



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

Avaliação experimental de perdas por transmissão em soluções multicamada

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

Autor

Vera Alexandra Pereira Marques

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 correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Janeiro, 2014

AGRADECIMENTOS

Eu escolhi a profissão que queria quando tinha dez anos e, neste momento, este trabalho representa o final de uma etapa muito importante para mim. Não poderia deixar de agradecer a algumas pessoas que tiveram um papel fundamental durante esta fase da minha vida.

Aos meus orientadores, Professor Luís Godinho e Professor Paulo Mendes, por toda a disponibilidade e apoio que me concederam.

Ao ITeCons (Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção), que disponibilizou as instalações para a realização dos ensaios, assim como todos os equipamentos e materiais necessários. Quero agradecer também ao Engenheiro José Nascimento que me prestou uma valiosa ajuda durante toda a fase da realização dos ensaios laboratoriais.

À minha família e ao meu namorado André que são as pessoas mais importantes para mim e que me acompanharam todos os dias. Por fim, um agradecimento especial à minha mãe, pelo carinho e por todo o apoio que me deu durante todo o meu percurso académico.

RESUMO

Na seleção de materiais de construção e de sistemas construtivos é importante conseguir conciliar o cumprimento dos requisitos de desempenho acústico com aspetos estéticos e operacionais, como a espessura e o peso reduzidos. As soluções multicamada apresentam assim um grande interesse, uma vez que procuram tirar partido, não só do comportamento individual dos materiais, mas também da solução que se obtém pela sobreposição de vários materiais diferentes.

Partindo de um conjunto de materiais, correntes e inovadores, com potencial para integrar soluções multicamada, foram inicialmente realizados ensaios experimentais para avaliar o seu desempenho acústico. Numa fase seguinte, foram então desenvolvidas várias soluções multicamada a partir de alguns destes materiais, cujas propriedades acústicas foram igualmente analisadas.

Os trabalhos experimentais consistiram na determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora, através de um tubo de impedância, recorrendo a amostras de pequenas dimensões. Durante a realização dos ensaios experimentais, o método de ensaio foi analisado detalhadamente, de forma a tentar determinar as limitações provenientes da sua utilização. Foi possível concluir que as condições de selagem das amostras assumem uma grande importância nos resultados obtidos. Para além de se realizar uma análise comparativa entre os vários materiais e soluções testadas, os resultados experimentais foram ainda comparados com os que se obtiveram por aplicação de um modelo teórico simples.

Este trabalho enquadrou-se no âmbito do projeto FCOMP-01-0202-FEDER-030191 (DoorTECH), financiado pelo QREN através do Programa Operacional Factores de Competitividade.

ABSTRACT

In the selection of building materials and constructive systems it is important to conciliate the requirements of acoustic performance with aesthetic and operational aspects, such as reduced thickness and weight. Therefore the multilayered solutions show a great interest, as they seek to take advantage not only of the individual behaviour of materials, but also the solution obtained by the superposition of several different materials.

From a set of current and innovative materials, with the potential to integrate multilayered solutions, experimental tests were initially conducted to evaluate their acoustic performance. At a later stage, multilayered solutions were developed from some of these materials, which acoustic properties were also analysed.

The experimental work consisted in the determination of the sound transmission loss parameter making use of an impedance tube, using small samples. When carrying out experimental tests, the test method was analysed thoroughly in order to try to determine the limitations resulting from its use. It was concluded that the sealing conditions of the samples have a great importance in relation to the results obtained. The tested solutions were analysed and compared between them, and, in addition, the experimental results were also compared with those provided by a simple theoretical model.

This study is framed as part of the FCOMP-01-0202-FEDER-030191 (DoorTECH) project, funded by QREN through the “Programa Operacional Factores de Competitividade”.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento Geral	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 ESTADO DA ARTE	3
2.1 Isolamento a sons aéreos.....	3
2.1.1 Perda por transmissão sonora	3
2.1.2 Modos de vibração e frequências próprias	7
2.2. Determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora.....	8
2.2.1 Técnicas de medição da TL através de um tubo de impedância	12
2.2.2 Efeito das condições de fixação da amostra no tubo	14
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	19
3.1 Metodologia experimental.....	19
3.1.1 Equipamento.....	19
3.1.2 Descrição do método de obtenção da perda por transmissão sonora (TL).....	20
3.2 Descrição dos materiais analisados	23
3.2.1 MDF, platex, Aglomerado de madeira, Aglomerado flaxboard.....	24
3.2.2 Lã mineral (lã de rocha e lã de vidro).....	25

3.2.3 Metais (aço, alumínio e chumbo)	26
3.2.4 Espumas (Basotect, Aglomex e PU)	27
3.2.5 Membrana acústica	29
3.3 Efeito das condições de fixação da amostra no tubo	31
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	39
4.1 Apresentação e análise dos resultados obtidos	39
4.1.1 Materiais simples	39
4.1.2 Soluções multicamada	46
4.2. Comparação com a lei da massa	55
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	61
5.1 Conclusão	61
5.2 Trabalhos Futuros	63
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação entre a perda por transmissão e a massa por unidade de superfície da divisória, para determinados valores de frequência (Everest e Pohlmann, 2001).....	5
Figura 2.2 - Curva da perda por transmissão sonora de paredes simples (Pinto, 2011).....	5
Figura 2.3 - Representação de câmaras acústicas (adaptado de Tadeu et al, 2004).....	9
Figura 2.4 - Representação da configuração de um tubo de impedância (adaptado de Mohammadi e Mahjoob, 2009)	9
Figura 2.5 - Resultados do Índice de redução sonora: a) amostra de vidro (4 mm) b) amostra de aço (10 mm) (retirado de Tadeu et al, 2004)	11
Figura 2.6 - Esquema do método da terminação anecoica (adaptado de Tao e Seybert, 2003).....	12
Figura 2.7 - Esquema do método das duas cargas (adaptado de Vengala, 2007).....	13
Figura 2.8 - Esquema do método das duas fontes (adaptado de Tao e Seybert, 2003)	14
Figura 2.9 - Resultados da amostra 2 (retirado de Collings e Stewart, 2011).....	16
Figura 2.10 - Variação da TL em relação à Lei da Massa (retirado de Collings e Stewart, 2011).....	17
Figura 2.11 - Variação da TL em relação à TL _{field} (retirado de Collings e Stewart, 2011) ...	18
Figura 3.1 - Tubo de impedância decomposto (à esquerda); Configuração do tubo de impedância para a determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora (à direita) ...	19
Figura 3.2 - Configuração do tubo de impedância para a determinação da TL (adaptado de Collings e Stewart, 2011)	20
Figura 3.3 - Fotografia do conjunto de terminações utilizadas nos ensaios experimentais	21
Figura 3.4 - Fotografia do tubo de impedância para a determinação da absorção sonora.....	22
Figura 3.5 - Coeficiente de absorção (α) para as terminações utilizadas	22
Figura 3.6 - Amostras de MDF, platex, Aglomerado de madeira e Aglomerado flaxboard	25
Figura 3.7 - Amostras de lã rocha, lã de vidro e lã mineral.....	26
Figura 3.8 - Amostras de alumínio, aço e chumbo	27
Figura 3.9 - Amostras de Aglomex D60FR (10 mm, 20 mm, 30 mm).....	28
Figura 3.10 - Amostras de Aglomex D90FR (10 mm, 20 mm, 30 mm)	28
Figura 3.11 - Amostras de Aglomex D200FR (10 mm, 20 mm, 30 mm)	28
Figura 3.12 - Amostras de Basotect G e Basotect UF	29
Figura 3.13 - Amostras de Poliuretano (PU)	29
Figura 3.14 - Amostras de membrana acústica Danosa (2 mm e 4 mm).....	30
Figura 3.15 - Amostras de Aglomerados de cortiça	31

Figura 3.16 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomerado flaxboard de 25 mm (G) para condições de fixação: Loose; Medium Tight, Tight e Extra Tight	32
Figura 3.17 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomerado de madeira de 37 mm (H) para condições de fixação: Loose; Medium Tight, Tight e Extra Tight	33
Figura 3.18 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomex D200FR 30mm, para condições de fixação: Medium Tight, Tight e Extra Tight.....	33
Figura 3.19 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomerado de madeira de 8 mm (D) para condições de fixação: Loose; Medium Tight e Tight.....	34
Figura 3.20 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomerado flaxboard de 15 mm (E), para condições de fixação: Loose; Medium Tight, Tight e Extra Tight	35
Figura 3.21 - Valores de TL para a amostra Aglomerado de madeira de 8mm (D) com Aglomex D200FR 30mm, para condições de fixação: Loose; Medium Tight e Tight	36
Figura 3.22 - Valores de TL para a amostra de Aglomerado flaxboard de 15 mm (E) com Aglomex D200FR 30mm, para condições de fixação: Loose; Medium Tight, Tight e Extra Tight	36
Figura 3.23 - Valores de TL para a amostra de Aglomerado flaxboard de 25 mm (G) com Aglomex D200FR 30 mm, para condições de fixação: Loose; Medium Tight, Tight e Extra Tight	37
Figura 3.24 - Valores de TL para a amostra de Aglomerado de madeira de 37 mm (H) com Aglomex D200FR 30mm, para condições de fixação: Loose; Medium Tight, Tight e Extra Tight	37
Figura 4.1 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de MDF de 3,2 mm (A), MDF de 5mm (B) e plutex de 3,3 mm (C).....	40
Figura 4.2 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Aglomerado de madeira de 8mm (D), Aglomerado flaxboard de 15 mm (E), Aglomerado flaxboard de 19 mm (F), Aglomerado flaxboard de 25 mm (G) e Aglomerado de madeira de 37 mm (H)	41
Figura 4.3 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Rocterm	41
Figura 4.4 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Isover.....	42
Figura 4.5 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Ursa Terra ..	42
Figura 4.6 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de aço, alumínio e chumbo	43
Figura 4.7 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Basotect.....	44
Figura 4.8 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Aglomex.....	44
Figura 4.9 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de PU.....	45
Figura 4.10 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de membrana acústica	45

Figura 4.11 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Aglomerado de cortiça.....	46
Figura 4.12 - Amostras de Basotect, Aglomex e PU.....	48
Figura 4.13 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Basotect, PU e Aglomex	48
Figura 4.14 - Soluções multicamada: a) MDF 3,2mm + MDF 3,2mm; b) MDF 3,2mm +Basotect 40mm+ MDF 3,2mm; c) MDF 3,2mm+ PU 40mm+ MDF 3,2mm; d) MDF 3,2mm +Aglomex 30mm+ MDF 3,2mm; e) MDF 3,2mm +Aglomex 10mm+Aglomerado flaxboard 19mm+ MDF 3,2mm.....	49
Figura 4.15 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as soluções multicamada com MDF de 3,2 mm (A).....	50
Figura 4.16 - Soluções multicamada: a) MDF 5mm + MDF 5mm; b) MDF 5mm +Basotect 40mm+ MDF 5mm; c) MDF 5mm+ PU 40mm+ MDF 5mm; d) MDF 5mm +Aglomex 30mm+ MDF 5mm;.....	50
Figura 4.17 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as soluções multicamada com MDF de 5 mm (B)	51
Figura 4.18 - Soluções multicamada a) Platex 3,3mm + Platex 3,3mm; b) Platex 3,3mm +Basotect 40mm+ Platex 3,3mm; c) Platex 3,3mm+ PU 40mm+ Platex 3,3mm; d) Platex 3,3mm +Aglomex 30mm+ Platex 3,3mm;.....	51
Figura 4.19 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as soluções multicamada com Platex de 3,3 mm (C).....	52
Figura 4.20 - Soluções multicamada: a) MDF 3,2mm +Aglomerado madeira 37mm +MDF 3,2 mm; b) MDF 5mm +Aglomerado madeira 37mm +MDF 5mm; c) Platex 3,3mm +Aglomerado madeira 37mm +Platex 3,3 mm	53
Figura 4.21 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para: “MDF 3,2mm +Aglomerado madeira 37mm+MDF 3,2 mm”, “MDF 5mm+Aglomerado madeira 37mm+MDF 5mm” e “Platex 3,3mm +Aglomerado madeira 37mm+Platex 3,3 mm”.....	53
Figura 4.22 - Soluções multicamada: a) MDF 3,2mm+Aglomex 10mm+Aglomerado flaxboard 25mm+MDF 3,2mm; b) MDF 3,2mm+Aglomex 30mm+Aglomerado madeira 8mm+MDF 3,2mm;.....	54
Figura 4.23 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para: “MDF 3,2mm+Aglomex 10mm+Aglomerado flaxboard 25mm+MDF 3,2mm”, “MDF 3,2mm+Aglomex 30mm+Aglomerado madeira 8mm+MDF 3,2mm” e “MDF 5mm+Aglomerado madeira 8mm+Aglomex 10mm+Aglomerado madeira 8mm+MDF 5mm”	54
Figura 4.24 - Variação dos valores de TL em relação à lei da massa para amostras de Aglomerados de madeira de 8 mm e 37mm (D e H), Aglomerados flaxboard de 15mm, 19mm e 25mm (E, F e G), Aglomex de 30mm, PU de 40 mm e Basotect de 40mm.....	57
Figura 4.25 - Variação dos valores de TL em relação à lei da massa para soluções multicamada com MDF de 3,2 mm (A)	58

Figura 4.26 - Variação dos valores de TL em relação à lei da massa para soluções multicamada com Platex de 3,3 mm (C)	59
Figura 4.27 - Valores de ΔTL para soluções multicamada com MDF de 5 mm (B)	58
Figura 4.28 - Variação dos valores de TL em relação à lei da massa para soluções multicamada.....	60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Propriedades das terminações do tubo de impedância	21
Quadro 3.2 - Propriedades das amostras de MDF, platex, Aglomerado de madeira e Aglomerado flaxboard	24
Quadro 3.3 - Propriedades das amostras de Lã Mineral	25
Quadro 3.4 - Propriedades das amostras de Alumínio, Aço e Chumbo	26
Quadro 3.5 - Propriedades das amostras de Aglomex D60FR, D90FR e D200FR.....	27
Quadro 3.6 - Propriedades das amostras de Basotect	28
Quadro 3.7 - Propriedades das amostras de Poliuretano	29
Quadro 3.8 - Propriedades das amostras de membrana acústica	30
Quadro 3.9 - Propriedades das amostras de Aglomerados de cortiça	31
Quadro 4.1 - Constituição e espessura das soluções multicamada.....	47
Quadro 4.2 - Propriedades das amostras de Basotect, Aglomex e PU	47
Quadro 4.3 - Propriedades das amostras individuais.....	55
Quadro 4.4 - Valores da massa por unidade de área das soluções multicamada.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

O conforto acústico tornou-se uma variável muito importante no desenvolvimento de soluções construtivas devido ao facto de, nos dias de hoje, a sociedade se encontrar muito mais sensibilizada relativamente ao ruído. Além disso, também têm surgido, paralelamente, regulamentações mais exigentes e rigorosas. Atualmente, encontra-se em vigor o Regulamento Geral do Ruído (Decreto-Lei 9/2007) que atua na prevenção do ruído e no controlo da poluição sonora e o Regulamento dos Requisitos Acústicos em Edifícios (RRAE) (Decreto-lei 96/2008) que se refere ao conforto acústico na edificação.

De forma a ser possível atingir-se melhores resultados em termos de conforto acústico, têm sido desenvolvidas diversas soluções formadas por várias camadas, que combinam materiais densos com materiais mais absorventes. Neste sentido, é importante que se continue a estudar as propriedades acústicas deste tipo de soluções, para que se encontrem novas alternativas constituídas por materiais ainda mais eficazes no tratamento acústico de espaços.

No caso da acústica de edifícios, as soluções multicamada apresentam uma grande gama de aplicação, podendo ser utilizadas tanto em espaços de habitação como comerciais, no isolamento de paredes, tetos, divisórias leves, etc.

A avaliação do parâmetro de perda por transmissão sonora destas soluções multicamada é fundamental para a quantificação do seu desempenho acústico.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo estudar o comportamento acústico de diferentes materiais a integrar posteriormente em soluções multicamada. O estudo efetuado baseou-se essencialmente em trabalhos experimentais de determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora.

Os ensaios laboratoriais foram realizados com o auxílio de um tubo de impedância, disponibilizado pelo ITeCons, Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção. Através da análise dos resultados obtidos pretende-se determinar quais os materiais que apresentam maiores vantagens para serem utilizados em soluções multicamada destinadas a diversos sistemas construtivos.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos.

O capítulo 1 é constituído por um enquadramento geral do tema do trabalho, e pelos objetivos do mesmo. Neste capítulo também se realiza uma breve descrição da sua estrutura.

No capítulo 2 são descritos conceitos teóricos importantes no âmbito do trabalho realizado, e é apresentada uma revisão bibliográfica concebida através de estudos publicados na literatura especializada acerca deste tema.

O capítulo 3, que se refere aos procedimentos experimentais, contém a descrição das metodologias de ensaio aplicadas, os materiais utilizados e uma secção que analisa um fenómeno que ocorre nos ensaios experimentais, relacionado com as condições de fixação das amostras.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos para o parâmetro de perda por transmissão sonora, procurando-se depois analisar estes resultados, compará-los com um modelo teórico simples e refletir acerca da possível utilização destas soluções em aplicações reais.

Finalmente, no capítulo 5, são expostas as conclusões retiradas da análise do trabalho realizado, e sugerem-se propostas para trabalhos futuros no seguimento do tema aqui abordado.

2 ESTADO DA ARTE

No presente capítulo serão apresentados alguns conceitos teóricos relacionados com o isolamento acústico e com a perda por transmissão sonora de elementos de separação, que são relevantes para a compreensão do tema deste trabalho.

2.1 Isolamento a sons aéreos

Cada material possui propriedades de isolamento e de absorção de energia sonora específicas. O isolamento acústico de um elemento pode ser caracterizado através do seu parâmetro de perda por transmissão sonora, que, por sua vez, se relaciona com o coeficiente de transmissão sonora. Estes dois parâmetros têm uma relação inversa, uma vez que a perda por transmissão sonora representa a energia sonora que se perde ao atravessar a divisória, enquanto que o coeficiente de transmissão especifica quanta da energia sonora incidente é transmitida através do elemento.

2.1.1 Perda por transmissão sonora

A perda por transmissão sonora (*sound transmission loss*, TL) corresponde à diferença do nível de potência sonora entre a onda sonora incidente e a onda transmitida através de um atenuador acústico com uma terminação anecoica (Tao e Seybert, 2003).

Pode dizer-se que a perda por transmissão sonora é então a quantidade de som perdida, quando este se transmite através de um material (Pereira, 2013). Quando os valores de TL são elevados, existe uma baixa transmissão de energia acústica e vice-versa.

Segundo Wang et al (2005), citado por Pereira (2013), a TL é determinada através da medição de níveis de pressão sonora, numa dada gama de frequências, a partir da fonte e do recetor que se encontram em espaços adjacentes.

Segundo Méndez et al (1990), citado por Pinto (2011), o isolamento de uma parede depende da diferença entre a energia incidente e a energia transmitida. O coeficiente de transmissão (τ), que pode variar entre os valores de 0 e 1, é obtido fazendo-se a relação entre a energia transmitida e a energia incidente (Pinto, 2011).

A perda por transmissão sonora pode ser descrita como sendo o inverso do coeficiente de transmissão, expresso em decibéis, como se observa na expressão seguinte:

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

onde E_i é a energia sonora incidente e E_t corresponde à energia sonora transmitida.

A transmissão de energia sonora num elemento de separação realiza-se através da vibração do elemento. As variáveis mais relevantes neste fenómeno são a massa por unidade de área do elemento e a frequência do som incidente. Outras variáveis importantes que podemos referir são o ângulo de incidência das ondas sonoras, a existência de pontos fracos de isolamento, a rigidez, o amortecimento do elemento e, no caso de elementos múltiplos, o número de painéis, as características de cada um deles e a sua separação (Tadeu et al, 2010).

Com o aumento da massa do elemento, o isolamento aumenta, uma vez que aumentam também as forças de inércia. Aumentando a frequência do som, não alterando a massa do elemento, também ocorre um aumento do isolamento, porque a vibração do elemento diminui, verificando-se assim uma maior dissipação de energia sonora (Tadeu et al, 2010).

Regra geral, quanto mais maciça for a parede mais difícil será para as ondas sonoras movê-la. Em termos de perda por transmissão sonora, a massa do material que constitui a barreira é mais determinante do que propriamente o tipo de material. Por exemplo, a perda por transmissão sonora através de uma camada de chumbo de certa espessura pode ser igualada por um painel de contraplacado 95 vezes mais espessa (Everest e Pohlmann, 2001). Na Figura 2.1 estão representadas retas, correspondentes a valores fixos de frequência em hertz, que relacionam os valores de perda por transmissão sonora com a massa por unidade de área da divisória.

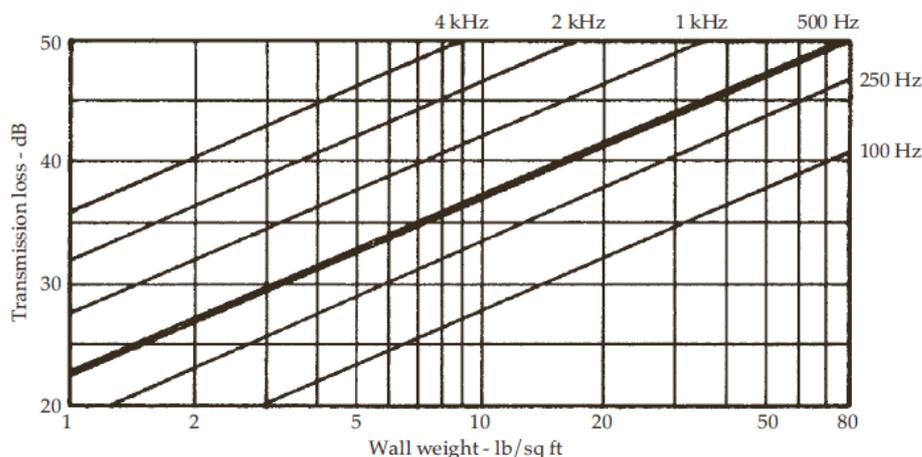


Figura 2.1- Relação entre a perda por transmissão sonora e a massa por unidade de superfície da divisória, para determinados valores de frequência (retirado de Everest e Pohlmann, 2001)

A curva da perda por transmissão sonora de uma parede simples, representada na Figura 2.2, pode ser dividida em diversas zonas de acordo com a frequência. Existe uma zona controlada pela rigidez, uma controlada pelo amortecimento, outra pela massa do elemento e finalmente uma controlada pelo efeito de coincidência (Pinto, 2011).

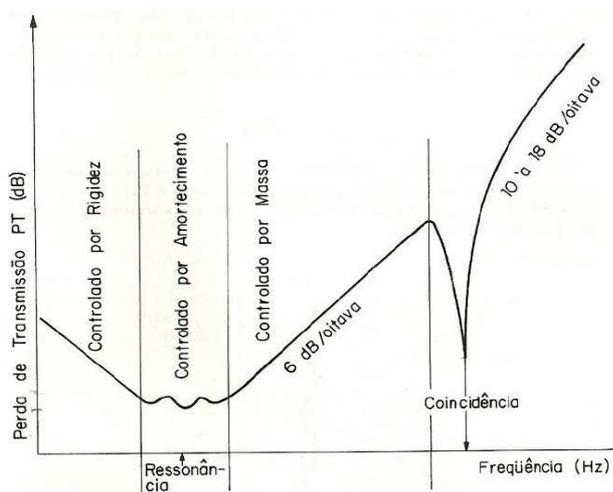


Figura 2.2 - Curva da perda por transmissão sonora de paredes simples (Pinto, 2011)

Nas baixas frequências, e até à frequência de ressonância, o painel vibra como um todo e a perda por transmissão sonora depende da sua rigidez, decrescendo a uma taxa de 6 dB por oitava ao duplicar a frequência ou a rigidez (Pinto, 2011).

Na zona controlada pelo amortecimento, aparecem as primeiras frequências de ressonância que originam quebras de isolamento, devido à maior movimentação do painel (Pinto, 2011).

Na zona controlada pela massa, o isolamento sonoro aumenta com acréscimos de 6 dB por cada duplicação da massa por unidade de superfície do elemento ou por cada duplicação da frequência do som. Esta variação segue uma lei, designada como lei teórica da massa ou lei teórica da frequência que é caracterizada pela expressão seguinte (Tadeu et al, 2010):

$$TL = 20 \log (f m) - 42,5 \text{ (dB)} \quad (2)$$

onde, f é a frequência do som em Hz e m é a massa da barreira por unidade de superfície em kg/m^2 .

No caso de se tratar de uma situação de campo difuso a expressão é substituída pela seguinte:

$$TL = 20 \log (f m) - 47 \text{ (dB)} \quad (3)$$

Tendo em conta estas expressões teóricas e sendo $20 \log (2)$ igual a 6 dB, conclui-se que ao duplicar-se a massa ou a frequência, a TL sofre um aumento de 6 dB (Everest e Pohlmann, 2001).

Numa gama de frequências mais elevadas, a rigidez da barreira vai gerar uma ressonância, uma vez que a barreira vai fletir e curvar para o mesmo comprimento de onda que a onda sonora incidente, e como resultado, vai transmitir o som mais facilmente. Perto da frequência de ressonância, a TL vai decair 10 a 15 dB. Este fenómeno é denominado de efeito de coincidência. Acima desta zona de frequências, a TL irá aumentar novamente de acordo com a lei da massa, ou mesmo excedê-la (Everest e Pohlmann, 2001). Para um dado material, a frequência de coincidência é inversamente proporcional à espessura do painel. Deste modo, a frequência de coincidência pode ser aumentada através da diminuição da espessura; isto poderá ser benéfico por permitir mover o pico de frequência de coincidência para uma frequência acima da gama de frequências de interesse, por exemplo acima das frequências da fala. No entanto, quando a espessura é reduzida, a TL reduz-se também globalmente (Everest e Pohlmann, 2001).

Por fim, importa referir que as conclusões retiradas da lei da massa são válidas apenas se considerarmos que o elemento não tem rigidez nem está sujeito a fenómenos de amortecimento, o que não acontece na realidade. De facto, o painel vibra em função da rigidez tornando possível uma maior transmissão de energia sonora, em determinadas frequências do som (Tadeu et al, 2010).

2.1.2 Modos de vibração e frequências próprias

Para um qualquer elemento plano, tendo em conta a sua densidade, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, a espessura, a largura, o comprimento e as suas condições de apoio, existe um conjunto de frequências de vibração próprias que podem refletir importantes quebras de isolamento sonoro (Tadeu et al, 2010).

As frequências correspondentes aos modos próprios de vibração de uma placa podem ser obtidas a partir de uma análise tridimensional aplicável a sólidos em geral. No caso de placas finas é possível considerar-se uma análise bidimensional ou até mesmo uma análise unidirecional, quando uma das dimensões é significativamente superior à outra (Tadeu et al, 2010).

Em situações correntes, é em placas finas que os modos próprios de vibração, por flexão transversal do painel, podem contribuir significativamente para a perda de isolamento acústico do elemento. Em elementos mais espessos e com uma área significativa, as primeiras frequências próprias de vibração, por flexão transversal do painel, situam-se numa gama de frequências muito baixas, fora da zona audível, não afetando significativamente o isolamento acústico desse elemento (Tadeu et al, 2010).

A perda por transmissão sonora é crescente de acordo com a lei da massa apenas até à frequência crítica (f_c), onde ocorre o fenómeno de coincidência que origina uma quebra (Pinto, 2011). Beranek (1971) citado por Pinto (2011) refere que a frequência crítica ocorre quando a velocidade de propagação da onda de flexão na placa iguala à velocidade de propagação do som no ar. A frequência crítica pode ser expressa pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_s}{B}} \text{ (Hz)} \quad (4)$$

onde, c é a velocidade do som no ar em m/s, B é a rigidez à flexão em Nm e ρ_s é a massa por unidade de superfície (kg/m^2). A frequência crítica é então dependente da massa e da rigidez do provete.

A rigidez dinâmica à flexão pode ser expressa pela expressão seguinte:

$$B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

onde, E é o módulo de Young em N/m², h é a espessura da parede em metros e ν é o coeficiente de Poisson.

Cada elemento de separação, em função do material que o constitui e em função da sua geometria, vibra como resultado da combinação dos vários modos próprios de vibração a que correspondem frequências bem definidas. Contudo, os vários modos de vibração apenas são excitados caso a carga a que são submetidos contenha energia dentro dessas frequências (Tadeu et al, 2010).

2.2. Determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora

Existem vários métodos diferentes que podem ser utilizados para determinar o parâmetro de perda por transmissão sonora e caracterizar o isolamento sonoro de um elemento.

Os ensaios “*in situ*”, por exemplo, têm como objetivos principais analisar as condições existentes após a aplicação de soluções construtivas e verificar se estas cumprem os requisitos regulamentares. Deste modo, pode dizer-se que estes ensaios não caracterizam um determinado material ou sistema, mas sim avaliam o seu desempenho quando são aplicados em obra (Construção Magazine@, 2009).

No caso de ensaios laboratoriais torna-se possível isolar o comportamento de um material ou sistema e analisá-lo de forma objetiva. Este tipo de ensaios são necessariamente realizados sob condições controladas e em instalações com requisitos muito específicos, de forma a ser possível comparar resultados. Alguns dos parâmetros que podem ser determinados são a absorção sonora, o isolamento a sons aéreos, o isolamento a sons de percussão e a redução de transmissão sonora de pavimentos (Construção Magazine@, 2009).

Os ensaios laboratoriais podem ser distinguidos como sendo ensaios de grande escala ou de pequena escala. Os primeiros são realizados em câmaras acústicas que têm estipulado um volume mínimo de 50 m³. O provete que é inserido na separação das câmaras tem cerca de 10 m² e dimensões não inferiores a 2,3 m (Tadeu et al, 2010). As características das câmaras de ensaio são definidas na norma EN ISO 10140-5:2010. Outro aspeto fundamental nestes ensaios é que haja uma efetiva minimização da existência de transmissões marginais e da

influência do ruído de fundo e de vibrações exteriores (Construção Magazine@, 2009). Estes ensaios tornam-se muito dispendiosos e demorados, uma vez que é preciso construir o provete, ensaiá-lo e depois demoli-lo. Os ensaios de pequena escala utilizam um tubo de impedância para determinar o coeficiente de absorção ou a perda por transmissão sonora. As amostras colocadas no tubo de impedância têm a enorme vantagem de terem um diâmetro de apenas 10 cm. Isto possibilita que se testem novas soluções e materiais de uma forma mais económica e menos limitada.

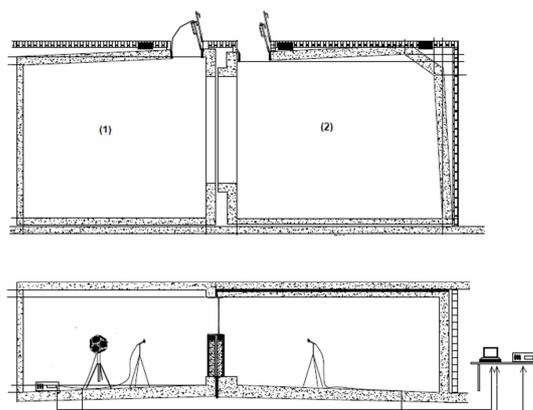


Figura 2.3 - Representação de câmaras acústicas (adaptado de Tadeu et al, 2004)

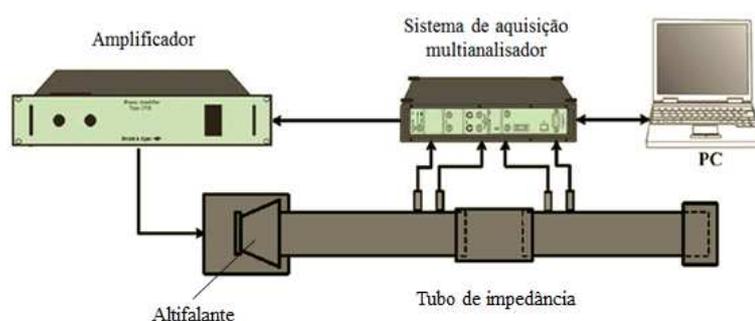


Figura 2.4 - Representação da configuração de um tubo de impedância (adaptado de Mohammadi e Mahjoob, 2009)

Outra forma de determinar o isolamento sonoro de um elemento é recorrendo a modelos numéricos e analíticos. Devido ao elevado número de variáveis existentes, é fácil perceber que a construção de um modelo matemático para simular o fenómeno complexo do isolamento acústico é extremamente complicado e, por isso, a maioria dos modelos analíticos

e numéricos apresentam-se com um número limitado de variáveis. Os modelos simplificados que têm sido desenvolvidos melhoraram o nosso entendimento do fenômeno acústico, mas como não oferecem a solução completa, têm sido feitos ensaios laboratoriais para obter o nível de isolamento fornecido por painéis constituídos por um ou dois elementos (Tadeu et al, 2004).

Nos últimos anos têm-se desenvolvido modelos mais complexos de forma a ter em conta um grande número de variáveis no cálculo do isolamento sonoro a sons aéreos. Alguns destes modelos recorrem a métodos numéricos bem conhecidos, como o Método dos Elementos Finitos e o Método dos Elementos de Fronteira. Embora estes modelos se apresentem de aplicação geral, exigem elevados recursos computacionais para poderem ser aplicados a um exemplo qualquer, podendo tornar-se numa alternativa difícil e pouco prática. Um outro método aplicável a este tipo de cálculo é o SEA (*Statistical Energy Analysis*) que se tem revelado uma ferramenta muito útil na previsão da transmissão sonora através de paredes divisórias (Tadeu et al, 2010). Este modelo é uma poderosa ferramenta analítica para a determinação da TL em grandes sistemas estruturais, especialmente para uma grande gama de frequências. Por exemplo, no cálculo da TL em estruturas *sandwich*, o SEA recorre a um modelo equivalente mais simples do painel *sandwich*, que não tem em conta a influência dos modos de vibração espessura-extensão da TL, nem prevê as frequências simétricas de coincidência (Wang et al, 2005).

Tadeu et al (2004) estudaram o isolamento acústico obtido em elementos de separação de vidro, aço e betão, quando estes são constituídos por um ou por dois painéis. Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados foram depois comparados com os resultados obtidos numa previsão de um modelo analítico e numa previsão a partir do modelo da lei teórica da massa.

A partir da análise dos resultados obtidos, os autores encontraram uma clara relação entre as curvas de isolamento para as amostras testadas e a criação de campos de ondas estacionárias dentro das câmaras acústicas. Este fenómeno provoca quebras e flutuações no isolamento. Os resultados obtidos revelaram ainda a existência de quebras que estão relacionadas com o movimento transversal de flexão induzida do painel. O modelo analítico utilizado não conseguiu ter em conta estas quebras de isolamento referidas.

A Figura 2.5 apresenta os resultados obtidos para uma amostra de vidro com 4 mm de espessura, com uma área de $1,8 \times 1,8 \text{ m}^2$ (a) e para uma amostra de aço com 10 mm de espessura, com uma área de $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$ (b), em bandas de 1/10 de oitava. Os resultados nas

baixas e nas altas frequências são muito diferentes das previsões obtidas a partir da lei da massa. Nas baixas frequências, a lei da massa sugere que o índice de redução sonora vai ser mais baixo, e nas altas frequências os resultados previstos são muito superiores aos resultados analíticos e experimentais. A partir da zona do efeito de coincidência, a diferença é particularmente expressiva. Estas diferenças devem-se ao facto de os níveis de isolamento previstos pela lei da massa serem mais próximos dos resultados obtidos experimentalmente quando os painéis são pesados.

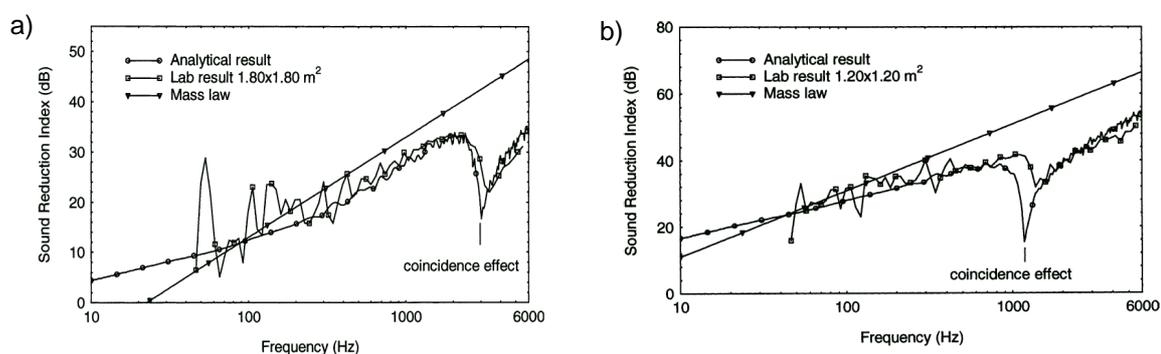


Figura 2.5 - Resultados do Índice de redução sonora: a) amostra de vidro (4 mm) b) amostra de aço (10 mm) (retirado de Tadeu et al, 2004)

O modelo analítico concebido pelos autores foi considerado apropriado para prever o índice de redução sonora para estes painéis. As diferenças entre os resultados analíticos e experimentais ocorreram nas baixas frequências, principalmente nas quebras de isolamento associadas ao campo sonoro estacionário criado nas câmaras acústicas ou ao movimento transversal dos painéis. Em termos de análise experimental, as dimensões do painel mostraram ser uma variável importante na definição das quebras associadas ao efeito de coincidência.

No trabalho de Tadeu et al (2007), os autores usam soluções analíticas para avaliar o isolamento sonoro proporcionado por divisórias homogêneas que são infinitas ao longo do seu plano. O algoritmo usa Funções de Green, derivadas com base no trabalho dos autores realizado anteriormente, acerca da previsão do isolamento sonoro em painéis simples e duplos. O modelo foi aqui alargado para se considerarem sistemas multicamada, permitindo a simulação de cargas tridimensionais. Os resultados fornecidos pelo modelo analítico permitiram obter um bom acordo com os resultados experimentais, exceto na proximidade do efeito de coincidência em painéis mais espessos. Foram estudadas várias variáveis, como a massa, a rigidez das camadas, a posição e a direção da carga no meio elástico e a presença de

material poroso nas camadas de fluido. Descobriu-se que o modelo consegue simular o fenómeno acústico envolvido em sistemas simples ou multicamada.

Este artigo apresenta um modelo que permite resolver estruturas com um número arbitrário de camadas acústicas e elásticas, permitindo também a aplicação de cargas de impacto tridimensionais. Assim, é possível prever o comportamento acústico de um conjunto mais abrangente de sistemas acústicos que os modelos encontrados na bibliografia. No entanto, não se tem em consideração a presença de transmissões laterais ou pontes sonoras, uma vez que se assume que os painéis são uniformes e com comprimento infinito, sem fixações mecânicas.

A partir da análise dos resultados obtidos foi possível concluir que os resultados analíticos possuem uma boa concordância com os resultados experimentais em toda a gama de frequências, exceto para as baixas frequências. Esta diferença é devida ao efeito de coincidência que não está presente nos resultados experimentais devido ao tamanho da amostra. Para o caso das frequências mais baixas, os resultados previstos pela lei da massa também diferem dos resultados experimentais. De fato, o modelo analítico apresenta um comportamento melhor nas baixas frequências que a lei da massa.

2.2.1 Técnicas de medição da TL através de um tubo de impedância

O tubo de impedância é um equipamento que permite estudar e obter as propriedades acústicas, como a absorção sonora e a perda por transmissão sonora, dos materiais ensaiados. No caso da perda por transmissão sonora existem três métodos possíveis para a sua determinação através do tubo de impedância.

- Método da terminação anecoica (método de decomposição)

Este método utiliza a razão entre a energia sonora incidente e a energia sonora transmitida para determinar a perda por transmissão sonora da amostra (Vengala, 2007).

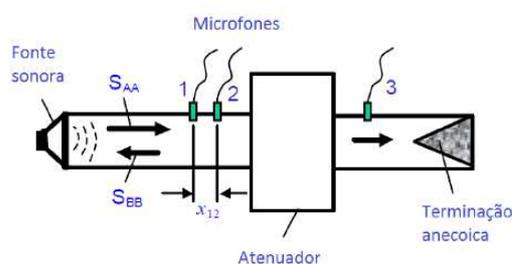


Figura 2.6 - Esquema do método da terminação anecoica (adaptado de Tao e Seybert, 2003)

Neste método, utiliza-se uma terminação anecoica, o que significa que a terminação colocada no tardo do tubo de impedância é completamente absorvente. Assim, a onda refletida no compartimento recetor do tubo desaparece, simplificando a equação utilizada na determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora. Este método tem a vantagem de reduzir para a metade o número de medições, mas na realidade é bastante difícil encontrar materiais que tornem a terminação verdadeiramente anecoica, de forma a originar bons resultados (Collings e Stewart, 2011). Yousefzadeh et al (2008) citado por Collings e Stewart (2011) indica que o coeficiente de reflexão da terminação do tubo tem um efeito significativo nas medições e na flutuação dos resultados da perda por transmissão.

- Método das duas cargas

O método das duas cargas caracteriza-se por utilizar duas terminações diferentes durante o ensaio, como descrito na Figura 2.7. Podemos ter como terminações, por exemplo, uma capa rígida, ou deixar o tubo aberto, ou usar um material de referência. O fabricante *Bruel & Kjaer* sugere que se usem dois materiais absorventes diferentes (Collings e Stewart, 2011).

No entanto, se as duas terminações escolhidas forem demasiado similares, os resultados obtidos serão instáveis. Geralmente, as duas cargas podem ser tubos com dois comprimentos diferentes, um único tubo com e sem material absorvente, entre outras. Teoricamente é possível utilizar uma qualquer terminação mas não se recomenda uma terminação com grande reflexão. Quando a terminação é muito refletora, a relação sinal-ruído é baixa, podendo ocorrer grandes erros que podem contaminar os resultados experimentais (Tao e Seybert, 2003).

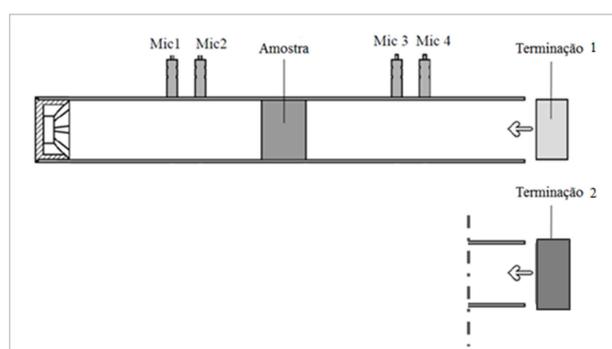


Figura 2.7 - Esquema do método das duas cargas (adaptado de Vengala, 2007)

- Método das duas fontes

O método das duas fontes tem como fundamento a alteração da localização da fonte sonora, como mostra a Figura 2.8, recorrendo-se seguidamente ao método da matriz de transferência (Tao e Seybert, 2003). O método das duas cargas e o método das duas fontes são igualmente eficazes mas este último apresenta uma aplicação mais difícil porque é necessário mover a fonte sonora.

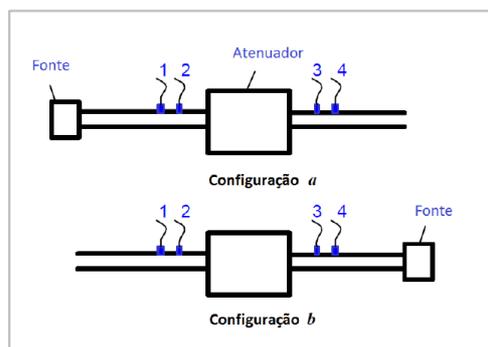


Figura 2.8 - Esquema do método das duas fontes (adaptado de Tao e Seybert, 2003)

2.2.2 Efeito das condições de fixação da amostra no tubo

O efeito das condições de fixação da amostra no tubo de impedância é um fenómeno, conhecido também por *clamping effect*, que foi observado por vários autores que realizaram ensaios com este equipamento. O facto de se colocar uma fita em torno das amostras faz com que o ensaio decorra com a amostra muito apertada dentro do tubo de impedância. Concluiu-se que os resultados obtidos em amostras seladas com fita diferem bastantes das que não foram seladas. Este fenómeno pode ter como explicação o facto de as amostras ensaiadas no tubo de impedância não poderem vibrar da mesma forma que as amostras ensaiadas nas câmaras acústicas que podem vibrar nos seus modos naturais (Collings e Stewart, 2011).

Neste trabalho, este fenómeno foi também analisado, tendo-se comparado os resultados obtidos a partir de várias amostras com diferentes tipos de selagem. Estes resultados serão apresentados mais à frente.

O trabalho de Collings e Stewart (2011) investigou a relação entre os resultados obtidos através do método das duas cargas no tubo de impedância (TL_{normal}) e os dados provenientes de ensaios em câmaras reverberantes (TL_{field}). Estes resultados foram depois comparados com a previsão obtida através do Modelo de Sharp. A intenção dos autores foi estudar a viabilidade da utilização do tubo de impedância e determinar as suas desvantagens na análise

do comportamento acústico de materiais, uma vez que se trata de um método muito mais económico e acessível.

Neste artigo foi utilizado o método das duas cargas, no qual se usam duas terminações diferentes no tubo de impedância durante o ensaio. A gama de frequências estudada situou-se entre os 60 e os 1600 Hz.

- 1ª Terminação: 20 mm de espuma de calibração com 20 mm de fibras têxteis
- 2ª Terminação: 20 mm de espuma de calibração com 80 mm fibra de vidro

Foram selecionadas três amostras diferentes, com 100 mm de diâmetro.

- Betão celular autoclavado (*Autoclaved Aerated Concrete*, AAC) isotrópico de baixa densidade com 75 mm de espessura (**Amostra 1**)
- Betão celular autoclavado (AAC) de 75 mm colado a 10 mm de revestimento com 1 mm de separação (**Amostra 2**)
- Lâmina de aço ortotrópica (0,42 mm) + composto de elastómetro (1 mm) + Lâmina Zincoalumínio ortotrópico (0,42 mm) (**Amostra 3**)

De forma a garantir um ajuste perfeito da amostra ao tubo e evitar a ocorrência de fugas, as amostras foram seladas com fita. Depois de realizados os ensaios, a TL_{normal} é calculada através do *software* e apresentada num gráfico.

A Figura 2.9 apresenta os resultados da amostra 2, contendo os resultados para ambas as superfícies da amostra, tanto com fita (T) como sem fita (NT). Apresentam-se também as curvas da lei da massa, do modelo de Sharp e dos valores dos ensaios em câmaras reverberantes (TL_{field}). É possível observar que as amostras que não foram vedadas com fita apresentam resultados muito diferentes dos resultados das amostras com uma boa vedação.

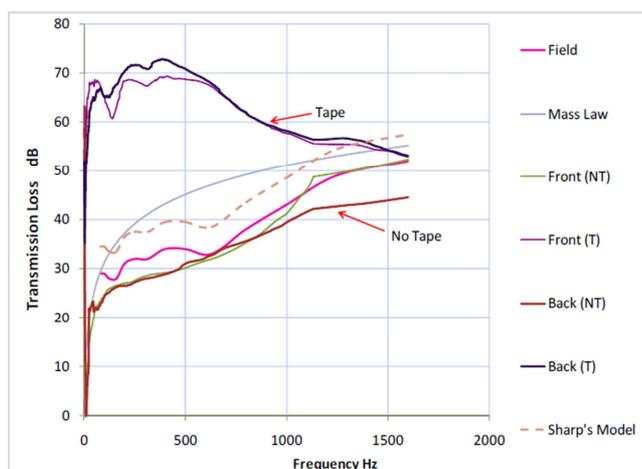


Figura 2.9 - Resultados da amostra 2 (retirado de Collings e Stewart, 2011)

Nas frequências mais baixas, pelo facto de a amostra ser vedada com fita, observam-se valores de perda por transmissão sonora muito superiores aos obtidos, quer pelo modelo teórico da lei da massa, modelo de Sharp ou método das duas câmaras. Por outro lado, para a amostra que não foi selada, é possível observar que as suas curvas se encontram bastante próximas da curva relativa ao ensaio realizado pelo método das duas câmaras. No que diz respeito ao modelo da lei da massa, apesar dos resultados da amostra sem fita estarem um pouco afastados, o comportamento das curvas é semelhante.

A figura 2.10 contém os valores do desvio da TL em relação à lei teórica da massa traduzida pela seguinte expressão:

$$TL_{normal} = 20 \log(fm) - 42.5 \quad (dB) \quad (6)$$

em que, f é a frequência em Hz e m é a massa por unidade de área em kg/m^2 . Os resultados são variados mas, no entanto, para a amostra 1 (*Front* (1) e *Back* (1)), acima 1050 Hz, os resultados são bons. O mesmo também parece acontecer na amostra 2, para o caso da superfície da frente exposta e sem fita (*Front* (NT 2)) acima dos 1100 Hz. Abaixo desta frequência, existe uma grande variação em relação à lei da massa para todas as amostras. Esta variação é de certo modo esperada, uma vez que se trata de uma gama de frequências na qual o isolamento sonoro é controlado pela rigidez dos materiais (Collings e Stewart, 2011). As duas curvas da amostra 2 que não tem fita apresentam um comportamento muito diferente do traçado das restantes amostras.

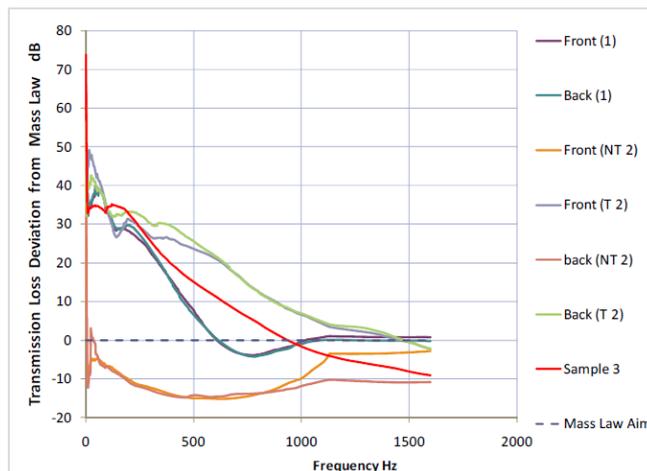


Figura 2.10 - Variação da TL em relação à Lei da Massa (retirado de Collings e Stewart, 2011)

Segundo Bies e Hanson (2009), citados por Collings e Stewart (2011), a relação entre a TL_{normal} e a TL_{field} para um painel isotrópico, pode ser estimada a partir do Modelo de Sharp, através das seguintes expressões:

$$TL_{field} = TL_{normal} - 10 \log \left(1.5 + \log \frac{2f}{\Delta f} \right) \quad (dB) \quad (7)$$

$$TL_{field} = TL_{normal} - 5.5 \quad (dB) \quad (8)$$

onde, $\Delta f/f=0.236$ para uma análise em bandas de 1/3 oitava. Esta estimativa está representada na Figura 2.9 para a amostra 2. Este modelo só pode ser aplicado em painéis isotrópicos, não sendo por isso possível considerar a amostra 3 que é ortotrópica, apesar de, na Figura 2.11, a sua curva ser bastante semelhante à da amostra 1 (Collings e Stewart, 2011).

A Figura 2.11 apresenta os desvios dos valores de TL que foram detetados entre as amostras analisadas e os dados provenientes dos ensaios realizados pelo método das duas câmaras (TL_{field}) registados no laboratório da NATA em Chatswood, Austrália. Também se encontra representada a curva do modelo de Sharp, que corresponde a uma translação de 5,5 dB em relação aos valores de TL_{field} . É possível observar que nenhuma das curvas dos resultados experimentais se aproxima desta curva teórica. A amostra 2, para a situação em que a superfície frontal está exposta e sem fita (*Front (NT 2)*), é a que se aproxima mais dos valores obtidos nos ensaios das duas câmaras (TL_{field}), quase coincidindo em determinadas frequências. As maiores variações, que chegam a atingir 40 dB, são observadas em amostras seladas com fita, o que comprova mais uma vez a existência de um fenómeno relacionado com as condições de fixação da amostra dentro do tubo de impedância.

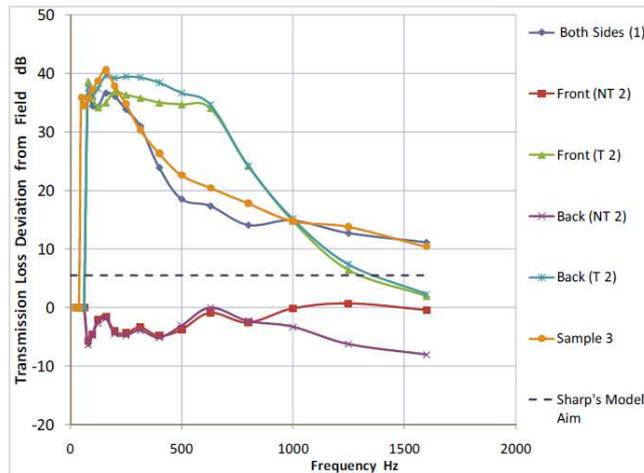


Figura 2.11 - Variação da TL em relação à TL_{field} (retirado de Collings e Stewart, 2011)

De uma forma geral, a utilização do Modelo de Sharp para prever a relação entre a TL_{normal} e a TL_{field} não foi totalmente provada pelos resultados obtidos neste artigo.

Os autores acabam o artigo mencionando que ainda será necessário realizar mais investigação antes de ser possível usar os ensaios com o tubo de impedância, de forma fiável, na previsão de perda por transmissão.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos todos os procedimentos, equipamentos e materiais que fazem parte dos ensaios experimentais destinados à determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora com recurso a um tubo de impedância.

3.1 Metodologia experimental

3.1.1 Equipamento

O equipamento principal presente nos ensaios laboratoriais efetuados foi o tubo de impedância, de secção circular e paredes rígidas, da marca Brüel & Kjær, modelo 4206. Na determinação da perda por transmissão sonora (TL) o tubo de impedância apresenta uma configuração com quatro microfones incorporados (modelo 2670), dois de cada um dos lados da amostra. Para ser possível efetuar a obtenção e o tratamento do sinal, foram ainda necessários um amplificador (Brüel & Kjær modelo 2716C), um sistema de aquisição multianalisador Pulse (modelo 3039) e um computador portátil com *software* de aquisição de sinal (Pulse LabShop versão 15.1.0) que permite a monitorização dos ensaios e a recolha dos dados. Foram também utilizados um termómetro e um barómetro.



Figura 3.1 - Tubo de impedância decomposto (à esquerda); Configuração do tubo de impedância para a determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora (à direita)

3.1.2 Descrição do método de obtenção da perda por transmissão sonora (TL)

O método de ensaio escolhido para a determinação do parâmetro da perda por transmissão sonora, utilizando o tubo de impedância, foi o método das duas cargas. Antes de iniciar o ensaio é necessário medir-se a temperatura e a pressão atmosférica dentro do tubo, com a fonte sonora ligada e efetuar-se a calibração dos microfones. A medição da pressão e temperatura permite determinar a velocidade do som e a massa volúmica do ar, de acordo com as seguintes expressões:

$$c_0 = 343,2\sqrt{T/293} \text{ [m/s]} \quad (9)$$

$$\rho = 1,186 \frac{293p_a}{101,325T} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (10)$$

em que, T é a temperatura, em $^{\circ}\text{C}$ e p_a é a pressão atmosférica, em kPa. Por fim, é também necessário medir e registar as distâncias entre os microfones (s_1 e s_2) e as distâncias entre a superfície da amostra e os microfones (d_1 e d_2), como exemplificado na Figura 3.2.

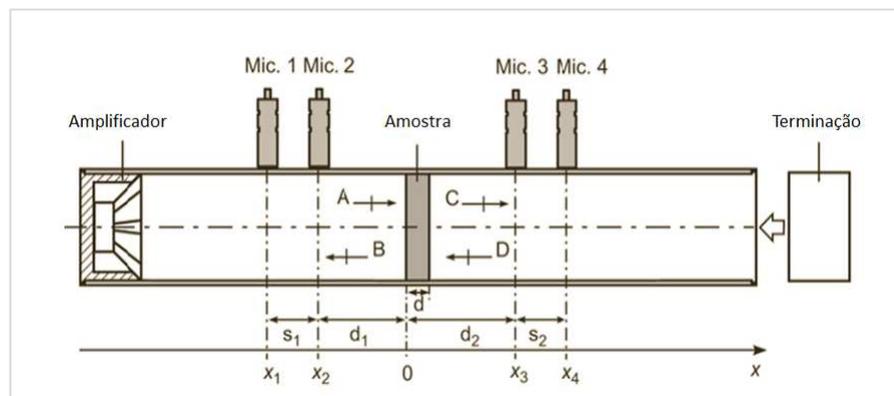


Figura 3.2 - Configuração do tubo de impedância para a determinação da TL (adaptado de Collings e Stewart, 2011)

Na montagem do provete é preciso ter em conta que as amostras a testar não devem estar demasiado apertadas dentro do tubo nem ter folgas excessivas. As amostras analisadas têm um diâmetro de 100 mm. Durante o processo, cada amostra deve ser ensaiada pelo menos três vezes, sendo que a amostra deve ser tirada e colocada novamente dentro do tubo entre cada ensaio. É necessário garantir que a força do sinal da fonte sonora tem sempre mais 10-20 dB do que o ruído de fundo (Vengala, 2007).

Depois de feitas estas verificações, coloca-se a amostra no tubo de impedância e inicia-se o ensaio. No final, os dados obtidos podem ser exportados e tratados em Microsoft Excel. A gama de frequências considerada encontra-se entre os 100Hz e os 1600Hz.

Foram utilizadas duas terminações diferentes no tubo de impedância (Figura 3.3). A primeira terminação é anecoica e combina uma amostra de lã de rocha e uma amostra de poliuretano, com espessuras de 30 mm e 40 mm, respetivamente. A segunda terminação é uma amostra de feltro com 10 mm de espessura. Em cada ensaio é indiferente a ordem de colocação de cada terminação.

Quadro 3.1 - Propriedades das terminações do tubo de impedância

		Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m³)
1ª Terminação	Poliuretano	40	24.8
	Lã de Rocha	30	31.2
2ª Terminação	Feltro	10	10.1



Figura 3.3 - Fotografia do conjunto de terminações utilizadas nos ensaios experimentais

De forma a caracterizar as terminações utilizadas, determinaram-se os seus coeficientes de absorção (α) através do tubo de impedância. A absorção sonora é determinada a partir do método dos dois microfones (ISO 10534-2) e segue o mesmo procedimento descrito para a determinação da perda por transmissão sonora, mas com uma configuração diferente para o tubo de impedância, apresentando apenas as duas extremidades do tubo (Figura 3.4). A Figura 3.5 apresenta as curvas do coeficiente de absorção obtidas para as duas terminações.



Figura 3.4 - Fotografia do tubo de impedância para a determinação da absorção sonora

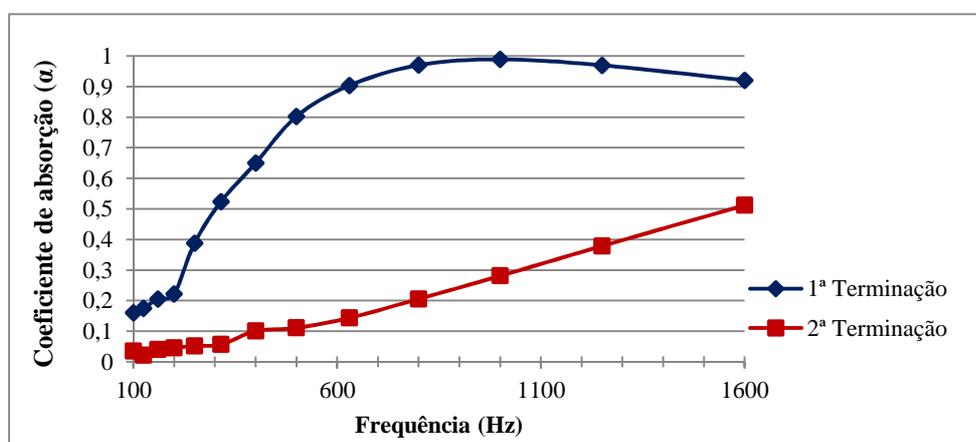


Figura 3.5 - Coeficiente de absorção (α) para as terminações utilizadas

- Metodologia de cálculo

Para a determinação da perda por transmissão sonora, através do método das duas cargas, recorre-se à seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{B_{12}} p_2 \\ p_1 - A_{12} p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{23} & B_{23} \\ C_{23} & D_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{D_{34}}{B_{34}} p_3 + (C_{34} - \frac{D_{34} A_{34}}{B_{34}}) p_4 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

na qual, A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} e D_{ij} representam os quatro polos acústicos dos elementos $i-j$ e p_i representa a pressão sonora, sendo os números 1, 2, 3 e 4 referentes à posição dos microfones, como representado na Figura 3.2. Esta equação contém quatro incógnitas (A_{23} , B_{23} , C_{23} e D_{23}) mas apenas duas equações. De forma a obterem-se duas equações adicionais, é necessário alterar-se a condição da extremidade do tubo (Tao e Seybert, 2003).

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

$$A_{23} = \frac{\Delta_{34}(H_{32a}H_{34b} - H_{32b}H_{34a}) + (H_{32b} - H_{32a})}{\Delta_{34}(H_{34b} - H_{34a})} \quad (12)$$

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

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

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

em que, H_{ij} é calculado a partir da relação entre p_j e p_i , que são medidos, e Δ 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 polos, obtém-se a perda por transmissão através da seguinte expressão:

$$TL = 20 \log \left\{ \frac{1}{2} \left| A_{23} + \frac{B_{23}}{\rho c} + \rho c \cdot C_{23} + D_{23} \right| \right\} + 10 \log \left(\frac{S_i}{S_0} \right) \quad (13)$$

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

3.2 Descrição dos materiais analisados

Os trabalhos experimentais realizados estiveram focados na determinação do parâmetro de perda por transmissão sonora em vários tipos de materiais diferentes. Alguns destes materiais foram, posteriormente, aplicados em soluções multicamada. Todas estas amostras a ensaiar no tubo de impedância apresentam um diâmetro de 10 cm.

Os vários materiais analisados podem ser divididos nos seguintes grupos:

- MDF, platex, Aglomerado de madeira, Aglomerado flaxboard
- Lã mineral
- Metais (aço, alumínio e chumbo)
- Espumas
- Membrana acústica
- Aglomerados com cortiça

3.2.1 MDF, platex, Aglomerado de madeira, Aglomerado flaxboard

Este grupo de materiais reúne quatro variedades de produtos derivados de madeira, com espessuras que variam entre os 3,2 mm e os 37 mm. As diferentes composições físicas das amostras refletem-se nos valores de massa volúmica que se podem observar no Quadro 3.2. As amostras de MDF e Platex têm espessuras mais reduzidas, mas apresentam massas volúmicas superiores. São ambos materiais bastante resistentes e homogêneos, que resultam de processos de aglutinação de fibras de madeira. No caso do MDF é adicionada uma resina sintética durante a compactação, enquanto que no platex, as fibras de madeira são resinosas e são depois comprimidas a temperaturas e pressões muito elevadas. O Aglomerado de madeira é uma placa com três camadas, composta por partículas de madeira prensadas a quente, com resinas especiais para que a superfície da placa fique mais densa que o centro. O flaxboard é um material constituído por caules de plantas usadas na produção de linho (mínimo 70%), podendo conter também fibras de madeira e serradura. Estes materiais são aglutinados através de resinas sintéticas.

Quadro 3.2 - Propriedades das amostras de MDF, Platex, Aglomerado de madeira e Aglomerado flaxboard

Ref. ^a	Material	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)
A	MDF	3,2	871,0
B	MDF	5	923,1
C	Platex	3,3	928,7
D	Aglomerado de madeira	8	722,6
E	Aglomerado flaxboard	15	468,6
F	Aglomerado flaxboard	19	462,4
G	Aglomerado flaxboard	25	468,6
H	Aglomerado de madeira	37	501,7



Figura 3.6 - Amostras de MDF, Plutex, Aglomerado de madeira e Aglomerado flaxboard

3.2.2 Lã mineral (lã de rocha e lã de vidro)

Este tipo de materiais é muito utilizado como isolamento térmico e acústico. Neste trabalho foram analisadas muitas amostras diferentes, de fabricantes, espessuras e massas volúmicas variadas. Dependendo do tratamento final que é empregue em fábrica, em termos de grau de compactação, a lã pode ser flexível ou rígida.

Existem dois tipos de produtos de lã mineral: a lã de rocha e a lã de vidro. A lã de rocha é fabricada a partir de rochas basálticas e outros minerais e a lã de vidro a partir de areia, vidro reciclado ou carbonato de cálcio. Estes materiais são fundidas e centrifugados, transformando-se em filamentos, que são depois aglomeradas com resinas orgânicas e óleos impermeabilizantes para obter um produto semelhante à lã.

Quadro 3.3 - Propriedades das amostras de Lã Mineral

Fabricante	Material	Espessura (mm)	Ref. ^a	Massa Volúmica (kg/m ³)
Rocterm	Lã de rocha	50	GC70	62,7
Rocterm	Lã de rocha	50	TVF55	55,8
Rocterm	Lã de rocha	50	TVF70	63,4
Rocterm	Lã de rocha	40	PN40	49,3
Rocterm	Lã de rocha	50	PN55	59,6
Rocterm	Lã de rocha	50	PN100	103,7
Isover	Lã de rocha	50	Acustilane 70	85,9
Isover	Lã de vidro	90	IBR	12,7
Ursa Uralita	Lã de vidro	60	P4222	26,6
Ursa Uralita	Lã mineral	30	Ursa terra plus	23,3
Ursa Uralita	Lã mineral	20	Ursa terra sol 20	72,4
Ursa Uralita	Lã mineral	45	Ursa terra 45 (Painel)	19,0
Ursa Uralita	Lã mineral	45	Ursa terra 45 (Rolo)	19,8



Figura 3.7 - Amostras de lã rocha, lã de vidro e lã mineral

3.2.3 Metais (aço, alumínio e chumbo)

Os metais analisadas abrangeram amostras de alumínio, aço e chumbo, com espessuras bastante reduzidas, compreendidas entre os 0,5 e os 2 mm. Este tipo de materiais pode apresentar grandes vantagens em termos de isolamento acústico.

O alumínio é um metal muito versátil, leve mas resistente. Apresenta uma boa elasticidade que o torna fácil de trabalhar. No entanto, a sua melhor característica é a resistência à corrosão. O aço é uma liga de ferro e carbono, que desempenha um papel muito importante na construção. Trata-se de um material natural, totalmente reciclável que possui uma elevada resistência estrutural. O chumbo é um material muito utilizado, colocado junto a um material absorvente, para reforçar o isolamento sonoro de divisórias leves. A sua elevada massa volúmica permite aumentar a massa da parede.

Quadro 3.4 - Propriedades das amostras de Alumínio, Aço e Chumbo

Material	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Alumínio	0,5	2617,8
	1,0	2647,1
	1,5	2631,4
Aço	0,5	7759,1
	1,0	7673,8
	2,0	7622,2
Chumbo	0,5	10743,6
	1,0	11480,8



Figura 3.8 - Amostras de alumínio, aço e chumbo

3.2.4 Espumas (Basotect, Aglomex e PU)

O estudo de espumas baseou-se na análise de amostras de Basotect, Aglomex e PU (espuma de poliuretano). Estes materiais desempenham um papel muito importantes no contexto das soluções multicamada. São materiais muito porosos e com grande aplicação em sistemas de absorção sonora.

O Aglomex é um produto com propriedades acústicas consideráveis que resulta da reutilização de espumas de poliuretano prensadas e cortadas com as densidades e espessuras pretendidas. Este material é utilizado fundamentalmente no isolamento acústico a sons aéreos e sons de percussão, na correção acústica de espaços interiores. As amostras de Aglomex analisadas possuem uma massa volúmica muito superior à dos outros dois materiais.

Quadro 3.5 - Propriedades das amostras de Aglomex D60FR, D90FR e D200FR

Material	Ref. ^a	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Aglomex	D60FR	10	63,7
		20	67,4
		30	72,6
	D90FR	10	76,6
		20	86,6
		30	90,7
	D200FR	10	193,7
		20	203,5
		30	189,2



Figura 3.9 - Amostras de Aglomex D60FR (10 mm, 20 mm, 30 mm)



Figura 3.10 - Amostras de Aglomex D90FR (10 mm, 20 mm, 30 mm)



Figura 3.11 - Amostras de Aglomex D200FR (10 mm, 20 mm, 30 mm)

O Basotect é uma espuma muito flexível, leve e com células abertas, produzido a partir de resina de melanina. É um material que mantém as suas propriedades físicas numa grande gama de temperaturas, apresentando boas propriedades de resistência ao fogo. O Basotect G possui uma tonalidade mais clara.

Quadro 3.6 - Propriedades das amostras de Basotect

Material	Ref. ^a	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Basotect	G	10	10,8
		20	10,7
		30	9,8
	UF	10	8,4
		20	7,6
		30	7,2



Figura 3.12 - Amostras de Basotect G e Basotect UF

O poliuretano é um isolamento térmico e acústico muito eficaz. É leve e muito durável. Possui uma grande flexibilidade e uma elevada resistência à compressão, voltando sempre à forma original. É muito utilizado como revestimento interior de cabines insonorizadas.

Quadro 3.7 - Propriedades das amostras de PU

Material	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Espuma PU	méd. 15	30,0
	30	27,5



Figura 3.13 - Amostras de PU

3.2.5 Membrana acústica

A membrana acústica é uma membrana betuminosa, formada por lâminas de asfalto modificadas, de forma a obter um elevado desempenho acústico. Como se pode verificar através do Quadro 3.8, foram ensaiadas amostras com espessuras de 2 mm e 4 mm. Trata-se de um material extremamente denso e com uma elevada plasticidade que permite obter uma grande atenuação do ruído de baixa frequência produzido pela ressonância entre painéis de gesso-laminado. É normalmente utilizada para substituir as placas de chumbo.

Quadro 3.8 - Propriedades das amostras de membrana acústica

Material	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Membrana acústica	2,0	1617,0
	4,0	1450,9

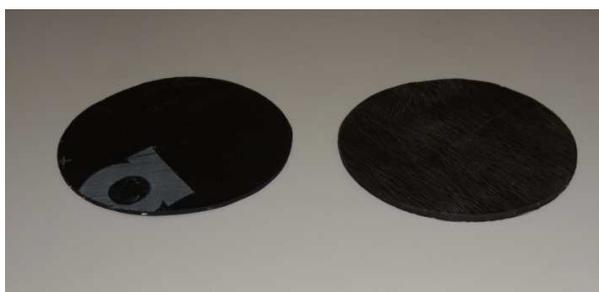


Figura 3.14 - Amostras de membrana acústica Danosa (2 mm e 4 mm)

3.2.6 Aglomerados com cortiça

As amostras de Aglomerados com cortiça apresentadas no Quadro 3.9 contém produtos de cortiça simples e produtos com adição de borracha ou poliuretano. Uma das amostras tem a particularidade de ter uma superfície irregular, com uma espessura média de 5 mm. As espessuras das amostras variam entre os 3 mm e os 10 mm.

Os Aglomerados de cortiça são isolamentos térmicos e acústicos bastante eficazes, apresentam uma durabilidade ilimitada e derivam da cortiça que é uma matéria-prima totalmente natural e renovável. A sua produção consiste na aglutinação dos grânulos da cortiça através, exclusivamente, da sua expansão volumétrica e da exsudação das suas resinas naturais, a partir da injeção de vapor de água a uma temperatura de 300°C.

Quadro 3.9 - Propriedades das amostras de Aglomerados de cortiça

Material	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Aglomerado de cortiça	5	188,7
	10	152,8
Aglomerado de cortiça e PU	5	305,6
Aglomerado de cortiça e borracha	5	606,0
	3	676,9
Aglomerado de cortiça perfilado	méd. 5mm	259,7



Figura 3.15 - Amostras de Aglomerados de cortiça

3.3 Efeito das condições de fixação da amostra no tubo

O conhecimento da existência de um fenómeno relacionado com as condições de fixação da amostra no interior do tubo de impedância, esteve na origem da realização de um conjunto de ensaios experimentais adicional. Foram então efetuados ensaios para a determinação da perda por transmissão sonora, num determinado grupo de amostras, de forma a analisar este tema de uma forma mais aprofundada. Como foi descrito anteriormente, este fenómeno caracteriza-se pela obtenção de valores de perda por transmissão sonora elevados, principalmente para frequências mais baixas, que não retratam verdadeiramente as propriedades do material em causa.

Cada amostra foi ensaiada quatro vezes, sendo que, de cada vez, esta se encontra um pouco mais apertada dentro do tubo de impedância. Existem assim quatro graus de selagem diferentes para as amostras. Foi considerada uma situação inicial, mais solta (*Loose*), em que a amostra não se encontra apertada dentro do tubo, e a partir da qual se retiraram os resultados de TL característicos para as diversas amostras. Para obter os outros graus de selagem mais apertados, a amostra é progressivamente envolvida com uma fita adesiva fina, ao longo de todo o seu perímetro. O grau de médio aperto (*Medium Tight*) tem uma camada de fita, o grau apertado (*Tight*) tem duas camadas de fita e, por sua vez o modo mais apertado (*Extra Tight*)

apresenta três camadas de fita adesiva em torno da amostra. As amostras selecionadas para integrar esta análise foram as amostras de Aglomerado de madeira de 8 mm, Aglomerado flaxboard de 15 mm, Aglomerado flaxboard de 25 mm, Aglomerado de madeira 37 mm e o Aglomex D200FR de 30 mm de espessura.

A Figura 3.16 refere-se aos resultados obtidos nos ensaios realizados à amostra de Aglomerado flaxboard de 25 mm (G). A partir destes resultados, é possível confirmar a existência do fenómeno de *clamping effect* mencionado no capítulo 2, no trabalho de Collings e Stewart (2011). De uma forma geral, os valores de TL obtidos aumentam, à medida que a amostra se encontra mais apertada dentro do tubo e que, relativamente à amostra mais solta, as restantes curvas são mais irregulares. As curvas correspondentes às condições *Medium Tight* e *Tight* acabam por apresentar um decréscimo de valores de TL nas frequências mais altas, o que contraria a ideia estabelecida de que os resultados do isolamento acústico de divisórias aumentam com o aumento da frequência. Também se verifica que, com o aumento da frequência, as amostras mais apertadas tendem a convergir para um mesmo valor de TL.

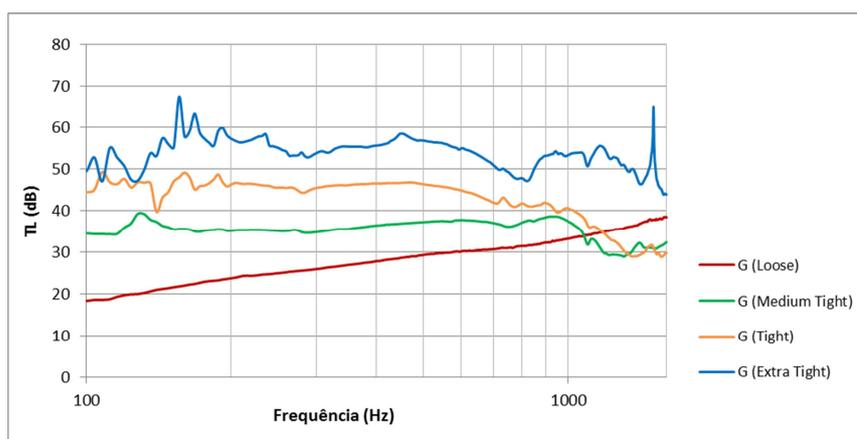


Figura 3.16 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomerado flaxboard de 25 mm (G) para condições de fixação: *Loose*; *Medium Tight*, *Tight* e *Extra Tight*

O gráfico da Figura 3.17, que corresponde à amostra de Aglomerado de madeira de 37 mm (H), apresenta, de uma forma geral, as mesmas particularidades observadas no gráfico anterior. Mais uma vez se demonstra que, o facto de se colocar um provete no tubo de impedância que esteja demasiado justo, provoca a obtenção de valores com grandes discrepâncias relativamente aos valores corretos. Neste caso, a partir de um frequência de 700Hz, a amostra *Medium Tight* coincide praticamente com a curva *Loose*, verificando-se a mesma situação para a amostra *Tight*, a partir dos 1100 Hz, o que vem confirmar a convergência das curvas referida em cima e a ocorrência de maiores variações de valores de perda por transmissão sonora para frequências mais baixas.

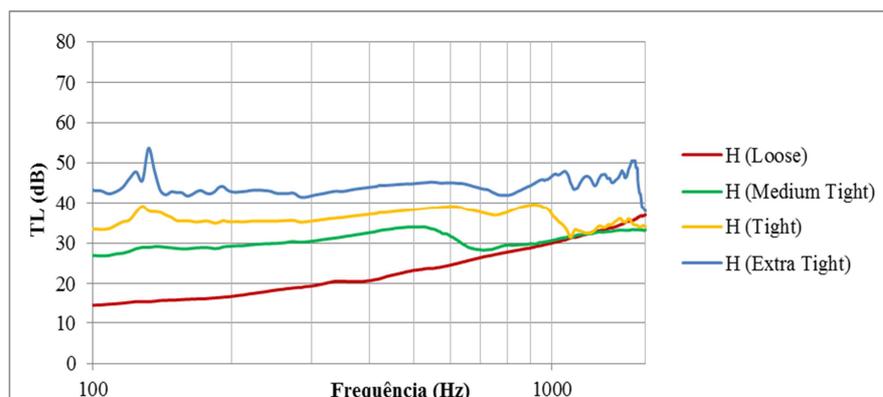


Figura 3.17 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomerado de madeira de 37 mm (H) para condições de fixação: *Loose*; *Medium Tight*, *Tight* e *Extra Tight*

Na Figura 3.18 encontram-se os resultados de uma amostra de Aglomex D200FR de 30 mm que foi ensaiada para tentar avaliar a ocorrência deste fenômeno em materiais absorventes. Neste caso, foram consideradas apenas três condições de fixação para a amostra. A amostra inicial corresponde a um grau muito apertado (*Extra Tight*), sendo que as amostras mais folgadas são obtidas a partir do desbaste desta amostra inicial. Como se trata de uma espuma que é um material muito flexível, não foi possível registrar diferenças significativas entre os resultados obtidos para as diferentes situações. Conclui-se então que o fenômeno de *clamping effect* não se manifesta neste tipo de materiais.

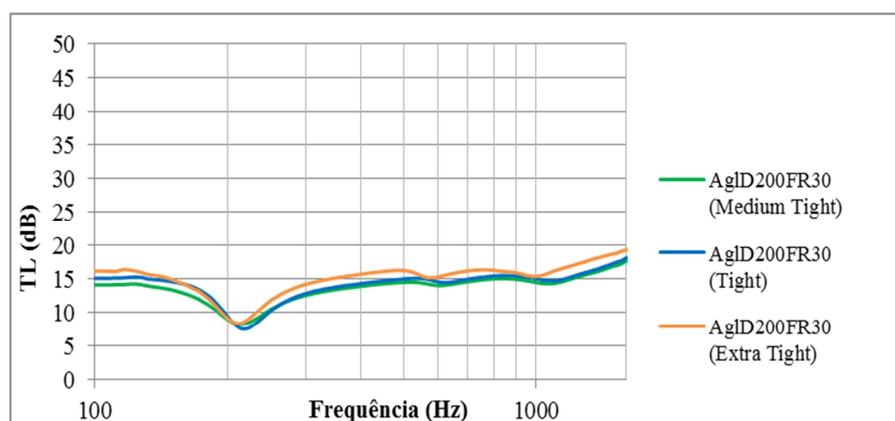


Figura 3.18 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomex D200FR 30mm, para condições de fixação: *Medium Tight*, *Tight* e *Extra Tight*

O gráfico da Figura 3.19 apresenta os resultados obtidos para a amostra de Aglomerado de madeira de 8 mm (D), que se trata portanto de uma amostra com uma espessura mais reduzida que as restantes amostras analisadas anteriormente. Os ensaios realizados permitiram observar mais uma vez o fenómeno relacionado com as condições de fixação da amostra, sendo que neste caso, a partir dos 400 Hz se observa uma clara diminuição dos valores de TL. O traçado das curvas apresenta uma depressão acentuada nas frequências mais altas que parece deslocar-se para a direita, à medida que a amostra se encontra mais apertada dentro do tubo.

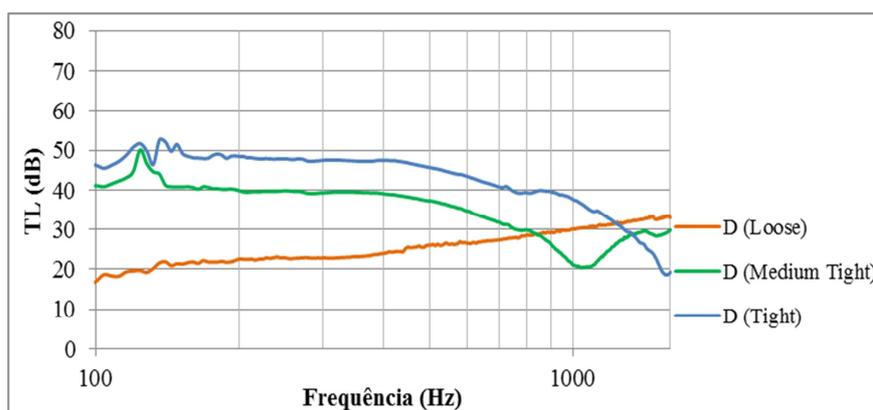


Figura 3.19 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomerado de madeira de 8 mm (D) para condições de fixação: *Loose*; *Medium Tight* e *Tight*

Os resultados obtidos para a amostra de Aglomerado flaxboard de 15 mm (E) encontram-se representados na Figura 3.20. Para esta amostra, os comportamentos das curvas para as condições de fixação *Medium Tight*, *Tight* e *Extra Tight* aproximam-se mais do traçado da curva *Loose*, não havendo variações de valores de TL nas baixas frequências tão elevadas, como nas outras amostras. A curva correspondente à condição *Extra Tight*, apresenta um aumento acentuado entre os 800 e os 1100 Hz, mas de seguida torna a decrescer de forma abrupta, convergindo para as restantes curvas, como se observou também em gráficos anteriores.

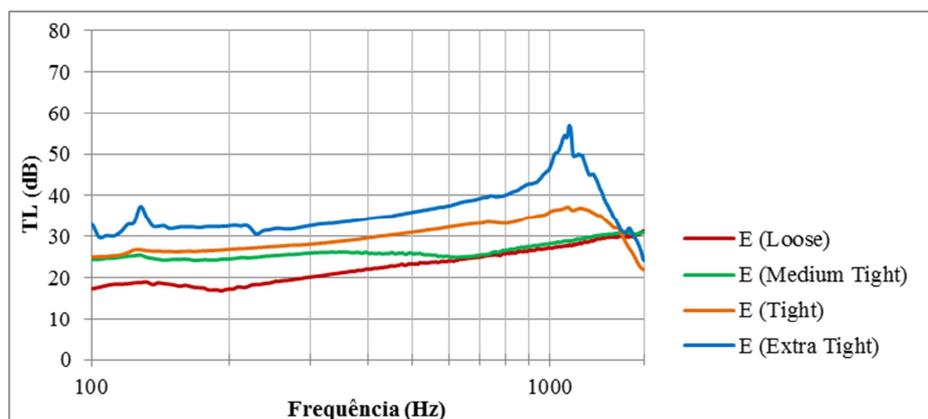


Figura 3.20 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para a amostra de Aglomerado flaxboard de 15 mm (E), para condições de fixação: *Loose*; *Medium Tight*, *Tight* e *Extra Tight*

Seguidamente, estudou-se o efeito das condições de fixação da amostra, para uma situação em que se adiciona uma amostra de Aglomex no tardo das amostras de Aglomerados consideradas. Com a adição do material resiliente, no qual o *clamping effect* não se manifestou, pretende-se averiguar se ocorrem alterações no comportamento das amostras de Aglomerados, relativamente a este fenómeno.

O gráfico da Figura 3.21 contém os resultados da perda por transmissão sonora para o caso em que se acrescenta uma camada de Aglomex D200FR de 30 mm no tardo da amostra de Aglomerado de madeira de 8 mm (D). As curvas a tracejado representam a amostra de Aglomerado de madeira de 8 mm sem a camada de Aglomex. De uma forma generalizada, não parecem existir melhorias significativas com a adição da camada de material resiliente. No entanto, para a curva *Loose* observa-se um aumento dos valores de TL, a partir dos 500 Hz, e tanto para a curva *Medium Tight* como para a *Tight*, deixa de se verificar a descida significativa dos valores de TL nas frequências mais altas.

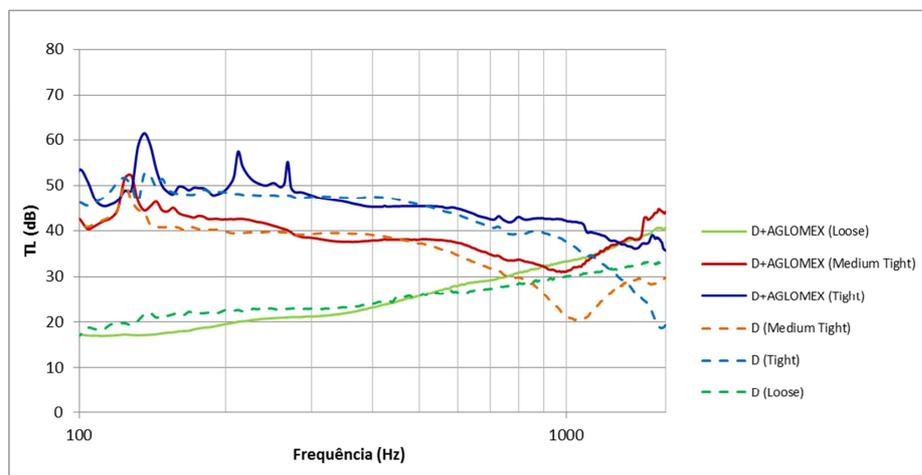


Figura 3.21 - Valores de TL para a amostra Aglomerado de madeira de 8mm (D) com Aglomex D200FR 30mm, para condições de fixação: *Loose*; *Medium Tight* e *Tight*

As Figuras 3.22 e 3.23 contêm gráficos com os resultados das amostras de Aglomerados flaxboard de 15 mm (E) e 25 mm (G), respectivamente. Em ambos os gráficos, a adição da camada de Aglomex, origina translações positivas relativamente às curvas originais, em praticamente todas as curvas. No final do gráfico das amostras de Aglomerado flaxboard de 15 mm, verifica-se que todas as curvas com Aglomex convergem para um valor de sensivelmente 40 dB. As curvas das amostras de Aglomerado flaxboard de 25 mm apresentam valores de TL superiores, com picos de 70 dB e 80 dB, para frequências de 160 Hz e 1500 Hz, respectivamente. Neste gráfico, da Figura 3.23, a partir dos 800 Hz, a curva da amostra *Tight* apresenta um grande afastamento relativamente à curva inicial, sendo que ao longo de toda a gama de frequências se encontra próxima da curva da condição *Extra Tight*.

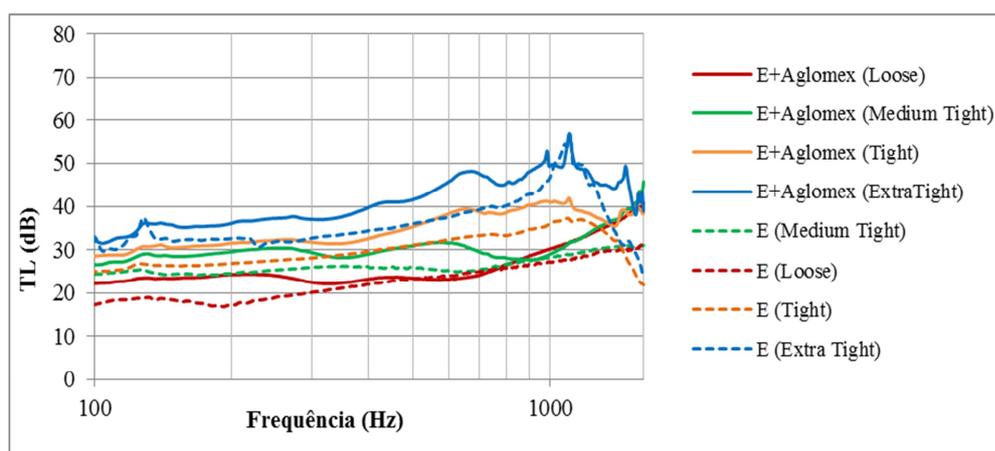


Figura 3.22 - Valores de TL para a amostra de Aglomerado flaxboard de 15 mm (E) com Aglomex D200FR 30mm, para condições de fixação: *Loose*; *Medium Tight*, *Tight* e *Extra Tight*

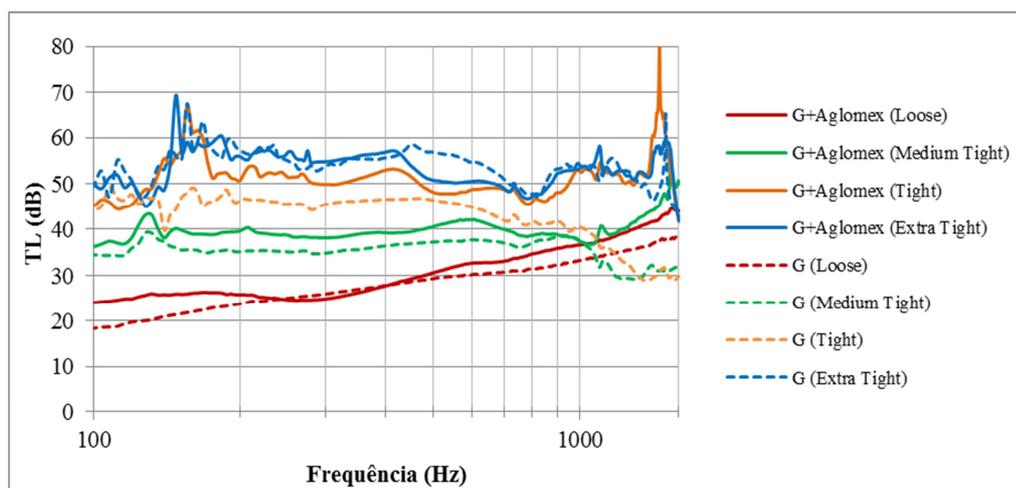


Figura 3.23 - Valores de TL para a amostra de Aglomerado flaxboard de 25 mm (G) com Aglomex D200FR 30 mm, para condições de fixação: *Loose*; *Medium Tight*, *Tight* e *Extra Tight*

A Figura 3.24 corresponde à amostra de Aglomerado de madeira de 37 mm (H) com Aglomex D200FR de 30 mm. Para esta amostra ocorre uma melhoria geral ao longo de toda a gama de frequências. Isto deve-se ao facto de, talvez, já no estudo inicial, sem Aglomex, esta amostra apresentar um comportamento mais constante e regular. No entanto, para valores de frequência mais elevados, a curva *Extra Tight* apresenta um comportamento muito irregular, com vários picos.

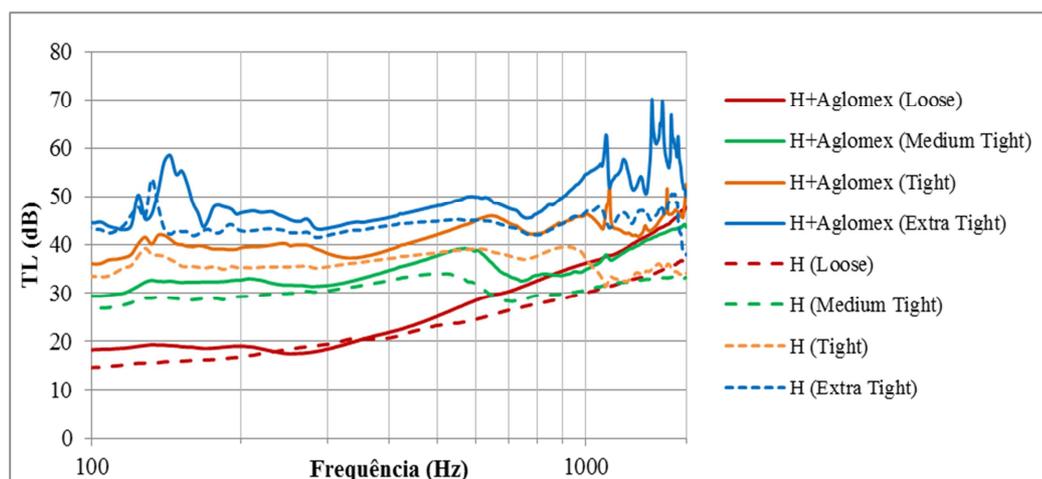


Figura 3.24 - Valores de TL para a amostra de Aglomerado de madeira de 37 mm (H) com Aglomex D200FR 30mm, para condições de fixação: *Loose*; *Medium Tight*, *Tight* e *Extra Tight*

Sumariamente, as amostras (G) e (H) apresentaram, de uma forma geral, resultados semelhantes, verificando-se que, à medida que se colocam mais camadas de fita em torno das amostras, os valores de perda por transmissão sonora obtidos aumentam, decrescendo depois com o aumento da frequência. Os ensaios realizados a uma amostra de Aglomex D200FR provaram que o fenómeno de *clamping effect* não se manifesta em materiais absorventes. Quando esta amostra foi colocada no tardo das outras amostras estudadas, verificaram-se melhorias generalizadas mas de valores reduzidos. Na amostra (D), que tem uma espessura mais reduzida, existe uma clara presença do fenómeno provocado pelas condições de fixação da amostra, uma vez que os valores de TL chegam mesmo a decrescer na zona de frequências mais elevadas, ao contrário da curva de referência da amostra mais solta.

Se compararmos os resultados obtidos nestes ensaios experimentais com o trabalho realizado por outros autores como Collings e Stewart (2011), podemos encontrar várias semelhanças entre os dois grupos de resultados, derivadas da influência das condições de fixação da amostra no interior do tubo de impedância. Desta forma, comprovada a existência deste fenómeno, é fundamental que os resultados de perda por transmissão sonora sejam determinados tomando as devidas precauções para evitar a sua ocorrência e, assim, obter valores mais precisos e verdadeiros.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais realizados neste trabalho têm como principal objetivo desenvolver e analisar soluções multicamada com potencial para serem integrados em sistemas destinados ao tratamento acústico de espaços. De forma a estas soluções multicamada poderem ser realmente aplicadas, para além do cumprimento de determinados requisitos acústicos, é necessário que apresentem também espessuras reduzidas, sem se tornarem demasiado deformáveis. As amostras analisadas contemplam diversos materiais, com propriedades físicas e acústicas muito distintas. Numa primeira fase, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados a materiais simples e, posteriormente, os resultados relativos às soluções multicamada desenvolvidas. No final, realiza-se uma comparação dos valores de perda por transmissão sonora obtidos experimentalmente, com os valores previstos pelo modelo da lei da massa já mencionado.

4.1 Apresentação e análise dos resultados obtidos

Para a determinação experimental do parâmetro de perda por transmissão sonora, no tubo de impedância, usou-se o método das duas cargas já descrito anteriormente. Nestes ensaios laboratoriais, a gama de frequências encontra-se no intervalo entre os 100Hz e os 1600Hz. Os valores do parâmetro de perda por transmissão sonora apresentados resultam da média dos resultados obtidos para os três ensaios realizados em cada amostra.

No capítulo anterior foi abordado um fenómeno relacionado com as condições de fixação da amostra no interior do tubo de impedância, que origina resultados de perda por transmissão sonora incorretos, quando as amostras se encontram demasiado pressionadas dentro do tubo. As amostras foram então tratadas até encaixarem perfeitamente dentro do tubo, de forma garantir a obtenção de valores precisos.

4.1.1 Materiais simples

- MDF, Aglomerado de madeira e Aglomerado flaxboard

A Figura 4.1 apresenta os resultados da perda por transmissão sonora para as amostras de MDF com 3,2 mm e 5 mm, e para a amostra de platex com 3,3 mm. Podemos observar que todas as amostras apresentam um aumento da TL com o aumento da frequência e quebras

mais acentuadas nas frequências mais baixas. Comparando as amostras entre si, elas têm um comportamento similar ao longo da gama de frequência mas a amostra de MDF com espessura de 5 mm, que é a amostra mais espessa deste grupo, é a que apresenta melhores resultados. A amostra de MDF de 3,2 mm e a amostra de platex de 3,3 mm têm aproximadamente a mesma espessura mas, tendo em conta a massa volúmica, seria de esperar que a amostra de platex tivesse resultados mais elevados, estando abaixo da amostra de MDF de 3,2 mm até aos 600 Hz.

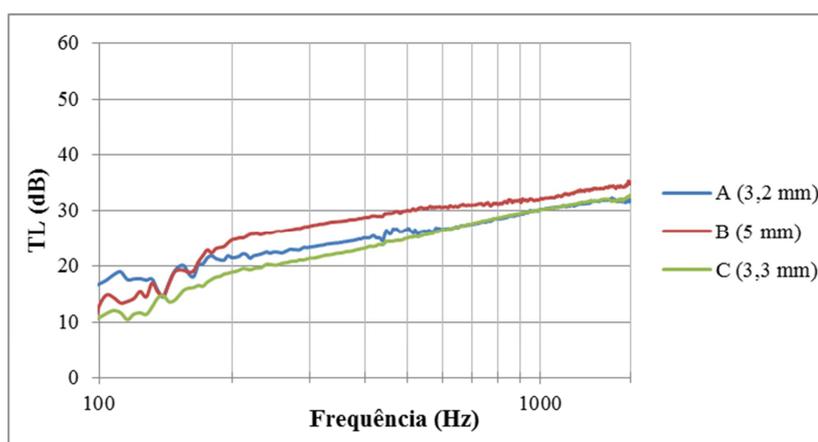


Figura 4.1 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de MDF de 3,2 mm (A), MDF de 5mm (B) e platex de 3,3 mm (C)

No gráfico da Figura 4.2 podemos observar as curvas da perda por transmissão sonora para as amostras de Aglomerado de madeira de 8 mm, Aglomerado flaxboard de 15 mm, Aglomerado flaxboard de 19 mm, Aglomerado flaxboard de 25 mm e Aglomerado de madeira de 37 mm. As quebras de isolamento nas frequências mais baixas são menos pronunciadas que no gráfico anterior. As amostras de Aglomerados flaxboard de 15 mm, 19 mm e 25 mm, apresentam comportamentos semelhantes por pertencerem ao mesmo material, parecendo mesmo paralelas a partir dos 200 Hz. O aglomerado flaxboard de 19 mm apresenta os resultados de perda por transmissão sonora mais baixos, sendo que se trata também da amostra com uma massa volúmica mais reduzida. No que diz respeito às amostras de Aglomerado de madeira, que apresentam espessuras muito diferentes entre si, as duas amostras acabam por atingir valores de TL aproximados, porque, apesar de a placa com 8 mm ser muito mais fina, tem também uma massa volúmica muito superior à amostra mais espessa. Este gráfico reflete assim a importância que a componente da massa volúmica das amostras representa nos valores da perda por transmissão sonora.

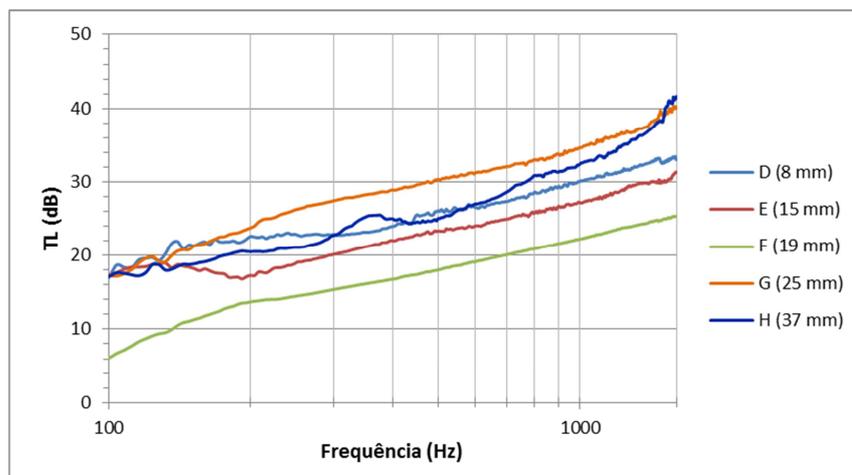


Figura 4.2 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Aglomerado de madeira de 8mm (D), Aglomerado flaxboard de 15 mm (E), Aglomerado flaxboard de 19 mm (F), Aglomerado flaxboard de 25 mm (G) e Aglomerado de madeira de 37 mm (H)

- Lã mineral

Na Figura 4.3 é possível observar uma quebra de isolamento acentuada em cada uma das curvas, situada numa zona central da gama de frequências. Podemos verificar que essa quebra se desloca para a direita à medida que a massa volúmica das amostras aumenta. De uma forma geral, os valores de TL aumentam com o aumento da massa volúmica da amostra. As amostras apresentam valores de TL bastante inferiores aos valores das amostras anteriores e não apresentam um comportamento crescente ao longo da gama de frequências.

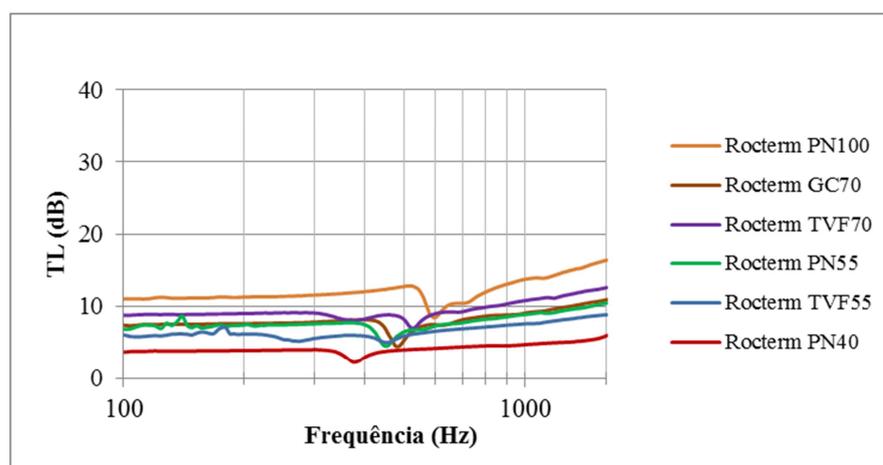


Figura 4.3 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Rocterm

Para as duas amostras de lã mineral apresentadas na Figura 4.4 podemos tirar as mesmas conclusões do gráfico anterior, uma vez que, com o aumento da massa volúmica ocorre um aumento do isolamento e um deslocamento da maior quebra de isolamento para a direita.

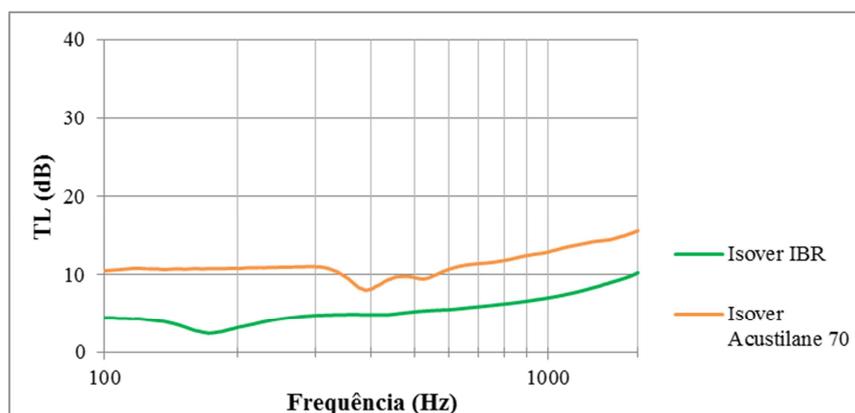


Figura 4.4 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Iover

A Figura 4.5 contém os resultados obtidos para as amostras de lã de vidro e lã mineral da marca Ursa Terra, podendo observar-se um valor máximo de aproximadamente 10 dB. A amostra de Ursa Terra Sol II, que apresenta valores mais elevados, é a que tem uma massa volúmica bastante superior à das restantes amostras. A lã mineral Ursa Uralita P4222, apesar de ter uma massa volúmica relativamente baixa, apresenta um comportamento semelhante ao da amostra mencionada anteriormente. As restantes amostras têm um comportamento bastante similar entre si, devido às semelhanças entre os valores de massa volúmica e espessura. Estas também apresentam perdas de isolamento muito menos acentuadas que as primeiras, observando-se comportamentos bastante lineares.

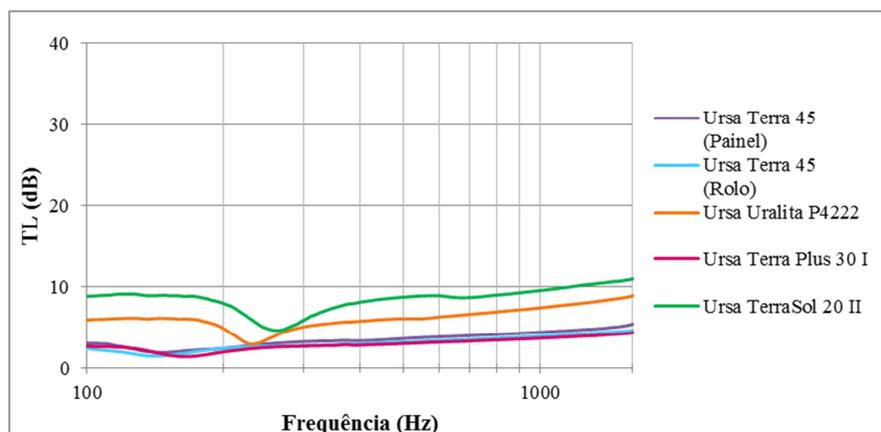


Figura 4.5 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Ursa Terra

- Metais (aço, alumínio e chumbo)

A Figura 4.6 contém os resultados obtidos para amostras de metais. Foram ensaiadas amostras de alumínio, aço e chumbo, com espessuras compreendidas entre os 0,5 mm e os 2,0 mm. As curvas têm comportamentos estáveis, sendo que amostras pertencentes ao mesmo material apresentam curvas sensivelmente paralelas entre si. Os resultados mais elevados foram obtidos para a amostra mais espessa de aço. A partir dos 160Hz, a amostra de chumbo com 1,0 mm, que tem uma massa volúmica bastante superior à dos restantes materiais, ultrapassa a amostra de aço com a mesma espessura. A curva com resultados inferiores pertence ao alumínio com 0,5 mm, que é a amostra com a massa volúmica mais reduzida. Não se observam quebras de isolamento muito significativas.

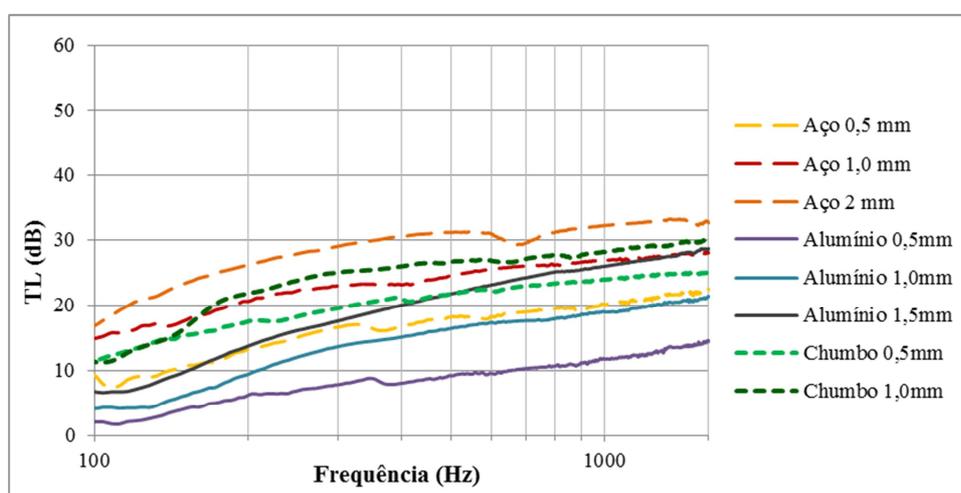


Figura 4.6 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de aço, alumínio e chumbo

- Espumas (Basotect, Aglomex e PU)

O gráfico da Figura 4.7 engloba os resultados de perda por transmissão sonora de todas as amostras de Basotect (G e UF), para as espessuras de 10 mm, 20 mm e 30 mm. Estas amostras apresentam valores extremamente reduzidos, atingindo um máximo de aproximadamente 4 dB nas frequências mais elevadas. Observam-se quebras de valores do parâmetro TL mais pronunciadas para três das amostras: Basotect UF 20 mm, Basotect UF 30 mm e Basotect G 30 mm. Observa-se mais uma vez a existência de curvas sensivelmente paralelas para materiais iguais com espessuras diferentes.

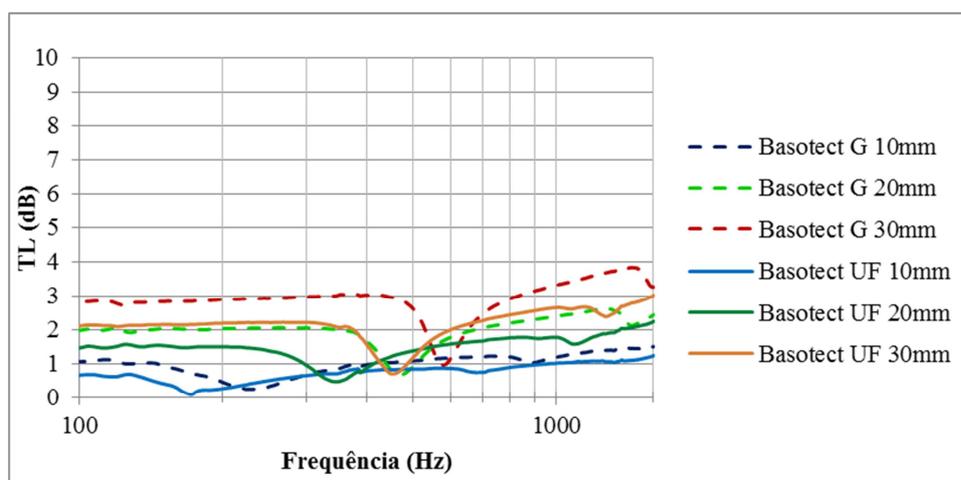


Figura 4.7 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Basotect

Na Figura 4.8 encontram-se os resultados obtidos para as várias amostras de Aglomex analisadas. As amostras de Aglomex apresentam-se com três diferentes massas volúmicas (60, 90 e 200 kg/m³) e três diferentes espessuras (10 mm, 20 mm e 30 mm). O valor mais elevado de TL é de aproximadamente 20 dB. As amostras menos densas apresentam resultados extremamente reduzidos. As amostras com valores de massa volúmica superiores têm resultados mais elevados mas apresentam quebras significativas que vão diminuindo com o aumento da frequência.

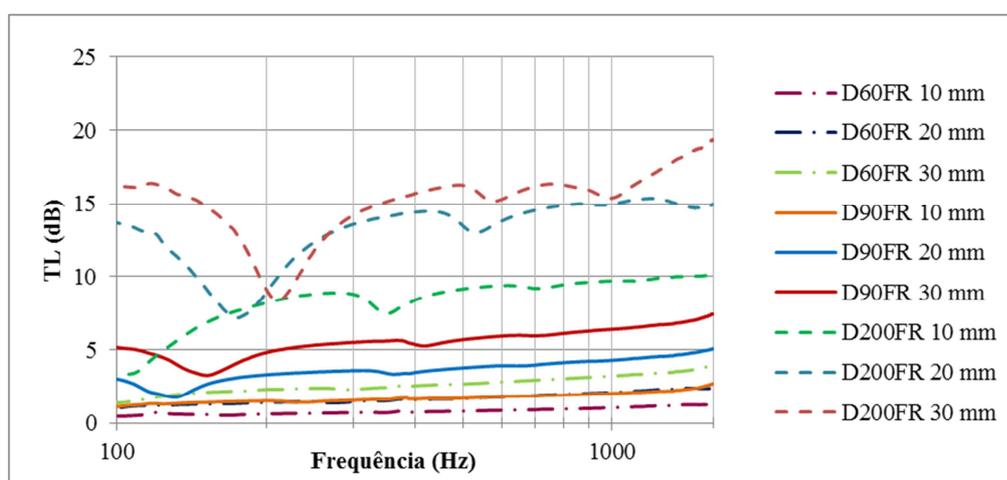


Figura 4.8 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Aglomex

O gráfico da Figura 4.9 contém as curvas que correspondem a duas amostras de Poliuretano (PU) perfilado com 15 mm de espessura. Depois de ensaiada individualmente, juntaram-se duas amostras perfiladas de modo a obter-se uma amostra lisa com 30 mm de espessura. Os resultados obtidos são novamente muito reduzidos, sendo que, como seria de esperar, existe um aumento da perda por transmissão sonora quando duplica a espessura da amostra.

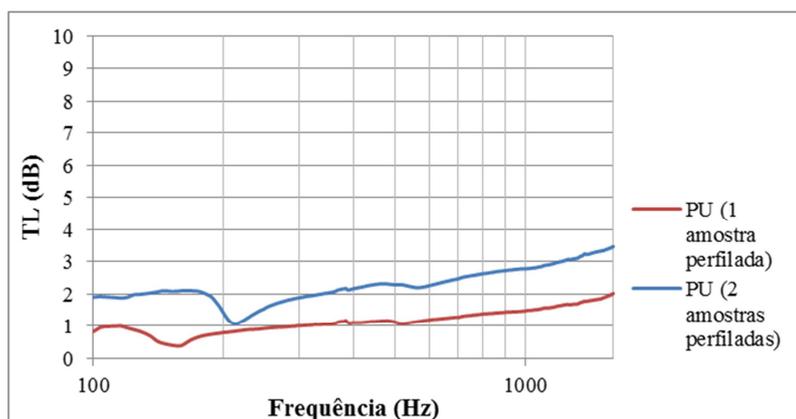


Figura 4.9 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de PU

- Membrana acústica

A Figura 4.10 apresenta os valores de perda por transmissão sonora para amostras de membrana acústica, da marca Danosa, com espessuras de 2 mm e 4 mm. Este material possui uma massa volúmica bastante superior a todos os outros materiais estudados, com exceção dos metais. A partir dos 250 Hz, ambas as amostras apresentam um comportamento muito estável, sem quebras, com o aumento dos valores de TL com o aumento da frequência. As quebras que se observam nas frequências mais baixas não são muito expressivas.

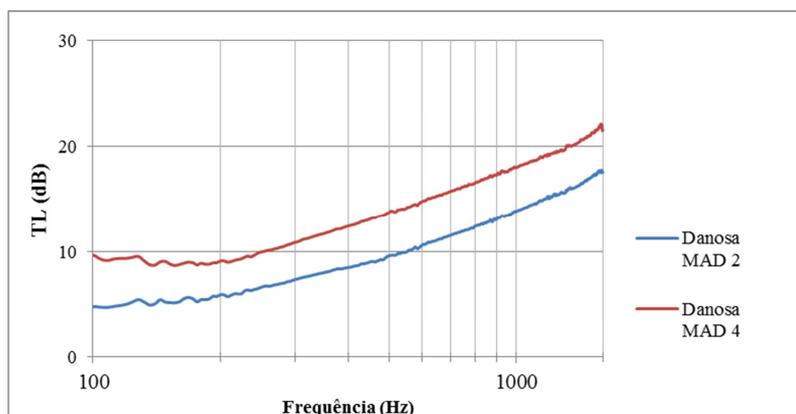


Figura 4.10 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de membrana acústica

- Aglomerados com cortiça

A Figura 4.11 contém os resultados para as amostras de Aglomerados de cortiça. A amostra de Aglomerado de cortiça e borracha (5 mm), apesar dos valores baixos, apresenta um comportamento muito estável, praticamente constante. Uma vez que este tipo de material tem uma massa volúmica superior, estes valores tão reduzidos são um pouco inesperados. O mesmo material, mas considerando a amostra com 3 mm, tem um comportamento bastante superior. A amostra de Aglomerado de cortiça de 10 mm, apresenta uma enorme quebra de isolamento, na zona dos 300 Hz, o que não acontece em nenhuma das restantes amostras. Além disso, apesar de ter o valor de massa volúmica mais baixo, a sua curva encontra-se acima da curva da amostra de Aglomerado de cortiça com borracha (3 mm). As restantes amostras possuem curvas com traçados semelhantes e que condizem com a condição do aumento do isolamento com o aumento da massa volúmica.

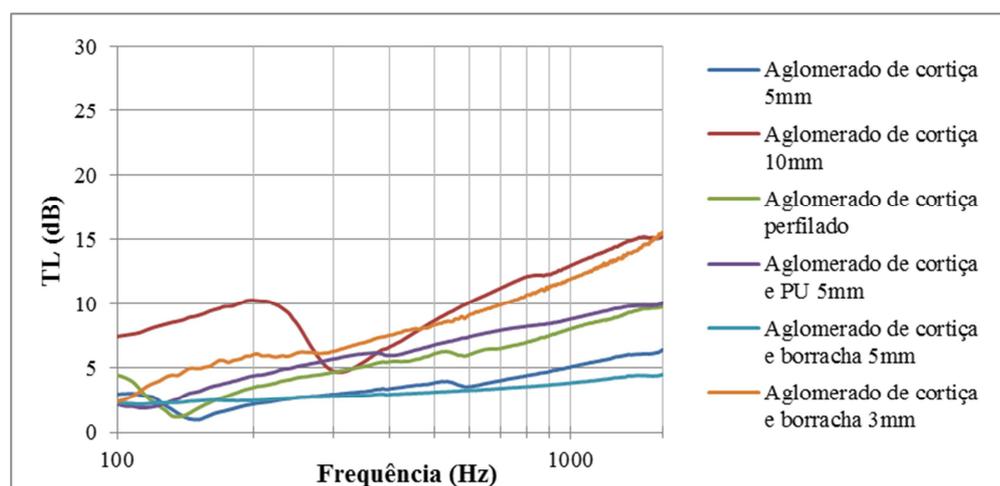


Figura 4.11 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Aglomerado de cortiça

4.1.2 Soluções multicamada

Durante os trabalhos experimentais, realizaram-se ensaios em várias soluções multicamada, a partir de alguns dos materiais apresentados anteriormente. As várias amostras estudadas encontram-se representadas no Quadro 4.1. As soluções multicamada foram desenvolvidas a partir da conjugação dos seguintes materiais: MDF de 3,2 mm (A) e de 5 mm (B), Platex de 3,3 mm (C), Aglomerados de madeira de 8 mm (D) e de 37 mm (H) e Aglomerados de flaxboard de 19 mm (F) e de 25 mm (G). Para além destes materiais rígidos, em algumas soluções multicamada encontram-se materiais absorventes como o Basotect de 40 mm, o PU

de 40 mm e o Aglomex de 10 mm e de 30 mm de espessura. Em qualquer uma das soluções apresentadas, as camadas exteriores são constituídas por placas de MDF ou Plutex que são materiais mais finos, mas também mais rígidos e compactos. É importante salientar que todos os sistemas considerados apresentam espessuras iguais ou inferiores a 50 mm, de forma a garantir que estas alternativas possam ser aplicadas em situações reais, não muito espessas.

Quadro 4.1 - Constituição e espessura das soluções multicamada

Soluções Multicamada	Espessura (mm)
A + A	6,4
A + Basotect 40 mm + A	46,4
A + PU 40mm + A	46,4
A + Aglomex 30mm + A	36,4
A + Aglomex 10mm + F + A	35,4
B + B	10,0
B + Basotect 40 + B	50,0
B + PU 40mm + B	50,0
B + Aglomex 30mm + B	40,0
C + C	6,6
C + Basotect 40mm + C	46,6
C + PU 40mm + C	46,6
C + Aglomex 30mm + C	36,6
A + H + A	43,4
B + H + B	47,0
C + H + C	43,6
A + Aglomex 10mm + G + A	41,4
A + Aglomex 30mm + D + A	44,4
B + D + Aglomex 10mm + D + B	36,0

Quadro 4.2 - Propriedades das amostras de Basotect, Aglomex e PU

Componentes	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Basotect	40,0	10,2
Aglomex	30,0	86,2
PU	40,0	25,1

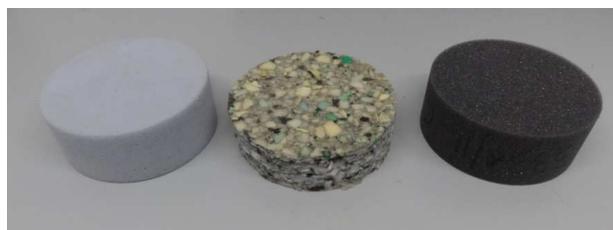


Figura 4.12 - Amostras de Basotect, Aglomex e PU

O gráfico da Figura 4.13 apresenta as curvas dos materiais resilientes utilizados em soluções multicamada, ensaiadas isoladamente. Nenhuma das amostras apresenta valores de perda por transmissão sonora superiores a 5 dB. O Basotect e o Aglomex apresentam resultados um pouco superiores que o PU, verificando-se que o Aglomex tem um comportamento mais constante ao longo da gama de frequência estudada. O Basotect exibe uma quebra de isolamento mais acentuada que os outros materiais para uma gama de frequências entre os 400Hz e os 700Hz. Tendo em conta a sua espessura mais reduzida, a massa volúmica superior, e o comportamento mais estável ao longo de toda a gama e frequência, talvez o Aglomex venha a originar resultados superiores nas soluções multicamada.

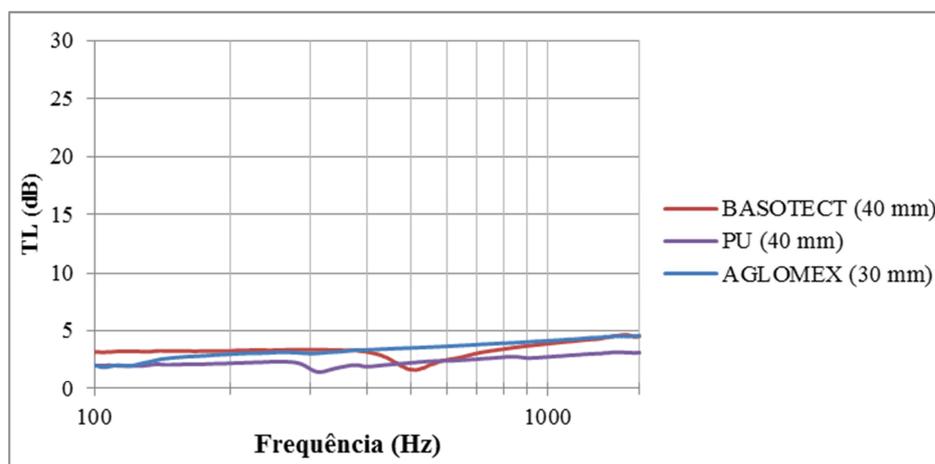


Figura 4.13 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as amostras de Basotect, PU e Aglomex

As Figuras 4.14 e 4.15 correspondem a soluções multicamada com a amostra de MDF de 3,2 mm (A) nas extremidades. Na Figura 4.15, observa-se que, a partir dos 400 Hz, as curvas correspondentes às amostras de MDF de 3,2 mm com Basotect de 40 mm, PU de 40 mm ou

Aglomex de 30 mm, têm um desenvolvimento bastante similar. A amostra constituída por duas placas de MDF de 3,2 mm, não tem nenhuma componente de material poroso, e por isso, apesar de apresentar um comportamento satisfatório nas frequências mais baixas, a partir dos 400 Hz torna-se uma solução muito inferior às restantes. A curva da amostra com duas placas MDF de 3,2mm, Aglomex de 10 mm e Aglomerado flaxboard de 19 mm, começa com uma diferença de aproximadamente 15 dB acima das outras curvas mas logo de seguida sofre uma quebra acentuada. A mesma amostra volta a ter mais uma quebra na zona dos 650 Hz, o que pode estar relacionado com o facto de ser constituído por mais camadas que as outras amostras. Apesar de esta amostra ter um material absorvente com uma espessura inferior, obtêm-se igualmente bons resultados. Desta forma, as soluções multicamada podem tornar-se mais económicas, uma vez que os materiais absorventes têm um custo elevado, e apresentar uma estrutura mais resistente, devido à camada de Aglomerado flaxboard. No caso da solução com duas placas de MDF de 3,2mm e uma camada de PU de 40 mm, tendo em conta a sua espessura e massa volúmica, os valores obtidos deveriam ser ligeiramente superiores aos da solução com Basotect de 40 mm, o que só acontece a partir dos 500 Hz. É importante referir que existe uma grande melhoria em termos de isolamento neste tipo de soluções, uma vez que os seus valores máximos de perda por transmissão sonora ultrapassam os 60 dB e para a solução com duas placas de MDF de 3,2 mm atinge-se cerca de 30 dB.

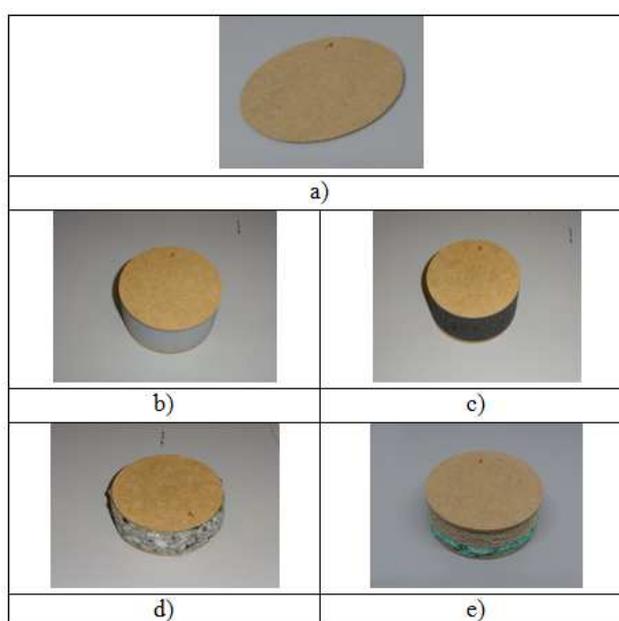


Figura 4.14 - Soluções multicamada: a) MDF 3,2mm + MDF 3,2mm; b) MDF 3,2mm +Basotect 40mm+ MDF 3,2mm; c) MDF 3,2mm+ PU 40mm+ MDF 3,2mm; d) MDF 3,2mm +Aglomex 30mm+ MDF 3,2mm; e) MDF 3,2mm +Aglomex 10mm+Aglomerado flaxboard 19mm+ MDF 3,2mm

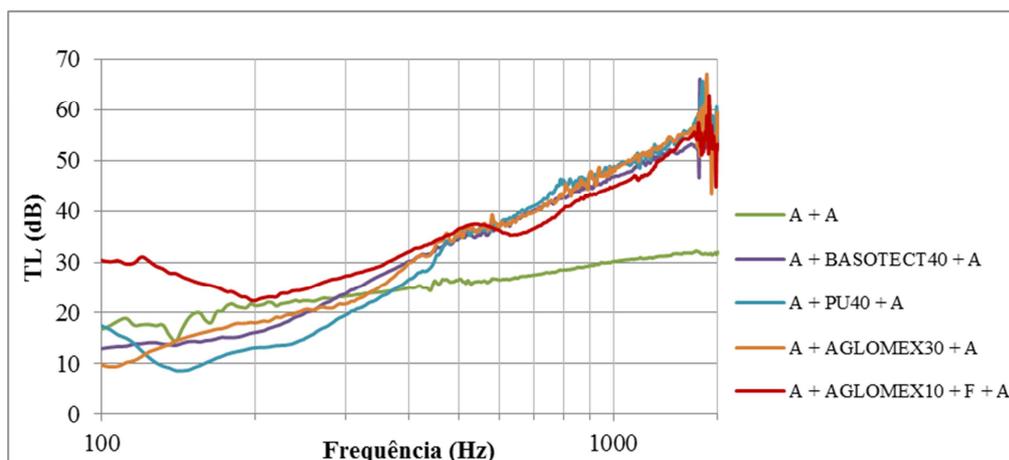


Figura 4.15 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as soluções multicamada com MDF de 3,2 mm (A)

As Figuras 4.16 e 4.17 dizem respeito às soluções multicamada com placas de MDF de 5 mm de espessura (B) nas extremidades. Mais uma vez, a solução mais simples, sem material absorvente, tem um comportamento bastante inferior às restantes soluções, sensivelmente a partir dos 250 Hz. Apesar das diferentes características dos materiais, até aos 600 Hz, as curvas correspondentes às amostras com Basotect de 40 mm, com PU de 40 mm e com Aglomex de 30 mm, têm comportamentos bastante semelhantes. As soluções com duas placas de MDF de 5 mm e Basotec de 40 mm ou PU de 40 mm, apresentam maiores picos nas frequências mais altas.

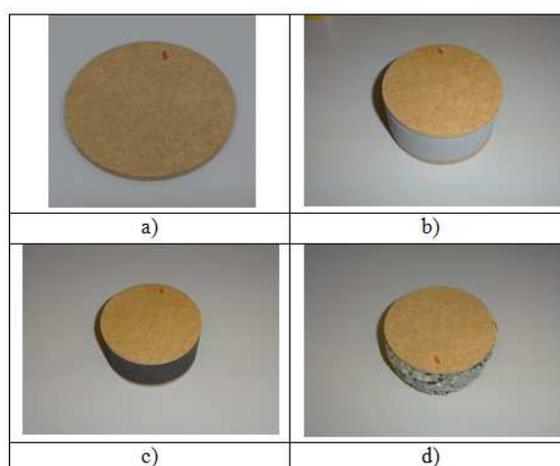


Figura 4.16 - Soluções multicamada: a) MDF 5mm + MDF 5mm; b) MDF 5mm +Basotect 40mm+ MDF 5mm; c) MDF 5mm+ PU 40mm+ MDF 5mm; d) MDF 5mm +Aglomex 30mm+ MDF 5mm;

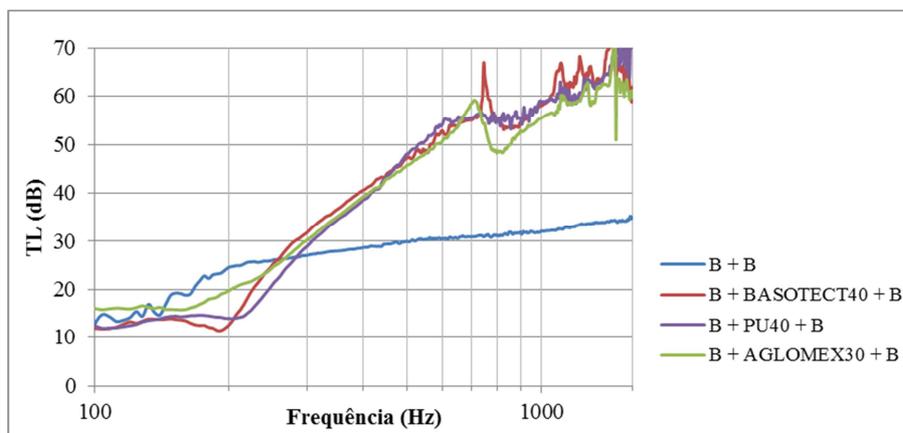


Figura 4.17 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as soluções multicamada com MDF de 5 mm (B)

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam soluções multicamada com placas de Platex de 3,3 mm de espessura (C) nas extremidades. A partir dos 200 Hz, a solução sem material absorvente tem um comportamento praticamente linear. A solução com duas placas de Platex de 3,3 mm e uma camada de Aglomex de 30 mm aparenta ter menos variações de TL ao longo da gama de frequências. A curva da solução com Basotect de 40 mm apresenta uma depressão no intervalo de frequências entre os 600 e os 800 Hz.

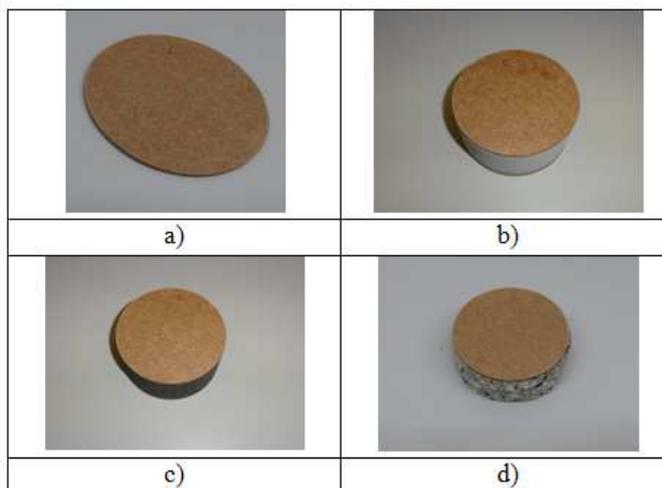


Figura 4.18 - Soluções multicamada a) Platex 3,3mm + Platex 3,3mm; b) Platex 3,3mm +Basotect 40mm+ Platex 3,3mm; c) Platex 3,3mm+ PU 40mm+ Platex 3,3mm; d) Platex 3,3mm +Aglomex 30mm+ Platex 3,3mm;

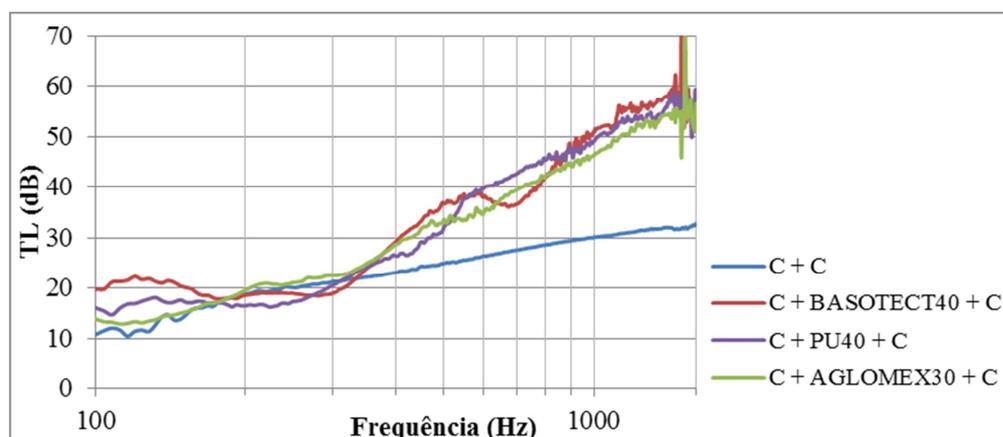


Figura 4.19 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para as soluções multicamada com Plutex de 3,3 mm (C)

Todas as soluções multicamada analisadas até ao momento, constituídas por MDF de 3,2 mm e 5 mm, Plutex de 3,3 mm e materiais absorventes, atingem valores de perda por transmissão sonora bastante semelhantes. Isto é certamente esperado, uma vez que os materiais rígidos que são colocados nas extremidades das amostras têm, espessura, composição física e valores de massa volúmica muito próximos.

As Figura 4.20 e 4.21 correspondem a soluções multicamada com um núcleo de Aglomerado de madeira de 37 mm (H) e com amostras de MDF de 3,2 mm (A), MDF de 5 mm (B) ou Plutex de 3,3 mm (C) nas extremidades. A solução com MDF de 5 mm apresenta, nas frequências mais baixas, valores muito mais elevados que o esperado, o que leva a pensar na possibilidade da presença do fenómeno de *clamping effect*. Nas duas outras soluções este picos de valores não são tão proeminentes. Se considerarmos o intervalo entre os 1000 e os 1600 Hz, podemos dizer que ocorre um decréscimo de valores de TL em comparação com as soluções analisadas anteriormente, cujos valores se encontravam acima dos 50 dB. Por outro lado, apesar dos valores mais baixos, o comportamento das amostras é muito mais estável e linear. As soluções com Aglomerado de madeira de 37 mm e duas placas de MDF de 5 mm e com Aglomerado de madeira de 37 mm e duas placas de Plutex de 3,3 mm têm curvas similares, que dos 150 aos 300 Hz apresentam uma diferença de cerca de 10 dB, e que a partir daí se aproximam mais. De um modo geral, o traçado da solução com Aglomerado de madeira de 37 mm e duas placas de MDF de 3,2 mm é mais uniforme, apresentando apenas uma quebra mais acentuada nas frequências mais baixas.

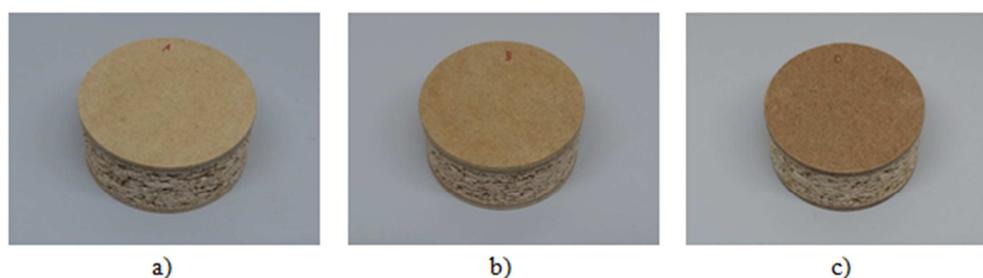


Figura 4.20 - Soluções multicamada: a) MDF 3,2mm +Aglomerado madeira 37mm +MDF 3,2 mm; b) MDF 5mm +Aglomerado madeira 37mm +MDF 5mm; c) Platex 3,3mm +Aglomerado madeira 37mm +Platex 3,3 mm

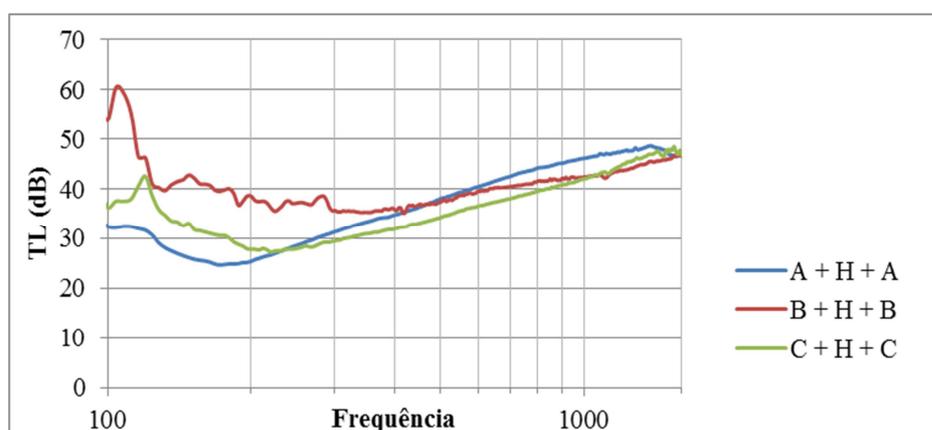


Figura 4.21 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para: “MDF 3,2mm +Aglomerado madeira 37mm+MDF 3,2 mm”, “MDF 5mm+Aglomerado madeira 37mm+MDF 5mm” e “Platex 3,3mm +Aglomerado madeira 37mm+Platex 3,3 mm”

As Figura 4.22 e 4.23 correspondem a soluções multicamada constituídas por MDF de 3,2 mm nas extremidades (A), Aglomex de 10 mm e Aglomerado flaxboard de 25 mm (G); MDF de 3,2 mm nas extremidades (A), Aglomex de 30 mm e Aglomerado de madeira de 8 mm (D); e MDF de 5 mm (B) e Aglomerado de madeira de 8 mm nas extremidades (D), com Aglomex de 10 mm no centro.

A partir do gráfico da Figura 4.23, no caso desta primeira amostra, entre 100 aos 400 Hz, o valor de TL é praticamente constante, com um valor de aproximadamente 30 dB. A solução com MDF de 5 mm, Aglomerado de madeira de 8 mm e Aglomex de 10 mm é a que apresenta melhores resultados ao longo da gama de frequências. Esta solução e a que é

composta por MDF de 3,2 mm nas extremidades, Aglomex de 10 mm e Aglomerado flaxboard de 25 mm apresentam curvas praticamente paralelas ao longo de todo o gráfico. A solução multicamada com MDF 3,2 mm as extremidades, Aglomex de 30 mm e Aglomerado madeira de 8 mm, que apresenta uma espessura de material absorvente mais elevada, possui resultados mais baixos nas baixas frequências, até aos 200 Hz, mas depois melhora bastante e chega a atingir um valor de TL de 70 dB. Comparando este gráfico com o anterior, observa-se que os valores de TL, nas frequências mais elevadas, voltam a ultrapassar os 50 dB, mas com muitas oscilações.

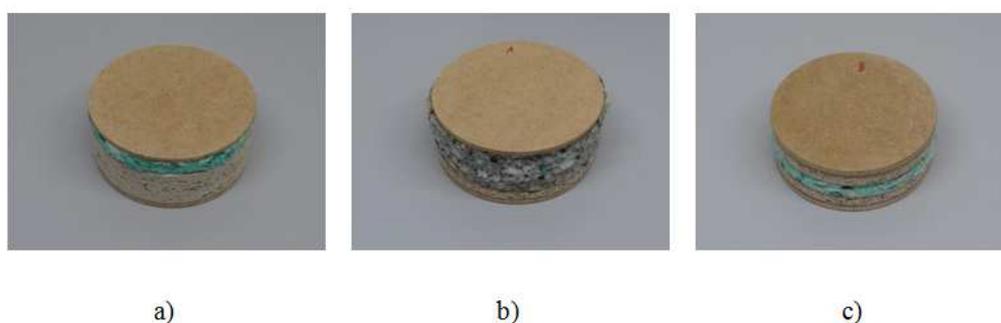


Figura 4.22 - Soluções multicamada: a) MDF 3,2mm+Aglomex 10mm+Aglomerado flaxboard 25mm+MDF 3,2mm; b) MDF 3,2mm+Aglomex 30mm+Aglomerado madeira 8mm+MDF 3,2mm; c) MDF 5mm+Aglomerado madeira 8mm+Aglomex 10mm+Aglomerado madeira 8mm+MDF 5mm

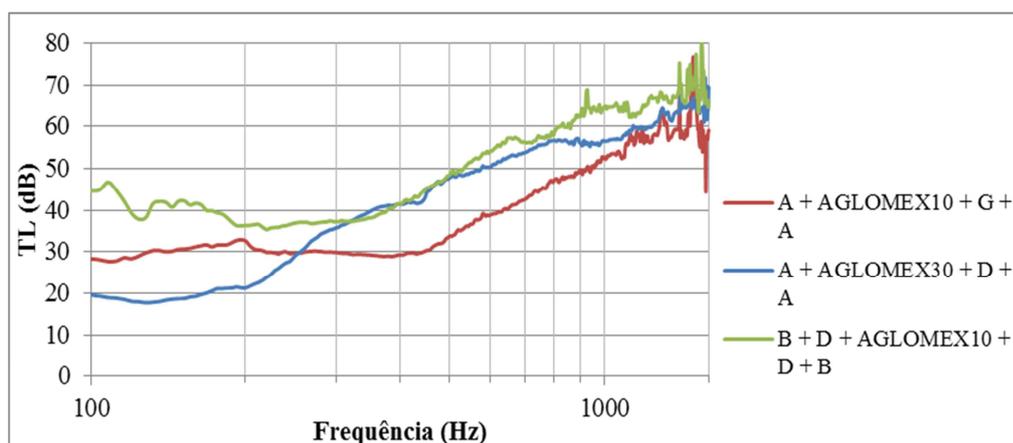


Figura 4.23 - Valores de perda por transmissão sonora (TL) para: “MDF 3,2mm+Aglomex 10mm+Aglomerado flaxboard 25mm+MDF 3,2mm”, “MDF 3,2mm+Aglomex 30mm+Aglomerado madeira 8mm+MDF 3,2mm” e “MDF 5mm+Aglomerado madeira 8mm+Aglomex 10mm+Aglomerado madeira 8mm+MDF 5mm”

4.2. Comparação com a lei da massa

Uma das componentes da análise dos resultados experimentais obtidos consistiu na comparação destes com a lei da massa, traduzida pela expressão (2) apresentada anteriormente.

De forma determinar o valor teórico da perda por transmissão sonora das amostras, foi necessário calcular a massa por unidade de superfície para todas as suas componentes presentes nesta secção de resultados. Estes valores são obtidos multiplicando a massa volúmica das amostras, pelas respetivas espessuras. Posteriormente, no caso de amostras com várias camadas, somam-se os valores de massa por unidade de superfície de cada componente da solução multicamada. Estes valores, usados na determinação das curvas da lei da massa para as várias amostras, são apresentados nos Quadros 4.3 e 4.4. Depois de se obterem as curvas teóricas das amostras, determinam-se as variações dos valores da perda por transmissão sonora, relativamente aos valores experimentais, através da expressão seguinte:

$$\Delta TL = TL_{experimental} - TL_{lei\ da\ massa} \quad (15)$$

sendo, ΔTL expresso em decibéis (dB). Os gráficos das Figuras 4.24 à 4.28 representam estas variações de valores de perda por transmissão sonora (ΔTL). Nos gráficos, a lei da massa corresponde a uma função constante de ordenada nula. Assim, para as soluções cujos valores se encontram acima da linha que contém a lei da massa, esta lei subestima o nível de perda por transmissão sonora que é possível alcançar. De forma inversa, para os valores que se encontram abaixo da lei da massa, esta lei sobrestima os seus valores de perda por transmissão sonora.

Quadro 4.3 - Propriedades das amostras individuais

	Espessura (mm)	Massa Volúmica (kg/m ³)	Massa por unidade de área (kg/m ²)
MDF 3,2 mm (A)	3,2	871	2,79
MDF 5 mm (B)	5	923,1	4,62
Platex 3,3 mm (C)	3,3	928,7	3,06
Aglomerado de madeira 8 mm (D)	8	722,6	5,78
Aglomerado flaxboard 15 mm (E)	15	468,6	7,03
Aglomerado flaxboard 19 mm (F)	19	462,4	8,79
Aglomerado flaxboard 25 mm (G)	25	468,6	11,72
Aglomerado de madeira 37 mm (H)	37	501,7	18,56
Aglomex 30 mm	30	27,2	0,82
PU 40mm	40	76,6	3,06
Basotect 40mm	40	86,6	1,73
Aglomex 10 mm	30	90,7	2,72

Quadro 4.4 - Valores da massa por unidade de área das soluções multicamada

Solução multicamada	Massa por unidade de área (kg/m ²)
A + A	5,57
A + Basotect 40mm + A	7,31
A + PU 40mm + A	8,64
A + Aglomex 30mm + A	8,30
B + B	9,23
B + Basotect 40mm + B	10,96
B + PU 40mm + B	12,30
B + Aglomex 30mm + B	11,95
C + C	6,13
C + Basotect 40 mm + C	7,86
C + PU 40mm + C	9,19
C + Aglomex 30mm + C	8,85
A + Aglomex 10mm + F + A	17,08
A + H + A	24,14
B + H + B	27,79
C + H + C	24,69
A + Aglomex 10mm + G + A	18,06
A + Aglomex 30mm + D + A	13,94
B + D + Aglomex 10mm + D + B	21,56

O gráfico da Figura 4.24 apresenta os resultados obtidos para as amostras de Aglomerados de madeira e flaxboard (D, E, F, G e H), com espessuras que variam entre os 8 e os 37 mm. O gráfico apresenta ainda três amostras de espumas, mais especificamente, uma de Aglomex com 30 mm de espessura, uma amostra de Poliuretano com 40 mm e uma de Basotect também com 40 mm de espessura. É possível observar que as três espumas apresentam comportamentos praticamente lineares em relação à lei da massa, com valores de ΔTL negativos em quase toda a gama de frequências considerada, o que reflete que o modelo teórico prevê valores de perda por transmissão sonora superiores aos que são obtidos experimentalmente. As amostras de Aglomerado flaxboard de 25 mm (G) e de Aglomerado de madeira de 37 mm (H), também apresentam valores de ΔTL negativos. Para as restantes amostras, correspondentes às placas de Aglomerado de madeira de 8 mm, e de Aglomerados de flaxboard de 15 mm e 19 mm, observam-se resultados experimentais superiores às previsões do modelo teórico, sendo que esta diferença vai diminuindo e chega a inverter-se para as frequências mais elevadas. Isto indica que no modelo da lei da massa os valores de TL aumentam mais rapidamente com o aumento da frequência do que aquilo que se verifica em ensaios experimentais.

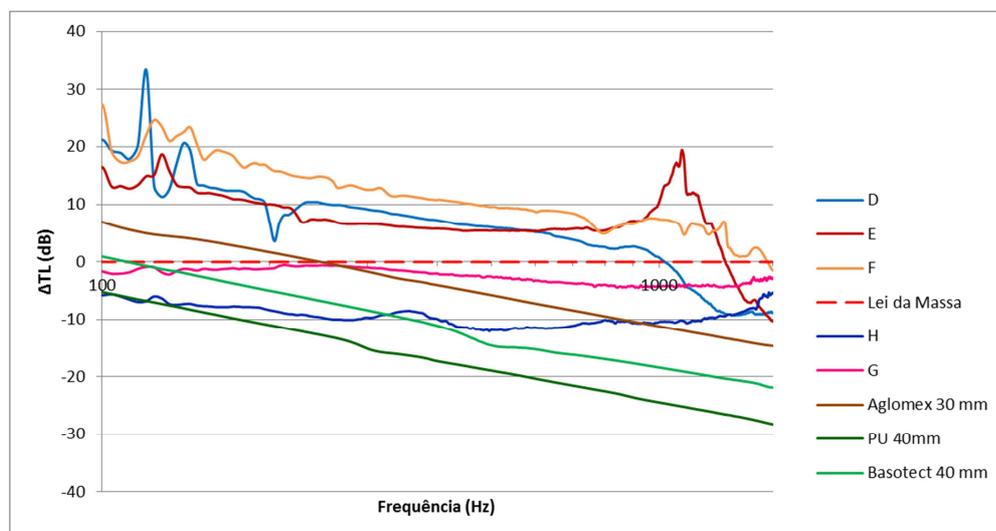


Figura 4.24 - Valores de ΔTL para amostras de Aglomerados de madeira de 8 mm e 37mm (D e H), Aglomerados flaxboard de 15mm, 19mm e 25mm (E, F e G), Aglomex de 30mm, PU de 40 mm e Basotect de 40mm

O gráfico na Figura 4.25 diz respeito a soluções multicamada com a amostra de MDF de 3,2 mm (A) nas duas extremidades. A amostra que é constituída por apenas duas placas de MDF de 3,2 mm aproxima-se bastante do modelo teórico, talvez por se tratar de uma amostra com a justaposição de duas placas do mesmo material, com uma massa volúmica elevada. Entre os 200 e os 800 Hz, a solução com MDF de 3,2 mm, Aglomex de 10 mm, Aglomerado flaxboard de 19 mm e MDF de 3,2 mm, também apresenta um comportamento próximo da lei da massa. As três restantes soluções com Basotect, PU e Aglomex entre as placas de MDF de 3,2 mm, possuem um comportamento muito semelhante entre si, notando-se que, inicialmente, as curvas apresentam valores negativos de ΔTL , mas que depois, sensivelmente a partir dos 400Hz, existe um afastamento progressivo em relação à lei da massa, que indica a obtenção de valores experimentais de perda por transmissão sonora superiores aos previstos pelo modelo teórico.

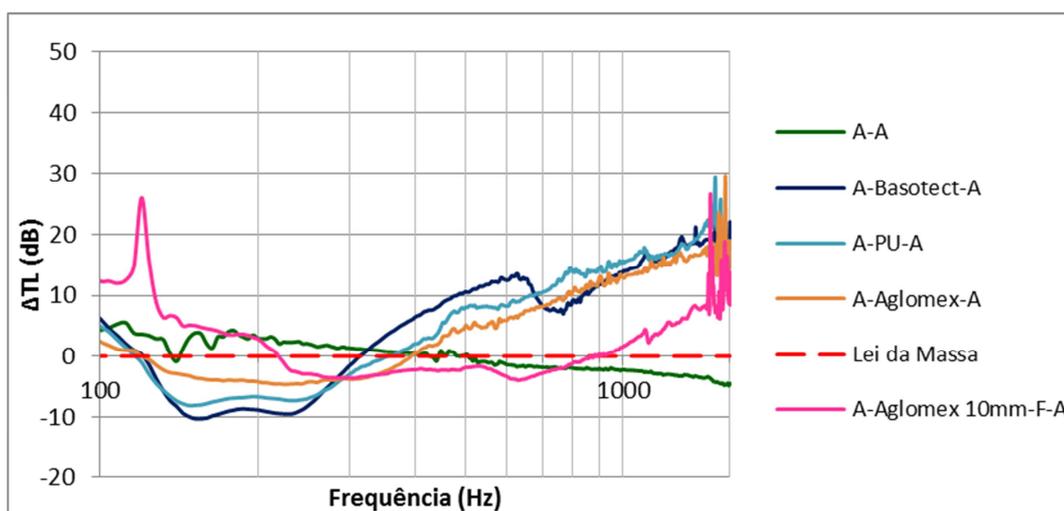


Figura 4.25 - Valores de ΔTL para soluções multicamada com MDF de 3,2 mm (A)

O gráfico presente na Figura 4.26 contém a variação dos valores de perda por transmissão sonora (ΔTL) para as soluções multicamada com MDF de 5 mm (B) nas extremidades. É possível observar curvas com comportamentos similares às curvas do gráfico anterior, o que faz sentido, uma vez que as soluções são compostas por camadas dos mesmos materiais, variando apenas a espessura das placas de MDF. Ocorre mais uma vez um acréscimo dos valores de ΔTL para as amostras com Basotect, PU e Aglomex, sendo que neste caso se inicia para frequências entre os 250 Hz e os 300 Hz. Neste caso, o valor máximo de variação do valor de TL é de aproximadamente 40 dB para a solução de duas placas de MDF de 5 mm com Basotect de 40 mm.

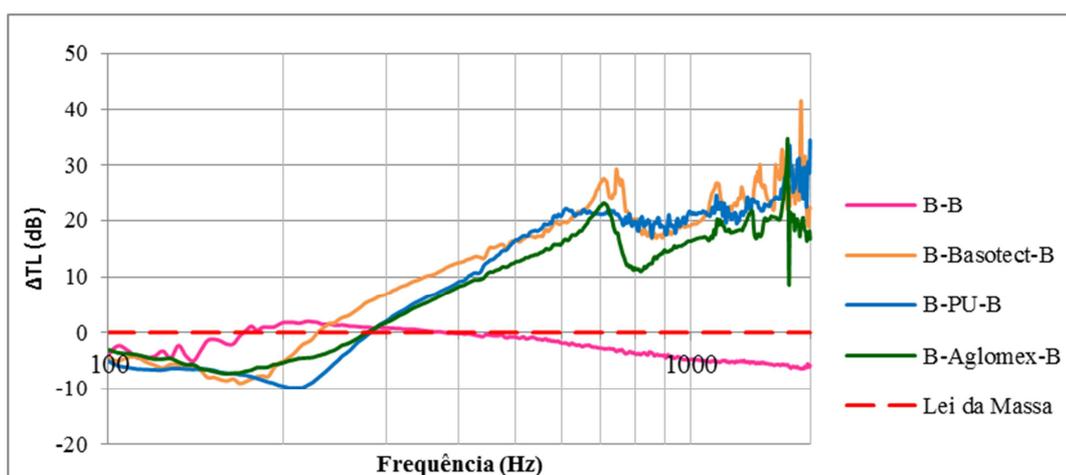


Figura 4.26 - Valores de ΔTL para soluções multicamada com MDF de 5 mm (B)

A Figura 4.27 contém os resultados das variações dos valores de perda por transmissão sonora (ΔTL) para soluções multicamada com extremidades constituídas por Platex de 3,3 mm (C). Este gráfico também apresenta curvas com comportamentos similares às curvas observadas nos gráficos anteriores. A solução mais próxima da lei da massa, apresentando valores de ΔTL mais reduzidos, é a solução composta por duas placas de Platex de 3,3 mm. Neste caso, também se assiste a um acréscimo dos valores de ΔTL , sensivelmente a partir dos 400 Hz, para os compostos com Basotect, PU e Aglomex no interior das placas de Platex.

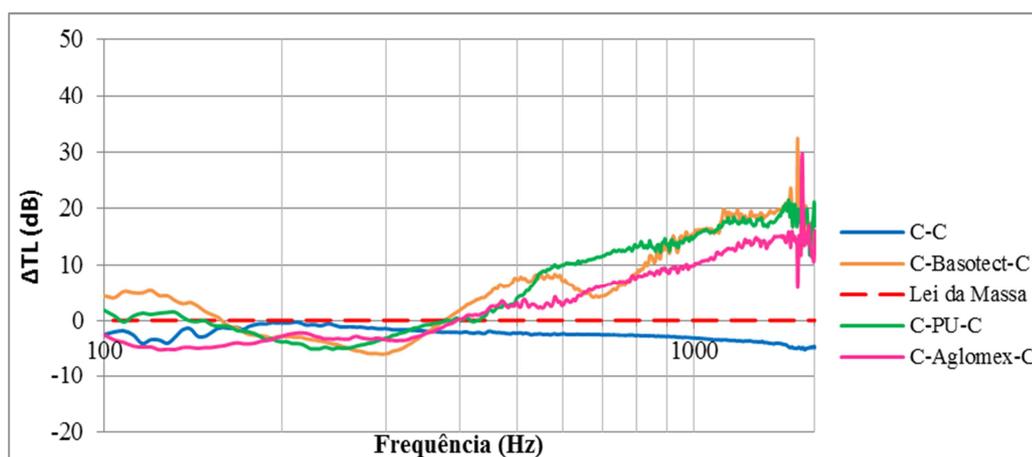


Figura 4.27 - Valores de ΔTL para soluções multicamada com Platex de 3,3 mm (C)

O gráfico da Figura 4.28 apresenta a variação dos valores de perda por transmissão sonora (ΔTL) para um conjunto de soluções multicamada nas quais ocorre a junção de Aglomerado de madeira de 37 mm (H), com as amostras de MDF de 3,2 mm (A), MDF de 5 mm (B) ou Platex de 3,3 mm (C) nas extremidades. Além destas três amostras, o gráfico apresenta também soluções formadas por MDF de 3,2 mm nas extremidades, com Aglomex de 10 mm e Aglomerado flaxboard de 25 mm (G), por MDF de 3,2 mm nas extremidades, com Aglomex de 30 mm e Aglomerado de madeira de 8 mm (D) e por MDF de 5 mm nas extremidades, com duas placas de Aglomerado de madeira de 8 mm e Aglomex de 10 mm.

Apesar de as três primeiras amostras apresentarem valores elevados de ΔTL nas frequências mais baixas, as suas curvas tendem depois a aproximar-se do modelo da lei da massa, principalmente a curva correspondente à amostra de MDF de 3,2 mm (A) com Aglomerado de madeira de 37 mm (H). É possível observar que, mais uma vez, as amostras com componentes de materiais absorventes apresentam curvas que se afastam do modelo teórico, à medida que a frequência vai aumentando. Neste gráfico verifica-se que este afastamento progride até

valores máximos de ΔTL de aproximadamente 30 dB. Deste grupo de soluções multicamada, a amostra com duas placas de MDF de 5 mm, duas placas de Aglomerado de madeira de 8 mm e uma camada de Aglomex de 10 mm, é a única que, ao longo de toda a gama de frequências, apenas apresenta valores de ΔTL positivos, o que significa que os seus resultados experimentais se apresentam sempre superiores à previsão do modelo teórico.

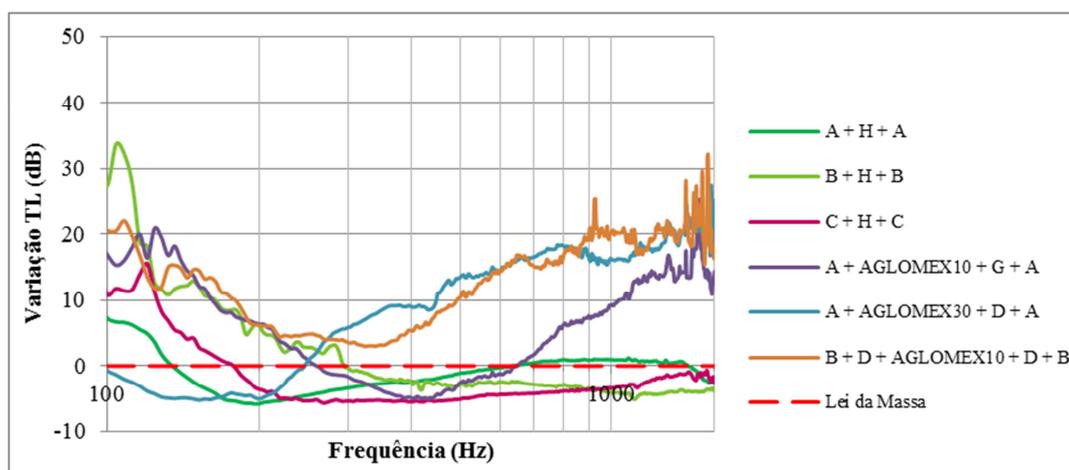


Figura 4.28 - Valores de ΔTL para soluções multicamada

Os gráficos das Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 apresentam bastantes semelhanças. As ligeiras diferenças de valores de ΔTL que ocorrem devem ser provocadas pela variação da espessura das amostras de MDF e Platex, uma vez que, apesar de serem materiais diferentes, as suas massas volúmicas são aproximadas.

Todas as soluções multicamada constituídas por Aglomex e por mais dois materiais rígidos diferentes, presentes nas Figuras 4.25 e 4.28, apresentam curvas semelhantes, com variações de valores de perda por transmissão sonora mais significativas nos extremos da gama de frequências.

A determinação da variação de valores de perda por transmissão sonora entre os resultados experimentais e os resultados fornecidos pela lei da massa, também foi realizada por Collings e Stewart (2011), em amostras de betão leve com cerca de 75 mm de espessura e lâminas de aço de 0,42 mm de espessura. No gráfico, apresentado na Figura 2.10, observa-se que a amostra 2, que não foi selada com fita, apresenta um comportamento bastante diferente das restantes amostras e que os valores de ΔTL tendem a diminuir com o aumento da frequência. Apesar de se tratar de amostras com características completamente diferentes, o mesmo também foi observado em algumas das amostras ensaiadas neste trabalho.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Neste trabalho pretendeu-se aprofundar o estudo de soluções multicamada a aplicar em sistemas construtivos para tratamentos acústicos.

Inicialmente, o trabalho realizado baseou-se no levantamento de informação acerca de conceitos teóricos importantes de isolamento acústico. Realizou-se uma pesquisa aprofundada sobre o parâmetro de perda por transmissão sonora e sobre os métodos utilizados na sua determinação, principalmente os que incluem o tubo de impedância. Relativamente aos ensaios com o tubo de impedância, tentou-se adquirir também informação acerca da influência contida nas condições de fixação da amostra no interior do tubo.

A realização de ensaios laboratoriais teve como objetivo avaliar o parâmetro de perda por transmissão sonora de alguns materiais selecionados, assim como das soluções multicamada posteriormente desenvolvidas, utilizando o tubo de impedância. Este equipamento teve como vantagem permitir a análise de amostras de dimensões reduzidas. Primeiro determinaram-se valores do parâmetro de perda por transmissão sonora para amostras simples, de uma vasta gama de materiais, com diversas espessuras e massas volúmicas. Posteriormente, analisaram-se soluções multicamada apresentando alguns dos materiais analisados. Os materiais considerados nos ensaios experimentais foram o MDF, o platex, os Aglomerados de madeira e flaxboard, a membrana acústica, metais, espumas, a lã mineral e Aglomerados com cortiça.

Uma das principais conclusões retiradas dos ensaios laboratoriais é que os valores de perda por transmissão sonora (TL) obtidos são bastante afetados pelas condições de fixação da amostra dentro do tubo de impedância. Este fenómeno foi analisado em quatro amostras de Aglomerados de madeira e flaxboard (D, E, G e H) e numa amostra de Aglomex (Aglomex D200FR 30mm). As amostras escolhidas foram ensaiadas no tubo de impedância em quatro fases, encontrando-se progressivamente mais apertadas dentro do tubo. Observou-se que o facto de a amostra se encontrar demasiado apertada dentro do tubo de impedância originava valores de TL mais irregulares e mais elevados do que os que se poderiam esperar na realidade. No caso da amostra de Aglomex não se observaram praticamente nenhuma alteração, talvez por este tipo de material ser muito flexível e facilmente adaptável ao tubo.

Em termos de resultados experimentais, as amostras de derivados de madeira apresentaram resultados com comportamentos semelhantes, exibindo retas crescentes, com um máximo de 40 dB para a amostra de Aglomerado flaxboard com 25 mm de espessura (G). Para o caso das amostras de lã mineral, os resultados foram bastante inferiores, com um máximo de 15 dB para a amostra com a massa volúmica mais elevada. De uma forma geral, estas amostras apresentam resultados mais baixos mas constantes ao longo da gama de frequência. Os gráficos obtidos para amostras de metais apresentam curvas bastante estáveis, com um ligeiro aumento da TL com o aumento da frequência, sendo o valor máximo de TL de cerca de 30 dB (amostra de aço com 2 mm de espessura). As amostras de Basotect e de PU apresentaram valores de TL muito baixos, não ultrapassando os 5 dB. As amostras de Aglomex, que têm uma massa volúmica muito superior às outras espumas, conseguiram alcançar resultados de perda por transmissão sonora de aproximadamente 20 dB. A membrana acústica possui um comportamento bastante linear, com valores máximos de cerca de 20 dB. No caso das amostras de Aglomerados de cortiça, todas elas apresentam um comportamento similar, exceto a amostra com 10 mm de espessura, que exhibe valores de TL superiores nas frequências mais baixas, apresentando depois uma quebra acentuada.

Na etapa de ensaios laboratoriais seguinte foram analisadas 19 soluções multicamada diferentes, todas com menos de 50 mm de espessura. Estas soluções multicamada foram formadas por amostras de MDF de 3,2 mm (A), MDF de 5mm (B), Platex de 3,3, mm (C), Aglomerado de madeira de 8 mm (D), Aglomerado flaxboard de 15 mm (F), Aglomerado flaxboard de 25 mm (G), Aglomerado de madeira de 37 mm (H), Basotect (40 mm), PU (40 mm) e Aglomex (10 mm e 30 mm). Todas as soluções consideradas alcançaram valores máximos de perda por transmissão sonora entre os 50 dB e os 80 dB, o que é bastante positivo. É ainda importante realçar que, em todos os casos analisados, é possível observar valores de perda por transmissão sonora muito mais elevados para as soluções multicamada com materiais absorventes, a partir de uma frequência de aproximadamente 300 Hz.

Finalmente, quis-se ainda comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados previstos por um modelo teórico. O modelo escolhido foi a lei da massa e a comparação dos resultados foi feita para as amostras de MDF, Platex, Aglomerados de madeira e flaxboard, Aglomex (10 mm e 30 mm), PU (40mm), Basotect (40 mm) e para todas as amostras de soluções multicamada. A comparação com o modelo da lei da massa trata-se apenas de uma aproximação, uma vez que a sua fórmula foi deduzida para um elemento homogéneo com espessura constante, e as soluções multicamada são formadas por várias camadas com características diferentes. A curva da lei da massa foi representada através de uma reta constante de ordenada nula, querendo isto dizer que valores de ΔTL positivos correspondem a valores experimentais de TL superiores aos resultados do modelo teórico e

valores de ΔTL negativos indicam que os valores previstos pela lei da massa são superiores aos verificados nos ensaios realizados. As amostras simples das espumas apresentaram os valores de ΔTL negativos mais elevados, sendo que as curvas que se aproximaram mais da lei da massa foram as que não continham materiais absorventes.

5.2 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros seria desejável continuar esta análise, utilizando o tubo de impedância, considerando uma gama de frequência mais abrangente, e estudando também outros parâmetros acústicos importantes para além da perda por transmissão sonora.

Deveriam ainda ser estudadas outras soluções multicamada, utilizando materiais que neste presente trabalho foram apenas ensaiados isoladamente, como foi o caso das amostras de placas metálicas, os Aglomerados de cortiça ou a lã mineral.

Outra possibilidade seria realizar ainda ensaios laboratoriais de grande escala, através do método das duas câmaras, nas soluções multicamada que neste trabalho demonstraram atingir valores superiores, de forma a verificar os resultados obtidos.

Para concluir, acho que a concretização de parcerias com várias empresas direcionadas para este mercado seria uma enorme mais-valia na execução destes estudos, que se apoiariam numa vertente económica e comercial mais realista.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências bibliográficas citadas

Collings, S., Stewart, K. (2011). “Building material panel Transmission loss evaluation using an impedance tube”. Proceedings of ACOUSTICS 2011, Gold Coast, Australia, Paper number 113.

Construção Magazine@(2009). “Caracterização de Produtos e Sistemas”, slides de palestra proferida por Luís Godinho no âmbito do seminário “Requisitos Acústicos dos Edifícios”, Lisboa.

<http://www.construcaomagazine.pt/xFiles/scEditor/File/Seminrio%20Acstica/Luis%20Godinho.pdf>

Everest, F., Pohlmann, K. (2001). “Master Handbook of Acoustics”, Fifth Edition.

Mohammadi, N., Mahjoob, M.J. (2009). “Transmission Loss of multilayer panels containing a fluid using progressive wave model: Comparison with impedance progressive model and experiments”. Comptes Rendus Mecanique, Vol. 337, pp. 198-207.

Pereira, A. (2013). “Desempenho acústico de soluções divisórias para “open-spaces””. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Pinto, R. (2011). “Determinação experimental e numérica da redução sonora aérea em paredes de alvenaria utilizadas em habitações”. Tese de Mestrado, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Tadeu, A., António, J., Mateus, D. (2004). “Sound insulation provided by single and double panel walls – a comparison of analytical solutions versus experimental results”. Applied Acoustics, Vol. 65, pp. 15-29.

- Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Mendes, P. (2010). “Acústica Aplicada”. Departamento Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Tadeu, A., Pereira, A., Godinho, L. and António, J. (2007). “Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multilayer systems using analytical expressions”. *Applied Acoustics*, Vol. 68, pp. 17-42.
- Tao, Z., Seybert, A. (2003). “A review of current techniques for measuring muffler transmission loss”, University of Kentucky.
- Vengala, K. (2007). “Building a modified impedance tube for measurement of sound transmission loss and absorption coefficients of polymer cross-linked aerogel core composites”, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University.
- Wang, T., Sokolinsky, V., Rajaram, S. and Nutt, S. (2005). “Assessment of sandwich models for the prediction of sound transmission loss in unidirectional sandwich panels”. *Applied Acoustics*, Vol. 66, pp. 245-262.

Referências bibliográficas consultadas

- Barnard, A., Rao, M. (2004). “Measurement of sound transmission loss using a modified four microphone impedance tube”. NOISE-CON 2004, Baltimore, Maryland.
- Doutress, O., Atalla, N. (2011). “Experimental estimation of the transmission loss contributions of a sound package placed in a double wall structure”. *Applied Acoustics*, Vol. 72, pp. 372-379
- Ho, K., Yang, Z., Zhangm X., Sheng, P. (2005). “Measurements of sound transmission through panels of locally resonant materials between impedance tubes”. *Applied Acoustics*, Vol. 66, pp. 751-765
- Jung, S., Kim, Y., Lee, Y., Cho, S., Lee, K. (2008). “Measurement of sound transmission loss by using impedance tubes”. *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 53, No. 2, pp. 596-600

- Lee, C., Xu, Y. (2009). “A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials”. *Journal of sound and vibration*, Vol. 326, pp. 290-301
- Li, P., Peng, H., Li, Z. (2008). “The modified method of measuring the complex transmission coefficient of multilayer acoustical panel in impedance tube”. *Applied Acoustics*, Vol. 69, pp. 1240-1248
- Steele, C., Balch, C. “Introduction to the Theory of Plates”. Department of Mechanical Engineering, Stanford University, California, USA.
- Vigran, T. E. (2012). “Normal incidence sound transmission loss in impedance tube – Measurement and prediction methods using perforated plates”. *Applied Acoustics*, Vol. 73, pp. 454-459