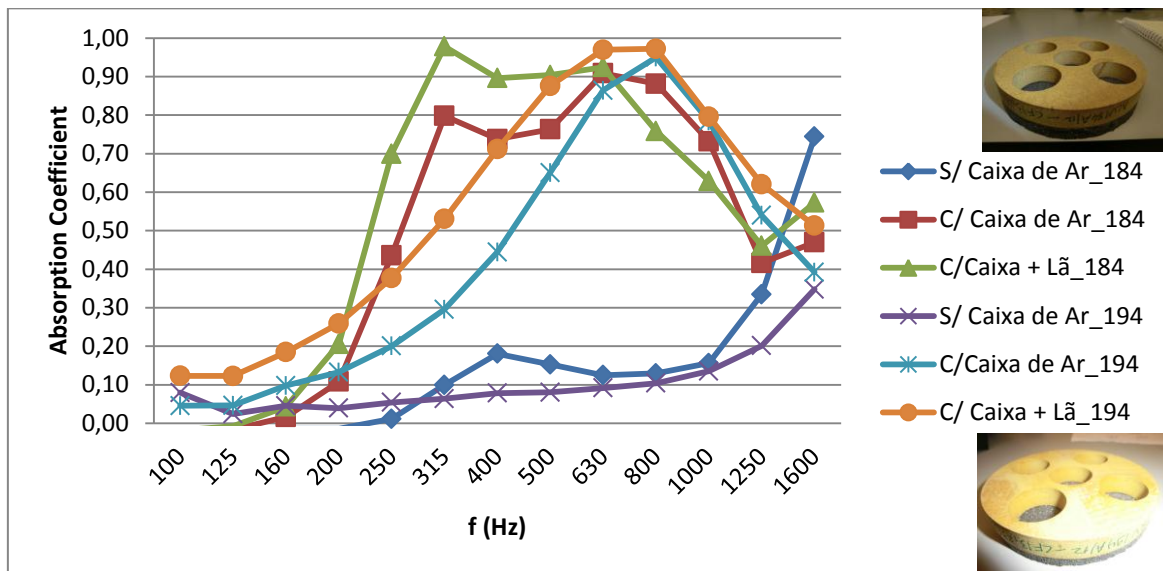


Figura 5.13 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente espessuras de espuma e para as baixas frequências. Amostra: ACU184A_12 e ACU194A_12.

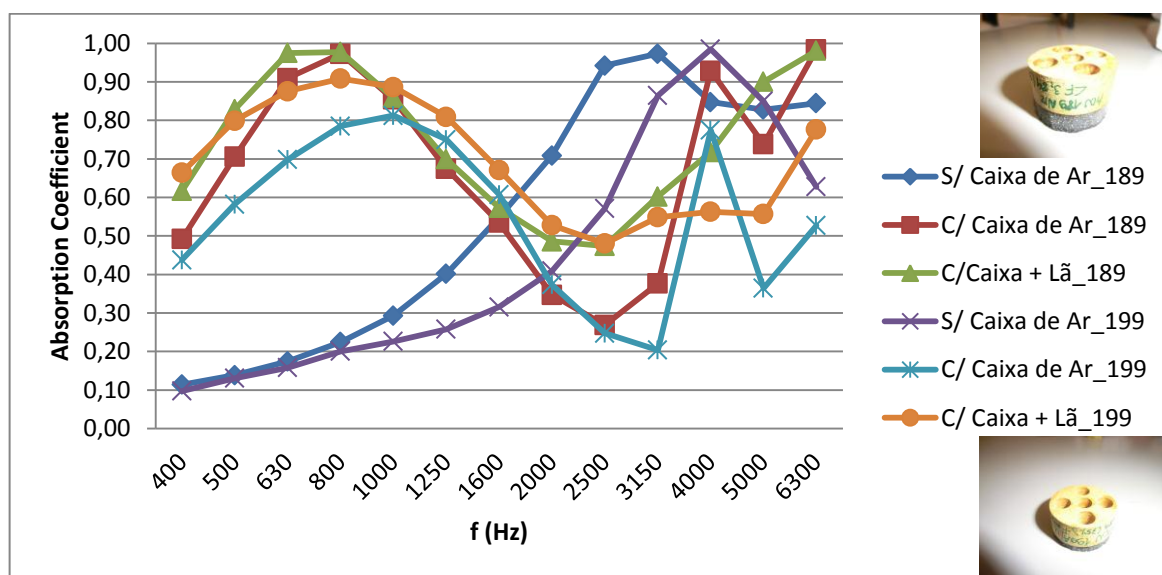


Figura 5.14 - - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferente espessuras de espuma e para as altas frequências. Amostra: ACU189A_12 e ACU199A_12.

Verifica-se, pela observação de ambos os gráficos, que, através da introdução da caixa-de-ar na configuração dos painéis, a frequência de ressonância dos dois provetes diminui, bem como se constata uma melhoria da absorção em toda a gama de frequências, quando o sistema inclui lã de rocha no interior da caixa-de-ar. No gráfico representativo das baixas frequências,

verifica-se que o provete com maior espessura de espuma tem um coeficiente de absorção superior ao outro logo a partir dos 300 Hz, quando aplicados encostados ao êmbolo. Em relação ao sistema com caixa-de-ar e com caixa-de-ar e lã de rocha, verifica-se que a frequência de ressonância é mais baixa para o provete com maior espessura de espuma, tendo ambos picos idênticos em cada configuração, mas em frequências distintas. Já nas altas frequências e para o sistema sem caixa-de-ar, verifica-se uma maior absorção do provete com 5 mm de espuma até cerca dos 3500 Hz, sendo daí em diante mais eficaz o provete com 3 mm de espuma. Também nas outras duas configurações se verifica uma maior absorção por parte do painel mais espesso, visualizando-se alguma superioridade do provete menos espesso dos 1000 Hz aos 2500 Hz.

Segundo a teoria, a introdução de uma maior espessura de material poroso, originaria uma maior absorção sonora nas altas frequências e um incremento significativo de gamas absorvidas. Pelos gráficos, pode-se observar que isso sucedeu aos provetes testados. Também é possível notar uma diminuição da frequência de ressonância de ambos os painéis quando a caixa-de-ar é introduzida, assim como um incremento de absorção originado pela lã de rocha.

5.2.6 Influência da Tela nos Provetes

A aplicação de telas acústicas nos painéis perfurados provoca melhorias significativas no comportamento dos mesmos. O intuito deste capítulo é perceber qual a sua influência na absorção sonora dos painéis testados e onde se verificam as melhorias.

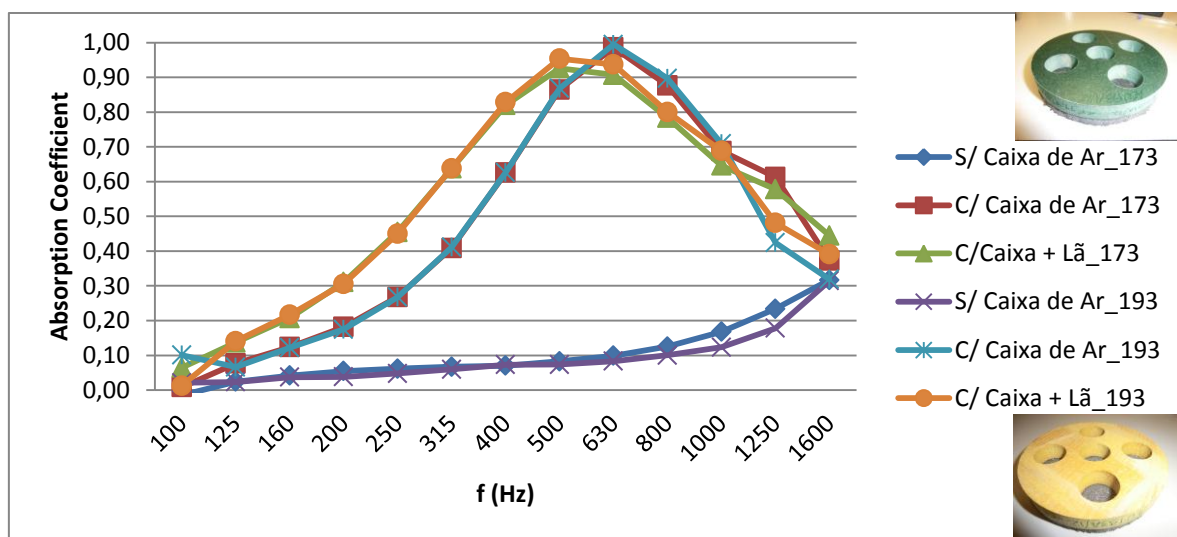


Figura 5.15 - Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferença na utilização de tela e para as baixas frequências. Provete: ACU173A_12 e ACU193A_12.

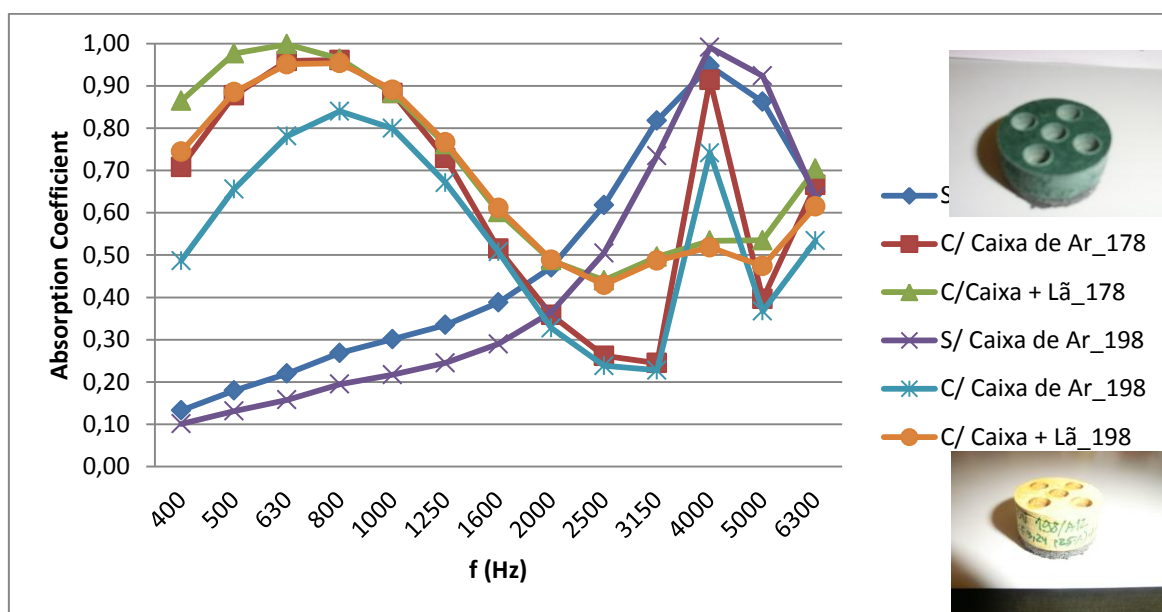


Figura 5.16- Gráfico e fotos das respectivas amostras, com diferença na utilização de tela e para altas frequências. Provete: ACU178A_12 e ACU198A_12.

Os provetes utilizados nesta comparação têm a mesma percentagem de área aberta, a mesma espessura de espuma e o mesmo tipo de cola. A diferença entre estes dois provetes está na utilização de uma tela acústica entre a espuma e o MDF para os provetes (173 (baixas freq.) e 178 (altas freq.)), estando os outros provetes desprovidos da mesma.

Verifica-se, para ambos os provetes e para as baixas frequências, uma melhoria substancial na absorção quando a caixa-de-ar é introduzida, verificando-se também nos dois provetes uma redução do pico de absorção e uma diminuição da frequência de ressonância, quando é colocada a lã de rocha. No que diz respeito à tela, o gráfico para as baixas frequências não mostra diferenças significativas para a absorção dos provetes. Já no gráfico das altas frequências observa-se uma maior eficiência na absorção quando o provete possui a tela acústica, isto para a configuração sem caixa-de-ar e com caixa-de-ar mas sem lã de rocha. Na configuração com a lã de rocha, a proximidade entre as curvas de absorção dos provetes é muito grande, ou seja o comportamento de ambos é praticamente idêntico.

Como esperado, verifica-se um aumento de absorção quando os sistemas possuem tela acústica (configuração sem caixa-de-ar e com caixa-de-ar). Nestas configurações, a tela é o principal elemento a introduzir resistência no sistema ressoador, originando a melhoria na absorção. Já quando existe lã no interior da caixa-de-ar o comportamento dos dois provetes é idêntico.

5.3 Influência do revestimento por “flocagem”

Os estudos e comparações efectuados anteriormente, permitiram uma melhor percepção do comportamento dos sistemas, no entanto, falta compreender a influência das espumas flocadas na absorção sonora dos painéis perfurados. Assim, neste subcapítulo será executada uma comparação entre um painel liso (constituídos apenas por MDF perfurado, (provete B1)) e dois painéis flocados. Os provetes flocados utilizados são ACU177 e 187. A diferença entre os mesmos reside na espessura das espumas e também na presença de uma tela acústica em um dos provetes. Em ambos os provetes foi aplicada cola manualmente para fazer a ligação entre a espuma e o painel.

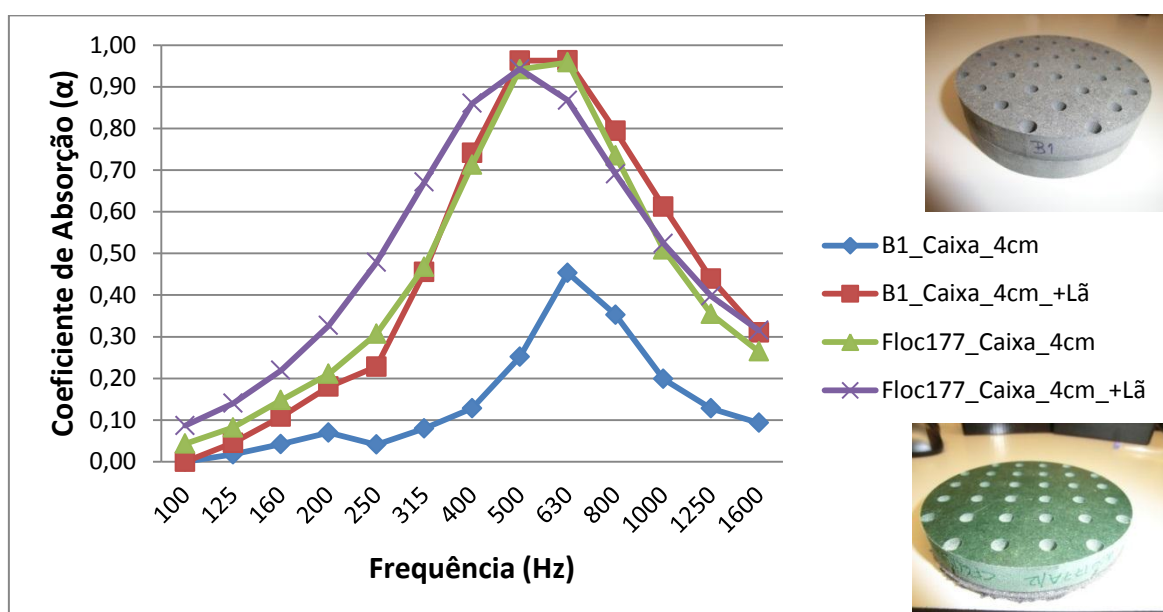


Figura 5.17 – Curva de absorção para painel liso e flocado em duas configurações distintas.
Provete: B1 e ACU177A_12.

Constata-se, pela observação da Figura 5.17 que para a configuração com caixa-de-ar de 4 cm vazia, o coeficiente de absorção do provete flocado é muito superior ao do provete liso, verificando-se também que a curva de absorção do provete flocado com configuração sem lã de rocha é idêntico ao do provete liso quando este contém esse material poroso na caixa-de-ar. Ao se aplicar lã de rocha no tardo do provete flocado nota-se uma redução na frequência de ressonância do painel, uma ligeira diminuição do pico de absorção e um aumento da banda de frequências absorvidas.

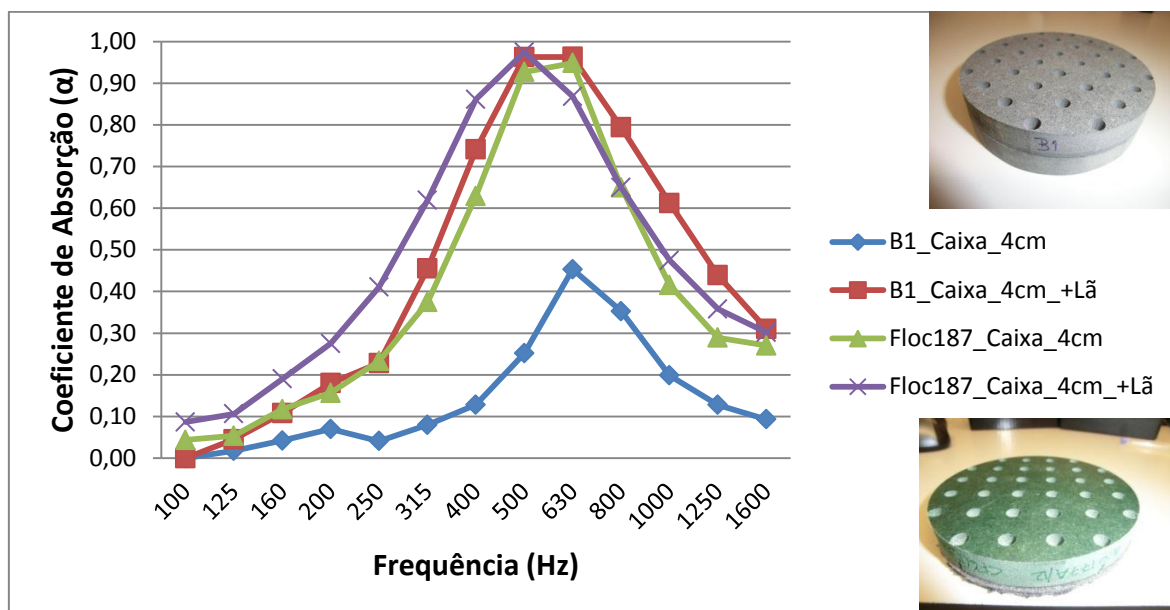


Figura 5.18 - Curva de absorção para painel liso e flocado em duas configurações distintas.
Provete: B1 e ACU187A_12.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.18, verifica-se que a aplicação de um painel com maior espessura de espuma e sem tela não provoca grandes alterações no comportamento do sistema quando comparado com o painel anterior. No entanto, observa-se uma ligeira redução da banda de frequências absorvidas para a configuração sem lã de rocha. Já na configuração com lã observa-se um ligeiro aumento do pico de absorção deste provete. Mais uma vez nota-se uma grande proximidade entre os resultados obtidos para o painel liso em configuração com caixa mais lã de rocha, e o painel flocado apenas com caixa-de-ar.

6 CONCLUSÃO

Para se construir um edifício com boas propriedades acústicas, é imprescindível uma adequada caracterização do espaço e um bom conhecimento sobre os materiais possíveis de serem empregues. O condicionamento acústico exerce um papel preponderante na qualidade acústica dos espaços interiores, sendo o leque de produtos disponíveis para tal tarefa muito vasto.

Desta forma, este trabalho surgiu com o objetivo de se tentar conhecer de forma mais profunda algumas técnicas novas, tentando compreender-se também, qual a influência de determinadas características na absorção sonora dos painéis de madeira perfurados.

No começo desta dissertação, foram enunciados vários conceitos teóricos e enumeradas várias soluções para o tratamento da acústica de interiores. De seguida, foram executados estudos sobre os painéis perfurados, que permitiram retirar muitas conclusões acerca dos mesmos.

Numa primeira instância, realizou-se um estudo sobre modelação da absorção sonora de painéis perfurados. Essa análise permitiu visualizar de forma clara as mudanças originadas pelas diferentes características dos painéis, ficando por perceber se os resultados obtidos pelo modelo programado em Matlab, seriam viáveis ou não. Assim, de seguida, procedeu-se a uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos, que permitiram concluir que, através do modelo utilizado se obtêm valores para o coeficiente de absorção bastante próximos dos obtidos no tubo de impedância. No entanto, esses valores apesar de próximos são sempre ligeiramente mais baixos que os obtidos nos ensaios laboratoriais, sendo a proximidade entre os mesmos mais elevada, quando a percentagem de perfuração é aumentada. Os resultados permitiram concluir que a modelação pode servir para executar os primeiros estudos sobre estes sistemas, pois permite obter resultados consideravelmente bons e a um custo baixo.

De seguida, efetuou-se um estudo sobre os painéis revestidos através da técnica de flocagem. Foram feitas várias comparações sobre os mesmos e a respeito de diversos parâmetros, pois os provetes utilizados possuem características distintas. Através desta pesquisa é possível retirar várias conclusões. A utilização da caixa-de-ar aumentou o rendimento de todos os painéis nas médias frequências, aumentando também a banda de frequências abrangida; já a utilização de lã de rocha na caixa-de-ar melhorou a absorção dos painéis nas altas frequências, no entanto a sua utilização parece dispensável, quando se utiliza painéis com maior espessura de espuma,

tela, ou espumas autoadesivas, pois as mesmas já provocam resistividade ao fluxo de ar suficiente, não se notando variações compensatórias nestes sistemas aquando se aplica a lã de rocha. Uma maior percentagem de perfuração também melhora a absorção sonora destes sistemas, notando-se uma variação mais elevada nos sistemas mais abertos, quando se aplica a caixa-de-ar ou a lã de rocha.

Para que o estudo ficasse concluído, era importante perceber qual a função da espuma flocada no aumento de absorção destes sistemas. Para isso, foi efectuado um estudo sobre um painel constituído apenas por MDF e dois painéis flocados com as mesmas características de MDF. Através da comparação destes resultados é possível concluir que o sistema com espuma “flocada” apresenta coeficientes de absorção sonora sempre mais elevados, quando se utiliza a configuração apenas com caixa-de-ar, notando-se uma proximidade muito grande quando se utiliza um painel de MDF liso com caixa-de-ar e lã de rocha no seu interior, com o painel flocado com caixa-de-ar mas sem material poroso no seu interior. A utilização da lã de rocha no painel flocado, origina uma redução na frequência de ressonância do sistema.

Para esta última comparação apenas foi possível realizar o estudo com base em um painel liso e para as baixas frequências, pois não existiam mais painéis destes com as mesmas características dos flocados. Com o conhecimento apenas deste painel, e como o sistema de painel liso com lã de rocha é menos dispendioso que o flocado, podemos dizer que, se não estiver envolvida a componente estética e o mais importante for a vertente económica, a utilização do painel liso é mais vantajosa, pois tem valores de absorção relativamente próximos dos painéis flocados e a um custo inferior.

Em futuros estudos e de forma a se aprofundar este trabalho, surge a necessidade de se fazer um estudo mais exaustivo a esta técnica de flocagem, tentando perceber-se claramente quais as vantagens na sua utilização. Para esse estudo será importante fabricar vários provetes com as mesmas características, sendo uns flocados e os outros não.

O estudo realizado foi feito apenas com o recurso a ensaios em tubo de impedância e a um modelo analítico programado em Matlab, que também tem como base a incidência de ondas normais ao provete. Desta forma, seria também importante realizar ensaios com alguns painéis flocados em camara reverberante e perceber assim qual o seu comportamento quando da presença de um campo sonoro difuso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM E 1050 (1998). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.

Beranek, L.L. & Vér, I.L., (1992). Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Bolt, R.H., (1947). On the Design of Perforated Facings for Acoustic Materials, Journal of the Acoustical Society of America.

Bksv@, (2012). (<http://www.bksv.com>). Denmark.

Callaway, D.B. e Ramer, L.G., (1952). The Use of Perforated Facings in Designing Low Frequency Resonant Absorbers, Journal of the Acoustical Society of America.

Carvalho, A. P. Oliveira (2009). Acústica Ambiental e de Edifícios. FEUP, Porto.

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

Forum.autoportal.iol@, (2012). (<http://forum.autoportal.iol.pt/>).

Flockcolor@, (2012). (<http://www.flockcolor.com.br/maquina-flocagem.php>). Brasil

Frasmil@, (2012). (<http://www.frasmil.com.br/produtos.php>). Brasil

Godinho, Luís; Mendes, Paulo Amado; Patraquim, Ricardo; Jordão, Ana Catarina (2011). Avaliação do comportamento acústico de painéis ressonantes incorporando telas acústicas. TecniAcustica, Cáceres.

Ibflock@, (2012). (<http://www.ibflock.pt/ibhome.html>). Leiria.

Ingard, K.U. e Bolt, R.H., (1951). Absorption Characteristics of Acoustic Materials with Perforated Facings, Journal of the Acoustical Society of America.

Isbert, Antoni Carrion (1998). *Diseño Acustico De Espacios Arquitectonicos* . Universidad Politecnica De Cataluña, Barcelona.

ISO 10534-2 (2001). *Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Transfer-function method*. International Organization for Standardization (ISO).

Jordão, Ana Catarina Vieira, (2011). *Análise experimental paramétrica do desempenho de painéis perfurados*. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra. Coimbra.

Kuttruff, H., (2000). *Room Acoustics Fourth Edition*, Spon Press, London.

Lamounier, Mônica Mesquita, (2008). *Critérios para seleção de materiais acústicos utilizados em recintos fechados para diferentes tipologias*. REDEMAT, Ouro Preto.

Leão, António Jorge de Almeida (1994). *Acústica de edifícios. Recomendações técnico-práticas para concepção de edifícios escolares e de habitação*. Faculdade de Engenharia, gabinete de Construções Civas, Universidade do Porto, Porto.

Long, Marshall (2006). *Architectural Acoustics*. Elsevier Academic Press. United States.

Meisser, M., (1986). *La Correction Acoustique des Locaux*, CATED, Paris.

Mikeska, E.E. e Lane, R.N., (1956). *Measured Absorption Characteristics of Resonant Absorbers employing Perforated Panel Facings*, J. Acoust. Soc. Am.

Morse, P.M., Bolt, R.H. e Brown, R. L., (1940). *Acoustic Impedance and Sound Absorption*, Journal of the Acoustical Society of America.

NP EN ISO 354 (2007). *Acústica. Medição da absorção sonora em câmara reverberante*. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Portugal.

Oliveira, Pedro Daniel Pinto Silva, (2009). *Desenvolvimento e caracterização acústica de elementos autoportantes para absorção sonora em espaços tipo open space*. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

Patraquim, Ricardo (2007). *Formação em Acústica em Edifícios*. Gabinete de Inovação e Desenvolvimento, Madeicávadoc Cascais.

Patraquim, Ricardo; Godinho, Luís; Tadeu, António; Amado-Mendes, Paulo, (2011). Influence of the presence of lining materials in the acoustic behaviour of perforated panel systems. 18TH Internatinal congress on sound e"romeno lol" vibration, Rio de Janeiro, Brazil.

Patraquim, Ricardo; Godinho, Luís; Amado Mendes, Paulo, (2012). Análise da absorção sonora de painéis ranhurados e perfurados incorporando espumas sintéticas. Évora.

Portela, Marcelo. Materiais Acústicos. Conceitos para acústica arquitetônica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Produto.mercadolivre@, (2012). (<http://www.mercadolivre.com.br>). Brasil.

Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Mendes, P. (2010). "Acústica Aplicada". Textos de apoio à disciplina de opção "Acústica Aplicada", Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.

T.J. Cox and P. D'Antonio (2004). Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application, Spoon Press, 1st ed.

Timberacoustic@, (2012), Algumas noções de acústica. (<http://www.timberacoustic.com/scid/timberpt/#a135>), Braga.

Vigran, T. (2008). Building Acoustics. Taylor & Francis, London, UK.