

COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO À BASE DE AGLOMERADO DE FIBRAS DE MADEIRA E CIMENTO

ROSA ALEXANDRA PINTO FERREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Gonçalves Calejo Rodrigues

JULHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À memória de meu irmão, Carlos Manuel Pinto Ferreira

A única constante é a mudança

Heráclito de Éfeso

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que, embora de forma diferente, contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado, nomeadamente:

Ao Professor Doutor Rui Calejo, orientador desta dissertação, pela disponibilidade, incentivo e sugestões.

À minha amiga e colega, Carla Taveira, pela partilha de experiências.

Ao meu amigo, arquitecto Fernando Reis, pela troca de conhecimentos.

À empresa VIROC pelo fornecimento do material ensaiado.

À minha família pelo incentivo.

RESUMO

O crescimento económico do último século permitiu que, milhões de pessoas em todo o mundo, em especial no ocidente, melhorassem a sua qualidade de vida. No entanto, à medida que este crescimento se ia acentuando, o Homem ia tomando consciência de que nem sempre o crescimento foi sinónimo de desenvolvimento já que acarretou impactes negativos para as pessoas e para o ambiente.

Um dos impactes negativos e bastante preocupante, dada a sua escala e crescimento, é o ruído.

A redução do ruído ambiental, o isolamento acústico e o “tratamento” acústico dos espaços são, actualmente, matéria de investigação e desenvolvimento em larga escala e a nível global.

É neste âmbito que esta dissertação se insere e tenta, apresentar algumas respostas à mitigação deste problema, com especial enfoque no “tratamento” acústico dos espaços.

Assim sendo, este trabalho visa, sobretudo, avaliar o comportamento acústico de componentes da construção à base de fibras de madeira e cimento, no que diz respeito à absorção sonora.

Para tal, procedeu-se à determinação do coeficiente de absorção sonora do sistema em estudo, utilizando painéis perfurados de VIROC, através de modelos teóricos existentes, bem como, com recurso a ensaios experimentais em câmara reverberante.

No âmbito desta dissertação são apresentadas diferentes soluções em termos de materiais e sistemas absorventes sonoros.

Este trabalho termina com algumas referências a possíveis desenvolvimentos futuros e assinala as conclusões mais relevantes a retirar da dissertação elaborada.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Reverberação, Absorção Sonora, Painéis Perfurados.

ABSTRACT

The last century economic growth allowed millions of people in the whole world, special in west, to improve their quality of life. However, as this growth increases Man acquired conscience that not always the growth was synonymous of development, since it caused negative impact for the people and the environment.

One of these negatives impacts, assumed to be considerable, is the noise.

The reduction of the inside noise, the acoustic isolation and the “acoustic treatment” of the spaces are, currently matter of large scale research and development at a global level.

Therefore, the aim of this work is to present some answers to the mitigation of this problem, with special approach in the “acoustic treatment” of closed spaces.

And so, this work specific aim is to evaluate the acoustic behavior of construction components made of wood fiber cement plates, regarding its sound absorption.

For such, through existing theoretical methods it was provided the coefficient of sound absorption of the system in study, using perforated plates of VIROC. With the same purpose, it was experimentally determinated the sound absorption coefficient by the method of reverberation room.

This work presents distinct solutions, in terms of materials and absorbent systems, however, the experimental simulation and the theoretical method, the lab work and the comparative analysis of results are centered in a specific type of sound absorbent system.

This work finishes with some references to the possible future developments and designates the most excellent conclusions about this test.

KEYWORDS: Acoustics, Reverberation, Sound Absorption, Perforated Plates.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. ÂMBITO E OBJECTIVOS	2
1.2.1. ÂMBITO	2
1.2.2. OBJECTIVOS	2
1.3. INSERÇÃO HISTÓRICA E CULTURAL	2
1.4. IMPACTE SOCIAL E ECONÓMICO	4
2. NOÇÕES GERAIS	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. O SOM	7
2.2.1. O SOM NO AR	7
2.2.2. COMPRIMENTO DE ONDA	8
2.3. PRESSÃO SONORA, NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA	8
2.4. NÍVEL SONORO	10
3. ACÚSTICA EM RECINTOS FECHADOS	13
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
3.2. ABSORÇÃO SONORA	13
3.2.1. DEFINIÇÃO	13
3.2.2. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA	13
3.2.3. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PONDERADO	15
3.2.4. INDICADORES DE FORMA L, M, H	16
3.2.5. CLASSES DE ABSORÇÃO SONORA	16
3.2.6. ÁREA DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE	16
3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	17
3.3.1. DEFINIÇÃO	17

3.3.2. FÓRMULAS DE PREVISÃO.....	17
3.3.2.1. Fórmula de Sabine	17
3.3.2.2. Fórmula de Eyring.....	19
3.3.2.3. Fórmula de Millington-Sette.....	19
3.3.2.4. Fórmula de Kuttruff	19
3.3.2.5. Tempos de reverberação em função do volume do recinto	20
3.4. CAMPO SONORO, CAMPO DIRECTO E CAMPO REVERBERADO	20
3.5. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS	22
3.5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	22
3.5.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSO.....	22
3.5.2.1. Tecidos e alcatifas	23
3.5.2.2. Massas porosas para projecção.....	23
3.5.2.3. Fibras minerais	24
3.5.2.4. Materiais plásticos	24
3.5.2.5. Aglomerados de cortiça	24
3.5.3. MEMBRANAS RESSONANTES.....	25
3.5.4. RESSOADORES DE CAVIDADE	26

4. METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

29

4.1. INTRODUÇÃO

29

4.2. MODELAÇÃO TEÓRICA DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE PAINÉIS PERFURADOS...

29

4.2.1. INTRODUÇÃO

29

4.2.2. MODELO DE DELANY E BAZELEY

30

4.2.3. MODELO DE MECHEL

30

4.2.4. IMPEDÂNCIA ACÚSTICA SUPERFICIAL DO SISTEMA

32

4.3. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PELO MÉTODO EXPERIMENTAL EM CÂMARA REVERBERANTE.....

34

4.3.1. CONDIÇÕES DA CÂMARA REVERBERANTE

34

4.3.2. PROVETE DE ENSAIO.....

35

4.3.3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO INTERIOR DA CÂMARA REVERBERANTE.....

35

4.3.4. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

36

4.3.5. MÉTODO DO RUÍDO INTERROMPIDO

36

4.3.6. MÉTODO DE CÁLCULO.....	36
4.3.7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	37

5. APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS.....39

5.1. INTRODUÇÃO.....39

5.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO SISTEMA ABSORVENTE COM RECURSO A MODELO TEÓRICO.....40

5.2.1. INTRODUÇÃO DE DADOS.....40

5.2.2. INPUT DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ABSORVENTE SONORO.....41

5.2.2.1. Definição do sistema absorvente.....41

5.2.2.2. Características dos painéis perfurados.....42

5.2.2.3. Características da lã mineral fibrada.....43

5.2.2.4. Características da caixa-de-ar.....43

5.2.3. OUTPUT DE RESULTADOS.....45

5.3. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO SISTEMA ABSORVENTE PELO MÉTODO EXPERIMENTAL EM CÂMARA REVERBERANTE.....45

5.3.1. INTRODUÇÃO.....45

5.3.2. CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE.....46

5.3.2.1. Dimensões.....46

5.3.2.2. Tempo de reverberação.....46

5.3.3. EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....47

5.3.4. CARACTERÍSTICAS DOS PROVETES DE ENSAIO.....47

5.3.5. CARACTERÍSTICAS DA CAIXA-DE-AR.....49

5.3.6. CONDIÇÕES DA LÃ MINERAL FIBRADA NO INTERIOR DA CAIXA-DE-AR.....50

5.4. RESULTADOS.....51

5.4.1. VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA OBTIDOS EM MODELOS TEÓRICOS.....51

5.4.2. VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA OBTIDOS EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....53

6. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....57

6.1. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....57

6.1.1. INTRODUÇÃO.....57

6.1.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS VS RESULTADOS TEÓRICOS.....57

6.1.3. RESULTADOS OBTIDOS COM CAIXA-DE-AR DE DIFERENTES ESPESSURAS	59
6.1.4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS COM DIFERENTES TAXAS DE FURAÇÃO	61
6.1.5. RESULTADOS OBTIDOS COM CAIXA-DE-AR PARCIALMENTE PREENCHIDA COM LÃ MINERAL OU COM LÃ MINERAL E FELTRO	62
6.1.6. RESULTADOS OBTIDOS COM CAIXA-DE-AR PARCIALMENTE PREENCHIDA COM LÃ MINERAL E FELTRO OU COM ESPUMA DE POLIURETANO	63
6.2. CONCLUSÕES	63
6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	64
6.4. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 - Pressão e nível de pressão sonora	9
Fig.2.2 - Pressão sonora, pressão atmosférica e pressão eficaz	10
Fig.3.1 - Curva de referência para determinação do coeficiente de absorção sonora ponderado.....	16
Fig.3.2 - Tempo de reverberação.....	17
Fig.3.3 - Tempos de reverberação aconselhados em função do volume do recinto (para $f=500$ Hz)...	20
Fig.3.4 - Reflexões estabelecidas num recinto fechado	21
Fig.3.5 - Variação da pressão e da velocidade de vibração das partículas de incidência de uma onda sonora um elemento rígido: a) Pressão; b) Velocidade de vibração	23
Fig.3.6 - Valores do coeficiente de absorção sonora de um reposteiro de algodão com diferentes percentagens de franzido.....	23
Fig.3.7 - Diferenças de absorção sonora entre aglomerado negro e aglomerado composto de cortiça...	25
Fig.3.8 - Membrana ressonante	25
Fig.3.9 - Ilustração da selectividade de uma membrana ressonante; a) Sem material poroso no tardo da caixa-de-ar; b) Com material poroso no tardo da caixa-de-ar	26
Fig.3.10 - Esquema básico de um ressoador de cavidade	26
Fig.3.11 - Sistema - tipo de ressoador de cavidade.....	27
Fig.3.12 - Esquema básico de ressoadores agrupados.....	27
Fig.3.13 - Ilustração esquemática de sistemas associando diferentes processos de absorção sonora	28
Fig.3.14 - Evolução da absorção sonora em vários sistemas compostos.....	28
Fig.4.1 - Sistema absorvente sonoro constituído por: A – Parede ou tecto duro; B – Caixa-de-ar; C – Material poroso ou fibroso; D – Pannel perfurado.....	33
Fig.4.2 - Geometria para a modelação da matriz de transferência.....	34
Fig.5.1 - Sistema absorvente sonoro constituído por: A – Parede ou tecto duro; B – Caixa-de-ar; C – Material poroso ou fibroso; D – Pannel perfurado.....	40
Fig.5.2 - Valores da resistividade da lã de rocha e lã de vidro, R e G, respectivamente, em função da densidade (adaptado de [28])	40
Fig.5.3 - Definição do sistema absorvente sonoro, constituído por pannel perfurado, lã mineral fibrada (modelo de Mechel), caixa-de-ar e parede/tecto	41
Fig.5.4 - Definição do sistema absorvente sonoro, constituído por pannel perfurado, lã mineral fibrada (modelo de Delany e Bazley), caixa-de-ar e parede/tecto.....	41
Fig.5.5 - Input das características de um dos painéis perfurados	42
Fig.5.6 - Input das características do segundo pannel perfurado	42

Fig.5.7 - Input das características da lã mineral fibrada.....	43
Fig.5.8 - Caixa-de-ar com 100 mm de espessura preenchida parcialmente por uma camada de lã mineral fibrada com 40 mm de espessura	43
Fig.5.9 - Caixa-de-ar com 200 mm de espessura preenchida parcialmente por uma camada de lã mineral fibrada com 40 mm de espessura	44
Fig.5.10 - Caixa-de-ar com 400 mm de espessura preenchida parcialmente por uma camada de lã mineral fibrada com 40 mm de espessura	44
Fig.5.11 - Output dos valores do coeficiente de absorção sonora.....	45
Fig.5.12 - Câmara reverberante R1 da FEUP	45
Fig.5.13 - Esquema das câmaras reverberantes da FEUP (corte transversal)	46
Fig.5.14 - Interior da câmara reverberante R1 com estrutura de madeira para suporte dos painéis ...	46
Fig.5.15 - Tempo de reverberação	47
Fig.5.16 - Placa perfurada com 9,2% de taxa de furação	47
Fig.5.17 - Pormenor A	48
Fig.5.18 - Placa perfurada com 15,5% de taxa de furação	48
Fig.5.19 - Pormenor B	48
Fig.5.20 - Estrutura da caixa-de-ar	49
Fig.5.21 - Esquema da estrutura da caixa-de-ar	49
Fig.5.22 - Colocação da lã mineral na caixa-de-ar.....	50
Fig.5.23 - Esquema da estrutura do sistema absorvente sonoro em estudo.....	50
Fig.5.24 - Esquema do sistema absorvente sonoro descrito na tabela 5.4	54
Fig.6.1 - Resultados teóricos vs resultados experimentais (F_9,2%_Cx 200mm_Lã mineral).....	58
Fig.6.2 - Resultados teóricos vs resultados experimentais (F_15,5%_Cx 200mm_Lã mineral).....	58
Fig.6.3 - Coeficiente de absorção sonora obtido pelo modelo de Mechel (F_9,2%)	59
Fig.6.4 - Coeficiente de absorção sonora obtido pelo modelo de Dalany e Bazley (F_15,5%).....	60
Fig.6.5 - Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para diferentes espessuras de caixa-de-ar (F_15,5%)	60
Fig.6.6 - Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para diferentes espessuras de caixa-de-ar (F_9,2%)	61
Fig.6.7 - Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para sistemas absorventes sonoros com painéis perfurados com diferentes taxas de furação (9,2% e 15,5%)	62
Fig.6.8 - Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para caixa-de-ar parcialmente preenchida só com lã mineral e para caixa-de-ar parcialmente preenchida com uma combinação de lã mineral e feltro.....	62

Fig.6.9 - Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã mineral e feltro e para caixa-de-ar parcialmente preenchida com espuma de poliuretano.....	63
Fig.6.10 - Coeficiente de absorção sonora obtido em modelo teórico para painéis com taxa de furação de 15,5% e painéis com taxa de furação de 31%.....	66
Fig.6.11 - Placa perfurada com 31% de taxa de furação.....	66
Fig.6.12 - Pormenor C.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores numéricos das ponderações A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama audível [3]	11
Tabela 3.1 - Valores de coeficiente de absorção sonora de alguns materiais ou sistemas [3]	15
Tabela 3.2 - Classes de absorção sonora [3]	16
Tabela 3.3 - Exemplos de absorções localizadas (m^2) [3]	18
Tabela 3.4 - Absorção sonora do ar (m^{-1}) em função da humidade relativa [3]	18
Tabela 3.5 - Exemplos de valores de γ_2 [3]	20
Tabela 3.6 - Exemplos de coeficientes de absorção sonora para massa porosa projectada (K13) aplicada sobre superfície rígida em diversas espessuras [3]	24
Tabela 4.1 - Valores máximos de área de absorção sonora equivalente para câmara reverberante com $V=200 \text{ m}^3$ [14]	35
Tabela 4.2 - Requisitos para os valores de temperatura e humidade relativa durante a medição do tempo de reverberação	37
Tabela 5.1 - Resultados teóricos (modelo de Mechel)	51
Tabela 5.2 - Resultados teóricos (modelo de Delany e Bazley)	52
Tabela 5.3 - Resultados experimentais (E_200mm_9,2%_15,5%_Lã mineral)	53
Tabela 5.4 - Resultados experimentais (E_9,2%_15,5%_Lã mineral+feltro)	54
Tabela 5.5 - Resultados experimentais (E_200mm_9,2%_15,5%_Espuma de poliuretano)	55
Tabela 6.1 - Resultados teóricos para painéis com taxa de furação de 15,5% e 31%	65

1

INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

O crescimento económico a que o “mundo” assistiu nas últimas décadas nos países desenvolvidos, acarretou consigo situações indesejáveis e bastante preocupantes para o ambiente e para as populações. A destacar, o importante e nefasto aumento dos níveis de ruído a que as populações são expostas diariamente no local de trabalho, nos espaços públicos, nos locais de lazer e até mesmo em suas casas, motivo pelo qual esta matéria tem sido alvo de grande atenção por parte dos actores políticos e profissionais a nível nacional e internacional.

A exposição excessiva ao ruído pode provocar distúrbios do sono, perda de inteligibilidade da palavra, propensão à irritabilidade e em casos extremos, a perda da audição. No entanto, não é apenas ao nível da audição que os efeitos maléficos do ruído se fazem sentir, mas também a nível físico, mental e emocional.

Cita-se de Tirone e Nunes [1] “...O desconforto acústico tem uma enorme influência sobre a nossa capacidade de concentração, condicionando, conseqüentemente, a nossa produtividade, tornando-se também um forte motivador de acção...”.

A redução da exposição ao ruído das populações constitui, por isso, um desafio importante para as próximas décadas.

O crescimento económico não é, nem pode ser, o único objectivo a ser perseguido. Para que haja um verdadeiro desenvolvimento há que preservar o ambiente, a saúde e o bem-estar das pessoas.

A redução do ruído ambiental, o isolamento acústico e o “tratamento” acústico dos espaços são actualmente, matéria de investigação e desenvolvimento em larga escala e a nível global.

É dever do projectista acústico contribuir de forma directa, ou indirecta, para a preservação da saúde e do bem-estar das pessoas, bem como, para a preservação do ambiente, sem esquecer naturalmente, a conservação do património histórico e cultural.

Com o trabalho que aqui se desenvolve, pretende-se contribuir de alguma forma, para aumentar o conhecimento das soluções construtivas no domínio da absorção sonora, e desta forma abrir o leque de opções para o desenvolvimento de espaços com desempenho acústico adequado.

1.2. ÂMBITO E OBJECTIVOS

1.2.1. ÂMBITO

Para que uma actividade se desenvolva de forma eficaz num espaço fechado, este tem que apresentar condições de conforto acústico adequadas a essa actividade. Assim, existem dois aspectos essenciais a ter em conta; por um lado o isolamento sonoro do espaço relativamente a ruídos provenientes do exterior, e por outro lado as características do campo sonoro que nele se estabelece, que resulta essencialmente da concepção arquitectónica, dos materiais de revestimento das superfícies expostas e ainda, do mobiliário, dos equipamentos ou das pessoas nele inseridos [2].

Espaços como salas de conferência, auditórios, salas de aula, igrejas, etc, requerem condições especiais de “tratamento” acústico, de forma a obter as condições acústicas adequadas à função pretendida [3].

Os tectos falsos constituídos por painéis perfurados (que normalmente suportam mantas de lã mineral) são elementos com uma boa absorção sonora e que, por isso, podem ser utilizados nestes locais (ou outros, como salas de escritório em open place) para promover um bom desempenho acústico, condicionando, desta forma, o campo estabelecido no seu interior [3].

Actualmente, o indicador mais utilizado para caracterizar o campo sonoro de um determinado espaço, é o tempo de reverberação. Este indicador será maior, ou menor, na razão inversa do coeficiente de absorção sonora dos materiais, ou sistemas, que revestem as superfícies desse espaço [2].

O âmbito deste trabalho direcciona-se justamente para o estudo de tectos falsos à base de placas de compósito de madeira e cimento perfuradas, a funcionar como um ressoador de Helmholtz.

1.2.2. OBJECTIVOS

O presente trabalho respeita à caracterização teórica e experimental de painéis compósitos à base de fibras de madeira e cimento, na perspectiva do comportamento acústico.

Pretende-se comparar os resultados obtidos por modelos teóricos com os obtidos experimentalmente e perceber qual a aplicabilidade da modelação teórica.

É também objectivo deste trabalho, despertar as pessoas para a importância da qualidade acústica dos espaços, imprimir uma consciência cultural no campo da acústica semelhante à consciência cultural que qualquer cidadão tem relativamente à arquitectura e ao design.

1.3. INSERÇÃO HISTÓRICA E CULTURAL

A acústica é o ramo da Física onde se estuda as ondas sonoras [3].

Actualmente a acústica está subdividida em várias áreas como a acústica musical, a acústica de edifícios ou a electroacústica, entre outras [3].

Os mais antigos ramos da acústica são, no entanto, os relacionados com a construção de instrumentos musicais ou com a análise filosófica da origem e propagação do som [3].

As primeiras referências com o intuito de explicar o fenómeno do som surgem por Pitágoras (570-497 a.C). Filósofo e matemático grego, Pitágoras introduziu a matemática na cultura grega [4]. Este filósofo, que iniciou a matematização do som, estudou a relação entre o comprimento de cordas em vibração e o som que estas produziam, concluindo que, quando duas cordas de comprimentos

diferentes eram tocadas simultaneamente, o som produzido era agradável se a sua relação fosse de 2:1 [5]. Pitágoras não deixou nenhum registo escrito sobre o seu trabalho, e o que dele se conhece é através de das obras de Aristóteles (384-322 a.C.) e Platão (429-347 a.C.) [6].

Em 25 a. C., Vitruvius, engenheiro e arquitecto romano, escreveu sobre a acústica dos teatros. Uma parte da sua obra “*De Architectura Libri Decem*” trata das características acústicas dos teatros gregos e romanos, em forma de semicírculo. Vitruvius tinha, também, conhecimentos sobre ecos e reverberação [6].

Engenheiro, pintor, escultor, arquitecto e sábio, Leonardo da Vinci, deixou nos seus escritos referências importantes sobre a Acústica. Através da observação dos ecos, Leonardo da Vinci concluiu que a velocidade de propagação do som era necessariamente finita [6].

No séc. XVII, Galileu dedicou-se a estudar o movimento oscilatório e a velocidade do som [5]. Publicou em 1638 o tratado conhecido por “*Dois Novas Ciências*”, em que expôs a dedução quantitativa das leis das cordas, estabelecendo as relações entre frequência, comprimento, diâmetro, densidade e tensão [6].

Na medição da velocidade do som, Borrelli (1608-1679) e Viviani (1622-1703) determinaram o tempo entre o “flash” de um pequeno canhão e a recepção do som a uma distância pouco superior a uma milha, mediram o tempo e encontraram um valor de 350 m/s [6].

O desenvolvimento da Acústica como ciência, iniciou-se com Chlandi, com a edição, em 1802, do seu trabalho intitulado de “*Die AkustiH*”. Na mesma época, Young, realizou trabalhos sobre a teoria ondulatória, seguem-se, entretanto, trabalhos realizados por Newton e Leibnitz sobre este mesmo assunto [7].

Durante o séc. XIX, Jean-Baptist Biot fez as primeiras experiências para determinar a velocidade de propagação do som num meio sólido. No mesmo século, August Kundt realizou medições da velocidade do som no ar e noutros gases a partir da formação da onda estacionária num tubo. Actualmente, este tubo é conhecido por “*Tubo de ondas estacionárias ou Tubo de Kundt*” [6].

Em 1815, o matemático Nathaniel Bowditch descreveu as curvas resultantes da combinação de dois movimentos harmónicos simples, estudo desenvolvido mais tarde por Lissajous e Miller [6].

Em 1863, Hermann von Helmholtz escreveu “*On The Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Sound*”, onde publicou avanços no campo da audição, da psicofísica do som e da música [5]. Helmholtz, desenvolveu, ainda, os ressoadores de cavidade, que actualmente são um dos elementos nobres em termos de comportamento acústico. Estes ressoadores são, também, denominados de “*Ressoadores de Helmholtz*” [3] e estão na base deste trabalho.

O físico alemão Heinrich Rudolf Hertz descobriu o efeito fotoeléctrico, e contribuiu para a teoria das ondas electromagnéticas, demonstrando a existência de ondas electromagnéticas com comprimentos de onda diferentes dos da luz visível. Foi dado o seu nome à unidade de frequência – “*hertz*” [6].

O fim do séc. XIX e o início do séc. XX foram épocas de grande incremento no estudo do som, é nesta altura que surgem instrumentos decisivos e ainda actuais para o estudo do comportamento do som, os transdutores electromecânicos (microfone e altifalante) [6].

É também no início do séc. XX que a Acústica de Edifícios, tal como se conhece hoje, “nasce” pelas mãos do físico americano W. C. Sabine. Sabine desenvolveu o primeiro modelo teórico para determinar o tempo de reverberação, com base no volume e na área de absorção do compartimento, embora o arquitecto romano Vitruvius tenha escrito sobre algumas regras empíricas de como construir de forma a obter um som adequado em anfiteatros. Seguiram-se várias fórmulas de previsão para o

tempo de reverberação (Eyring, Millington-Sette, Kuttruff, Higini-Avau), tendo por base a formulação de Sabine [3].

Relativamente à absorção sonora em painéis perfurados, a história passa por Bolt, que em 1947 estudou a absorção sonora deste tipo de sistemas [8]. Em 1951, Ingard e Bolt concluíram que a absorção sonora depende das características do painel e da caixa-de-ar [9]. Um trabalho experimental desenvolvido por Callaway e Ramer, em 1952, demonstrou que a caixa-de-ar tem grande influência na absorção sonora do sistema ressonante [10].

Em 1969, Delany e Bazley desenvolveram fórmulas semi-empíricas para determinar a impedância acústica específica de materiais absorventes porosos [11]. Estas fórmulas foram posteriormente desenvolvidas por Mechel [12].

Com o enorme avanço que o processamento digital do sinal conheceu no final do séc. XX, o desenvolvimento experimental da caracterização da absorção dos sistemas teve um significativo impulso, relegando para segundo plano a modelação.

1.4. IMPACTE SOCIAL E ECONÓMICO

A revolução industrial e o consequente uso de máquinas “barulhentas”, expôs os trabalhadores a níveis de ruído nefastos. Sem que existisse regulamentação à data, os casos de redução e de perda de audição como consequência da exposição ao ruído no local de trabalho, foram-se somando ao longo do tempo, sendo neste momento uma das doenças profissionais mais comuns na Europa.

Actualmente, a maioria da população europeia vive nos centros urbanos. O aumento exponencial dos meios de transporte, individuais ou colectivos, nas duas últimas décadas, tornou estes espaços em verdadeiras “máquinas de ruído”.

Não existem, em termos mundiais, estimativas sobre o impacte e o custo da poluição sonora, no entanto, existe um proeminente exemplo que cobre a maioria dos países europeus, trata-se do “*European Union’s Green Paper on Future Noise Policy*” (1996).

Dados da Comissão Europeia de 1996, mostravam que, já nessa altura, cerca de 20% da população europeia estava diariamente exposta a níveis sonoros acima dos 56 dB, nível a partir do qual, há geralmente, perturbações do sono, da saúde e do bem-estar dos cidadãos. Em termos económicos, o ruído ambiental já tinha um custo para a sociedade de aproximadamente 0,2 a 2% do PIB de cada Estado membro da União Europeia [13].

Cita-se de Patrício [7] “...*As preocupações sociais respeitantes à qualidade do meio ambiente, entendido, no seu sentido mais abrangente, como a realidade que envolve os indivíduos, têm sido objecto de um crescimento muito acentuado...*”

Actualmente, o cidadão europeu comum, além de já ter ampla consciência sobre os malefícios da exposição ao ruído, é também mais atento e mais exigente, procurando obter a cada instante o máximo de conforto e de satisfação. As políticas nacionais e internacionais relativas à exposição ao ruído, ao isolamento sonoro e “tratamento” acústico dos espaços, são tradução das actuais necessidades das populações.

Em Portugal, apesar de existir uma legislação que procura satisfazer as necessidades individuais e colectivas da sua população no âmbito da acústica e da exposição ao ruído, parece ainda não existir uma consciência cultural relativamente à importância de uma acústica de qualidade.

É comum, as salas para espectáculos portuguesas “encherem” de pessoas que pagam bilhetes por um concerto, uma ópera, um teatro, uma orquestra, ou outro, sem que a acústica do espaço seja a adequada ao tipo de espectáculo que aí decorre. De uma forma geral, uma mesma sala para espectáculos recebe diferentes tipos de actividades. Ora como é sabido, o tempo de reverberação ideal de uma sala, varia com o tipo de actividade que nela irá decorrer, pelo que em regra, cada sala terá um tempo de reverberação adequado a um só tipo de espectáculo. Quando uma destas salas recebe diferentes tipos de espectáculos, a qualidade acústica de alguns deles é comprometida, e por conseguinte todo o espectáculo é, também, comprometido.

Actualmente, conciliar a “beleza” do espaço com o conforto acústico é uma tarefa mais simples. Existe uma grande oferta no mercado de materiais e sistemas absorventes sonoros bastante atractivos sob o ponto de vista da qualidade acústica e estética.

Os painéis perfurados, âmbito desta dissertação, são exemplo de sistemas absorventes sonoros que associam a inovação, o conforto acústico e o design atractivo. Importa ainda referir que, ao tratar-se de um produto português pode constituir, sobretudo no actual contexto de crise, uma oportunidade de negócio e um contributo, ainda que ténue, para a redução do défice da balança comercial do país, já que o mercado externo é também alvo da empresa portuguesa.

2

NOÇÕES GERAIS

2.1. INTRODUÇÃO

A Acústica, como uma parte da Física, pode ser compreendida como uma ciência onde se estuda as vibrações e as ondas mecânicas nos meios materiais [7].

As vibrações de frequência muito baixa (inferiores a 20 Hz) são os infra-sons, as de frequências entre os 20 e os 20000 Hz são os áudio-sons (audíveis pelo ouvido humano “normal”) e as frequências superiores são os ultra-sons [3].

O ouvido humano é sensível a uma faixa de frequências de cerca de 10 oitavas e distingue cerca de 3 a 4 mil tonalidades diferentes [7].

Aquilo que habitualmente é designado por som (quando é agradável ou com significado para o ouvinte) ou ruído (quando é desagradável ou sem significado para o ouvinte) é, na verdade, uma sensação provocada no cérebro devida à captação, pelo sistema auditivo, de alterações de pressão no meio de propagação das ondas sonoras. Por isso a variação de pressão provocada pelas ondas sonoras é o elemento mais importante a ser medido, tendo por base a pressão atmosférica (pressão atmosférica normal de referência=101400Pa) [3].

O limite superior de audição, expresso em nível de pressão sonora (isto porque, a escala logarítmica é a que permite traduzir de forma mais realista o poder resolvente do ouvido humano), para o ouvido “normal” a estímulos sonoros, é de 130 dB, sendo estabelecido como a pressão diferencial máxima que o tímpano pode suportar sem que ocorram lesões físicas permanentes [3].

2.2. O Som

2.2.1. O SOM NO AR

A acústica é a ciência que estuda o som, a sua propagação e as suas inter-relações com o ser humano, bem como as suas consequências [7].

A propagação de uma onda sonora no ar produz-se por movimento ondulatório, através do qual a molécula de ar afectada oscila em redor da sua posição de repouso. As moléculas do meio, colidem umas contra as outras, sucessivamente, e voltam à sua posição inicial devido à força elástica do ar. Estas perturbações traduzem-se por contracções e dilatações de volumes de ar elementares, correspondendo-lhes respectivamente, uma alteração de pressão, que em repouso é a pressão atmosférica P_0 , e um movimento vibratório das partículas de ar [3].

Propagando-se e atingindo o ouvinte, estas perturbações impressionam o tímpano e em consequência o sistema auditivo humano [3].

Em termos matemáticos, a propagação das ondas de pressão sonora, num meio isotrópico, sem viscosidade e em repouso, é dada pela seguinte expressão [3]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} * \frac{\delta^2 p}{\delta t^2} \quad (2.1)$$

onde:

p - Pressão (Pa)

c - Velocidade do som (m/s)

t - Tempo (s)

δ - Massa específica (Kg/m³)

A velocidade de propagação das ondas sonoras no ar, ou seja, a propagação da variação de pressão no ar, varia com a temperatura de acordo com a seguinte expressão [3]:

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.2)$$

em que:

$$T = 273,15 + \theta \text{ (} ^\circ\text{C)} \quad (2.3)$$

2.2.2. COMPRIMENTO DE ONDA

Para se poder efectuar o estudo dos sons importa conhecer o “tamanho” das ondas sonoras. Trata-se do comprimento de onda, que é a distância entre dois pontos idênticos consecutivos da onda periódica, e é específico de cada onda. O comprimento de onda pode ser obtido pela seguinte expressão [3]:

$$\lambda = c.T \text{ ou } \lambda = \frac{c}{f} \quad (2.4)$$

onde:

λ - Comprimento de onda (m)

c - Velocidade do som (m/s)

T - Período (s)

f - Frequência (Hz)

2.3. PRESSÃO SONORA, NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA

O sistema auditivo humano responde a uma gama alargada de valores de pressão sonora, que varia entre os 10⁻⁵ Pa, para o limiar da audição, e os 100 Pa, para o limiar da dor [3].

Tendo em conta a alargada gama de valores de pressão sonora, associada ao facto do ouvido não se comportar de uma forma linear aos estímulos, mas sim, de forma quase logarítmica, os valores das grandezas no domínio da acústica (pressão, potência e intensidade sonora) são correntemente expressos pelos seus níveis (fig. 2.1), considerados relativamente a valores de referência [3].

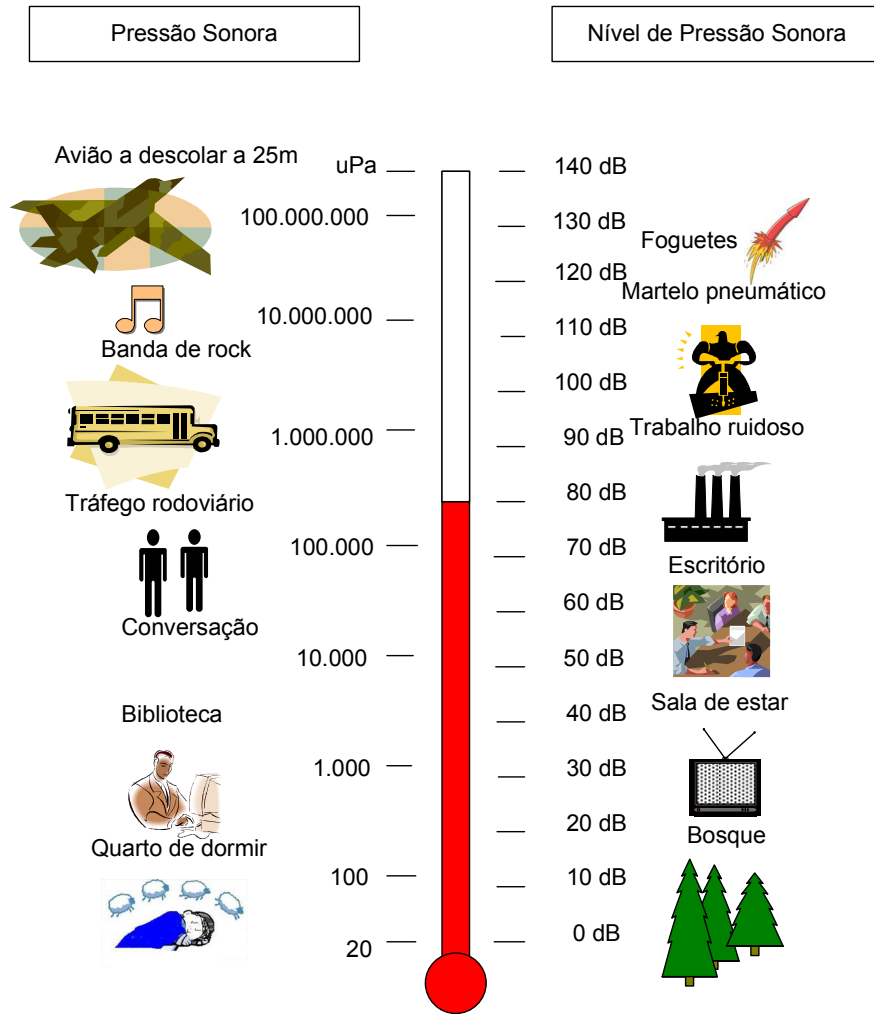


Fig.2.1 – Pressão e nível de pressão sonora

A figura 2.1 mostra como é comum a exposição das pessoas a níveis de ruído elevados.

O nível de pressão sonora, expresso em decibel (dB), é dado pela seguinte expressão [3]:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_{ef}^2}{P_0^2} \right) \quad (2.5)$$

em que a pressão sonora de referência (atmosférica), P_0 , toma o valor de $2 \cdot 10^{-5}$ Pascal, e o quadrado do valor eficaz da pressão sonora (fig. 2.2), para um determinado intervalo de tempo t , definido por $(t_2 - t_1)$, é dado por [7]:

$$P_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [p(t)]^2 dt \quad (2.6)$$

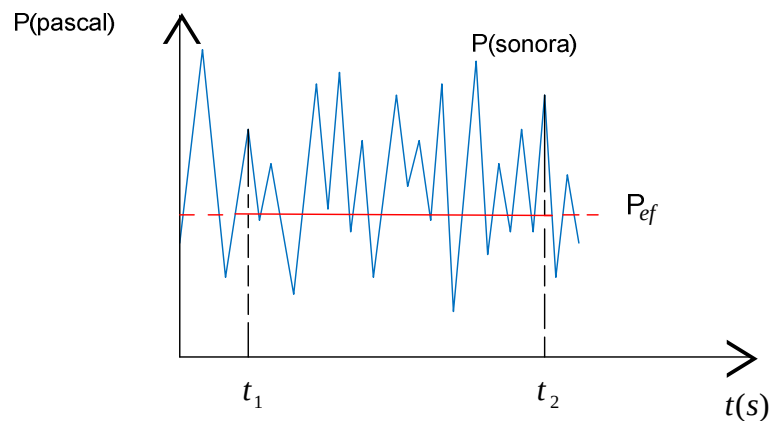


Fig.2.2 – Pressão sonora, pressão atmosférica e pressão eficaz

O nível de potência sonora de uma determinada fonte (a potência sonora é uma característica da fonte e não do estímulo criado por essa fonte, como é o caso da pressão e da intensidade sonora), pode ser obtido pela seguinte expressão [7]:

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.7)$$

onde W , representa o valor da potência sonora da fonte e o valor de referência da potência sonora, W_0 , toma o valor 10^{-12} Watt [7].

O nível de intensidade sonora, L_i , pode ser obtido através da seguinte expressão [3]:

$$L_i = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.8)$$

em que, o valor da intensidade de referencia I_0 , toma o valor de 10^{-12} Watt/m² e a intensidade sonora I , é definida como a média no tempo, do fluxo de energia sonora que atravessa uma superfície normal à direcção de propagação, por unidade de área [3].

2.4. NÍVEL SONORO

O nível sonoro pretende traduzir, por um só valor, a subjectividade da resposta do ouvido humano às diferentes frequências dos sons. Para tal, surgem as chamadas curvas de ponderação, que representam precisamente, as correcções efectuadas em função das frequências do som captado. Existem diferentes curvas de ponderação, sendo a mais usada a curva (ou filtro) A [7].

O nível sonoro em dB (A) traduz através de um único valor, a energia acústica de um som filtrado por uma curva de ponderação A [7].

Para se obter o nível sonoro de um som há que somar aos valores em análise dos níveis de pressão sonora em dB, os valores numéricos das ponderações da curva A (tabela 2.1) e, posteriormente, adiciona-se logaritmicamente cada um destes valores, sendo o resultado desta operação, o nível sonoro em dB (A) [3].

Tabela 2.1 – Valores numéricos das ponderações A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama audível [3]

BANDA DE FREQUÊNCIA (Hz)	PONDERAÇÃO A PARA 1/3 DE OITAVA	PONDERAÇÃO A PARA 1/1 DE OITAVA	BANDA DE FREQUÊNCIA (Hz)	PONDERAÇÃO A PARA 1/3 DE OITAVA	PONDERAÇÃO A PARA 1/1 DE OITAVA
25	-44,7		800	-0,8	
31	-39,4	-40	1 000	0	0
40	-34,6		1.250	+0,6	
50	-30,2		1.600	+1,0	
63	-26,2	-26	2.000	+1,2	+1
80	-22,5		2.500	+1,3	
100	-19,1		3.150	+1,2	
125	-16,1	-15,5	4.000	+1,0	+1
160	-13,4		5.000	+0,5	
200	-10,9		6.300	-0,1	
250	-8,6	-8,5	8.000	-1,1	-1
315	-6,6		10.000	-2,5	
400	-4,8		12.500	-4,3	
500	-3,2	-3	16.000	-6,6	-7
630	-1,9		20.000	-9,3	

3

ACÚSTICA EM RECINTOS FECHADOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os elementos mais importantes para a acústica num recinto fechado são a sua forma e os materiais que revestem as suas superfícies (paredes e tectos). As reflexões das ondas sonoras constituem o elemento básico desse comportamento acústico [3].

3.2. ABSORÇÃO SONORA

3.2.1. DEFINIÇÃO

A absorção sonora é a capacidade que os materiais possuem de poder transformar parte da energia sonora noutra forma de energia, normalmente a térmica [3]. Por definição a absorção sonora num meio é a redução da potência sonora por dissipação resultante da propagação do som nesse meio [2].

A absorção sonora depende, essencialmente, do tipo de material, respectiva densidade e espessura, do ângulo de incidência das ondas sonoras na superfície desse material e das condições de aplicação do sistema que o integra [2].

3.2.2. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

O coeficiente de absorção sonora α , é a razão entre a quantidade de energia sonora que é absorvida por determinado material e aquela que sobre ele incide [3].

Por definição, o coeficiente de absorção sonora de um meio material (numa dada banda de frequência e para certas condições de exposição), é a razão entre o valor da energia sonora absorvida nessa banda de frequência e o valor da energia sonora incidente na fronteira daquele meio, nessa mesma banda e naquelas condições de exposição [7]:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (3.1)$$

em que:

E_a - Energia absorvida

E_i - Energia incidente

Se o contorno do espaço fechado for constituído por elementos de superfície S_n , de materiais diferentes, define-se o coeficiente de absorção sonora médio $\bar{\alpha}$, para uma dada frequência, ou banda de frequências, pela expressão [3]:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_n \alpha_n S_n}{\sum_n S_n} \quad (3.2)$$

O coeficiente de absorção sonora varia entre 0 e 1. Quando um material tem um coeficiente de absorção sonora igual a 0,30, significa que absorve 30% da energia que sobre ele incide, reflectindo os restantes 70% [15]. O coeficiente de absorção sonora de um material ou sistema difere consoante a frequência do som incidente, conforme se pode observar na tabela 3.1. A partir dos resultados obtidos para as diferentes bandas de frequência, é determinado o seu coeficiente de absorção sonora médio. Um material muito reflector (por exemplo, mármore polido) tem um coeficiente de absorção sonora médio quase nulo (cerca de 0,01). Um material “absorvente” (por exemplo, lã de rocha) tem um coeficiente de absorção sonora médio de cerca de 0,60 [3]. Quanto mais reflectores são os materiais que revestem um recinto, mais demorado será o tempo de decaimento do som no local, o que provoca um tempo de reverberação mais elevado [3].

A determinação do coeficiente de absorção sonora de um material pode ser obtida utilizando uma câmara reverberante de acordo com a norma NP EN ISO 354: 2007 [14]. O valor deste coeficiente varia com o ângulo de incidência e com a frequência do som incidente [3].

O coeficiente de reflexão (quociente da energia reflectida, ou não absorvida pelo material, por unidade de tempo pela energia incidente, durante o mesmo intervalo de tempo), considerando ondas planas incidindo normalmente numa superfície, é dado pela expressão [16]:

$$|r| = \frac{p_r^2}{p_i^2} = \left| \frac{\vec{Z} - \rho_0 c_0}{\vec{Z} + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (3.3)$$

em que:

p_r - Pressão sonora da onda reflectida

p_i - Pressão sonora da onda incidente

$\vec{Z}$ - Impedância acústica oferecida pelo material à onda incidente e que será a sua impedância específica ao tratar-se de um meio definido

$\rho_0 c_0$ - Impedância específica do ar

O coeficiente de absorção sonora α (admitindo o meio em causa como indefinido), será o complementar à unidade, ou seja, dado pela expressão:

$$\alpha = 1 - \vec{r} \quad (3.4)$$

Para uma incidência for oblíqua, segundo um ângulo φ (da direcção de incidência com a normal à superfície do material), temos a expressão:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\vec{Z} \cos \varphi - \rho_0 c_0}{\vec{Z} \cos \varphi + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (3.5)$$

Estas expressões, 3.3, 3.4 e 3.5, são válidas para uma dada frequência, uma vez que a impedância acústica do material é função da mesma [16].

Tabela 3.1 – Valores de coeficiente de absorção sonora de alguns materiais ou sistemas [3]

FREQUÊNCIA (HZ)	125	250	500	1 K	2 K	4 K
Gesso cartonado, 2 placas (32 mm)	0,28	0,12	0,10	0,17	0,13	0,09
Madeira com caixa-de-ar de 25 mm	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
Painéis de contraplacado fino	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06
Vidro espesso	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Pavimento em betão	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Soalho (parquet) de madeira sobre betão	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Argamassa	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
Alcatifa densa colada sobre betão	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Alcatifa densa com base em borracha	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Alcatifa leve colada sobre betão	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40
Cortina leve	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina pesada	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Audiência – Estofa espesso	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
Audiência – Estofa médio	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
Audiência – Estofa leve	0,56	0,68	0,79	0,83	0,86	0,86
Cadeiras vazias – Estofa espesso	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Cadeiras vazias – Estofa médio	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
Cadeiras vazias – Estofa leve	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

3.2.3. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PONDERADO α_w

O coeficiente de absorção sonora ponderado obtém-se por ajuste ponderado numa curva de referência usando bandas de oitava dos 250 aos 4000 Hz.

Traça-se a curva dos valores do coeficiente de absorção sonora por banda de oitava e determina-se a soma dos desvios positivos de uma curva de referência móvel (fig. 3.1) e os valores reais. O valor do coeficiente de absorção sonora ponderado α_w , é o valor lido para a banda de oitava de frequência central 500 Hz na curva ajustada, de modo a que a soma dos desvios positivos seja a mais elevada possível, sem ultrapassar os 0,10 (em múltiplos de 0,05) [2].

Na figura 3.1 está representada a curva de referência para determinação do coeficiente de absorção sonora ponderado.

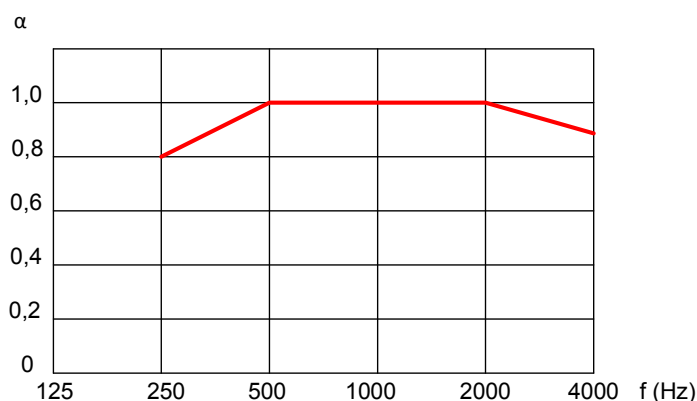


Fig.3.1 – Curva de referência para determinação do coeficiente de absorção sonora ponderado

3.2.4. INDICADORES DE FORMA L, M, H

Estes indicadores informam sobre os factores de absorção sonora que excedem a curva de referência em 0,25 ou mais, nas diferentes bandas de frequência. Assim, se a curva de referência for excedida em pelo menos 0,25 para a frequência de 250 Hz, deve acrescentar-se a letra L. Se isto acontecer nas frequências de 500 ou 1000 Hz, acrescenta-se a letra M. Por fim, a letra H deve ser usada para as frequências de 2000 e 4000 Hz. As letras L, M e H (indicadores de forma) devem estar entre parênteses [2].

3.2.5. CLASSES DE ABSORÇÃO SONORA

A norma EN ISO 11654: 1997 determina classes de absorção sonora de acordo com os valores do coeficiente de absorção sonora ponderado, conforme a tabela 3.2 [3].

Tabela 3.2 – Classes de absorção sonora [3]

CLASSE DE ABSORÇÃO SONORA	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PONDERADO
A	$\alpha_w \geq 0,90$
B	$0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$
C	$0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$
D	$0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$
E	$0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$
Sem classificação	$\alpha_w \leq 0,10$

3.2.6. ÁREA DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE

Por definição, a área de absorção sonora equivalente de um corpo, numa dada banda de frequências, para certas condições de exposição, é a área de uma superfície absorvente perfeita na qual, para essas condições de exposição, a potência dissipada seria igual à que é dissipada no corpo e a área de

absorção sonora de um recinto, numa dada banda de frequências, é a área de uma superfície absorvente perfeita na qual, a potência sonora dissipada seria igual à que é dissipada no recinto [2].

A dissipação da energia sonora num recinto está relacionada com o revestimento das suas superfícies e com os elementos ou número de pessoas que se encontram no seu interior [3].

Como anteriormente referido, a quantificação da dissipação da energia sonora num determinado espaço fechado é, normalmente, efectuada através do tempo de reverberação [2]. Assim sendo, para se determinar esta área de absorção sonora equivalente, pode recorrer-se a medições realizadas em laboratório, em conformidade com a norma NP EN ISO 354: 2007 [14].

3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

3.3.1. DEFINIÇÃO

O tempo de reverberação é o intervalo de tempo (medido em segundos) que num espaço “fechado”, um estímulo sonoro demora a extinguir-se por completo, após múltiplas reflexões. Por definição é o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora diminua 60 dB, após interrompida a emissão (fig. 3.2) [3].

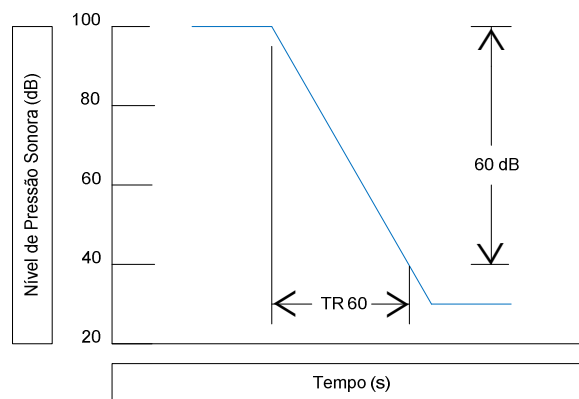


Fig.3.2 – Tempo de reverberação

O valor do tempo de reverberação depende da frequência, da absorção sonora dos materiais que integram a envolvente exposta (revestimentos ou elementos definidores da compartimentação), dos objectos existentes no recinto fechado, do número de pessoas no espaço, da humidade relativa e do volume do recinto [3].

3.3.2. FÓRMULAS DE PREVISÃO

3.3.2.1. Fórmula de Sabine

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad (3.6)$$

em que:

T - Tempo de reverberação, em segundos

V - Volume do compartimento (m^3)

A - Absorção sonora equivalente, (m^2)

sendo:

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (3.7)$$

onde:

α_i - Coeficiente de absorção sonora do material i (sem unidades)

S_i - Superfície real do material i (m²)

Em termos genéricos, a Fórmula de Sabine pode ser sistematizada pela expressão [3]:

$$T = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^N A_j + mV} \quad (3.8)$$

em que:

A_j - Absorções sonoras localizadas (tabela 3.3)

m - Absorção sonora do ar (m⁻¹) em função da humidade relativa (tabela 3.4)

Tabela 3.3 – Exemplos de absorções localizadas (m²) [3]

ABSORÇÃO LOCALIZADA (M ²)	125 HZ	250 HZ	500 HZ	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Pessoa de pé	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37
Músico de orquestra com instrumento	0,40	0,85	1,15	1,40	1,30	1,20
Cadeira ou peq. mesa (metal, madeira) (1)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04
Cadeira de madeira ocupada (1)	0,17	0,36	0,47	0,52	0,50	0,46
Cadeira estofada ocupada (1)	0,35	0,38	0,38	0,39	0,41	0,42

Se a disposição das cadeiras for como numa sala de espectáculos (muito agrupadas), deve utilizar-se um valor de coeficiente de absorção sonora de acordo com a tabela 3.1 e multiplicar-se pela área de pavimento da audiência (contando com uma margem extra de 0,5 m para atender ao acréscimo em altura das áreas de absorção reais) [3].

Tabela 3.4 – Absorção sonora do ar (m⁻¹) em função da humidade relativa [3]

HR (%)	< 1 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,008	0,016	0,056	0,188	0,34
40	0	0,004	0,008	0,044	0,096	0,21
60	0	0,003	0,004	0,028	0,064	0,14
80	0	0,002	0,004	0,008	0,052	0,11

A Fórmula de Sabine permite obter valores muito próximos da realidade para compartimentos com campos sonoros difusos e com um coeficiente de absorção sonora médio inferior a 0,20 [3].

3.3.2.2. Fórmula de Eyring

$$T = \frac{0,16V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (3.9)$$

em que:

T - Tempo de reverberação, em segundos

V - Volume do compartimento (m³)

$\bar{\alpha}$ - Média pesada pelas superfícies de S_i dos coeficientes de absorção sonora α_i das superfícies envolventes, ou seja: $\bar{\alpha} = \sum \alpha_i S_i / \sum S_i$

$S = \sum S_i$

A Fórmula de Eyring é mais adequada para compartimentos em que todas as superfícies do local têm coeficientes de absorção sonora semelhantes [3].

3.3.2.3. Fórmula de Mellington-Sette

$$T = \frac{0,16V}{-\sum_{i=1}^N S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (3.10)$$

em que:

T - Tempo de reverberação, em segundos

V - Volume do compartimento (m³)

α_i - Coeficiente de absorção sonora do material i (sem unidades)

S_i - Superfície real do material i (m²)

A Fórmula de Millington-Sette é mais adequada para compartimentos onde as superfícies têm coeficientes de absorção sonora com diferenças significativas [3].

3.3.2.4. Fórmula de Kuttruff

$$T = \frac{0,16V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}) [1 + \frac{\gamma^2}{2} \ln(1 - \bar{\alpha})]} \quad (3.11)$$

em que:

T - Tempo de reverberação, em segundos

V - Volume do compartimento (m³)

$\bar{\alpha}$ - Média pesada pelas superfícies de S_i dos coeficientes de absorção sonora α_i das superfícies envolventes, ou seja: $\bar{\alpha} = \sum \alpha_i S_i / \sum S_i$

$$S = \sum S_i$$

γ^2 - É a variância relativa da distribuição do comprimento dos percursos percorridos pelas ondas, que é função da geometria do compartimento (tabela 3.5)

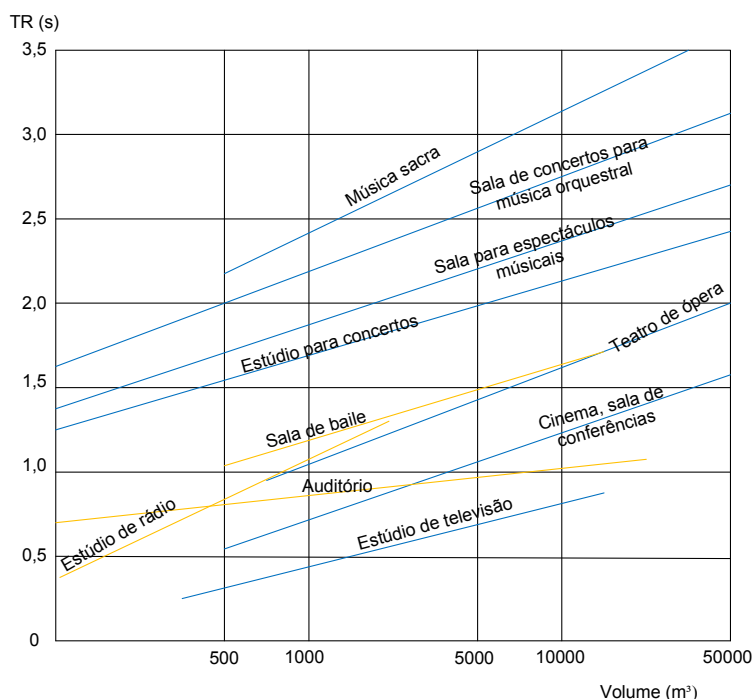
Tabela 3.5 – Exemplos de valores de γ^2 [3]

DIMENSÕES	γ^2	DIMENSÕES	γ^2	DIMENSÕES	γ^2	DIMENSÕES	γ^2
Esfera	0,125	1:2:2	0,363	1:1:10	0,415	1:5:10	0,510
1:1:1	0,342	1:2:5	0,403	1:5:5	0,464	1:10:10	0,613
1:1:2	0,356	1:1:5	0,412	1:2:10	0,465		

Em situações correntes γ^2 toma o valor de 0,4

3.3.2.5. Tempos de reverberação em função do volume do recinto

O tempo de reverberação num recinto fechado deve ser adequado à função atribuída ao próprio recinto. Na figura 3.3 apresentam-se os valores do tempo de reverberação aconselhado para recintos de utilização específica, em função do volume do recinto, para a banda de frequências de 500 Hz [7].

Fig.3.3 – Tempos de reverberação aconselhados em função do volume do recinto (para $f=500$ Hz)

3.4. CAMPO SONORO, CAMPO DIRECTO E CAMPO REVERBERADO

Um campo sonoro é uma zona do espaço onde existem ondas sonoras, sendo definido pela pressão sonora e pela velocidade das partículas. São estas variáveis e a relação de fase entre eles que

descrevem o comportamento das ondas sonoras no tempo e no espaço. O campo sonoro descreve a interação das ondas sonoras com o meio. A sua natureza depende da radiação da fonte sonora, da distância à fonte e dos obstáculos no percurso das ondas sonoras [6].

Um campo directo é um campo sonoro em que as ondas sonoras se podem propagar em todas as direcções sem obstáculos, não há, portanto, reflexão, difracção, refacção, absorção e difusão, e não havendo reflexão, não há fenómenos de ressonância. É praticamente impossível conseguir um campo directo, a melhor aproximação é a câmara anecóica, uma vez que quase não existem reflexões [6].

Quando uma fonte sonora emite num espaço fechado, o nível de pressão sonora em cada ponto é consequência de dois campos sonoros sobrepostos, ou seja, o campo directo, que se deve essencialmente às ondas directas, e o campo reverberado, onde há preponderância das ondas reflectidas (fig. 3.4) [3].

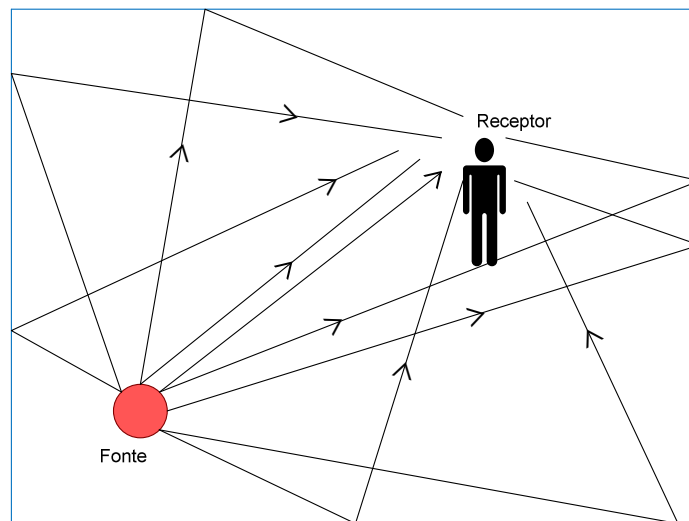


Fig.3.4 – Reflexões estabelecidas num recinto fechado

O campo directo decresce com a distância à fonte e o campo reverberado depende da absorção sonora do espaço. O nível de pressão sonora L_p , em cada ponto, pode ser calculado a partir do nível de potência sonora da fonte L_w , com factor de direccionalidade D e constante acústica do espaço R , pela expressão [3]:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{D}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (3.12)$$

Existe uma distância da fonte sonora, denominada “distância crítica”, “raio de reverberação” ou “rádio” (D_c), em que o campo directo e o campo reverberado são praticamente iguais. Para uma fonte omnidireccional, D_c , para salas rectangulares, é dado pela expressão [6]:

$$D_c = 0,14 \sqrt{S \bar{\alpha}} \quad (3.13)$$

em que:

D_c - Distância crítica

$\bar{\alpha}$ - Coeficiente médio de absorção sonora

S - Superfície dos materiais

3.5. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

3.5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No âmbito da acústica arquitectural, a absorção sonora dos materiais e sistemas utilizados é, usualmente, caracterizada pela descrição dos valores do coeficiente de absorção sonora no domínio de frequência entre os 125 e os 4000 Hz, descrição designada convencionalmente por “características de absorção sonora” [17].

Um material é absorvente sonoro quando a sua principal função é criar condições de conforto acústico a partir da absorção do som [3].

O mecanismo que leva à transformação de energia sonora, incidente no material, num outro tipo de energia, habitualmente, a energia térmica, determina a designação dos materiais ou sistemas absorventes sonoros em [2]:

- Materiais porosos e fibrosos (ou texturados)
- Membranas ressonantes
- Ressonadores de cavidade

Estes três tipos de materiais actuam em gamas distintas de frequências [2].

Os materiais porosos e fibrosos são mais eficazes nas altas frequências, os ressonadores de cavidade nas médias frequências e as membranas ressonantes nas baixas frequências [2].

É, no entanto, bastante usual encontrar sistemas absorventes sonoros que integram dois ou três dos referidos métodos de absorção sonora.

3.5.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS

O mecanismo de absorção sonora dos materiais porosos e fibrosos baseia-se na existência de poros e interstícios [17].

O movimento do ar, devido às variações de pressão, propaga-se nestes pequenos espaços em que, dadas as dimensões reduzidas, intervém a viscosidade do ar, originando uma degradação em energia calorífica e, por conseguinte, uma atenuação das ondas sonoras [17].

A eficácia destes materiais depende, essencialmente, da sua densidade e espessura [7].

A máxima eficácia no funcionamento destes sistemas é obtida com a colocação do material na posição em que a velocidade de vibração das partículas de ar é maior, permitindo, assim reduzir a energia cinética da vibração correspondente (fig. 3.5) [17].

A velocidade de vibração das partículas é maior à distância de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, λ , que incide sobre o material, pelo que, aumenta a quantidade de energia dissipada [7].

Na absorção sonora produzida por estes materiais há dois aspectos a considerar, por um lado, a energia susceptível de ser absorvida será tanto maior quanto melhor for a adaptação de impedâncias, isto é, quanto mais ar o material contiver [7].

Por outro lado, quando existe uma boa adaptação à impedância do ar, os poros serão relativamente grandes e o efeito da viscosidade será menos sentido, pelo que a absorção será menor.

Um bom absorvente deste tipo tem que ter um equilíbrio entre estas duas situações [17].

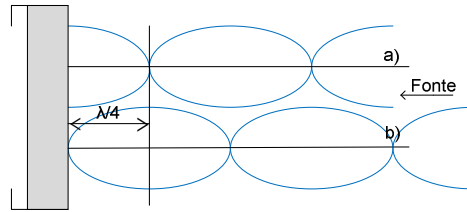


Fig.3.5 – Variação da pressão e da velocidade de vibração das partículas de incidência de uma onda sonora um elemento rígido: a) Pressão; b) Velocidade de vibração

3.5.2.1. Tecidos e alcatifas

As características de absorção sonora de cortinas, reposteiros, alcatifas e painéis decorativos de tecidos encorporados, podem diferir bastante [17].

O comportamento acústico das cortinas e reposteiros depende do seu peso específico, do grau de franzido e da distância à parede. O aumento do grau de franzido (número de pregas) aumenta a sua eficácia em toda a gama de frequências (fig. 3.6). O comportamento acústico das alcatifas depende da espessura do pelo e do tipo de suporte. O aumento da espessura aumenta a sua eficácia para as altas frequências [3].

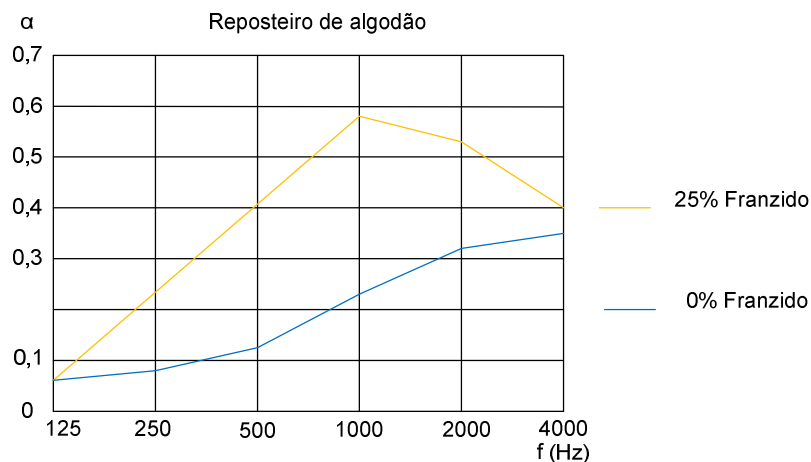


Fig.3.6 – Valores do coeficiente de absorção sonora de um reposteiro de algodão com diferentes percentagens de franzido

3.5.2.2. Massas porosas para projecção

As massas porosas para projecção são, normalmente, aplicadas sobre o tosco de paredes e tectos. Este tipo de material apresenta uma massa específica que varia entre 130 Kg/m³ e 165 Kg/m³, e são uma boa opção para aplicar em superfícies irregulares, ou em locais sujeitos a grandes variações de humidade relativa do ar ou a condensações de vapor de água [2].

As massas porosas para projecção apresentam um excelente desempenho acústico, como se pode verificar na tabela 3.6 [3].

À medida que a sua espessura aumenta o coeficiente de absorção sonora é mais elevado.

Tabela 3.6 – Exemplos de coeficientes de absorção sonora para massa porosa projectada (K13) aplicada sobre superfície rígida em diversas espessuras [3]

MMS	125 HZ	250 HZ	500 HZ	1 kHz	2 kHz	4 kHz	NRC
16 mm	0,05	0,16	0,44	0,79	0,90	0,91	0,55
25mm	0,08	0,29	0,75	0,98	0,93	0,96	0,75
38 mm	0,15	0,51	0,95	1,06	0,99	0,98	0,90
51 mm	0,26	0,68	1,05	1,10	1,03	0,98	0,95
63 mm	0,41	0,84	1,05	1,07	1,02	0,99	1,00
76 mm	0,57	0,99	1,04	1,03	1,00	1,00	1,00

3.5.2.3. Fibras minerais

A absorção sonora destes materiais em mantas ou placas, (lã de rocha, lã de vidro, de escórias de alto forno, etc.) varia em função do efeito da sua espessura, densidade e largura da caixa-de-ar existente. O aumento da espessura da manta de lã mineral faz aumentar a sua absorção sonora, sobretudo nas baixas frequências, mas à medida que a espessura aumenta, o ganho vai diminuindo [2].

A densidade das fibras minerais afecta pouco a sua absorção sonora (para valores entre os 25 a 100 Kg/m³). A existência de uma caixa-de-ar melhora a absorção sonora, principalmente para as baixas frequências [3].

3.5.2.4. Materiais plásticos

A sua absorção sonora depende da intercomunicabilidade dos alvéolos e, consequentemente, da maior ou menor facilidade de dissipação da energia sonora, que é característica dos materiais porosos [17].

Existem vários tipos de materiais plásticos que são usados, quer para tratamento acústico, quer para tratamento térmico, sendo o poliuretano expandido, o poliestireno expandido e as espumas flexíveis de poliuretano, os mais usuais [3].

3.5.2.5. Aglomerados de cortiça

Dos vários produtos derivados da cortiça, apenas os aglomerados negros de cortiça são considerados bons absorventes sonoros [3].

Na figura 3.7 é possível perceber a diferença existente entre o coeficiente de absorção sonora do aglomerado negro de cortiça e o coeficiente de absorção sonora do aglomerado composto de cortiça.

O valor de pico do coeficiente de absorção sonora do aglomerado composto de cortiça não ultrapassa o valor de 0,3, enquanto que, o valor de pico do coeficiente de absorção sonora do aglomerado negro de cortiça passa o valor de 0,7.

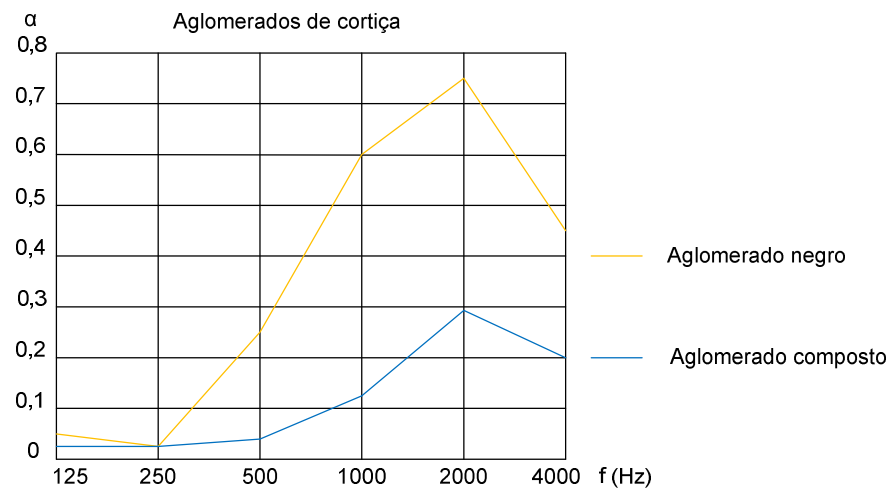


Fig.3.7 – Diferenças de absorção sonora entre aglomerado negro e aglomerado composto de cortiça

3.5.3. MEMBRANAS RESSONANTES

As membranas ressonantes são sistemas onde intervém a porosidade e a ressonância do sistema. A absorção sonora destes sistemas consiste em transformar a energia sonora em energia mecânica e energia térmica. As membranas ressonantes são constituídas, habitualmente, por uma grande área de painéis de espessura reduzida, podendo ter material absorvente na caixa-de-ar (fig. 3.8). A colocação de material absorvente na caixa-de-ar entre o painel e a parede, ou tecto, aumenta a absorção sonora do sistema para as altas frequências (fig. 3.9) [2].

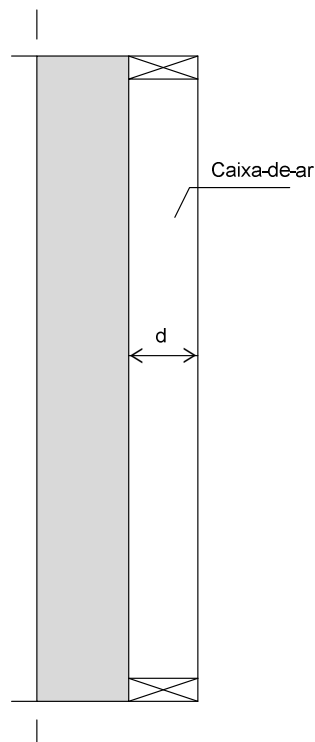


Fig.3.8 – Membrana ressonante

A frequência f , para a qual a membrana tem um coeficiente de absorção sonora máximo (frequência de ressonância) é dada pela expressão [2]:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{md}} \quad (3.14)$$

em que:

c - Velocidade de propagação do som no ar (m/s)

ρ - Massa volúmica do ar (Kg/m³)

m - Massa superficial do painel (Kg/m²)

d - Espessura da caixa-de-ar (m)

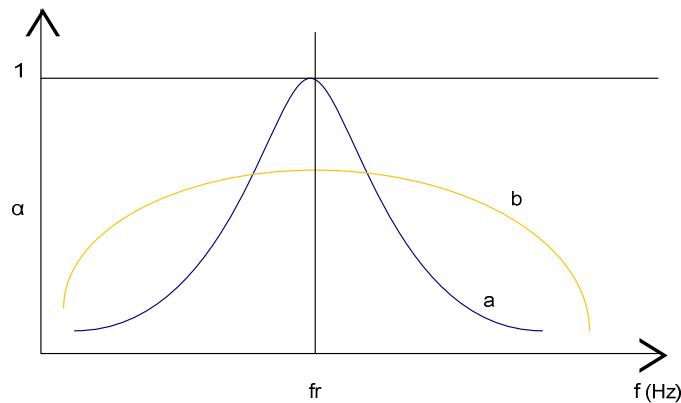


Fig.3.9 – Ilustração da selectividade de uma membrana ressonante; a) Sem material poroso no tardo da caixa-de-ar; b) Com material poroso no tardo da caixa-de-ar

3.5.4. RESSOADORES DE CAVIDADE

Os ressoadores de cavidade, ou ressoadores de Helmholtz que serão mais adiante abordados experimentalmente, têm maior eficácia nas médias frequências. A forma mais vulgar de um ressoador de Helmholtz é uma garrafa vazia (fig. 3.10). A frequência de ressonância deste sistema depende do volume da cavidade e das outras dimensões geométricas, sendo a sua frequência de eficácia máxima dada pela expressão [7]:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L \times V}} \quad (3.15)$$

em que:

S - Secção de abertura de passagem (área sombreada da figura 3.10)

L - Comprimento do gargalo

V - Volume da cavidade

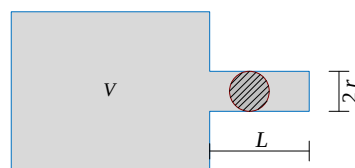


Fig.3.10 – Esquema básico de um ressoador de cavidade

Estes sistemas consistem num volume de ar no interior de uma cavidade, ligado à atmosfera geral por um pequeno volume de ar semelhante ao contido numa garrafa. O ar contido no “gargalo” é colocado em vibração, imprimindo deslocamentos à massa de ar contida no mesmo, acompanhados de dissipação de energia devido ao atrito do ar contra as suas paredes rígidas [3].

Tal como nas membranas, a absorção sonora destes sistemas passa pela transformação da energia sonora em energia mecânica e em energia térmica. A sua zona de eficácia pode ser alargada pela inclusão de material absorvente sonoro na caixa-de-ar, no entanto, perde-se amplitude de absorção [3].

A expressão apresentada (3.15) não se adapta a todas as formas que podem conceber-se para ressoadores de cavidade, no entanto, pode ser feita a sua adaptação aos sistemas mais correntes (fig. 3.11) [7].

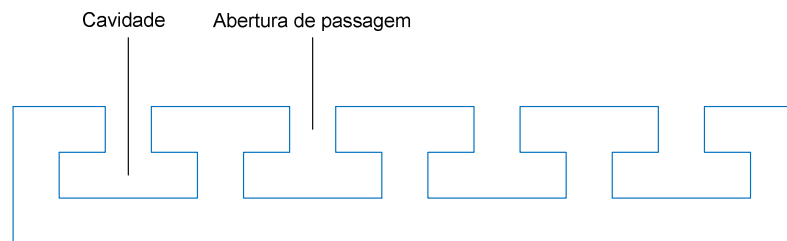


Fig.3.11 – Sistema - tipo de ressonador de cavidade

O caso mais usual destes sistemas são os ressoadores agrupados, conforme se mostra na figura 3.12 (por exemplo em painéis perfurados metálicos ou de madeira para tectos falsos), sendo a sua frequência de eficácia máxima obtida pela seguinte expressão (válida para $f \cdot d < 3400 \text{ Hz} \cdot \text{cm}$) [3]:

$$fr = \frac{10c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(e + 1,6r)d}} \quad (3.16)$$

em que:

- P - Percentagem de área perfurada (%)
- e - Espessura da placa perfurada (cm)
- r - Raio de cada perfuração (cm)
- d - Largura da caixa-de-ar (cm)

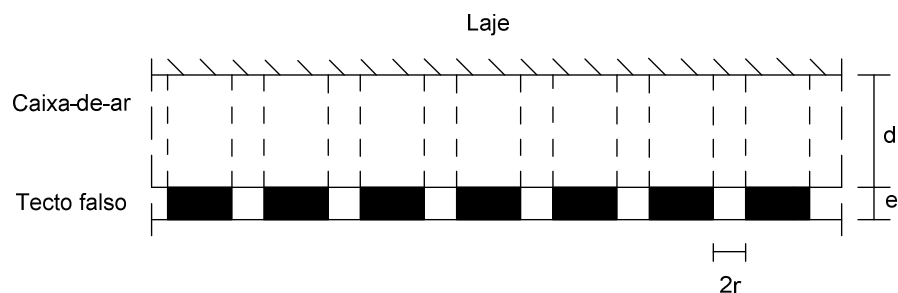


Fig.3.12 – Esquema básico de ressoadores agrupados

A absorção sonora aumenta, para as mesmas condições de aplicação, com o aumento da percentagem de perfuração das placas, atingindo o seu máximo para cerca de 25% de área aberta [3].

Se um painel apresentar aberturas com dimensões diferentes, funcionará como um conjunto de ressoadores de cavidade, correspondendo a cada tipo de perfuração uma frequência de ressonância diferente [2].

A colocação de material poroso na cavidade do ressoador, aumenta a largura de banda de eficiência dos painéis, embora reduza a absorção máxima para a frequência de ressonância [7].

A figura 3.13, ilustra uma conjugação de sistemas que permitem absorver energia sonora numa gama relativamente alargada de frequências. Nas frequências baixas a absorção é conferida pelo sistema de painel ressonante, nas frequências médias a absorção é conseguida através da furação e das cavidades que constituem modelos de ressoadores de Helmholtz e nas frequências altas a absorção é função do material poroso colocado entre o painel e o elemento rígido de apoio (parede ou tecto). A figura 3.14 apresenta uma ilustração esquemática da possível evolução da absorção sonora em sistemas deste tipo [7].

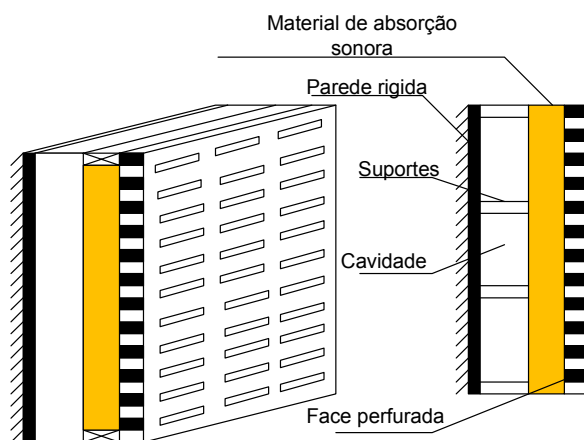


Fig.3.13 – Ilustração esquemática de sistemas associando diferentes processos de absorção sonora

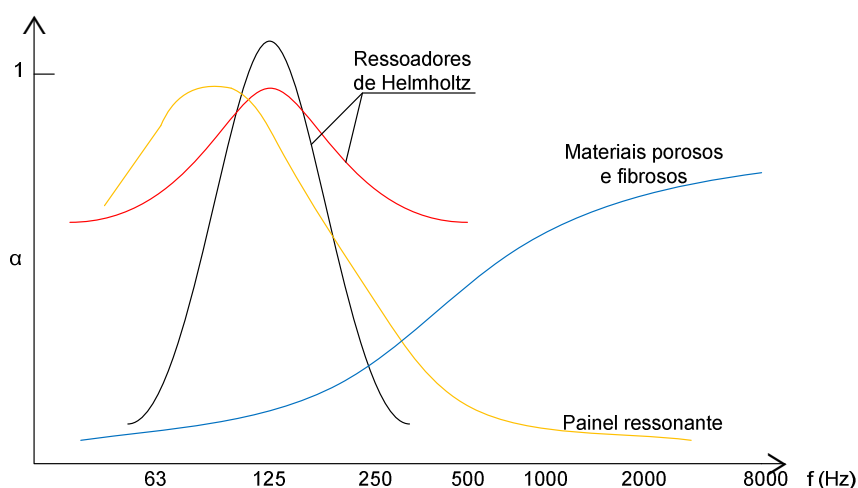


Fig.3.14 – Evolução da absorção sonora em vários sistemas compostos

4

METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

4.1. INTRODUÇÃO

A investigação científica pode ser suportada por métodos teóricos, por métodos experimentais, ou por ambos.

Dos métodos experimentais actualmente disponíveis para determinar o coeficiente de absorção sonora, de um determinado material ou sistema, o que produz resultados mais fidedignos, é o método experimental em câmara reverberante. Note-se que também se pode utilizar o tubo de ondas estacionárias para ensaios experimentais.

No entanto, há que salientar que, o método experimental em câmara reverberante envolve um grande consumo de recursos, quer financeiros, de tempo, de logística, de mão-de-obra e de matéria-prima, já que necessita de amostras de grandes dimensões. Este método aumenta o desperdício e é ecologicamente penalizante.

Encontrar um modelo teórico capaz de reproduzir com fiabilidade os resultados obtidos através do método experimental em câmara reverberante, e portanto, resultados que traduzem a realidade, é um desafio que deve ser seguido por todo e qualquer investigador.

O método experimental em câmara reverberante é o método utilizado no trabalho que aqui se desenvolve para determinar o coeficiente de absorção sonora das amostras a ensaiar, tendo como objectivo avaliar se um modelo teórico é capaz de reproduzir os mesmos resultados, permitindo assim, em futuros desenvolvimentos de novos produtos, limitar o número de ensaios com base na avaliação teórica.

4.2. MODELAÇÃO TEÓRICA DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE PAINÉIS PERFURADOS

4.2.1. INTRODUÇÃO

Os modelos teóricos para determinação do coeficiente de absorção sonora de painéis perfurados consistem, essencialmente, na conversão da impedância acústica de apenas um furo do painel num valor médio, que corresponde à impedância acústica da área perfurada do painel. O painel será constituído por um material suficientemente denso e rígido para que a sua área não perfurada seja completamente reflectora. O painel será tratado como um conjunto de tubos curtos de comprimento igual à espessura do próprio painel, em que:

$$l_0 < \lambda \quad (4.1)$$

onde:

l_0 - Comprimento do tubo

λ - Comprimento da onda sonora

Para determinar a impedância acústica deste tipo de sistemas recorre-se ao método da matriz de transferência. Tendo em conta a continuidade da velocidade da partícula em ambas as faces do painel perfurado e conhecendo as características acústicas do meio, é possível determinar, através deste método, a impedância acústica superficial da face não exposta do painel. Quando este tipo de sistemas suportam no tardo da caixa-de-ar materiais absorventes porosos, como no caso em estudo, importa determinar a impedância característica (Z_c) e o coeficiente de propagação (γ) destes materiais. A sua determinação pode ser realizada por via experimental ou através de modelos teóricos como os propostos por Delany e Bazley [11], ou por Mechel [12]. De acordo com o referido no capítulo 3, nas expressões 3.3, 3.4 e 3.5, conhecendo a impedância acústica superficial do sistema é possível determinar o coeficiente de absorção sonora para incidência normal e oblíqua.

4.2.2. MODELO DE DELANY E BAZLEY

Delany e Bazley [11] desenvolveram fórmulas semi-empíricas para a determinação da impedância característica Z_c e do coeficiente de propagação γ , de materiais absorventes porosos (com porosidade perto da unidade), em função da frequência da onda sonora, f , e da resistência à passagem do ar, σ , destes materiais. Estas fórmulas (em unidades CGS; $g.s^{-1}.cm^{-3}$) são traduzidas pelas seguintes expressões:

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 9,08 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,75} - j(11,9 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,73}) \right] \quad (4.2)$$

$$\gamma = \frac{\omega}{c_0} \left[10,3 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,59} + j(1 + 10,8 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,70}) \right] \quad (4.3)$$

sendo:

$\rho_0 c_0$ - Impedância específica do ar

c_0 - Celeridade do som no ar

ω - Frequência angular

Conhecidas a impedância característica e o coeficiente de propagação, é possível estimar a impedância Z do material absorvente, para uma determinada espessura e , através da seguinte expressão:

$$Z = Z_c \coth(\gamma e) \quad (4.4)$$

4.2.3. MODELO DE MECHEL

O modelo teórico desenvolvido por Mechel [12], para determinar o coeficiente de absorção sonora de materiais porosos e fibrosos, tem por base o modelo proposto por Delany e Bazley. Mechel introduz

um novo parâmetro, a porosidade do material, e desenvolve expressões teóricas distintas, consoante se trate de baixas frequências ou médias/altas frequências.

Assim, para a determinação da impedância característica Z_c e do coeficiente de propagação γ , Mechel propõe:

Para baixas frequências:

$$\gamma = j \sqrt{1 - j \left(\frac{\varphi}{2\pi E} \right)} \quad (4.5)$$

$$Z_c = \left(\frac{1}{j\varphi h} \right) \gamma \quad (4.6)$$

Para médias e altas frequências:

$$\gamma = \frac{0,2082}{E^{0,6193}} + j \left(1 + \frac{0,1087}{E^{0,6731}} \right) \quad (4.7)$$

$$Z_c = \left(1 + \frac{0,06082}{E^{0,717}} \right) - j \left(\frac{0,1323}{E^{0,6601}} \right) \quad (4.8)$$

onde:

φ - Constante adiabática do ar

h - Porosidade do material absorvente

em que E , é uma variável adimensional, função da frequência e da resistência à passagem do ar e é dada pela seguinte expressão:

$$E = \frac{\rho_0 f}{\sigma} \quad (4.9)$$

sendo:

ρ_0 - Densidade do ar

f - Frequência da onda sonora

σ - Resistência à passagem do ar

Conhecidas a impedância característica e o coeficiente de propagação, é possível estimar a impedância Z do material absorvente, para uma determinada espessura e , através da seguinte expressão:

$$Z = \frac{Z_c / \cos \theta_1}{\tanh(K_0 e \gamma \cos \theta_1)} \quad (4.10)$$

em que K_0 , número de onda em campo livre, é dado pela expressão:

$$K_0 = \omega / c_0 \quad (4.11)$$

Conhecido o ângulo de incidência da onda sonora, θ , o ângulo complexo de refração no material absorvente, θ_1 , é dado pela expressão:

$$\cos^2 \theta_1 = \frac{(\gamma^2 + \sin^2 \theta)}{\gamma^2} \quad (4.12)$$

4.2.4. IMPEDÂNCIA ACÚSTICA SUPERFICIAL DO SISTEMA

A impedância acústica superficial do sistema constituído por um painel perfurado, mais material absorvente poroso, mais caixa-de-ar, mais parede rígida, é dada pela seguinte expressão [18]:

$$Z_{\text{sistema}} = Z_{\text{painel}} + Z_{\text{interior}} \quad (4.13)$$

onde:

$$Z_{\text{painel}} = \frac{Z_{\text{tubo}}}{\varepsilon} \quad (4.14)$$

em que ε , é a percentagem da área perfurada do painel.

De acordo com Maa [19], a impedância acústica do tubo pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$Z_{\text{tubo}} = i\omega\rho_0 l_0 \left[1 - \frac{2J_1(x\sqrt{-i})}{(x\sqrt{-i})J_0(x\sqrt{-i})} \right]^{-1} \quad (4.15)$$

onde J_0 e J_1 é a função de Bessel de ordem 0 e 1, respectivamente, l_0 é o comprimento do tubo e o valor de x é dado por:

$$x = d \sqrt{\frac{\omega\rho_0}{4\eta}} \quad (4.16)$$

em que:

- d - Diâmetro do tubo
- ω - Frequência angular
- η - Viscosidade do ar
- ρ_0 - Densidade do ar

Para valores de x situados no intervalo de 1 a 10, a impedância acústica do tubo é dada por:

$$Z_{\text{tubo}} = \frac{32\eta l_0}{d^2} \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + i\omega\rho_0 l_0 \left[1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + x^2/2}} \right] \quad (4.17)$$

Para os restantes valores de x e, considerando as simplificações desenvolvidas por Crandall [20], a impedância acústica do tubo pode ser obtida através das seguintes expressões:

$$\text{se } x < 1: Z_{\text{tubo}} = \frac{8\eta l_0}{(d/2)^2} + i \frac{4}{3} \omega\rho_0 l_0 \quad (4.18)$$

$$\text{se } x > 10: Z_{\text{tubo}} = \sqrt{2\omega\eta\rho_0} \frac{l_0}{(d/2)} + i(\sqrt{2\omega\eta\rho_0} \frac{l_0}{(d/2)} + \omega\rho_0 l_0) \quad (4.19)$$

As expressões atrás apresentadas, são válidas, apenas, para tubos de comprimento infinito, pelo que, para tubos de comprimento finito, deverão ser adicionados factores de correcção, quer à parte real, quer à parte imaginária. Estes factores de correcção devem-se, essencialmente, à viscosidade em torno dos orifícios e no interior dos tubos, à impedância radiativa dos orifícios e aos efeitos da interacção entre os tubos. De acordo com Ingard e Morse [21], [22], estes factores correctivos podem ser obtidos pela seguinte expressão:

$$F_{correctivos} = \left[2\sqrt{2\omega\eta\rho_0} + \rho_0 c_0 \pi^2 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 + i\omega\rho_0\partial \right] \quad (4.20)$$

O valor de ∂ pode ser estimado a partir da seguinte expressão [23], [24]:

$$\partial = \frac{8d}{3\pi} \left(1 - 1,47\sqrt{\varepsilon} + 0,47\sqrt{\varepsilon^3} \right) \quad (4.21)$$

De acordo com Patrício [18], a impedância acústica superficial, da face não exposta (fig. 4.1) do painel perfurado, pode ser prevista usando o método da matriz de transferência. Este método permite determinar a pressão sonora e a velocidade de partícula num determinado ponto ($i+1$), conhecendo os respectivos valores num outro ponto (i), distanciados d_i , num meio com uma impedância característica Z_{c_i} e um coeficiente de propagação γ_i . Para tal pode ser usada a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} P_{i+1} \\ V_{x_{i+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_{x_i} d_i) & j \frac{Z_{c_i} \sin(\gamma_{x_i} d_i)}{\cos \theta_i} \\ j \frac{\cos \theta_i \sin(\gamma_{x_i} d_i)}{Z_{c_i}} & \cos(\gamma_{x_i} d_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_i \\ V_{x_i} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

sendo γ_{x_i} dado pela Lei de Snell, através da seguinte expressão:

$$\gamma_{x_i} = \sqrt{\gamma_i^2 - (\gamma_{i+1} \sin \theta_{i+1})^2} \quad (4.23)$$

Sabendo-se qual a impedância característica e qual o coeficiente de propagação de um meio, é possível prever qual a impedância superficial específica do meio usando a seguinte expressão (de acordo com a figura 4.2):

$$Z_{i+1} = \frac{Z_{c_i}}{\cos \theta_i} \cdot \frac{Z_i + j \frac{Z_{c_i}}{\cos \theta_i} \tan(\gamma_{x_i} d_i)}{\frac{Z_{c_i}}{\cos \theta_i} + j Z_i \tan(\gamma_{x_i} d_i)} \quad (4.24)$$

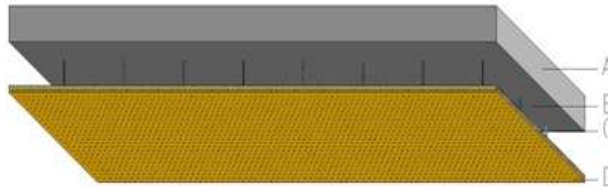


Fig.4.1 – Sistema absorvente sonoro constituído por: A – Parede ou tecto duro; B – Caixa-de-ar; C – Material poroso ou fibroso; D – Painel perfurado

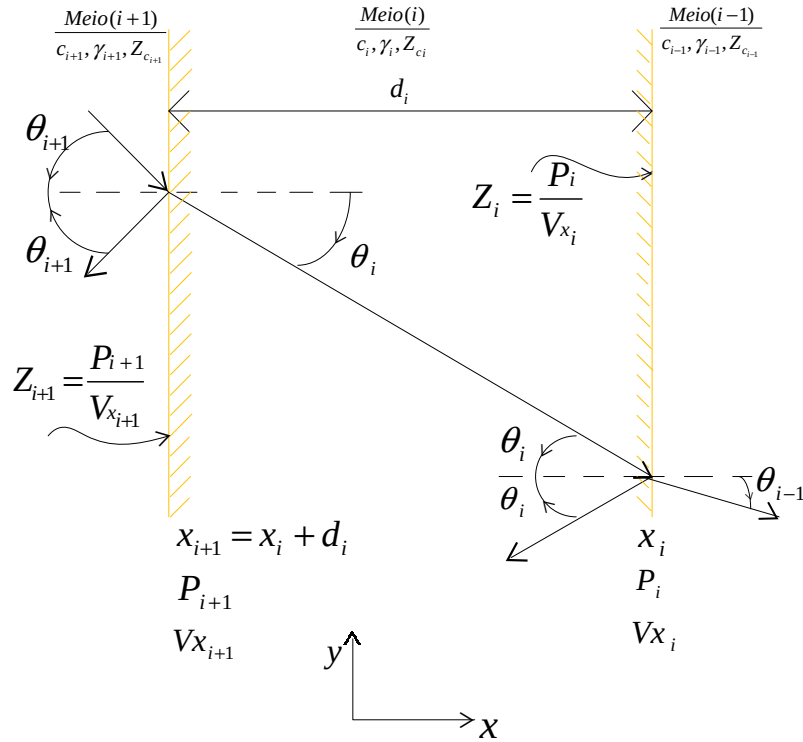


Fig.4.2 – Geometria para a modelação da matriz de transferência

4.3. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PELO MÉTODO EXPERIMENTAL EM CÂMARA REVERBERANTE

A determinação do coeficiente de absorção sonora dos painéis em análise pelo método experimental em câmara reverberante, deve seguir as regras da normalização em vigor, ou seja, deve ser efectuado de acordo com a NP EN ISO 354: 2007 [14].

4.3.1. CONDIÇÕES DA CÂMARA REVERBERANTE

A norma NP EN ISO 354: 2007 recomenda que o volume da câmara reverberante, para a realização dos ensaios em análise, não deve ser inferior a 150 m³. Para câmaras a construir, o seu volume deve ser cerca de 200 m³, no entanto, de acordo com a norma, para câmaras reverberantes com volume superior a 500 m³ a precisão das medições pode ser afectada, sobretudo para as altas frequências, em virtude da significativa absorção sonora incrementada pelo ar [14].

Para a realização dos ensaios em análise, a forma da câmara reverberante, deve satisfazer a seguinte condição [14]:

$$l_{\max} < 1,9V^{1/3} \quad (4.25)$$

em que:

$l_{\max}$ - Comprimento, em metros, da maior linha recta contida no perímetro da câmara (por exemplo, numa câmara com planta rectangular, corresponde à maior diagonal)

V - Volume da câmara reverberante em m³

A área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante, sem a amostra a ensaiar, designada por A_1 , determinada em bandas de terço de oitava, não deve exceder os valores da tabela 4.1 e o campo sonoro, estabelecido na câmara reverberante, deve ser suficientemente difuso para que as medições efectuadas na câmara sejam próximas das condições reais que se estabelecem no interior de um recinto fechado corrente, como um auditório, uma igreja, uma sala de espectáculos, entre outros [14].

Tabela 4.1 – Valores máximos de área de absorção sonora equivalente para câmara reverberante com $V=200 \text{ m}^3$ [14]

FREQUÊNCIA (HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$A_1 \text{ (m}^2\text{)}$	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
FREQUÊNCIA (HZ)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$A_1 \text{ (m}^2\text{)}$	6,5	7,0	7,5	8,0	9,5	10,5	12,0	13,0	14,0

Se o volume da câmara reverberante não for de 200 m^3 , os valores deste quadro devem ser multiplicados por:

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

De notar que, de acordo com esta norma internacional, a descrição da área de absorção sonora equivalente, da câmara reverberante vazia, no domínio da frequência, deve ser regular e não apresentar picos ou depressões de amplitude maiores do que 15% da média dos valores correspondentes às duas bandas de terço de oitava adjacente [14].

4.3.2. PROVETE DE ENSAIO

Para elementos absorventes planos, como no caso em estudo, o provete deve ter uma área entre 10 m^2 e 12 m^2 . Se o volume da câmara reverberante for superior a 200 m^3 , então, o limite superior para a área do provete deve ser multiplicado por $(V/200\text{m}^3)^{2/3}$. De referir que, quanto maior for a câmara reverberante maior deverá ser a área do provete de ensaio. Se o coeficiente de absorção sonora do provete for baixo, deve-se escolher a área do limite superior [14].

A amostra deve ser rectangular e ter uma relação largura/comprimento entre 0,7 e 1. A distância de qualquer um dos pontos da amostra às paredes da câmara reverberante deve ser pelo menos 1 m [14].

4.3.3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO INTERIOR DA CÂMARA REVERBERANTE

As medições efectuadas com a câmara reverberante vazia e com a câmara contendo a amostra devem ser efectuadas em condições semelhantes, de temperatura e humidade relativa, sendo que a humidade relativa deve estar compreendida entre 30% e 90%, e a temperatura não deve ser inferior a 15°C [14].

4.3.4. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A norma estabelece dois métodos para a medição de curvas de decaimento, ou seja, o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva integrada [14]. Este trabalho foi realizado recorrendo ao método do ruído interrompido.

Relativamente aos microfones a utilizar nas medições, a norma preconiza que estes devem ser omnidireccionais e de incidência aleatória. Os registos devem ser feitos com diferentes posições dos microfones, que devem ter um afastamento entre si de 1,5 m e de 2 m da fonte sonora e de pelo menos 1 m das superfícies da câmara reverberante e da amostra. Os microfones têm que ter, no mínimo, três posições. A fonte sonora, também, deve ser omnidireccional e deve ter, pelo menos, duas posições, com um espaçamento mínimo de 3 m [14].

4.3.5. MÉTODO DO RUÍDO INTERROMPIDO

No método do ruído interrompido, a curva de decaimento resulta de um processo estatístico, onde é necessário calcular a média de vários tempos de reverberação, medidos para uma posição fonte/microfone de forma a obter uma repetibilidade adequada. A fonte sonora deve emitir um sinal com espectro contínuo de banda larga, sendo que este, deve ser tal que as diferenças nos níveis de pressão sonora resultantes na câmara reverberante sejam menores que 6 dB em bandas de um terço de oitava adjacentes, ou em banda estreita com uma largura de banda de pelo menos um terço de oitava. O sinal deve ter um tempo de excitação de pelo menos metade do valor estimado para o tempo de reverberação esperado [14].

O equipamento de medição deve possuir filtros de um terço de oitava, que devem estar de acordo com a IEC 61260 [14].

4.3.6. MÉTODO DE CÁLCULO

O tempo de reverberação da câmara reverberante com e sem a amostra, respectivamente T_2 e T_1 , é resultado da média aritmética do número de medições em cada banda de frequência [14].

Determinados os tempos de reverberação da câmara reverberante com e sem a amostra, procede-se ao cálculo da área de absorção sonora equivalente A_n , em m^2 , sendo $n=1$ para a câmara reverberante vazia e $n=2$ para a câmara reverberante contendo o provete de ensaio. O valor de A_n pode ser obtido através da expressão:

$$A_n = \frac{55,3V}{cT_n} - 4Vm_n \quad (4.26)$$

onde:

V - Volume da câmara reverberante (m^3)

c - Celeridade do som no ar (m/s)

T_n - Tempos de reverberação T_2 e T_1 (s)

m_n - Coeficiente de atenuação sonora devido à presença do ar, sendo $m_n = m_1$, para a câmara reverberante sem a amostra e $m_n = m_2$, para a câmara reverberante contendo a amostra

O valor de m_n , em m^{-1} , deve ser calculado de acordo com a ISO 9613-1, usando as condições climáticas resultantes das medições com a câmara reverberante vazia ($n=1$) e com a câmara reverberante com o provete de ensaio ($n=2$). O valor de m pode ser determinado pela expressão:

$$m = \frac{\alpha}{10 \log(e)} \quad (4.27)$$

Determinados os valores de A_1 e A_2 , a área de absorção sonora A_T , pode ser calculada pela expressão:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,5V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (4.28)$$

sendo:

c_1 - Celeridade do som no ar à temperatura t_1

c_2 - Celeridade do som no ar à temperatura t_2

O termo $[4V(m_2 - m_1)]$ não deve exceder em mais de 0,5 m² a área de absorção sonora equivalente e só deve ser determinado quando os valores da humidade relativa e da temperatura excederem os valores constantes na tabela 4.2 [14].

Tabela 4.2 – Requisitos para os valores de temperatura e humidade relativa durante a medição do tempo de reverberação

HUMIDADE RELATIVA DURANTE AS MEDIÇÕES	VARIAÇÃO PERMITIDA DA HUMIDADE RELATIVA	VARIAÇÃO PERMITIDA DA TEMPERATURA	TEMPERATURA MÍNIMA PERMITIDA
Inferior a 60%	3%	3°C	10°C
Superior a 60%	5%	5°C	10°C

O coeficiente de absorção sonora da amostra, α_s , pode ser determinado pela expressão:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (4.29)$$

sendo:

S - Área da amostra (m²)

4.3.7. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados devem ser registados, em tabelas ou gráficos, para todas as bandas de frequência de medição. A área de absorção sonora equivalente da amostra deve ser arredondada a 0,1 m² e o coeficiente de absorção sonora a 0,01 [14].

Quanto ao relatório de ensaio (ver anexos A1 e A2), este deve fazer referência à norma NP EN ISO 354: 2007 e deve incluir os seguintes dados [14]:

- a) Nome do laboratório que realizou o ensaio.
- b) Data do ensaio.
- c) Descrição da amostra, nomeadamente a sua área, montagem e a sua posição na câmara reverberante.
- d) Forma da câmara reverberante, seu tratamento de difusão, incluindo o número e dimensões dos difusores. O número de microfones e as posições da fonte sonora.
- e) Dimensões da câmara reverberante, nomeadamente, o volume e as áreas das paredes, tecto e pavimento.
- f) Temperatura e humidade relativa durante a medição de T_1 e T_2 .
- h) Tempos de reverberação médios T_1 e T_2 , para cada banda de frequência.
- i) Resultados do ensaio

5

APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS

5.1. INTRODUÇÃO

O objectivo deste trabalho é determinar o coeficiente de absorção sonora do sistema absorvente em estudo. Para tal, e como já anteriormente referido, a determinação deste coeficiente foi suportada por dois métodos distintos, ou seja, por método teórico e por método experimental.

Tendo em conta o intervalo temporal para a elaboração desta dissertação, torna-se imperativo que a determinação do coeficiente de absorção sonora do sistema através de modelo teórico, seja realizada com recurso a um software concebido para o efeito.

Assim sendo, para prever o coeficiente de absorção sonora, do sistema absorvente proposto, através de um modelo teórico, utilizou-se o WinFLAG. Este software reproduz o modelo teórico já descrito no capítulo 4 desta dissertação.

Para determinar o coeficiente de absorção sonora de um sistema absorvente, como aquele que este trabalho apresenta, utiliza-se o método da matriz de transferência, descrito em vários papers [18] e livros [25] e apresentado no capítulo anterior. No capítulo 4 são, também, apresentados dois dos quatros modelos teóricos que o software propõe para determinar o coeficiente de absorção sonora dos materiais porosos. Ou seja, o modelo de Delany e Bazley [11] e o modelo de Mechel [12], descritos no capítulo anterior, e ainda, o modelo de Attenborough [26] e o modelo de Allard-Johnson [27].

O modelo proposto por Attenborough, embora possa ser usado para determinar o coeficiente de absorção sonora de um material poroso, é mais dirigido para a previsão da propagação das ondas sonoras no exterior [26]. No caso do modelo teórico de Allard-Johnson, o mais complexo dos quatro modelos de suporte do WinFLAG, o seu uso é determinado por um estudo muito profundo do material que se pretende avaliar, já que é necessário conhecer inúmeras das suas características [27].

Para realização desta dissertação e, determinação do coeficiente de absorção sonora das amostras em estudo através de modelo teórico, a opção recaiu sobre o modelo de Mechel e sobre o modelo de Delany e Bazley, como suporte para a determinação do coeficiente de absorção sonora do sistema. O recurso a estes modelos implica o conhecimento prévio da densidade, resistividade e porosidade do material poroso que constitui o sistema absorvente [12].

A previsão do coeficiente de absorção sonora do sistema absorvente em estudo, com recurso ao proposto software, implica, ainda, o conhecimento prévio das propriedades do painel que constitui esse sistema, nomeadamente, a sua espessura, densidade, diâmetro dos furos, área de furação, resistência e resistência corrigida. A espessura da caixa-de-ar e a posição de cada camada constituinte

do sistema absorvente, têm, também, que ser previamente definidas, conforme é exemplificado na figura 5.1.

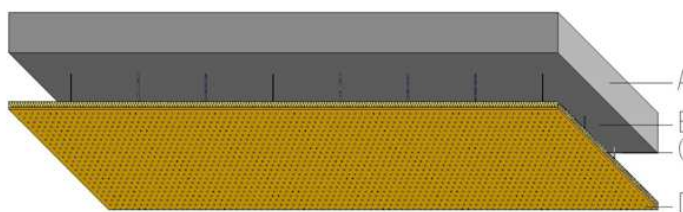


Fig.5.1 – Definição das camadas constituintes dos painéis perfurados. A – Tecto ou parede dura; B – Caixa-de-ar; C – Material poroso ou fibroso; D – Painel perfurado

5.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO SISTEMA ABSORVENTE COM RECURSO A MODELO TEÓRICO

5.2.1. INTRODUÇÃO DE DADOS

Todas as propriedades dos materiais, necessárias à realização deste estudo foram disponibilizadas pelos seus fornecedores, com excepção da resistividade da lã mineral usada nos ensaios. Para obter a resistividade do referido material, recorreu-se aos valores obtidos a partir do gráfico da figura 5.2.

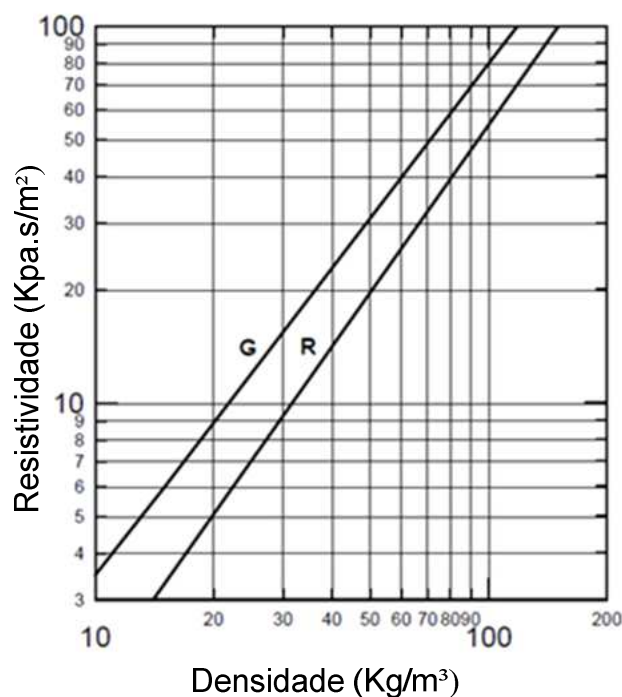


Fig.5.2 – Valores da resistividade da lã de rocha e lã de vidro, R e G, respectivamente, em função da densidade (adaptado de [28])

No ponto 5.2 é feita uma apresentação da simulação efectuada da modelação do sistema absorvente sonoro proposto a estudo, com vista à determinação do seu coeficiente de absorção sonora. É também

apresentada a definição do sistema e características dos materiais utilizados, os modelos teóricos usados, a introdução de valores e o resultado desta modelação.

5.2.2. INPUT DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ABSORVENTE SONORO

5.2.2.1. Definição do sistema absorvente sonoro

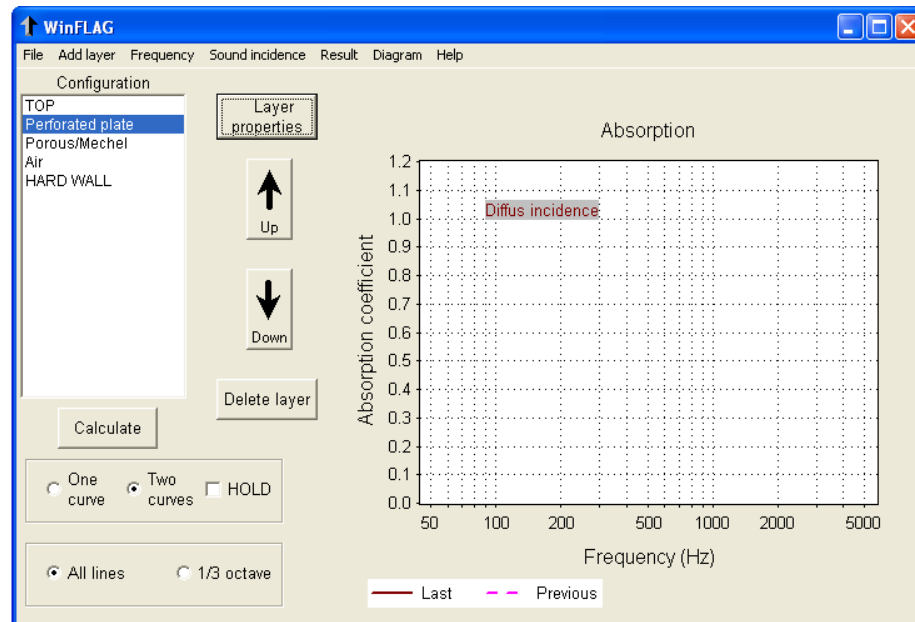


Fig.5.3 – Definição do sistema absorvente sonoro, constituído por painel perfurado, lã mineral fibrada (modelo de Mechel), caixa-de-ar e parede/tecto

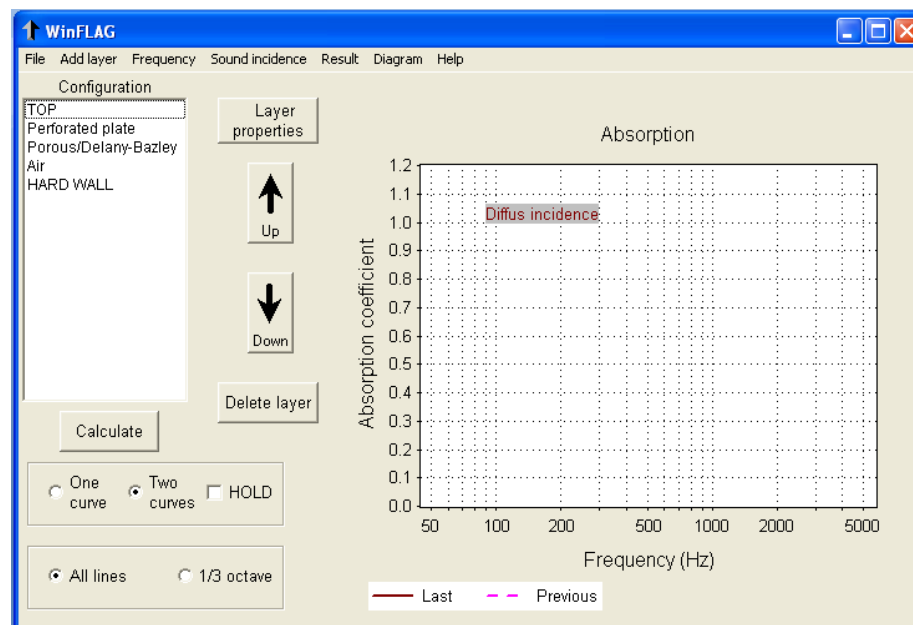


Fig.5.4 – Definição do sistema absorvente sonoro, constituído por painel perfurado, lã mineral fibrada (modelo de Delany e Bazley), caixa-de-ar e parede/tecto

5.2.2.2. Características dos painéis perfurados

Neste trabalho de dissertação foram usados dois tipos de painéis perfurados à base de compósito de fibras de madeira e cimento, ambos com a mesma densidade (1000 Kg/m^3) e com a mesma espessura (12 mm). Um dos painéis apresentava uma malha de furação quadrada de 16 mm, sendo o diâmetro dos furos de 12 mm e um segundo painel, com uma malha de furação quadrada de 32 mm e furos com diâmetro de 8mm (figuras 5.5 e 5.6).

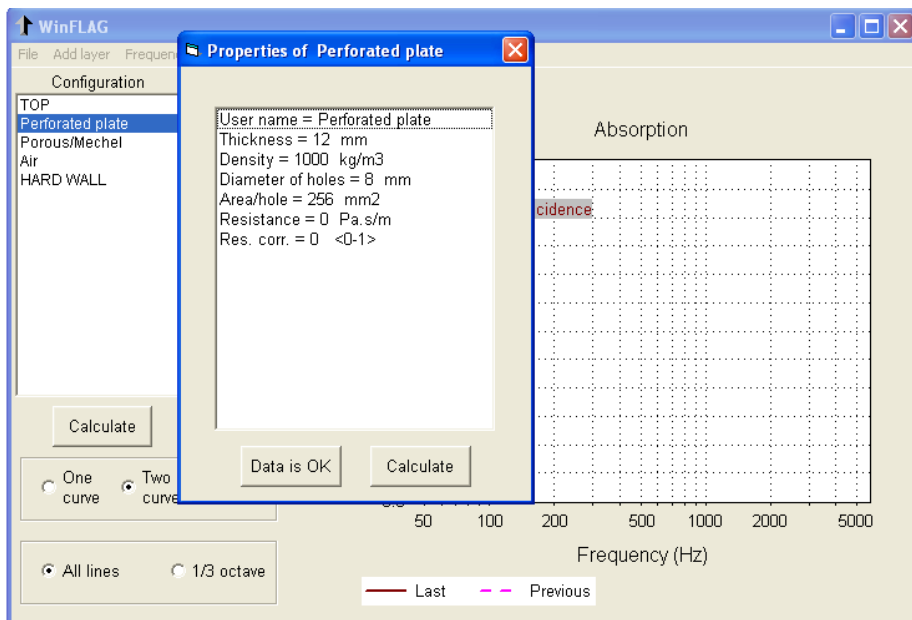


Fig.5.5 – Input das características de um dos painéis perfurados

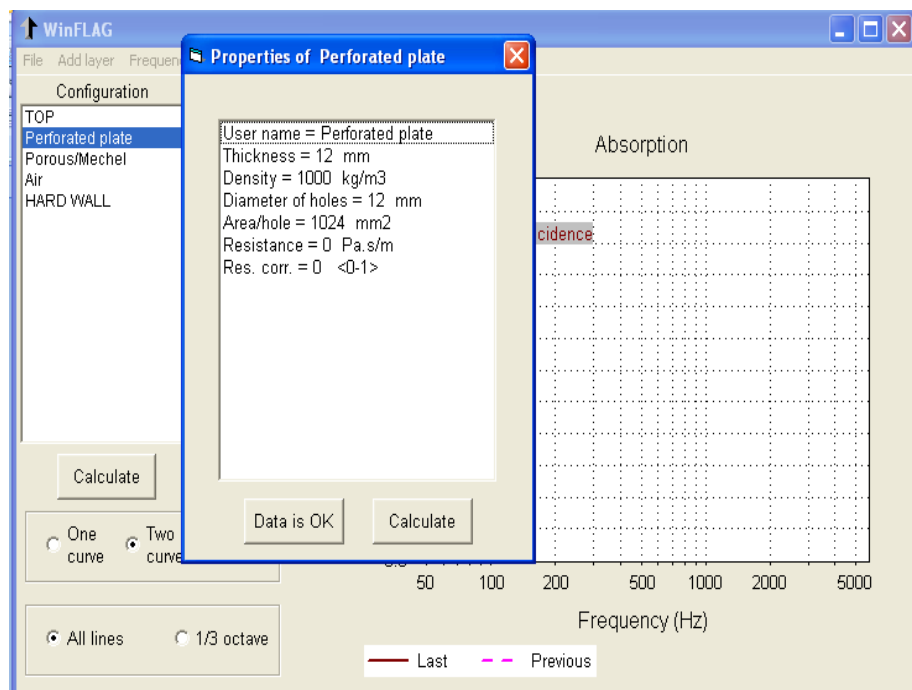


Fig.5.6 – Input das características do segundo painel perfurado

5.2.2.3. Características da lã mineral fibrada

A lã mineral fibrada possui uma espessura de 40 mm e uma densidade de 30 Kg/m³.

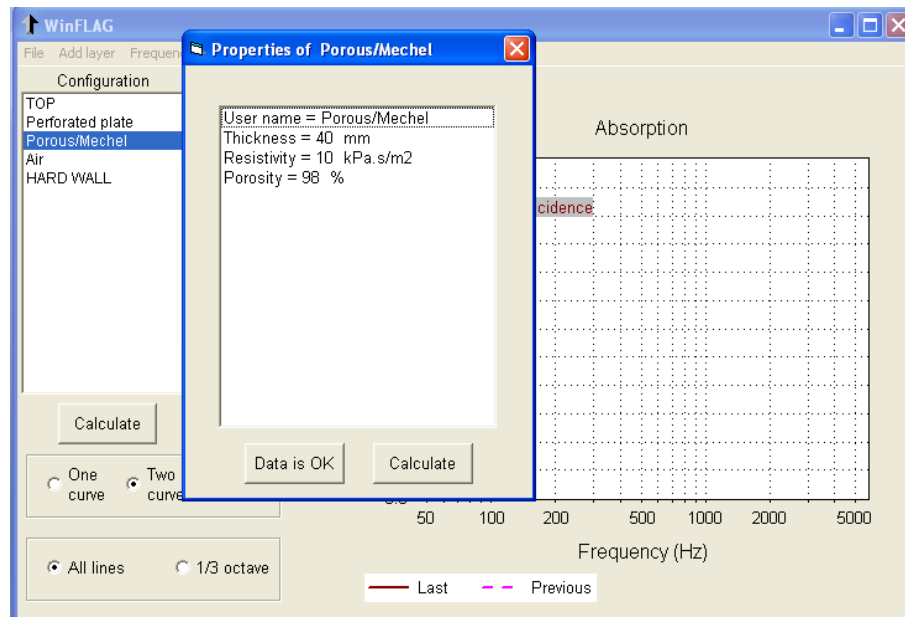


Fig.5.7 – Input das características da lã mineral fibrada

5.2.2.4. Características da caixa-de-ar

Os ensaios efectuados contaram com uma caixa-de-ar que tomou os valores de 100, 200 e 400 mm, conforme as figuras 5.8, 5.9 e 5.10, respectivamente.

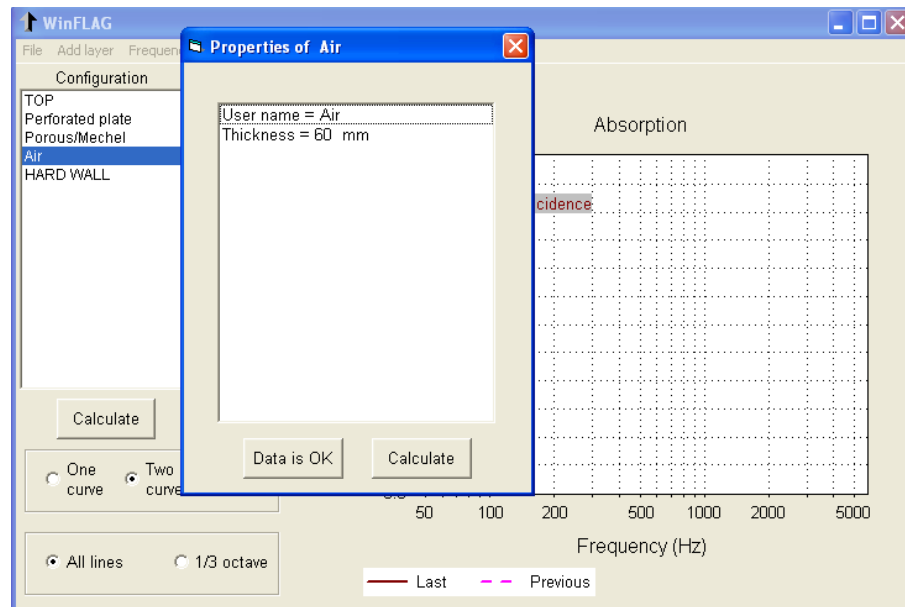


Fig.5.8 – Caixa-de-ar com 100 mm de espessura preenchida parcialmente por uma camada de lã mineral fibrada com 40 mm de espessura

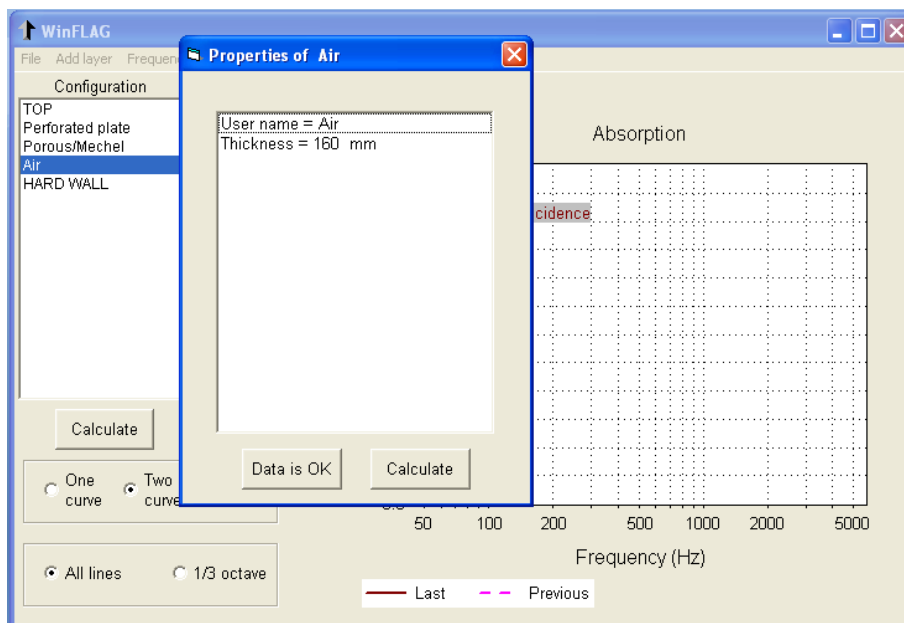


Fig.5.9 – Caixa-de-ar com 200 mm de espessura preenchida parcialmente por uma camada de lã mineral fibrada com 40 mm de espessura

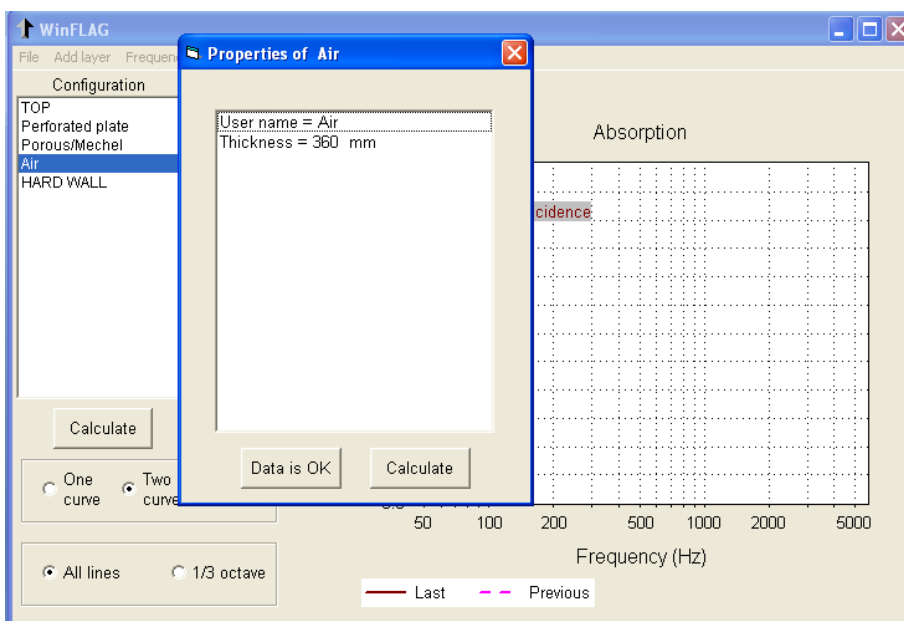


Fig.5.10 – Caixa-de-ar com 400 mm de espessura preenchida parcialmente por uma camada de lã mineral fibrada com 40 mm de espessura

5.2.3. OUTPUT DE RESULTADOS

A figura 5.11 apresenta o output dos valores do coeficiente de absorção sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava, para uma das soluções em análise e para campo difuso, com recurso ao modelo de Mechel. Estes resultados permitem verificar, desde já, que o sistema apresente um significativo coeficiente de absorção sonora, principalmente a partir da banda de frequência de 250 Hz.

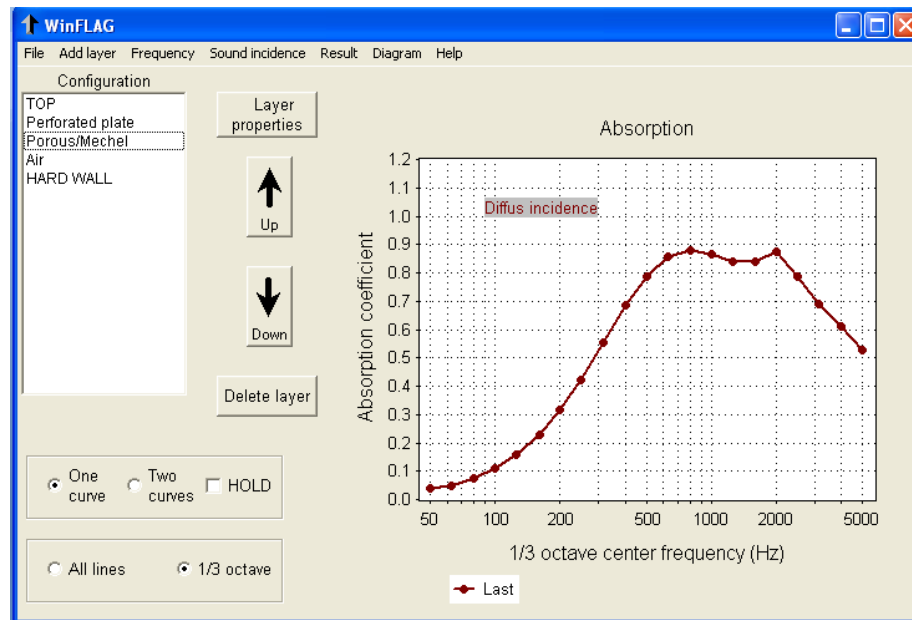


Fig.5.11 – Output dos valores do coeficiente de absorção sonora

5.3. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO SISTEMA ABSORVENTE PELO MÉTODO EXPERIMENTAL EM CÂMARA REVERBERANTE

5.3.1. INTRODUÇÃO

A determinação do coeficiente de absorção sonora dos painéis em análise pelo método experimental em câmara reverberante, deve seguir as regras da normalização em vigor, ou seja, deve ser efectuado de acordo com a NP EN ISO 354: 2007 [14].

Os ensaios das amostras de estudo foram efectuados pela equipa do Núcleo de Investigação & Desenvolvimento em Engenharia Acústica (NI&DIA). A realização dos ensaios foi suportada pela câmara reverberante R1 da FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), conforme as figuras 5.12 e 5.13. Os painéis foram assentes sobre uma estrutura de madeira apoiada no pavimento da câmara reverberante (fig.5.14).



Fig.5.12 – Câmara reverberante R1 da FEUP

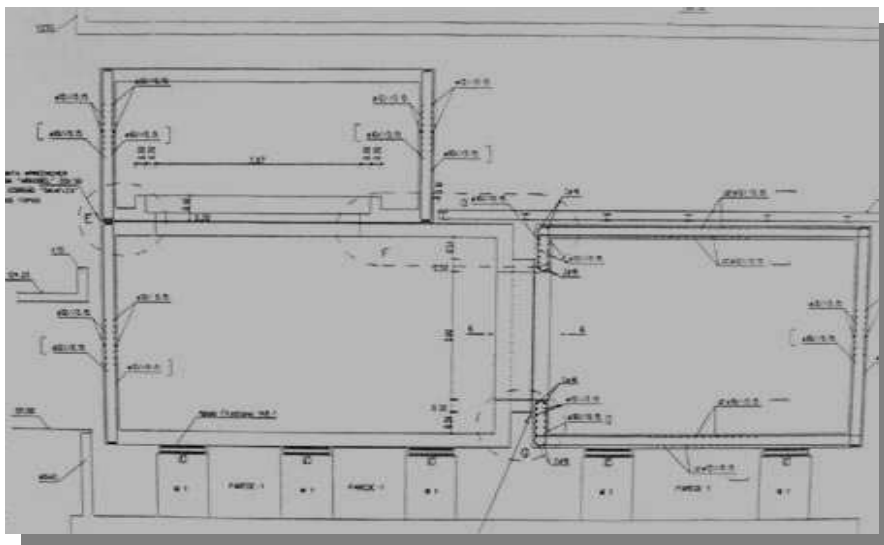


Fig.5.13 – Esquema das câmaras reverberantes da FEUP (corte transversal)



Fig.5.14 – Interior da câmara reverberante R1 com estrutura de madeira para suporte dos painéis

5.3.2. CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

5.3.2.1. Dimensões

- a) Comprimento máximo: 7,50 m
- b) Comprimento mínimo: 7,00 m
- c) Largura máxima: 6,15 m
- d) Altura: 4,65 m
- e) Volume: 217 m³

5.3.2.2. Tempo de reverberação

A figura 5.15 mostra o tempo de reverberação, por banda de frequência de 1/3 de oitava, da câmara reverberante R1 sem o provete de ensaio

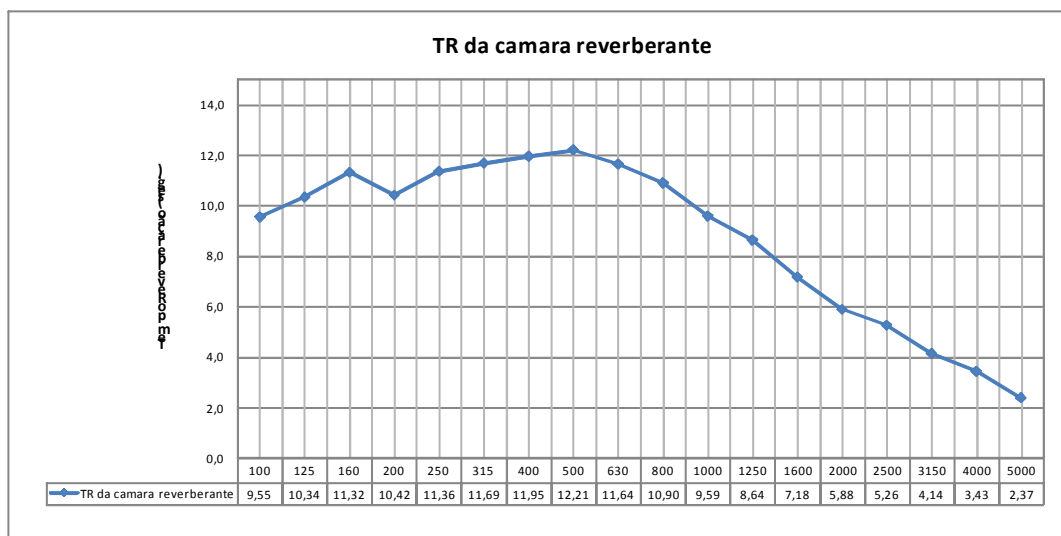


Fig.5.15 – Tempo de reverberação

5.3.3. EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

- a) Sonómetro Bruel & Kjaer 2260 (verificado no ISQ – Bol. Ver. 245.70/08.629 de 15 de Outubro de 2008).
- b) Microfone, marca Bruel & Kjaer, modelo 4189.
- c) Pré-amplificador, marca Bruel & Kjaer, modelo ZC0026.
- d) Fonte sonora, marca Bruel & Kjaer, modelo 4296.
- e) Calibrador, marca Bruel & Kjaer, modelo 4231 (verificado no ISQ – Bol. Ver. 245.70/08.629 de 15 de Outubro de 2008).
- f) Termo - Higrómetro Digital 4600.

5.3.4. CARACTERÍSTICAS DOS PROVETES DE ENSAIO

- a) Placas perfuradas de compósito de fibras de madeira e cimento com 1250 mm*600 mm*12 mm, furos de 12 mm afastados de 32 mm, com uma taxa de furação de 9,2% (figura 5.16).

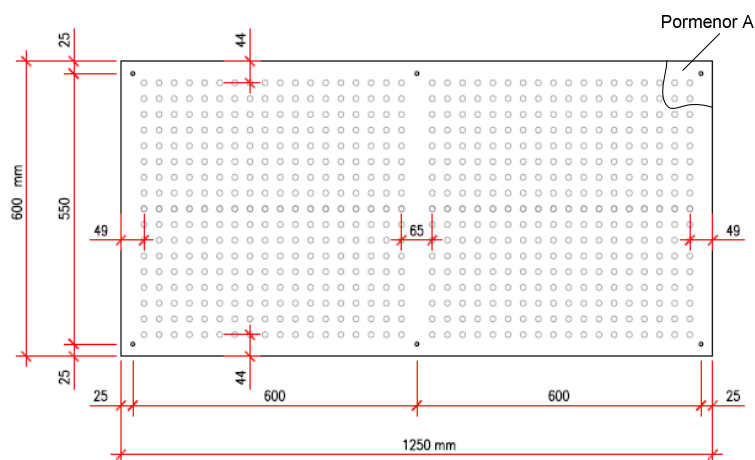


Fig.5.16 – Placa perfurada com 9,2% de taxa de furação

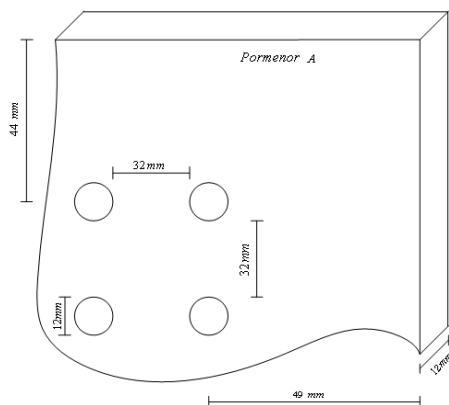


Fig.5.17 – Pormenor A

b) Placas perfuradas de compósito de fibras de madeira e cimento com 600 mm*625 mm*12 mm, furos de 8 mm afastados de 16 mm, com uma taxa de furação de 15,5% (figura 5.18).

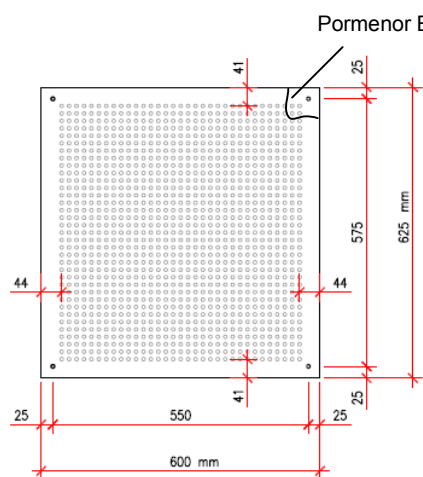


Fig.5.18 – Placa perfurada com 15,5% de taxa de furação

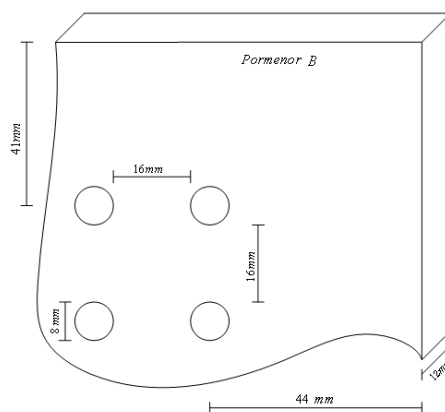


Fig.5.19 – Pormenor B

5.3.5. CARACTERÍSTICAS DA CAIXA-DE-AR

Durante os ensaios foram utilizadas três estruturas de madeira, conforme as figuras 5.20 e 5.21, que permitiram a montagem dos painéis perfurados a uma distância do pavimento da câmara reverberante de 400 mm, 200 mm e 100 mm.

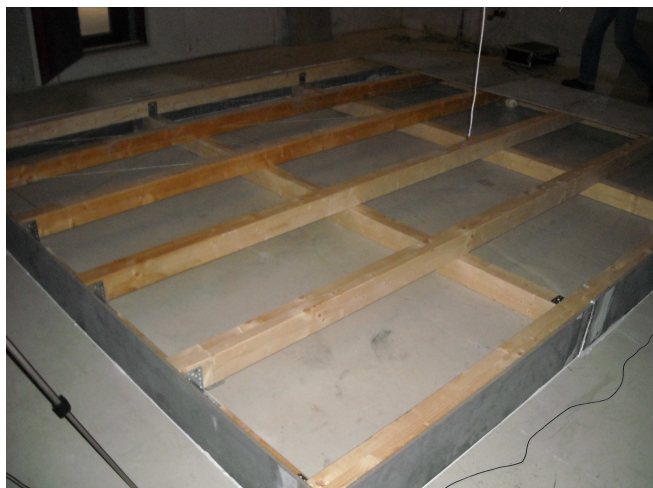
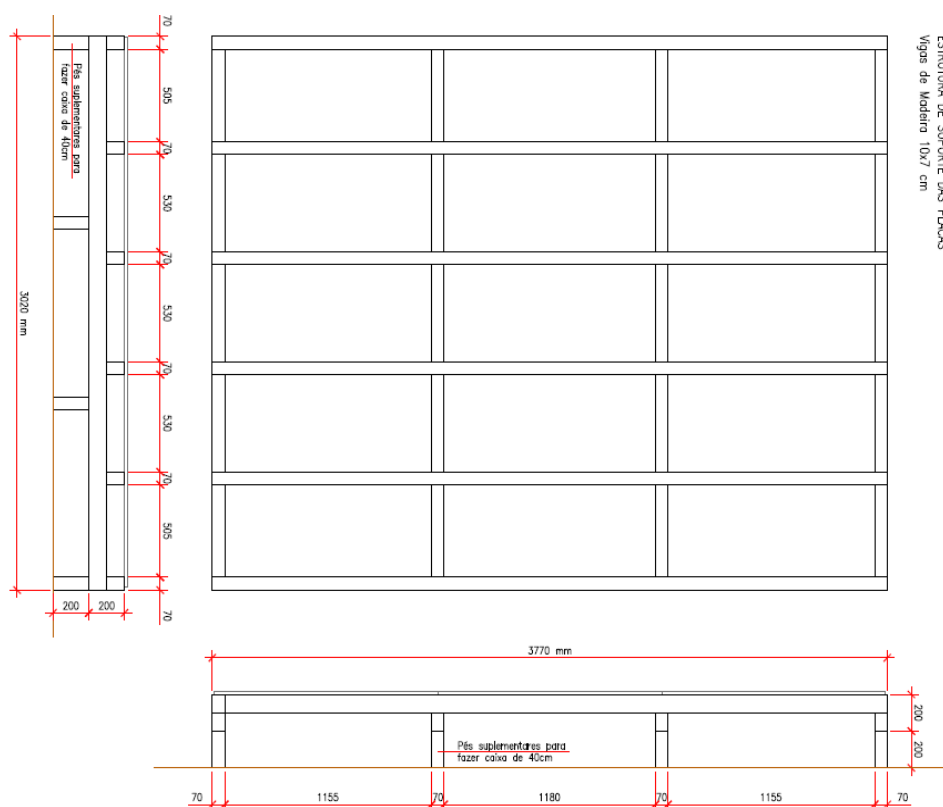


Fig.5.20 – Estrutura da caixa-de-ar



5.3.6. CONDIÇÕES DA LÃ MINERAL FIBRADA NO INTERIOR DA CAIXA-DE-AR

A lã mineral fibrada, utilizada para a realização dos ensaios pretendidos, tinha uma espessura de 40 mm e densidade de 30 Kg/m³. Foram colocadas pequenas cordas, fixas à estrutura por meio de camarões, onde se estenderam as mantas de lã mineral, de forma a ficarem junto aos painéis perfurados (fig. 5.22).



Fig.5.22 – Colocação da lã mineral na caixa-de-ar

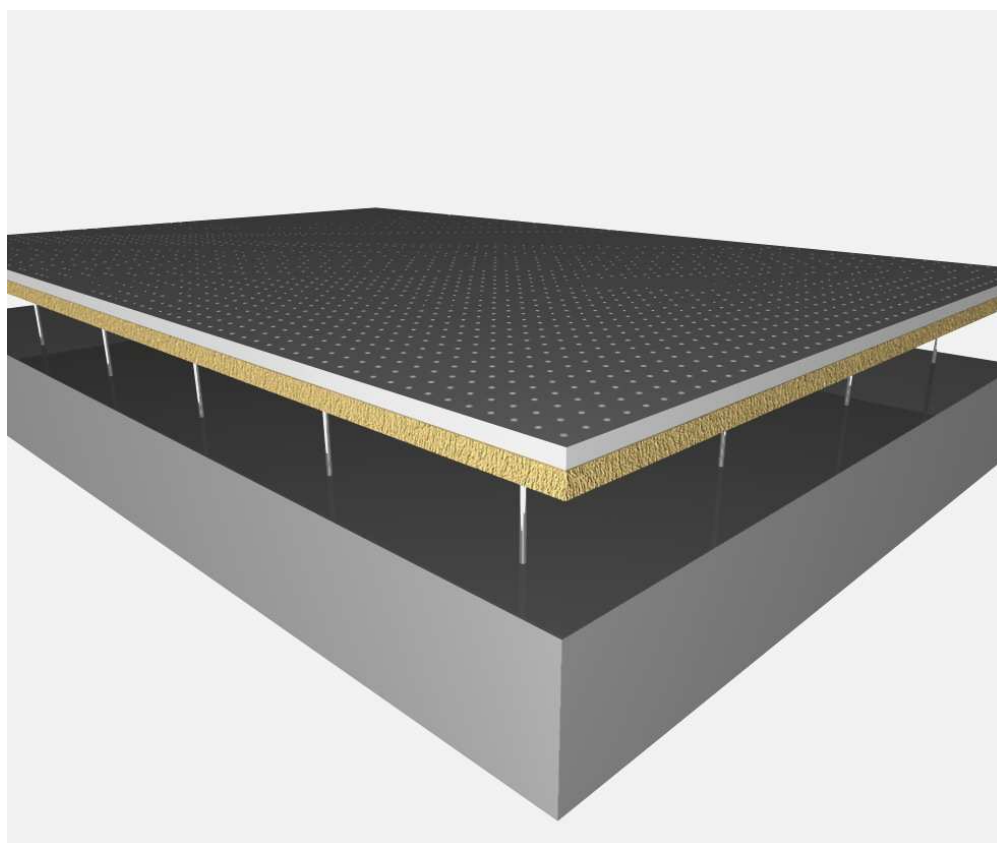


Fig.5.23 – Esquema da estrutura do sistema absorvente sonoro em estudo

5.4. RESULTADOS

5.4.1. VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA OBTIDOS EM MODELOS TEÓRICOS

A tabela 5.1 apresenta os valores do coeficiente de absorção sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava para soluções em estudo de painéis perfurados com furos de 12 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 32 mm (taxa de furação de 9,2%) e de painéis perfurados com furos de 8 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 16 mm (taxa de furação de 15,5%), ambos com 12 mm de espessura, seguindo o modelo de Mechel para a obtenção das variáveis necessárias à determinação do coeficiente de absorção sonora do sistema absorvente em causa.

Tabela 5.1 – Resultados teóricos (modelo de Mechel)

FREQUÊNCIA (Hz)	CAIXA-DE-AR DE 100MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 400MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 100MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 400MM, FUROS DE 8MM
100	0,12	0,25	0,54	0,11	0,24	0,51
125	0,18	0,37	0,67	0,16	0,34	0,63
160	0,27	0,52	0,78	0,24	0,47	0,74
200	0,39	0,66	0,83	0,34	0,60	0,82
250	0,54	0,79	0,83	0,46	0,72	0,85
315	0,72	0,85	0,76	0,61	0,82	0,82
400	0,85	0,82	0,63	0,76	0,86	0,70
500	0,84	0,74	0,64	0,85	0,85	0,64
630	0,73	0,63	0,74	0,87	0,79	0,81
800	0,59	0,58	0,65	0,82	0,73	0,81
1000	0,46	0,64	0,60	0,74	0,80	0,80
1250	0,38	0,46	0,46	0,67	0,78	0,75
1600	0,33	0,33	0,33	0,65	0,65	0,66
2000	0,26	0,24	0,23	0,60	0,56	0,55
2500	0,16	0,16	0,16	0,43	0,43	0,43
3150	0,11	0,11	0,11	0,32	0,32	0,32
4000	0,08	0,08	0,08	0,24	0,24	0,24
5000	0,06	0,06	0,06	0,19	0,19	0,19

Os resultados apresentados na tabela 5.1 permitem verificar que, o aumento da espessura da caixa-de-ar determina um aumento do coeficiente de absorção sonora do sistema, em especial, para as baixas

frequências. Existe um valor de pico que se encontra num intervalo que varia entre a frequência de 200 Hz e a frequência de 400 Hz, consoante a espessura da caixa-de-ar. Estes valores de pico devem-se ao facto do sistema funcionar como um ressonador de cavidade.

A tabela 5.2 apresenta os valores do coeficiente de absorção sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava para soluções em estudo de painéis perfurados com furos de 12 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 32 mm (taxa de furação de 9,2%) e de painéis perfurados com furos de 8 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 16 mm (taxa de furação de 15,5%), ambos com 12 mm de espessura, seguindo o modelo de Delany e Bazley para a obtenção das variáveis necessárias à determinação do coeficiente de absorção sonora do sistema absorvente em causa

Tabela 5.2 – Resultados teóricos (modelo de Delany e Bazley)

FREQUÊNCIA (Hz)	CAIXA-DE-AR DE 100MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 400MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 100MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 400MM, FUROS DE 8MM
100	0,09	0,23	0,53	0,09	0,22	0,50
125	0,15	0,35	0,66	0,14	0,32	0,63
160	0,24	0,51	0,77	0,22	0,46	0,74
200	0,37	0,66	0,82	0,33	0,59	0,81
250	0,54	0,78	0,80	0,46	0,72	0,83
315	0,72	0,83	0,71	0,61	0,81	0,79
400	0,83	0,78	0,58	0,76	0,84	0,65
500	0,81	0,69	0,61	0,84	0,81	0,62
630	0,70	0,58	0,71	0,85	0,74	0,79
800	0,55	0,53	0,62	0,78	0,68	0,77
1000	0,43	0,61	0,57	0,69	0,77	0,79
1250	0,34	0,45	0,44	0,62	0,75	0,72
1600	0,31	0,32	0,32	0,60	0,63	0,66
2000	0,25	0,23	0,23	0,58	0,55	0,53
2500	0,16	0,16	0,16	0,42	0,42	0,42
3150	0,11	0,11	0,11	0,31	0,32	0,32
4000	0,08	0,08	0,08	0,24	0,23	0,23
5000	0,06	0,06	0,06	0,19	0,19	0,19

Os resultados traduzidos na tabela 5.2 permitem prever as mesmas condições dos resultados obtidos anteriormente (tabela 5.1).

5.4.2. VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA OBTIDOS EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Na tabela 5.3 encontram-se os valores do coeficiente de absorção sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava para 200 mm de caixa-de-ar parcialmente preenchida (40 mm) com lã mineral fibrada, para painéis perfurados com furos de 12 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 32 mm (taxa de furação de 9,2%) e para painéis perfurados com furos de 8 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 16 mm (taxa de furação de 15,5%), ambos com 12 mm de espessura.

Tabela 5.3 – Resultados experimentais (E_200mm_9,2%_15.5%_Lã mineral)

FREQUÊNCIA (HZ)	CAIXA-DE-AR DE 200MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM
	FUROS DE 12MM	FUROS DE 8MM
100	0,19	0,16
125	0,42	0,36
160	0,55	0,53
200	0,77	0,68
250	0,91	0,94
315	0,82	0,83
400	0,80	0,87
500	0,69	0,83
630	0,66	0,77
800	0,66	0,79
1000	0,61	0,79
1250	0,46	0,67
1600	0,35	0,58
2000	0,26	0,50
2500	0,26	0,47
3150	0,22	0,41
4000	0,28	0,44
5000	0,17	0,31

Durante a realização dos ensaios experimentais, atrás descritos, entendeu-se ser útil avaliar o resultado do coeficiente de absorção sonora do sistema com algumas variantes. Assim sendo, novas soluções foram estudadas.

Os resultados do coeficiente de absorção sonora dos ensaios experimentais para as novas soluções são apresentados nas tabelas 5.4 e 5.5.

Na tabela 5.4 são apresentados os valores do coeficiente de absorção sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava para painéis perfurados com furos de 12 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 32 mm (taxa de furação de 9,2%) e para painéis perfurados com furos de 8 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 16 mm (taxa de furação de 15,5%), ambos com 12 mm de espessura, com combinação de lã mineral e feltro na caixa-de-ar (conforme a figura 5.23).

Tabela 5.4 – Resultados experimentais (E_9,2%_15.5%_Lã mineral+feltro)

FREQUÊNCIA (HZ)	CAIXA-DE-AR DE 100MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 400MM, FUROS DE 12MM	CAIXA-DE-AR DE 100MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 400MM, FUROS DE 8MM
100	0,00	0,23	0,74	0,00	0,19	0,74
125	0,14	0,37	0,71	0,14	0,33	0,75
160	0,24	0,53	0,86	0,24	0,50	0,88
200	0,50	0,78	0,71	0,43	0,68	0,78
250	0,69	1,00	0,77	0,59	0,87	0,84
315	0,83	0,80	0,67	0,74	0,86	0,73
400	0,86	0,80	0,67	0,87	0,89	0,75
500	0,81	0,72	0,76	0,92	0,84	0,81
630	0,67	0,69	0,76	0,84	0,82	0,84
800	0,56	0,64	0,72	0,78	0,81	0,86
1000	0,49	0,60	0,62	0,71	0,82	0,81
1250	0,43	0,48	0,50	0,65	0,72	0,72
1600	0,36	0,37	0,38	0,60	0,60	0,63
2000	0,29	0,29	0,28	0,51	0,52	0,52
2500	0,28	0,27	0,27	0,48	0,50	0,49
3150	0,23	0,23	0,20	0,40	0,43	0,42
4000	0,24	0,25	0,21	0,44	0,45	0,42
5000	0,07	0,10	0,10	0,27	0,30	0,25

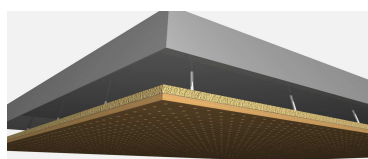


Fig.5.24 – Esquema do sistema absorvente sonoro descrito na tabela 5.4

Na tabela 5.5 encontram-se os valores do coeficiente de absorção sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava para 400 mm de caixa-de-ar parcialmente preenchida com espumas de poliuretano, para painéis com furos 12 mm de diâmetro e uma malha de furação quadrada com 32mm (taxa de furação de 9,2%) e para painéis com furos 8 mm de diâmetro e uma malha de furação quadrada com 16 mm (taxa de furação de 15,5%), ambos com 12 mm de espessura.

Tabela 5.5 – Resultados experimentais (E_200mm_9,2%_15.5%_Espuma de poliuretano)

FREQUÊNCIA (HZ)	PAINÉIS COM FUROS DE 12MM DE DIÂMETRO	PAINÉIS COM FUROS DE 8MM DE DIÂMETRO
100	0,79	0,57
125	0,79	0,74
160	0,64	0,70
200	0,70	0,80
250	0,63	0,70
315	0,60	0,67
400	0,61	0,68
500	0,65	0,76
630	0,67	0,79
800	0,63	0,75
1000	0,50	0,64
1250	0,45	0,61
1600	0,37	0,54
2000	0,29	0,49
2500	0,30	0,48
3150	0,25	0,43
4000	0,29	0,46
5000	0,15	0,29

Os resultados apresentados na tabela 5.5, à semelhança dos anteriores, permitem verificar que o aumento da taxa de furação dos painéis conduz a melhores resultados. Isto prende-se com o facto de uma maior taxa de perfuração aumentar a área de exposição do material poroso absorvente sonoro às ondas sonoras incidentes no sistema. Tendo em conta que os materiais porosos são mais eficazes nas médias frequências e os ressoadores de cavidade nas baixas, o aumento da taxa de furação aumenta o espectro de eficácia do painel.

6

ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

6.1.1. INTRODUÇÃO

Após a previsão dos resultados, importa efectuar uma análise comparativa de forma a se obter informação útil ao objectivo do trabalho. Assim sendo os gráficos apresentados nas figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9, mostram o valor do coeficiente de absorção sonora, por banda de frequência de 1/3 de oitava, em diferentes combinações. Resultados estes, que foram obtidos nos ensaios experimentais e por modelação teórica.

6.1.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS VS RESULTADOS TEÓRICOS

Os gráficos das figuras 6.1 e 6.2 mostram que, os resultados obtidos através dos modelos teóricos propostos, quer por Mechel, quer por Delany e Bazley, são praticamente sobreponíveis aos resultados obtidos nos ensaios experimentais.

A análise aos referidos gráficos permite, ainda, perceber que, o sistema absorvente que inclui o painel perfurado com maior taxa de furação, a de 15,5%, apresenta melhores resultados.

É igualmente visível que a frequência de pico se destaca, independentemente do método usado para determinar o coeficiente de absorção sonora.

É possível ainda concluir que, acima da banda de frequência dos 1000 Hz, o coeficiente de absorção sonora baixa significativamente e tende para zero.

A figura 6.1 apresenta um gráfico com os valores do coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais e em modelos teóricos para o sistema absorvente sonoro composto por painel perfurado com 12 mm de espessura, 9,2% de taxa de furação (furos com 12 mm de diâmetro e malha de furação quadrada com afastamentos de 32 mm), lã mineral fibrada no interior da caixa-de-ar e caixa-de-ar com 200 mm de espessura.

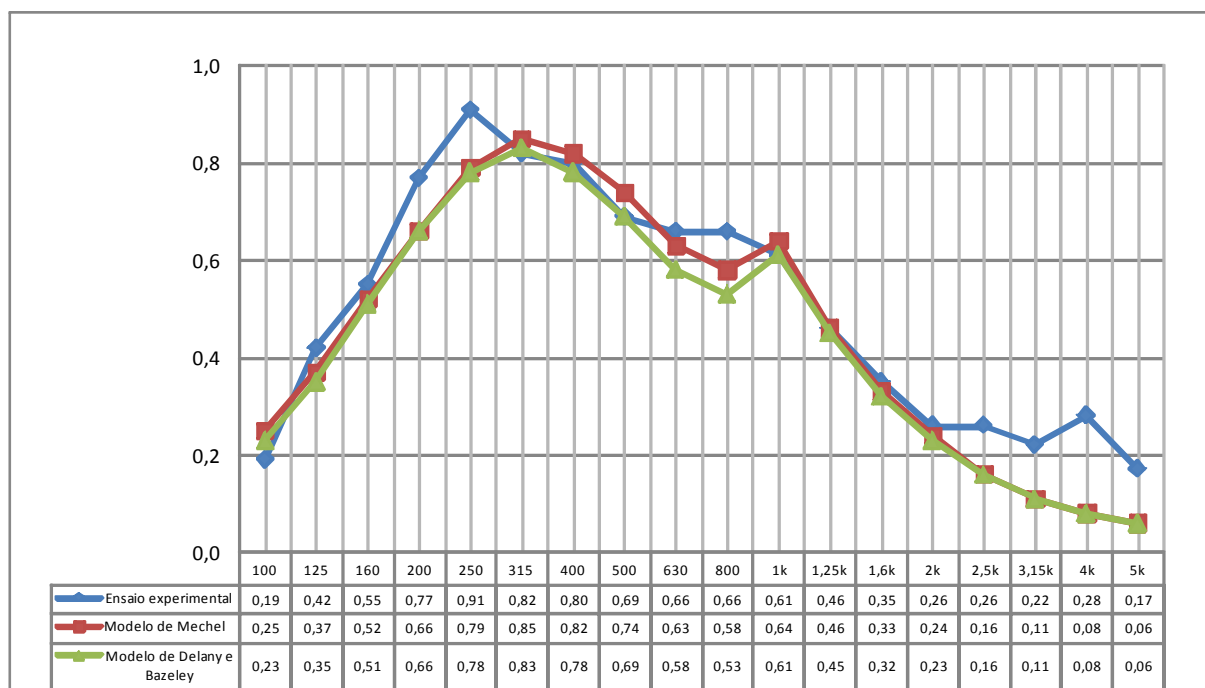


Fig.6.1 – Resultados teóricos vs resultados experimentais (F_9,2%_Cx 200mm_Lã mineral)

No gráfico da figura 6.2 apresentam-se os resultados obtidos em ensaios experimentais e em modelos teóricos para sistema absorvente sonoro composto por painel perfurado com 12 mm de espessura, 15,5% de taxa de furação (furos com 8 mm de diâmetro e malha de furação quadrada com afastamentos de 16 mm) e lã mineral fibrada no interior da caixa-de-ar, que apresenta 200 mm de espessura.



Fig.6.2 – Resultados teóricos vs resultados experimentais (F_15,5%_Cx 200mm_Lã mineral)

6.1.3. RESULTADOS OBTIDOS COM CAIXA-DE-AR DE DIFERENTES ESPESSURAS

Os resultados obtidos em modelo teórico para diferentes espessuras de caixa-de-ar, e apresentados nos gráficos das figuras 6.3 e 6.4, mostram que, quanto maior é esta espessura, melhor é o resultado do coeficiente de absorção sonora obtido pelo sistema absorvente sonoro.

Na figura 6.3 estão representados os valores do coeficiente de absorção sonora obtido pelo modelo de Mechel para sistema absorvente sonoro composto por painel perfurado com 9,2% de taxa de furação (furos com 12 mm de diâmetro e malha de furação quadrada com afastamentos de 32 mm) e com 12 mm de espessura e lâ mineral fibrada no interior de caixa-de-ar.

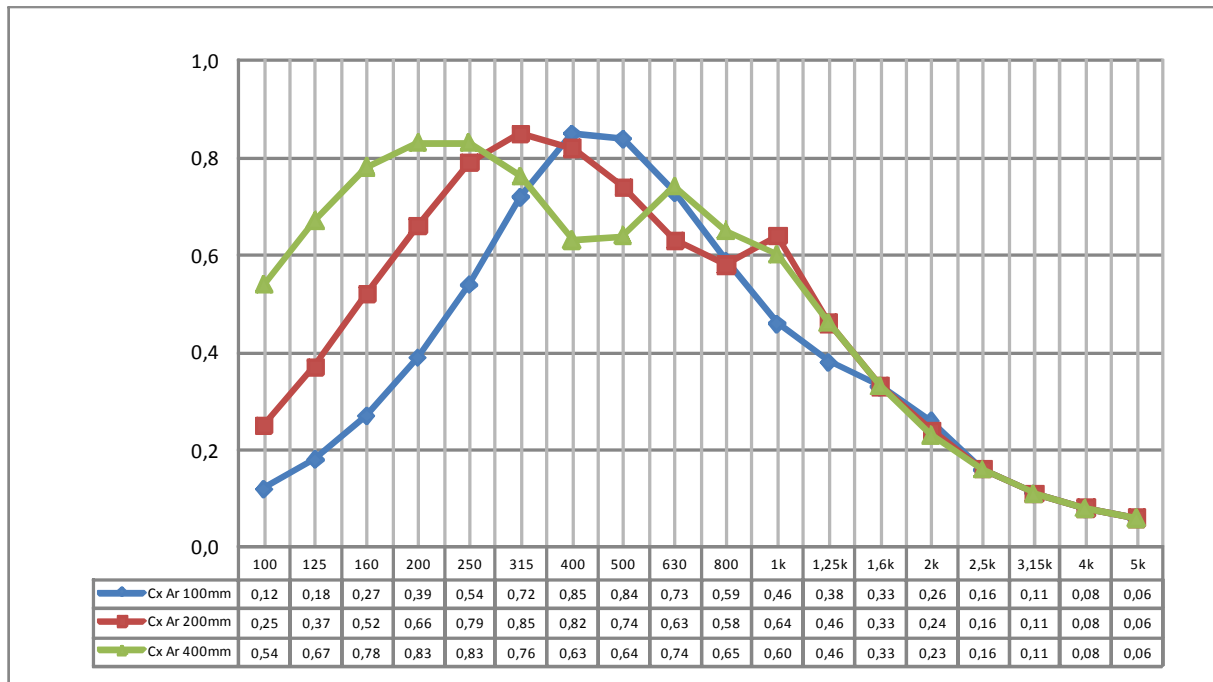


Fig.6.3 – Coeficiente de absorção sonora obtido pelo modelo de Mechel (F_9,2%)

A análise destes resultados permite verificar que, nas bandas de frequência inferiores à banda de frequência de 250 Hz, a diferença entre o coeficiente de absorção sonora, para as diferentes profundidades da caixa-de-ar, é significativa.

Por outro lado, a partir da banda de frequência dos 1600 Hz, o valor do coeficiente de absorção sonora é sobreponível, para qualquer espessura da caixa-de-ar.

É possível ainda concluir, à semelhança dos resultados apresentados nos gráficos das figuras anteriores que, o aumento da percentagem de furação do painel melhora o resultado do coeficiente de absorção sonora do sistema absorvente sonoro.

O gráfico da figura 6.4 mostra os resultados obtidos para o coeficiente de absorção sonora obtido pelo modelo de Dalany e Bazley para sistema absorvente sonoro composto por painel perfurado com 15,5% de taxa de furação (furos com 8 mm de diâmetro e malha de furação quadrada com afastamentos de 16 mm) e com espessura de 12 mm e lâ mineral fibrada no interior de caixa-de-ar.

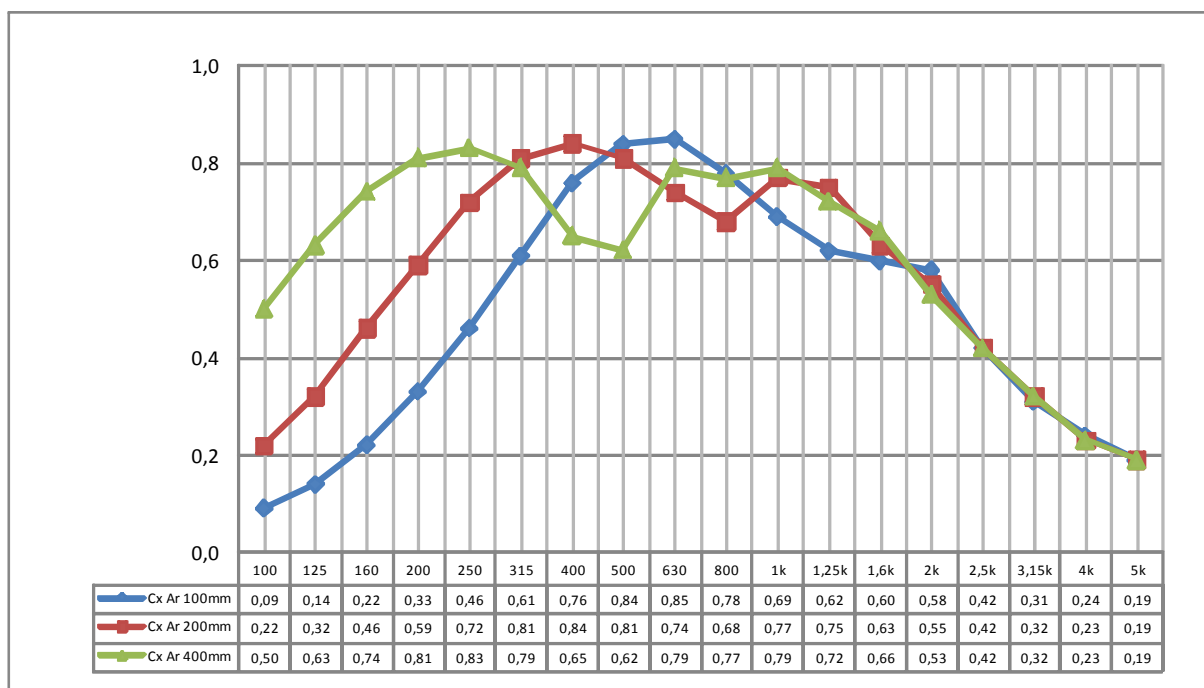


Fig.6.4 – Coeficiente de absorção sonora obtido pelo modelo de Dalany e Bazley (F_15,5%)

Nos ensaios experimentais verificou-se exactamente o mesmo, também aqui, quanto maior é a espessura da caixa-de-ar, melhor é o resultado do coeficiente de absorção sonora obtido pelo sistema absorvente sonoro, conforme mostram os gráficos das figuras 6.5 e 6.6.

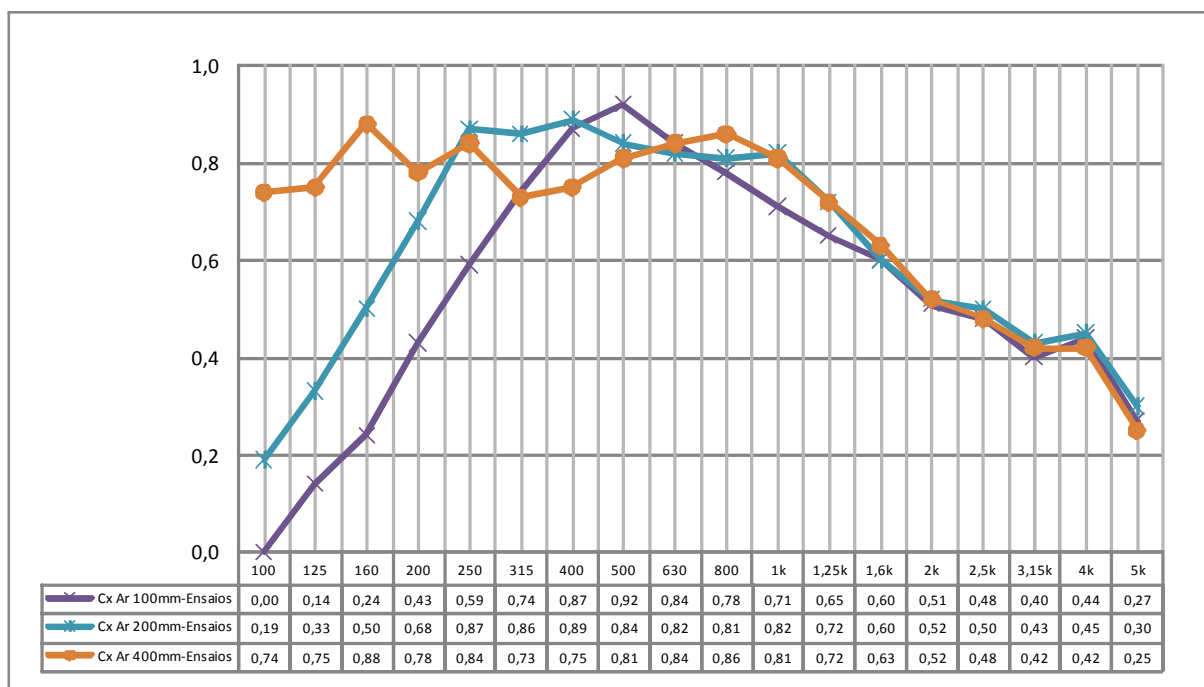


Fig.6.5 – Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para diferentes espessuras de caixa-de-ar (F_15,5%)

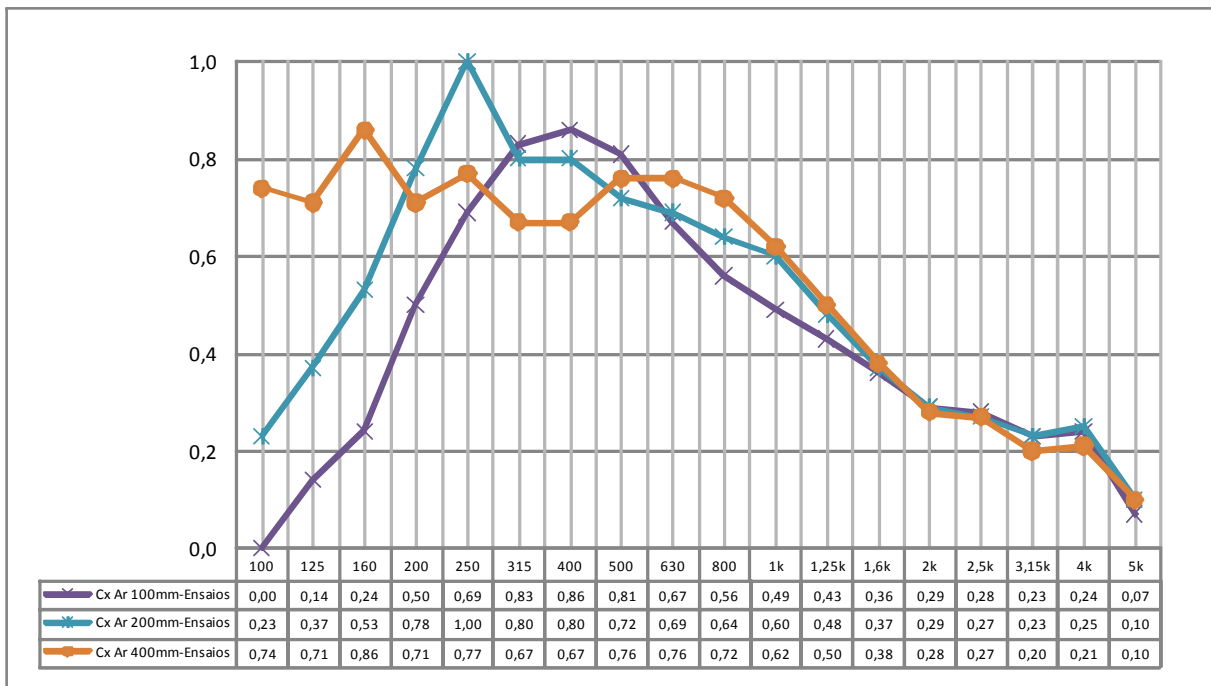


Fig.6.6 – Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para diferentes espessuras de caixa-de-ar (F_9,2%)

6.1.4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS COM DIFERENTES TAXAS DE FURAÇÃO

A análise ao gráfico representado na figura 6.7 revela, tal como nos resultados obtidos em modelo teórico, que o incremento na taxa de furação, do painel, aumenta o coeficiente de absorção sonora do sistema absorvente sonoro.

É, também, visível que, até à banda de frequência de 315 Hz, o valor do coeficiente de absorção sonora é praticamente sobreponível.

Por outro lado, a partir da banda de frequência de 400 Hz, as curvas afastam-se e mantêm-se com diferenças significativas para todas as bandas de frequência

Um aumento de 4 mm no diâmetro dos furos, produz um incremento no coeficiente de absorção sonora de cerca de 20%, a partir da frequência de pico.

Estes resultados, obtidos a partir de ensaios experimentais em câmara reverberante, foram efectuados para sistema absorvente sonoro constituído por parede dura, caixa-de-ar, fibra de lã mineral e painel perfurado.

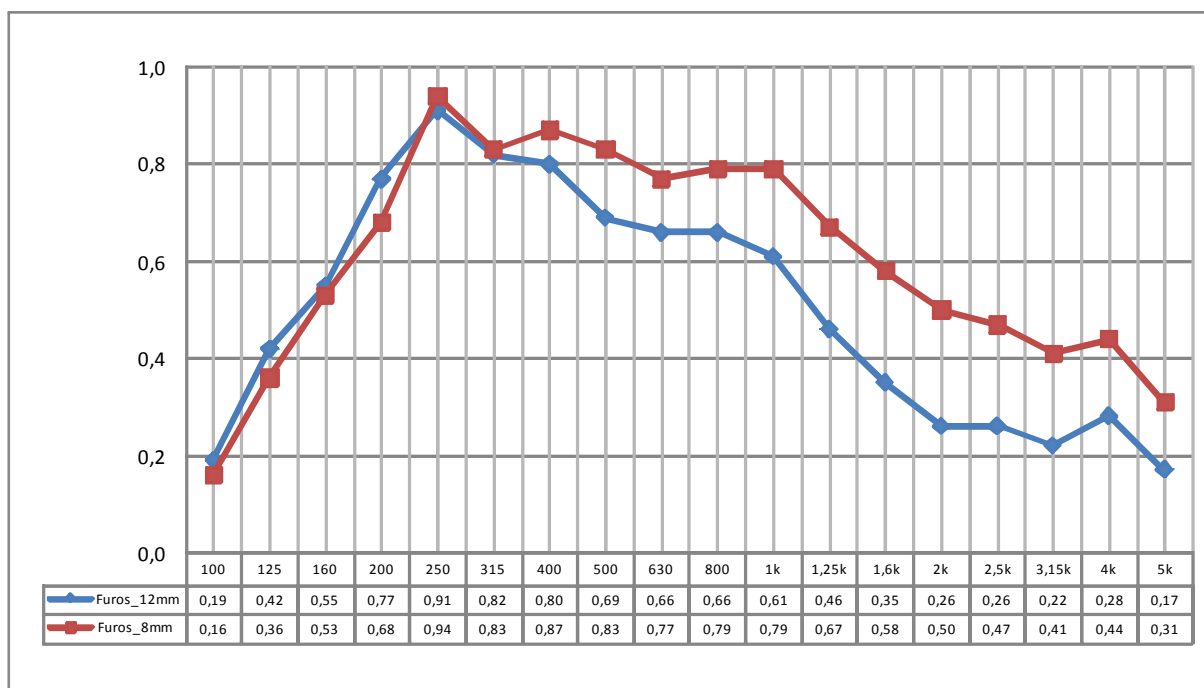


Fig.6.7 – Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para sistemas absorventes sonoros com painéis perfurados com diferentes taxas de furação (9,2% e 15,5%)

6.1.5. RESULTADOS OBTIDOS COM CAIXA-DE-AIR PARCIALMENTE PREENCHIDA COM LÃ MINERAL OU COM LÃ MINERAL E FELTRO

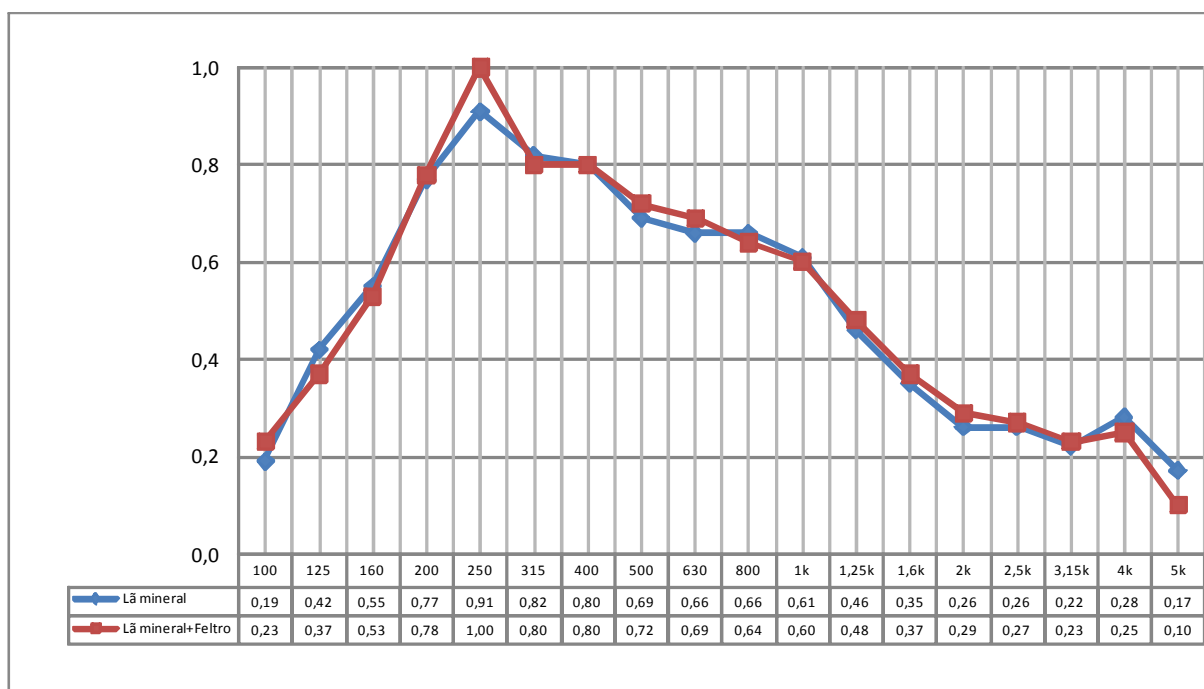


Fig.6.8 – Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para caixa-de-ar parcialmente preenchida só com lã mineral e para caixa-de-ar parcialmente preenchida com uma combinação de lã mineral e feltro

A colocação de feltro entre o painel e a lã mineral fibrada, não trás qualquer mais-valia para o sistema absorvente sonoro. Como é possível verificar nos resultados apresentados no gráfico da figura 6.8, os valores do coeficiente de absorção sonora obtido, para as duas situações, é semelhante.

6.1.6. RESULTADOS OBTIDOS COM CAIXA-DE-AIR PARCIALMENTE PREENCHIDA COM LÃ MINERAL E FELTRO OU COM ESPUMA DE POLIURETANO

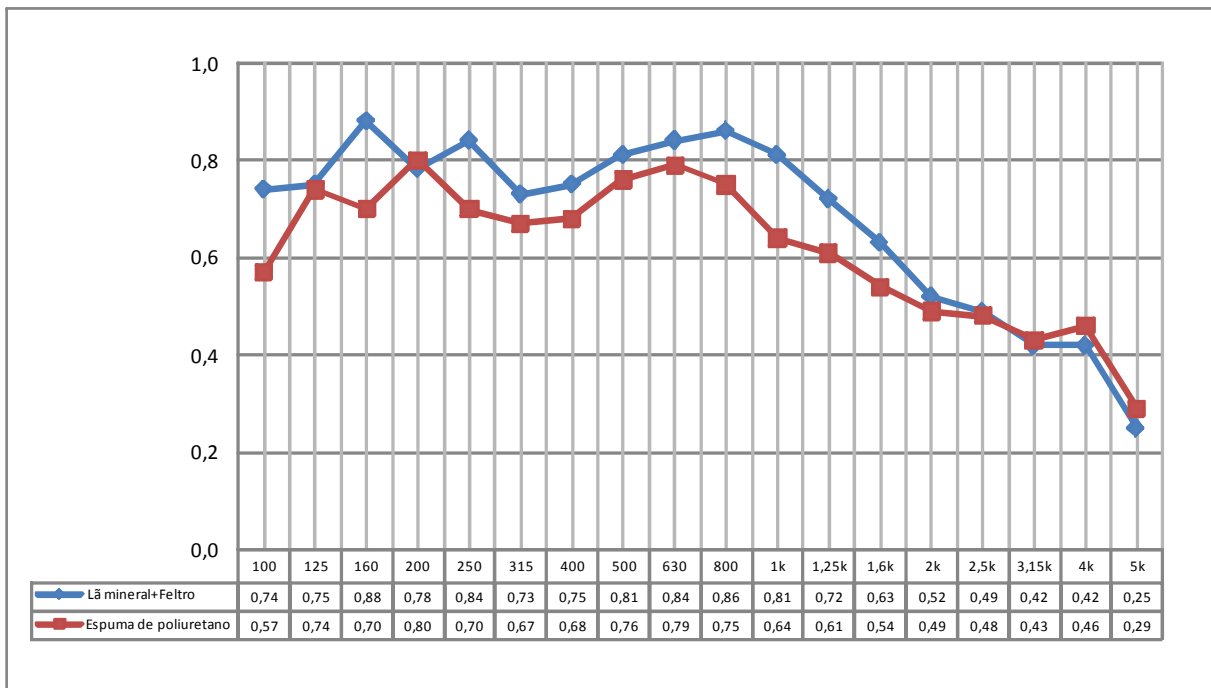


Fig.6.9 – Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios experimentais para caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã mineral e feltro e para caixa-de-ar parcialmente preenchida com espuma de poliuretano

O gráfico apresentado na figura 6.9, permitem verificar que a espuma de poliuretano é uma alternativa viável à fibra de lã mineral.

6.2. CONCLUSÕES

Esta dissertação tinha como objectivo primordial, a caracterização e o desenvolvimento tecnológico, no domínio do comportamento acústico, de painéis perfurados à base de compósito de madeira e cimento, mais concretamente, no que respeita à obtenção do coeficiente de absorção sonora dos sistemas absorventes sonoros avaliados. No final do trabalho é possível concluir que, o objectivo inicial foi, genericamente, cumprido.

As conclusões mais importantes a retirar deste trabalho são:

- Os modelos teóricos propostos, nesta dissertação, para determinar o coeficiente de absorção sonora do sistema, fornecem valores muito semelhantes aos obtidos experimentalmente. Assim sendo, é possível fazer simulações sem recurso a ensaios experimentais, permitindo desta forma economias monetárias e ambientais.

- Qualquer um dos modelos propostos, modelo de Mechel e modelo de Delany e Bazley, para a obtenção das variáveis necessárias à determinação do coeficiente de absorção sonora do sistema absorvente em causa, produz resultados muito próximos dos obtidos experimentalmente.
- O aumento da espessura da caixa-de-ar conduz a melhores resultados, em especial nas baixas frequências.
- Os painéis perfurados com maior taxa de furação permitem obter um coeficiente de absorção sonora, do sistema, mais elevado.
- O preenchimento parcial da caixa-de-ar com aglomerados de espumas de poliuretano, parece ser uma alternativa viável à fibra de lã mineral, com resultados mais favoráveis. Com a vantagem de dispensar a colocação de feltro por de trás dos painéis perfurados, caso esse seja obrigatório, aquando da utilização da lã mineral fibrada.

6.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

- A escolha do software para prever, por modelo teórico, o coeficiente de absorção sonora dos sistemas absorventes sonoros avaliados durante a realização deste trabalho permitiu perceber que, o Zorba®, software comercial, também concebido para determinação do coeficiente de absorção sonora, não permite modelar caixa-de-ar, no entanto parece ser útil para prever o coeficiente de absorção sonora de sistemas tipo “sandwich”, com uma ou mais camadas de material absorvente poroso. Seria de todo importante avaliar no futuro, resultados obtidos experimentalmente com este tipo de sistemas e compará-los com os resultados obtidos com este software.
- Uma das conclusões que este trabalho permitiu retirar, é a de que a eficiência do sistema está relacionada, também, com o aumento da espessura da caixa-de-ar, ou seja, quanto maior a profundidade da caixa-de-ar, maior é o coeficiente de absorção sonora do sistema, em particular para baixas frequências. Mas esta relação funcionará para qualquer que seja o valor da espessura da caixa-de-ar? Irá o sistema comportar-se sempre como um ressoador de cavidade?
- Neste trabalho ficou demonstrado que, neste tipo de sistemas absorventes sonoros, o aumento da percentagem de furação do painel produz melhores resultados. Mas até que ponto irá este incremento, no que se refere ao coeficiente de absorção sonora?

6.4. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO

Se a um dos sistemas absorventes sonoros, avaliados neste trabalho, for trocado o painel perfurado por um outro com o dobro da percentagem de furação, qual será o resultado?

Foi possível fazer uma primeira análise com recurso a modelo teórico.

Para tal definiu-se duplicar o diâmetro dos furos de um dos painéis estudados (painel perfurado com 12 mm de espessura, furos com 8 mm de diâmetro, espaçamento entre furos em malha quadrada com 16 mm e taxa de furação de 15,5%), obtendo-se assim, um painel perfurado de 12 mm de espessura, com furos de 16 mm de diâmetro, espaçamento entre furos em malha quadrada com 16 mm e com uma taxa de furação de 31%, conforme se mostra nas figuras 6.11 e 6.12.

A tabela 6.1 apresenta os resultados do coeficiente de absorção sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava para soluções em estudo de painéis perfurados com furos de 8 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 16 mm (taxa de furação de 15,5%) e de painéis perfurados com furos de 16 mm de diâmetro e malha de furação quadrada de 16 mm (taxa de furação de 31%), ambos com 12 mm de espessura, seguindo o modelo de Mechel para a obtenção das variáveis necessárias à determinação do coeficiente de absorção sonora do sistema absorvente em causa.

Tabela 6.1 – Resultados teóricos para painéis com taxa de furação de 15,5% e 31%

FREQUÊNCIA (HZ)	CAIXA-DE-AR DE 100MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 100MM, FUROS DE 16MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 200MM, FUROS DE 16MM	CAIXA-DE-AR DE 400MM, FUROS DE 8MM	CAIXA-DE-AR DE 400MM, FUROS DE 16MM
100	0,11	0,11	0,24	0,23	0,51	0,49
125	0,16	0,16	0,34	0,32	0,63	0,60
160	0,24	0,23	0,47	0,43	0,74	0,71
200	0,34	0,31	0,60	0,55	0,82	0,80
250	0,46	0,41	0,72	0,66	0,85	0,84
315	0,61	0,53	0,82	0,76	0,82	0,85
400	0,76	0,66	0,86	0,84	0,70	0,74
500	0,85	0,76	0,85	0,87	0,64	0,63
630	0,87	0,83	0,79	0,86	0,81	0,78
800	0,82	0,88	0,73	0,80	0,81	0,84
1000	0,74	0,89	0,80	0,77	0,80	0,83
1250	0,67	0,88	0,78	0,88	0,75	0,88
1600	0,65	0,87	0,65	0,90	0,66	0,89
2000	0,60	0,91	0,56	0,90	0,55	0,90
2500	0,43	0,90	0,43	0,89	0,43	0,89
3150	0,32	0,86	0,32	0,87	0,32	0,87
4000	0,24	0,83	0,24	0,83	0,24	0,83
5000	0,19	0,78	0,19	0,79	0,19	0,79

Os resultados atrás referidos estão representados graficamente na figura 6.10.

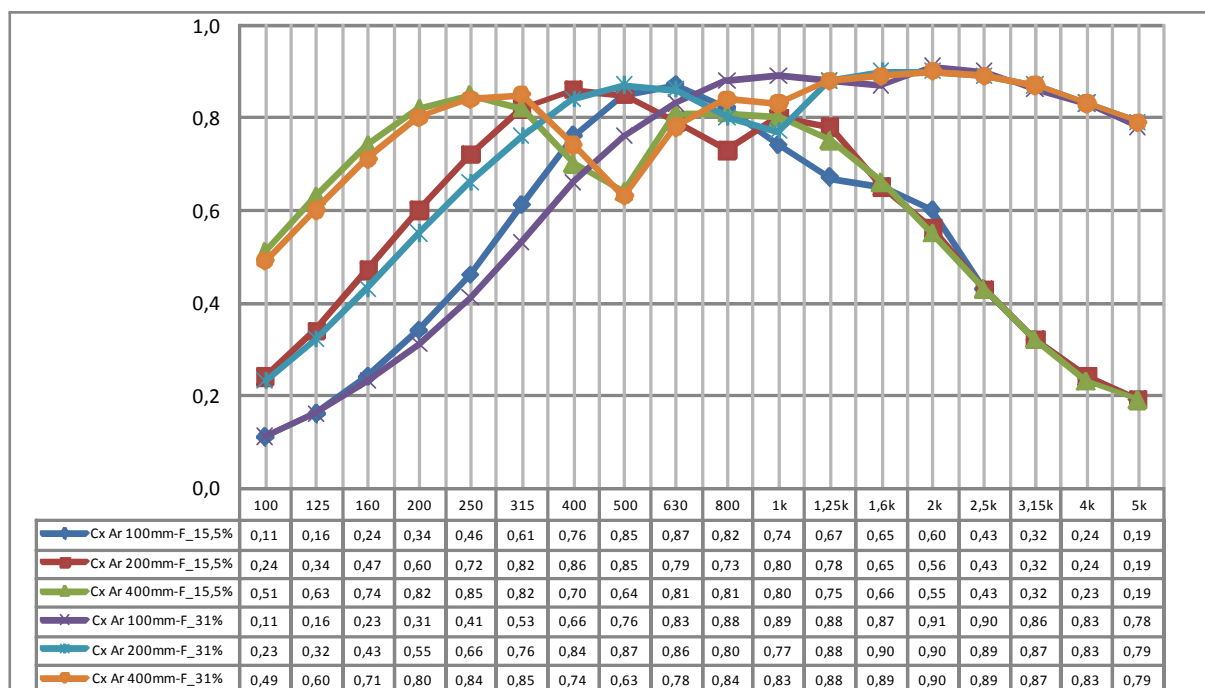


Fig.6.10 – Coeficiente de absorção sonora obtido em ensaios teóricos para painéis com taxa de furação de 15,5% e painéis com taxa de furação de 31%

O gráfico da figura 6.10 mostra os resultados obtidos em modelo teórico, e de acordo com esses resultados pode concluir-se que, com a duplicação da percentagem de furação do painel, o aumento da espessura da caixa-de-ar também produz melhores resultados, sobretudo nas baixas frequências. No entanto, a conclusão mais importante a retirar desta análise, prende-se com o facto de o valor do coeficiente de absorção sonora se manter sempre elevado para as bandas de frequência acima dos 1000 Hz, o que não acontece com o painel com taxa de furação de 15,5%, já que para as bandas de frequência acima dos 2000 Hz, o seu valor é pouco significativo e tende para zero. E isto acontece, independentemente da profundidade da caixa-de-ar.

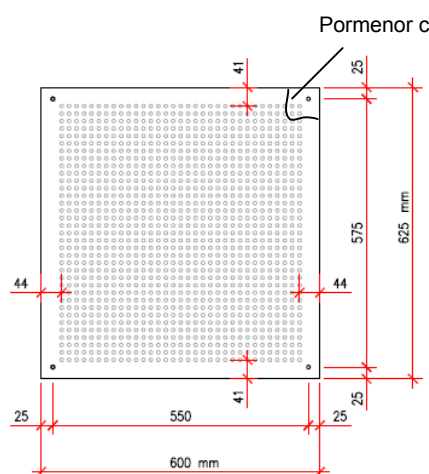


Fig.6.11 – Placa perfurada com 31% de taxa de furação

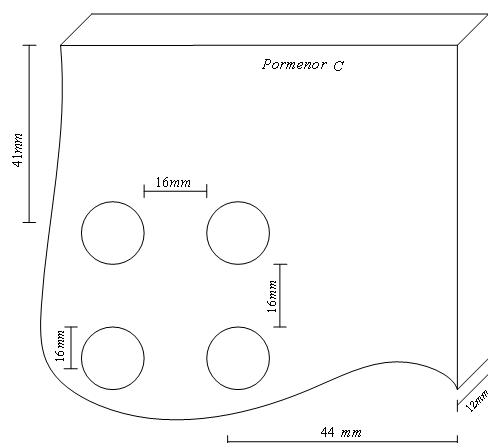


Fig.6.12 – Pormenor C

Não foi possível, durante a realização deste trabalho, comparar estes resultados com valores obtidos experimentalmente, pelo que, esta poderá ser matéria de interesse numa análise futura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tirone, L., Nunes, K. *Construção Sustentável*. Tirone Nunes, Lisboa, 2008.
- [2] Domingues, O. *A Acústica nos edifícios materiais e sistemas absorventes sonoros coeficiente de absorção sonora.*, LNEC, Lisboa, 2005.
- [3] Carvalho, A. P. Oliveira de. *Texto de Apoio à Disciplina de Acústica Ambiental e de Edifícios*. FEUP, Porto, 2009.
- [4] Pierce, Alan, D. *Acoustics na Introduction to its Physical Principles and Applications*. Acoustical Society of America, 1989.
- [5] “acoustics” - <http://www.britannica.com/eb/article-9109556> - Encyclopedia Britannica Online, 2007.
- [6] Henrique, Luís L. *Acústica musical*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002.
- [7] Patrício, J. *Acústica nos Edifícios*. VERLAG DASHOFER, Lisboa, 2008.
- [8] Bolt, R. H. (1947). *On the design of perforated facings for acoustic materials*. J.A.S.A. 19: p. 917-921.
- [9] Ingard, K. U., Bolt, R. H. (1951). *Absorption characteristics of acoustic material with perforated experimental facings*. J.A.S.A. 23: p. 533-540.
- [10] Callaway, D. B., Ramer, L. G. (1952). *The use of perforated facings in designings low frequency resonant absorbers*. J.A.S.A. 24: p.309-312.
- [11] Delany, M. E., Bazley, E. N. (1970). *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*. Applied Acoustics 3: p. 105-116.
- [12] Mechel, F. P. (1988). *Design charts for sound absorber layers*. J.A.S.A. 83: p. 1002-1013.
- [13] Comissão das Comunidades Europeias, Relatório COM(96) 540. *Futura Política de Ruído, Livro Verde da Comissão Europeia*. Bruxelas, 1996.
- [14] NP EN ISO 354 - *Acústica: Medição da absorção sonora em Câmara Reverberante*. Comité Europeu de Normalização, 2007.
- [15] Long, M. *Architectural acoustics*. Elsevier/Academic Press, Londres, 2006.
- [16] Silva, P. Martins da. *Projecto de condicionamento acústico de edifícios*. LNEC, Lisboa, 2006.
- [17] Silva, P. Martins da. *Acústica de edifícios*. LNEC, Lisboa, 1998.
- [18] Patraquim, R., Patrício, J. *Condicionamento Acústico Interior. Modelação e Avaliação Experimental da Absorção Sonora de Sistemas com Painéis de Madeira Perfurados*. Revista de Acústica, Vol. 39. Nº 3 e 4, p. p. 9-18. Sociedade Espanhola de Acústica, 2008.
- [19] Maa, D. Y. 1998). *Potencial of Micro-perforet panel absorber*. J.A.S.A. 104: p. 2861-2866.
- [20] Crandall, I. B. (1926). *Theory of vibrating systems and sound*. New York: Van Nostrand.
- [21] Ingard, K. U. (1953). *On the theory and design acoustic resonators*. J.A.S.A. 25: p. 1037-1062.
- [22] Morse, P. M., Ingard, K. U. *Theoretical acoustic*.^{1st} Princeton University Press Edition, 1986.
- [23] Cremer, L., Muller, H. (1978). *Principles and applications of room acoustic: wave theoretical room acoustics*. Applied Science Publishers.

- [24] Beranek, L. L., Ver, I. L. *Noise and Vibration Control Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 2nd ver., 2005.
- [25] Vigran, T. E. *Building acoustics*. London and New York: Taylor & Francis, 2008.
- [26] Attenborough, K. (1985). *Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces*. New York: Journal of Sound and Vibrations 99:4 p 521-544.
- [27] Allard, J. F. (1993). *Propagation of sound in porous media. Modeling sound absorbing materials*. London and New York: Elsevier Applied Science.
- [28] WinFLAG Version 1.0.

ANEXOS

A1 – EXEMPLO DE RELATÓRIO DE ENSAIO

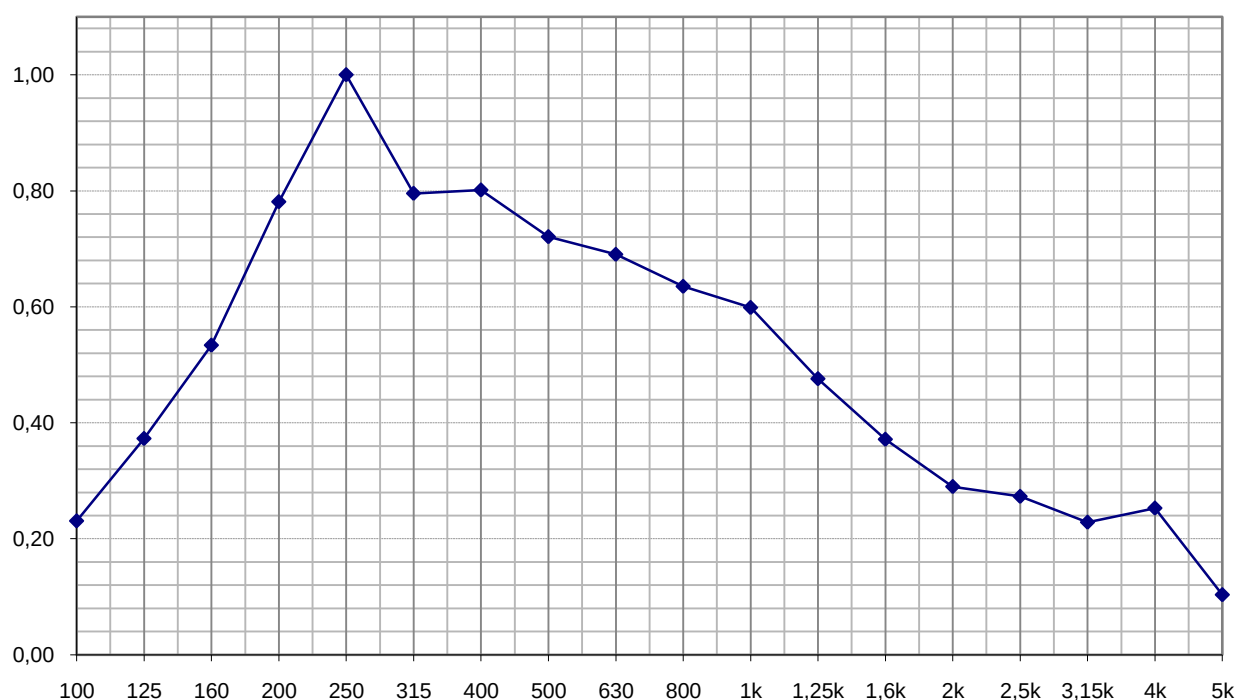
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 12mm+tela+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 16 cm	
		Data
Dimensão da Amostra =	11,25 m ²	15-09-2009

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m)	7,25	Altura (m) =	4,65	Temperatura do Ar (°C) =	16,6
Largura média (m) =	5,88	Volume (m ³) =	217,7	Humidade do Ar (%) =	68
c= 340,96		Sc=	207,369	Nº Decaimentos	2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	5,6	4,6	3,9	2,9	2,5	3,0	3,0	3,2	3,3	3,4	3,4	3,7	3,9	3,8	3,6	3,2	2,7	2,2
α_a	0,23	0,37	0,53	0,78	1,00	0,80	0,80	0,72	0,69	0,64	0,60	0,48	0,37	0,29	0,27	0,23	0,25	0,10
ϵ_{20}	0,08668	0,09	0,083	0,09	0,08	0,07	0,06	0,051	0,045	0,039	0,04	0,03	0,026	0,02	0,02	0,021	0,02	0,02

A2 – RELATÓRIOS DE ENSAIO

Estes relatórios encontram-se integralmente no CD anexo no final da dissertação

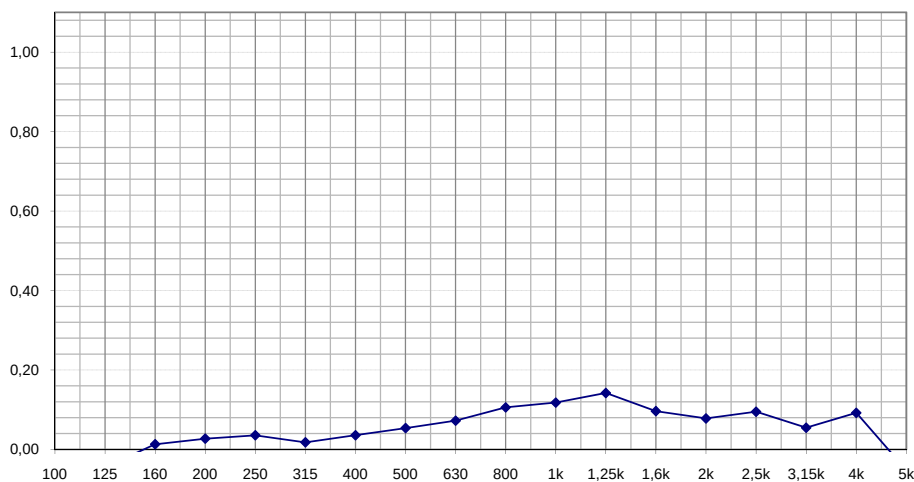
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - Diferença entre câmara Vazia e câmara com estrutura	Data
	Dimensão da Amostra = 11,25 m ²	17-09-2009

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c = 340,96	Sc = 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	12,8	12,1	10,8	9,6	10,1	11,0	10,5	10,1	9,2	8,0	7,1	6,2	5,9	5,1	4,5	3,9	3,1	2,5
α_R	-0,08	-0,05	0,01	0,03	0,04	0,02	0,04	0,05	0,07	0,11	0,12	0,14	0,10	0,08	0,09	0,05	0,09	-0,05
ϵ_{20}	0,057317	0,053	0,0494	0,047	0,041	0,035	0,0316	0,0289	0,027	0,0257	0,024	0,023	0,021	0,02	0,019	0,019	0,018	0,018

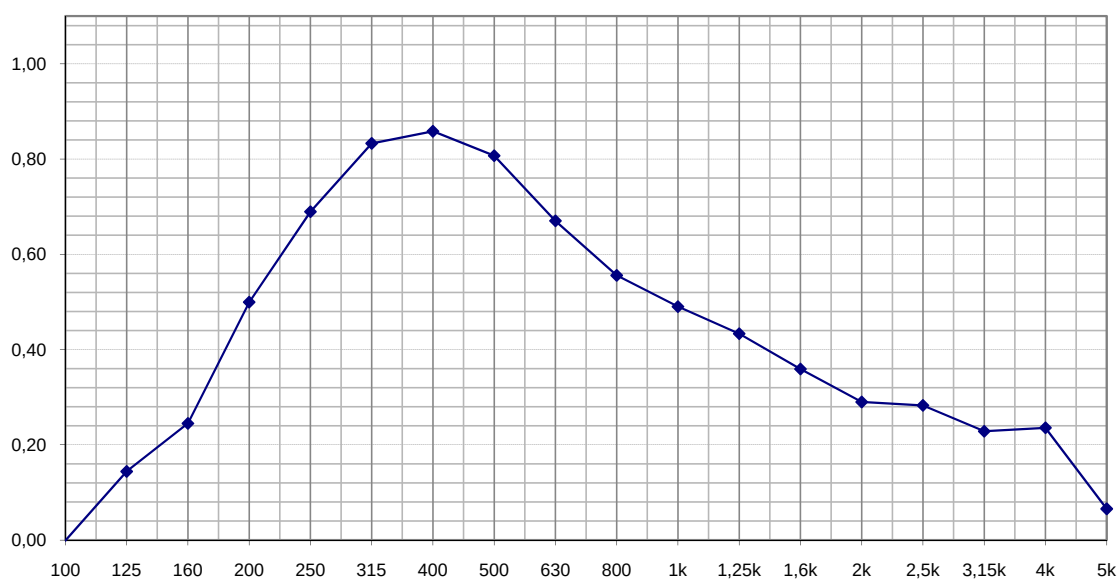
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 12mm+tela+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 6 cm	Data
		17-09-2009
Dimensão da Amostra =	11,25 m ²	

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) =	7,25	Altura (m) =	4,65	Temperatura do Ar (°C) =	16,6
Largura média (m) =	5,88	Volume (m ³) =	217,7	Humidade do Ar (%) =	68
c=	340,96	Sc=	207,369	Nº Decaimentos	2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	9,6	7,0	6,0	3,9	3,3	2,9	2,8	3,0	3,3	3,7	3,8	3,9	3,9	3,8	3,6	3,2	2,7	2,3
α_a	0,00	0,14	0,24	0,50	0,69	0,83	0,86	0,81	0,67	0,56	0,49	0,43	0,36	0,29	0,28	0,23	0,24	0,07
ϵ_{20}	0,066331	0,069	0,0662	0,073	0,072	0,069	0,0613	0,05346	0,0448	0,03763	0,033	0,029	0,026	0,024	0,022	0,021	0,02	0,019

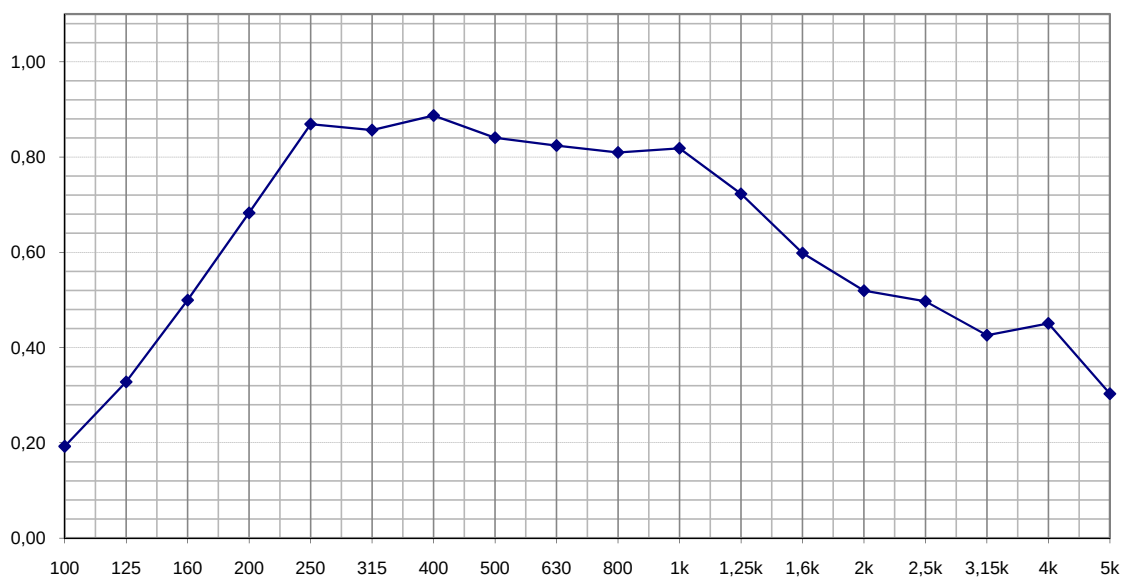
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 8mm+tela+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 6 cm	Data
		18-09-2009
Dimensão da Amostra =	11,25 m ²	

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) =	7,25	Altura (m) =	4,65	Temperatura do Ar (°C) =	16,6
Largura média (m) =	5,88	Volume (m ³) =	217,7	Humidade do Ar (%) =	68
c=	340,96	Sc=	207,369	Nº Decaimentos	2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	6,0	5,0	4,0	3,2	2,7	2,8	2,7	2,9	2,9	2,9	2,7	2,9	3,0	3,0	2,9	2,7	2,3	1,9
α_a	0,19	0,33	0,50	0,68	0,87	0,86	0,89	0,84	0,82	0,81	0,82	0,72	0,60	0,52	0,50	0,43	0,45	0,30
ϵ_{20}	0,083676	0,082	0,0808	0,081	0,078	0,069	0,0621	0,05429	0,0483	0,04292	0,039	0,034	0,029	0,027	0,024	0,022	0,021	0,021

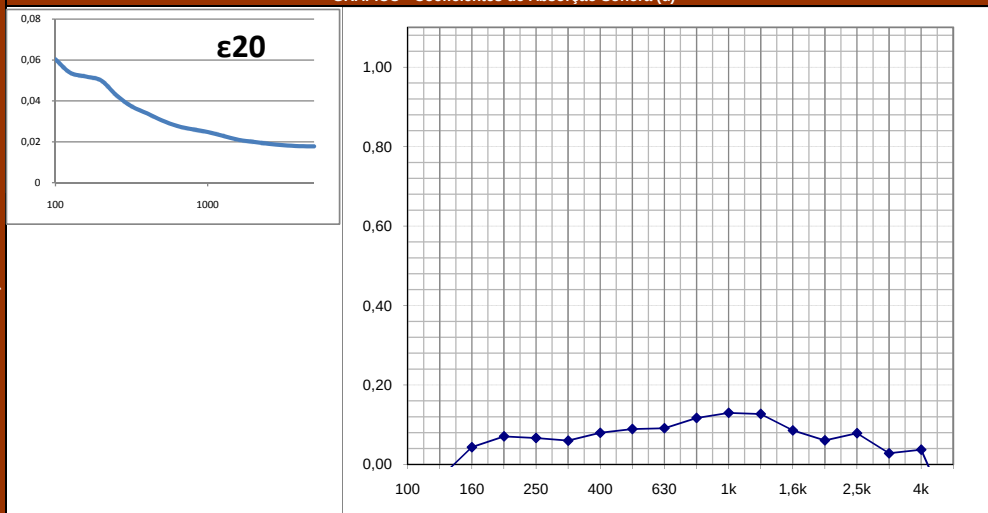
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - Diferença entre câmara Vazia e câmara com estrutura	Data
	Dimensão da Amostra = 11,3 m ²	14-09-2009

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c = 340,96	Sc = 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,54853	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,95	12,2	11,6	10,9	9,59	8,64	7,175	5,88	5,26	4,14	3,434	2,37
RT ₂ ^{AVG}	11,56	11,7	9,79	8,44	9,15	9,56	9,17	9,07	8,7	7,75	6,87	6,4	6	5,28	4,65	3,99	3,3	2,67
α _R	-0,06	-0,03	0,04	0,07	0,07	0,06	0,08	0,09	0,09	0,12	0,13	0,13	0,09	0,06	0,08	0,03	0,04	-0,15
ε ₂₀	0,060384	0,054	0,052	0,05	0,043	0,037	0,0339	0,03	0,028	0,026	0,025	0,023	0,021	0,02	0,019	0,018	0,018	0,02

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 12mm+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 16 cm	Data
		15-09-2009
Dimensão da Amostra =	11,25 m ²	

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) =	7,25	Altura (m) =	4,65	Temperatura do Ar (°C) =	16,6
Largura média (m) =	5,88	Volume (m ³) =	217,7	Humidade do Ar (%) =	68
c=	340,96	Sc=	207,369	Nº Decaimentos	2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	6,0	4,4	3,8	2,9	2,6	2,9	2,9	3,3	3,4	3,3	3,3	3,8	4,0	4,0	3,7	3,2	2,6	2,1
α_a	0,19	0,42	0,55	0,77	0,91	0,82	0,80	0,69	0,66	0,66	0,61	0,46	0,35	0,26	0,26	0,22	0,28	0,17
ϵ_{20}	0,083607	0,088	0,0833	0,085	0,08	0,068	0,0599	0,0503	0,0444	0,0399	0,036	0,03	0,026	0,023	0,021	0,02	0,02	0,02

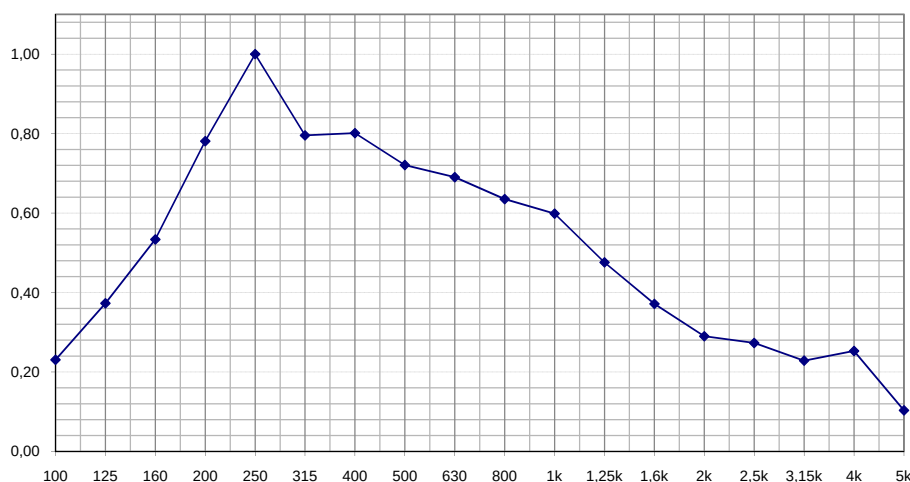
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 12mm+tela+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 16 cm	Data
	Dimensão da Amostra = 11,25 m ²	15-09-2009

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c = 340,96	Sc = 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	5,6	4,6	3,9	2,9	2,5	3,0	3,0	3,2	3,3	3,4	3,4	3,7	3,9	3,8	3,6	3,2	2,7	2,2
α_R	0,23	0,37	0,53	0,78	1,00	0,80	0,80	0,72	0,69	0,64	0,60	0,48	0,37	0,29	0,27	0,23	0,25	0,10
ϵ_{20}	0,08668	0,085	0,0825	0,085	0,083	0,067	0,0598	0,0512	0,0452	0,0394	0,035	0,03	0,026	0,024	0,022	0,021	0,02	0,02

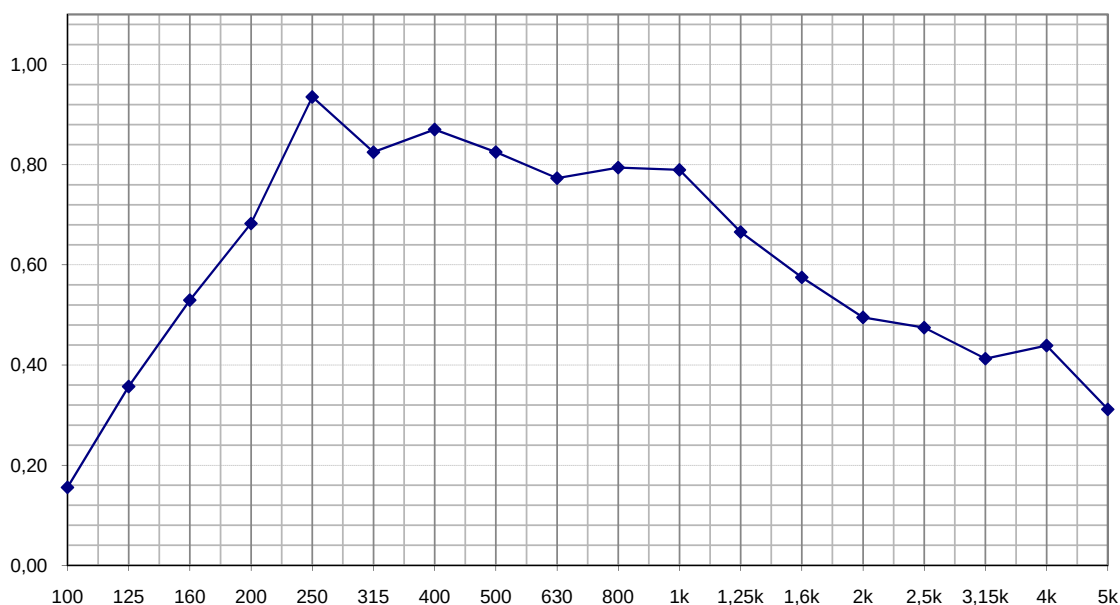
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 8mm+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 16 cm	Data
		15-09-2009
Dimensão da Amostra =	11,3 m ²	

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c= 340,96	Sc= 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	6,5	4,8	3,9	3,2	2,6	2,9	2,8	2,9	3,0	2,9	2,8	3,1	3,1	3,1	2,9	2,7	2,3	1,9
α_a	0,16	0,36	0,53	0,68	0,94	0,83	0,87	0,83	0,77	0,79	0,79	0,67	0,58	0,50	0,47	0,41	0,44	0,31
ϵ_{20}	0,080651	0,084	0,082	0,081	0,081	0,068	0,0617	0,054	0,047	0,043	0,039	0,033	0,029	0,026	0,024	0,022	0,021	0,021

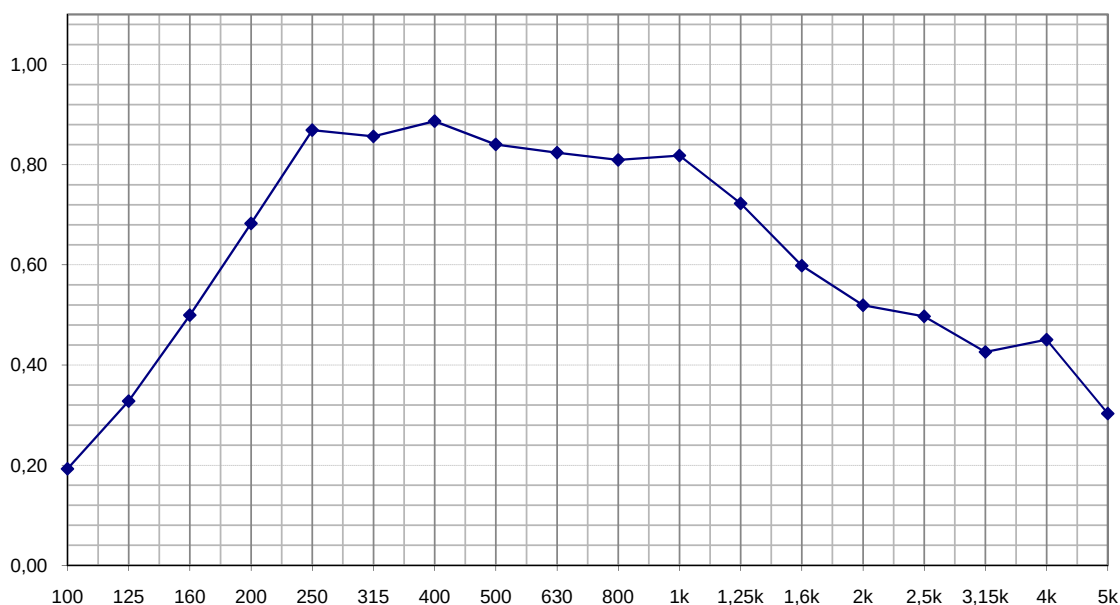
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 8mm+tela+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 16 cm	Data
		15-09-2009
Dimensão da Amostra =	11,3 m ²	

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c = 340,96	Sc = 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	6,0	5,0	4,0	3,2	2,7	2,8	2,7	2,9	2,9	2,9	2,7	2,9	3,0	3,0	2,9	2,7	2,3	1,9
α_a	0,19	0,33	0,50	0,68	0,87	0,86	0,89	0,84	0,82	0,81	0,82	0,72	0,60	0,52	0,50	0,43	0,45	0,30
ϵ_{20}	0,083676	0,082	0,081	0,081	0,078	0,069	0,0621	0,054	0,048	0,043	0,039	0,034	0,029	0,027	0,024	0,022	0,021	0,021

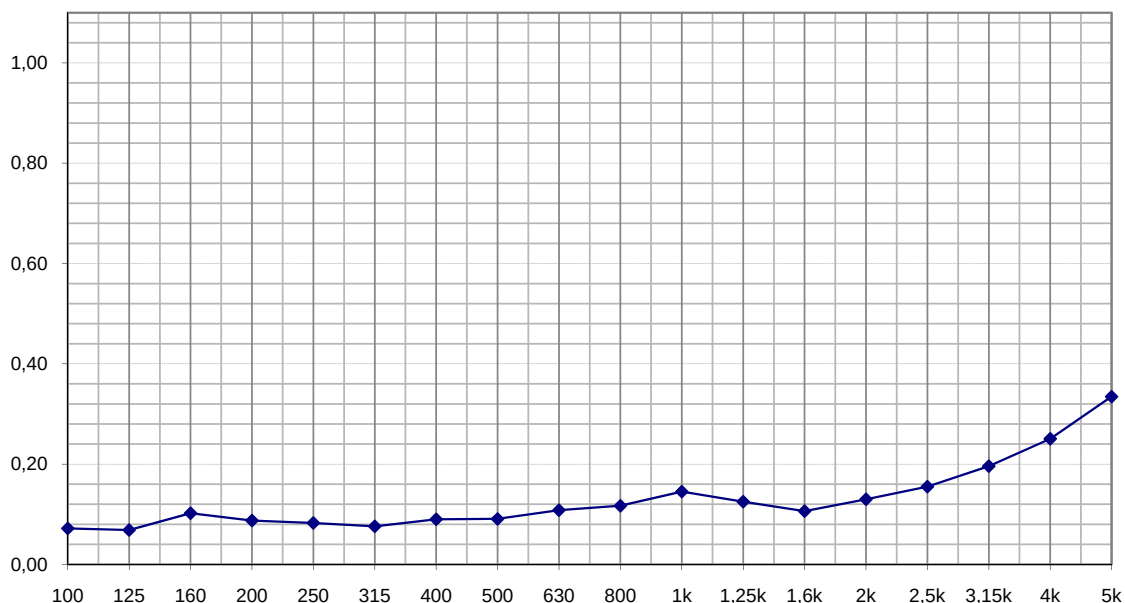
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - Diferença entre câmara Vazia e câmara com estrutura	Data
		14-09-2009
Dimensão da Amostra =	11,3 m ²	

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c = 340,96	Sc = 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	12,53	12,2	11,7	9,87	11,1	11,7	11,43	11,2	10,6	9,47	8,73	7,56	6,79	6,1	5,38	4,61	3,79	3,1
RT ₂ ^{AVG}	9,74	9,61	8,46	7,74	8,58	9,12	8,61	8,46	7,77	7	6,22	5,81	5,52	4,87	4,25	3,58	2,91	2,33
α_a	0,07	0,07	0,10	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09	0,11	0,12	0,15	0,13	0,11	0,13	0,16	0,20	0,25	0,33
ϵ_{20}	0,065784	0,059	0,056	0,052	0,044	0,038	0,035	0,032	0,029	0,027	0,026	0,024	0,022	0,021	0,02	0,019	0,019	0,019

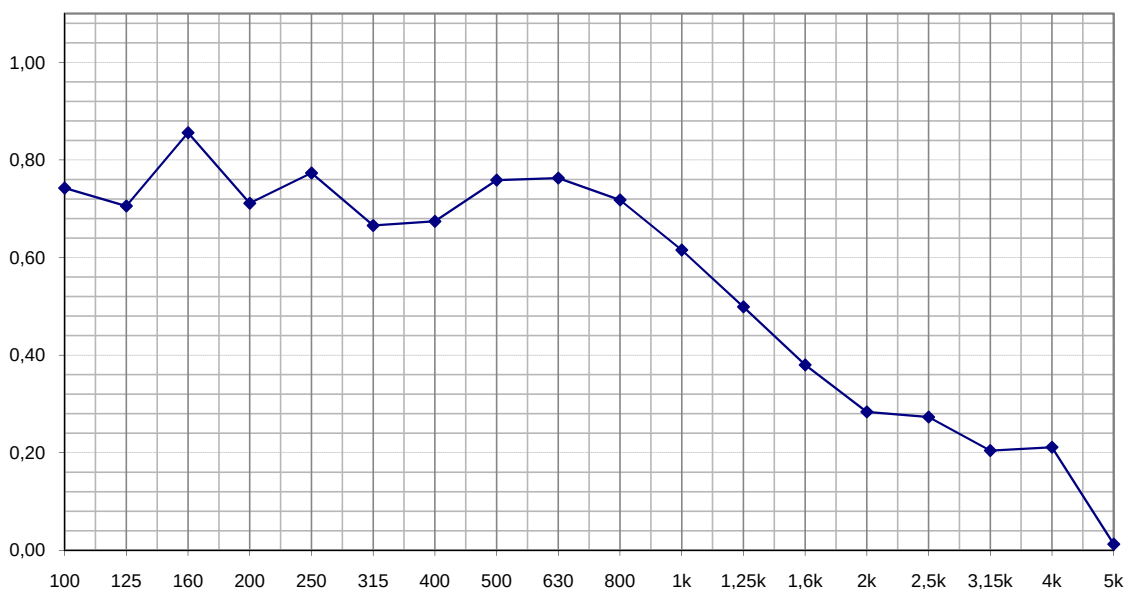
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 12mm+tela+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 36 cm	Data
Dimensão da Amostra =	11,25 m ²	15-09-2009

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) =	7,25	Altura (m) =	4,65	Temperatura do Ar (°C) =	16,6
Largura média (m) =	5,88	Volume (m ³) =	217,7	Humidade do Ar (%) =	68
c=	340,96	Sc=	207,369	Nº Decaimentos	2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	2,9	3,1	2,8	3,1	3,0	3,4	3,4	3,1	3,0	3,1	3,3	3,6	3,8	3,8	3,6	3,3	2,8	2,4
α_a	0,74	0,71	0,86	0,71	0,77	0,67	0,67	0,76	0,76	0,72	0,62	0,50	0,38	0,28	0,27	0,20	0,21	0,01
ϵ_{20}	0,11994	0,104	0,0975	0,082	0,075	0,063	0,0561	0,0522	0,0469	0,0411	0,036	0,03	0,026	0,023	0,022	0,02	0,019	0,019

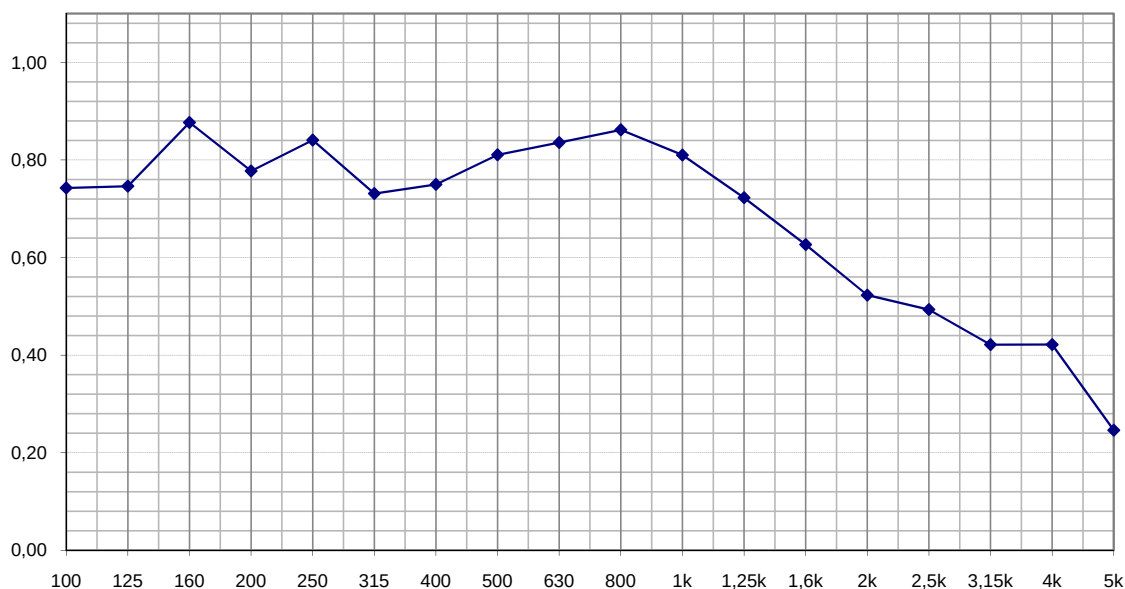
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis perfurados VIROC - VICOC com 12 mm espessura e furo 8mm+tela acustica+lã de rocha 4cm+caixa de ar de 36 cm	Data
	Dimensão da Amostra = 11,25 m ²	15-09-2009

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c= 340,96	Sc= 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	2,9	3,0	2,7	2,9	2,8	3,1	3,1	2,9	2,8	2,7	2,8	2,9	3,0	3,0	2,9	2,7	2,4	2,0
α_a	0,74	0,75	0,88	0,78	0,84	0,73	0,75	0,81	0,84	0,86	0,81	0,72	0,63	0,52	0,49	0,42	0,42	0,25
ϵ_{20}	0,11994	0,106	0,0984	0,085	0,077	0,065	0,0583	0,0535	0,0485	0,0439	0,039	0,034	0,03	0,027	0,024	0,022	0,021	0,021

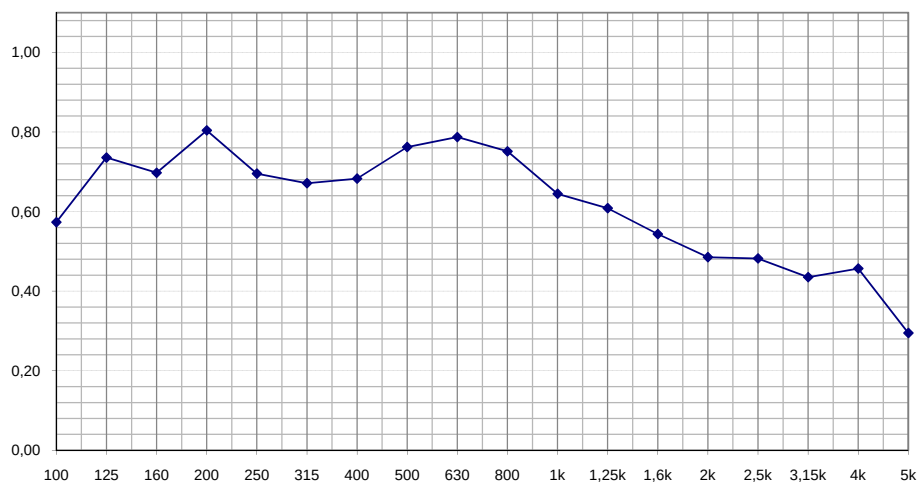
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis VIROC - VIROC com furo 8mm+ESPUMA FLEX com 6 cm+caixa de ar de 34 cm	Data
		15-09-2009
Dimensão da Amostra =	11,25 m ²	

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c = 340,96	Sc = 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	3,5	3,0	3,2	2,8	3,2	3,3	3,3	3,1	3,0	3,0	3,2	3,2	3,2	3,1	2,9	2,6	2,3	1,9
α_R	0,57	0,74	0,70	0,80	0,70	0,67	0,68	0,76	0,79	0,75	0,64	0,61	0,54	0,49	0,48	0,43	0,46	0,29
ϵ_{20}	0,110055	0,106	0,0905	0,086	0,072	0,063	0,0563	0,0523	0,0475	0,0418	0,036	0,032	0,029	0,026	0,024	0,023	0,021	0,021

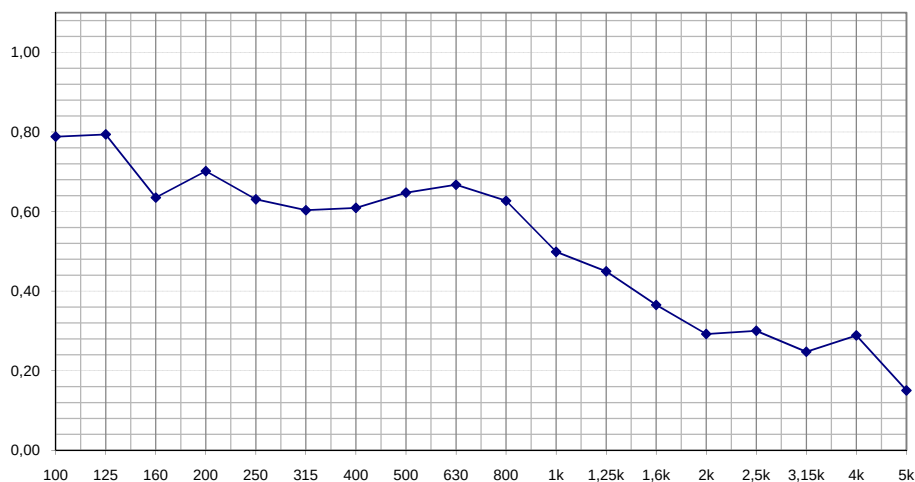
DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

REQUERENTE:	VIROC	Referência
DESCRIÇÃO:	Ensaio de painéis VIROC - VIROC com furo 12mm+ESPUMA FLEX com 6 cm+caixa de ar de 34 cm	Data
	Dimensão da Amostra = 11,25 m ²	15-09-2009

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) = 7,25	Altura (m) = 4,65	Temperatura do Ar (°C) = 16,6
Largura média (m) = 5,88	Volume (m ³) = 217,7	Humidade do Ar (%) = 68
c = 340,96	Sc = 207,369	Nº Decaimentos 2

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



Perfil Metálico

F(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
RT ₁ ^{AVG}	9,5	10,3	11,3	10,4	11,4	11,7	11,9	12,2	11,6	10,9	9,6	8,6	7,2	5,9	5,3	4,1	3,4	2,4
RT ₂ ^{AVG}	2,8	2,9	3,4	3,1	3,5	3,6	3,6	3,5	3,4	3,4	3,8	3,9	3,9	3,8	3,5	3,1	2,6	2,1
α_R	0,79	0,79	0,64	0,70	0,63	0,60	0,61	0,65	0,67	0,63	0,50	0,45	0,37	0,29	0,30	0,25	0,29	0,15
ϵ_{20}	0,122474	0,109	0,0875	0,082	0,07	0,061	0,0541	0,0493	0,0447	0,0392	0,033	0,03	0,026	0,024	0,022	0,021	0,02	0,02