



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

# **Desempenho acústico de soluções divisórias para “open-spaces”**

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

Autor

**Ana Rita Gonçalves Pereira**

Orientadores

**Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho**

**Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues 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

Este projeto é o culminar de um ciclo e para que fosse possível concretizá-lo, não poderia deixar de agradecer a um conjunto de pessoas muito importantes para a realização do mesmo.

Aos meus orientadores, Professor Luís Godinho e Professor Paulo Mendes, por toda a disponibilidade, apoio e partilha de sabedoria que tiveram comigo.

À Castelhana e Ferreira S.A., em especial ao Engenheiro Ricardo Patraquim, que foi sempre muito prestativo.

Ao ITeCons (Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção), que disponibilizou as instalações, os equipamentos e os materiais necessários para a realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Engenheiro José Nascimento e ao meu colega Daniel Rodrigues, que me ajudaram em todos os ensaios laboratoriais que tive de realizar, e sem os quais teria tido a tarefa mais dificultada.

A todos os meus amigos, dos quais destaco os que me acompanharam desde o primeiro dia desta caminhada, e que nos momentos menos bons me deram o incentivo que precisava: André Carvalho, Bruno Santos, Débora Correia, Inês Rodrigues, Jaime Patrão, Joana Morais, João Jorge, João Lemos, José Martins, Kelly Teixeira, Luís Canais, Maria João, Nuno Costa, Ricardo Dias, Sofia Matias, Teresa Linhares, Tiago Silva.

Por último, mas os mais importantes, aos meus pais, José e Leontina, pelo apoio, pelo carinho, pela amizade, pela educação, por tudo o que sou hoje e por me terem dado a oportunidade de chegar até aqui.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
ÍNDICE.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
SIMBOLOGIA .....	vi
ABREVIATURAS .....	viii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento Geral .....	1
1.2 Objetivo .....	2
1.3 Estrutura da dissertação .....	2
2 ESTADO DA ARTE .....	4
2.1 "Open Space" .....	4
2.2 Parâmetros relativos ao comportamento acústico do espaço .....	7
2.2.1 Tempo de reverberação e ruído de fundo .....	8
2.2.2 Índice de privacidade e índice de articulação .....	10
2.2.3 Índice de transmissão da fala .....	11
2.2.4 Índice de inteligibilidade da palavra.....	12
2.2.5 Claridade ( $C_{50}$ ).....	12
2.3 Parâmetros relativos ao comportamento acústico de materiais e soluções e sua interligação com a acústica do espaço .....	13
2.3.1 Coeficiente de absorção.....	13
2.3.2 Perda por transmissão sonora .....	14
2.4 Comportamento acústico de uma divisória.....	17
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	20

---

3.1	Metodologia experimental .....	20
3.1.1	Equipamento .....	20
3.1.2	Descrição do método usado para obter o coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) .....	21
3.1.3	Descrição do método para obter a perda por transmissão ( $TL$ ) .....	23
4	MODELAÇÃO.....	26
4.1	Descrição dos modelos .....	26
4.2	Sistemas analisados.....	32
4.2.1	Estudo paramétrico .....	33
4.2.2	Comparação com resultados experimentais .....	38
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	42
5.1	Descrição dos materiais e sistemas ensaiados .....	42
5.2	Apresentação e análise dos resultados obtidos .....	45
5.2.1	Coeficiente de absorção.....	46
5.2.2	Perda por transmissão sonora .....	50
5.3	Discussão de resultados .....	53
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	55
6.1	Conclusão.....	55
6.2	Trabalhos futuros .....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58
	Referências bibliográficas citadas .....	58
	Referências bibliográficas consultadas.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fontes de ruído (adaptado de Pan e Chan, 2007).....	5
Figura 2.2 – Satisfação do nível de ruído (adaptado de Pan e Chan, 2007) .....	6
Figura 2.3 – Satisfação da qualidade acústica (adaptado de Pan e Chan, 2007) .....	6
Figura 2.4 – Tempo de reverberação (Tadeu et al, 2010).....	8
Figura 2.5 – Tempos óptimos de reverberação, a 500Hz, para diferentes tipos de utilizações (Tadeu et al, 2010).....	9
Figura 2.6 – Diferença entre má e boa transmissão da palavra (Ecophon®, 2012) .....	13
Figura 2.7 – Esquema do método da terminação anecoica (adaptado de Tao e Seybert,2003) 16	
Figura 2.8 – Esquema do método das duas fontes (adaptado de Tao e Seybert,2003).....	16
Figura 2.9 - Esquema dos caminhos de transmissão sonora entre duas salas (Pinto, 2011) ....	17
Figura 2.10 – Sombra acústica (Magnani, 2011).....	18
Figura 2.11 – Barreiras acústicas de secretária (Texaa®, 2012) .....	18
Figura 2.12 – Barreiras acústicas (Texaa®,2012) .....	19
Figura 3.1 – Fotografia do equipamento de ensaio para a determinação do coeficiente de absorção .....	20
Figura 3.2 – Fotografia do equipamento de ensaio para a determinação da perda por transmissão sonora.....	21
Figura 3.3 - Esquema do tubo de impedância para determinação do coeficiente de absorção (adaptado de Oliveira, 2009) .....	22
Figura 3.4 - Esquema do ensaio método das duas cargas (adaptado de Vigran,2012).....	23
Figura 4.1 – Lei de Hooke (Alva, s. d.).....	27
Figura 4.2 – Movimento de onda P (a) e onda S (b) (Bastos, 1993).....	28
Figura 4.3 – Esquema do problema .....	30
Figura 4.4 – Esquemas dos sistemas analisados.....	32
Figura 4.5 – Influência da variação espessura e da densidade do MDF nos valores de $TL$ no sistema a).....	34
Figura 4.6 - Influência da variação do coeficiente de Poisson e do módulo de Young do MDF nos valores de $TL$ no sistema a) .....	34
Figura 4.7 - Influência da variação da resistividade ao fluxo da espuma nos valores de $TL$ no sistema b).....	35
Figura 4.8 - Influência da variação da espessura do MDF e da espuma e da densidade do MDF nos valores de $TL$ no sistema b) .....	35

---

Figura 4.9 - Influência da variação das espessuras do MDF e da espuma nos valores de $TL$ no sistema c).....	36
Figura 4.10 - Influência da variação da resistividade ao fluxo da espuma e da densidade do MDF nos valores de $TL$ no sistema c).....	36
Figura 4.11 – Influência da variação da espessura e da resistividade ao fluxo da espuma nos valores de $TL$ nos sistemas d).....	37
Figura 4.12 – Diferenças nos valores de $TL$ no sistema b) e neste sistema com fibra de vidro ou lã de rocha.....	38
Figura 4.13 – Influência da variação da espessura da fibra de vidro e da lã de rocha no sistema b) nos valores de $TL$ .....	38
Figura 4.14 – Sistema a): Resultados em termos de $TL$ , Modelo vs Experimental.....	39
Figura 4.15 – Sistema b): Resultados em termos de $TL$ , Modelo vs Experimental.....	40
Figura 4.16 – Sistema c): Resultados em termos de $TL$ , Modelo vs Experimental.....	40
Figura 4.17 – Sistema d): Resultados em termos de $TL$ , Modelo vs Experimental.....	41
Figura 5.1 – Amostras A1, B1 e C1, em MDF perfurado .....	42
Figura 5.2 – Amostra ACU_320, em MDF não perfurado.....	43
Figura 5.3 – Amostras ACU_207, ACU_217, ACU_161 e ACU_162, em MDF, com e sem perfuração com espuma colada e flocadas .....	44
Figura 5.4 – Amostras de ACU_344 (quash branco), ACU_333 (espuma de poliuretano) e ACU_351 (basotect).....	45
Figura 5.5 – Valores do coeficiente de absorção para a amostra A1.....	46
Figura 5.6 - Valores do coeficiente de absorção para a amostra B1 .....	47
Figura 5.7 - Valores do coeficiente de absorção para a amostra C1 .....	47
Figura 5.8 - Valores do coeficiente de absorção para a amostra ACU_207.....	48
Figura 5.9 - Valores do coeficiente de absorção para a amostra ACU_217.....	49
Figura 5.10 - Valores do coeficiente de absorção para as amostras ACU_161 e ACU_162 e ACU_320.....	49
Figura 5.11 – Valores de perda por transmissão sonora para a amostra A1 .....	50
Figura 5.12 - Valores de perda por transmissão sonora para a amostra B1 .....	51
Figura 5.13 - Valores de perda por transmissão sonora para a amostra C1 .....	51
Figura 5.14 - Valores de perda por transmissão sonora para a amostra ACU_161 e ACU_162 .....	52
Figura 5.15 - Valores de perda por transmissão sonora para a amostra ACU_207 e ACU_217 .....	53

## SIMBOLOGIA

$A_{ij}$  – pólo acústico do elemento i-j  
 $A^{inf}$  – factor de amplitude dos potenciais  
 $A^{sup}$  – factor de amplitude dos potenciais  
 $B_{ij}$  – pólo acústico do elemento i-j  
 $c_0$  – velocidade do som  
 $C_{50}$  - Claridade  
 $c$  – velocidade do som  
 $c_0$  – velocidade do som  
 $C_{ij}$  – pólo acústico do elemento i-j  
 $D_d$  – trajeto direto  
 $D_f$  – trajeto por flancos  
 $D_{ij}$  – pólo acústico do elemento i-j  
 $E$  – módulo de Young  
 $E_{absorvida}$  – energia absorvida  
 $E_i$  – energia incidente  
 $E_{incidente}$  – energia incidente  
 $E_t$  – energia transmitida  
 $f$  - frequência  
 $F_d$  – trajeto por flancos  
 $F_f$  – trajeto por flancos  
 $H_{ij}$  – razão entre pressões sonoras  
 $k$  – número de onda  
 $k_\alpha^c$  – número de onda complexo  
 $M$  – número de Mach  
 $p_a$  – pressão no interior do tubo  
 $p_i$  – pressão sonora  
 $p_j$  – pressão sonora  
 $p_R$  – pressão acústica calculada no receptor R  
 $p_{inc\_R}$  – pressão incidente em condições de campo livre  
 $R$  – isolamento sonoro  
 $R_i$  – isolamento sonoro do elemento i  
 $R_i$  – relação sinal-ruído  
 $s$  – distância entre a amostra e o microfone mais afastado

$S_0$  – área do tubo  
 $S_{AA}$  – onda incidente  
 $S_{BB}$  – onda reflectida  
 $S_i$  – área do material i  
 $S_i$  – área do tubo  
 $T$  – período  
 $T$  – temperatura  
 $Tr$  – tempo de reverberação  
 $u$  - deslocamento  
 $V$  – velocidade do fluido  
 $V$  – volume do espaço  
 $x_l$  – distância entre os microfones 1 e 2  
 $W_i$  – factor de ponderação  
 $z_c$  – impedância  
 $z^c$  – impedância complexa

$\alpha$  – coeficiente de absorção  
 $\alpha_i$  – coeficiente de absorção do material i  
 $\varepsilon$  – deformações  
 $\lambda$  – comprimento de onda  
 $\mu$  – viscosidade absoluta  
 $\rho$  – densidade do ar  
 $\rho_0$  – densidade do ar  
 $\sigma$  – resistividade ao fluxo do ar  
 $\sigma$  - tensões  
 $\sigma_{full}$  – campo de ondas sonoras incidentes  
 $\tau$  – coeficiente de transmissão sonora  
 $\tau_i$  – coeficiente de transmissão sonora  
 $\omega$  – frequência angular

## ABREVIATURAS

*EDT* – early decay time

*FTM* – função de transferência de modulação

*IA* – índice de articulação

*IL* – insertion loss

*IP* – índice de privacidade

*MDF* – medium density fiberboard

*NR* – noise reduction

*RASTI* – rapid speech transmission index

*RRAE* – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

*SEA* – statistical energy analysis

*SII* – speech intelligibility index

*SNR* – signal to noise ratio

*STI* – speech transmission index

*TL* – sound transmission loss

## RESUMO

Nas últimas décadas, muitos dos espaços de trabalho em ambientes empresariais de maior dimensão apresentam uma configuração aberta, sendo usualmente designados como *open spaces*. Este tipo de espaços apresentam exigências de comportamento acústico específicas, devendo proporcionar a quem neles trabalha condições adequadas de concentração no posto de trabalho. Muitos dos problemas que se colocam nesses espaços relacionam-se com o desconforto acústico associado à presença de muitos utilizadores, sem uma total separação entre as diferentes áreas de trabalho. Deste modo, os sistemas de compartimentação usados devem funcionar de forma complementar na separação física dos espaços, mas também no condicionamento acústico dos mesmos.

Neste trabalho pretende-se, em primeiro lugar, efetuar uma pesquisa alargada sobre as exigências acústicas dos *open spaces* e dos respetivos sistemas de compartimentação. Depois desta fase, seguir-se-á um estudo em laboratório de algumas soluções, procurando caracterizar diferentes produtos do ponto de vista da absorção sonora e da perda por transmissão por eles conferida. Este estudo será realizado em pequenas amostras com recurso a um tubo de impedância, usando-se o método dos dois microfones para o coeficiente de absorção e o método das duas cargas para a perda por transmissão. Como complemento aos ensaios experimentais efetuados, irá realizar-se estudo paramétrico através de uma modelação teórica implementada no programa FreeMat. Neste estudo, pretender-se-á verificar a influência da variação dos diferentes parâmetros dos materiais utilizados (coeficiente de Poisson, módulo de Young, resistividade ao fluxo de ar, densidade e espessura).

## **ABSTRACT**

In the last decades, work spaces in bigger enterprises present an open configuration, usually referred to as open-spaces. This kind of work space has some specific demands concerning acoustic behavior, as it has to be able to provide a quiet environment where workers can focus on their job. Most issues concerning this kind of work space are related to the acoustic discomfort experienced by the workers, who share their work space with many other people, without a complete separation between different work areas. Thus, light partition used, must operate not only as a physic separation but also in the acoustic conditioning of the workspaces.

The purpose of this work is, in the first place, to do an extended research about the acoustic demands of open-spaces and their respective compartmentalizing systems. Afterwards, a laboratorial study of solutions to this problem will take place, in order to characterize different products from the sound absorption and loss of transmission point of view. This laboratory study, done with small scale samples using an impedance tube, using the two-microphones method for the absorption coefficient and t two load method to the transmission loss. In addition to the experimental trials, we will do a parametric study based on a theoretical modulation using FreeMat. In the present study, we intend to verify the influence of the variation of different parameters in the used materials (Poisson's ratio, Young's modulus, airflow resistivity, density and thickness).

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento Geral

Com o evoluir dos tempos, adaptaram-se os espaços de trabalho às necessidades da sociedade. Surgem, assim, os *open spaces*, espaços onde se pretende que exista um ambiente propício ao trabalho em grupo e, como espaço destinado a esta função, é inevitável a existência de ruído. Torna-se imperativo o aparecimento de soluções acústicas para melhorar esse mesmo ambiente, isto porque um mau ambiente de trabalho, pode provocar stress e baixo rendimento, aliado à falta de concentração.

Um espaço deste tipo é definido por uma zona ampla, sem qualquer tipo de parede convencional a fazer a sua divisão, o que proporciona uma maior interação entre os utilizadores do espaço. Na generalidade dos casos, as delimitações deste tipo de espaços são feitas através de barreiras de diferentes alturas, tipos de sistemas e materiais adotados.

Pretende-se, assim, um ambiente que permita o trabalho em grupo, sem que este perturbe o trabalho individual. É bastante comum o descontentamento dos utilizadores deste tipo de espaços, queixando-se de variados ruídos, sendo esta uma razão comum para que os *open spaces* sejam preteridos em relação ao comum escritório fechado. No entanto, estes espaços têm também várias vantagens, como por exemplo, uma maior dinamização do grupo de trabalho e maior flexibilidade, o que leva a apostar cada vez mais em espaços como estes.

Os revestimentos presentes num espaço (paredes, pavimento, tetos), assim como o mobiliário e outras componentes, quer sejam unicamente decorativas ou com propriedades funcionais, conferem um tipo de absorção sonora, que está diretamente relacionada com a capacidade de dissipação de energia sonora do espaço em causa. Para se atingir um conforto acústico adequado, num determinado espaço, é preciso ter-se em consideração os fenómenos de propagação do som dentro do espaço e a finalidade a que este se destina. Interessa referir que o campo sonoro dentro de um espaço fechado está relacionado com a energia sonora de incidência direta e também com a energia refletida pelos obstáculos e superfícies existentes no espaço.

Com estas características de um espaço tipo *open space*, torna-se necessário que se conjuguem os tipos de sistemas e materiais adequados para uma boa solução. Uma das soluções previstas nestes espaços, são as divisórias leves, muitas vezes amovíveis, por isso é importante fazer-se um estudo acústico sobre os materiais e tipos de sistemas a aplicar, com a finalidade de melhorar o ambiente acústico desses espaços, numa perspetiva de proporcionar uma maior satisfação dos utilizadores de *open spaces*, tanto no plano económico, como no plano físico e emocional dos mesmos.

O presente trabalho centra-se no estudo de alguns parâmetros acústicos relevantes para o desempenho de divisórias leves, designadamente o coeficiente de absorção e a perda por transmissão, abordando estes parâmetros, tanto a nível de ensaios, como a nível de modelação teórica.

## 1.2 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo analisar o comportamento acústico de diferentes materiais e tipos de sistemas para barreiras acústicas verticais em *open spaces*, em colaboração com a empresa *Castelhano & Ferreira, S.A.*. Além de um bom comportamento acústico, procura-se ter em atenção o custo e a viabilidade de execução.

Para efetuar esta análise foram feitos ensaios laboratoriais num tubo de impedância, disponibilizado pelo ITeCons, Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção, e ainda uma modelação teórica no programa FreeMat, tendo-se comparado os resultados obtidos experimentalmente com os resultantes do programa. Com a comparação de resultados pretende-se ganhar alguma sensibilidade relativamente à possível aplicação dos materiais estudados na construção deste tipo de dispositivos.

Os dois parâmetros testados laboratorialmente, o coeficiente de absorção e a perda por transmissão, foram ensaiados em tubo de impedância, onde foram usados o método dos dois microfones, segundo a norma ISO 10534-2, e o método das duas cargas, respetivamente.

## 1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto por seis capítulos.

No capítulo 1 é feito um enquadramento geral do tema deste trabalho, propondo-se os objetivos do mesmo. É feita também uma breve descrição da sua estrutura.

No capítulo 2 são apresentados um conjunto de conceitos teóricos relevantes para este estudo, efetuando-se ainda uma revisão bibliográfica, baseada em estudos já publicados na literatura especializada.

No capítulo 3 são descritas as metodologias de ensaio utilizadas, assim como o material utilizado.

No capítulo 4 é feita uma modelação teórica do desempenho de diferentes soluções, usando uma implementação de modelos matemáticos, através do programa FreeMat. Faz-se a descrição dos modelos utilizados e dos sistemas analisados, e realiza-se um estudo paramétrico, para ver a influência das propriedades dos materiais. Por fim, apresenta-se uma comparação preliminar dos resultados da modelação com os experimentais.

No capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais, tanto para o coeficiente de absorção como para a perda por transmissão, procurando-se ainda efetuar uma reflexão sobre os resultados obtidos e sobre o potencial de aplicação das soluções tratadas.

No capítulo 6 são expostas as conclusões retiradas da análise do trabalho feito, e apresentam-se propostas para trabalhos futuros no seguimento deste mesmo tema.

## 2 ESTADO DA ARTE

No presente capítulo serão apresentados alguns conceitos teóricos relacionados com o tema de caracterização acústica de divisórias leves para *open spaces*, tanto a nível de espaço como das próprias divisórias.

### 2.1 "Open Space"

Com a evolução dos setores de serviços e comércio, têm vindo a ser exploradas novas tipologias de espaço de trabalho, entre as quais se incluem os *open spaces* (isto é espaços abertos). Estes espaços são definidos por serem amplos, sem paredes convencionais, sendo que as possíveis divisões serão feitas, por exemplo, por divisórias de variados tamanhos, materiais e tipos de sistemas. São destinados a reunir pessoas para vários fins, tendo como principal objetivo a interação entre os utilizadores e proporcionar um bom desempenho nas tarefas que estes realizam. Uma das grandes vantagens deste tipo de conceito é o melhor aproveitamento de espaço.

No entanto, este tipo de espaços acarretam não só vantagens, mas também desvantagens. Espaços como estes promovem a comunicação e interação entre trabalhadores, uma maior flexibilidade e ainda aumenta a capacidade de acolher um maior número de trabalhadores, mas também aumentam o barulho, a distração e há uma diminuição da privacidade (O'Neil, 2008).

A ideia da criação deste tipo de espaços deve-se a Harrison Owen, na década de oitenta (Wikipédia@, 2012).

Vários estudos foram efetuados sobre as vantagens e desvantagens de espaços como este. Num desses estudos efetuados, foram questionados trabalhadores sobre quais as fontes de ruído mais perceptíveis em *open spaces* e em espaços fechados. Os resultados deste questionário podem ser analisados no gráfico da figura 2.1.

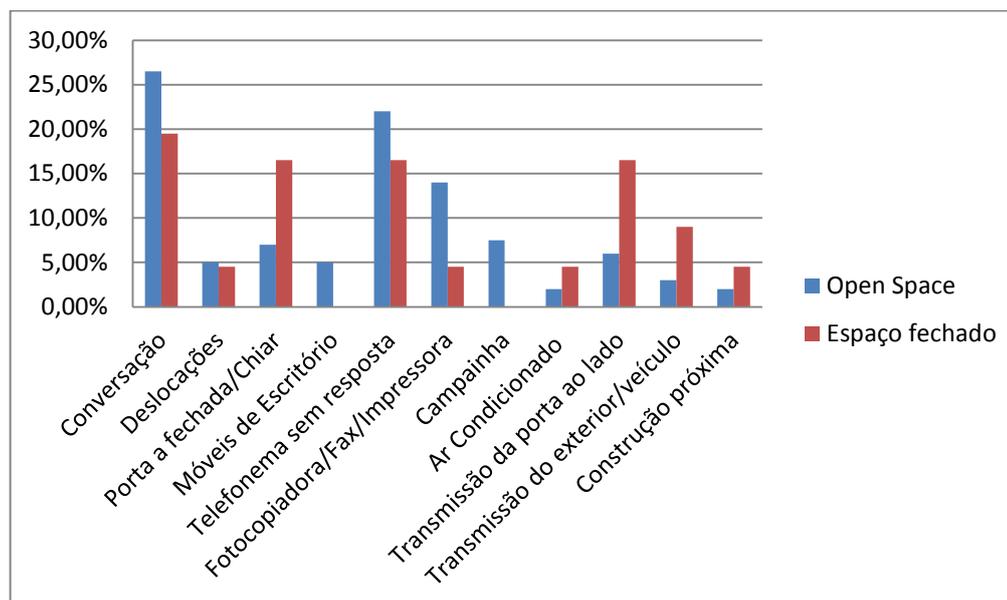


Figura 2.1 – Fontes de ruído (adaptado de Pan e Chan, 2007)

A conclusáo que se tira é que independentemente do tipo de espaço, o ruído mais incomodativo é o gerado pela conversaço e pelas máquinas (como por exemplo, o telefone e a fotocopiadora). Conclui-se também que os espaços tipo *open space* provocam uma maior distraço e uma menor privacidade de conversaço que os espaços fechados (Pan e Chan, 2007).

As condições acústicas são muito relevantes neste tipo de espaços. É, por isso, necessário encontrarem-se as melhores soluções e materiais, para que os espaços apresentem as características acústicas adequadas para a sua finalidade. No tipo de espaços em estudo (*open space*) existe uma fácil propagaço de ruído, o que obriga ao uso de outros recursos, tais como mecanismos que atenuem esta propagaço.

Vários inquéritos e estudos foram efetuados, mostrando resultados de alguma insatisfaço para este tipo de espaços, caso não tenham o devido tratamento acústico.

Ainda no âmbito do inquérito realizado por Pan e Chan (2007), foi averiguada a opinião de dois grupos distintos, sendo que os diferentes grupos trabalham em *open space* e em espaço fechado, respetivamente.

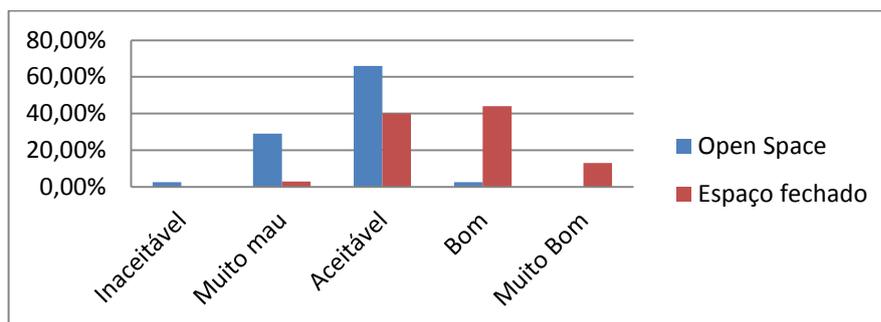


Figura 2.2 – Satisfação do nível de ruído (adaptado de Pan e Chan, 2007)

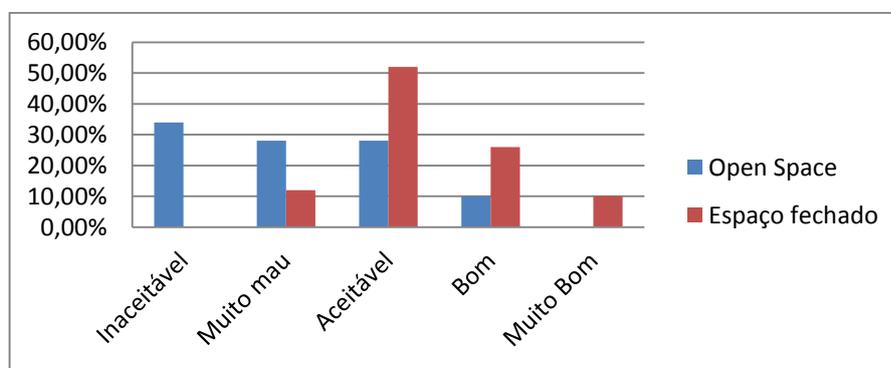


Figura 2.3 – Satisfação da qualidade acústica (adaptado de Pan e Chan, 2007)

Do inquérito realizado resultaram estes dois gráficos (figuras 2.2 e 2.3), onde se pode ver que os *open space* são preteridos aos espaços fechados, recebendo, globalmente, piores classificações no que respeita ao seu desempenho acústico.

Anteriormente, Jesen e Arens (2005) realizaram um inquérito a 23450 pessoas de 142 edifícios, tendo sido avaliadas várias situações: espaço fechado, espaço partilhado, espaço com barreiras altas, espaço com barreiras baixas e, por fim, *open space*. Os resultados mostraram que a solução mais satisfatória foi o espaço fechado, seguindo-se o escritório partilhado, que no entanto, não satisfaz na vertente da privacidade do som. O *open space* apresenta uma classificação intermédia, seguido dos espaços de barreiras altas e na última posição, o espaço com barreiras baixas. Este estudo pode apresentar resultados diferentes com o referido anteriormente, em virtude de ter um sistema diferente de mobiliário e a escala do espaço ser outra.

Cherow (1991), citado por Pan e Chan (2007), elaborou um estudo relacionado com a produtividade destes diferentes espaços, onde comprova que a baixa produção está

relacionada com espaços abertos, quando comparados com espaços fechados. Também Pan e Chan (2007), com um estudo idêntico, tiraram conclusões idênticas.

Perante toda esta insatisfação torna-se peremptória a existência de mecanismos de absorção sonora, como por exemplo, divisórias, tetos e pavimentos, de forma a diminuir a reverberação do espaço, melhorando o conforto acústico dos seus utilizadores.

Um inquérito foi feito por Nilsson e Hellström (2010), constituído por 60 questões de escolha múltipla, a um conjunto de pessoas que trabalham num escritório sujeito a tratamento acústico, procuram obter uma análise do ambiente acústico por parte dos seus utilizadores. Os resultados obtidos mostram que o tratamento acústico melhora em muito as condições do local, deixando, por exemplo, de existir pessoas a considerar que o ambiente é muito mau. No entanto, nenhum dos participantes no inquérito considera que o ambiente acústico era muito bom, nem antes nem depois da reabilitação do espaço.

Anteriormente, Sykes (2004) observou, através de ensaios laboratoriais e *in situ*, que é fundamental que haja um decréscimo do ruído proveniente da palavra, aumentando assim a privacidade da palavra. Com estas condições, a capacidade de concentração dos trabalhadores aumentava quase em 50%, assim como havia uma considerável diminuição de distrações provocadas pelo ruído de fundo. Desta forma, era possível proporcionar um melhor ambiente para o desempenho dos trabalhadores, o que se evidencia no trabalho produzido com diminuição de erros e de stress.

Conclui-se, portanto, que a utilização de soluções que permitem melhorar as condições acústicas do espaço é essencial, devendo fazer-se um estudo para melhorar o tipo de material, características do mesmo e criar tipos de sistemas eficazes num melhoramento acústico.

Estes tipos de espaços têm parâmetros acústicos que permitem a caracterização do espaço, e pretende-se fazer uma referência aos mesmos de seguida.

## **2.2 Parâmetros relativos ao comportamento acústico do espaço**

Para uma melhor compreensão das exigências acústicas de espaços tipo *open space*, torna-se necessário abordar determinados conceitos teóricos relacionados com os parâmetros que permitem a caracterização acústica dos mesmos.

### 2.2.1 Tempo de reverberação e ruído de fundo

A definição de tempo de reverberação consiste no intervalo de tempo necessário para se verificar um decaimento de 60 dB no nível sonoro, após a interrupção instantânea da fonte sonora (figura 2.4).

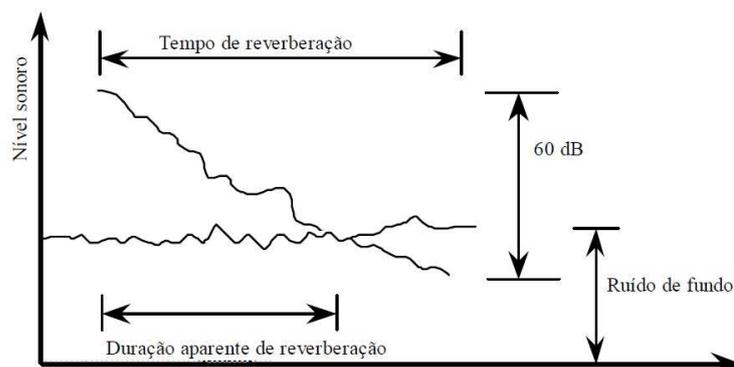


Figura 2.4 – Tempo de reverberação (Tadeu et al, 2010)

O tempo de reverberação pode ser relacionado com a absorção sonora, mas uma das mais utilizadas e simplificada é através da fórmula de Sabine:

$$Tr = \frac{0,16V}{\sum S_i \alpha_i}, \quad (2.1)$$

onde  $V$  é o volume do espaço;  $S_i$  é a área do material  $i$ , que se encontra na envolvente do espaço; e  $\alpha_i$  é o coeficiente de absorção do material  $i$ .

O tempo de reverberação adequado a um espaço depende, fundamentalmente, do seu volume e do fim a que este se destina. Em alguns casos, o objetivo do tratamento acústico de um espaço é que o seu tempo de reverberação seja o mais baixo possível para que haja uma melhor oralidade no espaço. Noutros, pretende-se alguma reverberação, de modo a “encher” acusticamente o espaço (figura 2.5).

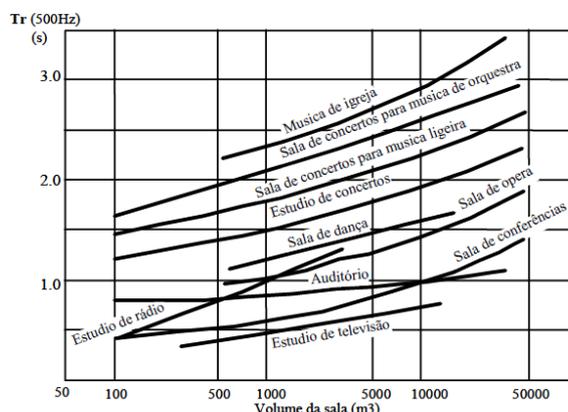


Figura 2.5 – Tempos óptimos de reverberação, a 500Hz, para diferentes tipos de utilizações (Tadeu et al, 2010)

Este é um dos parâmetros de principal especificação para espaços, onde um longo tempo de reverberação implica um compartimento com um pobre índice de inteligibilidade e muito barulhento. No caso de um *open space* é importante proporcionar um decréscimo suficiente de níveis de ruído, tendo uma suficiente atenuação sonora entre diferentes compartimentos e ainda afastando as possíveis fontes de ruído (Oliveira, 2009).

Outro parâmetro relevante em espaços fechados é o ruído de fundo, isto é, todo o ruído que existe num determinado espaço quando não há qualquer tipo de atividade no mesmo. As origens deste tipo de ruído são variadas, sendo as mais frequentes: o sistema de climatização, as instalações hidráulicas e elétricas e os ruídos vindos do exterior do espaço em causa (Mateus, 2008).

De acordo com o Regulamento dos Requisitos Acústico dos Edifícios (RRAE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06, no Artigo 6º, destinado a edifícios escolares e similares, de investigação e de leitura (os mais próximos de *open spaces*), alínea d), refere que o tempo de reverberação (Tr) corresponde à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz.

Segundo o RRAE, aprovado pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06, é exigido que neste tipo de espaços o tempo de reverberação satisfaça as condições indicadas no quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Limite do valor do tempo de reverberação (máximo) em *open spaces*

Locais	Tempo de reverberação (500 Hz — 2 kHz)
Salas de aula bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios .....	$T \leq 0,15 V^{1/3}$ [s] (V. artigo 9.º)
Ginásios .....	

$V$  = volume interior do recinto em causa.

### 2.2.2 Índice de privacidade e índice de articulação

Neste tipo de conceito de espaço, a grande problemática é a privacidade da palavra, isto porque existem poucos sistemas absorventes e barreiras.

O índice de privacidade ( $IP$ ) do som mede a privacidade do som, ou seja a falta de perceptibilidade da palavra. O  $IP$  relaciona-se com o índice de articulação ( $IA$ ):

$$IP = (1 - IA) \times 100\% , \quad (2.2)$$

sendo  $IA$  o entendimento da conversação, variando entre 0 (baixa perceptibilidade) e 1 (alta perceptibilidade). Este índice é calculado a partir de:

$$IA = \sum W_i \times R_i , \quad (2.3)$$

onde  $W_i$  é o fator de ponderação correspondente na banda de um terço oitava (quadro 2.2) e o  $R_i$  é a relação sinal-ruído ( $SNR$ ), também para a banda de um terço de oitava (200-5000 Hz) (Andersson e Chigot, 2004).

Quadro 2.2 – Factores de ponderação ( $W_i$ ) de acordo com a norma ANSI S3.5 (Anderson e Chigot, 2004)

Hz	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$W_i$	.0004	.001	.001	.0014	.0014	.002	.002	.0024	.003	.0037	.0038	.0034	.0034	.0024	.002

O valor de 90% para o  $IP$  é considerado uma boa privacidade (Andersson e Chigot, 2004). No caso específico a estudar (espaços tipo *open space*) o objetivo é maximizar o  $IA$  na fonte emissora e minimizar este mesmo parâmetro no recetor, isto porque quanto menor o  $IA$  maior será a privacidade da palavra, como já referido anteriormente (Oliveira, 2009).

### 2.2.3 Índice de transmissão da fala

O índice de transmissão da fala (*speech transmission index, STI*) é um parâmetro que permite a medição da percepção da palavra, isto é, um sinal deverá ser entendido com o mínimo de deformação possível. Este pode ser classificado entre 0 e 1, correspondendo estes valores a inteligibilidade nula e ótima, respetivamente (Larm et al, 2005).

A relação, em percentagem, entre as consoantes recebidas e as emitidas permite avaliar se há uma boa perceptibilidade, sendo necessário que esta relação seja maior que 60% para que se tenha uma perceptibilidade apropriada (Patrício, 2010).

Outro parâmetro associado ao *STI* é o *RASTI* (*rapid speech transmission index*) este é um parâmetro que é classificado quantitativamente, de mau a excelente. (Andersson e Chigot, 2004). Este parâmetro é uma versão mais simplificada do *STI*, que permite também quantificar a inteligibilidade da palavra num espaço fechado.

A estimativa de ambos os parâmetros referidos é fundamentada na avaliação de detioração da modulação entre o ponto de emissão e o de recepção, isto é, na Função de Transferência de Modulação (FTM) (Paulino, 2008).

É importante referir que a inteligibilidade da palavra refere-se a indivíduos em conversação entre si, enquanto que a privacidade do discurso, pelo contrário, se destina a indivíduos que não se encontram integrados na conversação (Andersson e Chigot, 2004).

Na medição destes parâmetros é necessário ter em conta algumas características do espaço, tais como: o tempo de reverberação, o nível de ruído de fundo, a geometria do espaço e, por fim, mas não menos importante, a localização de superfícies de absorção/reflexão/difusão (Andersson e Chigot, 2004).

Num espaço tipo *open space*, o *RASTI* deve ser tão baixo quanto possível, sendo assim a privacidade da palavra alta. O valor considerado adequado entre postos de trabalho é de 0,5, ou seja, o trabalhador do lado consegue ouvir o que é dito pelo colega do lado, mas não é perturbado (Larm et al, 2005).

As diferenças entre estes dois parâmetros, *STI* e *RASTI*, não serão, expectavelmente, grandes, isto porque em estudos efectuados os tempos de reverberação mais cedo (*early decay time, EDT*) são muito pequenos e o ruído de mascaramento é semelhante ao de discurso (Larm et al, 2005).

O parâmetro *EDT*, referido acima, é o intervalo de tempo que a curva do nível de energia demora a cair 10dB, após a fonte de excitação ser subitamente desligada. Quando se tem um valor elevado de *EDT*, sugere que há valores altos de reverberação e valores baixos para a claridade (Paulino,2008).

#### **2.2.4 Índice de inteligibilidade da palavra**

O índice de inteligibilidade da palavra (*speech intelligibility index, SII*) é uma medida física para avaliar a inteligibilidade da palavra em diferentes combinações de discurso e de níveis de ruído.

Pode variar entre 1 e 0, sendo que o valor de 1 indica que todos os estímulos do discurso atingem o ouvinte. Por outro lado, quando o seu valor é zero significa que não há sinais de discurso que cheguem ao ouvinte.

Este parâmetro permite classificar, em *open spaces*, a privacidade da palavra esperada pelo ouvinte. Quanto mais baixos forem os valores do SII, maior será a privacidade da palavra.

Para o cálculo de SII é necessário conhecer-se o nível sonoro equivalente do espectro de conversação, o nível sonoro equivalente do espectro de ruído e, por fim, o nível limiar de audição equivalente. No caso particular dos *open spaces*, para o cálculo do SII, dispensa-se o conhecimento do nível limiar de audição equivalente (Wang e Bradley, 2002).

#### **2.2.5 Claridade ( $C_{50}$ )**

Para estudos efetuados em *open spaces*, a medição da Claridade ( $C_{50}$ ) é frequentemente realizada. Um valor alto para este parâmetro é positivo para a claridade, isto porque valores baixos dão a impressão de que o som não é claro, ou seja, demasiado reverberante (Paulino, 2008).

A claridade tem em conta a qualidade de transferência do discurso para os ouvintes, como representado na figura 2.6 (Nilson e Hellström, 2010).



Figura 2.6 – Diferença entre má e boa transmissão da palavra (Ecophon®, 2012)

O logaritmo da relação entre a energia registada no 80 mseg, no caso da música, ou 50 mseg, no caso da voz, e a energia do sinal excedente define a claridade do espaço (Paulino, 2008).

## 2.3 Parâmetros relativos ao comportamento acústico de materiais e soluções e sua interligação com a acústica do espaço

### 2.3.1 Coeficiente de absorção

O coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) é a razão entre a energia sonora absorvida e a energia sonora total incidente no material (num dado intervalo de tempo), e varia normalmente com a frequência, assumindo valores entre 0 a 1. No entanto, para que os materiais sejam considerados absorventes o valor do coeficiente de absorção deverá ser superior a 0,5 (Tadeu et al, 2010). O coeficiente de absorção é tanto maior, quanto maior for a dissipação de energia incidente, isto porque a absorção sonora de um material resulta da transformação de energia sonora em energia calorífica por atrito e/ou deformação (Parreira, 2008),

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.4)$$

Este parâmetro é uma característica do material, que permite definir a capacidade de absorção do mesmo, sendo o parâmetro mais fácil de alterar para se efetuar uma correção acústica de espaços (Oliveira, 2009).

Para a determinação deste parâmetro pode recorrer-se a diferentes métodos, sendo os métodos laboratoriais mais relevantes os seguintes: a câmara reverberante e o método do tubo de impedância.

A medição do coeficiente de absorção, através do tubo de impedância (também designado de tubo de Kundt), é das mais antigas e das mais longas. É também conhecido pelo método da onda estacionária. A norma que se aplica a esta metodologia é a ISO 10534-1 [5]. O procedimento de ensaio consiste na utilização de um tubo circular de pequeno diâmetro, que apenas permita a propagação de ondas na direção axial. É colocado um altifalante numa das extremidades e na outra extremidade, que está a uma determinada distância, é colocada uma terminação rígida. Este método apresenta algumas desvantagens, tais como o longo período de duração que tem e ainda o facto de se limitar a algumas frequências, sendo mais adequado para materiais com baixa absorção.

No caso do método da câmara reverberante, a norma a seguir é a ISO 354 [9]. Este procedimento tem em conta que, no campo difuso da câmara, o tempo de reverberação ( $T_{60}$ ) para uma redução de 60dB, em nível de pressão sonora, depende da quantidade total de absorção. Segundo aquela norma, a fórmula usada neste caso, é a de Sabine (já referida, anteriormente). Através deste método, obtém-se o coeficiente de absorção para uma incidência aleatória. Uma das grandes vantagens na utilização deste ensaio é o facto de se poder usar amostras de grandes dimensões (áreas acima de  $10\text{m}^2$ ), podendo ser mais representativo de situações reais.

Apesar dos ensaios laboratoriais serem bastante fiáveis, há necessidade de recorrer a ensaios *in-situ*, existindo nestes o método direto e o indireto (Kruse, 2008).

### **2.3.2 Perda por transmissão sonora**

A perda por transmissão sonora (*sound transmission loss*,  $TL$ ) é determinada pela medição de níveis de pressão sonora, numa dada gama de frequências, a partir da fonte e do recetor que se encontram em espaços adjacentes (Wang et al, 2005).

De uma forma simplificada, pode-se dizer que é a quantidade de som perdida, quando o mesmo se transmite através de um material. Existe uma classificação em categorias de transmissão sonora para os vários tipos de painéis acústicos existentes. Na classe de transmissão sonora entre os 20 e 25 significa que um som, em voz baixa, se ouve na sala adjacente, no entanto uma classe que varie entre os 50 e os 60 exprime que um ruído alto praticamente não se ouve.

Segundo Gerges (1992), citado por Pinto (2011), a  $TL$  é uma relação logarítmica entre as energias incidente ( $E_i$ ) e transmitida ( $E_t$ ):

$$TL = 10 \log \frac{E_i}{E_t} = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (2.5)$$

onde  $\tau$  é o coeficiente de transmissão sonora, que varia entre 0 e 1 (Pinto, 2011).

Desta forma, quanto maior o coeficiente de transmissão sonora menor será a  $TL$ , logo será menor o isolamento aos sons conduzidos por via aérea (Armstrong@, 2012).

Uma das estruturas para as quais é habitual avaliar este parâmetro são os painéis em sanduíche. Muitos estudos foram já efetuados em relação a este tema, sendo habitual o uso do método de análise estatística de energia (*statistical energy analysis, SEA*), visto ser uma poderosa ferramenta para a determinação de  $TL$  em sistemas de grande espessura, principalmente nas altas frequências (Wang et al, 2005).

Quando se fala em perda por transmissão não se pode deixar de falar de dois parâmetros, que estão intimamente relacionados com este: a redução sonora (*noise reduction, NR*) e a perda por inserção (*insertion loss, IL*). De facto, estes três parâmetros ( $TL$ ,  $NR$  e  $IL$ ) são muito relevantes na definição do desempenho de elementos no que respeita ao isolamento.

A redução sonora é a diferença de níveis de pressão sonora, em dB, através do elemento, enquanto a perda por inserção, também expressa em dB, é a diferença de níveis de pressão sonora num ponto, habitualmente fora do sistema, sem e com a presença desse elemento. Dos dois parâmetros referidos, o mais útil, mas também o mais difícil de avaliar é a perda por inserção. Por seu lado, a redução sonora, apesar de ser facilmente medida, não tem uma utilidade tão grande (Tao e Seybert, 2003).

No que respeita ao  $TL$ , existem vários métodos para se obter este parâmetro, sendo que neste trabalho se optou pela utilização do método das duas cargas no tubo de impedância, que é descrito mais à frente. No entanto, há ainda outros métodos: o método dos dois compartimentos, o método de decomposição ou o método da terminação anecoica e, por fim, o método das duas fontes (Yousefzadeh et al, 2008).

No método dos dois compartimentos, o método de ensaio para a medição do  $TL$  usa dois compartimentos adjacentes com um caminho de transmissão contíguo. A amostra a ser testada é colocada nesse caminho de transmissão. Gera-se som num dos compartimentos e em ambos os compartimentos, são registados os valores das medições que vão permitir a caracterização do  $TL$ . Este método tem a desvantagens de exigir custos elevados e espaços de ensaio em grande escala (Tao e Seybert, 2003).

No método de ensaio denominado de método da terminação anecoica ou método de decomposição, como está representado na figura 2.7, uma onda estacionária desenvolve-se quando existe uma variação na impedância à entrada do atenuador, para ocorrer uma viagem unidimensional do som ao longo do canal. Neste método a pressão sonora pode ser decomposta em onda incidente ( $S_{AA}$ ) e onda reflectida ( $S_{BB}$ ), respetivamente.

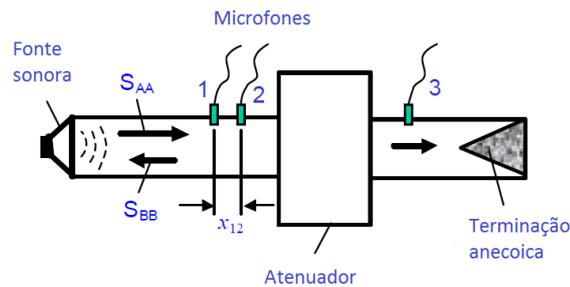


Figura 2.7 – Esquema do método da terminação anecoica (adaptado de Tao e Seybert,2003)

No entanto, este método não é de fácil execução, pois exige que a terminação seja completamente anecoica, o que não é fácil de construir. Tem ainda como desvantagens não permitir o cálculo do conjunto de parâmetros, que são necessário para obter a perda por inserção ( $TL$ ).

Por fim, o método das duas fontes, onde o principal critério é a mudança de localização da fonte.

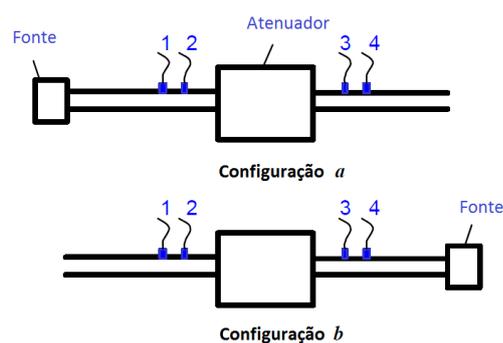


Figura 2.8 – Esquema do método das duas fontes (adaptado de Tao e Seybert,2003)

Como mostra a figura 2.8, são colocadas duas fontes em locais distintos, sendo depois usado o método da matriz de transferência, como referido por Tao e Seybert (2003). Note-se que este método pode ser utilizado com apenas dois microfones, mas com excitação aleatória.

Pode-se também determinar a perda por transmissão *in-situ*. Deve-se ter em conta que valores de perda por transmissão sonora determinados *in-situ* podem ser inferior em 5dB aos que resultam de ensaios laboratoriais (Kruse, 1975).

## 2.4 Comportamento acústico de uma divisória

Num caso mais geral, o som é transmitido por diferentes vias. Na figura 2.9 mostra quatro maneiras diferentes de transmissão da energia sonora, sendo Dd o trajeto direto e Df, Fd e Ff os trajetos por flancos (Pinto, 2011).

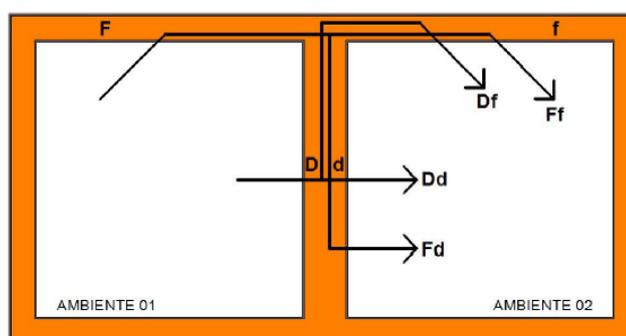


Figura 2.9 - Esquema dos caminhos de transmissão sonora entre duas salas (Pinto, 2011)

Para a correção no meio de transmissão surgem as barreiras acústicas, causando a difração das ondas. Estas variam consoante as suas características físicas e geométricas, sendo umas das soluções mais exequíveis e comuns.

A fonte emite som e este, quando atinge a barreira, é difratado, alcançando depois o recetor. Assim, é originada uma sombra acústica, como representado na figura 2.10, que é tanto maior quando maior for a altura da barreira e a frequência de onda. Pode-se concluir ainda que as frequências baixas são as menos atenuadas, em comparação com as altas frequências (Magnani, 2011).

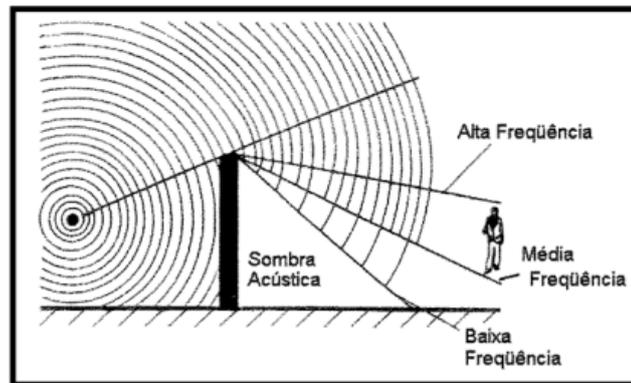


Figura 2.10 – Sombra acústica (Magnani, 2011)

Em muitas situações as divisórias existentes dentro de um espaço apresentam uma altura limitada, não se prolongando até ao teto. Assim, o seu comportamento pode aproximar-se de forma significativa de uma barreira acústica.

Este tipo de barreiras permite um aumento da distância percorrida pelas ondas sonoras nas altas frequências do espectro, ocorrendo uma dissipação de energia sonora. São, por isso, considerados elementos que permitem uma absorção sonora (Patrício, 2010).

Há vários tipos de barreiras, incorporando diferentes materiais, de diversas tipologias e para finalidades distintas.



Figura 2.11 – Barreiras acústicas de secretária (Texaa@, 2012)

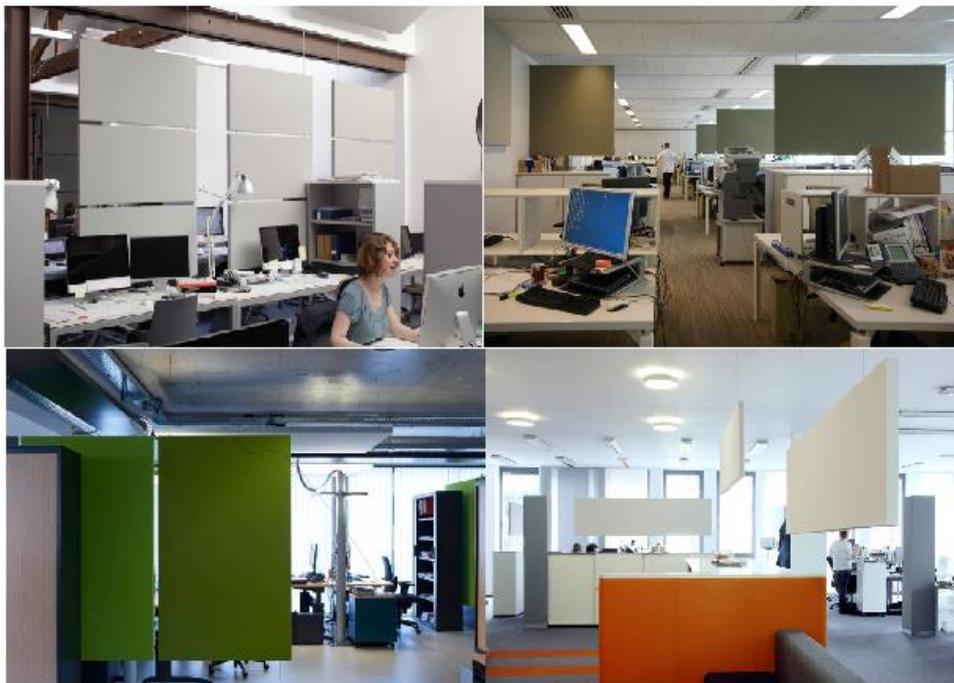


Figura 2.12 – Barreiras acústicas (Texaa@,2012)

### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

No presente capítulo são descritos os métodos normalmente usados para efetuar ensaios experimentais, os materiais e os equipamentos utilizados. Descrevem-se, em particular, os métodos de ensaio que permitem obter dois parâmetros considerados relevantes na avaliação do desempenho acústico de materiais usados em elementos divisórios: a absorção sonora ( $\alpha$ ) e a perda por transmissão sonora ( $TL$ ).

#### 3.1 Metodologia experimental

##### 3.1.1 Equipamento

O equipamento para a execução destes ensaios laboratoriais focou-se, essencialmente, na utilização do tubo de impedância, de secção circular e paredes rígidas. O tubo de impedância utilizado é da marca Brüel & Kjær, modelo 4206 de acordo com as exigências da norma ISO 10534-2. Nos testes em causa a onda gerada pela fonte sonora (altifalante) é plana.

Para a determinação do coeficiente de absorção, o tubo de impedância utilizado no âmbito deste trabalho tem uma fonte sonora e dois microfones incorporados, como podemos verificar na figura 3.1.



Figura 3.1 – Fotografia do equipamento de ensaio para a determinação do coeficiente de absorção

Além do tubo, existem equipamentos essenciais para se efetuar os ensaios pretendidos, designadamente para a obtenção e tratamento do sinal. Refira-se, neste caso:

- o amplificador da Brüel & Kjær modelo 2716C;
- o sistema de aquisição multianalisador Pulse, modelo 3039;
- um computador portátil com software de aquisição de sinal (Pulse LabShop versão 15.1.0), permitindo a monitorização dos ensaios e a recolha de dados;
- um termómetro e um barómetro.

Para a obtenção do parâmetro de perda por transmissão, é necessário, além do equipamento já descrito, uma outra parte do tubo de impedância, com dois microfones e ainda uma parte de ligação entre a já existente e esta adicional, onde se colocam as amostras a serem testadas, como se pode observar na figura 3.2.



Figura 3.2 – Fotografia do equipamento de ensaio para a determinação da perda por transmissão sonora

### 3.1.2 Descrição do método usado para obter o coeficiente de absorção ( $\alpha$ )

Para a realização do ensaio, são necessários alguns procedimentos prévios. É necessário verificar-se a precisão dos microfones usando o calibrador. Deve-se medir a temperatura e a pressão dentro do tubo de ensaio antes de qualquer ensaio, sendo que a fonte sonora (altifalante) deve estar ligada (produzindo ruído) durante pelo menos 10 minutos.

Para a preparação e montagem do provete são necessários alguns cuidados. Antes de mais, as amostras a testar devem caber perfeitamente no suporte das mesmas, não devendo existir folgas (é aconselhável o uso de plasticinas ou vaselina para as preencher), nem ser demasiado apertadas de forma a que não fiquem dobradas. Para cada amostra devem ser efetuados, no mínimo 4 ensaios, sendo que entre cada ensaio a amostra deve ser retirada e colocada no tubo de impedância.

Relativamente ao procedimento de ensaio, o método dos dois microfones (proposto pela norma ISO 10534-2), permite obter o coeficiente de absorção e depende apenas do espaçamento entre os dois microfones.

Antes de iniciar a realização do ensaio, deve-se medir e registar a distância entre a superfície da amostra e o microfone mais afastado da mesma (microfone 1), isto é, a distância ( $x_1$ ) e a distância entre os microfones 1 e 2 ( $s$ ), como se observa na figura 3.3.

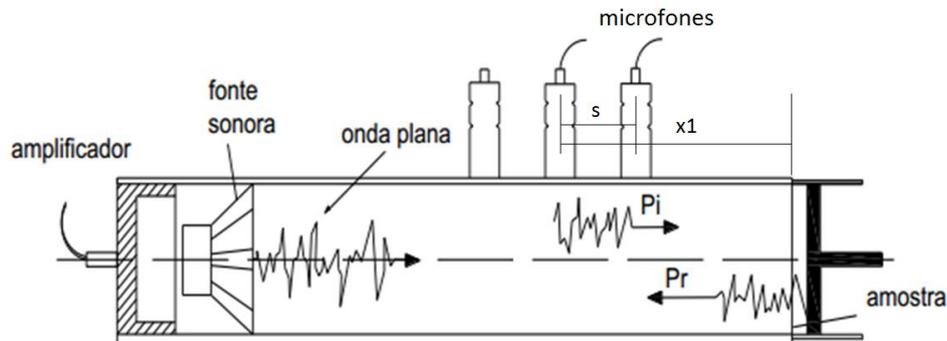


Figura 3.3 - Esquema do tubo de impedância para determinação do coeficiente de absorção (adaptado de Oliveira, 2009)

Os valores da temperatura ( $T$  em  $^{\circ}\text{C}$ ) e da pressão ( $p_a$  em  $\text{kPa}$ ) no interior do tubo, já referidos anteriormente, permitem o cálculo da velocidade do som ( $c_0$ ) e da densidade do ar ( $\rho$ ) nas condições ambiente do ensaio:

$$c_0 = 343,2\sqrt{T/293} \text{ [m/s]} \quad (3.1)$$

$$\rho = 1,186 \frac{293p_a}{101,325T} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.2)$$

Ainda antes do início do ensaio, é necessário realizar algumas verificações prévias. Deve-se garantir que o nível sonoro, com a fonte a trabalhar, é, pelo menos, 10dB superior ao nível sonoro sem a fonte a trabalhar, na gama de frequências em estudo. Deve-se também determinar o fator de calibração, permitindo assim a anulação dos erros de fase dos dois microfones. Assim, utilizando uma amostra com características sonoras absorventes, devem executar-se medições com microfones em posições invertidas e na posição correta.

Depois de tudo isto verificado, inicia-se o ensaio, colocando-se a amostra no tubo de impedância e utilizando o programa Pulse LabShop v.15.1.0. Os dados obtidos através deste programa, podem depois ser exportados e tratados em Microsoft Excel.

No caso em estudo, as amostras têm um diâmetro de 100mm, o que no tubo de impedância utilizado implica um limite de gama de frequências entre os 100Hz e os 1600Hz.

### 3.1.3 Descrição do método para obter a perda por transmissão (TL)

Para obtenção da perda por transmissão, optou-se pela utilização do método das duas cargas. Neste método é utilizada a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} 1 & p_2 \\ \frac{1}{B_{12}} & (p_1 - A_{12}p_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{23} & B_{23} \\ C_{23} & D_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{D_{34}}{B_{34}}p_3 + (C_{34} - \frac{D_{34}A_{34}}{B_{34}})p_4 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Em que  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ ,  $C_{ij}$  e  $D_{ij}$  são os quatro pólos acústicos dos elementos i-j, e as respetivas incógnitas do sistema; e  $p_i$  é a pressão sonora. Na equação 3.3 existem 4 incógnitas ( $A_{23}$ ,  $B_{23}$ ,  $C_{23}$  e  $D_{23}$ ) e só duas equações. Para se obterem duas equações adicionais, para a determinação das incógnitas, altera-se a condição da extremidade do tubo, como se pode observar na figura 3.4 (Tao e Seybert, 2003).

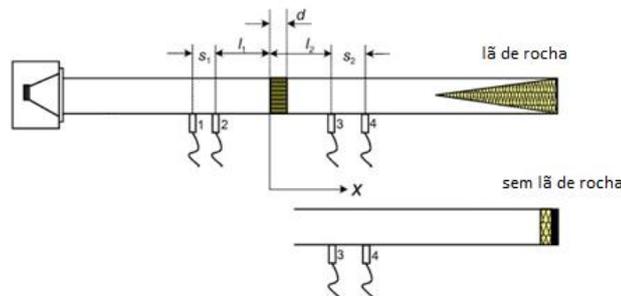


Figura 3.4 - Esquema do ensaio método das duas cargas (adaptado de Vigran, 2012)

As equações dos quatro pólos dos elementos 2-3 podem obter-se da seguinte forma (Tao e Seybert, 2003):

$$A_{23} = \frac{\Delta_{34}(H_{32a}H_{34b} - H_{32b}H_{34a}) + (H_{32b} - H_{32a})}{\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} \quad (3.4)$$

$$B_{23} = \frac{B_{34}(H_{32a} - H_{32b})}{\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} \quad (3.5)$$

$$C_{23} = \frac{(H_{31a} - A_{12}H_{32a})(\Delta_{34}H_{34b} - D_{34}) - (H_{31b} - A_{12}H_{32b})(\Delta_{34}H_{34a} - D_{34})}{B_{12}\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} \quad (3.6)$$

$$D_{23} = \frac{B_{34}(H_{31a} - H_{31b}) - A_{12}(H_{32b} - H_{32a})}{B_{12}\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} \quad (3.7)$$

Em que  $H_{ij}$  é calculado a partir da relação entre  $p_j$  e  $p_i$ , que são medidos, e  $\Delta$  é o determinante da matriz, isto é,  $\Delta = A_{23}D_{23}B_{23}C_{23}$  (Tao e Seybert, 2003).

Depois de obtidos os parâmetros dos quatro pólos, consegue-se obter a perda por transmissão, através de:

$$TL = 20 \log_{10} \left\{ \frac{1}{2} \left| A_{23} \frac{B_{23}}{\rho c} + \rho c \cdot C_{23} + D_{23} \right| \right\} + 10 \log_{10} \left( \frac{S_i}{S_0} \right) \quad (3.8)$$

onde  $TL$  é definido pelos quatro pólos e as áreas do tubo ( $S_i$  e  $S_0$ ).

Na figura 3.4, os números 1,2,3 e 4 correspondem às posições dos microfones,  $s_1$  e  $s_2$  são as distâncias entre microfones,  $l_1$  e  $l_2$  são as distâncias da amostra até ao microfone 2 e 3, respetivamente, e por fim  $d$  é a espessura da amostra. Neste método são utilizadas duas condições diferentes na terminação do tubo (duas cargas), sendo no primeiro caso usada a lã de rocha e no segundo caso o tubo é deixado fechado. Além desta configuração (um único tubo com e sem material absorvente), que foi a escolhida, pode-se também usar duas impedâncias iguais em tubos com comprimentos diferentes ou, ainda, dois diferentes atenuadores (Tao e Seybert, 2003).

Para o ensaio, inicialmente, é necessária a calibração dos microfones. Depois, deve-se ter em conta as medidas que estão representadas na figura 3.4, pois variam de amostra para amostra e são determinantes no cálculo dos dados.

No passo seguinte, depois de colocada a amostra, e de termos uma terminação (indiferente a ordem com que se testa) recorre-se ao Pulse LabShop v.15.1.0, repete-se o mesmo processo para a outra terminação. Este processo foi repetido três vezes para cada amostra, retirando a amostra entre cada um deles.

Depois de efetuado o cálculo do  $TL$  a partir dos dados medidos para as diferentes terminações, obtêm-se valores de perda por transmissão sonora que podem ser exportados para Microsoft Excel e aí tratados.

Este método é muito parecido com o método das duas fontes, no entanto, ao contrário do método dos dois compartimentos tem mais vantagens, porque não requer grandes espaços, câmaras dispendiosas e/ou amostras de grande tamanho. É, portanto, um método rápido, económico e que permite alguma mobilidade. Tem uma fácil utilização, apresenta melhores resultados, que grande parte dos outros métodos, contudo, também se verifica alguma instabilidade de resultados, visto exigir diferentes tipos de terminações (Kruse, 2008).

## 4 MODELAÇÃO

Neste presente capítulo pretende-se fazer um estudo paramétrico recorrendo a uma modelação teórica, baseada nos modelos de Delany-Bazley (1970) e Miki (1990), no âmbito da perda por transmissão sonora.

### 4.1 Descrição dos modelos

Para implementação dos modelos teóricos de previsão, foi usada a plataforma FreeMat, muito adequada à criação de protótipos científicos e processamento de dados. Com esta ferramenta pretende-se fazer uma modelação, que possibilite determinar analiticamente valores dos parâmetros abordados neste trabalho, permitindo analisar a sua variação consoante as propriedades do material. Aborda-se e estuda-se especificamente, a perda por transmissão sonora, considerando diferentes tipos de material com leis de comportamento físico diferentes.

No caso de um material sólido com uma camada, o modelo utilizado é o de um material com comportamento elástico linear. Dando um exemplo académico, explicativo do que acontece a um material com comportamento elástico, quando aplicada uma força numa mola, esta deforma-se. Assim, com o aumento dessa força há um aumento da deformação consequente. No entanto, quando retirada a força, a mola retorna à sua forma inicial, apresentando exatamente o mesmo comportamento em fase de carga e descarga (Silva, 2004).

O comportamento deste material segue, então, a lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon , \quad (4.1)$$

onde  $\sigma$  representa as tensões,  $\varepsilon$  as deformações (extensões) e  $E$  o módulo de Young (em que,  $E = \frac{F}{A} = \frac{F}{L_0} \cdot L_0 = \frac{F}{L_0} \cdot \frac{L_0}{\Delta L} = \frac{F}{\Delta L} \cdot L_0$ ), existindo, neste caso, uma proporcionalidade direta entre tensões e deformações, como se pode ver na figura 4.1 (Alva, s. d.).

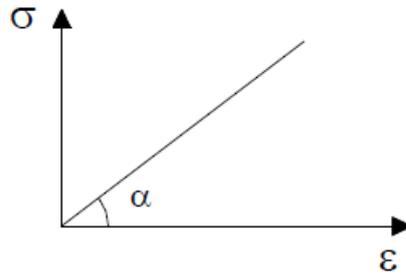


Figura 4.1 – Lei de Hooke (Alva, s. d.)

Quanto ao ar, é um fluido compressível, isto é, reduz o seu volume quando submetido a uma força. O ar é, portanto, um fluido não viscoso, ou seja, o coeficiente de viscosidade absoluta ( $\mu$ ) é igual a zero.

$$M = \frac{V}{c} \quad (4.2)$$

Sendo que  $M$  é o número de Mach;  $V$  a velocidade do fluido; e por fim o  $c$  é a velocidade do som.

No entanto, nas condições do caso em estudo o número de Mach é igual a zero por ser uma fonte estática.

A velocidade de propagação do som no meio, que depende das propriedades deste, é a velocidade à qual um estímulo acústico, caracterizado por uma determinada fase, se desloca no espaço, isto é:

$$c = \lambda \cdot f \Leftrightarrow c = \frac{\lambda}{T} \quad (4.3)$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação;  $\lambda$  a distância mínima entre dois pontos idênticos numa onda, ou seja, o comprimento de onda; e  $f$  a frequência, que é a taxa de repetição do movimento ( $f = 1/T$ ).

A frequência está relacionada com a frequência angular, em que esta é um múltiplo da frequência e define-se como sendo a taxa de variação temporal de um ângulo:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ [rad/s]} \quad (4.4)$$

O número de ondas que cabe num metro é determinado pelo número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (4.5)$$

No caso de materiais sólidos, existem vários tipos de ondas, de entre as quais as ondas P e as ondas S. As ondas P ou ondas primárias são ondas longitudinais que fazem o material vibrar paralelamente à direção da onda. A velocidade, deste tipo de ondas, varia com o meio onde se propagam, sendo sempre superior à velocidade de propagação das ondas S. Por sua vez, as ondas S ou secundárias são ondas transversais ou de corte, o que significa que o material é deslocado perpendicularmente à direção de propagação (figura 4.2). Em fluidos (gases e líquidos) apenas se propagam ondas P, uma vez que estes não suportam forças de corte (Bastos, 1993).

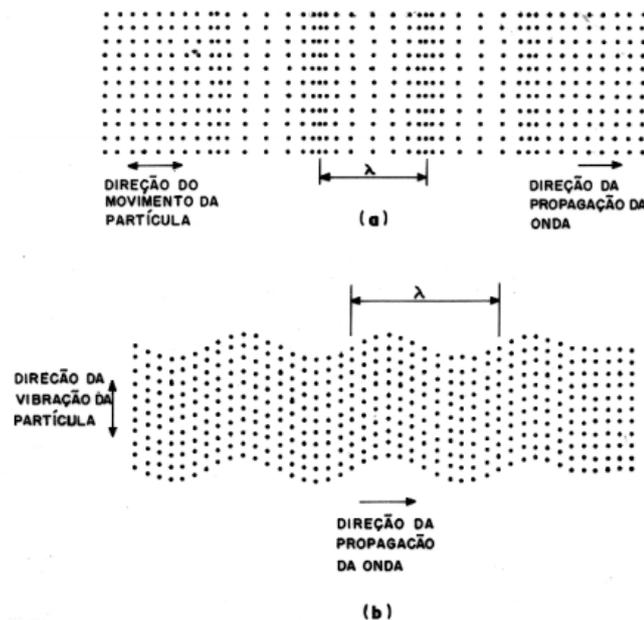


Figura 4.2 – Movimento de onda P (a) e onda S (b) (Bastos, 1993)

Foram também utilizados neste estudo materiais absorventes porosos, mais especificamente espumas. Em materiais porosos, tanto a energia de dissipação a partir da absorção como a atenuação da pressão sonora não são desprezáveis, ao contrário da maioria dos problemas de acústica. No entanto, a geometria dos poros deste tipo de materiais é demasiado complexa, o

que faz com que se tenha de utilizar uma formulação empírica simplificada em simulações acústicas.

Existem vários modelos estabelecidos para este tipo de materiais, sendo o de Delany – Bazley (1970) um dos mais representativos. Estes autores propuseram expressões empíricas para o cálculo dos valores das propriedades complexas (impedância ( $z_c$ ) e número de onda ( $k$ )), a partir de várias medições feitas em materiais fibrosos com porosidade perto de 1. Sendo as expressões propostas as seguintes (Yoon, 2013):

$$z_c = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 9.08 \left( 10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.75} - i11.9 \left( 10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.73} \right] \quad (4.6)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left[ 1 + 10.8 \left( 10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.70} - i10.3 \left( 10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.59} \right], \quad (4.7)$$

sendo  $\rho_0$  a densidade do ar,  $c_0$  a velocidade do som no ar,  $\omega$  a frequência angular ( $\omega=2\pi f$ ) e  $\sigma$  a resistividade ao fluxo do ar, na direção de propagação da onda.

Posteriormente, Miki (1990) fez modificações a este modelo e propôs novas expressões, as quais foram utilizadas na modelação teórica neste trabalho. Miki (1990) notou que no modelo de Delany-Bazley (1970), para multicamadas, a parte da superfície de impedância real tornava-se, por vezes, negativa para as baixas frequências, o que é um resultado sem significado físico. Assim, propôs as seguintes alterações ao modelo (Yoon, 2013):

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 5.50 \left( 10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} - i8.43 \left( 10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \right] \quad (4.8)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left[ 1 + 7.81 \left( 10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} - i11.41 \left( 10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right] \quad (4.9)$$

Os parâmetros usados são os mesmos, já descritos no modelo de Delany-Bazley (1970), e os dois modelos têm também em comum os limites de velocidade das expressões propostas, ou seja:

$$0.01 < \frac{f}{\sigma} < 1.00 \quad (4.10)$$

No caso particular em estudo, as ondas são planas, normais à superfície, como se representa na figura 4.3:

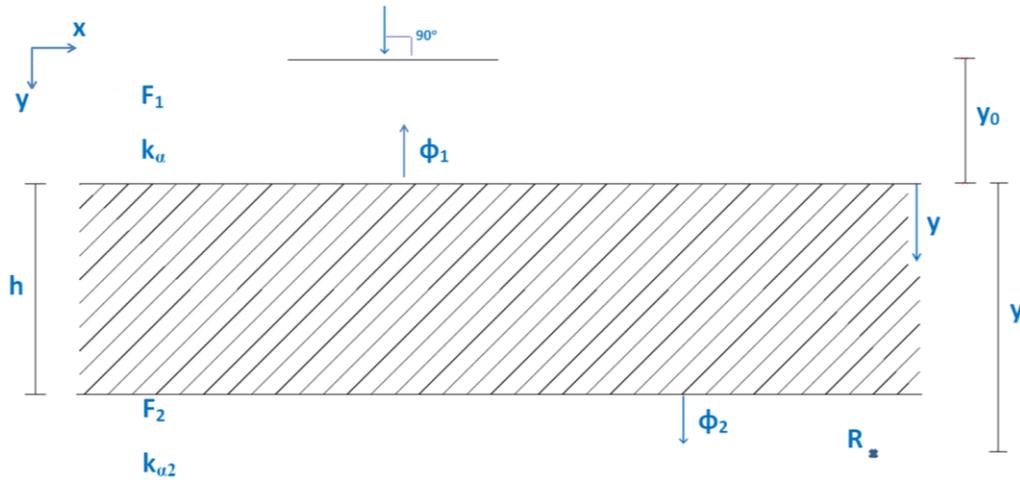


Figura 4.3 – Esquema do problema

Para esta condição, o campo de ondas sonoras incidente ( $\sigma_{full}$ ), sobre a estrutura, pode escrever-se como:

$$\sigma_{full} = \frac{e^{-i\frac{\omega}{c}|y-y_0|}}{\frac{\omega}{c}} = \frac{e^{-ik_{\alpha}|y-y_0|}}{k_{\alpha}} \quad (4.11)$$

$$\sigma_{fsup(F1)} = \sigma_{full} + \Phi_1 = \sigma_{full} + A^{sup} \frac{e^{-ik_{\alpha}|y|}}{k_{\alpha}} \quad (4.12)$$

$$\sigma_{finf(F2)} = \Phi_2 = A^{inf} \frac{e^{-ik_{\alpha 2}|y-h|}}{k_{\alpha 2}} \quad (4.13)$$

$A^{sup}$  e  $A^{inf}$  são fatores de amplitude dos potenciais, que são à partida desconhecidos e  $\Phi_1$   $\Phi_2$  são as fronteiras das duas camadas, respetivamente. Para a sua determinação, torna-se necessário estabelecer um sistema de equações, que tenham em consideração que os dois fluidos (inferior ( $F_1$ ) e superior ( $F_2$ )), e a estrutura multicamada que se pretende analisar. Para estabelecer este sistema, segue-se a metodologia descrita em Tadeu et al (2007),

estabelecendo as necessárias condições de interface entre as várias camadas do sistema. Assim, temos uma equação para tensões normais e uma equação para deslocamentos,

Numa interface fluido-sólido:

$$\sigma_f^{Fluido} = \sigma_{yy}^{Sólido} \quad (4.14)$$

$$u_y^{Fluido} = u_y^{Sólido} \quad (4.15)$$

Numa interface sólido-sólido:

$$\sigma_{yy}^{Sólido1} = \sigma_{yy}^{Sólido2} \quad (4.16)$$

$$u_y^{Sólido1} = u_y^{Sólido2} \quad (4.17)$$

Numa interface fluido-fluido:

$$\sigma_f^{Fluido1} = \sigma_f^{Fluido2} \quad (4.18)$$

$$u_y^{Fluido1} = u_y^{Fluido2} \quad (4.19)$$

Note-se, que no caso de meios fluidos, os deslocamentos ( $u$ ) envolvidos se relacionam com a pressão sonora, através de:

$$u_y = -\frac{1}{\rho\omega^2} \frac{dp}{dy} \quad (4.20)$$

No caso de meios absorventes modelados pelos modelos de Miki (1990) e Delany-Bazley(1970), esta relação deve ser tida em conta, calculando, em primeiro lugar, o número de onda complexo ( $k_\alpha^c$ ), para o meio fluido, e depois determinada uma densidade complexa, como sendo:

$$\rho^c = \frac{k_\alpha^c \times z^c}{\omega} \quad (4.21)$$

em que  $z^c$  é a impedância complexa calculada pelo mesmo modelo.

Após obtenção dos fatores de amplitude envolvidos, a perda por transmissão ( $TL$ ) pode ser calculada, por:

$$TL = -20 \log_{10} \left( \frac{|p_R|}{|p_{inc\_R}|} \right) \quad (4.22)$$

Em que  $p_R$  é a pressão acústica calculada no ponto recetor R (figura 4.3), na presença do sistema de análise; e  $p_{inc\_R}$  é a pressão incidente em condições de campo livre.

## 4.2 Sistemas analisados

Para a aplicação do modelo implementado no software FreeMat foram escolhidos alguns sistemas como se pode ver na figura 4.4:

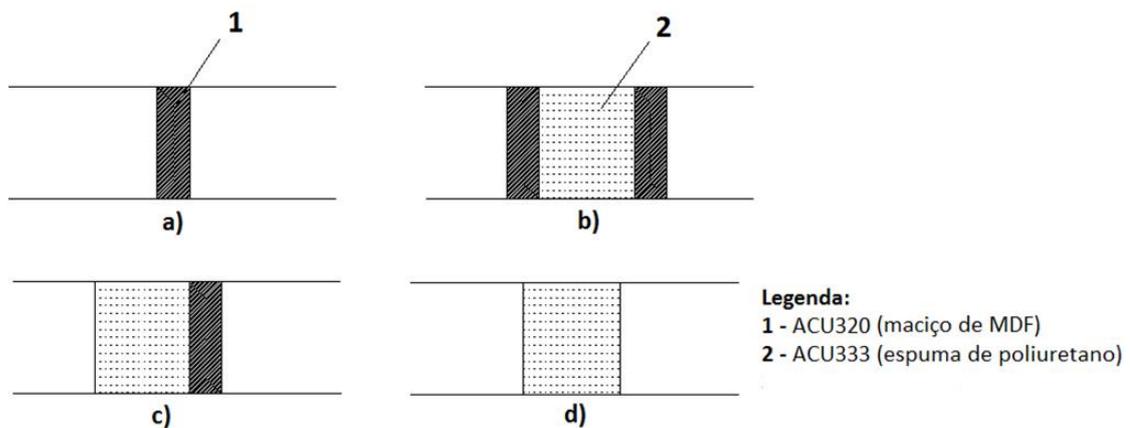


Figura 4.4 – Esquemas dos sistemas analisados

Na configuração a) existe apenas uma placa de MDF (*Medium Density Fiberboard*); na configuração b) o sistema é composto por duas placas de MDF e no meio destas encontra-se espuma de poliuretano; no c) existe apenas uma placa de MDF a espuma de poliuretano; e, por fim, no d) encontra-se apenas espuma de poliuretano.

As propriedades dos materiais utilizados nos sistemas analisados, resumem-se no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Propriedades dos materiais utilizados (adaptado Eleotério, 2000)

	Espessura [mm]	Módulo Young [GPa]	Coefficiente de Poisson	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistividade ao fluxo do ar [Ns/m <sup>4</sup> ]
ACU320 (maciço de MDF)	12	3,65	0,33	650	-
ACU333 (espuma de poliuretano)	40	-	-	35	3500

#### 4.2.1 Estudo paramétrico

Levou-se a cabo um estudo paramétrico tendo como objetivos: nomear parâmetros para avaliação; definir a faixa dos parâmetros; especificar restrições de projeto; e ainda analisar os resultados de cada variação dos parâmetros. Fez-se, então, um estudo paramétrico que se foca neste último aspeto; ou seja, alteraram-se espessuras, módulos de Young, coeficientes de Poisson, resistividade ao fluxo, densidades do material, analisando a influência que estas alterações desencadearam nos valores da perda por transmissão.

Para o sistema analisado a), constituído apenas pela placa de MDF (ACU\_320), da figura 4.5, pode-se concluir que, com o aumento, tanto da espessura, como da densidade do material, há um aumento da perda por transmissão. A espessura foi aumentada para o dobro, passando de 12mm a 24mm, e provocou um aumento de aproximadamente 6dB, no caso da densidade o valor de 650kg/m<sup>3</sup> passou para 900kg/m<sup>3</sup> que provocou um aumento de, sensivelmente, 2dB (figura 4.5). O valor de módulo de Young, inicialmente, era de 3,65GPa, à medida que o do coeficiente de Poisson era de 0,33, passando o sistema a ser testado com 6GPa e 0,66, respetivamente, verifica-se que a variação destes parâmetros, em nada afeta os valores da perda por transmissão. (figura 4.6).

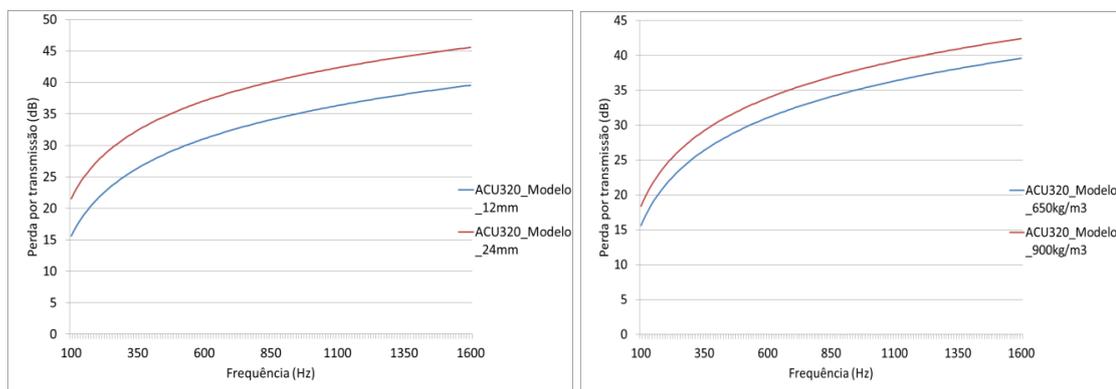


Figura 4.5 – Influência da variação espessura e da densidade do MDF nos valores de  $TL$  no sistema a)

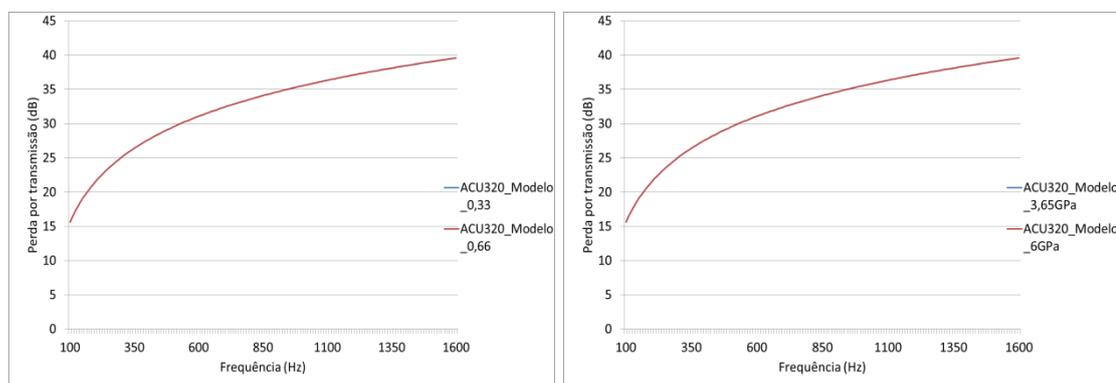


Figura 4.6 - Influência da variação do coeficiente de Poisson e do módulo de Young do MDF nos valores de  $TL$  no sistema a)

Para o sistema b), composto por duas placas de MDF (ACU\_320) e, no meio destas encontra-se, espuma de poliuretano (ACU\_333), conclui-se que a resistividade ao fluxo da espuma, praticamente não afeta os valores de perda por transmissão, quando esta é aumentada para o dobro (figura 4.7). No que se refere à variação de espessura, neste caso aumentando de 12mm para 20mm as placas de MDF e diminuindo a de espuma de 40mm para 24mm, permite um aumento destes valores de  $TL$  em, aproximadamente, 6dB. Verifica-se um aumento, também significativo, quando há um aumento da densidade das placas de MDF, de  $650\text{kg/m}^3$  para  $900\text{kg/m}^3$ . É de notar também que, na variação de espessura do MDF existe uma queda abrupta nas frequências próximas dos 100Hz, que apenas se desloca para cima com as alterações feitas à espessura do sistema, enquanto que, para a variação de densidade desloca-se não só para cima (é menos significativa que a subida da espessura), mas também para a direita (figura 4.8).

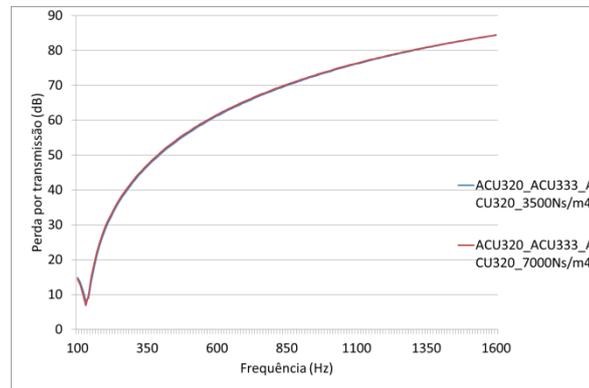


Figura 4.7 - Influência da variação da resistividade ao fluxo da espuma nos valores de  $TL$  no sistema b)

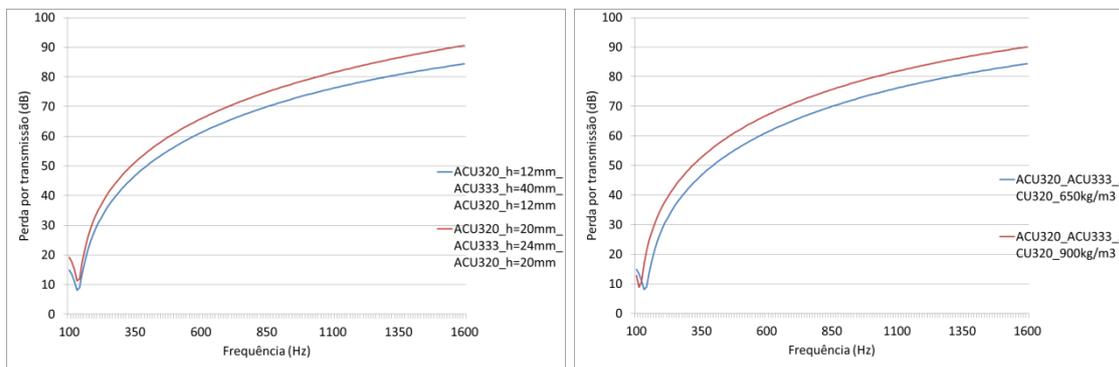


Figura 4.8 - Influência da variação da espessura do MDF e da espuma e da densidade do MDF nos valores de  $TL$  no sistema b)

Numa análise ao sistema c), espuma de poliuretano (ACU\_333) e apenas uma placa de MDF (ACU\_320), conclui-se que a alteração da espessura da placa de MDF tem uma maior influência nos valores de perda por transmissão, que a variação da espessura da espuma. Verifica-se um aumento relevante dos valores de  $TL$  na situação em que se aumenta a espessura do MDF para 24mm, já no caso de aumento da espessura da espuma para os 60mm, os valores de  $TL$  apenas aumentam, aproximadamente, 2dB (figura 4.9).

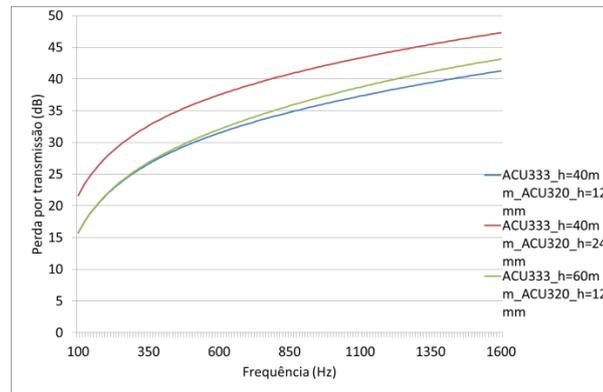


Figura 4.9 - Influência da variação das espessuras do MDF e da espuma nos valores de  $TL$  no sistema c)

Ainda no mesmo sistema, pode-se ver que com o aumento da resistividade ao fluxo da espuma e da densidade do MDF, há um aumento dos valores de  $TL$ . Contudo, o aumento mais significativo é verificado no segundo parâmetro referido, que se verifica que com a alteração da densidade de  $650\text{kg/m}^3$  para  $900\text{kg/m}^3$ , ocorre um aumento de, sensivelmente, 3dB nos valores de  $TL$ . No caso de se aumentar a resistividade ao fluxo de  $3500\text{Ns/m}^4$  para o dobro, observa-se um ligeiro aumento dos valores de  $TL$ . (figura 4.10).

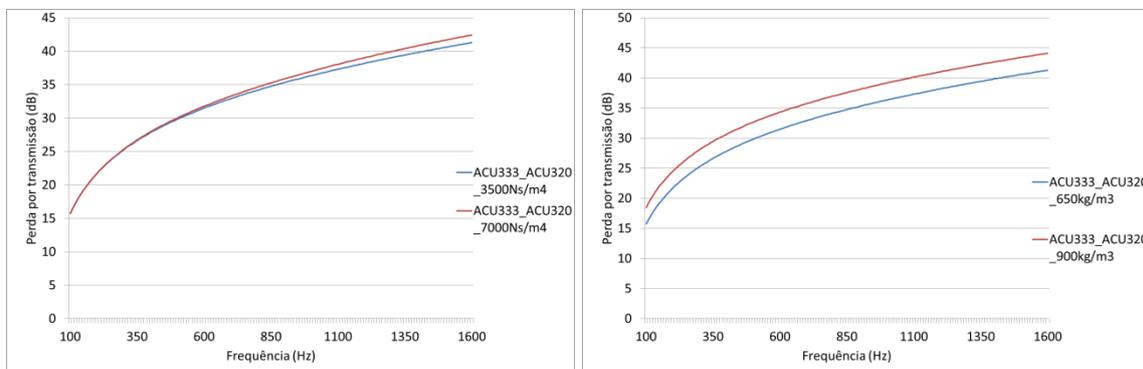


Figura 4.10 - Influência da variação da resistividade ao fluxo da espuma e da densidade do MDF nos valores de  $TL$  no sistema c)

No sistema d), composto somente por espuma de poliuretano (ACU\_333), verifica-se, tal como no sistema a), que tanto o módulo de Young como o coeficiente de Poisson não influenciam a alteração dos valores de perda por transmissão. Este sistema é o que apresenta valores de  $TL$  mais baixos, onde o valor máximo atingido aproxima-se dos 6dB. Note-se que um aumento espessura de 40mm para 80mm, aumenta os valores de  $TL$ , aproximadamente,

2,5dB. Com a alteração da resistividade ao fluxo, pode observar-se um aumento dos valores de  $TL$  entre 1 e 2dB (figura 4.11).

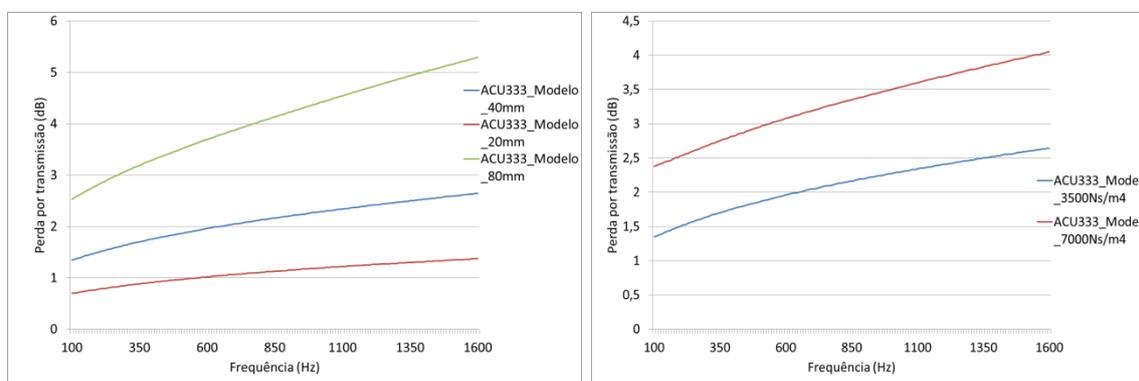


Figura 4.11 – Influência da variação da espessura e da resistividade ao fluxo da espuma nos valores de  $TL$  nos sistemas d)

Também foram comparadas as diferenças entre os sistemas analisados e materiais como fibra de vidro e lã de rocha. As propriedades destes materiais encontram-se no quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Propriedades dos materiais (adaptado de Doutres e Atalla, 2011)

	Fibra de vidro	Lã de rocha de alta densidade
Porosidade	0,99	0,97
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	5,5	133
Resistividade ao fluxo [Ns/m <sup>4</sup> ]	14000	95000

Analisando o sistema b) (2 placas de MDF com espuma no meio) e substituindo a espuma por estes dois materiais, utilizando exatamente as mesmas espessuras e as mesmas propriedades do MDF, verifica-se que a lã de rocha de alta densidade é a que proporciona melhores valores de  $TL$ , atingindo os 97dB aos 1600Hz. No caso da fibra de vidro também são atingidos bons valores de  $TL$ , no entanto, o máximo alcançado é de aproximadamente 90dB (figura 4.12).

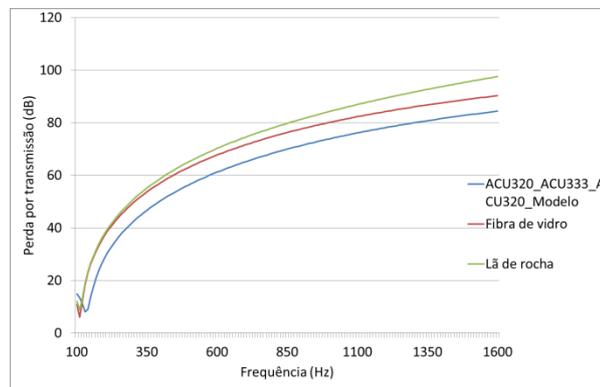


Figura 4.12 – Diferenças nos valores de  $TL$  no sistema b) e neste sistema com fibra de vidro ou lã de rocha

Analisando estes dois materiais nesta mesma configuração, sistema b), e alterando as suas espessuras, mantendo a de MDF, conclui-se que a lã de rocha é o material com melhor comportamento, e que com um aumento da sua espessura em pouco mais do dobro (de 40mm para 100mm) há um aumento próximo dos 30dB. No caso da fibra de vidro há apenas um aumento de aproximadamente 8dB nos valores de  $TL$ . No entanto, é de notar, que todos estes valores de  $TL$  são bastante significativos, chegando-se a atingir 128dB de perda por transmissão sonora na lã de rocha de 100mm (figura 4.13).

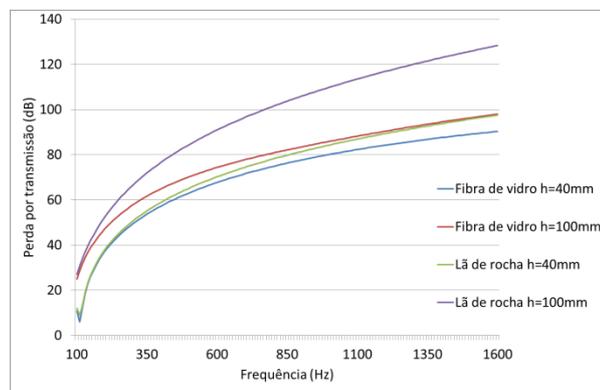


Figura 4.13 – Influência da variação da espessura da fibra de vidro e da lã de rocha no sistema b) nos valores de  $TL$

#### 4.2.2 Comparação com resultados experimentais

Para os sistemas já referidos, além da aplicação do modelo teórico, foram feitos ensaios experimentais a fim de obter valores para a perda por transmissão por esta via. Esta comparação surge antes da exposição dos resultados experimentais obtidos, para que se possa ter uma maior sensibilidade e crítica aos resultados obtidos pelos dois processos.

Assim, comparando os resultados obtidos pelo modelo teórico e experimentalmente, verifica-se que, por exemplo, no caso do sistema a) (somente a placa de MDF), apresentam curvas idênticas, contudo, apesar do modelo apresentar valores superiores, com, aproximadamente, 10dB de diferença (figura 4.14). Uma das explicações possíveis para isto se verificar, são as pequenas folgas que as amostras podem apresentar. A influência dessa folga na amostra, nos valores de  $TL$ , foi calculada através do isolamento sonoro ( $R$ ).

$$R = 10 \log \left( \frac{\sum_1^n S_i}{\sum_1^n (S_i \tau_i)} \right) = 10 \log \left( \frac{\sum_1^n S_i}{\sum_1^n \left( \frac{S_i}{10^{(R_i/10)}} \right)} \right), \quad (4.23)$$

em que  $R_i$  é o isolamento sonoro do elemento  $i$ ,  $S_i$  a área dos elementos e  $\tau_i$  o coeficiente por transmissão (Tadeu et al, 2010).

Depois de feita esta análise, observa-se que esta é uma das condicionantes dos resultados obtidos experimentalmente, justificando-se, assim, a diferença de resultados obtidos pelos dois processos. Neste sistema, foi feita uma análise para as percentagens de 0,1% e de 0,01% de folga, verificando-se, na figura 4.14, a proximidade de resultados do modelo com folga, dos obtidos experimentalmente.

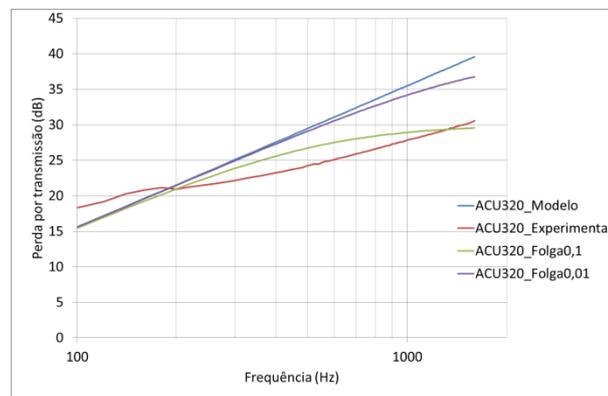


Figura 4.14 – Sistema a): Resultados em termos de  $TL$ , Modelo vs Experimental

No caso do sistema b) (composto por duas placas de MDF e, entre estas, espuma de poliuretano), na comparação com os resultados obtidos experimentalmente verificam-se valores significativamente diferentes, e como no sistema anterior, o modelo teórico apresenta valores de perda por transmissão superiores aos conseguidos experimentalmente. Mais uma vez, foi feita uma análise da possível influência de folgas de 0,01% e 0,001% nos valores de  $TL$ , em que a partir dos 400Hz a curva estabiliza, que se pode dever ao facto de existirem

duas barreiras maciças de MDF no sistema em estudo. Como se pode verificar na figura 4.15, a curva obtida experimentalmente apresenta-se irregular e com vários picos, o que pode acontecer pelas condicionantes de um ensaio experimental. Enquanto no modelo teórico se atingem valores de  $TL$  de sensivelmente 85dB, via experimental apenas se atingem valores até aos 65dB.

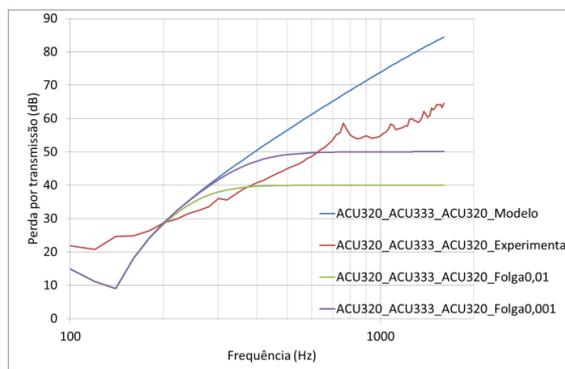


Figura 4.15 – Sistema b): Resultados em termos de  $TL$ , Modelo vs Experimental

Quanto ao sistema c) (espuma de poliuretano e uma placa de MDF), pode observar-se que o fenómeno é o mesmo dos anteriores sistemas analisados, isto é, os valores experimentais, mais uma vez, são inferiores aos valores obtidos pelo modelo teórico. Neste caso, a curva proveniente dos resultados experimentais é irregular e atinge valores de  $TL$  entre os 20 e os 28dB, à medida que o intervalo da curva do modelo teórico se situa entre os 16 e os 43dB. Também se observa uma quebra aproximadamente aos 700Hz que pode ser explicada por um efeito dinâmico, que não foi possível detetar (figura 4.16). Também aqui se tentou explicar a diferença de resultados obtidos com a influência da folga da amostra, onde se verificou que para uma folga de 0,1% se atingem valores muito próximos dos obtidos via experimental.

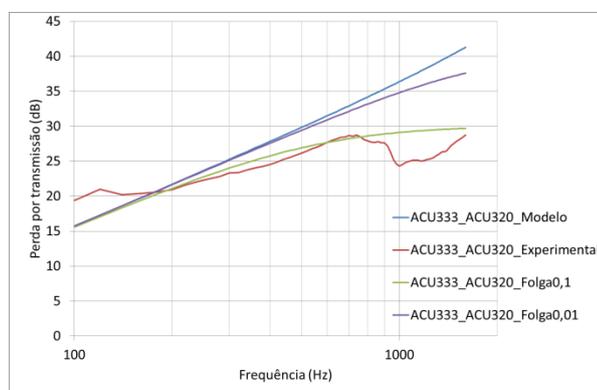


Figura 4.16 – Sistema c): Resultados em termos de  $TL$ , Modelo vs Experimental

Ao contrário do que se verificou nos restantes sistemas, com o sistema d), constituído apenas pela espuma de poliuretano, os valores experimentais de  $TL$  são superiores aos valores que se obtêm através do modelo teórico, apesar de que são resultados muito semelhantes, como se pode observar na figura 4.17. Neste sistema os valores de  $TL$  atingidos são bastante baixos, o que seria de esperar, visto tratar-se de uma análise apenas à espuma de poliuretano. O valor máximo atingido é aos 1600Hz e não ultrapassa os 3dB.

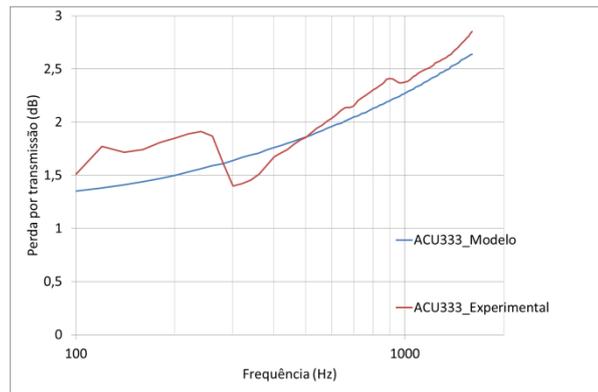


Figura 4.17 – Sistema d): Resultados em termos de  $TL$ , Modelo vs Experimental

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O trabalho experimental, realizado no presente trabalho, tem como objetivo permitir uma melhor caracterização do material em estudo. Este objetivo inicial, tem como finalidade encontrar material adequado à execução de divisórias.

### 5.1 Descrição dos materiais e sistemas ensaiados

Para os procedimentos experimentais foram utilizados diversos materiais, com o desígnio de testar o seu comportamento em relação a dois parâmetros, o coeficiente de absorção e a perda por transmissão sonora.

Um tipo de material utilizado, foram os MDF perfurados (A1, B1 e C1), em amostras de 100mm e todas com 12mm de espessura. A amostra A1 é a que apresenta uma percentagem de furação de 5,76%, enquanto a B1 e a C1 apresentam 11,52% e 18,24% respetivamente (figura 5.1). São complementadas algumas propriedades deste material no quadro 5.1.



Figura 5.1 – Amostras A1, B1 e C1, em MDF perfurado

Quadro 5.1 – Propriedades das amostras A1, B1 e C1

A1_100mm					
Espessura [mm]	Raio dos furos [mm]	Afast de furos [mm]	% de furação	Área de orifício [mm <sup>2</sup> ]	Número de Orifícios
12	4	32,5	5,76	50,3	9
B1_100mm					
Espessura [mm]	Raio dos furos [mm]	Afast de furos [mm]	% de furação	Área de orifício [mm <sup>2</sup> ]	Número de Orifícios
12	3	16	11,52	28,3	32
C1_100mm					
Espessura [mm]	Raio [mm]	Afast de furos [mm]	% de furação	Área de orifício [mm <sup>2</sup> ]	Número de Orifícios
12	2	8	18,24	12,7	114

Além das amostras perfuradas já referidas, foi testada a amostra ACU\_320. Esta amostra é de 100mm e com uma espessura de 12mm. É constituída pelo mesmo material das anteriores (MDF), no entanto, não apresenta qualquer tipo de perfuração, é uma amostra maciça (figura 5.2).



Figura 5.2 – Amostra ACU\_320, em MDF não perfurado

Ainda, em MDF, foram testadas mais quatro amostras. Contudo, estas amostras têm uma especificidade distintas das anteriores, são flocadas e incorporam espuma de diferentes espessuras. As amostras ACU\_207 e ACU\_217 são, então, ambas flocadas e em MDF perfurado (com a mesma perfuração, 11,52% de furação), o que as distingue é que a primeira apresenta uma tela e uma espuma de 3mm, enquanto a ACU\_217 não tem tela e exibe uma espuma de 5mm de espessura. No caso das amostras ACU\_161 e ACU\_162, ambas são maciças de MDF e flocadas, sendo a diferença entre elas a espessura da espuma de 3mm e

5mm, respetivamente (figura 5.3). No quadro 5.2 foram colocadas informações adicionais destas amostras.



Figura 5.3 – Amostras ACU\_207, ACU\_217, ACU\_161 e ACU\_162, em MDF, com e sem perfuração com espuma colada e flocadas

Quadro 5.2 – Propriedade de ACU\_207, ACU\_217, ACU\_161 e ACU\_162

ACU207 (flocada com tela) _100mm				
Espessura [mm]	Raio [mm]	Afast de furos [mm]	% de furação	Espessura de espuma colada [mm]
12	3	16	11,52	3
ACU217 (flocada sem tela) _100mm				
Espessura [mm]	raio [mm]	Afast de furos [mm]	% de furação	Espessura de espuma colada [mm]
12	3	16	11,52	5
ACU161 (flocada)_100mm				
Espessura [mm]	Raio [mm]	Afast de furos [mm]	% de furação	Espessura de espuma colada [mm]
12	-	-	0	3
ACU162 (flocada)_mm				
Espessura [mm]	Raio [mm]	Afast de furos [mm]	% de furação	Espessura de espuma colada [mm]
12	-	-	0	5

A amostra ACU\_344 é feita de material denominado quash branco e tem uma espessura de 52mm. O quash é um material acústico, em que de uma forma simplificada pode dizer-se que é uma espuma de polietileno, mas com características melhoradas. Note-se que uma das funções, deste material, é o controlo da vibração proveniente do movimento ou do som, isto por ser um material de células fechadas (figura 5.4).

Por sua vez, a amostra ACU\_333 é uma espuma de poliuretano com uma espessura de 40mm, onde algumas das suas características já foram referidas, anteriormente, no estudo paramétrico, realizado no capítulo da modelação. Este material além de ser utilizado para isolamento acústico, pode também ser utilizado com a finalidade de isolamento térmico. Uma das características do poliuretano é, que combinando-se as de diferentes maneiras os seus compostos, obtêm-se diferentes tipos de materiais, sendo este uma espuma flexível (figura 5.4).

Por último, foi também usado, na amostra ACU\_351 de 40mm, um material denominado de basotect. O basotect é uma espuma de células abertas feita a partir da resina de melamina (polímero termoendurecível). A sua principal característica é ser um material facilmente moldado, no entanto, é de salientar o custo elevado deste tipo de material (figura 5.4).



Figura 5.4 – Amostras de ACU\_344 (quash branco), ACU\_333 (espuma de poliuretano) e ACU\_351 (basotect)

## 5.2 Apresentação e análise dos resultados obtidos

Os resultados apresentados, tanto a nível de coeficiente de absorção, como de perda por transmissão sonora, resultam da média dos valores de quatro e três ensaios realizados em cada amostra, respetivamente.

Foram analisados diferentes materiais, com diferentes espessuras, características (perfuração, flocados, espuma incorporada, com e sem tela), descritos anteriormente, permitindo analisar os materiais que otimizem as exigências acústicas.

Nestes ensaios laboratoriais, a gama de frequências é abrangida dos 100Hz aos 1600Hz, porque foram utilizadas apenas amostras para as baixas frequências com 100mm de diâmetro.

Para a determinação experimental do coeficiente de absorção em amostras de pequena dimensão no tubo de impedância, seguiu-se a norma ISO 10534-2, usando o método dos dois microfones. No caso da determinação experimental dos valores de perda por transmissão

sonora, também utilizando o tubo de impedância, optou-se pelo método das duas cargas. Estas metodologias de ensaio foram já abordadas em capítulo anterior.

### 5.2.1 Coeficiente de absorção

Para analisar o comportamento do material, em relação ao coeficiente de absorção, começou-se por analisar a amostra A1 (MDF com 5,76% de furação) em várias situações, como se pode observar na figura 5.5. A partir da observação desta figura, pode-se concluir que a amostra isolada de A1 apresenta resultados baixos. No comportamento de A1 com uma caixa-de-ar de 5mm e 10mm notam-se dois picos aos 1250Hz e aos 1000Hz, respetivamente. Esta mesma amostra, em conjunto com o ACU\_333 (espuma de poliuretano) e com o ACU\_351 (basotect) têm resultados muito semelhantes e de alguma significância, principalmente entre os 250Hz e os 800Hz, chegando a atingir um valor próximo de 1 aos 500Hz. Pode-se verificar que também o conjunto de A1 com ACU\_344 (quash branco) tem resultados interessantes, sendo que apenas se diferenciam dos conjuntos anteriores, por a sua curva se deslocar ligeiramente para a esquerda, onde a gama de frequências abrangida é alterada para os 180Hz a 500Hz e o pico é atingido aos 315Hz.

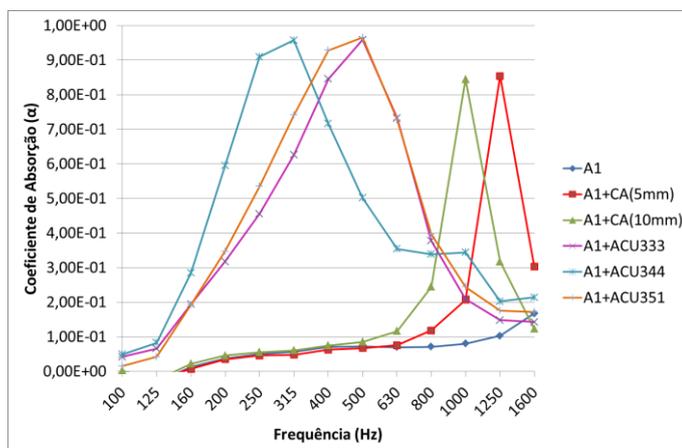


Figura 5.5 – Valores do coeficiente de absorção para a amostra A1

Fez-se o mesmo tipo de análise para a amostra B1 (MDF com 11,52% de furação). Na figura 5.6, verifica-se novamente um comportamento semelhante ao de A1 (MDF com 5,76% de furação) com ACU\_333 (espuma de poliuretano) e ACU\_351 (basotect), sendo que o primeiro conjunto apresenta valores inferiores em relação ao segundo. As caixas-de-ar, apresentam picos aos 1250Hz na de 10mm e aos 1600Hz na de 5mm. B1 com ACU\_344 apresenta valores satisfatórios entre os 200Hz e os 630Hz. Foi ainda feita uma análise da amostra B1 com ACU\_320 (maciço de MDF), que apresenta valores semelhantes à análise feita à amostra isolada.

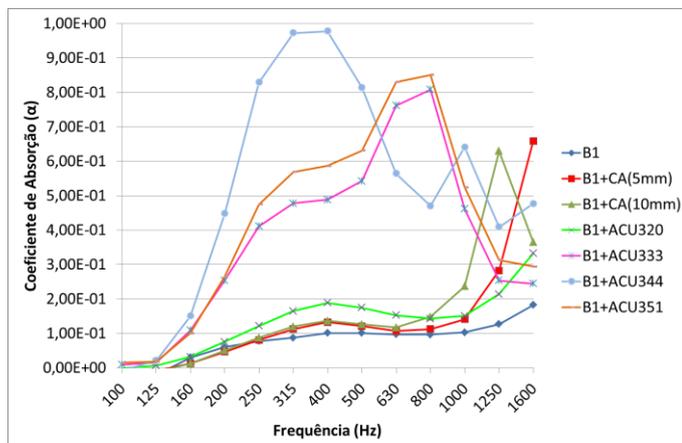


Figura 5.6 - Valores do coeficiente de absorção para a amostra B1

Na figura 5.7, os sistemas em análise são feitos com a amostra C1 (MDF com 18,24% de furação). Da análise da figura, verifica-se que, tal como acontece na amostra B1 (MDF com 11,52% de furação), C1 com ACU\_320 (maciço de MDF) comporta-se praticamente igual a C1 isolado. Mais uma vez o que se destaca com melhores valores é quando C1 associado a ACU\_344 (quash branco), que aos 400Hz fica próximo de atingir um coeficiente de absorção sonora de 1. E também, C1 com ACU\_351 (basotect) e ACU\_333 (espuma de poliuretano) se comportam de maneira semelhante, como já se verificou nas amostras anteriores, sendo que o pico se tem vindo a deslocar para valores cada vez mais à direita. Os picos provocados pelas caixas de ar, neste caso, não são visíveis para a gama de frequências abrangida.

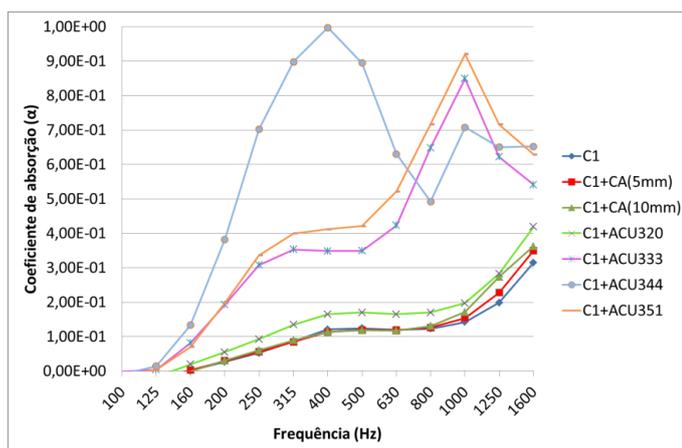


Figura 5.7 - Valores do coeficiente de absorção para a amostra C1

Quando se utiliza a amostra ACU\_207 (MDF com 11,52% de furação, espuma de 3mm e flocada) isolada, a curva apresentada na figura 5.8, detém uma subida gradual dos valores de

coeficiente de absorção com o aumento das frequências. Em conjunto com caixas-de-ar de 5 e 10mm, a amostra tem um pico de absorção no intervalo de 250Hz a 500Hz, onde o valor mais alto é atingido na caixa-de-ar de 10mm, de valor de 0,4. A amostra associada a ACU\_333 (espuma de poliuretano) e a ACU\_351 (basotect) apresentam um comportamento semelhante, e mesmo a ACU\_344 (quash branco) tem uma curva muito próxima, apenas não atinge valores tão elevados. Com exceção da amostra isolada, todas as outras curvas evidenciam uma quebra entre os 630Hz e os 1250Hz (figura 5.8).

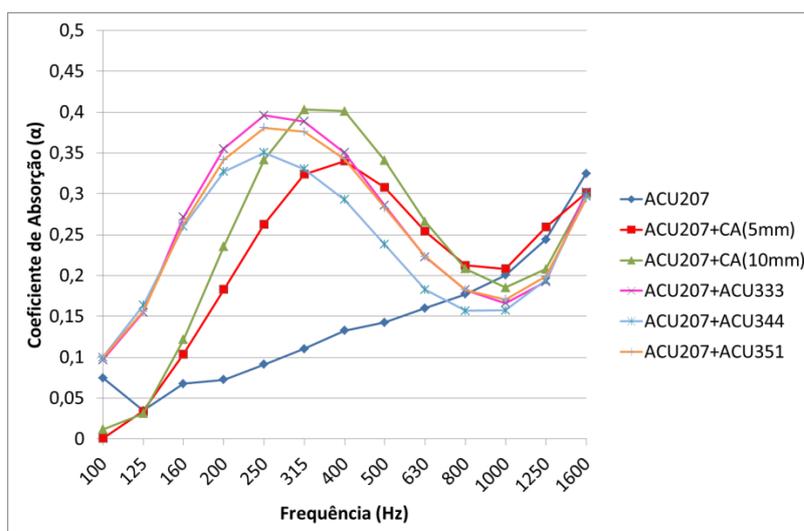


Figura 5.8 - Valores do coeficiente de absorção para a amostra ACU\_207

Para a amostra ACU\_217 (MDF com 11,52% de furação, espuma de 5mm e flocada) observa-se uma relevante semelhança com a amostra anteriormente analisada, porque a diferença entre as duas é apenas a espessura da espuma, que difere 2mm uma da outra. Era, portanto expectável atingirem-se valores idênticos, o que se pode observar na figura 5.9, em comparação com a figura 5.8, é que os valores de coeficiente de absorção atingidos são ligeiramente superiores. Esta amostra em conjunto com o ACU\_351 (basotect) atinge valores perto dos 0,5dB, que são valores a ter em conta quando se fala do coeficiente de absorção.

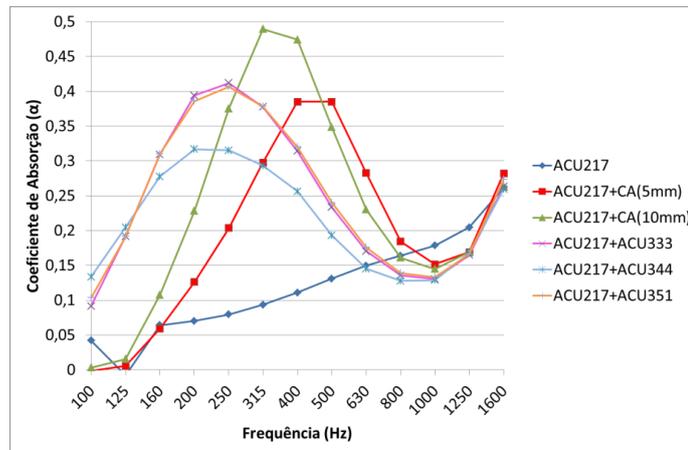


Figura 5.9 - Valores do coeficiente de absorção para a amostra ACU\_217

As três amostras, ACU\_161, ACU\_162 e ACU\_320, são maciças de MDF, sem qualquer tipo de perfuração, contudo, as duas primeiras amostras são flocadas e providas de espuma de 3 e 5mm, respetivamente. Pelo facto de serem amostras maciças, apenas se efetuaram ensaios à amostra isola, sem outro tipo de material ou caixa-de-ar. Como se pode observar dos resultados obtidos na figura 5.10, estas amostras trabalhando isoladas não têm resultados muito relevantes para baixas frequências, notando-se que a partir dos 630Hz cada uma das amostras tem um desempenho distinto, mas em crescente, sendo a amostra de MDF flocada com espuma de 3mm (ACU\_161) a que evidencia um melhor desempenho.

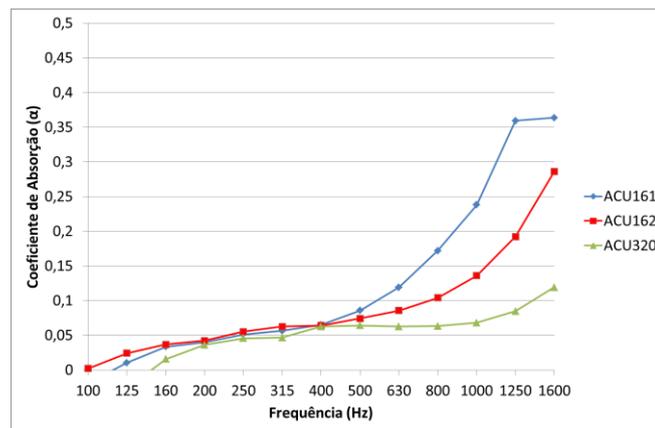


Figura 5.10 - Valores do coeficiente de absorção para as amostras ACU\_161 e ACU\_162 e ACU\_320

### 5.2.2 Perda por transmissão sonora

Na determinação dos valores da perda por transmissão sonora através do método das duas cargas, começou-se por analisar a amostra A1 (MDF com 5,76% de furação) associada a diferentes materiais (figura 5.11). A pequena diferença de usar os orifícios desencontrados (A1\_A1\_Desalinhado) permite obter resultados consideravelmente, melhores do que na situação em que os orifícios se encontram alinhados (A1\_A1\_Alinhado), sendo esta diferença na ordem dos 10dB. Observa-se um pico nos 1100Hz, quando a amostra é associada a ACU\_344 (quash branco), atingindo valores de 60dB para  $TL$ . Os restantes sistemas variam os valores de  $TL$  de 5dB a 30dB, sendo que em todos se denota uma subida na curva com o aumento da frequência, exceto o que utiliza ACU\_320 (MDF maciço) que a partir dos 850Hz tem uma quebra, que pode ser explicada por um modo de vibração ou um outro fenómeno dinâmico.

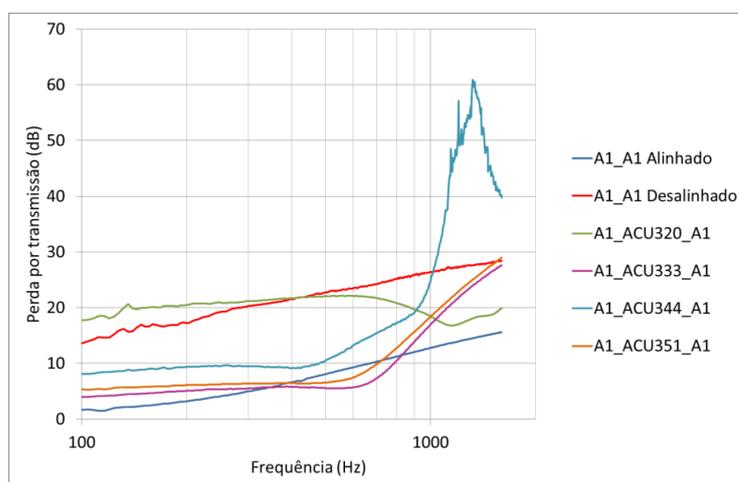


Figura 5.11 – Valores de perda por transmissão sonora para a amostra A1

Tal como acontece com a amostra A1 (MDF com 5,76% de furação), algo muito parecido se passa com a amostra B1 (MDF com 11,52% de furação), como se pode verificar na figura 5.12. Contudo, é de salientar que os valores máximos de perda por transmissão sonora diminuem, passando a atingir-se um máximo de, aproximadamente, 43dB. Verifica-se uma deslocação para a direita das curvas em relação à amostra anterior, que se deve ao aumento da percentagem de furação existente na amostra.

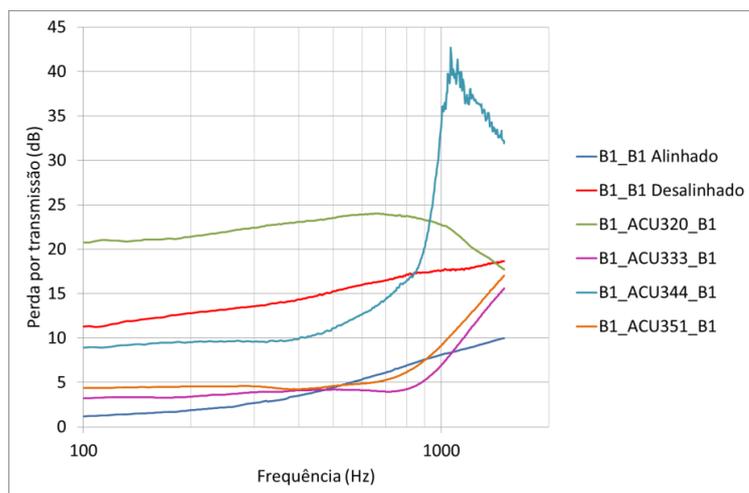


Figura 5.12 - Valores de perda por transmissão sonora para a amostra B1

O comportamento da amostra, C1 (MDF com 18,24% de furação), vem concordar com o que já foi analisado anteriormente. Nesta amostra, C1, há um aumento da percentagem da furação, em comparação com as amostras anteriores. Mais uma vez esse aumento implica um deslocamento das curvas para a direita, como se observa na figura 5.13.

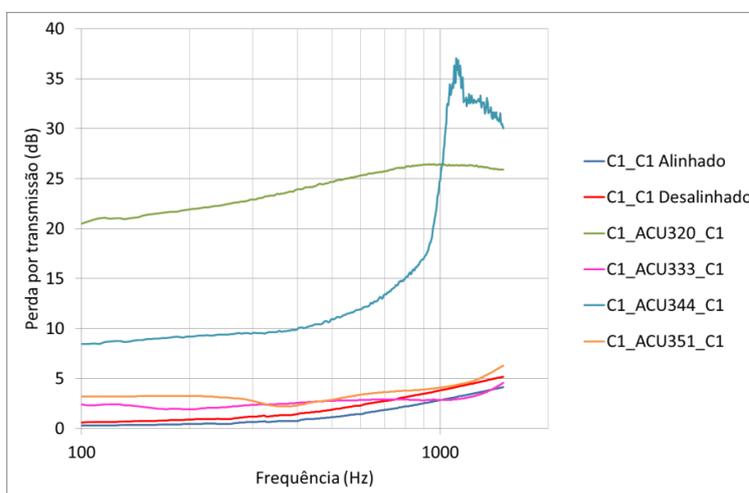


Figura 5.13 - Valores de perda por transmissão sonora para a amostra C1

Analisaram-se as amostras maciças ACU\_161 e ACU\_162 (maciças de MDF floçadas com espuma de 3 e 5mm, respetivamente) e o comportamento destas amostras isoladas apresenta resultados satisfatórios, valores de  $TL$  sempre próximos de 40dB. Com a adição de uma placa maciça de MDF (ACU\_320), os resultados melhoram levemente a partir dos 550Hz. Quando às amostras em estudo são adicionados ACU\_333 (espuma de poliuretano), ACU\_344 (quash

branco) e ACU\_351 (basotect), há um aumento significativo dos valores de  $TL$  obtidos. Em todos estes sistemas os valores de  $TL$  obtidos variam entre 48dB e 72dB, o que são valores consideravelmente altos. Na figura 5.14 pode reparar-se que as curvas são, praticamente, constantes nos sistemas das amostras isoladas e destas com a placa maciça de MDF, e que apesar de nos outros sistemas existirem muitos picos e quedas, os valores acabam por ser sempre muito próximos.

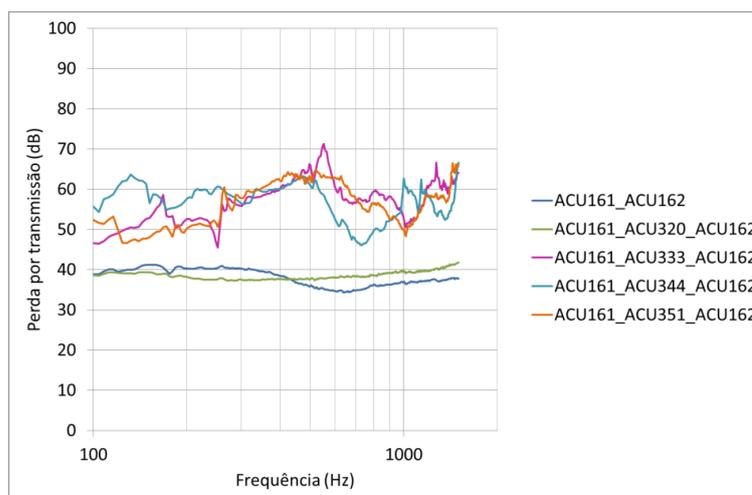


Figura 5.14 - Valores de perda por transmissão sonora para a amostra ACU\_161 e ACU\_162

Estas amostras, ACU\_207 e ACU\_217 (MDF com 11,52% de furação, flocadas com espuma de 3 e 5mm, respetivamente) apresentam valores de  $TL$  inferiores às amostras anteriores, no entanto, são valores a ter em conta. Para as amostras isoladas, consegue-se atingir valores perto dos 40dB aos 1600Hz, notando-se que a curva está em subida. No caso de se acrescentar a estas duas amostras uma placa maciça de MDF (ACU\_320), ocorre um aumento considerável dos valores de  $TL$ , sendo esse aumento de, aproximadamente, 6dB. Nos sistemas em que a estas duas amostras são adicionados ACU\_333 (espuma de poliuretano), ACU\_344 (quash branco) e ACU\_351 (basotect), verifica-se que o sistema que atinge valores mais baixos é o quash branco, no entanto, continuam a ser valores de alguma relevância, situam-se entre os 40dB e os 50dB. Verifica-se ainda, na figura 5.15, que em todas as curvas, há uma subida dos valores de  $TL$  com o aumento das frequências.

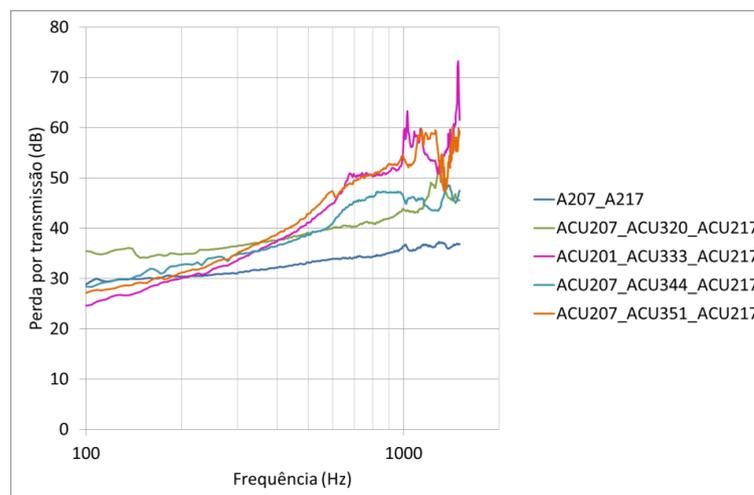


Figura 5.15 - Valores de perda por transmissão sonora para a amostra ACU\_207 e ACU\_217

### 5.3 Discussão de resultados

Os resultados obtidos experimentalmente têm sempre algumas condicionantes. No caso em particular de ensaios feitos no tubo de impedância, as amostras utilizadas são de pequenas dimensões, o que implica que os resultados não sejam tão fidedignos. O facto de as ondas emitidas pelo fonte, no tubo de impedância, serem apenas ondas planas pode condicionar a absorção nas baixas frequências.

As amostras colocadas no tubo de impedância devem ter o tamanho ideal, o que nem sempre acontece. Por vezes, a amostra é apertada ou encontra-se com uma pequena folga, que pode influenciar os resultados. A mínima folga das amostras permite a existência de espaços vazios, existindo o risco de ressonância. No caso da amostra estar apertada, a sua colocação, além de mais difícil, pode não possibilitar a posição perpendicular ao eixo do tubo, o que irá deformar a amostra e por conseguinte uma incorreta incidência das ondas sonoras na mesma.

Da análise dos resultados obtidos para o coeficiente de absorção, permite concluir-se que quanto menor for uma caixa-de-ar, mais o pico de absorção da amostra se desloca para a direita, isto é, o pico dá-se em frequências mais elevadas. Ainda em relação às caixas-de-ar, na comparação do comportamento de amostras com a mesma percentagem de perfuração (11,52%), distinguindo-se apenas por uma ser, apenas, MDF e outra ser MDF flocada com espuma colada, observou-se, que para a gama de frequência em estudo (100Hz a 1600Hz), as amostras flocadas e com espuma colada apresentam resultados mais estáveis nestas frequências no entanto mais baixos que os resultados obtidos para a amostra com apenas o MDF perfurado.

Em relação à perfuração das amostras, tanto no coeficiente de absorção, como na perda por transmissão sonora, notou-se que com o aumento da percentagem de furação das amostras, os possíveis picos ocorrem em frequências mais elevadas, sendo que esta conclusão influencia todos os sistemas testados.

Para o coeficiente de absorção, nas amostras perfuradas, flocadas e com espuma, associadas aos diversos materiais testados, apresentam uma quebra nos resultados aos 630Hz, no entanto, aos 1250Hz já se evidencia uma subida dos valores, podendo sugerir que continuam a aumentar para frequências mais altas. Estas amostras atingem valores para o coeficiente de absorção na ordem dos 0,5, o que já são valores de alguma relevância.

No estudo da perda por transmissão sonora, nas amostras de MDF perfuradas associadas ao quash branco, para as frequências próximas de 1000Hz existe sempre um pico dos valores de  $TL$ , que possivelmente, a partir dessa frequência, estabiliza esses mesmos valores.

Os resultados obtidos pelas amostras maciças flocadas e com espuma colada, atingiram os 70dB, apresentando os melhores resultados de todas as amostras. Estes resultados eram expectáveis, visto tratar-se de amostras de elementos totalmente fechados. No entanto, deve referir-se que as amostras também flocadas e com espuma colada, mas perfuradas atingiram resultados muito satisfatórios, apesar de ligeiramente inferiores às amostras maciças.

Um outro sistema com valores aceitáveis de  $TL$  foi a amostra de MDF com 18,24% de furação associada à placa maciça de MDF, que varia os valores entre 20 e 33dB.

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusão

Neste trabalho pretendeu-se contribuir para um maior conhecimento do comportamento de determinados materiais utilizados no contexto das divisórias de *open spaces*, em relação à sua absorção e transmissão sonoras.

Inicialmente, realizou-se uma revisão do conhecimento no que respeita à acústica de espaços de trabalho como estes. A pesquisa foi feita sobre estudos e inquéritos, que visavam entender os ruídos que incomodam o desempenho no trabalho e o grau de satisfação dos utilizadores destes espaços. Estudou-se, ainda na temática dos *open spaces*, os parâmetros relativos ao comportamento acústico do espaço: tempo de reverberação, índice de privacidade, índice de transmissão da fala, índice de inteligibilidade e, por fim, claridade. Além das características do espaço em si, foram também abordados conceitos teóricos relativos aos parâmetros que influenciam o desempenho dos materiais utilizados, para proporcionar um conforto acústico adequado.

Depois de executado o trabalho de pesquisa inicial, fez-se um estudo através de ensaios laboratoriais, onde foi utilizado o tubo de impedância. Como complemento da componente experimental, elaborou-se um estudo paramétrico através de uma modelação teórica. Deste modo, foi possível adquirir um olhar crítico sobre os resultados obtidos em laboratório.

Os materiais escolhidos para a elaboração dos ensaios experimentais tiveram como base placas de MDF, com diferenças nas perfurações dos mesmos, com e sem espumas coladas que por sua vez poderiam estar ou não floçadas. Além de testar este material, achou-se necessário, para um estudo mais abrangente, adicionar materiais absorventes, tais como a espuma de poliuretano, o basotect e o quash, avaliando, assim, a absorção sonora e a perda por transmissão sonora destes materiais.

Através de um modelo teórico, baseado em Delany-Bazley (1970) e Miki (1990), foi realizado um estudo paramétrico sobre o comportamento destes materiais no que respeita à perda por transmissão. Este estudo teve como finalidade analisar de que modo os diferentes parâmetros do material a ser testado condicionam os valores obtidos para a perda por transmissão sonora.

Os parâmetros analisados neste estudo paramétrico focaram-se no: módulo de Young, coeficiente de Poisson, espessura, densidade e resistividade ao fluxo de ar.

Deste estudo paramétrico, conclui-se que a alteração do módulo de Young e o coeficiente de Poisson dos materiais compostos por MDF, não modificam o comportamento da curva de perda por transmissão. Quando há alteração à resistividade ao fluxo da espuma, em sistemas que sejam compostos por MDF e espuma de poliuretano, a influência que tem nos valores de  $TL$  é pouco significativa. No sistema composto unicamente por espuma de poliuretano, os resultados aumentam aproximadamente 1dB com a alteração da resistividade ao fluxo de ar de  $3500\text{Ns/m}^4$  para  $7000\text{Ns/m}^4$ . Observou-se que a influência da alteração da espessura das placas de MDF era mais relevante (um aumento de, aproximadamente, 6dB nos valores de  $TL$ ), que a alteração da espessura da espuma de poliuretano (atinge pouco mais de 2dB de diferença nos valores de  $TL$ ). Em relação à variação da densidade do MDF, obtém-se resultados superiores perto dos 5dB, quando se aumenta a densidade de  $650\text{kg/m}^3$  para  $900\text{kg/m}^3$ .

Nos ensaios laboratoriais, uma das conclusões retiradas é que a perfuração influencia os resultados, isto é, quanto maior for a percentagem de perfuração das amostras, mais os picos se observam em frequências mais altas (deslocando os picos para a direita). No caso das caixas-de-ar, quanto maiores estas forem, mais para a esquerda se deslocam os picos observados, ou seja, os picos são atingidos em frequências mais baixas.

Analisando o coeficiente de absorção em amostras com a mesma perfuração, mas com e sem flocagem, conclui-se que as amostras flocadas apresentaram resultados mais baixos que as não flocadas, sendo os valores perto de 0,4 e 1, respetivamente. Em relação ao material utilizado, os sistemas, que incluíam o basotect, obtiveram sempre resultados muito próximos dos que incluíam espuma de poliuretano, e deve-se ter em conta que o basotect é um material de custo elevado.

Em relação à perda por transmissão sonora, os ensaios concretizados possibilitaram a verificação de uma quebra dos valores de  $TL$ , no sistema composto pelas amostras perfuradas de MDF associadas à placa maciça de MDF, que pode ser provocado por um fenómeno dinâmico. Essa quebra acontece em frequências mais altas com o aumento de perfuração das amostras de MDF. Os elementos totalmente fechados, flocados e com espuma colada, foram os que, previsivelmente, obtiveram resultados para  $TL$  mais elevados, chegando a atingir valores de 70dB. O quash associado a amostras perfuradas demonstrou sempre que, nos 1000Hz, existia uma ressonância, que provoca um pico nos valores de  $TL$ , parecendo que em frequências mais altas há a possibilidade de estabilização dos mesmos. Os resultados obtidos

pelas amostras perfuradas, flocadas e com espuma colada são de alguma relevância, pois são atingidos valores na ordem dos 30dB.

Os resultados obtidos pelas amostras flocadas apresentam bons resultados, ostentando não só potencial para um estudo mais aprofundado, com revisão do design dos elementos divisórios, como para uma futura aplicação prática, melhorando, assim, as características acústicas do espaço.

## **6.2 Trabalhos futuros**

Em trabalhos futuros poderá vir a ser interessante a utilização do método dos dois compartimentos, ou seja, estudar-se a perda por transmissão em grande escala.

Na continuidade do presente trabalho, deverá fazer-se um estudo abrangendo frequências mais elevadas, também em tubo de impedância.

Além dos coeficientes de absorção e de perda por transmissão sonora, seria interessante, também através do tubo de impedância, a determinação da impedância acústica, visto que é um outro parâmetro utilizado na caracterização de materiais com finalidades acústicas.

Na vertente dos parâmetros de caracterização do espaço, em termos de qualidade acústica, também seria interessante desenvolver um estudo que incluísse os mesmos.

Também seria importante proceder a uma avaliação do efeito das divisórias enquanto barreiras acústicas presentes no interior de espaços fechados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Referências bibliográficas citadas

Amstrong@(2012)<http://www.armstrongbrasil.com.br/commclgam/latam1/pt/br/glossario.html>.

Alva, G. (s. d.). "Comportamento dos Materiais e das Estruturas". Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

Andersson, N., Chigot, P. (2004). "Is the privacy index a good indicator for acoustic comfort in an open plan area". The 33<sup>rd</sup> International Congress and Exposition on Noise Central Engineering, Prague – Czech Republic.

Bastos, A. (1993). "Velocidade de onda compressão e cisalhantes como indicadores de litologia e tipo de fluido contido em rochas porosas". Tese de Mestrado, Universidade do Pára, Brasil.

Delany, M., Bazley, Z. (1970). "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Applied Acoustics* 3, pp. 105-116.

Doutres, O., Atalla, N. (2011). "Experimental estimation of the transmission loss contributions of a sound package placed in a double wall structure". *Applied Acoustics* 72, pp. 372-379.

Ecophon@(2012). <http://www.ecophon.com/en/Contact/Download-our-brochures-here/>. Ecophon, Saint Gobain, Hyllinge.

Eleotério, J. (2000). "Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidade e teores de resina". Tese de Mestrado, Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Universidade de São Paulo.

Jesen, K., Arens, E. (2005). "Acoustical quality in office workstations, as assessed by occupants surveys". *Proceedings: Indoor Air 2005*, pp. 2401-2405.

Jordão, A. (2011). "Análise experimental paramétrica do desempenho acústico de painéis perfurados". Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Kruse, H. (2008). "In-situ measurement of ground impedances". Tese de Doutorado, Faculdade de Matemática e Ciências Naturais, Universidade de Oldenburg.

- Larm, P., Keränen, J., Helenius, R., Hakala, J., Hongisto, V. (2005). "Acoustics in open-plan offices – A laboratory study". Forum Acusticum, Budapest – Hungary, pp. 2021-2025.
- Mateus, D. (2008). "Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Magnani, F. (2011). "Estudo da atenuação de ruídos por barreiras acústicas situadas em espaços fechados". Tese de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil.
- Miki, Y., (1990). "Acoustical properties of porous materials – modifications of Delany-Bazley models". J. Acoust. Soc. Jpn (E), 11(1), pp. 19-24.
- Nilson, E., Hellström, B. (2010). "Room Acoustic Design in Open-Plan Offices". 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon.
- Norma Internacional - ISO 10534-2:1998 – "Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes" – International Organization for Standardization (ISO).
- O'Neill, M. (2008). "Open Plan and Enclosed Private Offices". Knoll, Inc.
- Oliveira, P. (2009). "Desenvolvimento e caracterização acústica de elementos autoportantes para absorção sonora em espaços tipo open space". Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Pan, N., Chan, M. (2007). "Study on noise perception and distraction in office". International Association of Societies of Design Research, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
- Parreira, R. (2008). "Painéis acústicos perfurados em madeira: estudo e avaliação experimental de soluções". Tese de Mestrado, Insituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Patrício, J.(2010). "Acústica nos edifícios". 6ª Edição, Verlag Dashöfer.
- Paulino, N. (2008). "Condicionamento acústico de espaços – estudo do auditório Laginha Serafim". Tese Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Pinto, R. (2011). "Determinação experimental e numérica da redução sonora aérea em paredes de alvenaria utilizadas em habitações". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

RRAE – “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios”, aprovado pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 09/06.

Silva, V. (2004). “Mecânica e Resistência dos Materiais”. Coimbra, Portugal.

Sykes, D. (2004). “Productivity: How Acoustics Affect Worker’s Performance in Offices & Open Areas”.

Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Mendes, P. (2010). “Acústica Aplicada”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Tadeu, A., Pereira, A., Godinho, L., António, J. (2007). “Prediction of airborne sound and multilayer systems using analytical expression”. *Applied Acoustics* 68, pp. 17-42.

Tao, Z., Seybert, A. (2003). “A review of current techniques for measuring muffler transmission loss”. Society of Automotive Engineers, Inc.

Vigran, T. (2012). “Normal incidence sound transmission loss in impedance tube – Measurement and prediction methods using perforated plates”. *Applied Acoustics* 73, pp. 454-459.

Wang, C., Bradley, J. (2002). “Prediction of speech intelligibility index behind a single screen in an open plan office”, *Applied Acoustics*, Vol. 63, issue 8, pp. 867-883.

Wang, T., Sokolinsky, V., Rajaram, S., Nutt, S. (2005). “Assessment of sandwich models for the prediction of sound transmission loss in unidirectional sandwich panels”. *Applied Acoustics* 66, pp. 245-262.

Wikipédia@ (2012). [http://en.wikipedia.org/wiki/Open-space\\_technology](http://en.wikipedia.org/wiki/Open-space_technology)

Yoon, G. (2013). “Acoustic topology optimization of fibrous material with Delany-Bazley empirical material formulation”. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, issue 5, pp. 1172-1187.

Yousefzadeh, B., Mahjoob, M., Mohammadi, N., Shahsavari, A. (2008). “An experimental study of sound transmission loss (STL) measurement techniques using and impedance tube”. *Acoustics’08*, Paris.

### **Referências bibliográficas consultadas**

Aygun, H., Attenborough, K. (2008). “The insertion loss of perforated porous plates in a duct without and with mean air flow”. *Applied Acoustics* 69, pp. 506-513.

- Barnard, A., Rao, M. (2004). "Measurement of Sound Transmission Loss Using a Modified Four Microphone Impedance Tube". Noise-Con 2004, Baltimore – Maryland.
- Carvalho, A., Oliveira, P. (2009). "Divisórias autoportantes de desempenho acústico otimizado". TecniAcustica, Cádiz.
- Desarnaulds, V. (2007). "Acoustics of a very large open-plan learning center of the Swiss Institute of Technology in Lausanne (EPFL)". Inter-Noise 2007, Istanbul – Turkey.
- Galante, R. (2010). "Análise comparativa de métodos normalizados de previsão de transmissão sonora por via estrutural". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- García, M., Silo, D. (Sem data). "Practica de progacion del sonido".
- Ho, k., Yang, Z., Zhang, X., Sheng, P. (2005). "Measurements of sound transmission through panels of locally resonant materials between impedance tubes". Applied Acoustics 66, pp. 751-765.
- Hongisto, V., Virjonen, P., Keränen, J. (2007). "Determination of Acoustic Conditions in Open Offices and Sugestions for Acoustics Classification". International Congress on Acoustics, Madrid.
- Ismail, A., Putra, A., Ayob, MD. (2001). "Sound transmission loss of a double-leaf solid-microperforated partition under normal incidence of acoustic loading". IIUM Engineering Journal, Special Issue, Mechanical Enginnering, pp. 162-174.
- Jack, B., Evans, PE. (2009). "Acoustical Corrections Case-Study for Open and Closed Offices". The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration, Kraków.
- Jung, S., Kim, Y., Lee, Y., Cho, S., Lee, J. (2008). "Measurement of sound transmission loss by using impedance tubes". Journal of Korean Physical Society, Vol. 53, No.2, pp. 596-600.
- Keränen, J., Virjonen, P., Elorza, D., Hongisto, V. (2008). "Design of room acoustics for open offices". SJWEH Suppl 2008, (4), pp. 46-49.
- Lamounier, M. (2008). "Critérios para seleção de materiais acústicos utilizados em recintos fechados para diferentes tipologias". Tese de Mestrado, REDEMAT, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Brasil.
- Lee, C., Xu, Y. (2009). "A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials". Journal of sound and Vibration, 326, pp. 290-301.
- Liu, J., Herrin, D. (2008). "A simplified two-load method for measuring source impedance". Noise-Con 2008, Dearborn – Michigan.

Mu, R., Toyoda, M., Takahashi, D. (2011). "Sound insulation characteristics of multi-layer structures with a microperforated panel". *Applied Acoustics* 72, pp. 849-855.

Murray, B. (1995). "Notes on Office Acoustics". *Acoustics Australia*, Vol. 23, No. 3, pp. 105-107.

Patraquim, R., Patrício, J. (2008). "Modelação do comportamento acústico de painéis perfurados em madeira". *Acústica 2008, Coimbra – Portugal*.

Phon, V., Papamoschou, D. (2012). "Acoustic transmission loss of perforated plates". 33<sup>rd</sup> AIAA Aeroacoustics Conference, Colorado Springs.

Portela, M., (s. d.). "Materiais Acústicos – Conceitos para acústica arquitectónica". LVA/UFSC.

Rhebergen, K., Verfeld, N. (2005). "A speech intelligibility index-based approach to predict the speech reception threshold for sentences in fluctuating noise for normal – hearing listeners". *J. Acoustical Society of America*, Vol. 117, No.4, pp. 2181-2192.

Toutonge, J. (2006). "Projeto e construção de câmaras reverberantes em escala reduzida para o estudo das características de perda de transmissão de divisórias confeccionadas a partir de materiais regionais". Tese de Mestrado, Universidade Federal do Pára, Brasil.

Vengala, K. (2009). "Building a modified impedance tube for measurement of sound transmission loss and absorption coefficients of polymer cross-linked aerogel core composites". Tese de Mestrado, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University.

Wilkinson, S., Reed, R., Jailani, J. (2011). "User satisfaction in sustainable office buildings: a preliminary study". 17<sup>th</sup> PRRES Pacific Rim Real Estate Society Conference Gold Coast, Australia.