

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE MATERIAIS FONOABSORVENTES À BASE DE FILMES DE POLÍMERO MONOCOMPONENTES SOBRE LÃ MINERAL FIBRADA

GONÇALO VELOSO DE CARVALHO POÇAS MARTINS

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

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Gonçalves Calejo Rodrigues

FEVEREIRO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

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.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a realização desta Tese de Mestrado, nomeadamente:

- Ao Professor Doutor Rui Calejo, por todos os conhecimentos transmitidos, pelo entusiasmo que sempre demonstrou na orientação deste trabalho, bem como a inteira disponibilidade demonstrada, regendo-se sempre por um rigor, disciplina e metodologia científica assinaláveis;

- Aos meus colegas e amigos Adriano Gonçalves, Agostinho Sousa Coutinho, João Dirk e Pedro Sousa Rodrigues, pelo companheirismo e troca de conhecimentos ao longo da realização desta dissertação;

- Ao meu primo Eng^o João Poças Martins, por todos os esclarecimentos prestados e motivação transmitida;

- À empresa STIER, pelo fornecimento do material em estudo, na pessoa do Eng^o Aragão;

- Aos meus pais, amigos e restante família por todo o acompanhamento e incentivo manifestados.

RESUMO

O constante desenvolvimento e crescimento das cidades, tem vindo progressivamente a mudar hábitos e costumes das populações, assim como as suas exigências. Problemas ligados com o ruído são conhecidos desde os tempos remotos, sendo ainda hoje uma realidade.

Assim sendo, torna-se inevitável o aparecimento de novas soluções construtivas capazes de minimizar esta problemática.

Pretende-se portanto, neste trabalho, avaliar uma propriedade acústica, a absorção sonora, de duas variantes de um mesmo material: fibras de celulose aplicadas sobre lã mineral. Este material é usualmente aplicado em tectos, tendo como principal vantagem serem contínuos, não existindo juntas.

Para se proceder a tal avaliação previu-se primeiramente o valor do coeficiente de absorção sonora por um método teórico já existente. Com a mesma finalidade recorreu-se também a um método experimental: método do tubo de ondas estacionários. Estimados os valores para o coeficiente de absorção, das duas variantes do material em estudo, por estas duas metodologias distintas, realizou-se um último ensaio experimental, mais fiável, para conferir a viabilidade das previsões realizadas: método da câmara reverberante.

A existência de uma modelação teórica capaz de prever para o coeficiente de absorção sonora de um material, à semelhança das já existentes para o cálculo do índice de isolamento sonoro a sons aéreos, por exemplo, é uma ferramenta de extrema importância principalmente na fase de projecto.

Por sua vez, a utilização do método do tubo de ondas estacionárias tem como principal vantagem a necessidade de uma amostra de pequenas dimensões.

Por fim compara-se o material em estudo com soluções já utilizadas actualmente para tectos, para avaliar uma possível integração deste no mercado actual.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Absorção Sonora, fibras de papel aplicadas sobre lã mineral, modelo de Delany-Bazley, método do tubo de ondas estacionárias, método da câmara reverberante,

ABSTRACT

The constant development and growth of cities has been steadily changing habits and customs of the people, as well as their requirements. Problems associated with noise are known since the ancient times and are still today a reality.

Therefore, it is inevitable the emergence of new constructive solutions capable of minimizing this problem.

It is important therefore, in this study, to evaluate an acoustic property, the sound absorption of two variants of the same material: pulp fibres applied on mineral wool. This material is usually applied to ceilings, with the main advantage being continued, with no joints.

To make such an assessment it was provided primarily the value of the sound absorption coefficient by a theoretical existing method. With the same purpose it was also used an experimental method: the method using standing wave ratio. After the figures had been estimated for the rate of absorption of the two variants of the material under study, by these two different methodologies, one last experimental test took place, this time even more reliable, to check the feasibility of the forecasts previously made: method of the reverberation room.

The existence of a theoretical modelling that is able to provide the sound absorption coefficient of a material, like the existing ones for the airborne sound insulation, for example, is a tool of great importance especially at the project stage .

In turn, the use of the standing wave tube has, as a main advantage, the need for a sample of small parts.

Finally the studied material is compared to solutions already currently used for ceilings, to assess the possible integration of it on the market today.

KEYWORDS: Acoustics, Sound Absorption, paper fibre applied on mineral wool, Delany-Bazley model, the method using standing wave ration, method of the reverberation room

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJECTO DE INVESTIGAÇÃO	1
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 ESTADO DO CONHECIMENTO	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA	5
2.2.1 DESDE A ANTIGUIDADE AOS TEMPOS MODERNOS	5
2.2.2 A ACÚSTICA NOS TEMPOS MODERNOS.....	8
2.3 REGULAMENTAÇÃO DO RUÍDO EM PORTUGAL	9
2.3.1 A NECESSIDADE DE REGULAMENTAÇÃO	9
2.3.2 EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS REGULAMENTOS EM PORTUGAL.....	9
2.3.3 REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DOS EDÍFÍCIOS	11
2.4 A IMPORTÂNCIA DA ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS.....	13
2.4.1 CONCEITO DE ABSORÇÃO SONORA	13
2.4.2 INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS ABSORVENTES NO ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS	14
2.4.3 A INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS ABSORVENTES NO CAMPO SONORO DE UM ESPAÇO	15
2.5 PRODUTOS UTILIZADOS PARA TECTOS	21
2.5.1 AMOSTRA EM ESTUDO	21
2.5.2 OUTROS PRODUTOS UTILIZADOS PARA TECTOS.....	21
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	22
3 TEORIA DA ABSORÇÃO SONORA	25
3.1 INTRODUÇÃO	25

3.2	MODELOS TEÓRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA	25
3.2.1	MODELO DE DELANY E BAZLEY	25
3.2.2	OUTRAS MODELAÇÕES.....	29
3.3	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA NO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS	30
3.3.1	INTRODUÇÃO	30
3.3.2	PRINCIPIO DA METODOLOGIA.....	30
3.3.3	CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA.....	30
3.4	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE	32
3.4.1	PREPARAÇÃO DO ENSAIO	33
3.4.2	MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	35
3.4.3	CÁLCULO DOS RESULTADOS.....	36
3.4.4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	37
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	37
4	APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS	39
4.1	INTRODUÇÃO.....	39
4.2	CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PELO MÉTODO DE DELANY-BAZLEY	40
4.2.1	AUTOMATIZAÇÃO DO MODELO DE DELANY-BAZLEY	40
4.2.2	APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO À AMOSTRA EM ESTUDO	40
4.3	CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PELO MÉTODO DO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS	44
4.3.1	PROCEDIMENTO DO ENSAIO LABORATORIAL.....	44
4.3.2	ADOÇÃO DO TIPO DE TUBO A UTILIZAR CONSOANTE AS FREQUÊNCIAS DE TRABALHO A ESTUDAR.....	45
4.3.3	ADEQUAÇÃO DO EQUIPAMENTO A UMA AMOSTRA DE TESTE	46
4.3.4	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS EM ESTUDO	50
4.4	CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE	58
4.4.1	PREPARAÇÃO DO ENSAIO	58
4.4.2	VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO DA NORMA.....	60
4.4.3	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA	62
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	64
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	67
5.1	INTRODUÇÃO.....	67

5.2	COMPARAÇÃO DO MATERIAL TALOCHADO COM O MATERIAL PROJECTADO	67
5.3	COMPARAÇÃO DO MODELO TEÓRICO COM O MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE ...	69
5.4	COMPARAÇÃO DO MÉTODO DO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS COM O MÉTODO DA CAMARA REVERBERANTE	72
5.5	ENQUADRAMENTO DO PRODUTO EM ESTUDO NO MERCADO ACTUAL.....	74
5.5.1	EFEITO DA REDUÇÃO DA ESPESSURA DO MATERIAL	74
5.5.2	EFEITO DA COLOCAÇÃO DE CAIXA-DE-AR, NO TARDOZ DO MATERIAL SONACOUSTIC, 2,5 CM	74
5.5.3	COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTIC DE 3,5 CM COM O MATERIAL BASWAPHON DE 4,0 CM, APOIADOS SOBRE BASE SÓLIDA.....	75
5.5.4	COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTIC DE 2,5 CM COM CAIXA-DE-AR DE 12,5 CM COM MATERIAL STOSILENT A-TEC DE 2,7 CM COM CAIXA-DE-AR DE 10,0 CM.....	76
5.5.5	COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTIC DE 2,5 CM COM CAIXA-DE-AR DE 6,0 CM COM O MATERIAL AKUSTAPLAN DE 1,9 CM COM CAIXA-DE-AR DE 5,0 CM	77
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	78
6	CONCLUSÕES.....	81
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	82
7	BIBLIOGRAFIA	83

ÍNDICE DAS FIGURAS

FIGURA 1.1 - MATERIAL PROJECTADO (À ESQUERDA) E MATERIAL TALOCHADO (À DIREITA)	2
FIGURA 1.2 - DIAGRAMA SÍNTESE DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
FIGURA 2.1 - CRONOLOGIA DA REGULAMENTAÇÃO SOBRE O RUÍDO, EM PORTUGAL	11
FIGURA 2.2 - TEMPO DE REVERBERAÇÃO [9]	12
FIGURA 2.3 - WALLACE SABINE	13
FIGURA 2.4 - MECANISMO DE ABSORÇÃO SONORA	14
FIGURA 2.5 - VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE UMA ALCATIFA APOIADA SOBRE UMA LAJE DE BETÃO ARMADO [17]	16
FIGURA 2.6 - VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE UM REPOSTEIRO DE ALGODÃO COM DIFERENTES PERCENTAGENS DE FRANZIDO [8]	17
FIGURA 2.7 - VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE UMA MASSA POROSA COM ESPESSURAS NOMINAIS DE 13 MM E 25 MM [8]	17
FIGURA 2.8 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE ABSORSORES SUSPENSOS (BAFFLES) RETIRADO DE? ..	18
FIGURA 2.9 - VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO AGLOMERADO NEGRO E AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA (VALORES ODETE)	19
FIGURA 2.10 - VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE SISTEMAS TIPO MEMBRANA RESSONANTE [8]	19
FIGURA 2.11 - RESSOADROES DE CAVIDADE [8]	20
FIGURA 2.12 - MATERIAL BASWAPHON DE 4,0 CM	21
FIGURA 2.13 - SISTEMA STOSILENT A-TEC	22
FIGURA 2.14 - MATERIAL AKUSTAPLAN FWA GLASS	22
FIGURA 3.1 - NORMALIZAÇÃO DA COMPONENTE REAL DA IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA/RESISTÊNCIA AO FLUXO DO AR [18]	26
FIGURA 3.2 - NORMALIZAÇÃO DA COMPONENTE IMAGINÁRIA DA IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA/RESISTÊNCIA AO FLUXO DO AR [18]	27
FIGURA 3.3 - NORMALIZAÇÃO DA COMPONENTE REAL DO COEFICIENTE DE PROPAGAÇÃO COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA/RESISTÊNCIA AO FLUXO DO AR [18]	27
FIGURA 3.4 - NORMALIZAÇÃO DA COMPONENTE IMAGINÁRIA DO COEFICIENTE DE PROPAGAÇÃO COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA/RESISTÊNCIA AO FLUXO DO AR [18]	28
FIGURA 3.5 - ONDA ESTACIONÁRIA NO TUBO DE IMPEDÂNCIA. A PRIMEIRA PRESSÃO MÁXIMA A SER MEDIDA DEVE SER ESCOLHIDA ENTRE OS DOIS PRIMEIROS MÍNIMOS [14]	30
FIGURA 4.1 - FLUOXOGRAMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	40
FIGURA 4.2 - MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA À PASSAGEM DO AR	41
FIGURA 4.3 - INTRODUÇÃO DOS VALORES DAS PROPRIEDADES DOS DOIS MATERIAIS EM ESTUDO	41

FIGURA 4.4 - ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS EM ESTUDO OBTIDOS COM O MODELO TEÓRICO: MATERIAL Nº1 (M1) – MATERIAL TALOCHADO; MATERIAL Nº2 (M2) – MATERIAL PROJECTADO	42
FIGURA 4.5 - GRÁFICO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL TALOCHADO, CALCULADO COM BASE NO MODELO TEÓRICO.	43
FIGURA 4.6 - GRÁFICO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL PROJECTADO, CALCULADO COM BASE NO MODELO TEÓRICO.	44
FIGURA 4.7 – IMAGEM ONDE SE OBSERVA O ESQUEMA GERAL DA LIGAÇÃO DO EQUIPAMENTO	45
FIGURA 4.8 - MATERIAL DE TESTE: AGLUMERADO DE DESPERDÍCIOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO RECICLADAS.....	47
FIGURA 4.9- GRÁFICO DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL DE TESTE: K_0 " DETERMINADO PELO MÉTODO 1	49
FIGURA 4.10 - GRÁFICO DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL DE TESTE: K_0 " DETERMINADO PELO MÉTODO 2.....	50
FIGURA 4.11 - AMOSTRAS ESTUDADAS NO TUBO DE ONDAS DE ESTACIONÁRIAS: MATERIAL PROJECTADO (À ESQUERDA); MATERIAL TALOCHADO (À DIREITA).....	51
FIGURA 4.12 - NÚMERO DE MEDIÇÕES EFECTUADAS.....	51
FIGURA 4.13 - GRÁFICO DO VALOR DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA O MATERIAL TALOCHADO, OBTIDOS COM O TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS.....	55
FIGURA 4.14 - GRÁFICO DO VALOR DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA O MATERIAL PROJECTADO, OBTIDOS COM O TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS.....	57
FIGURA 4.15 - ESQUEMA DAS CÂMARAS REVERBERANTES - CORTE TRANSVERSAL	58
FIGURA 4.16 - ESQUEMATIZAÇÃO DO ENSAIO	59
FIGURA 4.17 - FOTO DO ENSAIO DO MATERIAL TALOCHADO NA CÂMARA REVERBERANTE.....	59
FIGURA 4.18 - GRÁFICO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL TALOCHADO, CALCULADO COM BASE NO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE.....	63
FIGURA 4.19 – GRÁFICO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL PROJECTADO, CALCULADO COM BASE NO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE.....	64
FIGURA 5.1 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA CADA O MATERIAL TALOCHADO E MATERIAL PROJECTADO, PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE	68
FIGURA 5.2 - DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES DE ABSORÇÃO SONORA OBTIDOS PARA OS MATERIAIS TALOCHADO E PROJECTADO, PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE.....	68
FIGURA 5.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O MATERIAL TALOCHADO E MATERIAL PROJECTADO, PELO MODELO TEÓRICO	69
FIGURA 5.4 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PARA O MATERIAL TALOCHADO, OBTIDOS PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE E PELO MODELO TEÓRICO.....	70
FIGURA 5.5 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PARA O MATERIAL PROJECTADO, OBTIDOS PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE E PELO MODELO TEÓRICO.....	70

FIGURA 5.6 - DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES OBTIDOS PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE E O MODELO TEÓRICO, NO DOMÍNIO DE FREQUÊNCIAS VÁLIDO PARA APLICAÇÃO DESTE ÚLTIMO, PARA O MATERIAL TALOCHADO	71
FIGURA 5.7 - DIFERENÇAS ENTRE OS VALORES OBTIDOS PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE E O MODELO TEÓRICO, NO DOMÍNIO DE FREQUÊNCIAS VÁLIDO PARA APLICAÇÃO DESTE ÚLTIMO, PARA O MATERIAL PROJECTADO	71
FIGURA 5.8 - COMPARAÇÃO DO VALOR DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL TALOCHADO COM O MATERIAL PROJECTADO, OBTIDOS COM O TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS .	72
FIGURA 5.9 - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE COM O MÉTODO DO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS, PARA O MATERIAL TALOCHADO	73
FIGURA 5.10 - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE COM O MÉTODO DO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS, PARA O MATERIAL PROJECTADO	73
FIGURA 5.11 - GRÁFICO PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA REDUÇÃO DA ESPESSURA DO MATERIAL TALOCHADO	74
FIGURA 5.12 - EFEITO DA COLOCAÇÃO DE CAIXA-DE-AR NO MATERIAL SONACOUSTIC	75
FIGURA 5.13 - COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTIC DE 3,5 CM COM O MATERIAL BASWAPHON DE 4,0 CM, AMBOS APOIADOS EM BASE SÓLIDA	76
FIGURA 5.14 - COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTI DE 2,5 CM + CAIXA-DE-AR DE 12,5 CM COM O MATERIAL STOSILENT A-TEC DE 2,7 CM + CAIXA-DE-AR DE 10,0 CM	77
FIGURA 5.15 - COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTIC DE 2,5 CM + CAIXA-DE-AR DE 6,0 CM COM O MATERIAL AKUSTAPLAN FWA GLASS DE 1,9 CM + CAIXA-DE-AR DE 5,0 CM	78

ÍNDICE DOS QUADROS

QUADRO 3.1 - VALORES MÁXIMOS DA ÁREA DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE PARA UMA CÂMARA REVERBERANTE COM $V=200\text{m}^3$ [15]	34
QUADRO 3.2 - REQUISITOS PARA OS VALORES DA TEMPERATURA E DA HUMIDADE RELATIVA DURANTE A MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO[15].	35
QUADRO 4.1 - VALORES DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS EM ESTUDO: ESPESSURA (E) E RESISTÊNCIA À PASSAGEM DO AR (Σ)	41
QUADRO 4.2 - TABELA DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL TALOCHADO, CALCULADO COM BASE NO MODELO TEÓRICO, PARA UM CAMPO DIFUSO	43
QUADRO 4.3 - TABELA DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL PROJECTADO, CALCULADO COM BASE NO MODELO TEÓRICO, PARA UM CAMPO DIFUSO.....	44
QUADRO 4.4 - TABELA PARA VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DE CADA UM DOS TUBOS	46
QUADRO 4.5 - CÁLCULO DO VALOR DA CONSTANTE DA ATENUAÇÃO DO TUBO, K_0''	48
QUADRO 4.6 - VALORES PARA OS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL DE TESTE: K_0'' DETERMINADO PELO MÉTODO1	49
QUADRO 4.7 - VALORES PARA OS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL DE TESTE: K_0'' DETERMINADO PELO MÉTODO2.....	50
QUADRO 4.8 – EXEMPLO DOS VALORES OBTIDOS PARA A AMOSTRA 1 DO MATERIAL TALOCHADO, UTILIZANDO AS ATENUAÇÕES CALCULADAS COM BASE NAS INSTRUÇÕES NORMATIVAS: MÉTODO 1	52
QUADRO 4.9 - VALORES OBTIDOS PARA OS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA A AMOSTRA 1 DO MATERIAL TALOCHADO, UTILIZANDO AS ATENUAÇÕES DO TUBO CALCULADAS PELO MÉTODO 2.	53
QUADRO 4.10 - VALORES OBTIDOS PARA OS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA A AMOSTRA 2 DO MATERIAL TALOCHADO, UTILIZANDO AS ATENUAÇÕES DO TUBO CALCULADAS PELO MÉTODO 2	53
QUADRO 4.11 - VALORES OBTIDOS PARA OS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA A AMOSTRA 3 DO MATERIAL TALOCHADO, UTILIZANDO AS ATENUAÇÕES DO TUBO CALCULADAS PELO MÉTODO 2	54
QUADRO 4.12 - VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL TALOCHADO, OBTIDOS COM O TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS	54
QUADRO 4.13 - VALORES OBTIDOS PARA OS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA A AMOSTRA 1 DO MATERIAL PROJECTADO, UTILIZANDO AS ATENUAÇÕES DO TUBO CALCULADAS PELO MÉTODO 2.....	55
QUADRO 4.14 - VALORES OBTIDOS PARA OS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA A AMOSTRA 2 DO MATERIAL PROJECTADO, UTILIZANDO AS ATENUAÇÕES DO TUBO CALCULADAS PELO MÉTODO 2.....	56

QUADRO 4.15 – VALORES OBTIDOS PARA OS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA PARA A AMOSTRA 3 DO MATERIAL PROJECTADO, UTILIZANDO AS ATENUAÇÕES DO TUBO CALCULADAS PELO MÉTODO 2.....	56
QUADRO 4.16 - VALORES DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL PROJECTADO, OBTIDOS COM O TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS	57
QUADRO 4.17 - ÁREA DE ABSORÇÃO EQUIVALENTE DA CÂMARA REVERBERANTE, SEM AMOSTRA	60
QUADRO 4.18 - VERIFICAÇÃO DA ÁREA DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE MÁXIMA ADMITIDA, PARA A CÂMARA REVERBERANTE VAZIA	61
QUADRO 4.19 - CUMPRIMENTO DAS DISPOSIÇÕES LEGAIS EM VIGOR, PARA AS DISTÂNCIAS RELATIVAS ENTRE OS DIVERSOS ELEMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO	61
QUADRO 4.20 - VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO DOS VALORES PARA A HUMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA, DURANTE O ENSAIO.....	62
QUADRO 4.21 - COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL TALOCHADO	62
QUADRO 4.22 - COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DO MATERIAL PROJECTADO	63

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - Área de absorção sonora equivalente (m^2)

c_0 - Celeridade (m/s)

f - Frequência (Hz)

k_0'' - constante de atenuação do tubo de ondas estacionárias

RGR - Regime Geral Sobre o Ruído

RLPS - Regime Legal Sobre a Poluição Sonora

RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S - Área da superfície de um elemento (m^2)

T - Tempo de reverberação (s)

V - Volume (m^3)

Z - Impedância de um material

Z_0 - Impedância característica de um material

α_d - coeficiente de absorção sonora para um campo difuso (ajuste do tubo de ondas estacionárias)

α_n - coeficiente de absorção sonora para uma incidência normal

$\alpha_{dT\text{eórico}}$ - coeficiente de absorção sonora para um campo difuso, obtido com o modelo teórico.

$\alpha_{dT\text{ubo}}$ - coeficiente de absorção sonora para um campo difuso, obtido com o tubo;

γ - Coeficiente de propagação

σ - Resistência à passagem do ar ($KPa.s/m^2$)

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o desenvolvimento e mutação a grande ritmo das cidades aumenta o número de casos de indivíduos com stress, conhecida como a doença do século XXI. Neste cenário a qualidade e conforto proporcionada pelos edifícios tem um papel preponderante pois contribui para a satisfação e qualidade de vida dos seus utentes.

Assim sendo, o conforto acústico de um edifício é de uma importância vital nos dias que correm: uma palestra inaudível num auditório ou uma noite mal dormida devido ao ruído emitido por uma discoteca são situações totalmente indesejáveis que podem ser evitadas desde que estudadas e analisadas previamente. Esse conhecimento prévio fundamenta-se nas as propriedades acústicas dos materiais, elementos e componentes utilizados nos edifícios.

Importa portanto realçar o papel preponderante que a legislação tem na qualidade dos edifícios a qual, incidindo na fase de projecto acarreta melhores resultados, assegurando também, obviamente, menores custos.

Optou-se assim por abordar um tema ligado à Acústica, mais concretamente a um dos seus inúmeros ramos: a Acústica de Edifícios. A crescente exigência dos consumidores, a defesa do seu bem-estar aliado ao facto de esta ser uma ciência em forte desenvolvimento a nível nacional, foram factores de peso aquando da escolha deste tema.

Um dos principais desígnios desta dissertação é apelar à necessidade do conhecimento profundo das propriedades acústicas dos materiais a empregar na construção, nomeadamente a absorção sonora.

Esta propriedade acústica pode ser determinada não só experimentalmente mas também recorrendo a modelos teóricos, que não têm vindo a ser objecto de estudo nos últimos anos por parte das equipas de investigação quer nacionais, quer internacionais.

1.2 OBJECTO DE INVESTIGAÇÃO

O presente estudo centra-se na determinação dos valores do coeficiente de absorção sonora de dois materiais fonoabsorventes à base de filmes de polímero monocomponentes sobre lã mineral fibrada.

A diferença existente entre as duas amostras consiste apenas na forma como o filme de polímero monocomponente (fibra de papel) é aplicado sobre a lã mineral fibrada (lã de vidro): na primeira amostra este é aplicado por projecção, sendo rematado com uma talocha, conferindo-lhe um acabamento mais fino, designado doravante por “*material Talochado*”; na segunda amostra a fibra de papel é unicamente projectada recorrendo a um equipamento de projecção, conferindo-lhe um aspecto mais rugoso, daí que a designação atribuída seja “*material Projectado*”.

Na presente dissertação pretende-se determinar o valor do coeficiente de absorção sonora de cada um dos seguintes materiais através de um modelo teórico já existente, bem como de duas metodologias experimentais bem distintas: o Método do Tubo de Ondas Estacionárias e o Método da Câmara Reverberante.

O objectivo principal assenta desta forma em duas comparações distintas: dos valores do coeficiente de absorção sonora obtidos, para cada um dos materiais, com o modelo teórico e com as metodologias praticas já explicitadas; do valor do coeficiente de absorção sonora obtido para cada uma das amostras.

O conteúdo deste trabalho visa salientar a importância da existência de um método teórico capaz de prever os valores do coeficiente de absorção sonora de um dado material, em função das suas propriedades, à semelhança do que já acontece, por exemplo, com os modelos teóricos já existentes e amplamente utilizados para a previsão do índice de isolamento sonoro de uma determinada solução construtiva.

A existência de um modelo teórico tem então como principal vantagem, quando automatizado, obter de uma forma rápida e eficaz, uma estimativa fiável para os valores do coeficiente de absorção sonora de um material, sem que se tenham de realizar ensaios morosos, com necessidade de utilizar amostras do mesmo cuja montagem e ensaios laboratoriais acarretam custos.



Figura 1.1 - Material projectado (à esquerda) e material Talochado (à direita)

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta-se dividida em 6 capítulos, referências bibliográficas e anexos, apresentando três partes fundamentais: a primeira referente ao estado do conhecimento, a segunda ligada à teoria da absorção sonora e uma terceira dedicada à aplicação do modelo teórico e das metodologias praticas abordadas neste documento.

No capítulo 1 faz-se uma introdução geral ao tema abordado nesta dissertação, descrevendo-se os objectivos do trabalho efectuado, a sua motivação e estrutura organizativa.

No capítulo 2 aborda-se o estado do conhecimento da Acústica, fazendo-se uma referência histórica sobre este tema, para depois se abordarem aspectos ligados à regulamentação em vigor em Portugal bem como se introduzir o fenómeno da absorção sonora.

No capítulo 3 aborda-se a teoria da absorção sonora, referindo-se alguns métodos teóricos existentes para o cálculo da mesma, bem como dois métodos experimentais utilizados com o mesmo fim: Método do Tubo de Ondas Estacionárias e o Método da Câmara Reverberante.

No capítulo 4 desenvolve-se em concreto os métodos abordados no capítulo anterior, de forma a obter os valores do coeficiente de absorção sonora, para cada uma das metodologias, do material em estudo.

No capítulo 5 visa-se a compilação, comparação e análise dos resultados obtidos.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões que se retiraram após a elaboração deste trabalho, fazendo alusão às dificuldades encontradas na sua execução, deixando em aberto propostas para investigação e desenvolvimentos futuros que possam surgir.

No que diz respeito aos oito Anexos (A, B, C, D, E, F, G e H):

O Anexo A apresenta três notícias referentes a problemas existentes na nossa sociedade, devido ao ruído.

O Anexo B apresenta a validação do modelo teórico utilizado,

O Anexo C apresenta a folha de cálculo para o cálculo da atenuação do tubo de ondas estacionárias.

Nos Anexos D, E e F, constam as folhas de cálculo para a determinação dos valores dos coeficientes de absorção sonora da amostra de estudo, do material Talochado e do Material Projectado, respectivamente.

O Anexo G apresenta as folhas de cálculo para a determinação do coeficiente de absorção sonora pelo Método da Câmara Reverberante, para os dois materiais em estudo: Talochado e Projectado.

No Anexo H apresentam-se os Boletins de Ensaio de cada um dos materiais em estudo nesta dissertação.

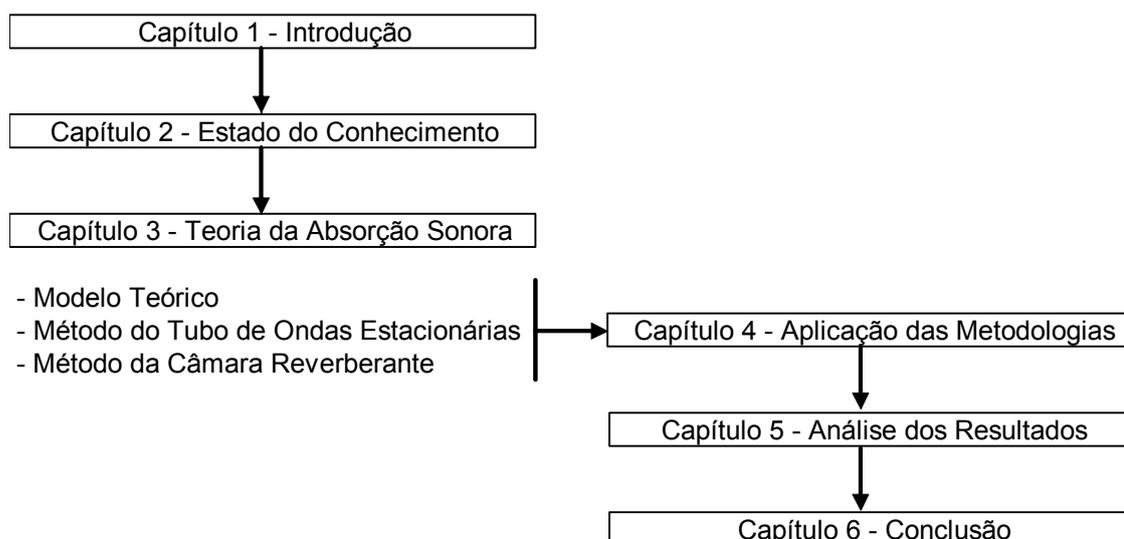


Figura 1.2 - Diagrama síntese da estrutura da dissertação

2

ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como principal objectivo sintetizar o estado do conhecimento da Acústica, tal como é intitulado.

Por conseguinte, aborda primeiramente a evolução histórica do conhecimento em Acústica desde as civilizações antigas até aos dias de hoje, sendo ainda abordado o panorama nacional e internacional desta ciência apresentando-se os principais organismos, congressos e outros assuntos relevantes do tema.

Seguidamente foi introduzida a necessidade da criação de normalização nesta área, tendo sido elaborada a cronologia dos regulamentos em Portugal. Assim, com a finalidade de introduzir o tema desta dissertação, foi aprofundando o estudo do Regulamento de Requisitos Acústicos de Edifícios com o intuito de fazer uma primeira abordagem ao parâmetro acústico em estudo: a absorção sonora.

Para finalizar e dado o objecto em estudo, são referidas quais as principais características a ter em conta nos produtos utilizados actualmente para tectos.

2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Para a compreensão de um fenómeno tão específico como a absorção sonora, importa desde logo caracterizar sucintamente a história relativa ao som, que perdura desde a antiguidade até aos dias de hoje, tornando-se mesmo numa ciência: a Acústica. Segundo Lindsay [23], esta gira em torno de três problemáticas: a produção do som (relacionada com as fontes sonoras), a sua propagação (o estudo do meio em que este se propaga) e a sua recepção (relacionada com o ouvinte).

2.2.1 DESDE A ANTIGUIDADE AOS TEMPOS MODERNOS

2.2.1.1 Antiguidade

Admite-se que desde o aparecimento do australopiteco (há cerca de trinta milhões de anos) e da sua postura erecta que lhe libertou as mãos e lhe conferiu assim a possibilidade de construir instrumentos musicais, que se estudava a música como uma forma de arte [1].

Contudo, supõe-se que o estudo do som começou a ser feito de uma forma científica a partir da Grécia Antiga, chegando-nos ainda hoje registos que nos datam e localizam esses trabalhos. Um dos primeiros filósofos gregos a estudar a origem do som, foi mesmo Pitágoras (VI a.C.) que, com experimentações ao nível da vibração de cordas esticadas, veio dar início a uma “teorização” do som. Também

Aristóteles (séc. IV a.C.) foi dos primeiros a tentar explicar o som como a movimentação do ar, produzido por uma fonte sonora [13].

Obras como os anfiteatros gregos, património cultural de inegável valor para a Humanidade, são dos maiores testemunhos dos conhecimentos gregos sobre a acústica: boa linha de visão para o palco; uso de parede reflectora na zona posterior do palco e ruído ambiente diminuto, são três regras essenciais a ter em consideração, mesmo nos tempos actuais, para a obtenção de uma boa qualidade acústica em anfiteatros. Os Romanos, também cedo deram importância às características acústicas que os seus teatros deveriam ter, conforme consta em “de Architectura”, de Marcus Vitruvius Pollio (27d.C.), sugerindo o uso de vasos ressonantes para se obter uma melhor performance acústica [1].

2.2.1.2 Idade Média

A Idade Média é considerada como um período negro da história relativa ao estudo do som na medida em que houve um interregno no desenvolvimento da ciência em geral, sendo que os estudos efectuados pelos sábios muçulmanos pouco ou nada vieram acrescentar ao que já havia sido desenvolvido pelos sábios gregos e romanos [13].

2.2.1.3 Renascimento

Quando se fala em Renascimento, é imperativo falar em Leonardo da Vinci (1452-1519) que também deu o seu contributo para a acústica, constatando através da observação dos ecos que a velocidade de propagação do som teria de ser inevitavelmente finita, problemática que ficou em aberto durante os anos seguintes [13].

2.2.1.4 Século XVII

No século XVII, Galileu Galilei (1564-1642), dedicou parte da sua vida a estudar o movimento oscilatório. Outro dos nomes de destaque no que diz respeito ao estudo do som, foi Marin Mersenne (1588-1648), um monge francês que determinou a velocidade do som através do tempo de retorno de um eco [1].

Nesta época, várias pessoas se reuniam para discutir novos assuntos, dando origem às chamadas academias científicas. Destas, importa realçar a Academia del Cimento, que se dedicou a diversos problemas formulados por Galileu, tal como a determinação da velocidade do som, já realizada por Mersenne [13].

Foi também durante este período que, através da realização de diferentes experiências se concluiu ser necessária a existência de um meio físico para a propagação do som. Robert Boyle (1627-1691), realizou a derradeira experiência que comprovou tal facto.

Com tamanhos desenvolvimentos nesta área, surgiu através de Joseph Sauveur (1653-1716) o termo Acústica para denominar a ciência dos sons, que significa “*relativo ao ouvido*” [23].

2.2.1.5 Século XVIII

O século XVIII foi um período da História em que houve uma grande evolução essencialmente ao nível da acústica teórica, onde os conhecimentos matemáticos de personalidades como Brook Taylor (1685-1731), Joseph Louis Lagrange (1736-1813), Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonhard Euler (1707-1783) e Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) tiveram enorme importância tendo sido postos os

seus conhecimentos ao serviço da acústica, tentando encontrar uma solução dinâmica para a corda vibrante. Só em 1822, Joseph Fourier (1768-1830) resolveu esse problema com o aparecimento do Teorema de Fourier [21].

Outro dos nomes marcantes para a Acústica foi Chladni (1758-1827) que, sem praticamente recorrer à matemática, observou os nodos vibratórios em corpos sólidos (espalhando areia fina sobre uma superfície a estudar que, posta a vibrar, definia certas figuras que correspondiam às linhas nodais-Figuras de Chladni). Aproveitando este trabalho, a Academia Francesa de Ciências ofereceu um prémio a quem descobrisse as equações que descreviam o comportamento das placas, o qual foi ganho por Sophie Germain (1776-1831). A equação diferencial de 4ª ordem estava assim descoberta, embora os limites não fossem os correctos, problema esse resolvido por Robert Kirchhoff (1824-1887) [13].

2.2.1.6 Século XIX

Foi durante o século XIX que Jean-Baptiste Biot (1774-1862) fez as primeiras experiências para a medição da velocidade de propagação do som num sólido. Por sua vez, August Kundt (1839-1899) mediu também a velocidade do som no ar e noutros gases, a partir da formação da onda estacionária no designado Tubo de Kundt. Já Charles Sturm (1803-1855) estudou a transmissão do som na água (Lago de Geneva) [1].

Neste período apareceu ainda instrumentação muito importante para o estudo do som, muitos deles fundamentais ainda nos dias de hoje, dos quais se destacam: sirene, estetoscópios, estroboscópio, telefone, fonógrafo e microfone [13].

Hermann von Helmholtz (1821-1894), foi também um nome de referência neste século, estudando o funcionamento do ouvido humano. O seu nome foi inclusive atribuído aos ressoadores: ressoadores de Helmholtz [1].

Diversos estudos sobre a audibilidade humana foram também realizados não só por Toepler (1836-1912) e Boltzmann (1844-1906) mas também por Rayleigh (1842-1919), grande impulsor da Acústica que recorreu à matemática para descrever diversos fenómenos desta ciência, editando uma obra marcante neste domínio: Teoria do Som [23].

Ainda neste século, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) destacou-se neste campo pois além de descobrir o efeito fotoelétrico deu também o seu contributo para a teoria das ondas electromagnéticas (o seu nome foi dado à unidade de frequência). Também Tyndall (1820-1893), que estudou os fenómenos da reflexão, refacção e difracção das ondas sonoras, deixou uma marca importante neste período [23].

2.2.1.7 Século XX

É na transição do século XIX para o século XX que surge o pai da acústica arquitectónica, Wallace Sabine (1868-1919), que desenvolveu estudos sobre a acústica do auditório da Universidade onde leccionava (Harvard, Boston) elaborando ainda o projecto de uma das melhores salas de música de todos os tempos: Boston Symphony Hall. Foi neste projecto que descobriu a fórmula que permitia calcular o tempo de reverberação, ainda hoje utilizada, e a qual ficou a ser conhecida por Fórmula de Sabine [13].

Dado o enorme interesse desta ciência e dada a diversidade de conhecimentos que abrange, vários investigadores deram o seu importante contributo para o seu desenvolvimento, destacando-se nomes como Cyrill M. Harris, Michael Barron (essencialmente na acústica de salas) e ainda Allan D.Pierce, Leo Beranek e Cremer que escreveram importantes textos sobre acústica teórica.

2.2.2 A ACÚSTICA NOS TEMPOS MODERNOS

Hoje em dia a Acústica tem vindo a ser objecto de estudo em diversas áreas de interesse, relacionando-se com os mais variados sectores da nossa sociedade. Refere-se de seguida algumas das secções especializadas desta ciência, que têm vindo a ser objecto de estudo: Acústica de Edifícios; Acústica Ambiental; Acústica Fisiológica e Psicológica; Acústica Musical; Acústica Subaquática; Bioacústica; Electroacústica, entre outros.

Pelo exposto, conclui-se que esta ciência tem vindo a ser alvo de atenção das mais diversas áreas, como por exemplo a Biologia, a Medicina e a Engenharia, sendo que quanto maior for o seu desenvolvimento, melhor será certamente a nossa qualidade de vida.

2.2.2.1 Panorama Nacional

Actualmente no nosso país, várias são as universidades onde existem já núcleos e equipas de investigação, cujo seu principal objectivo é o estudo da Acústica, nas mais variadas vertentes, dos quais se destacam:

- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Laboratório de Acústica do Instituto da Construção (LAIC) e o Núcleo de Investigação do Desenvolvimento em Engenharia Acústica (NI&DEA)
- Instituto Superior Técnico (Lisboa) - Grupo de Acústica e Controlo do Ruído;
- Escola de Engenharia da Universidade do Minho - Laboratório de Física e Tecnologia das Construções;
- Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons)

Ainda em Portugal, também o Laboratório Nacional de Engenharia Civil dedica parte dos seus estudos à Acústica, tendo como principal suporte o seu Laboratório de Ensaios de Acústica.

Por último importa ainda referir a existência da Sociedade Portuguesa de Acústica (SPA), *“que se constitui como a estrutura congregadora dos acústicos portugueses no sentido de gerar movimentos internos, no País, de formação técnico-científica e de facilitar o reconhecimento interno e no estrangeiro da actividade desenvolvida pelos que se dedicam à acústica em Portugal”*

Relativamente a congressos desta área organizados no nosso país, destacam-se o congresso “Acústica 2004”, realizado em Coimbra, cidade que aliás vai acolher futuramente, em 2009, o congresso “Acústica 2009”.

2.2.2.2 Panorama Internacional

No que concerne ao panorama internacional, diversas são também as universidades de todo o mundo cujo principal objecto de estudo é a Acústica.

Dada a imensidão de centros de estudo existentes por todo o mundo, cuja listagem seria certamente incompleta, optou-se primeiramente por referir os principais congressos a nível mundial, onde a comunidade científica apresenta o ponto de situação dos seus estudos bem como as descobertas e inovações desenvolvidas:

- Noise-Con;
- International Congress on Sound and Vibration (ICSV);

- International Congress on Acoustics (ICA);
- Meeting Acoust. Soc. America;
- International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Inter-Noise);
- Euronoise.

No que diz respeito a publicações escritas neste sector de investigação, assumem particular importância as seguintes publicações:

- Applied Acoustics;
- Acta Acústica;
- The Journal of the Acoustical Society of America;
- Journal of Sound and Vibration;
- Building Acoustics.

2.3 REGULAMENTAÇÃO DO RUÍDO EM PORTUGAL

2.3.1 A NECESSIDADE DE REGULAMENTAÇÃO

Ao longo dos tempos, vários são os relatos de problemas causados na nossa sociedade devido ao ruído: emitido pelos diferentes meios de transporte; causado por vizinhos; produzidos pela indústria; no trabalho, entre outros.

Assim sendo, a necessidade de regulamentação neste campo é também incontornável, cabendo ao Estado o papel de criar legislação capaz de minimizar os efeitos negativos produzidos pelo ruído, aumentando assim a qualidade de vida das pessoas.

No Anexo A desta dissertação, encontram-se algumas notícias retiradas da comunicação social, que visam retratar alguns dos problemas atrás enunciados.

2.3.2 EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS REGULAMENTOS EM PORTUGAL

Em Portugal, desde logo na sua Constituição, de 2 de Abril de 1976, são salvaguardados ao abrigo do artigo 66º, direitos e deveres directamente relacionados com o ambiente e qualidade de vida dos cidadãos:

“1. Todos têm direito a um ambiente de vida humano, sadio e ecologicamente equilibrado e o dever de o defender.

2. Para assegurar o direito ao ambiente, no quadro de um desenvolvimento sustentável, incumbe ao Estado, por meio de organismos próprios e com o envolvimento e a participação dos cidadãos:

a) Prevenir e controlar a poluição e os seus efeitos e as formas prejudiciais de erosão;(…)”

Com base nestes princípios enunciados anteriormente, criou-se a 7 de Abril de 1987 a Lei de Bases do Ambiente, que reserva um espaço dedicado somente ao Ruído, no artigo 22º:

“1- A luta contra o ruído visa a salvaguarda da saúde e bem-estar das populações e faz-se através, designadamente:

a) Da normalização dos métodos de medida do ruído;

b) Do estabelecimento de níveis sonoros máximos, tendo em conta os avanços científicos e tecnológicos nesta matéria;

c) *Da redução do nível sonoro na origem, através da fixação de normas de emissão aplicáveis às diferentes fontes;*

d) *Dos incentivos à utilização de equipamentos cuja produção de ruídos esteja contida dentro dos níveis máximos admitidos para cada caso;*

e) *Da obrigação dos fabricantes de máquinas e electro-domésticos apresentarem informações detalhadas, homologadas, sobre o nível sonoro dos mesmos nas instruções de uso e facilitarem a execução das inspecções oficiais;*

f) *Da introdução nas autorizações de construção de edifícios, utilização de equipamento ou exercício de actividades da obrigatoriedade de adoptar medidas preventivas para eliminação da propagação do ruído exterior e interior, bem como das trepidações;*

g) *Da sensibilização da opinião pública para os problemas do ruído;*

h) *Da localização adequada no território das actividades causadoras de ruído.*

2- *Os veículos motorizados, incluindo as embarcações, as aeronaves e os transportes ferroviários, estão sujeitos a homologação e controle no que se refere às características do ruído que produzem.*

3- *Os avisadores sonoros estão sujeitos a homologação e controle no que se refere às características dos sinais acústicos que produzem.*

4- *Os equipamentos electro-mecânicos deverão ter especificadas as características do ruído que produzem.(...)” [17].*

Surge então dois meses mais tarde o DL 251/87 de 24 de Junho de 1987, que aprova o primeiro documento em Portugal que visa enquadrar e dar resposta ao problema da poluição sonora já enunciado na Lei de Bases do Ambiente, tendo como principal objectivo salvaguardar a saúde e a qualidade de vida das pessoas, estabelecendo estratégias de prevenção e de regulação sobre essa problemática. Tal documento ficou designado por “Regulamento Geral Sobre o Ruído”, que entendia o ruído como:

“(...) estímulo sonoro sem conteúdo informado para o auditor, que lhe é desagradável ou que o traumatiza constitui anualmente um dos principais factores de degradação da qualidade de vida e representa, como tal, um elemento importante a considerar no contexto da saúde ambiental e ocupacional das populações.(...)” [5].

Volvidos dois anos, urge a necessidade de revisão desde regulamento, na medida em que era *“(...)necessário introduzir pequenas alterações(...)”* e *“(...) esclarecer alguns aspectos sobre os quais foram suscitadas questões e tornar mais exequíveis algumas das suas disposições (...)” [7]*, aprovando-se para isso o DL 292/89 de 2 de Setembro.

Este ultimo decreto-lei manteve-se em vigor cerca de doze anos, sendo que apenas em 14 de Maio de 2001 entrou em vigor o DL 292/2000 de 14 de Novembro, na medida em que se constatou novamente que o seu antecessor se mostrava *“(...) claramente insuficiente para a salvaguarda da saúde e do bem-estar das pessoas (...)”* e começava a existir uma *“(...) conflitualidade social gerada por situações ligadas ao ruído (...)” [8]*. Importa ainda realçar que, relativamente à identificação do diploma, além de se manter a designação primeiramente usada em 1987 (Regulamento Geral do Ruído), preconizou-se ainda uma nova designação, *“(...)com o intuito de salientar a força jurídica do normativo (...)” [8]* : Regime Legal sobre a Poluição Sonora.

Novamente passados dois anos, e na sequencia da aprovação da Lei n.º 159/99 de 14 de Setembro, que estabelece o quadro de transferência de atribuições e competências para as autarquias locais aprova-se o DL 259/2002 de 23 de Novembro, visando conferir aos municípios *“(...) um papel mais relevante, nomeadamente em matéria de ruído de vizinhança (...)” [6]*.

Cerca de três anos mais tarde, na sequência da “(...) transposição da directiva n.º 2002/49/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Junho, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente, tornou-se premente proceder a ajustamentos ao regime legal sobre poluição sonora (...) de modo a compatibilizá-lo com as normas ora aprovadas, em especial a adopção de indicadores de ruído ambiente harmonizados. (...)”. Aprovou-se assim o DL 9/2007 de 17 de Janeiro, que está actualmente em vigor em Portugal, ao qual se conferiu novamente única e exclusivamente a primeira designação já dada em 1987: Regulamento Geral do Ruído.

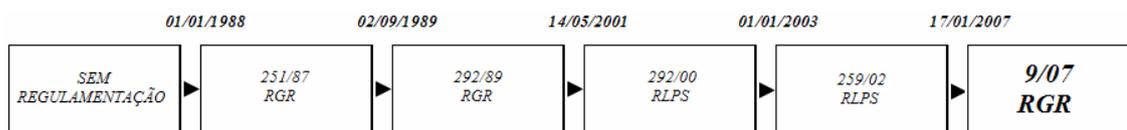


Figura 2.1 - Cronologia da regulamentação sobre o ruído, em Portugal

2.3.3 REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DOS EDÍFÍCIOS

O Regulamento Geral sobre o Ruído remete para diversos regulamentos complementares: Ruído no Trabalho, Ruído de Equipamento Exterior, Ruído nos Aeroportos, Avaliação e Gestão do Ruído Ambiente e Requisitos Acústicos de Edifícios.

No âmbito do presente trabalho, importa pois dar especial atenção ao Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE), que foi aprovado segundo o DL nº 129/2002 de 11 de Maio.

Este regulamento tem como principal objectivo “(...) melhorar as condições de qualidade acústica dos edifícios”, sendo aplicado aos seguintes edifícios, consoante os usos a que estes se destinam:

- a) Edifícios habitacionais e mistos;
- b) Edifícios comerciais, industriais ou de serviços;
- c) Edifícios escolares e de investigação;
- d) Edifícios hospitalares;
- e) Recintos desportivos;
- f) Estações de transporte de passageiros.” [22]

Para cumprir tais objectivos, o RRAE fixa os seguintes parâmetros:

- a) Isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado, $D_{2,m,n,w}$;
- b) Isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{n,w}$;
- c) Nível sonoro de percussão normalizado, $L'_{n,w}$
- d) Nível de avaliação, L_{Ar}
- e) Tempo de reverberação, T ” [22]

Além dos parâmetros atrás enunciados, também um parâmetro com especial relevância para o presente trabalho é fixado neste regulamento: “(...) Área de absorção sonora equivalente, A (...)”.

Conclui-se assim que, à luz deste regulamento, as propriedades acústicas dos materiais, nomeadamente os seus coeficientes de absorção têm um papel preponderante para o cumprimento do RRAE, no que diz respeito não só à verificação dos tempos de reverberação máximos admissíveis mas também às áreas de absorção sonora equivalentes mínimas aceitáveis.

Tempo de Reverberação (T) e Área de Absorção Sonora Equivalente (A):

O tempo de reverberação é entendido, segundo a norma Portuguesa NP-3225/1:1986, como o “intervalo de tempo durante o qual num processo de reverberação, a energia por unidade de volume do campo sonoro se reduz a um milionésimo do seu valor inicial” [20]. Outra definição, mas coincidente com a anterior, é também utilizada na EN ISO 20354 em que tempo de reverberação se define pelo “(...) intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora diminua de 60dB, após interrompida a emissão (...)”[16]. Esta definição (Figura 2.2) admite que o nível de pressão sonora é uma função linear do tempo e que o nível sonoro do ruído de fundo (ruído existente na ausência do ruído produzido pela fonte ou conjunto de fontes em causa) é suficientemente baixo, quando comparado com o da fonte geradora do campo sonoro estabelecido.

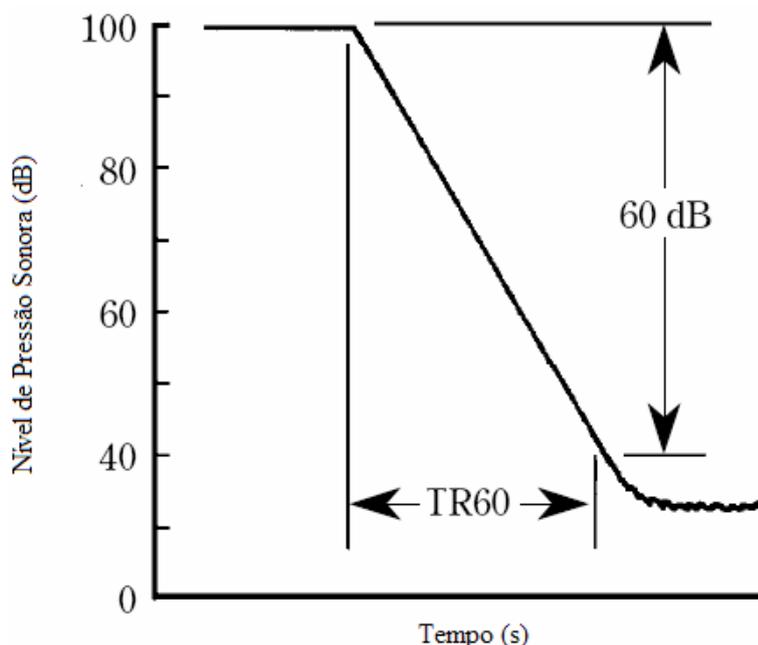


Figura 2.2 - Tempo de Reverberação [10]

Em termos práticos, devido ao nível de ruído de fundo que existe habitualmente nas salas, torna-se difícil medir um decaimento de 60dB, a não se ser que seja emitido um ruído bastante intenso. Assim, torna-se mais funcional calcular um decaimento de 30 dB ou até mesmo 20 dB e extrapolar para os 60 dB (TR30 e TR20). Tal extrapolação torna-se viável na medida em que, num meio totalmente difuso o decaimento é linear e portanto as medidas de TR60, TR30 e TR20 serão equivalentes.

No que diz respeito à fase de projecto, diversas formulações foram desenvolvidas ao longo dos anos, para a previsão do tempo de reverberação. O físico americano Wallace Clement Sabine (Figura 2.3), em 1898, após diversas experimentações na Universidade onde leccionava (Harvard, Boston), determinou a relação entre a absorção sonora, o volume e o tempo de reverberação naquela a que ficou a ser conhecida por *Fórmula de Sabine* [12]:



$$T = \frac{0.161 \times V}{A}, \quad (2.1)$$

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (2.2)$$

em que:

V - Volume do recinto;

S_i - Área do material i , em m²;

α_i - Coeficiente de absorção sonora do material i ,

Figura 2.3 - Wallace Sabine

Diversas formulações foram ao longo dos anos desenvolvidas tendo sempre como base a *Fórmula de Sabine*, tais como:

Fórmula de Eyring (1930) – utilizada quando as superfícies envolventes do local possuem coeficientes de absorção semelhantes;

Fórmula de Millington-Sette (1932) – utilizada quando as superfícies envolventes do local possuem coeficientes de absorção significativamente diferentes;

Fórmula de Kuttruff (1970) – utilizada quando se pretende ter em conta a forma geométrica do espaço.

Por fim, convém ainda referir que, nomes como os de Filtzroy (1959), Pujolle (1973) e Cremer (1978) desenvolveram também formulações matemáticas capazes de prever o tempo de reverberação.

2.4 A IMPORTÂNCIA DA ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS

Quando se aborda a temática do conforto acústico, no que diz respeito à Acústica de Edifícios, dois aspectos distintos devem ser desde logo considerados: o isolamento sonoro do espaço e as características do campo sonoro que nele se estabelecem. Importa por isso primeiramente definir o conceito de absorção sonora, para uma melhor compreensão destes dois fenómenos.

2.4.1 CONCEITO DE ABSORÇÃO SONORA

Quando uma onda sonora incide num determinado material, a energia contida nessa mesma onda é reflectida, transmitida através do material e ainda absorvida pelo mesmo (Figura 2.4). Desde que a análise envolva apenas a interacção da fronteira do material com a onda sonora, pode-se desde logo admitir que não é relevante a diferença entre absorção (em que a energia é convertida em calor) e transmissão (em que a energia passa através do material). Ambos são considerados mecanismos de absorção na medida em que a energia não é reflectida [18].

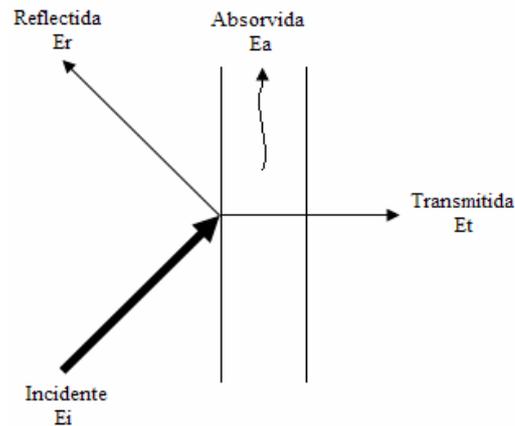


Figura 2.4 - Mecanismo de absorção sonora

Assim sendo,

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad (2.3)$$

Combinando então a energia absorvida com a energia transmitida e dividindo a equação (2.3) por E_i ,

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t + E_a}{E_i} \quad (2.4)$$

Estes rácios de energia são os chamados coeficientes de reflexão (α_r) e de absorção sonora (α_θ):

$$1 = \alpha_r + \alpha_\theta \quad (2.5)$$

Estes coeficientes variam entre um mínimo de 0 e um máximo de 1, sendo que um material com um coeficiente de absorção sonora de 0,20 absorve 20% da energia que sobre ele incide, reflectindo, obviamente, os restantes 80% [18].

2.4.2 INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS ABSORVENTES NO ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

Quando se aborda a questão do isolamento sonoro entre espaços contíguos importa diferenciar duas situações distintas: uma primeira em que nos centramos apenas no isolamento do elemento separador propriamente dito e uma segunda em que não se avalia apenas o isolamento desse mesmo elemento separador mas sim o comportamento de toda a envolvente directa isto é, contabilizando a passagem das ondas sonoras através de outros elementos que não o separador, mas ligados a este: *transmissões marginais*.

Assim sendo, no âmbito do presente trabalho, convém focar em pormenor a primeira situação atrás referida: o isolamento sonoro do elemento separador.

Para um comportamento acústico satisfatório de um determinado elemento construtivo, no que diz respeito ao isolamento sonoro a ruídos aéreos, pode-se actuar de duas formas distintas: através essencialmente da massa do elemento separador (paredes simples) ou então pela duplicação física do seu material (paredes duplas).

É através da utilização de materiais absorventes na caixa-de-ar das paredes duplas que se podem obter efeitos bastante benéficos no seu isolamento sonoro:

- A frequência de ressonância do sistema diminui, resultando no aumento do isolamento sonoro do elemento construtivo;

- O material absorvente amortece as ondas sonoras transmitidas através da parede resultando também num acréscimo do isolamento sonoro da parede;
- O material absorvente amortece ainda as ondas estacionárias que se estabelecem na caixa-de-ar conferindo à parede uma melhor performance acústica.

Em suma, os materiais absorventes desempenham um papel fundamental no preenchimento das caixas-de-ar das paredes dupla, não só pelo aumento de massa da parede, mas também pelas razões atrás mencionadas.

2.4.3 A INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS ABSORVENTES NO CAMPO SONORO DE UM ESPAÇO

Um campo sonoro de um determinado espaço, é condicionado por diversos factores: concepção arquitectónica do espaço, do mobiliário ou equipamentos nele existente, das pessoas nele inseridas e dos materiais que revestem as suas superfícies expostas.

Existem diversos indicadores que caracterizam um campo sonoro, sendo que o que mais se utiliza é o Tempo de Reverberação. Função do tipo de uso que se pretende dar a um determinado espaço, existem já estudos que prevêem tempos de reverberação ideais. Um dos exemplos é o estudo de Cavanaugh .

Na medida em que o projectista tem usualmente influência directa não só no volume e na forma mas também na escolha dos materiais de revestimento das superfícies do espaço, importa portanto conhecer os diferentes tipos de materiais absorventes existentes, isto é, aqueles que têm como função criar condições de qualidade acústica:

- Materiais Texturados;
- Membranas Ressonantes;
- Ressonadores de Cavidade;

De uma forma sucinta, as três diferentes designações dadas aos materiais absorventes estão relacionadas com as diferentes gamas de frequências que estes absorvem: os materiais texturados absorvem a energia sonora nas altas-frequências, as membranas ressonantes nas baixas frequências enquanto que os ressonadores de cavidade absorvem uma gama reduzida de frequências, nomeadamente as frequências médias.

2.4.3.1 Materiais Texturados

Estes materiais têm como particularidade possuírem poros e pequenos interstícios que comunicam entre si, assegurando a permeabilidade e a propagação das ondas sonoras de frequências altas. Quando estas incidem, o ar contido nos interstícios entra em movimento oscilatório, criando-se atrito sobre as paredes sólidas, havendo transformação da energia em calor [9].

Contudo, há que ter em conta que, embora a eficácia destes materiais dependa essencialmente da espessura e da sua densidade, valores extremos não serão aceitáveis, isto é: fibras muito soltas e afastadas levam a uma menor transformação da energia em calor e fibras muito compactas levam a que não ocorra penetração das ondas, sendo que o movimento oscilatório do ar não será suficiente para que se crie o atrito sobre as paredes sólidas [9].

Importa ainda realçar que, na medida em que a porosidade tem um papel preponderante na eficiência deste tipo de materiais, estes não devem ser pintados de uma forma em que todos os poros sejam colmatados.

Como durante este processo há uma maior absorção das ondas sonoras nas altas-frequências, com uma utilização excessiva deste tipo de materiais, pode haver uma predominância das ondas de baixas frequências, o que não será de todo desejável.

Deste tipo de materiais, fazem parte aqueles com as seguintes designações:

Alcatifas e Tecidos:

Consoante a espessura do pêlo e a sua textura, as características de absorção sonora de alcatifas podem variar substancialmente, sendo que a existência de um forro ou suporte pode melhor de sobremaneira não só as características de resiliência mas também as condições de aplicação do próprio revestimento. Nestes casos, a influência deste suporte tem que ver também com a sua espessura e massa volúmica.

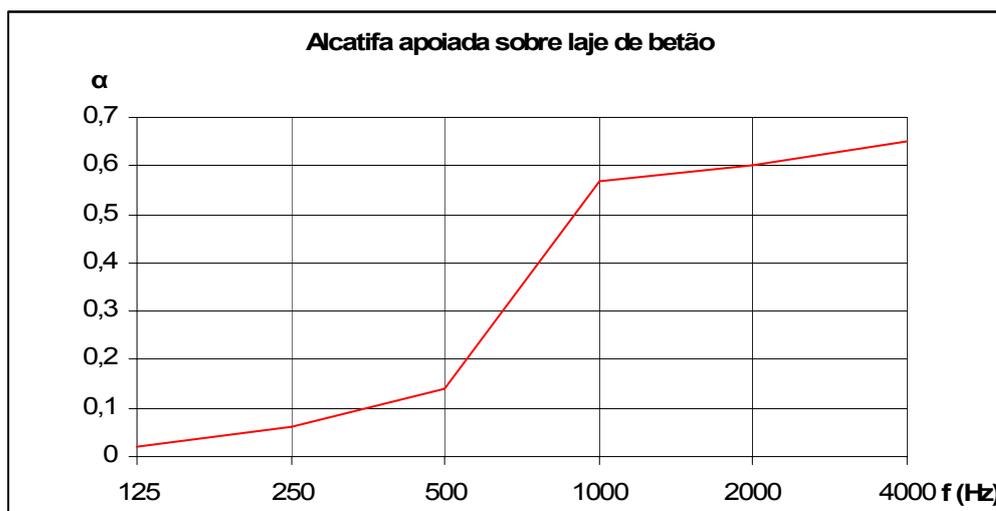


Figura 2.5 - Valores do coeficiente de absorção sonora de uma alcatifa apoiada sobre uma laje de betão armado [18]

No caso de tecidos decorativos como as cortinas ou reposteiros, não só a textura do próprio tecido tem influência na absorção sonora, mas também a percentagem de franzido (número de pregas) com que cobrem a superfície e a distância a que se encontram da parede ou janela.

Quanto maior for o número de pregas, maior será a eficácia em toda a gama de frequências, conforme se pode verificar na Figura 2.6.

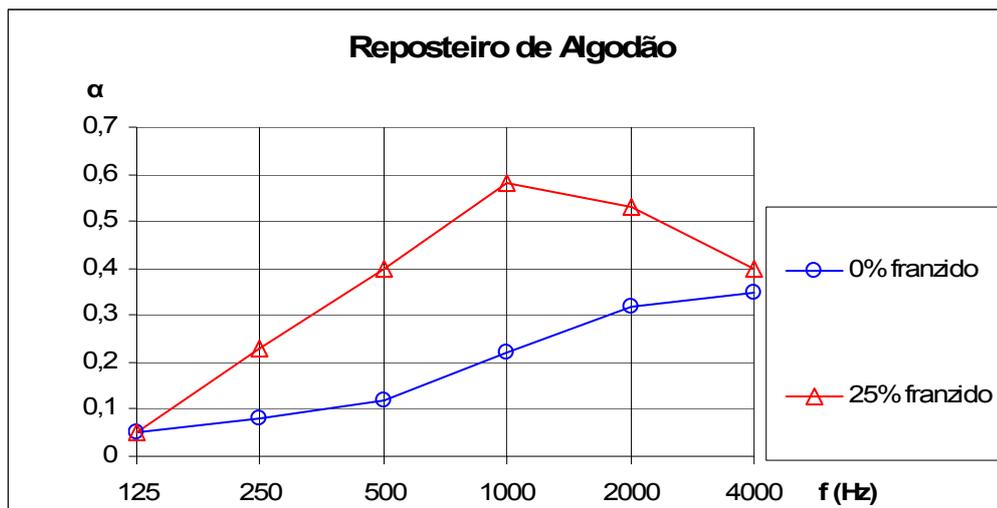


Figura 2.6 - Valores do coeficiente de absorção sonora de um reposteiro de algodão com diferentes percentagens de fransido [9]

Massas porosas:

Este tipo de materiais, normalmente com fibras ou granulados minerais e aglutinantes apropriados, aplicam-se por norma sobre os tascos das paredes e dos tectos, por projecção. A sua massa específica apresenta valores na ordem dos $150 (\pm 15) \text{ Kg/m}^3$, verificando-se através de ensaios realizados que o aumento da espessura acarreta um aumento da absorção sonora nas baixas frequências, mantendo-se a absorção das altas-frequências praticamente constante (Figura 2.7) [9].

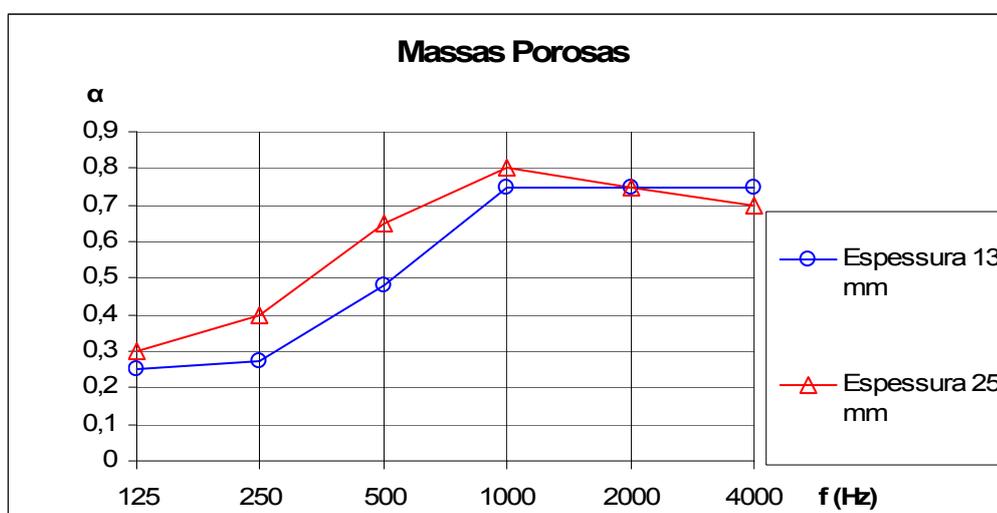


Figura 2.7 - Valores do coeficiente de absorção sonora de uma massa porosa com espessuras nominais de 13 mm e 25 mm [9]

Lãs minerais:

As lãs minerais, apresentam-se sob a forma de mantas ou placas (lã de rocha, lã de vidro, escórias de alto forno entre outros), consoante a sua flexibilidade e dimensões.

Relativamente às placas, por norma elementos rígidos ou semi-rígidos, são fornecidas em unidades pré-fabricadas, assentando a sua variabilidade essencialmente na textura e composição da sua superfície. Esta pode ter um aspecto liso, perfurado, fissurado ou até mesmo estriado. Uma das faces

das placas pode por vezes ser protegida com um tecido fibroso de forma a melhorar a aparência da superfície exposta e ainda reduzir a desagregação das fibras. No que diz respeito à flexibilidade, que está directamente relacionada com a massa volúmica, são utilizadas as seguintes designações:

- .Flexíveis – mantas com massa volúmica inferior a 55 Kg/m^3 ;
- .Semi-rígidos – placas com massa volúmica inferior a 55 Kg/m^3 ;
- .Rígidos – placas com massa volúmica superior a 55 Kg/m^3 .

Existe ainda outra forma de apresentação das fibras minerais: sob a forma de placas flexíveis e pouco densas, protegidas com uma película de polietileno, tratando-se de grande almofadas (até 1 m^2), que são designados por “absorvedores suspensos” (ou também designados por *baffles* - Figura 2.8). Estes são suspensos no tecto, na vertical, aumentando assim a sua área disponível para absorção, sendo que cada absorvedor actua em ambas as faces. A sua utilização é comum em espaços de grande volume, quando se pretende reduzir o tempo de reverberação [9].

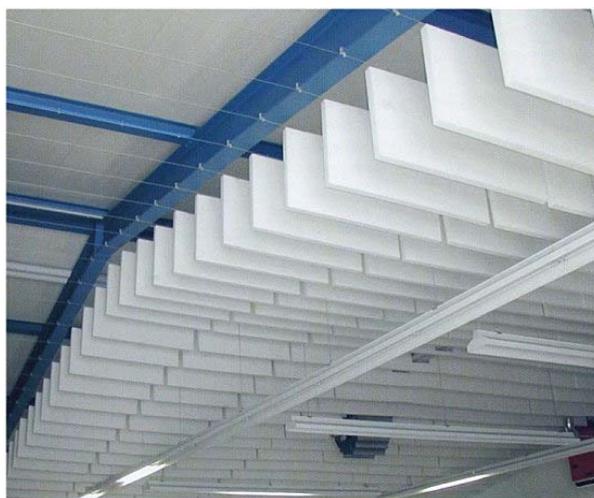


Figura 2.8 - Exemplo de aplicação de absorvedores suspensos (*baffles*)

Aglomerados de Cortiça:

Dos dois tipos de aglomerados de cortiça que existem, aglomerados negros de cortiça e aglomerados compostos de cortiça, apenas os primeiros, que também são conhecidos por aglomerados puros expandidos, são considerados bons absorvedores sonoros. Estes são comercializados com massas volúmicas variáveis, com dimensões normalizadas, pese embora ser possível apresentar outras dimensões, desde que se estabeleça um acordo entre o fabricante e o utilizador.

A diferença da absorção entre estes dois tipos de materiais (Figura 2.9), deve-se ao seu fabrico: no aglomerado negro de cortiça, os seus grânulos são expandidos em autoclave, sendo aglomerados sob pressão e temperatura, enquanto que no aglomerado complexo de cortiça, os seus grânulos são prensados e aglomerados com resina sintética [9].

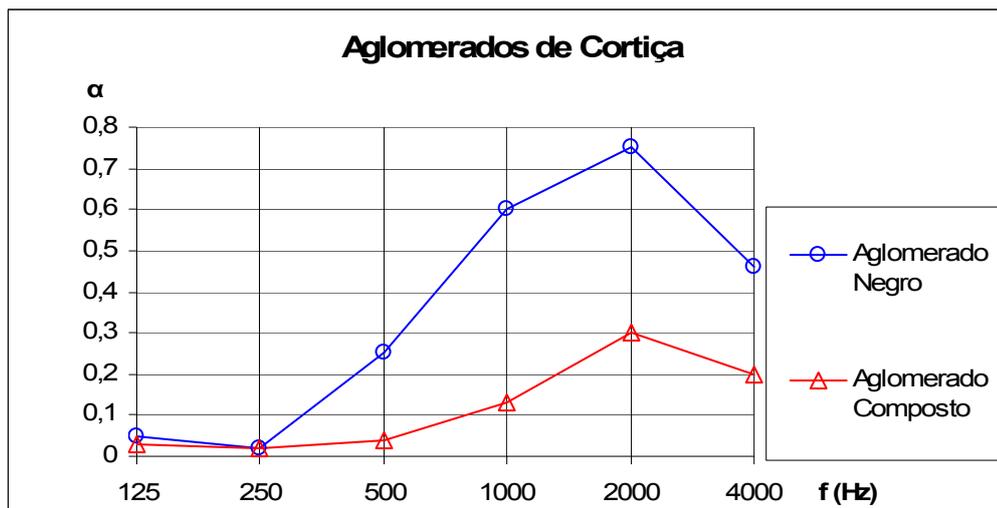


Figura 2.9 - Valores do coeficiente de absorção sonora do aglomerado negro e aglomerado composto de cortiça [9]

2.4.3.2 Membranas Ressonantes:

As membranas ressonantes são sistemas absorventes sonoros em que intervêm não só a porosidade do material mas também a ressonância do próprio sistema. Este tipo de materiais, que são também designados por painéis vibrantes, absorvem a energia das ondas sonoras através da vibração destes, sendo uma parte da energia sonora transformada em energia mecânica, transformando-se a outra parte em energia térmica, devido ao atrito interno de deformação [18].

O sistema é geralmente constituído por uma grande área de painéis com pequena espessura, podendo ainda ser preenchido o espaço de ar entre o tecto ou parede com material absorvente sonoro, favorecendo a absorção sonora nas altas-frequências [9].

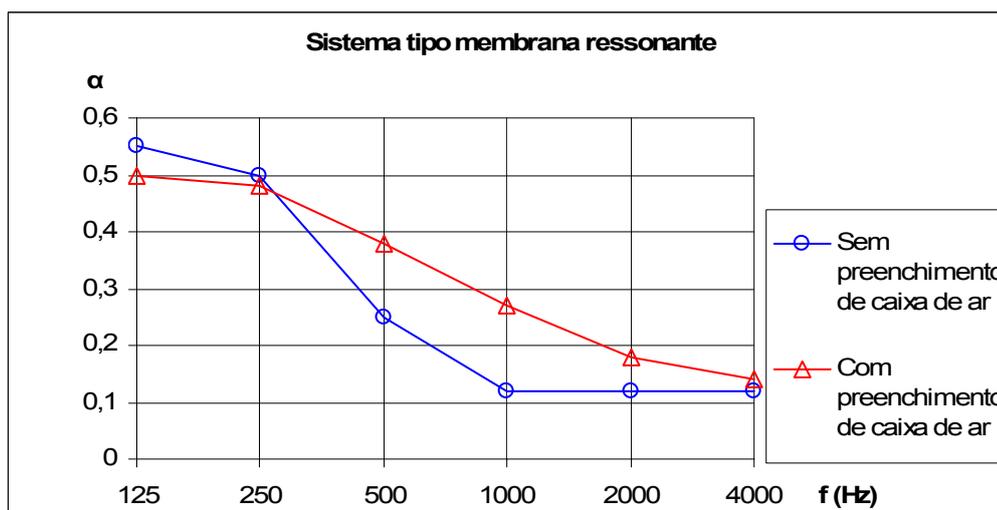


Figura 2.10 - Valores do coeficiente de absorção sonora de sistemas tipo membrana ressonante [9]

A frequência, f , para o qual o sistema tem um coeficiente máximo de absorção sonora pode ser calculado através da seguinte expressão [9]:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{md}} \quad (2.6)$$

em que:

c – velocidade de propagação do som no ar, em m/s;

ρ – massa volúmica do ar, em Kg/m³;

m – massa superficial do painel, em Kg/m²;

d – espessura da caixa de ar, em m.

2.4.3.3 Ressonadores de Cavidade:

Os ressoadores de cavidade funcionam, à semelhança das membranas ressonantes, como sistemas de absorção sonora concebidos para que a sua absorção sonora seja máxima numa determinada frequência.

Estes são constituídos por um conjunto de cavidades (o caso mais usado deste sistema são os ressoadores agrupados, por exemplo, painéis perfurados), de paredes rígidas com uma abertura estreita. A absorção da energia contida nas ondas sonoras concretiza-se de duas formas distintas, similares também às membranas ressonantes: por um lado, parte da energia sonora transforma-se em energia mecânica, devido à vibração das ondas, que se perde sob a forma de energia térmica devido ao atrito do ar sob as paredes das cavidades (pode por isso haver um alargamento da zona de eficácia do sistema, em frequência, pela introdução de material absorvente sonoro no interior das cavidades [18]); por outro lado, a energia sonora é também transformada directamente em energia calorífica.

Na Figura 2.11, representa-se um tipo de ressoador de cavidade, em que a frequência para que este apresenta um valor máximo do coeficiente de absorção sonora pode ser calculada da seguinte forma [9]:

$$f = \frac{c}{2\pi} \frac{S}{(vV)^{1/2}} \quad (2.7)$$

em que,

c – velocidade de propagação do som no ar (m/s);

V – volume da cavidade (m³);

v – volume da abertura de passagem (m³);

S – secção da abertura de passagem (m²).

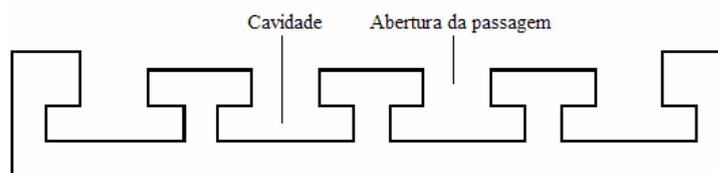


Figura 2.11 - Ressonadores de cavidade [9]

2.5 PRODUTOS UTILIZADOS PARA TECTOS

2.5.1 AMOSTRA EM ESTUDO

Relativamente à tecnologia construtiva do material em estudo, aplica-se sobre uma base limpa e desempenada, por colagem ou por fixação mecânica, lã mineral de alta densidade (90kg/m^3). Consegue-se deste modo que as justas fiquem justapostas e o mais obliteradas possíveis, sendo ainda revestidas com massa de agarre (ligação de gesso), procedendo-se de seguida ao seu lixamento, utilizando uma lixa rotativa. É aplicado posteriormente, por projecção uma camada de inerte à base de gesso em solução aquosa, mantendo em suspensão fibras de comprimento médio de celulose. Após secagem, lixa-se novamente a superfície projectando-se uma última camada de inerte semelhante à anterior, sendo que as fibras contidas nesta têm um comprimento mais curto, conferindo um aspecto mais fino.

Convém referir que, a diferença das duas amostras em estudo nesta dissertação consiste na forma de aplicação das duas camadas de inerte à base de gesso em solução aquosa na qual se encontram suspensas fibras de papel: no material Projectado, estas são aplicadas recorrendo única e exclusivamente à máquina de projectar; no material Talochado, estas além de serem aplicadas com a máquina de projectar, são passadas posteriormente com uma talocha, conferindo-lhe um acabamento menos rugoso.

Em suma, este material de revestimento decorativo aplicado usualmente para tectos (pode também ser utilizado em paredes) tem como principal objectivo reduzir a potencia sonora, impedindo que o som gerado se transforme em ruído.

Em termos de manutenção é anti-estático, não atraindo magneticamente partículas do ar, sendo os cuidados a ter neste aspecto muito diminutos.

2.5.2 OUTROS PRODUTOS UTILIZADOS PARA TECTOS

Existem actualmente algumas soluções disponíveis no mercado, para tectos contínuos, das quais se destacam as seguintes:

- BASWaphon (Figura 2.12) – é um sistema que consiste em painéis de lã mineral de peso reduzido, colocados sobre uma base, sendo posteriormente barrados com uma massa mineral para que se obtenha uma superfície continua. Este sistema é utilizado fundamentalmente para tectos, podendo também ser utilizado para paredes;



Figura 2.12 - Material BASWaphon de 4,0 cm

- STO- Silent A-Tec (Figura 2.13)– é outro sistema utilizado actualmente para tectos, contínuos, sendo constituído por um conjunto de painéis monolíticos leves, sendo necessárias juntas no caso se ser aplicado em áreas superiores a 200 m^2 ;

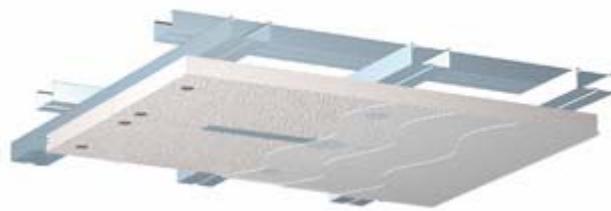


Figura 2.13 - Sistema StoSilent A-Tec

- Akustaplan (Figura 2.14) – é um material com compostos de ligação não orgânicos, sendo constituído à base de granulado expandido de vidro, sendo necessário recorrer à utilização de juntas também no caso de as áreas serem superiores a 200m².

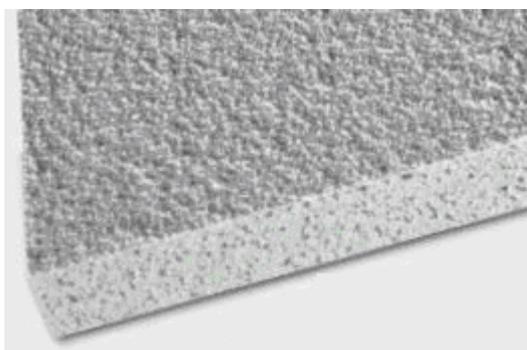


Figura 2.14 - Material Akustaplan Fwa Glass

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Na sequência do que foi exposto neste capítulo, facilmente se conclui que houve uma grande evolução na Acústica, sendo esta já reconhecida como uma nova ciência nos dias de hoje.

Apesar de nos tempos remotos se tomarem determinadas medidas, por exemplo, na construção dos grandes teatros, tendo em vista uma obtenção de uma acústica satisfatória, a Acústica nunca havia sido analisada como uma ciência, cuja aplicação prática estaria directamente ligada com fenómenos teóricos possíveis de ser explicados. As soluções então adoptadas eram meramente empíricas.

Contudo, só nos últimos 200 anos se começou a estudar verdadeiramente a Acústica, como uma ciência: primeiramente de uma forma mais teórica, chamada de “teorização do som”; seguiu-se depois uma fase onde se realizaram diversas experiências de cariz prático, de forma a confirmar ou não a validade das teorias até então desenvolvidas; posteriormente e mais recentemente, assistiu-se a um grande desenvolvimento de tecnologias e instrumentação, dando origem ao aparecimento de equipamentos digitais.

A troca de informação, facilitada com as novas tecnologias é também hoje em dia uma realidade na Acústica. À semelhança das academias científicas que se criaram no século XVII, vários congressos e palestras são levadas a cabo pelas diferentes instituições mundiais e também nacionais, onde todas as inovações e descobertas são apresentadas, discutidas e explicadas.

Assiste-se hoje em dias a um crescimento de diferentes áreas de interesse dentro da Acústica: Acústica de Edifícios, Acústica Ambiental, Electroacústica, entre outras, são alguns dos exemplos que têm vindo a merecer especial atenção por parte dos investigadores.

A existência de regulamentação é um factor determinante e indispensável para o bem-estar das sociedades. Problemas ligados ao ruído são relatados com frequência nos diversos meios de comunicação social, podendo actualmente constatar-se que tem vindo a ser feito um esforço pelas entidades competentes em desenvolver novas leis para minimizar os efeitos causados por este potenciador de stress.

No sentido não só de se cumprirem os regulamentos em vigor, mas também de se obter uma qualidade acústica aceitável dos espaços utilizados no nosso quotidiano, sejam eles um shopping, uma habitação ou ate mesmo o nosso local de trabalho, torna-se essencial e preponderante o conhecimento das propriedades acústicas dos materiais utilizados na construção.

A qualidade acústica de um material não pode ser avaliada unicamente pelo próprio material em si (pelas suas características), mas sim em função das necessidades do espaço onde se pretende a sua implementação: as necessidades de reverberação de um estúdio de gravação não são necessariamente as mesmas de uma sala de ópera, onde se exige um tempo de reverberação maior, logo com necessidades de absorção menores. Consoante a gama de frequências que se pretende “absorver”, existem três grandes grupos de materiais passíveis de serem utilizados:

- Materiais texturados – utilizados para absorverem as altas-frequências;
- Membranas Ressonantes – utilizados para absorverem as baixas-frequências;
- Ressonadores de cavidade – utilizados para absorverem as frequências médias.

Pese embora a funcionalidade, sob o ponto de vista dos engenheiros, ser a característica preponderante em qualquer estrutura concebida para o ser Humano, sempre que possível é importante não descorar o aspecto estético. Nesse sentido, a aplicação de tectos contínuos é uma solução comumente utilizada, sendo uma opção que agrada de sobremaneira os arquitectos, conferindo aos espaços uma grande homogeneidade e harmonia.

TEORIA DA ABSORÇÃO SONORA

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata a teoria da absorção sonora, subdividindo-se em três sub capítulos:

No primeiro sub capítulo introduzem-se alguns dos modelos teóricos existentes para o cálculo da absorção sonora, aprofundando-se o modelo de Delany-Bazley, proposto pelos autores M.E. Delany e por E.N. Bazley.

No segundo sub capítulo, é apresentada a teoria sobre a primeira metodologia experimental para a determinação do coeficiente de absorção sonora de um material: o Método do Tubo de Ondas Estacionárias.

No que ao terceiro capítulo diz respeito, este aborda a teoria sobre o segundo método experimental utilizado nesta dissertação para o cálculo da propriedade acústica em estudo: o Método da Câmara Reverberante.

3.2 MODELOS TEÓRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

3.2.1 MODELO DE DELANY E BAZLEY

O modelo desenvolvido na Grã-Bretanha por M. E. Delany e por E.N. Bazley, no ano de 1969, surgiu através da análise das propriedades acústicas de uma vasta gama de materiais absorventes porosos. Medidos os valores da impedância característica (Z_0) e do coeficiente de propagação (γ) dos materiais em estudo, conseguiram-se normalizar estas propriedades através de uma função da frequência dividida pela resistência à passagem do ar (σ).

Conhecidos os valores destas duas propriedades que podem ser estimados conhecendo apenas a resistência à passagem do ar, pode-se assim estimar o valor do coeficiente de absorção sonora de um determinado material, consoante a sua espessura.

Em termos gerais, a propagação do som num material homogéneo e isotrópico é determinada por duas quantidades complexas [19]:

- a impedância característica, Z_0

$$Z_0 = R + jX \quad (3.1)$$

- o coeficiente de propagação, γ

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.2)$$

Estas designações foram as adoptadas pelos autores, embora possam ser encontradas, em diferentes fontes bibliográficas, outras simbologias que representam as mesmas propriedades.

Assim sendo, utilizando um tubo de ondas estacionárias, Delany e Bazley avaliaram diferentes tipos de materiais absorventes com uma determinada gama de valores de σ , para determinar as suas propriedades acústicas, para cada uma das frequências (na gama do audível), através da incidência de ondas planas.

Dos dados então obtidos, foi possível correlacionar o valor das partes reais (R e α) e imaginárias (X e β) da impedância característica e do coeficiente de propagação, respectivamente, com a relação entre a frequência e a resistência à passagem do ar, $(\frac{f}{\sigma})$ [19]:

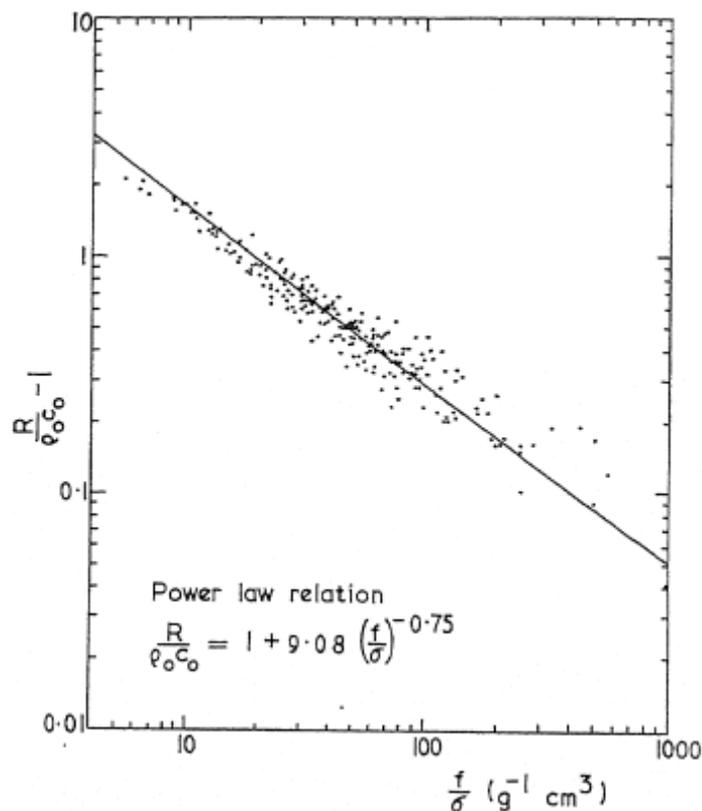


Figura 3.1 - Normalização da componente real da impedância característica como função da frequência/resistência ao fluxo do ar [19]

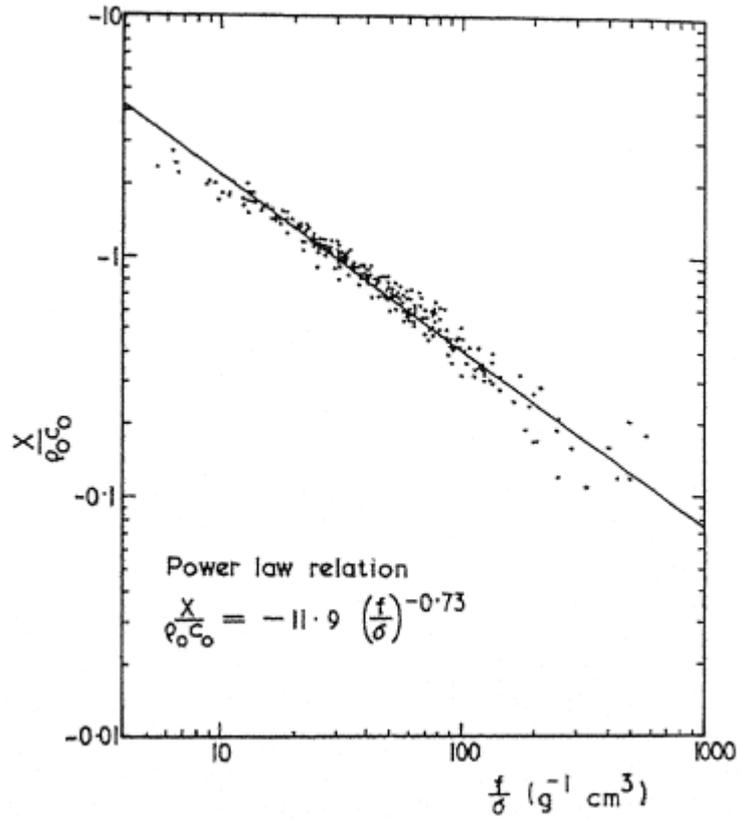


Figura 3.2 - Normalização da componente imaginária da impedância característica como função da frequência/resistência ao fluxo do ar [19]

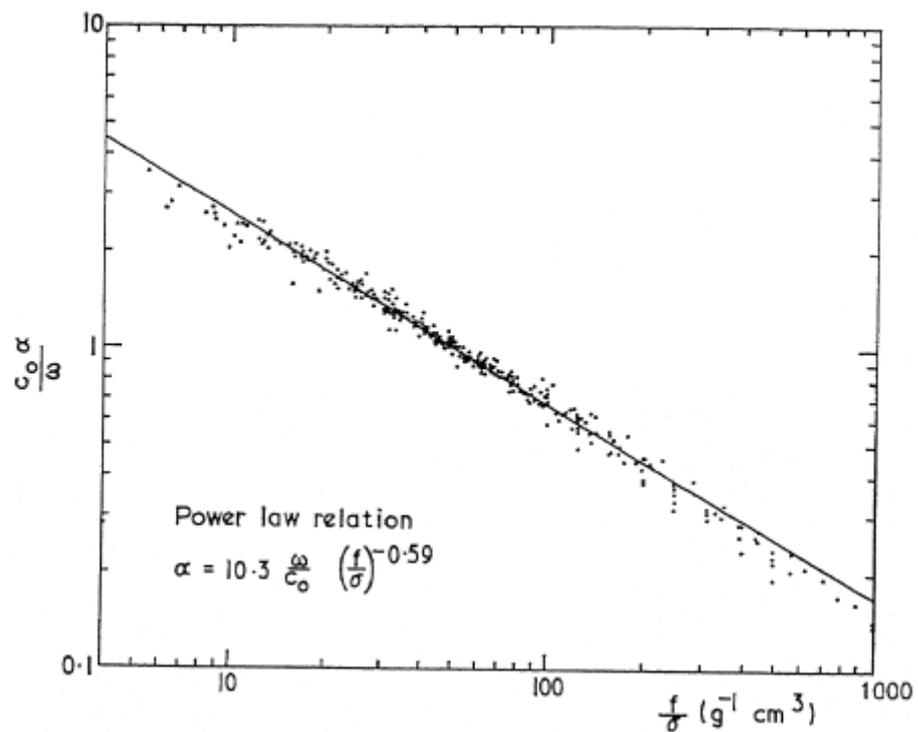


Figura 3.3 - Normalização da componente real do coeficiente de propagação como função da frequência/resistência ao fluxo do ar [19]

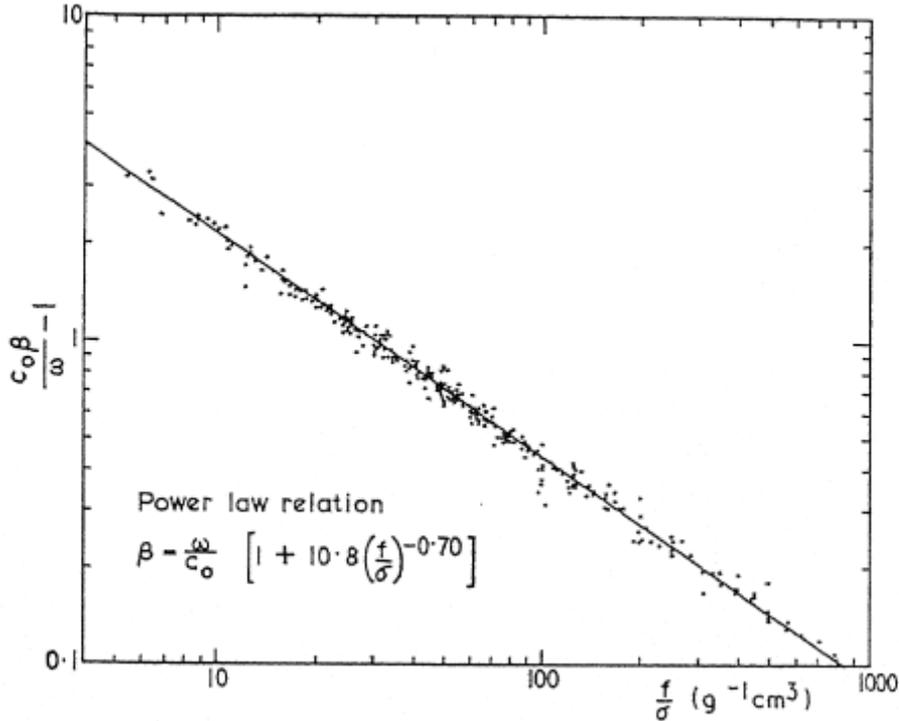


Figura 3.4 - Normalização da componente imaginária do coeficiente de propagação como função da frequência/resistência ao fluxo do ar [19]

Pese embora as curvas empíricas possam ser interpoladas no intervalo $10 \leq f/\sigma \leq 1000$, intervalo esse que abrange a maioria dos materiais e das frequências em estudo, a extrapolação fora deste intervalo não é recomendada [19].

Importa ainda referir que as unidades de medida consideradas neste modelo pertencem ao sistema CGS e que os materiais considerados nestas medições têm uma porosidade perto da unidade.

Em suma, pode-se concluir que:

$$Z_0 = \rho_0 c_0 \left[1 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.75} - j \left(11.9 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.73} \right) \right] \text{ (unidades CGS)} \quad (3.3)$$

$$\gamma = \frac{\omega}{c_0} \left[10.3 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.59} + j \left(1 + 10.8 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.70} \right) \right] \text{ (unidades CGS)} \quad (3.4)$$

Conhecidas estas duas propriedades, pode ser calculada a impedância, Z , de um determinado material poroso com espessura l , através da seguinte formulação [19]:

$$Z = Z_0 \coth(\gamma l) \text{ (unidades CGS)} \quad (3.5)$$

Finalmente, recorrendo a esta última propriedade pode-se determinar o valor do coeficiente de absorção para uma incidência normal da energia através da seguinte expressão [19]:

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (3.6)$$

3.2.2 OUTRAS MODELAÇÕES

Outra formulação desenvolvida para a determinação da absorção sonora de materiais porosos, foi elaborada por F.P. Mechel, em que desenvolveu a formulação atrás apresentada de Delaney-Bazley, propondo equações distintas consoante se trate de baixas ou médias/altas-frequências.

Este modelo utiliza assim expressões teóricas para o comportamento dos materiais nas baixas frequências, recorrendo ainda à combinação de formulação teórica com a regressão de dados experimentais para caracterizar um determinado material, no que diz respeito as frequências médias e altas.

Um novo parâmetro é necessário em relação ao modelo de Delaney-Bazley: a porosidade.

Em suma, de acordo com o modelo proposto por Mechel, cujas equações se optaram por omitir neste trabalho e que podem ser encontradas na bibliografia [11], conhecendo a porosidade e a resistência ao fluxo de ar de um material é então possível prever a sua absorção sonora, consoante a espessura desejada.

Também Attenborough desenvolveu um trabalho dirigido essencialmente para a previsão da propagação das ondas sonoras no exterior. Contudo, a sua metodologia pode ser também utilizada para a determinação do coeficiente de absorção sonora de um determinado material.

Além dos dois parâmetros que necessitam também de ser quantificados no modelo de Mechel, a porosidade e a resistência ao fluxo de ar, o autor deste modelo introduz ainda dois novos parâmetros que não podem ser medidos mas sim estimados: o primeiro tem como objectivo ter em conta a forma dos poros do material em estudo, designado por *factor de forma dos poros*, sendo que o segundo pretende ter em conta a orientação dos mesmos, denominando-se por *sinuosidade* ou mais comumente por *tortuosidade*. Optou-se também por omitir as equações do modelo de Attenborough neste trabalho, pelo que podem ser também encontradas na bibliografia [3].

Dos modelos já abordados, convém ainda mencionar o modelo de Allard-Johnson, mais complexo, sendo aquele que necessita de um maior número de variáveis para a determinação do coeficiente de absorção sonora. Assim sendo, são introduzidos dois parâmetros que visam caracterizar os poros do material: “*characteristic viscous length, A* ” e “*characteristic thermal length, A'* ”. Para materiais cujos poros se assemelham a tubos rectilíneos, os parâmetros têm a mesma magnitude enquanto que, quando os poros estão interligados por tubos filiformes, tem-se que $A \ll A'$.

Além destas novas duas variáveis já referidas, o referido modelo entra também em conta com as seguintes propriedades do material, já enumeradas anteriormente: espessura, resistividade, porosidade e tortuosidade [2].

3.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA NO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS

3.3.1 INTRODUÇÃO

A determinação do coeficiente de absorção sonora de um material, pode ser efectuada utilizando um tubo de ondas estacionárias, conforme especificado na ISO 10534-1:1996 [15].

A metodologia preconizada na norma internacional, permite determinar não só o coeficiente de absorção sonora de um material mas também outras propriedades acústicas como a impedância, a admitância e o factor de reflexão. A diferença entre este método e o Método da Câmara Reverberante (ponto 3.4), reside no facto do som apenas incidir perpendicularmente à amostra em estudo, necessitando-se apenas de uma amostra de pequena dimensão (do tamanho da secção do tubo), sendo mesmo esta a principal vantagem da utilização do tubo de ondas estacionárias. Contudo, a norma permite transformar os resultados obtidos no ensaio para uma situação mais próxima da realidade, em que o campo é difuso (ISO 10534-1:1996-Anexo D).

3.3.2 PRINCIPIO DA METODOLOGIA

A amostra em estudo deve ser montada na extremidade do tubo de impedância, onde na extremidade contrária é emitida uma onda sonora sinusoidal plana, através de um gerador de sinal ligado a um altifalante. A sobreposição da onda sonora emitida com a onda sonora reflectida na amostra em estudo, dá origem à formação de uma onda estacionária dentro do tubo.

Captando as pressões sonoras máximas ($p_{\text{máx}}$) e mínimas ($p_{\text{mín}}$) da onda estacionária, com auxílio de um sonómetro, registando ainda a distância ($x_{\text{mín},1}$) a que a primeira pressão mínima ocorre da amostra (com o auxílio de um microfone que percorre o interior do tubo), podem então ser determinadas as propriedades acústicas acima citadas (Figura 3.5) [15].

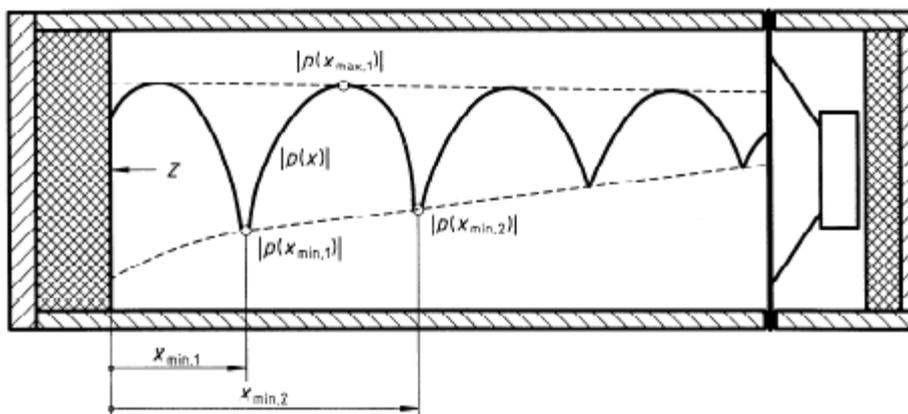


Figura 3.5 - Onda estacionária no tubo de impedância. A primeira pressão máxima a ser medida deve ser escolhida entre os dois primeiros mínimos [15]

3.3.3 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

No seguimento do âmbito deste trabalho, e visto que este tem como único objectivo determinar uma única propriedade acústica de um material, a absorção sonora, este ponto tem como principal objectivo descrever o procedimento analítico a realizar e quais os dados que devem ser registados para a sua determinação.

Intervalo de frequências de trabalho:

O intervalo de frequências no qual se pretende trabalhar num tubo de impedância, $f_l < f < f_u$, é determinado em função da sua dimensão e da sua secção transversal.

Assim, para se poderem obter duas pressões mínimas num tubo de impedância, o comprimento do tubo, l , no limite inferior de frequência, f_l , relaciona-se com o comprimento de onda (λ_0) da seguinte forma [15]:

$$l \geq 3\lambda_0 / 4 \tag{3.7}$$

Ainda em relação ao limite inferior de frequência, f_l e ao comprimento entre a face da amostra em estudo e o altifalante, l , este deve respeitar a equação (3.8):

$$l \geq 250 / f + 3d \tag{3.8}$$

em que:

d – diâmetro interior do tubo circular, em metros;

f – frequência, em Hertz.

Tal imposição visa assegurar que, o facto da possível existência de ondas com frequências superiores aquela que se pretende estudar (geradas pelo altifalante ou por objectos cujas propriedades acústicas variem lateralmente), não tenham qualquer influência nas medições [15].

No que diz respeito ao limite superior de frequência, f_u , este é imposto para garantir que não se criem ondas transversais no tubo, que possam afectar as medições. Assim, para tubos circulares com diâmetro d (metros), as condições são as seguintes [15]:

$$d \leq 0,58\lambda_0 \tag{3.9}$$

e,

$$f_u d \leq 200 \tag{3.10}$$

Determinação da atenuação do tubo:

Primeiramente, convém salientar que, para evitar erros grosseiros no cálculo da absorção sonora da amostra em estudo torna-se proeminente ter em conta a atenuação do próprio tubo. Assim sendo, a determinação da constante de atenuação, k_0 , deve ser efectuada para cada frequência, com o tubo vazio. Medem-se assim as pressões mínimas n e $n+1$, $p(x_{\min,n})$ e $p(x_{\min,n+1})$ respectivamente, bem como a pressão máxima entre estes dois mínimos $p(x_{\max,n})$, com $n=1,2,3\dots$, calculando-se então as seguintes quantidades [15]:

$$\Delta_n = \frac{|p(x_{\min,n+1})| + |p(x_{\min,n})|}{|p(x_{\max,n})|} = 2 \sinh(k_0 \lambda_0 / 4) \tag{3.11}$$

Logo,

$$k_0 = \frac{4}{\lambda_0} \operatorname{arcsinh} \frac{\Delta_n}{2} \tag{3.12}$$

No caso de medições em que não possam ser determinados dois valores de pressão mínima com precisão suficiente, a constante de atenuação do tubo pode ser determinada da seguinte forma [15]:

$$k_0 = 1,94 \times 10^{-2} (\sqrt{f} / c_0 \times d) \quad (3.13)$$

Onde,

d - é o diâmetro, em metros, para tubos circulares;

f - é a frequência, em Hertz

c_0 - é a velocidade de propagação do som, em m/s.

Cálculo do coeficiente de absorção sonora da amostra:

Colocando a amostra no tubo de impedância, registam-se para cada frequência emitida pelo gerador de sinal, os valores da pressão mínima, $p_{x_{\min,n}}$, a distância a que esta ocorre, $x_{\min,n}$ e ainda o valor da pressão máxima $p_{x_{\max,n}}$.

Se os valores da pressão sonora no tubo de impedância forem medidos numa escala logarítmica (em dB), e se a diferença entre a pressão máxima e mínima for ΔL , em dB, obtém o rácio da onda estacionária, S_n , necessário para o cálculo da magnitude do factor de reflexão, $|r|$ [15]:

$$S_n = 10^{\Delta L/20} \quad (3.14)$$

$$|r| = e^{2k_0 x_{\min,n}} \frac{S_n - e^{k_0 \lambda_0/4}}{S_n + e^{-k_0 \lambda_0/4}} \quad (3.15)$$

Finalmente, obtém-se o valor do coeficiente de absorção sonora, α_n (para uma incidência normal), da seguinte forma:

$$\alpha_n = 1 - |r|^2 \quad (3.16)$$

3.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE

A determinação do coeficiente de absorção sonora de um qualquer material, utilizando uma câmara reverberante, deve ser efectuada segundo a normalização europeia em vigor, a ISO 354:2003, que revogou a sua antecessora, a ISO 354:1985, sendo as alterações técnicas mais significativas as seguintes [16]:

- “1) Introdução do método da resposta impulsiva;
- 2) o requisito de medir no mínimo 60 decaimentos”

O método preconizado nesta norma aplica-se somente à medição dos coeficientes de absorção sonora de materiais acústicos utilizados no tratamento de paredes e de tectos ou então na área de absorção sonora equivalente não só de objectos como mobiliário, mas também de elementos absorventes como pessoas.

O seu princípio básico consiste então nas medições dos tempos de reverberação médios da câmara reverberante com e sem a amostra em estudo. Através dos resultados obtidos para os tempos de reverberação, a área de absorção equivalente pode ser calculada recorrendo à Formula de Sabine. Importa ainda salientar que as medições devem ser efectuadas em bandas de terço de oitavas (em Hertz), centradas nas seguintes frequências, de acordo com a ISO 266 [14]:

“100 125 160 200 250 315
 400 500 630 800 1 000 1 250
 1 600 2 000 2 500 3 150 4 000 5 000”

Medições fora destas bandas de frequências podem ser efectuadas, sendo que medições em frequências inferiores aos 100 Hz podem acarretar dificuldades na obtenção de resultados exactos devido à baixa densidade modal da câmara reverberante

3.4.1 PREPARAÇÃO DO ENSAIO

3.4.1.1 Condições da Câmara Reverberante

Para a realização deste ensaio, a norma recomenda que a câmara reverberante tenha um volume nunca inferior a 125 m³, sendo que para novas construções, o volume deve ser superior a 200 m³. Contudo, a norma salienta que, para câmaras reverberantes com volumes superiores a 500 m³, a precisão das medições a efectuar pode ser afectada especialmente nas altas-frequências devido à forte influência da absorção do ar.

Relativamente à forma da câmara reverberante, esta deve satisfazer a seguinte condição [16]:

$$l_{\max} < 1.9V^{1/3} \quad (3.17)$$

Onde,

l_{\max} – é o comprimento da maior linha recta contida no perímetro da câmara (por exemplo, num rectângulo, l_{\max} corresponde à maior diagonal), em metros;

V – é volume da câmara reverberante, em m³.

Segundo o Anexo A da normalização em estudo [16], o campo sonoro deve ser suficientemente difuso, podendo por vezes ser necessário a utilização de difusores, estacionários ou suspensos, ou reflectores rotativos.

No que diz respeito à área de absorção sonora equivalente da câmara sem a amostra em estudo, designada por A_l , determinada em bandas de terços de oitava, esta não deve exceder os valores apresentados no Quadro 3.1 [16]:

Quadro 3.1 - Valores máximos da área de absorção sonora equivalente para uma câmara reverberante com $V=200\text{m}^3$ [16]

Frequência, Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Área de absorção sonora equivalente, A_1 (m^2)	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5

Frequência, Hz	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
Área de absorção sonora equivalente, A_1 (m^2)	6,5	7,0	7,5	8,0	9,5	10,5	12,0	13,0	14,0

No caso do volume da câmara ser diferente de 200 m^3 , os valores apresentados no Quadro 3.1 devem ser multiplicados por $(V/200)^{2/3}$. A norma realça também o facto de não poderem existir picos no gráfico que relaciona A_1 com as diferentes frequências, não se podendo exceder em mais de 15%, a média dos valores de ambas as bandas adjacentes em terços de oitava.

3.4.1.2 Material a estudar

No que concerne ao material a ensaiar, distinguem-se elementos absorventes planos e discretos.

No primeiro caso, a amostra deve ter uma área compreendida entre 6 m^2 e 12 m^2 , devendo ser aumentado de um factor $(V/200)^{2/3}$, no caso da câmara reverberante ser maior do que 200 m^3 . Relativamente à sua posição na câmara, esta deverá ser tal que qualquer um dos seus pontos diste em relação às paredes da câmara pelo menos 1 m (a distância mínima não deve ser inferior a 0,75 m). Quanto à montagem da amostra, deve respeitar as instruções contidas no Anexo B da Norma [16], excepto situações em que o fornecedor do material exige uma montagem específica.

No segundo caso, entendem-se por objectos discretos elementos como cadeiras, pessoas entre outros, que devem ser colocados como se fossem aplicados na realidade. Devem ser colocados um número suficiente de objectos do mesmo tipo que se pretende estudar (no mínimo 3) para provocar uma variação significativa da absorção sonora equivalente, que deve ser no mínimo 1 m^2 e no máximo 12 m^2 . Novamente, no caso de a câmara ter mais de 200 m^3 os valores devem ser aumentados de $(V/200)^{2/3}$ [16].

3.4.1.3 Condições ambientais na Câmara Reverberante

Na realização de um qualquer ensaio na câmara reverberante, as condições de temperatura e de humidade relativa têm uma importância bastante significativa na medição dos tempos de reverberação, especialmente nas altas-frequências. Em caso algum os ensaios se podem realizar em ambientes cuja humidade relativa seja inferior a 40%, devendo a temperatura ser sempre igual ou superior a 10°C . No

caso de as variações de temperatura e humidade relativa, durante os ensaios, excederem os valores que constam na Quadro 3.2, devem ser efectuadas correcções que tenham em conta a absorção sonora do ar, conforme se verá adiante. Caso contrário, poderão omitir-se tais correcções [16].

Quadro 3.2 - Requisitos para os valores da Temperatura e da Humidade Relativa durante a medição do Tempo de Reverberação[16].

Humidade Relativa durante as medições	Varição permitida da Humidade Relativa	Varição permitida da Temperatura	Temperatura mínima permitida
Inferior a 60%	3 %	3 °C	10 °C
Superior a 60%	5 %	5 °C	10 °C

De salientar que as variações permitidas na primeira e segundas colunas do Quadro 3.2, correspondem à diferença entre os valores máximos e mínimos medidos durante todo o ensaio, da Humidade Relativa e Temperatura, respectivamente.

3.4.2 MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A Norma Internacional em vigor, preconiza dois métodos para a medição de curvas de decaimento: o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva integrada. No primeiro método, a curva de decaimento medida resulta de um processo estatístico, sendo necessário calcular a média de várias curvas de decaimento, ou tempos de reverberação, medidos para uma posição de fonte/microfone de forma a obter uma repetibilidade adequada. Por sua vez, a resposta impulsiva integrada de um dado compartimento, é uma função determinística sem propensão a desvios estatísticos, não sendo necessário calcular médias, necessitando por isso de equipamento mais sofisticado do que o utilizado para o método anterior [16].

No que diz respeito aos microfones a utilizar nas medições, estes devem ser omnidireccionais e de incidência aleatória devendo os registos ser feitos com diferentes posições dos microfones, afastadas entre si, no mínimo, de 1,5 metros e a 2 metros da fonte sonora e pelo menos a 1 metro de distancia das superfícies da câmara e do provete em estudo [16].

Relativamente à fonte sonora, esta deve também ser omnidireccional, devendo-se utilizar várias posições para a fonte sonora, com um espaçamento mínimo de 3 metros.

Finalmente, o número mínimo de posições do microfone é três, sendo que o número mínimo de posições da fonte sonora exigido é dois [16].

Método do ruído interrompido:

Nesta metodologia, a fonte sonora deve emitir um som que apresente um espectro contínuo de banda larga (devendo este ser tal que as diferenças nos níveis de pressão sonora resultantes na câmara sejam menores que 6 dB em bandas de um terço de oitava adjacentes) ou banda estreita (a largura da banda deve ser pelo menos um terço de oitava).

Quanto ao sinal de excitação, deve ter a duração suficiente para que se produzam níveis de pressão sonora constantes nas diferentes bandas de frequência, antes de ser interrompido (a sua duração deve ser pelo menos metade do tempo de reverberação esperado).

Para o cálculo dos valores médios, determina-se primeiramente o tempo de reverberação em cada uma das curvas de decaimento individuais e os tempos de reverberação assim obtidos utilizam-se para calcular uma média aritmética.

O sistema de aquisição deve ser um registador de nível sonoro (ou outro equipamento que determine a inclinação média da curva de decaimento do tempo de reverberação), incluindo os amplificadores e filtros necessários. O equipamento de registo (leitura e/ou avaliação) do decaimento do nível de pressão sonora pode utilizar:

- Média exponencial, representada na forma de curva contínua; ou
- Média exponencial, representada por pontos discretos; ou
- Média linear, representada por médias discretas.

O equipamento de medição deve possuir filtros de um terço de oitava, devendo as suas características respeitar a publicação IEC 61260.

3.4.3 CÁLCULO DOS RESULTADOS

O Tempo de Reverberação da câmara reverberante sem e com a amostra, T_1 e T_2 respectivamente, é resultado da média aritmética do número de medições, em cada banda de frequência.

Calculados T_1 e T_2 , procede-se ao cálculo das áreas de absorção equivalentes A_n para $n=1$ no caso da câmara vazia e $n=2$ no caso da câmara conter a amostra [16]:

$$A_n = \frac{55.3V}{cT_n} - 4Vm_n \quad (3.18)$$

Onde,

V - é o volume da câmara reverberante, em metros cúbicos;

c_n - é a velocidade de propagação do som no ar em metros por segundo e que pode ser calculada pela seguinte expressão: $c = 331 + 0.6t_n$ (m/s), em que:

t_n - é a temperatura do ar, em °C (variando entre 15°C e 30°C)

T_n - Tempo de reverberação, em segundos

m_n - coeficiente de absorção sonora do ar, em 1/m, calculada de acordo com a ISO 9613-1, usando as condições climáticas da câmara reverberante

Calculados os parâmetros A_1 e A_2 , calcula-se então a área de absorção equivalente do material, A , de acordo com a seguinte expressão [16]:

$$A = A_1 - A_2 = 55.3V \left(\frac{1}{c_2T_2} - \frac{1}{c_1T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (3.19)$$

De salientar que o termo $[-4V(m_2-m_1)]$ não deve exceder em $0.5m^2$ a área de absorção sonora equivalente e só deve ser calculado no caso de os valores da Humidade Relativa e Temperatura excederem os valores do Quadro 3.2, conforme já havia sido referido anteriormente.

Finalmente, para a determinação do coeficiente de absorção sonora, α_s , recorre-se à seguinte formula:

$$\alpha_s = \frac{A}{S} \quad (3.20)$$

em que,

A – é área de absorção sonora equivalente do material, em metros quadrados;

S – é a área da amostra, em metros quadrados.

3.4.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O relatório do ensaio, segundo a Norma Internacional em vigor, deve conter a seguinte informação:

- a) Nome da organização que efectuou o ensaio;*
- b) Data do teste;*
- c) Descrição da amostra e a sua área, o tipo de montagem e a sua posição na câmara, de preferência através de desenhos;*
- d) a forma da câmara reverberante, o seu tratamento de difusão (numero e tamanho dos difusores), o numero de microfones/fontes sonoras e as suas posições;*
- e) as dimensões da câmara reverberante, o seu volume V, e a área total das suas superfícies (paredes, laje e tecto), S_t ;*
- f) a temperatura e a humidade relativa durante as medições da câmara reverberante, vazia e com as amostras;*
- g) a média dos Tempos de reverberação T1 e T2, para cada frequência;*
- h) os resultados do teste”.*

No que diz respeito ao ponto h) atrás referido, devem ser apresentados sob a forma de tabela e gráfico os seguintes resultados:

- Para elementos absorventes planos e para um conjunto de objectos distribuídos regularmente, o coeficiente de absorção sonora, α_s (arredondado às centésimas);
- Para elementos absorventes discretos, a área de absorção sonora equivalente, A_{obj} (arredondado às décimas).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O conhecimento das propriedades acústicas de um material é de importância vital para a obtenção uma boa acústica das edificações.

Os modelos teóricos existentes para a determinação do coeficiente de absorção sonora de um material não têm vindo a ser alvo de estudo por parte das equipas de investigação, sendo que os modelos utilizados actualmente, cuja fiabilidade carece ainda de confirmação, datam de meados e finais do século passado. À semelhança dos modelos utilizados para a previsão do índice de isolamento sonoro de uma parede construída com um determinado material, que actualmente reflectem a realidade com

um grau de precisão significativo, a existência de um modelo de previsão do coeficiente de absorção sonora é de todo desejável.

No que concerne ao Método do Tubo de Ondas Estacionárias, muito utilizado em meados do século passado, apenas sofreu hoje em dia alterações ao nível da automatização do próprio equipamento e de uma sistematização no processo de cálculo. É uma metodologia prática bastante interessante, cujas principais vantagens assentam na possibilidade de caracterização de diferentes amostras de um mesmo produto, repercutindo assim nos resultados a possível variabilidade inerente aos processos de fabrico, e ainda a necessidade de amostras de pequenas dimensões. Também a curta duração necessária para a realização de um ensaio é um ponto forte desta metodologia.

Quanto ao Método da Câmara Reverberante, é a metodologia utilizada mais comumente para o cálculo do coeficiente de absorção sonora e que reproduz com maior fiabilidade a realidade. Contudo, este método além de acarretar alguns custos devido ao facto de necessitar de uma amostra com grandes dimensões e de se serem precisas instalações com uma arquitectura e propriedades muito específicas, é também bastante morosa, comparativamente com outras opções existentes actualmente, já referidas nesta dissertação.

4

APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se calcular o valor do coeficiente de absorção sonora do material em estudo, aplicando as diferentes metodologias apresentadas no capítulo anterior, subdividindo-se assim em três sub capítulos:

O primeiro onde se explicita como se aplicou o método teórico de Delany-Bazley, em que se procedeu à sistematização do mesmo num software de programação, o Matlab. Assim, introduzindo-se no programa a espessura do material e a sua resistência à passagem de ar, obtém-se uma tabela com os valores do coeficiente de absorção sonora por terços de oitava, bem como o respectivo gráfico. A escolha deste modelo prendeu-se com o facto de ser aquele que necessitava de um menor número de propriedades físicas do material em estudo, as quais poderiam ser quantificadas com os equipamentos disponíveis.

No segundo sub capítulo, que diz respeito ao Método do Tubo de Ondas Estacionárias, é explicado de forma detalhada como foi realizado o ensaio, quais os dados registados e a forma como estes foram tratados. Assim, introduzindo as expressões constantes na norma, já referidas anteriormente, numa folha Excel e recorrendo aos dados levantados, obtém-se também uma tabela dos valores do coeficiente de absorção sonora por terços de oitava, bem como o respectivo gráfico.

No último sub capítulo, explica-se também como foi realizado o ensaio na câmara reverberante, e novamente quais os dados registados assim como a forma com que estes foram tratados. Programou-se também neste caso uma folha Excel com as fórmulas também já apresentadas, de forma a obter uma tabela com valores do coeficiente de absorção sonora por terços de oitava, bem como o respectivo gráfico, indispensável para a comparação com as metodologias anteriores.

Na Figura 4.1, apresenta-se o fluxograma do procedimento experimental adoptado.

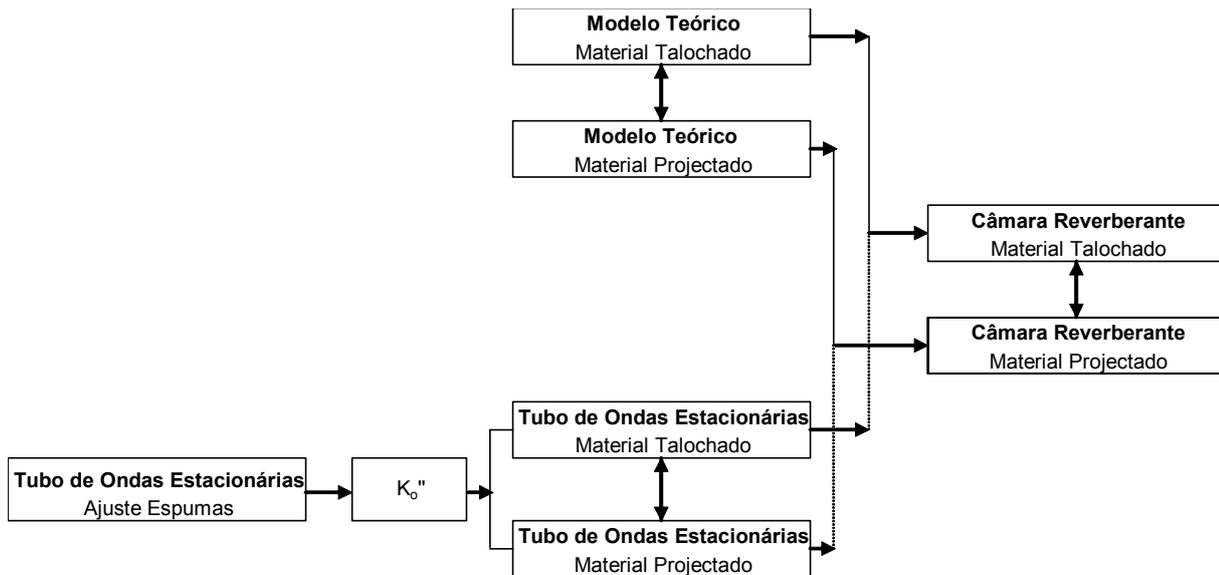


Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental.

4.2 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA PELO MÉTODO DE DELANY-BAZLEY

4.2.1 AUTOMATIZAÇÃO DO MODELO DE DELANY-BAZLEY

Na medida em que a aplicação deste modelo implica a utilização de operações matemáticas com números imaginários, procedeu-se à programação do mesmo numa ferramenta matemática com essas mesmas potencialidades: o Matlab.

Assim, introduzindo-se neste programa as equações da impedância característica, Z_0 (eq.(3.3)), do coeficiente de propagação, γ (eq. (3.4)), da impedância do material, Z (eq. (3.5) e finalmente da absorção sonora, α (eq. (3.6)), obtém-se então como output este último, sob a forma de tabela e de um gráfico, por bandas de terços de oitava.

Como input introduz-se apenas a espessura do material em estudo, bem como a sua resistência ao fluxo de ar. Convém ainda salientar que o programa permite uma fácil comparação entre várias previsões, ou seja, de materiais com propriedades diferentes, na medida em que permite sobrepor as curvas da absorção sonora de materiais com propriedades distintas. Tal aspecto é evidenciado no Anexo B, onde se demonstra também a validade do programa.

Finalmente, convém ainda realçar que, pese embora o modelo teórico em estudo não aconselhe a extrapolação dos valores fora do intervalo $10 \leq f/\sigma \leq 1000$, tal recomendação foi no domínio das hipóteses não considerada devido à necessidade de se obterem valores para todas as frequências compreendidas entre os 100 e os 5000 Hz, indispensáveis para a comparação de resultados obtidos.

4.2.2 APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO À AMOSTRA EM ESTUDO

Medidos os valores das espessuras (e) dos materiais em estudo, e recorrendo-se a um equipamento para testar a resistência à passagem do ar, o FX3360-Portair (Figura 4.2), obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 4.1:

Quadro 4.1 - Valores das propriedades dos materiais em estudo: Espessura (e) e Resistência à passagem do ar (σ)

Material	nº1-	Material	e (metros)	σ (KPa.s/m ²)
Talochado			0,035	154,87
Projectado			0,035	396,00



Figura 4.2 - Medição da resistência à passagem do ar

Introduzindo-se estes mesmos valores, no programa de cálculo automático, Figura 4.3, obtiveram-se como resultados os apresentados na Figura 4.4, para uma incidência normal das ondas sonoras.

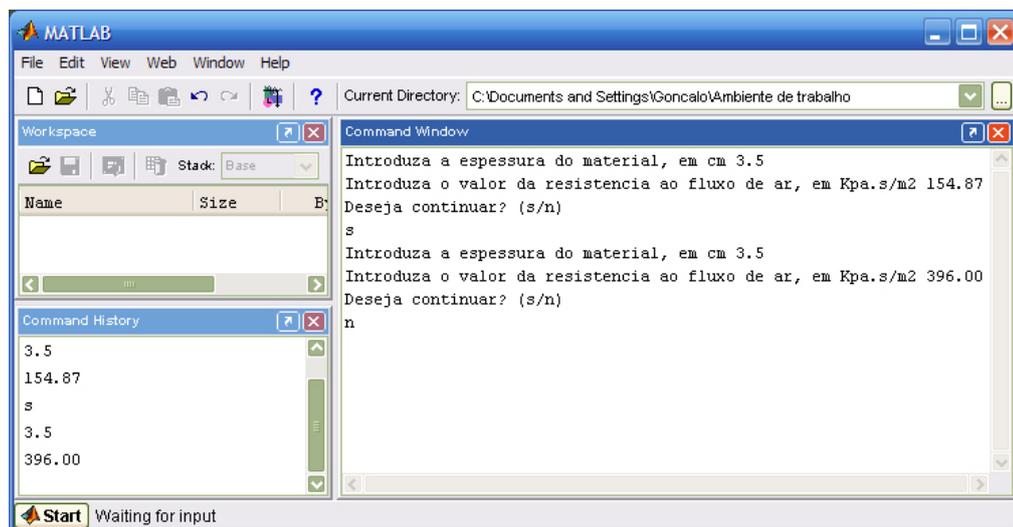


Figura 4.3 - Introdução dos valores das propriedades dos dois materiais em estudo

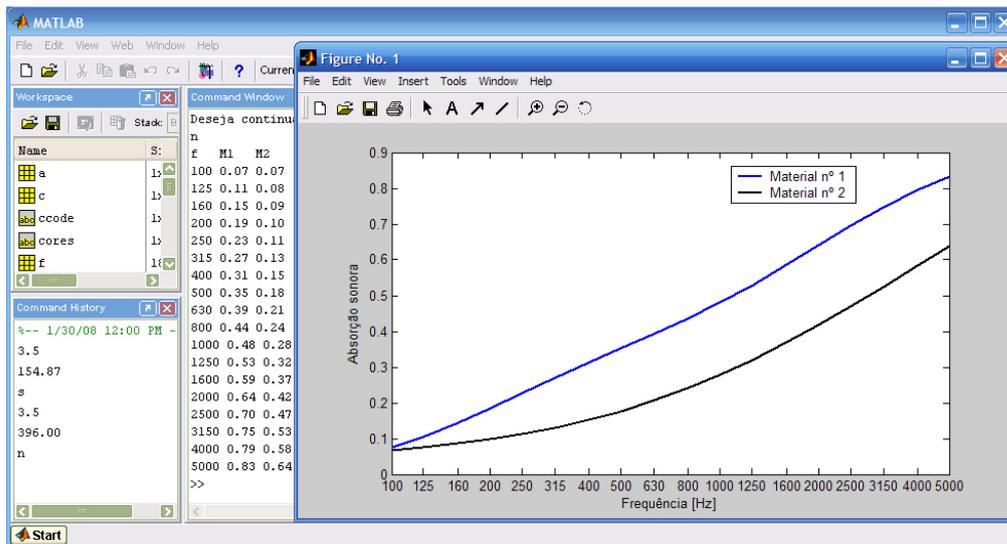


Figura 4.4 - Absorção sonora dos materiais em estudo obtidos com o Modelo Teórico: Material nº1 (M1) – Material Talochado; Material nº2 (M2) – Material Projectado

Por conseguinte, e devido à necessidade de se obterem valores do coeficiente de absorção sonora para um campo difuso, recorreu-se à expressão (4.1), que permite “transformar” um campo normal num campo difuso:

$$\alpha_{dTeórico} = 1,9277\alpha_n - 0,891\alpha_n^2 \quad (4.1)$$

Finalmente, aplicando a expressão anterior nos dados fornecidos pelo programa de cálculo automático, obtiveram-se os seguintes resultados, apresentados no Quadro 4.2 e Figura 4.5. para o material Talochado e no Quadro 4.3 e Figura 4.6 para o material Projectado:

Quadro 4.2 - Tabela dos valores do coeficiente de absorção sonora do material Talochado, calculado com base no modelo Teórico, para um campo difuso

Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{teórico}}$
100	0,13
125	0,20
160	0,27
200	0,33
250	0,40
315	0,46
400	0,51
500	0,57
630	0,62
800	0,68
1000	0,72
1250	0,77
1600	0,83
2000	0,87
2500	0,91
3150	0,94
4000	0,97
5000	0,99

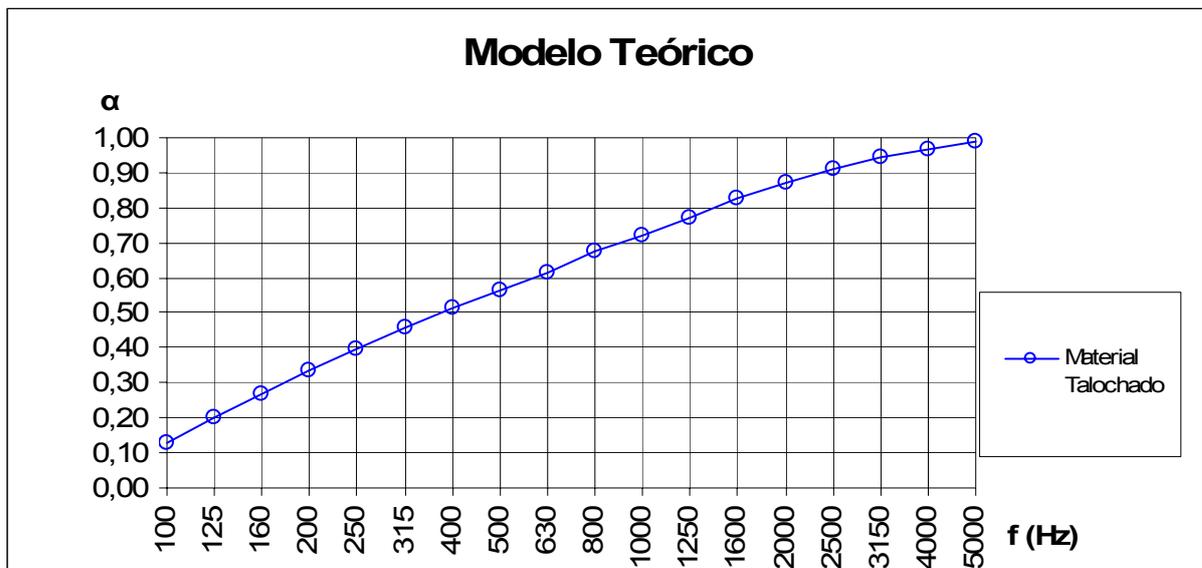


Figura 4.5 - Gráfico do coeficiente de absorção sonora do material Talochado, calculado com base no Modelo Teórico.

Quadro 4.3 - Tabela dos valores do coeficiente de absorção sonora do material Projectado, calculado com base no modelo Teórico, para um campo difuso.

Frequência (Hz)	$\alpha_{\text{teórico}}$
100	0,13
125	0,15
160	0,17
200	0,18
250	0,20
315	0,24
400	0,27
500	0,32
630	0,37
800	0,41
1000	0,47
1250	0,53
1600	0,59
2000	0,65
2500	0,71
3150	0,77
4000	0,82
5000	0,87

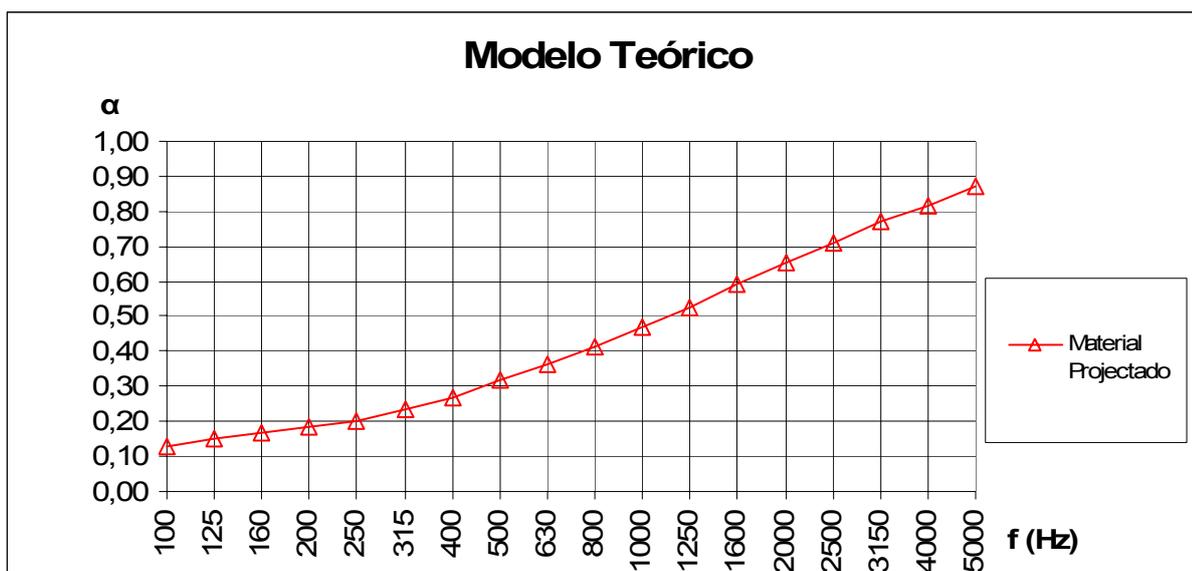


Figura 4.6 - Gráfico do coeficiente de absorção sonora do material Projectado, calculado com base no Modelo Teórico.

4.3 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PELO MÉTODO DO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS

4.3.1 PROCEDIMENTO DO ENSAIO LABORATORIAL

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora do material em estudo, foi utilizado o seguinte equipamento:

- Sonómetro (*BRÜEL & KJÆR, type 2231*);

- Tubo de Ondas estacionarias (BRÜEL & KJÆR, type 4002);
- Gerador de Sinal (BRÜEL & KJÆR type 1024).

Na Figura 4.7, pode verificar-se a ligação dos equipamentos atrás identificados:



Figura 4.7 – Imagem onde se observa o esquema geral da ligação do equipamento

Colocando a amostra no tubo de impedância (tubo grande/pequeno, consoante se estiver a avaliar baixas ou altas frequências, respectivamente), definindo a frequência que se pretende estudar no gerador de sinal, a onda é transmitida pelo altifalante, criando-se um campo de ondas estacionárias (sobreposição da onda emitida com a onda reflectida na amostra).

Posteriormente, desloca-se o carrinho, que contém no seu interior um microfone que por sua vez está ligado ao sonómetro, de modo a poder encontrar-se a pressão mínima e a pressão máxima, bem como a distância a que esta mínima ocorre, que corresponde à posição do carrinho na régua.

4.3.2 ADOÇÃO DO TIPO DE TUBO A UTILIZAR CONSOANTE AS FREQUÊNCIAS DE TRABALHO A ESTUDAR

De acordo com o explicado no capítulo 3 do presente trabalho, foi necessário avaliar qual o tipo de tubo a utilizar para cada frequência. Foram utilizados dois tubos com secção transversal circular, com as seguintes dimensões:

- Tubo grande: Comprimento (l)=1,0 m ; Diâmetro (d)=0,10 m;
- Tubo pequeno: Comprimento (l)=0,30 m ; Diâmetro (d)=0,03 m;

Assim, recorrendo às equações (3.7), (3.8), (3.9) e (3.10), obtiveram-se os seguintes resultados, Quadro 4.4, para cada um dos tubos:

Quadro 4.4 - Tabela para verificação das condições de utilização de cada um dos tubos

Frequência (Hz)	c_0 (m/s)	λ_0 (m)	Tubo grande l=1 m; d=0,10				Tubo Pequeno l=0,30 m d=0,03			
			$l \geq 3\lambda_0/4$	$l \geq 250/f+3d$	$d \leq 0,58 \cdot \lambda_0$	$f \cdot d \leq 200$	$l \geq 3\lambda_0/4$	$l \geq 250/f+3d$	$d \leq 0,58 \cdot \lambda_0$	$f \cdot d \leq 200$
100	343,3	3,43	2,57	2,80	1,99	10,00	2,57	2,59	1,99	3,00
125	343,3	2,75	2,06	2,30	1,59	12,50	2,06	2,09	1,59	3,75
160	343,3	2,15	1,61	1,86	1,24	16,00	1,61	1,65	1,24	4,80
200	343,3	1,72	1,29	1,55	1,00	20,00	1,29	1,34	1,00	6,00
250	343,3	1,37	1,03	1,30	0,80	25,00	1,03	1,09	0,80	7,50
315	343,3	1,09	0,82	1,09	0,63	31,50	0,82	0,88	0,63	9,45
400	343,3	0,86	0,64	0,93	0,50	40,00	0,64	0,72	0,50	12,00
500	343,3	0,69	0,51	0,80	0,40	50,00	0,51	0,59	0,40	15,00
630	343,3	0,54	0,41	0,70	0,32	63,00	0,41	0,49	0,32	18,90
800	343,3	0,43	0,32	0,61	0,25	80,00	0,32	0,40	0,25	24,00
1000	343,3	0,34	0,26	0,55	0,20	100,00	0,26	0,34	0,20	30,00
1250	343,3	0,27	0,21	0,50	0,16	125,00	0,21	0,29	0,16	37,50
1600	343,3	0,21	0,16	0,46	0,12	160,00	0,16	0,25	0,12	48,00
2000	343,3	0,17	0,13	0,43	0,10	200,00	0,13	0,22	0,10	60,00
2500	343,3	0,14	0,10	0,40	0,08	250,00	0,10	0,19	0,08	75,00
3150	343,3	0,11	0,08	0,38	0,06	315,00	0,08	0,17	0,06	94,50
4000	343,3	0,09	0,06	0,36	0,05	400,00	0,06	0,15	0,05	120,00
5000	343,3	0,07	0,05	0,35	0,04	500,00	0,05	0,14	0,04	150,00

- Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas no Tubo grande
- Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas no Tubo pequeno
- Valores para os quais correspondem frequências que não podem ser estudados em nenhum dos tubos
- Valores para os quais correspondem frequências que podem ser estudadas em ambos os tubos

Em suma, pela análise do quadro anterior, conclui-se que cada tubo pode ser utilizado nos seguintes intervalos de frequências:

- Tubo grande: $400 \leq f \leq 1600$ (Hz);
- Tubo Pequeno: $1250 \leq f \leq 5000$ (Hz).

Assim sendo, embora o tubo grande não tenha dimensões suficientes para se poderem estudar com precisão as frequências entre os 100 e os 315Hz, optou-se por utilizá-lo neste intervalo, por necessidade de obterem valores do coeficiente de absorção sonora no mesmo e devido à inexistência de um tubo com um comprimento superior, colocando-se naturalmente reservas aos dados obtidos.

Em relação às frequências de 1250 e 1600Hz, que podem ser estudadas em ambos os tubos, segundo a normalização em vigor, optou-se por estudá-las no tubo pequeno, na medida em que na adequação do equipamento a uma amostra de teste (ponto seguinte deste trabalho), a transição de tubos se verificou ser menos acentuada.

Concluindo, utilizou-se então o tubo grandes para frequências entre os 100 e os 1000Hz, tendo-se recorrido ao tubo pequeno para estudar as frequências entre os 1250 e os 5000Hz.

4.3.3 ADEQUAÇÃO DO EQUIPAMENTO A UMA AMOSTRA DE TESTE

Com o intuito de validar o aparelho às amostras que se pretendem estudar, avaliou-se primeiramente um material poroso (constituído por aglomerados de desperdícios de espumas de poliuretano, Figura 4.8), cujos valores para o coeficiente de absorção sonora já haviam sido previamente determinados na câmara reverberante.



Figura 4.8 - Material de teste: Aglomerado de desperdícios de espumas de poliuretano recicladas

Por conseguinte, para avaliar a atenuação do tubo, procedeu-se de duas formas distintas, de forma a escolher qual das duas teria uma melhor aplicação prática: a primeira forma (Método 1) consistiu em seguir a norma para o tubo de impedância, utilizando-se a equação (3.12) para frequências superiores a 315Hz (inclusive), e a equação (3.13) para frequências inferiores a 315Hz, onde não era possível registar dois mínimos consecutivos; a segunda forma (Método 2) consistiu em extrapolar equação (3.13) para todo o intervalo de frequências a estudar.

Programando-se as respectivas equações numa folha Excel, registaram-se os valores do nível de intensidade sonora de dois mínimos consecutivos (L_{min_n} e $L_{min_{n+1}}$, respectivamente) bem como o nível de intensidade sonora máximo compreendido entre estes dois mínimos, L_{max_n} , para cada um dos tubos vazios (sem amostra). Importa referir que, para o levantamento destes valores, se efectuaram três medições (Anexo C) de modo a evitar eventuais erros de medição, apresentando-se no Quadro 4.5 os resultados obtidos:

Quadro 4.5 - Cálculo do valor da constante da atenuação do tubo, k_0''

Frequência (Hz)	k_0'' - Método 1	k_0'' - Método 2
100	5,65E-05	5,65E-05
125	6,32E-05	6,32E-05
160	7,15E-05	7,15E-05
200	7,99E-05	7,99E-05
250	8,94E-05	8,94E-05
315	7,96E-04	1,00E-04
400	9,51E-04	1,13E-04
500	-3,62E-03	1,26E-04
630	-9,07E-04	1,42E-04
800	2,94E-03	1,60E-04
1000	8,57E-03	1,79E-04
1250	3,20E-03	5,99E-05
1600	-1,20E-03	6,78E-05
2000	-8,01E-02	7,58E-05
2500	8,09E-02	8,48E-05
3150	8,31E-02	9,51E-05
4000	1,74E-01	1,07E-04
5000	1,12E-01	1,20E-04
6000	1,84E-01	1,31E-04

Posteriormente, já conhecidas as atenuações do tubo, procedeu-se ao levantamento dos valores necessários para a determinação do valor do coeficiente de absorção sonora do material de teste, para então se comparar com os valores obtidos previamente, determinados na câmara reverberante.

Assim sendo, através do procedimento já descrito anteriormente, registaram-se os valores da pressão mínima e pressão máxima (na realidade retiraram-se níveis de intensidade sonora, L_{min_n} e L_{max_n} , que foram posteriormente convertidos em valores de pressões sonoras) bem como a distância a que esta pressão mínima ocorria, X_{min_n} .

Novamente, para se prevenirem eventuais erros nas medições, optou-se por se efectuarem três medições para a amostra em causa, utilizando-se os valores médios para os cálculos posteriores.

Programaram-se uma vez mais numa folha Excel as expressões para o cálculo de S_n e r , eq. (3.14) e (3.15) respectivamente, necessárias para a determinação do valor do coeficiente de absorção sonora, para uma incidência normal, α_n : expressão (3.16). Conhecido este valor, foi necessário estimar o valor do coeficiente de absorção sonora, para um campo difuso, utilizando-se a seguinte expressão [4]:

$$\alpha_{dTubo} = 1,9277\alpha_n - 0,891\alpha_n^2 \quad (4.2)$$

Analisado o gráfico que relaciona a absorção sonora, α_{dTubo} – expressão (4.2) - por frequência, verificou-se que se obtinha uma melhor correlação com os valores obtidos na câmara reverberante ($\alpha_{dCamara}$), se estes fossem transpostos 1/3 de oitava para trás, passando estes a serem designados por α_d .

Concluindo, encontram-se no Quadro 4.6 e na Figura 4.9, os valores para os diferentes valores do coeficiente de absorção sonora calculados, contabilizando-se a atenuação do tubo pelo Método 1 (de acordo com a Norma) acima descrito, sendo que os mesmos valores são também apresentados no Quadro 4.7 e na Figura 4.10, sendo que nestes a contabilização da contribuição da atenuação do tubo é feita pelo Método 2 (as folhas de cálculo para a amostra de teste encontram-se no Anexo D).

Quadro 4.6 - Valores para os coeficientes de absorção sonora do material de teste: K_0'' determinado pelo Método 1

Frequência (Hz)	k_0'' -Método 1	α_n	α_{dTubo}	α_d	$\alpha_{dCâmara}$
100	5,65E-05	0,12	0,23	0,22	0,17
125	6,32E-05	0,12	0,22	0,24	0,23
160	7,15E-05	0,13	0,24	0,36	0,37
200	7,99E-05	0,21	0,36	0,42	0,47
250	8,94E-05	0,25	0,42	0,61	0,58
315	7,96E-04	0,38	0,61	0,68	0,74
400	9,51E-04	0,45	0,68	0,91	0,98
500	-3,62E-03	0,69	0,91	0,97	1,00
630	-9,07E-04	0,80	0,97	1,02	1,00
800	2,94E-03	0,91	1,02	1,04	1,00
1000	8,57E-03	0,99	1,04	1,03	1,00
1250	3,20E-03	0,97	1,03	0,94	0,98
1600	-1,20E-03	0,74	0,94	1,03	0,97
2000	-8,01E-02	0,97	1,03	1,02	0,93
2500	8,09E-02	0,91	1,02	1,02	0,91
3150	8,31E-02	0,94	1,02	1,01	0,89
4000	1,74E-01	0,88	1,01	1,02	0,83
5000	1,12E-01	0,91	1,02	0,99	0,85
6000	1,84E-01	0,84	0,99		

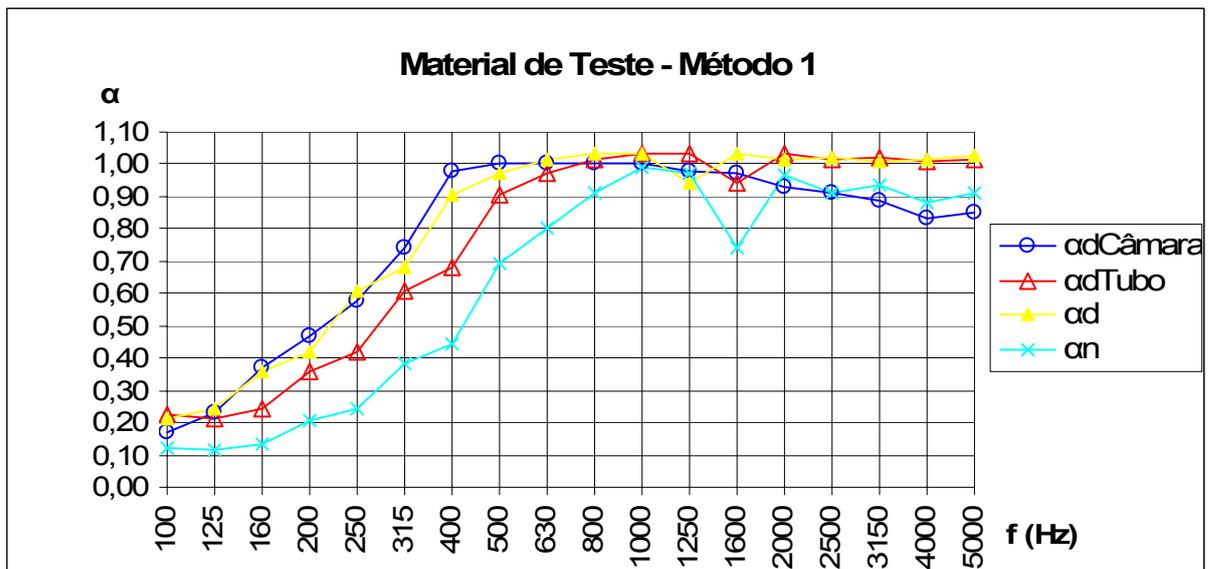


Figura 4.9- Gráfico dos Coeficientes de absorção sonora do material de teste: K_0'' determinado pelo Método 1

Quadro 4.7 - Valores para os coeficientes de absorção sonora do material de teste: K_0 determinado pelo Método 2

Frequência (Hz)	k_0 - Método 2	α_n	α_{dTubo}	α_d	$\alpha_{dCâmara}$
100	5,65E-05	0,12	0,23	0,22	0,17
125	6,32E-05	0,12	0,22	0,24	0,23
160	7,15E-05	0,13	0,24	0,36	0,37
200	7,99E-05	0,21	0,36	0,42	0,47
250	8,94E-05	0,25	0,42	0,66	0,58
315	1,00E-04	0,42	0,66	0,72	0,74
400	1,13E-04	0,48	0,72	0,86	0,98
500	1,26E-04	0,63	0,86	0,97	1,00
630	1,42E-04	0,79	0,97	1,02	1,00
800	1,60E-04	0,93	1,02	1,04	1,00
1000	1,79E-04	0,99	1,04	1,03	1,00
1250	5,99E-05	0,98	1,03	0,91	0,98
1600	6,78E-05	0,70	0,91	1,02	0,97
2000	7,58E-05	0,93	1,02	1,03	0,93
2500	8,48E-05	0,96	1,03	1,03	0,91
3150	9,51E-05	0,97	1,03	1,03	0,89
4000	1,07E-04	0,99	1,03	1,03	0,83
5000	1,20E-04	0,97	1,03	1,03	0,85
6000	1,31E-04	0,97	1,03		

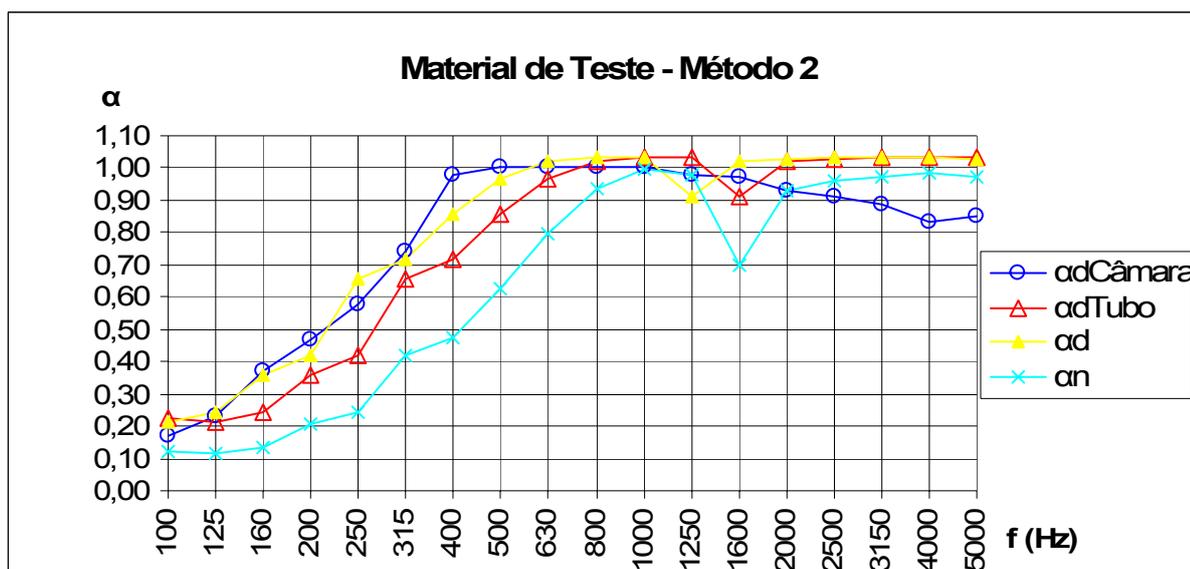


Figura 4.10 - Gráfico dos Coeficientes de absorção sonora do material de teste: K_0 determinado pelo Método 2

4.3.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DOS MATERIAIS EM ESTUDO

Adequado o tubo a uma amostra cujos valores dos coeficientes de absorção sonora já haviam sido determinados na Câmara Reverberante, procurou-se utilizar o mesmo procedimento, agora nas duas amostras em estudo: material Projectado e material Talochado (Figura 4.11).



Figura 4.11 - Amostras estudadas no tubo de ondas de estacionárias: material Projectado (à esquerda); material Talochado (à direita)

Por conseguinte, os dados a registar foram os mesmos aquando do estudo da amostra de teste: $X_{mín_n}$, $L_{mín_n}$ e $L_{máx_n}$. Tendo como objectivo caracterizar a dispersão dos resultados consoante a possível variabilidade no processo de fabrico, optou-se por estudar três amostras diferentes de cada um dos materiais em estudo, efectuando-se três medições para cada uma dessas amostras, com o intuito de prevenir erros no levantamento dos dados. Foi assim efectuado um total de dezoito medições conforme esquematizado na Figura 4.12:



Figura 4.12 - Número de medições efectuadas

Registados os dados e determinados os respectivos valores médios, estes foram colocados novamente na folha de Excel já programada aquando do estudo da amostra de teste.

Primeiramente, os valores do coeficiente de absorção sonora foram calculados utilizando os coeficientes referentes à atenuação do tubo determinados pelo método 1. Contudo, os valores obtidos não foram satisfatórios na medida em que, por este método, existiam alguns valores negativos e outros muito pouco prováveis, para os coeficientes de absorção sonora. A título exemplificativo, apresenta-se o Quadro 4.8 onde, para a Amostra 1 do Material Talochado, se podem observar os coeficientes de absorção sonora irrealis obtidos, aquando da utilização da correcção para a atenuação do tubo de acordo com a Norma em vigor:

Quadro 4.8 – Exemplo dos valores obtidos para a Amostra 1 do Material Talochado, utilizando as atenuações calculadas com base nas instruções Normativas: Método 1

Frequência (Hz)	k_0 "-Método 1	α_n	α_{dTubo}	α_d
100	5,65E-05	0,56	0,80	0,11
125	6,32E-05	0,06	0,11	0,13
160	7,15E-05	0,07	0,13	0,35
200	7,99E-05	0,20	0,35	0,34
250	8,94E-05	0,19	0,34	0,50
315	7,96E-04	0,30	0,50	0,68
400	9,51E-04	0,44	0,68	0,99
500	-3,62E-03	0,83	0,99	1,02
630	-9,07E-04	0,94	1,02	0,97
800	2,94E-03	0,79	0,97	0,96
1000	8,57E-03	0,78	0,96	1,03
1250	3,20E-03	0,94	1,03	0,97
1600	-1,20E-03	0,79	0,97	1,02
2000	-8,01E-02	0,93	1,02	-0,68
2500	8,09E-02	-0,31	-0,68	0,13
3150	8,31E-02	0,07	0,13	-4,59
4000	1,74E-01	-1,43	-4,59	0,07
5000	1,12E-01	0,04	0,07	-2,83
6000	1,84E-01	-1,00	-2,83	

Assim sendo, optou-se por calcular a absorção sonora dos materiais a estudar, recorrendo ao Método 2 para a determinação da contribuição das atenuações do tubo por frequência. Os resultados obtidos para as amostras 1, 2 e 3 do Material Talochado encontram-se nos Quadros 4.9, 4.10 e 4.11, respectivamente, podendo ser lidos os valores médios das três amostras deste material no Quadro 4.12, este último representado sob a forma de um gráfico na Figura 4.13.

Quadro 4.9 - Valores obtidos para os coeficientes de absorção sonora para a Amostra 1 do Material Talochado, utilizando as atenuações do tubo calculadas pelo Método 2.

Frequência (Hz)	k_o'' -Método 2	α_n	α_{dTubo}	α_d
100	5,65E-05	0,56	0,80	0,11
125	6,32E-05	0,06	0,11	0,13
160	7,15E-05	0,07	0,13	0,35
200	7,99E-05	0,20	0,35	0,34
250	8,94E-05	0,19	0,34	0,57
315	1,00E-04	0,35	0,57	0,71
400	1,13E-04	0,47	0,71	0,97
500	1,26E-04	0,79	0,97	1,02
630	1,42E-04	0,93	1,02	0,98
800	1,60E-04	0,82	0,98	0,99
1000	1,79E-04	0,84	0,99	1,03
1250	5,99E-05	0,95	1,03	0,96
1600	6,78E-05	0,78	0,96	0,90
2000	7,58E-05	0,68	0,90	0,88
2500	8,48E-05	0,66	0,88	0,90
3150	9,51E-05	0,69	0,90	0,83
4000	1,07E-04	0,59	0,83	0,86
5000	1,20E-04	0,62	0,86	0,75
6000	1,31E-04	0,50	0,75	

Quadro 4.10 - Valores obtidos para os coeficientes de absorção sonora para a Amostra 2 do Material Talochado, utilizando as atenuações do tubo calculadas pelo Método 2

Frequência (Hz)	k_o'' -Método 2	α_n	α_{dTubo}	α_d
100	5,65E-05	0,64	0,87	0,11
125	6,32E-05	0,06	0,11	0,12
160	7,15E-05	0,07	0,12	0,39
200	7,99E-05	0,22	0,39	0,36
250	8,94E-05	0,21	0,36	0,58
315	1,00E-04	0,36	0,58	0,90
400	1,13E-04	0,68	0,90	1,00
500	1,26E-04	0,87	1,00	0,99
630	1,42E-04	0,85	0,99	0,92
800	1,60E-04	0,72	0,92	0,99
1000	1,79E-04	0,83	0,99	1,03
1250	5,99E-05	0,94	1,03	0,98
1600	6,78E-05	0,82	0,98	0,92
2000	7,58E-05	0,71	0,92	0,91
2500	8,48E-05	0,69	0,91	0,83
3150	9,51E-05	0,59	0,83	0,81
4000	1,07E-04	0,57	0,81	0,93
5000	1,20E-04	0,73	0,93	0,75
6000	1,31E-04	0,50	0,75	

Quadro 4.11 - Valores obtidos para os coeficientes de absorção sonora para a Amostra 3 do Material Talochado, utilizando as atenuações do tubo calculadas pelo Método 2

Frequência (Hz)	k_o'' -Método 2	α_n	α_{dTubo}	α_d
100	5,65E-05	0,59	0,83	0,12
125	6,32E-05	0,07	0,12	0,13
160	7,15E-05	0,07	0,13	0,34
200	7,99E-05	0,19	0,34	0,33
250	8,94E-05	0,19	0,33	0,58
315	1,00E-04	0,36	0,58	0,74
400	1,13E-04	0,50	0,74	0,96
500	1,26E-04	0,78	0,96	1,02
630	1,42E-04	0,93	1,02	0,98
800	1,60E-04	0,82	0,98	0,99
1000	1,79E-04	0,85	0,99	1,03
1250	5,99E-05	0,94	1,03	0,96
1600	6,78E-05	0,79	0,96	0,93
2000	7,58E-05	0,73	0,93	0,91
2500	8,48E-05	0,70	0,91	0,84
3150	9,51E-05	0,60	0,84	0,82
4000	1,07E-04	0,58	0,82	0,82
5000	1,20E-04	0,59	0,82	0,74
6000	1,31E-04	0,50	0,74	

Quadro 4.12 - Valores do Coeficiente de Absorção sonora do Material Talochado, obtidos com o Tubo de Ondas Estacionárias

Frequência (Hz)	Valor médio			
	α_d -Amostra 1	α_d -Amostra 2	α_d -Amostra 3	α_d -Talochado
100	0,11	0,11	0,12	0,12
125	0,13	0,12	0,13	0,13
160	0,35	0,39	0,34	0,36
200	0,34	0,36	0,33	0,34
250	0,57	0,58	0,58	0,58
315	0,71	0,90	0,74	0,78
400	0,97	1,00	0,96	0,98
500	1,02	0,99	1,02	1,01
630	0,98	0,92	0,98	0,96
800	0,99	0,99	0,99	0,99
1000	1,03	1,03	1,03	1,03
1250	0,96	0,98	0,96	0,97
1600	0,90	0,92	0,93	0,92
2000	0,88	0,91	0,91	0,90
2500	0,90	0,83	0,84	0,86
3150	0,83	0,81	0,82	0,82
4000	0,86	0,93	0,82	0,87
5000	0,75	0,75	0,74	0,74

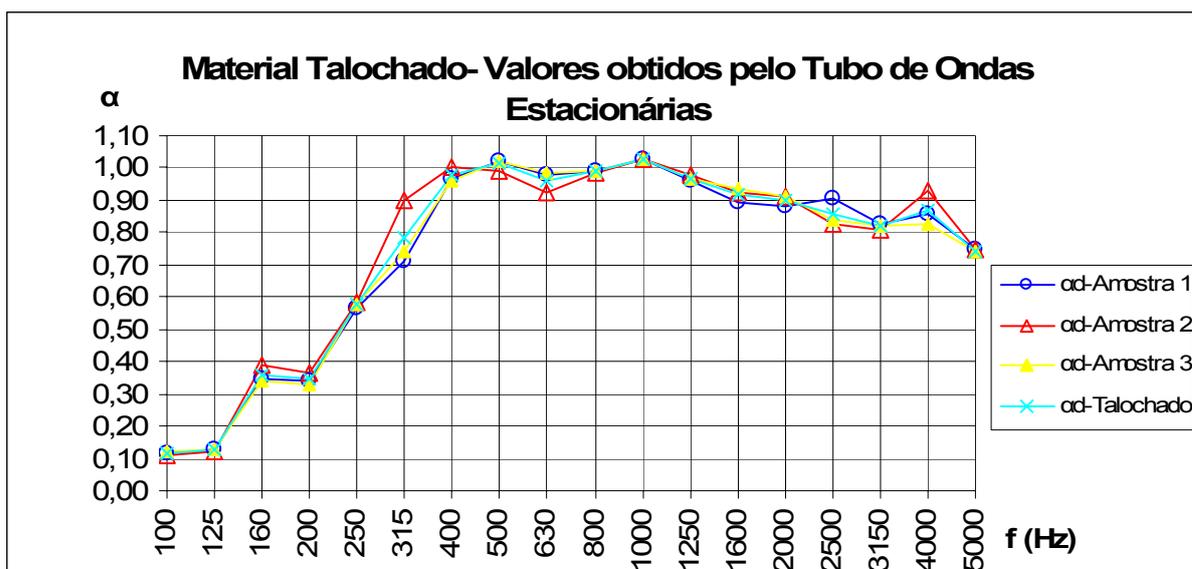


Figura 4.13 - Gráfico do valor dos coeficientes de absorção sonora para o Material Talochado, obtidos com o Tubo de Ondas Estacionárias

Recorrendo ao mesmo procedimento efectuado para o estudo do Material Talochado, estudou-se o Material Projectado, cujos resultados obtidos para as Amostras 1,2 e 3 deste material podem ser lidos no Quadro 4.13, Quadro 4.14 e Quadro 4.15, respectivamente. Do mesmo modo, constam no Quadro 4.16 os valores médios para o coeficiente de absorção sonora deste material, sendo que o gráfico respectivo é apresentado na Figura 4.14.

Quadro 4.13 - Valores obtidos para os coeficientes de absorção sonora para a Amostra 1 do Material Projectado, utilizando as atenuações do tubo calculadas pelo Método 2

Frequência (Hz)	k_o'' -Método 2	α_n	α_{dTubo}	α_d
100	5,65E-05	0,54	0,78	0,10
125	6,32E-05	0,06	0,10	0,11
160	7,15E-05	0,06	0,11	0,35
200	7,99E-05	0,20	0,35	0,28
250	8,94E-05	0,15	0,28	0,49
315	1,00E-04	0,29	0,49	0,68
400	1,13E-04	0,44	0,68	0,84
500	1,26E-04	0,60	0,84	0,95
630	1,42E-04	0,76	0,95	1,02
800	1,60E-04	0,94	1,02	1,01
1000	1,79E-04	0,89	1,01	1,03
1250	5,99E-05	0,99	1,03	1,03
1600	6,78E-05	0,96	1,03	1,01
2000	7,58E-05	0,89	1,01	1,00
2500	8,48E-05	0,85	1,00	0,96
3150	9,51E-05	0,77	0,96	0,93
4000	1,07E-04	0,73	0,93	0,94
5000	1,20E-04	0,74	0,94	0,85
6000	1,31E-04	0,62	0,85	

Quadro 4.14 - Valores obtidos para os coeficientes de absorção sonora para a Amostra 2 do Material Projectado, utilizando as atenuações do tubo calculadas pelo Método 2

Frequência (Hz)	k_o'' -Método 2	α_n	α_{dTubo}	α_d
100	5,65E-05	0,49	0,74	0,15
125	6,32E-05	0,08	0,15	0,18
160	7,15E-05	0,10	0,18	0,39
200	7,99E-05	0,23	0,39	0,32
250	8,94E-05	0,18	0,32	0,55
315	1,00E-04	0,34	0,55	0,73
400	1,13E-04	0,49	0,73	0,90
500	1,26E-04	0,68	0,90	0,92
630	1,42E-04	0,71	0,92	1,00
800	1,60E-04	0,86	1,00	1,00
1000	1,79E-04	0,86	1,00	1,04
1250	5,99E-05	0,99	1,04	1,03
1600	6,78E-05	0,95	1,03	1,00
2000	7,58E-05	0,86	1,00	0,98
2500	8,48E-05	0,82	0,98	0,93
3150	9,51E-05	0,73	0,93	0,91
4000	1,07E-04	0,69	0,91	0,91
5000	1,20E-04	0,69	0,91	0,82
6000	1,31E-04	0,59	0,82	

Quadro 4.15 – Valores obtidos para os coeficientes de absorção sonora para a Amostra 3 do Material Projectado, utilizando as atenuações do tubo calculadas pelo Método 2

Frequência (Hz)	k_o'' -Método 2	α_n	α_{dTubo}	α_d
100	5,65E-05	0,52	0,76	0,10
125	6,32E-05	0,05	0,10	0,09
160	7,15E-05	0,05	0,09	0,30
200	7,99E-05	0,17	0,30	0,31
250	8,94E-05	0,17	0,31	0,53
315	1,00E-04	0,32	0,53	0,66
400	1,13E-04	0,43	0,66	0,84
500	1,26E-04	0,60	0,84	0,99
630	1,42E-04	0,85	0,99	1,01
800	1,60E-04	0,89	1,01	0,99
1000	1,79E-04	0,85	0,99	1,03
1250	5,99E-05	0,97	1,03	1,01
1600	6,78E-05	0,90	1,01	0,97
2000	7,58E-05	0,80	0,97	0,98
2500	8,48E-05	0,81	0,98	0,92
3150	9,51E-05	0,71	0,92	0,89
4000	1,07E-04	0,66	0,89	0,89
5000	1,20E-04	0,66	0,89	0,84
6000	1,31E-04	0,60	0,84	

Quadro 4.16 - Valores do Coeficiente de Absorção sonora do Material Projectado, obtidos com o Tubo de Ondas Estacionárias

Frequência (Hz)				Valor médio
	α_d -Amostra 1	α_d -Amostra 2	α_d -Amostra 3	α_d -Projectado
100	0,10	0,15	0,10	0,12
125	0,11	0,18	0,09	0,13
160	0,35	0,39	0,30	0,35
200	0,28	0,32	0,31	0,30
250	0,49	0,55	0,53	0,52
315	0,68	0,73	0,66	0,69
400	0,84	0,90	0,84	0,86
500	0,95	0,92	0,99	0,96
630	1,02	1,00	1,01	1,01
800	1,01	1,00	0,99	1,00
1000	1,03	1,04	1,03	1,03
1250	1,03	1,03	1,01	1,02
1600	1,01	1,00	0,97	0,99
2000	1,00	0,98	0,98	0,98
2500	0,96	0,93	0,92	0,94
3150	0,93	0,91	0,89	0,91
4000	0,94	0,91	0,89	0,91
5000	0,85	0,82	0,84	0,84

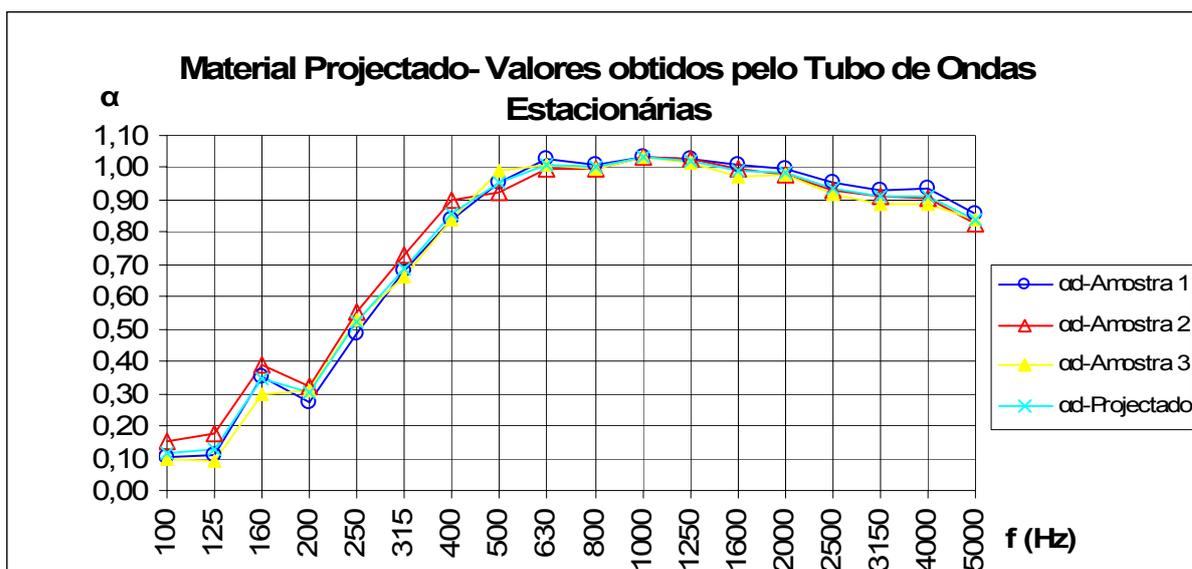


Figura 4.14 - Gráfico do valor dos coeficientes de absorção sonora para o Material Projectado, obtidos com o Tubo de Ondas Estacionárias

A totalidade dos dados registados durante este ensaio para os materiais Talochado e Projectado, bem como os cálculos intermédios necessários para o cálculo do coeficiente de absorção sonora, apresentam-se detalhadamente nos Anexos E e F, respectivamente.

4.4 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO PELO MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE

4.4.1 PREPARAÇÃO DO ENSAIO

Para determinação do coeficiente de absorção sonora, utilizaram-se câmaras reverberantes, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

São três câmaras reverberantes (R1, E1 e E2), ligadas entre si (Figura 4.15), onde é possível realizar ensaios de isolamento sonoro a sons aéreos, de percussão e de absorção sonora de diversos materiais.



Figura 4.15 - Esquema das Câmaras Reverberantes - Corte transversal

No presente caso, utilizou-se a câmara R1, com os materiais a estudar (Talochado e Projectado), aplicados sobre uma base sólida isto, simplesmente apoiados no pavimento.

Relativamente ao equipamento utilizado, recorreu-se ao seguinte equipamento:

- Sonómetro *BRÜEL & KJÆR* 2260 n°2168642 (verif. no ISQ – Cert. de Cal. n° 25310/04 de 03/09/2004);
- Calibrador *BRÜEL & KJÆR* 4231 n° 2176164 (cal. no ISQ – Cert. de Cal. n° 25310/04 de 03/09/2004);
- Microfone de 13 mm, marca *BRÜEL & KJÆR* modelo 4189;
- Fonte sonora, marca *BRÜEL & KJÆR* modelo 4224;
- Termo-Higrómetro Wm *HTA 4200*.

Para a realização do ensaio, foram utilizadas posições distintas para a fonte sonora (duas) e para os microfones (três), realizando-se então um total de seis medições. Convém ainda referir que, para cada medição, foram avaliados dois decaimentos do nível de pressão sonora, com os quais se fizeram uma média aritmética para a obtenção do valor final, para o tempo de reverberação.

Na Figura 4.16 encontram-se as posições dos elementos intervenientes nos ensaios, na Câmara Reverberante R1 (com uma altura de 4,65m e um volume aproximado de 217,7m³) bem como as medidas médias desta última:

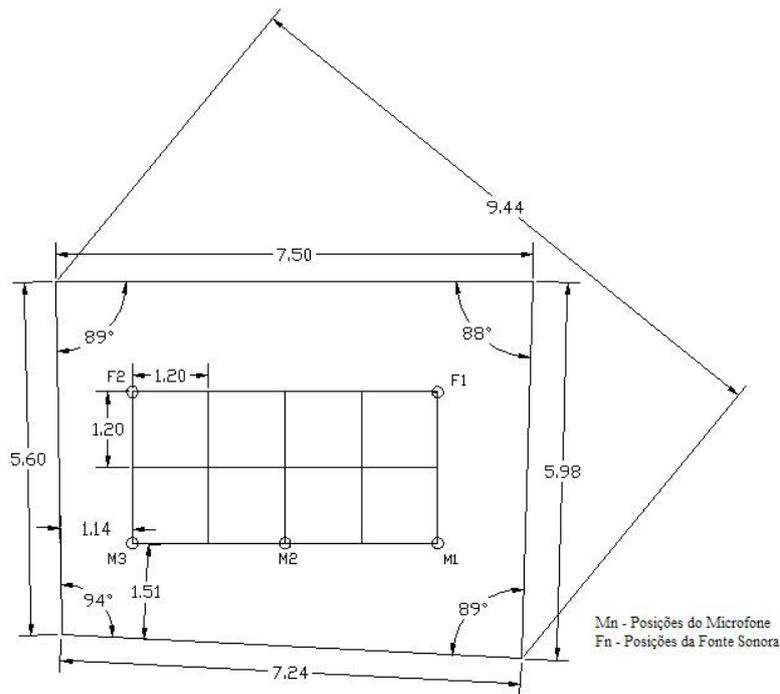


Figura 4.16 - Esquemática do ensaio

Em suma, fizeram-se assim três ensaios: o primeiro com a câmara reverberante vazia (sem amostra), o segundo e o terceiro com a câmara reverberante contendo os materiais Talochado e Projectado, respectivamente. A área das amostras em estudo foi de $11,52 \text{ m}^2$ (constituída por 8 placas de $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$, Figura 4.17).



Figura 4.17 - Foto do ensaio do Material Talochado na Câmara Reverberante

Assim sendo, programando-se a equação (3.18), para $n=1$ (câmara reverberante sem amostra), numa folha Excel, apresenta-se no Quadro 4.17 o valor médio dos dados obtidos para o primeiro ensaio.

Quadro 4.17 - Área de absorção equivalente da Câmara Reverberante, sem amostra

Frequência (Hz)	TR _{Médio} (s)	A ₁ (m ²)
100	15,68	2,25
125	13,64	2,59
160	13,88	2,55
200	11,78	3,00
250	10,55	3,35
315	10,28	3,44
400	10,02	3,53
500	9,65	3,66
630	9,28	3,81
800	9,03	3,91
1000	8,26	4,28
1250	7,48	4,72
1600	6,95	5,08
2000	6,22	5,68
2500	5,55	6,37
3150	4,67	7,56
4000	3,79	9,32
5000	3,02	11,70

4.4.2 VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO DA NORMA

Conhecidas as condições para a realização do ensaio, pretende-se avaliar o cumprimento da ISO 354:2003:

Assim, de acordo com a norma internacional em vigor:

$$V = 217,7 \geq 125m^3 \text{ OK} \quad (4.3)$$

No mesmo documento, e de acordo com a equação (3.17), que fixa um valor máximo consoante para o comprimento da maior linha recta contida no perímetro da câmara (Figura 4.16):

$$l_{máx} \leq 1,9V^{1/3} \Leftrightarrow 9,23 \leq 1,9 \times 217,7^{1/3} \Leftrightarrow 9,23 \leq 11,43 \text{ OK} \quad (4.4)$$

Quanto à verificação das áreas de absorção sonora equivalente da Câmara Reverberante vazia (Quadro 4.15), estas não devem exceder os valores que constam no Quadro 3.1, multiplicados por:

$$\left(\frac{V}{200}\right)^{2/3} = \left(\frac{217,7}{200}\right)^{2/3} = 1,06 \quad (4.5)$$

Os valores regulamentares máximos admitidos, são então apresentados no Quadro 4.18, denominados por A_{regulamentar}.

Quadro 4.18 - Verificação da área de absorção sonora equivalente máxima admitida, para a câmara reverberante vazia

Frequência (Hz)	A ₁ (m ²)	A _{regulamentar}	Verificação
100	2,25	6,89	ok
125	2,59	6,89	ok
160	2,55	6,89	ok
200	3,00	6,89	ok
250	3,35	6,89	ok
315	3,44	6,89	ok
400	3,53	6,89	ok
500	3,66	6,89	ok
630	3,81	6,89	ok
800	3,91	6,89	ok
1000	4,28	7,42	ok
1250	4,72	7,95	ok
1600	5,08	8,48	ok
2000	5,68	10,07	ok
2500	6,37	11,13	ok
3150	7,56	12,72	ok
4000	9,32	13,78	ok
5000	11,70	14,84	ok

No que concerne à área da amostra em estudo, a norma exige que esta tenha valores compreendidos entre 6 e 12 m², devendo estes valores ser novamente multiplicados pelo mesmo factor atrás calculados, na equação (4.5). Assim sendo:

$$6,36 \leq \text{Área}_{\text{amostra}} \leq 12,72 \Leftrightarrow 6,36 \leq 11,52 \leq 12,72 \text{ OK} \quad (4.6)$$

Relativamente às distâncias relativas entre os diversos elementos utilizados no ensaio, cujas posições se encontram esquematizadas na Figura 4.16, as exigências são também cumpridas (Quadro 4.19):

Quadro 4.19 - Cumprimento das disposições legais em vigor, para as distâncias relativas entre os diversos elementos utilizados no ensaio

Exigência	No ensaio	Verificação
Distância do provete à câmara recomendada é de pelo menos 1 metro, não devendo ser inferior a 0,75 metros	1,14	OK
Posições dos microfones afastadas mais de 1,5 metros entre si	2,4	OK
Microfones afastados mais de 2 metros da fonte sonora	2,4	OK
Microfones afastados mais de 1 metros das paredes da Câmara	1,14	OK
Posições da fonte sonora afastadas 3 metros entre si	4,8	OK
Numero mínimo de posições para o microfone e fonte sonora: 3 e 2, respectivamente	3 e 2	OK

Para finalizar, os valores fixados regularmente para a Temperatura e Humidade Relativa (Quadro 3.2), que foram medidos com o termohigrómetro durante os ensaios, são também cumpridos, conforme se pode concluir pelo Quadro 4.20:

Quadro 4.20 - Verificação do cumprimento dos valores para a Humidade Relativa e Temperatura, durante o ensaio.

	Humidade Relativa (%)	Temperatura (°C)
Início do ensaio	73	16,3≥10 OK
Fim do ensaio	71	16,2≥10 OK
Variação	2 ≤ 5 OK	0,1 ≤ 5 OK

4.4.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Verificado o cumprimento das disposições normalizadas, procedeu-se à medição do tempo de reverberação da câmara reverberante, com as amostras colocadas, tendo-se avaliado primeiramente o material Talochado e posteriormente o material Projectado.

Por conseguinte, programando-se novamente a equação (3.18), para $n=2$, determinou-se a área de absorção equivalente da câmara com a amostra, A_2 . Conhecidos então A_2 e A_1 , programando-se agora a equação (3.19), obtém-se o parâmetro A : área de absorção sonora equivalente da amostra. Conhecido este parâmetro, determina-se por fim o valor do coeficiente de absorção sonora da amostra, por bandas de 1/3 de oitava, de acordo com a equação (3.20). Os resultados obtidos calculados com base no tempo de reverberação médio, para os materiais Talochado e Projectado são apresentados nos Quadros Quadro 4.21 (representado graficamente na Figura 4.18) e Quadro 4.22 (representado também sob a forma de um gráfico na Figura 4.19), respectivamente.

Quadro 4.21 - Coeficiente de absorção sonora do material Talochado

Frequência (Hz)	TR _{Médio} (s)	A ₂ (m ²)	A (m ²)	α_s
100	11,21	3,15	0,90	0,08
125	8,43	4,19	1,60	0,14
160	5,15	6,86	4,32	0,37
200	3,66	9,65	6,66	0,58
250	3,04	11,62	8,27	0,72
315	3,01	11,74	8,30	0,72
400	3,15	11,22	7,69	0,67
500	2,77	12,76	9,09	0,79
630	2,77	12,76	8,95	0,78
800	2,57	13,75	9,84	0,85
1000	2,64	13,38	9,11	0,79
1250	2,61	13,54	8,81	0,77
1600	2,48	14,25	9,16	0,80
2000	2,56	13,80	8,12	0,71
2500	2,51	14,08	7,71	0,67
3150	2,31	15,30	7,73	0,67
4000	2,11	16,75	7,42	0,64
5000	1,81	19,52	7,82	0,68

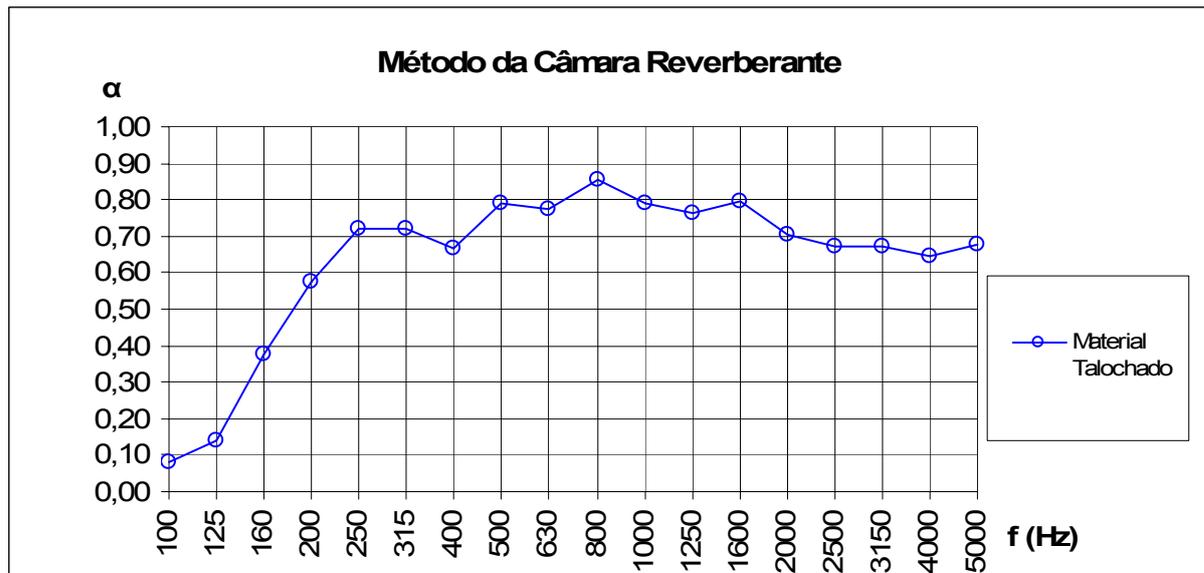


Figura 4.18 - Gráfico do coeficiente de absorção sonora do material Talochado, calculado com base no Método da Câmara Reverberante

Quadro 4.22 - Coeficiente de absorção sonora do material Projectado

Frequência (Hz)	TR _{Médio} (s)	A ₂ (m ²)	A (m ²)	α _s
100	11,27	3,14	0,88	0,08
125	8,46	4,18	1,59	0,14
160	5	7,07	4,52	0,39
200	3,64	9,71	6,71	0,58
250	3,22	10,97	7,62	0,66
315	3	11,78	8,34	0,72
400	3,05	11,58	8,06	0,70
500	2,94	12,02	8,36	0,73
630	2,8	12,62	8,81	0,76
800	2,56	13,80	9,89	0,86
1000	2,77	12,76	8,48	0,74
1250	2,68	13,18	8,46	0,73
1600	2,56	13,80	8,72	0,76
2000	2,61	13,54	7,86	0,68
2500	2,51	14,08	7,71	0,67
3150	2,36	14,97	7,41	0,64
4000	2,14	16,51	7,19	0,62
5000	1,88	18,79	7,10	0,62

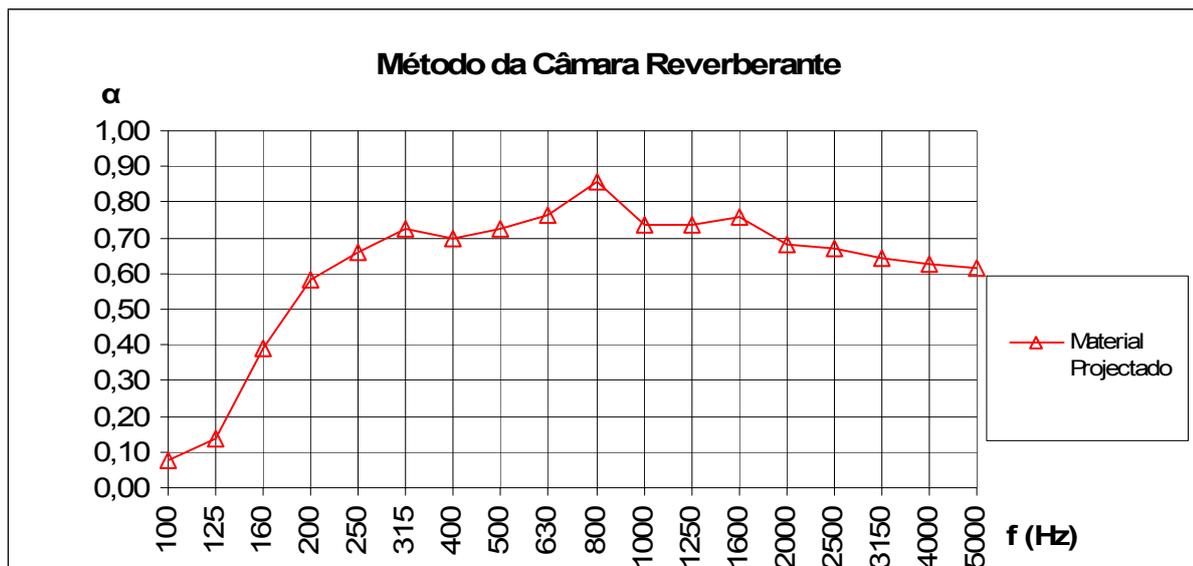


Figura 4.19 – Gráfico do coeficiente de absorção sonora do material Projectado, calculado com base no Método da Câmara Reverberante

Todos os dados registados e calculados constam no Anexo G, sendo que os Boletins de Ensaios para cada um dos materiais se apresentam do mesmo modo no Anexo H.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

No presente capítulo apresentaram-se apenas os resultados obtidos com o modelo teórico e com as duas metodologias práticas abordadas. As comparações e análises aos dados obtidos são apresentadas no capítulo seguinte.

Na utilização do modelo teórico, foi necessário recorrer a um equipamento específico, para determinação da resistência ao fluxo do ar, que nem todos os laboratórios ligados à Acústica têm ao seu dispor. Devido à necessidade de se obterem dados para o coeficiente de absorção sonora para todas as frequências em avaliação, não foi seguida a recomendação dos autores do modelo teórico aplicado, tendo mesmo sido extrapoladas as formulações existentes, para fora do intervalo em que o modelo tinha aplicabilidade.

Relativamente à utilização do tubo de ondas estacionárias, foi primeiramente efectuada uma adequação do mesmo a uma amostra de teste, cujos valores para o coeficiente de absorção sonora já haviam sido determinados pelo Método da Câmara Reverberante. Concluiu-se numa primeira fase que, utilizando os mesmos procedimentos para a amostra de teste nos materiais em estudo (retirados da norma em vigor), para ter em conta a atenuação do próprio tubo, as recomendações da norma conduziam a valores irrealistas dos coeficientes de absorção sonora. Adaptando-se então o modo de determinar a atenuação do tubo, extrapolando-se a fórmula preconizada na Norma para as baixas-frequências, conseguiram-se obter resultados bastante apropriados por este método, para a amostra de teste. Utilizando esta mesma adaptação para os materiais Talochado e Projectado, conseguiram-se também resultados passíveis de traduzir a realidade. Ainda neste método efectuaram-se também extrapolações dos procedimentos utilizados para frequências cuja aplicação do tubo não tem validade, pelas mesmas razões citadas para o modelo teórico.

Finalmente, no que diz respeito aos dados obtidos com o Método da Câmara Reverberante, tidos como aqueles que melhor traduzem a realidade, conclui-se que estes foram correctamente levantados, devido

ao facto de não terem existido grandes variações para as diferentes medições dos tempos de reverberação registados e das condições ambientais da câmara se terem mantido praticamente constantes durante todo o ensaio. É ainda importante salientar que, esta metodologia é a única em que todas as frequências foram correctamente avaliadas, não tendo sido necessário efectuar qualquer tipo de extrapolação.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo, tem-se como principais objectivos:

- Comparar os resultados do valor do coeficiente de absorção sonora do material Talochado com o material Projectado;
- Comparação das metodologias utilizados, de acordo com os dados obtidos para cada um dos materiais.

Assim sendo, partindo-se do pressuposto que os resultados obtidos pelo método da câmara reverberante são aqueles que melhor traduzem o comportamento do material, optou-se fazer duas análises comparativas: num primeiro momento comparando-se os valores do coeficiente de absorção sonora determinados recorrendo-se ao modelo teórico com os mesmos valor obtidos experimentalmente, na câmara reverberante; num segundo momento comparando-se os valores do coeficiente de absorção sonora obtidos pelo método do tubo de ondas estacionárias novamente com os mesmos valores obtidos pelo método que melhor traduz a realidade, o método da câmara reverberante.

Posteriormente, para uma melhor percepção das potencialidades do produto em estudo e para avaliar o seu possível enquadramento no mercado actual, efectuou-se uma comparação do mesmo com outras soluções equivalentes, que se encontram já a ser comercializadas.

5.2 COMPARAÇÃO DO MATERIAL TALOCHADO COM O MATERIAL PROJECTADO

Na sequência do que já foi abordado anteriormente e com o propósito de avaliar se existe ou não influência na forma de aplicação das fibras de papel sobre a lã mineral, procedeu-se à comparação do material Talochado com o material Projectado.

Na medida em que, das metodologias abordadas nesta dissertação, o Método da Câmara Reverberante é aquele que apresenta resultados mais fiáveis para a determinação do coeficiente de absorção sonora, optou-se por comparar apenas os dados obtidos por este método, para ambos os materiais, conforme se pode verificar na Figura 5.1.

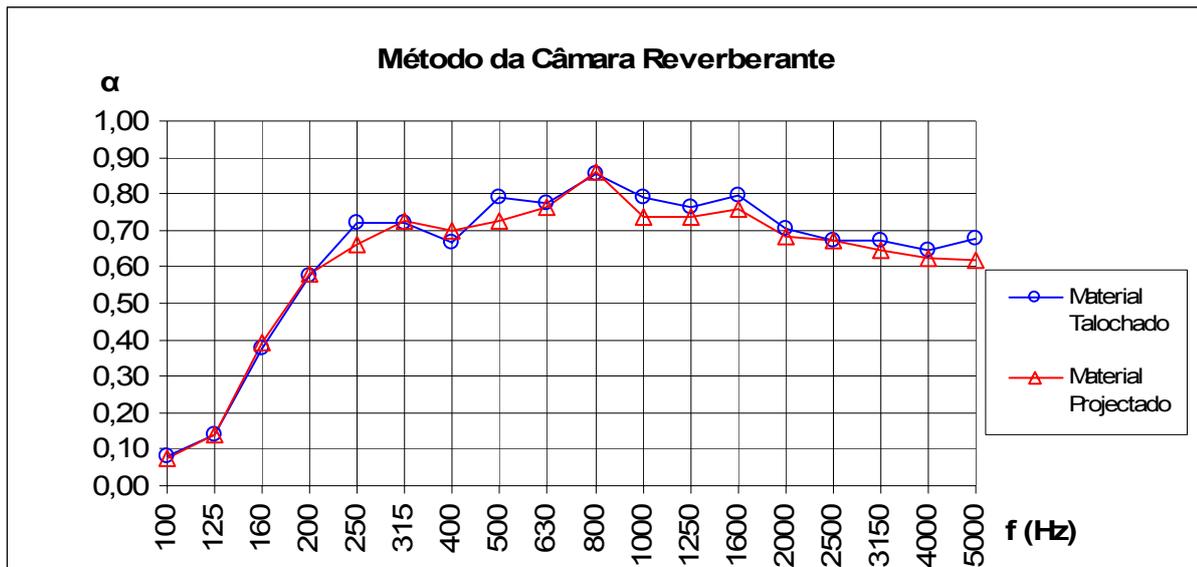


Figura 5.1 - Comparação dos resultados obtidos para cada o material Talochado e material Projectado, pelo Método da Câmara Reverberante

Conclui-se portanto facilmente que os materiais em estudo possuem valores praticamente idênticos para o coeficiente de absorção sonora. Contudo, nas altas-frequências constata-se que o material Talochado, cuja superfície de acabamento é mais fina (lisa), apresenta valores ligeiramente superiores para este coeficiente. A ligeira diferença aqui enunciada pode ser explicada devido a uma possível variação da metodologia do ensaio.

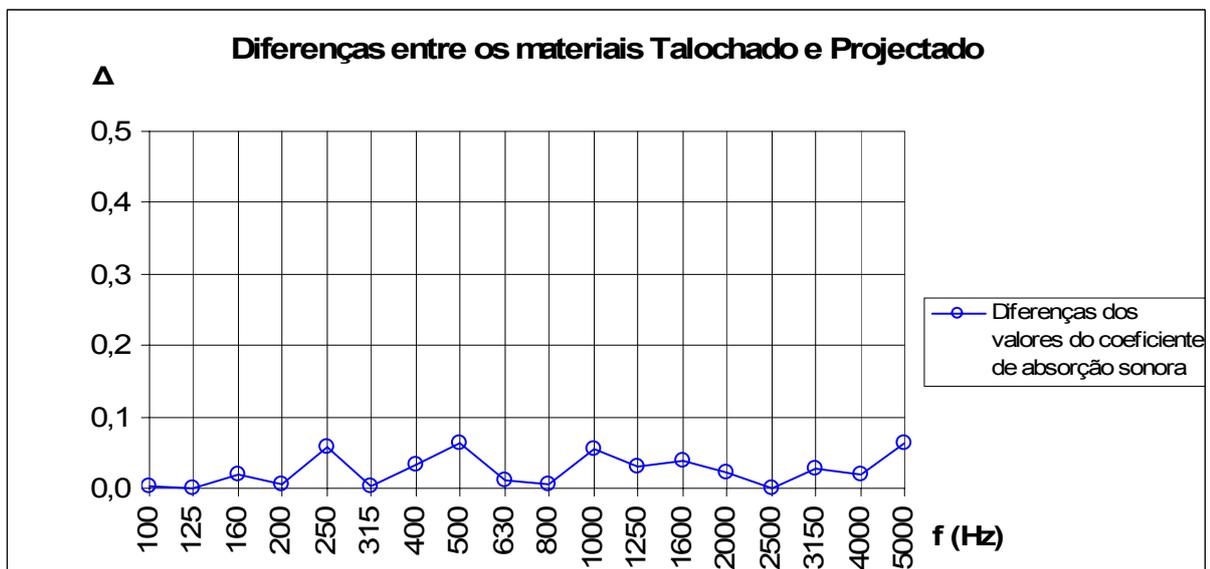


Figura 5.2 - Diferenças entre os valores de absorção sonora obtidos para os materiais Talochado e Projectado, pelo Método da Câmara Reverberante

Em traços gerais pode então ser assumido que a forma de aplicação da fibra de papel não tem grande relevância para o factor acústico aqui determinado, concluindo-se que os materiais são tecnicamente iguais.

5.3 COMPARAÇÃO DO MODELO TEÓRICO COM O MÉTODO DA CÂMARA REVERBERANTE

Primeiramente é fundamental realçar e reforçar um aspecto importante: segundo a Metodologia da Câmara Reverberante, as curvas dos dois materiais em estudo são praticamente sobrepostas isto é, ambos os materiais têm coeficientes de absorção sonora muito idênticos. Contudo, os resultados obtidos pelo modelo teórico para ambos os materiais, denotam uma diferença significativa na absorção sonora dos mesmos, não traduzindo portanto a realidade (Figura 5.3).

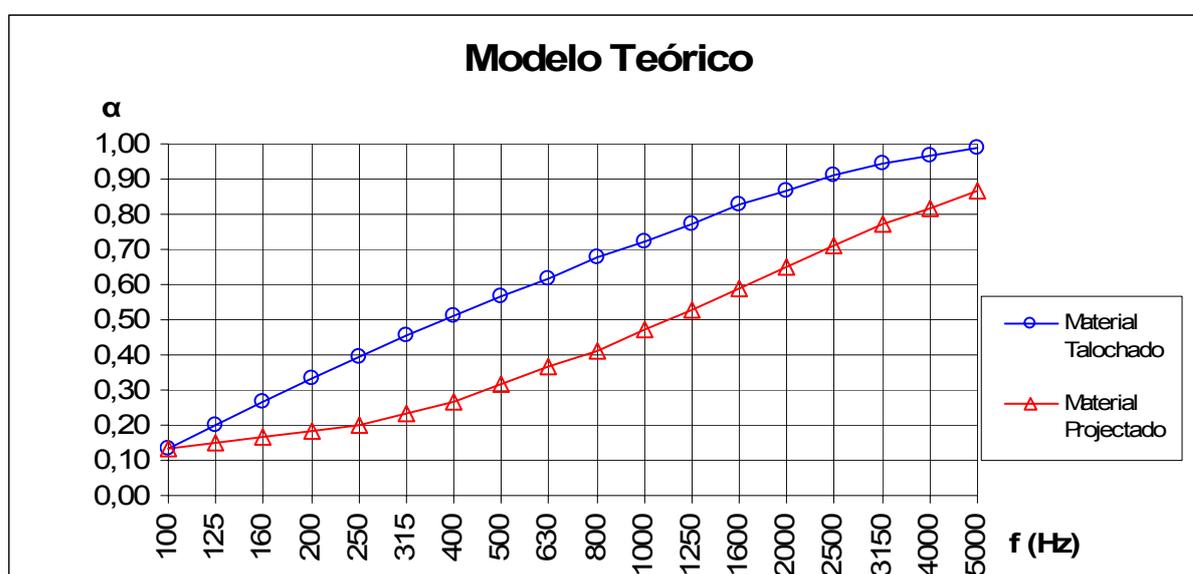


Figura 5.3 - Comparação dos resultados obtidos para o material Talochado e material Projectado, pelo Modelo Teórico

Assim sendo, tais factos levam portanto a concluir que, o fenómeno complexo da propriedade acústica em estudo não fica completamente caracterizado apenas em função da espessura do material e da sua resistência ao fluxo do ar

Analisando agora globalmente os dados obtidos para cada material, (Figura 5.4 e Figura 5.5 para os materiais Talochado e Projectado, respectivamente) através do modelo teórico de Delany-Bazley e do Método da Câmara Reverberante, constata-se que existe um desajuste significativo para os valores do coeficiente de absorção sonora determinados.

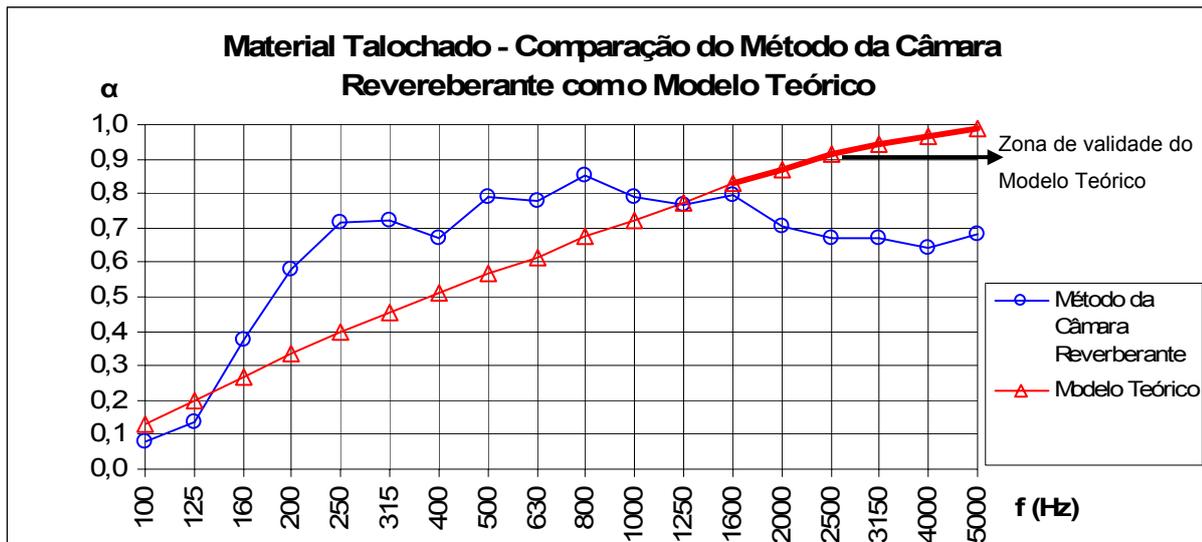


Figura 5.4 - Comparação dos valores do coeficiente de absorção sonora para o Material Talochado, obtidos pelo Método da Câmara Reverberante e pelo Modelo Teórico

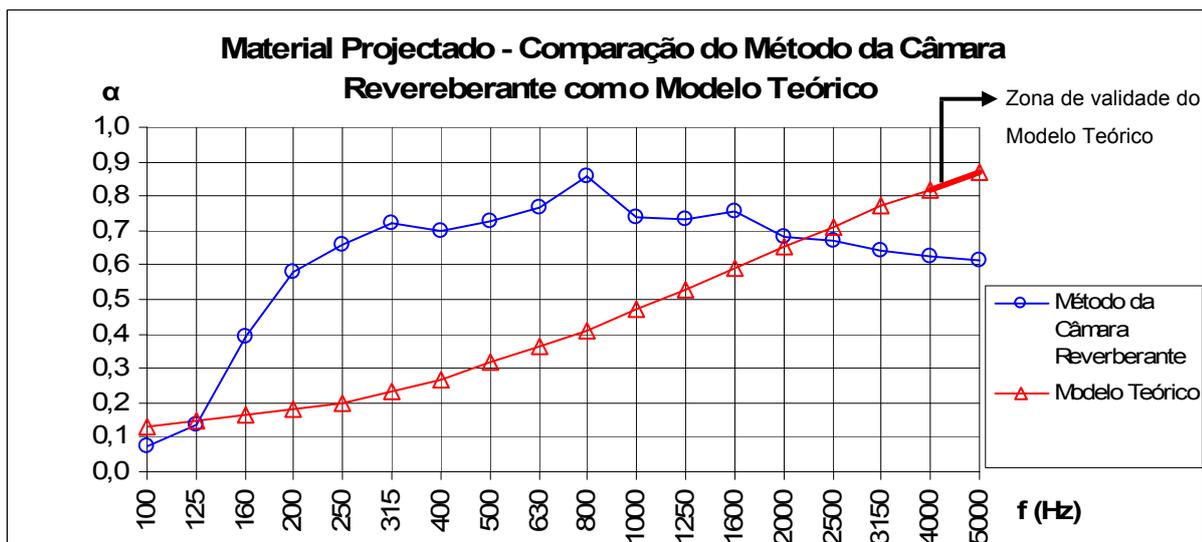


Figura 5.5 - Comparação dos valores do coeficiente de absorção sonora para o Material Projectado, obtidos pelo Método da Câmara Reverberante e pelo Modelo Teórico.

Porém, há que ter em conta o que foi referido no capítulo 3 do presente trabalho, aquando da exposição dos fundamentos teóricos do modelo de Delany-Bazley: as curvas devem ser interpoladas no intervalo

$$10 \leq \frac{f}{\sigma} \leq 1000, \text{ não sendo aconselhável a sua extrapolação.}$$

Assim, no caso do material Talochado em que $\sigma=154,87 \text{ Kpa.s/m}^2$, o intervalo de frequências com interesse neste trabalho, com validade para aplicação do modelo teórico em questão é o seguinte: $1600 \leq f \leq 5000$. Do mesmo modo, em relação ao material Projectado em que $\sigma=396,00 \text{ Kpa.s/m}^2$, o intervalo de frequências é ainda mais restrito: $4000 \leq f \leq 5000$

Conclui-se portanto que, no domínio de frequências válido para a utilização deste modelo, as diferenças entre os valores previstos e os valores reais são as seguintes:

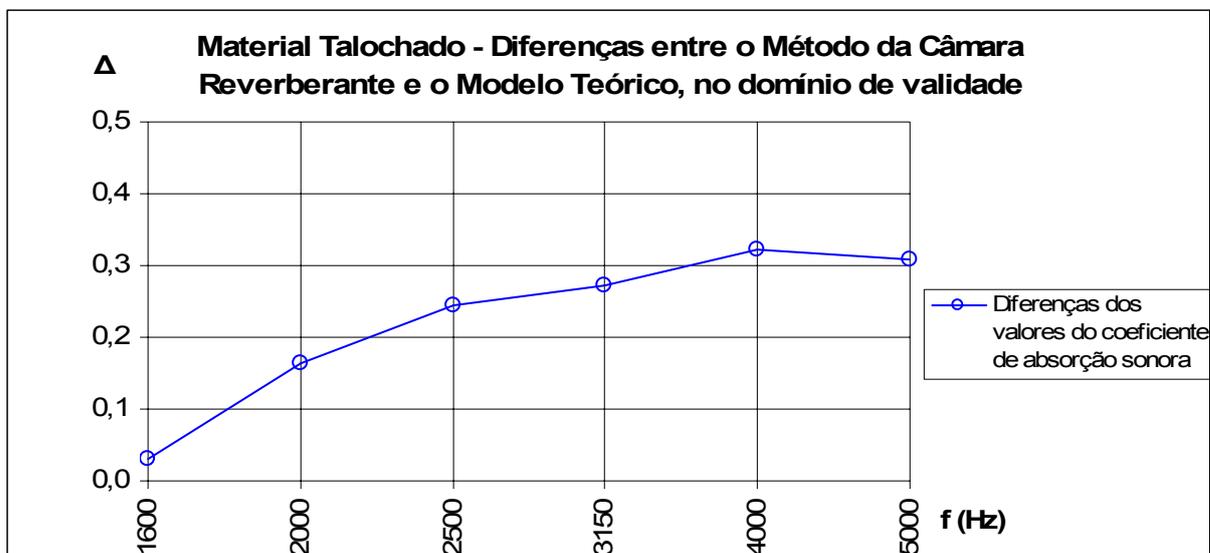


Figura 5.6 - Diferenças entre os valores obtidos pelo Método da Câmara Reverberante e o Modelo Teórico, no domínio de frequências válido para aplicação deste último, para o material Talochado

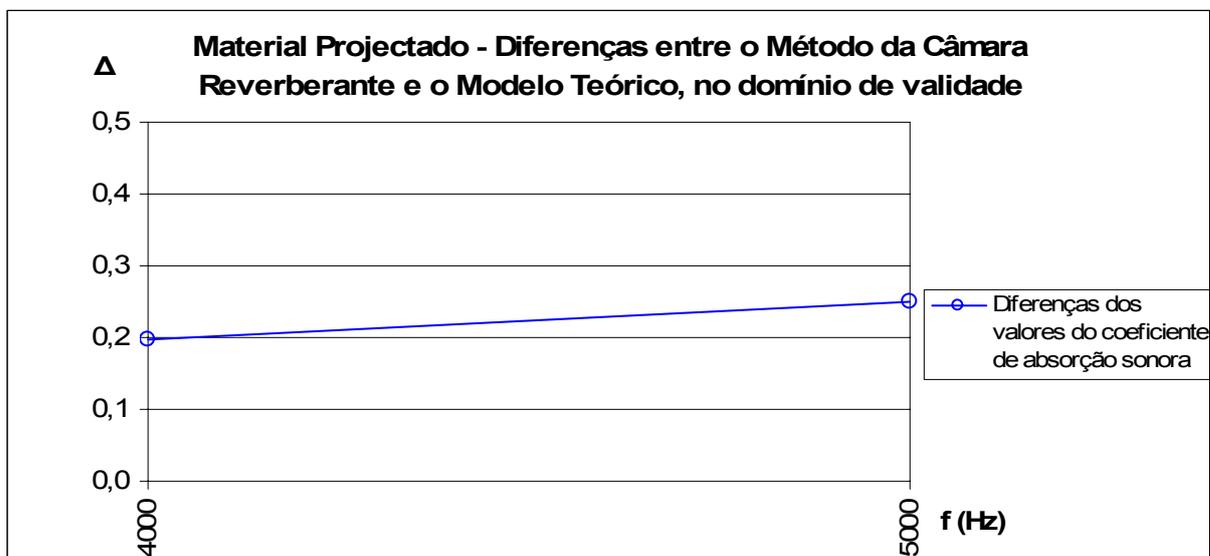


Figura 5.7 - Diferenças entre os valores obtidos pelo Método da Câmara Reverberante e o Modelo Teórico, no domínio de frequências válido para aplicação deste último, para o material Projectado

Pelo exposto, pode-se finalmente concluir que a utilização deste modelo teórico não é então aconselhada em fase de projecto, na medida em que fornece resultados muitas vezes superiores aos reais, o que é de todo indesejável.

5.4 COMPARAÇÃO DO MÉTODO DO TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS COM O MÉTODO DA CAMARA REVERBERANTE

Primeiramente importa alertar para o facto dos valores obtidos para o coeficiente de absorção sonora de ambos os materiais, no tubo de ondas estacionárias, traduzirem a variabilidade existente nos seus processos de produção. Por seu lado, nos ensaios realizados na câmara reverberante, o mesmo não aconteceu, na medida em que apenas foi avaliada uma amostra de cada material não se repercutindo assim a variabilidade existente entre diversas amostras de um mesmo produto, variabilidade essa inerente aos processos de fabrico.

Numa análise inicial aos dados calculados para ambas as amostras, com o tubo de ondas estacionárias, constata-se que, ao contrario do modelo teórico, com este método obtêm-se valores semelhantes para o coeficiente de absorção sonora para os materiais Talochado e Projectado (Figura 5.8).

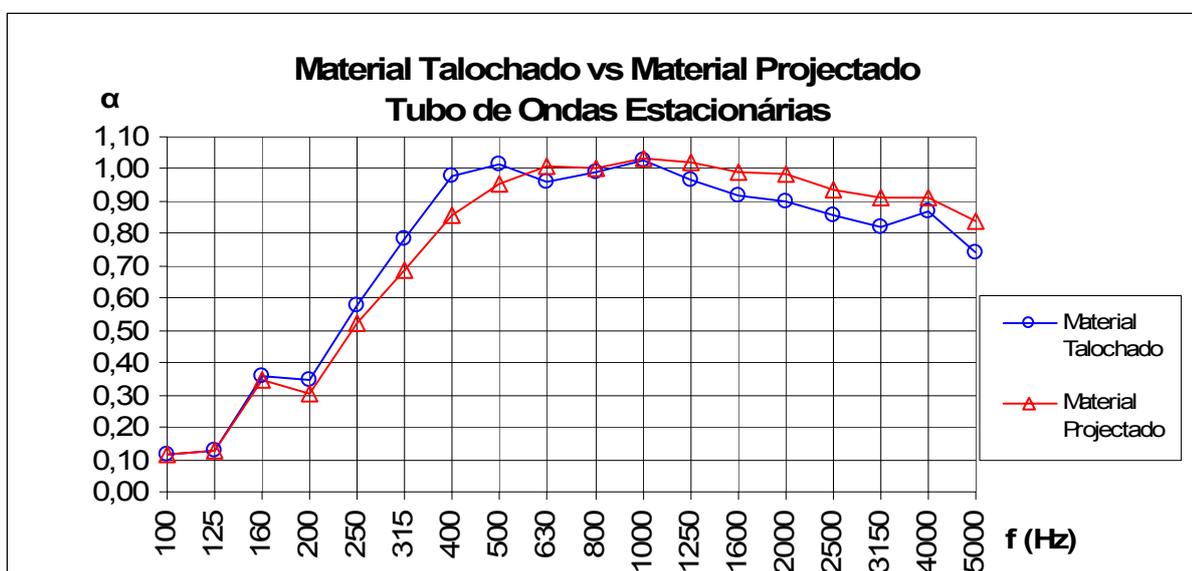


Figura 5.8 - Comparação do valor dos coeficientes de absorção sonora do Material Talochado com o Material Projectado, obtidos com o tubo de ondas estacionárias

É fundamental também referir que, ainda numa análise comparativa aos dados obtidos com o tubo, se constata que o material Projectado apresenta valores ligeiramente superiores para o coeficiente de absorção sonora em relação ao material Talochado, nas altas-frequências. Tal facto pode ser explicado devido à maior rugosidade que superfície de acabamento do material Projectado apresenta, que lhe confere assim uma maior área de absorção sonora e por conseguinte, valores mais elevados para o coeficiente de absorção sonora.

Tendo em vista agora a comparação dos resultados obtidos com o tubo de ondas estacionárias e o Método da Câmara Reverberante, sobrepôs-se no gráfico as diferentes curvas de absorção sonora calculadas com base no tubo e a curva obtida com base na câmara, dos materiais Talochado e Projectado (Figura 5.9 e Figura 5.10):

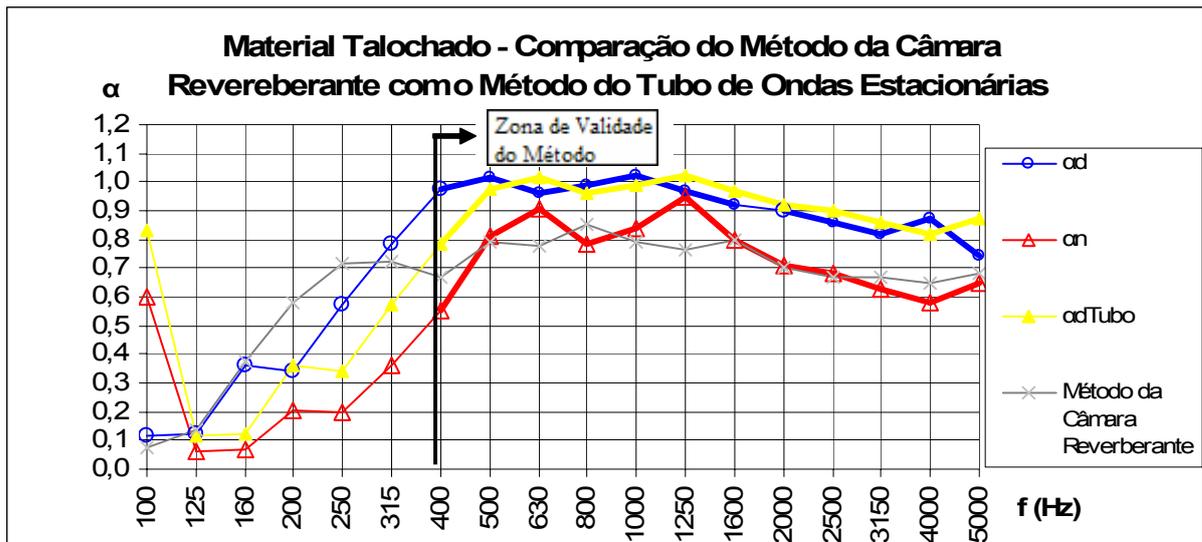


Figura 5.9 - Comparação dos valores obtidos pelo Método da Câmara Reverberante com o Método do Tubo de Ondas Estacionárias, para o material Talochado

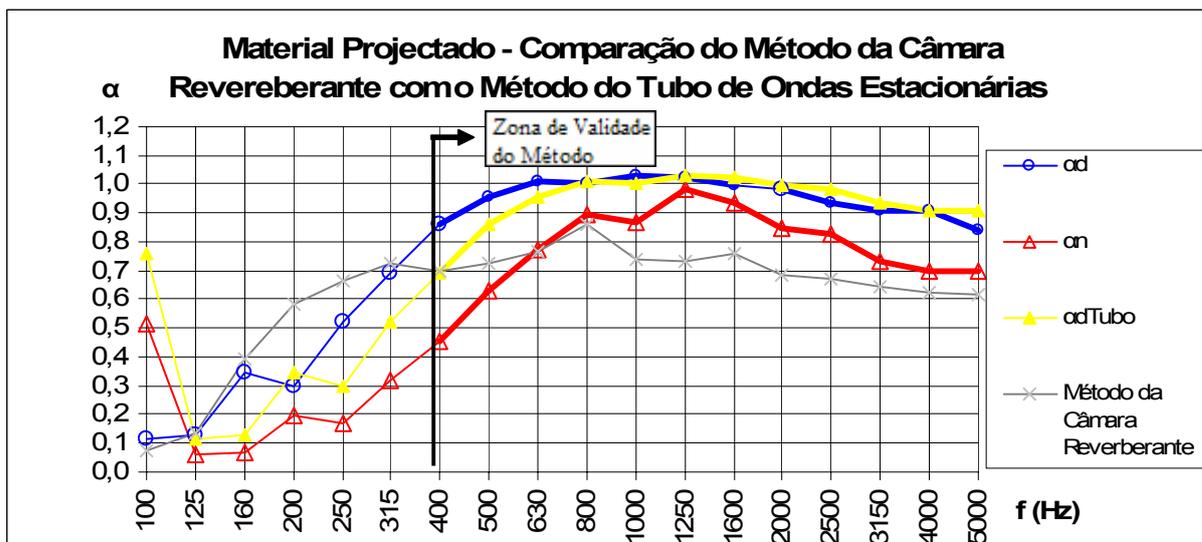


Figura 5.10 - Comparação dos valores obtidos pelo Método da Câmara Reverberante com o Método do Tubo de Ondas Estacionárias, para o material Projectado

As curvas α_n e α_{dTubo} , são as curvas dos coeficientes de absorção sonora para uma incidência normal e difusa, respectivamente, calculadas com base no tubo de ondas estacionárias. A curva α_d é aquela que representa o ajuste efectuado para a amostra de teste (deslocamento dos valores de α_{dTubo} 1/3 para trás), aplicado agora nos materiais Talochado e Projectado..

Efectuando-se uma análise global aos resultados obtidos para cada um dos materiais em estudo, pelos métodos do tubo de ondas estacionárias e pelo método da câmara reverberante, verifica-se um desenvolvimento semelhante de ambas as curvas de absorção sonora, típicas dos materiais porosos.

Procedendo-se agora a uma análise mais detalhada dos mesmos dados constata-se que, no domínio de frequências de trabalho do tubo de ondas estacionárias ($400 \leq f \leq 5000$, Quadro 4.4), os valores

obtidos com o tubo são superiores aos determinados com a câmara reverberante, quando considerada a mesma correcção adoptada para as espumas.

5.5 ENQUADRAMENTO DO PRODUTO EM ESTUDO NO MERCADO ACTUAL

Neste sub capítulo pretende-se enquadrar o produto em estudo com outros já existentes no mercado. Dada a irrelevância já referida sobre a forma de aplicação da fibra de papel, pretende-se comparar apenas a amostra do material Talochado não só com outros ensaios já efectuados para este material (com outra espessura e com a existência de caixa de ar), mas também com outros produtos utilizados actualmente no mercado. A introdução do material Talochado no mercado terá a seguinte designação comercial, atribuída pela empresa Stier: “Sonacoustic”

5.5.1 EFEITO DA REDUÇÃO DA ESPESSURA DO MATERIAL

Comparando os dados calculados para o valor do coeficiente de absorção sonora Sonacoustic, cuja espessura é de 3,5 cm e apoiado sobre base sólida, com outro material com a mesma composição e com as mesmas condições de apoio, mas com 2,5 cm, obteve-se o seguinte gráfico:

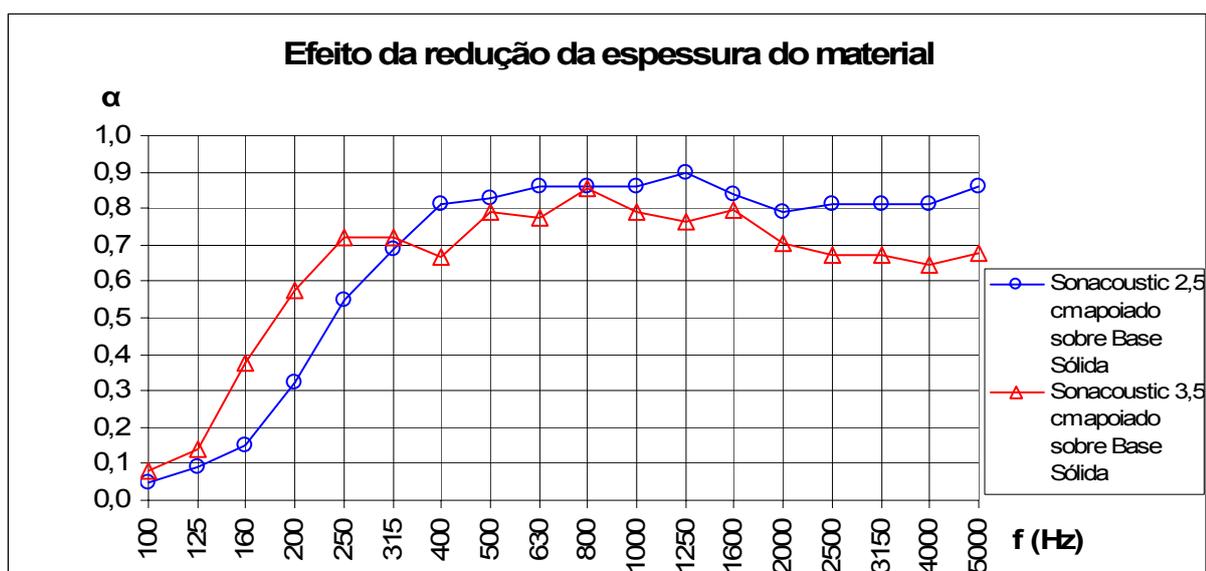


Figura 5.11 - Gráfico para avaliação do efeito da redução da espessura do material Talochado

Pela análise da Figura 5.11 constata-se que a redução de 1 cm da espessura do Sonacoustic, provoca uma redução do valor do coeficiente de absorção sonora do material, para frequências inferiores aos 315 Hz. Contudo, para frequências superiores a esta, o efeito da redução da espessura para 2,5 cm, acarreta um ganho para o valor do coeficiente de absorção sonora, ganho esse que é ainda mais acentuado para frequências superiores aos 2000 Hz isto é, na gama das altas frequências.

5.5.2 EFEITO DA COLOCAÇÃO DE CAIXA-DE-AR, NO TARDOZ DO MATERIAL SONACOUSTIC, 2,5 CM

Modificando as condições de apoio do material da empresa Stier, o Sonacoustic, cuja espessura é de 2,5 cm, recorrendo-se à utilização da caixa-de-ar, com duas espessuras distintas (6,0 e 12,5 cm), obtiveram-se os resultados apresentados na figura seguinte:

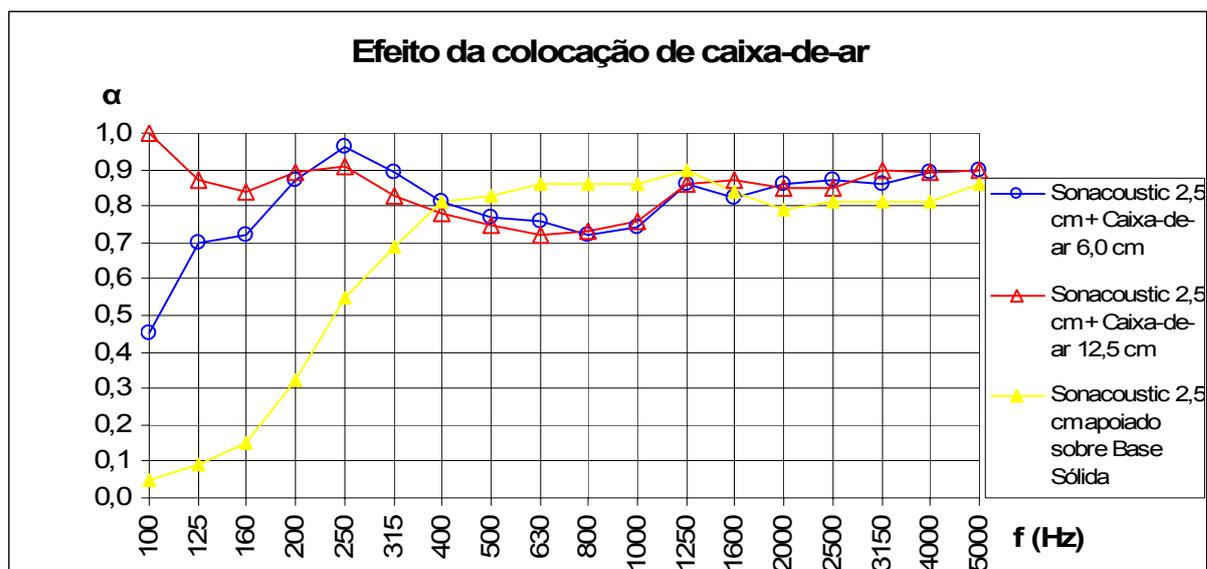


Figura 5.12 - Efeito da colocação de caixa-de-ar no material Sonacoustic

A colocação de caixa-de-ar com 6,0 cm no tardo do material Sonacoustic, provoca um ganho bastante interessante para o coeficiente de absorção de sonora para as frequências dos 100 aos 315 Hz. Também para frequências superiores aos 1250 Hz, é conseguido um ganho para o mesmo coeficiente, ainda que não tão significativo. Nas frequências intermédias, entre os 500 e os 1000 Hz, a modificação das condições de apoio confere mesmo uma redução ao valor do coeficiente de absorção sonora.

Relativamente à colocação de uma espessura de praticamente o dobro para a caixa-de-ar, mais concretamente de 12,5 cm, apenas se obtém um ganho nas três frequências iniciais de avaliação, os 100, 125 e 160 Hz. Todas as restantes frequências continuam com um coeficiente de absorção sonora muito semelhante.

5.5.3 COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTIC DE 3,5 CM COM O MATERIAL BASWAPHON DE 4,0 CM, APOIADOS SOBRE BASE SÓLIDA

O BASWaphon comercializado igualmente pela empresa STIER é um sistema acústico contínuo para tectos e paredes, com um acabamento fino, tendo como objectivo principal conseguir a redução do tempo de reverberação de espaços. O sistema consiste em painéis de lâ mineral calibrados e de peso reduzido que são colocados sobre uma base (betão, gesso cartonado, entre outros) sendo posteriormente barrado com uma massa mineral de forma a se obter uma superfície contínua. Em termos de aparência, assemelha-se a gesso estanhado, devido à ausência de juntas e à sua superfície praticamente lisa. Pode ainda também ser aplicado em paredes e colunas, bem como em superfícies curvas (concasas/convexas).

Na Figura 5.13, apresentam-se a sobreposição das curvas de absorção sonora do material Sonacoustic e do material BASWaphon:

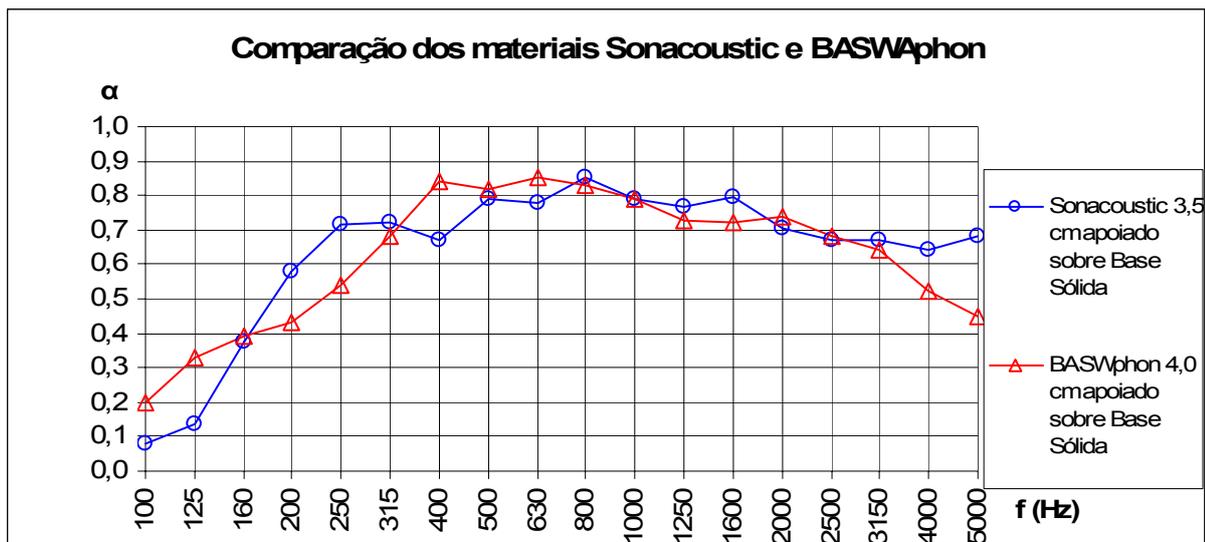


Figura 5.13 - Comparação do material Sonacoustic de 3,5 cm com o material BASWaphon de 4,0 cm, ambos apoiados em base sólida

Pela análise do gráfico anterior, conclui-se que os materiais em comparação possuem coeficientes de absorção sonora idênticos entre os 315 e os 3150 Hz. Nas frequência mais baixas, o material BASWaphon possui valores ligeiramente mais elevados, devido à diferença de espessuras entre as amostras, sendo que o material Sonacoustic apresenta valores ligeiramente superiores nas frequências de 200 e 250 Hz, bem como nas frequências dos 4000 e 5000 Hz.

5.5.4 COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTIC DE 2,5 CM COM CAIXA-DE-AR DE 12,5 CM COM MATERIAL STOSILENT A-TEC DE 2,7 CM COM CAIXA-DE-AR DE 10,0 CM

O StoSilent A-Tec, comercializado pela empresa STO, é um sistema de painéis monolíticos leves utilizados para tectos, que permite juntar painéis cobrindo uma área de cerca de 200m², sem serem necessárias a utilização de juntas.

Dependendo das necessidades de cada espaço, este sistema pode ser aplicado com diversas espessuras de caixa-de-ar. Assim, para efeitos comparativos com o material Sonacoustic, comparou-se a utilização do sistema StoSilent A-Tec, com uma espessura de 2,7 cm e com caixa-de-ar de 10,0 cm, com o material Sonacoustic, de 2,5 cm, cuja caixa-de-ar de tem a espessura de 12,5 cm (Figura 5.14)

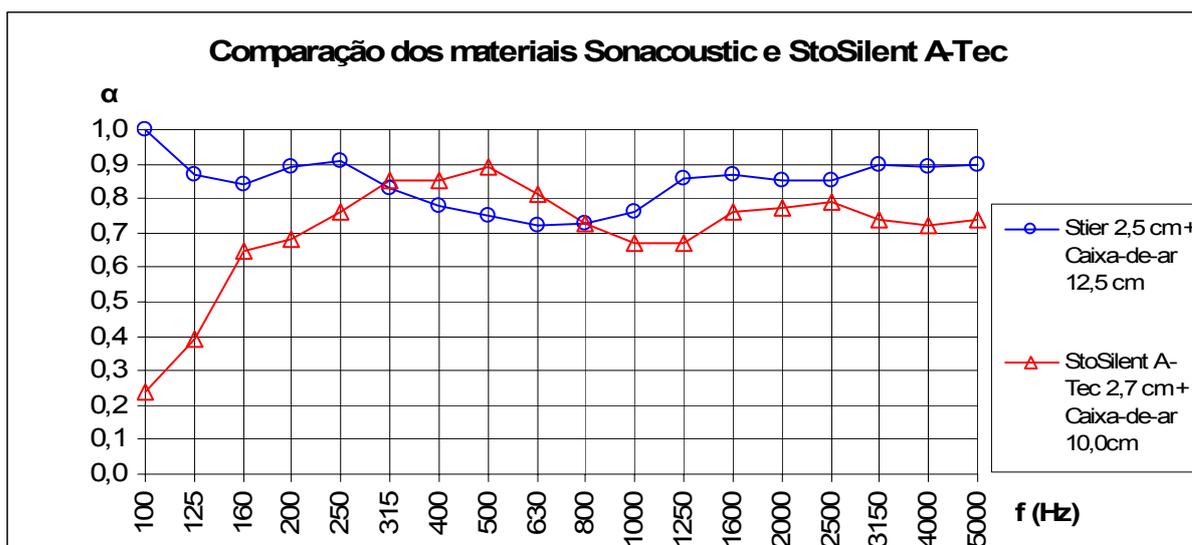


Figura 5.14 - Comparação do material Sonacoustic de 2,5 cm + caixa-de-ar de 12,5 cm com o material StoSilent A-Tec de 2,7 cm + caixa-de-ar de 10,0 cm

Pese embora as duas soluções apresentarem espessuras de painéis e de caixas-de-ar ligeiramente distintas, constata-se que, tirando as frequências iniciais dos 100, 125 e 160 Hz, ambos os materiais apresentam um comportamento semelhante, com valores bastante aceitáveis para a diminuição do tempo de reverberação de um dado espaço, dado o seu elevado valor para o coeficiente de absorção sonora. Assim, o sistema disponibilizado pela empresa STO consegue coeficientes de absorção sonora ligeiramente mais elevados nas frequências dos 400 aos 630 Hz, não só com uma espessura menor dos seus painéis mas também com uma espessura inferior da caixa-de-ar. Por outro lado a partir dos 1000 Hz, o material da Stier aplicado sob as condições de apoio já referidas, apresenta coeficientes ligeiramente superiores, para a absorção sonora.

5.5.5 COMPARAÇÃO DO MATERIAL SONACOUSTIC DE 2,5 CM COM CAIXA-DE-AR DE 6,0 CM COM O MATERIAL AKUSTAPLAN DE 1,9 CM COM CAIXA-DE-AR DE 5,0 CM

Para finalizar a comparação do produto Sonacoustic, com outros existentes no mercado, pretendeu-se comparar o mesmo com o produto pertencente à empresa Wilhelmi, cuja designação comercial é Akustaplan Fwa Glass .

O Akustaplan Fwa Glass é um material constituído à base de granulado expandido de vidro, com compostos de ligação não orgânicos. Pode ser aplicado como tecto numa área máxima de 200m², sem a necessidade de se realizarem juntas. Assim, no caso de áreas maior do que 200m², ou no caso de o a máxima dimensão do tecto exceder os 15 metros, a utilização de juntas é indispensável.

Comparando então por fim, o valor de absorção sonora do material Akustaplan Fwa Glass de 1,9 cm de espessura com caixa-de-ar de 5,0 cm com o material Sonacoustic de 2,5 cm de espessura e caixa-de-ar de 6,0 cm, obteve-se o gráfico apresentado na figura 3,5, por banda de oitava (devido ao facto de os resultados fornecidos pela Wilhelmi serem em bandas de oitava).

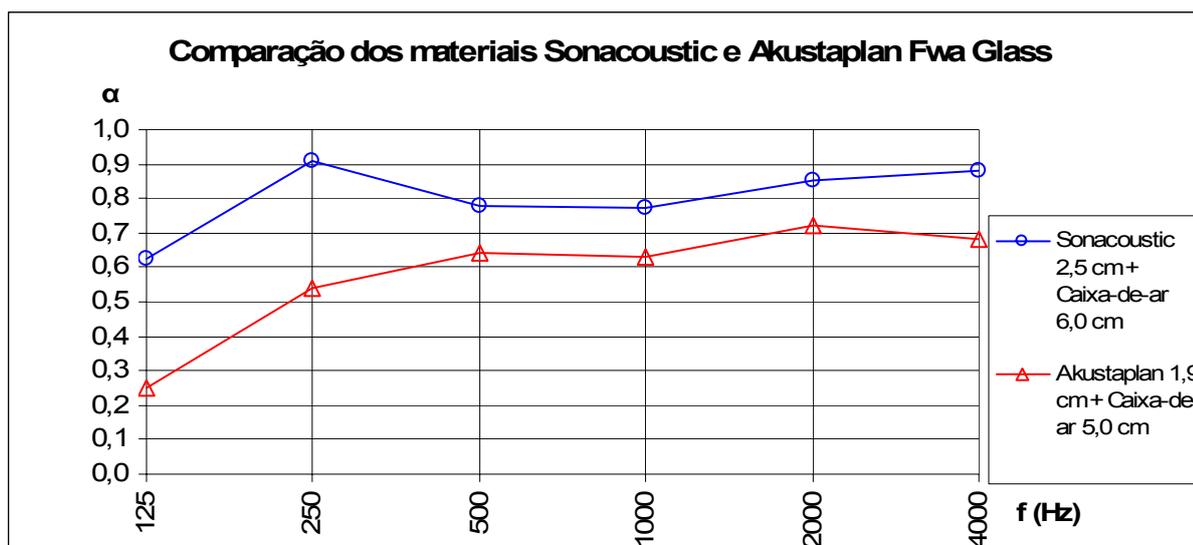


Figura 5.15 - Comparação do material Sonacoustic de 2,5 cm + caixa-de-ar de 6,0 cm com o material Akustaplan Fwa Glass de 1,9 cm + caixa-de-ar de 5,0 cm

Neste caso, constata-se uma maior absorção sonora do material Sonacoustic em todas as gamas de frequência avaliadas, sendo a diferença bastante acentuada nas duas frequências de entrada. Nas restantes frequências, a diferença é sensivelmente constante, variando em média cerca de 15%.

Conclui-se portanto que, em relação à solução padronizada e referida neste ponto para o material Akustaplan Fwa Glass, a solução equivalente proposta pela Stier consegue uma redução bastante mais acentuada para o tempo de reverberação de um espaço fechado.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Na avaliação dos resultados obtidos através do modelo teórico utilizado nesta dissertação, duas importantes conclusões podem desde logo ser retiradas: por um lado, a extrapolação utilizada não conduz, de facto, a resultados semelhantes dos reais, sendo que os resultados obtidos por essa extrapolação se mostram totalmente desajustados; por outro lado, que a espessura e a resistência ao fluxo de ar não caracterizam por si só o complexo fenómeno que é a absorção sonora, na medida em que, de acordo com o modelo teórico os materiais possuem diferentes coeficientes de absorção sonora, devido aos diferentes valores obtidos para a resistência à passagem do ar (já que a espessura é a mesma), o que não traduz novamente a realidade. No domínio de validade do modelo teórico (apenas de duas frequências no caso do material projectado), destaca-se o facto de os coeficientes de absorção sonora obtidos para ambos os materiais serem quase sempre superiores aos valores reais, sendo este um aspecto indesejável, especialmente na fase de projecto.

No que consiste aos valores obtidos pelo tubo de ondas estacionárias, realça-se como aspecto positivo o facto de os resultados calculados para cada um dos materiais serem idênticos, a exemplo do que efectivamente acontece. Contudo, importa salientar que as correcções utilizadas no material de teste aplicadas aos materiais em estudo, conduzem a uma sobrevalorização dos valores do coeficiente de absorção sonora destes.

Por fim, no que diz respeito às diversas soluções existentes actualmente para tectos contínuos, conclui-se que a solução Sonacoustic, designação comercial atribuída ao tipo de material que foi objecto de

estudo nesta dissertação, possui características de absorção sonora capazes de competir no mercado, podendo então ser considerada como uma boa alternativa às utilizadas presentemente.

CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução ao longo dos tempos da civilização Humana, fez com que o Homem se fosse adaptando às suas necessidades. As necessidades deste se fazer ouvir, de se conseguir expressar com nitidez, de evitar sons desagradáveis – ruído – contribuiu de sobremaneira para a evolução da Acústica, conhecida hoje em dia como a ciência que estuda o som.

Todavia, essas mesmas necessidades perduram actualmente, sendo que o nível exigencial das pessoas é cada vez maior. Vários são os relatos que nos chegam pelos mais diversos meios de comunicação de problemas têm origem no ruído. Assim, a existência de legislação capaz de minorar os efeitos deste agente nocivo, é indispensável para o bem-estar das sociedades, cabendo ao Estado a função de legislador.

Contudo, há que salientar outra perspectiva distinta, nomeadamente na Acústica de Edifícios (tema central deste trabalho) que não a do isolamento sonoro: a correcção acústica, que se refere à qualidade acústica que um determinado espaço tem e que é função do tipo de uso que se lhe confere.

Por tudo isto se influi que o conhecimento das propriedades acústicas dos materiais empregues nos edifícios é preponderante para o conforto acústico dos seus utentes, sendo incontornável a necessidade de serem conhecidas com precisão, por parte dos projectistas.

Relativamente às duas variantes do mesmo material em estudo, verificou-se que são tecnicamente iguais, concluindo-se deste modo que a forma de aplicação das fibras de papel na lã mineral, não tem grande influência neste parâmetro acústico em estudo: a absorção sonora.

No que diz respeito à utilização do modelo teórico para previsão do coeficiente de absorção sonora, este mostrou-se claramente desajustado e com uma gama de aplicabilidade bastante reduzida no domínio de frequências de trabalho com interesse. Salienta-se ainda o facto de os dados obtidos pelo modelo teórico, para ambas as amostras, serem também bastante diferentes, não traduzindo com precisão o seu comportamento real, em serviço.

Por sua vez com o tubo de ondas estacionárias obtiveram-se valores semelhantes do coeficiente de absorção sonora para as duas variantes do material em estudo. No entanto, comparando estes com os da câmara reverberante, nota-se um ligeiro desajuste, concluindo-se que a passagem do campo normal para um campo difuso, não reflecte a realidade com uma precisão aceitável.

Finalmente, quando analisada a possível integração do material fonoabsorvente, constituído por filmes de polímero monocomponentes aplicados sobre lã mineral fibrada, no mercado actual, conclui-se que este possui características de absorção sonora bastante satisfatórias, sendo por isso uma alternativa bastante viável às já existentes.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nesta dissertação foram abordados diversas formas para a determinação da absorção sonora de materiais e que poderão vir a ser objecto de estudo mais aprofundado ou despertar outras temáticas de interesse. É por isso importante referir que, neste estudo apenas se pretendeu abordar metodologias já existentes, sendo desejável que se possam desenvolver outro tipo de modelos ou métodos dentro do mesmo tema ou até mesmo aprofundar o conhecimento nesta área.

Seguidamente enunciam-se alguns aspectos que poderão futuramente vir a ser objecto de estudo, tendo sempre como objectivo primordial contribuir para o progresso da investigação na área da Acústica:

- Avaliação dos materiais em estudo de acordo com todos os modelos teóricos propostos nesta dissertação, ou outros existentes, para uma posterior comparação com resultados obtidos pelo Método da Câmara Reverberante;
- Análise de um maior numero de amostras, no tubo de ondas estacionárias, de diferentes tipos de filmes de polímero monocomponente aplicados sobre lã mineral, para confirmação de um procedimento sistemático para a determinação do coeficiente de absorção sonora de materiais com este tipo de características;
- Clarificação do valor da constante de atenuação do tubo, K_0'' proposta pela Norma.;
- Clarificação do ajuste do campo unidireccional para o campo difuso (omnidireccional);
- Determinação do efeito da variação da relação da espessura da lã mineral com a espessura da fibra de papel no coeficiente de absorção sonora deste tipo de materiais;
- Estudo do efeito da variação da densidade da lã mineral, mantendo constante a espessura do material, na absorção sonora de materiais com estas características;
- Avaliar o efeito da aplicação do material em estudo num determinado espaço com necessidades reais de alteração do seu tempo de reverberação;
- Avaliar o efeito da utilização de diversas espessuras de caixa-de-ar, para materiais com diferentes espessuras;
- Analisar a influência do teor de humidade e temperatura na realização dos ensaios.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "acoustics" - <http://www.britannica.com/eb/article-9109556>. - Encyclopædia Britannica Online, 2007.
- [2] Allard, J.F.(1993) - *Propagation of Sound in porous media. Modeling sound absorbing materials*. London, New York: Elsevier Applied Science,
- [3] Attenborough, K.(1985) - Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces. *J. Sound Vib.* 99:4 p. 521-544.
- [4] Carvalho, A.P. Oliveira de - *Texto de Apoio à Disciplina de Acústica Ambiental e de Edifícios*. 2007.
- [5] *Decreto-Lei n° 251/1987 de 24 de Junho*. - Diário da República 1987.
- [6] *Decreto-Lei n° 259/2002 de 14 de Setembro*. - Diário da República – I Série-A N° 271. 2002.
- [7] *Decreto-Lei n° 292/1989 de 2 de Setembro*. - Diário da República. 1989.
- [8] *Decreto-Lei n° 292/2000 de 14 de Novembro*. - Diário da República – I Série A N° 263. 2000.
- [9] Domingues, Odete - *Acústica nos edifícios materiais e sistemas absorventes sonoros coeficientes de absorção sonora*. Lisboa: LNEC, 2005.
- [10] Everest, F. Alton - *The Master Handbook of Acoustics*. 4ª Edição. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [11] F.P.Mechel(1988) - Design charts for sound absorber layers. *J. Acoust. Soc. Am.* 83:p. 1002-1013.
- [12] Finn Jacobsen, Torben Poulsen, Jens Olger Rindel - *Lecture note on Fundamentals of Acoustics and Noise Control*. Technical University of Denmark, 2007.
- [13] Henrique, Luís L - *Acústica musical*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- [14] *ISO 266:1997: "Acoustics - Preferred frequencies"*. - International Organization for Standardization, 1997.
- [15] *ISO 10534-1:1996: "Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 1: Method using standing wave ratio"*. - International Organization for Standardization, 1996.

- [16] ISO 354:2003 "Acoustics -- Measurement of sound absorption in a reverberation room". - International Organization for Standardization, 2003.
- [17] Lei de Bases do Ambiente, nº 11/87 de 7 de Abril. - 1987.
- [18] Long, Marshall - *Architectural acoustics*. Amsterdam ; London: Elsevier/Academic Press, 2006.
- [19] M.E. Delany, E.N. Bazley (1970) - Acoustical Properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*. 3:p. 105.
- [20] NP 3225-1:1986 (1ª Edição) "Acústica. Vocabulário.Parte 1:Definições gerais". - Instituto Português da Qualidade, 1986.
- [21] Pierce, Alan D. - *The Wave Theory of Sound*. Acoustical Society of America, 2007.
- [22] Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei nº 129/2002 de 11 de Maio. - Diário da República – 1ª Série-A Nº109. 2002.
- [23] Strutt, John William; Rayleigh, Baron - *The theory of sound*. 2nd revised and enlarged. New York: Dover Publications, 1945.

Anexo A – Relato de problemas causados pelo Ruído

A.1 Ruído de Vizinhança

Marinha Grande

Barulho de bar revolta vizinhança

III ► **protesto** Foram já entregues abaixo-assinados na Câmara e Governo Civil
Proprietário do espaço garante que cumpre os horários das licenças

Helena Simão

"É um desassossego!". Desde que o bar dançante 'Fábrica da Palha' abriu as portas, na zona da estação, Marinha Grande, há cerca de dois meses, Asélia Ramos não voltou a ter uma noite descansada. Esta moradora queixa-se do excesso de ruído provocado, sobretudo, pela falta de civismo dos utilizadores daquele espaço nocturno. "Conversam alto na rua, batem com as portas, aceleram a fundo nas motorizadas, enfim, não se pode dormir", lamenta.



Estabelecimento funciona há cerca de dois meses e moradores dizem que não dormem

Para além disso, "estacionam os carros em frente de garagens, sem qualquer cuidado. A Polícia já teve de ser chamada a intervir por várias vezes". Quanto ao ruído provocado pela música do próprio bar, Asélia assegura que o proprietário "até tem cuidado e praticamente não se ouve nada". O problema, diz, "é que o bar está aberto desde as 17 horas até às cinco da manhã. E há pessoas até essa hora". A residente diz não entender "como é que autorizam, numa zona residencial, um bar até tão tarde".

A maioria dos moradores dos prédios mais próximos subscreveu já dois abaixo-assinados, que entregaram, entretanto, na Câmara Municipal e Governo Civil de Leiria. Refere um dos documentos, a que o JN teve acesso, que "o barulho é público e de tal ordem que não nos deixam dormir, pois alguns condóminos trabalham por turnos, há crianças menores e idosos com problemas graves". E apela a que sejam tomadas, o mais rápido possível, "as medidas necessárias" à resolução do problema.

Contactado, o proprietário do bar recusou prestar declarações sobre o assunto. Esclareceu, apenas, que o estabelecimento, com espaço dançante, tem licença para estar aberto, durante a semana, até às 2 horas e, aos fins-de-semana, até às 4 horas, horário que, garante, é cumprido.

Cabe às câmaras emitir o licenciamento dos estabelecimentos comerciais de restauração e bebidas, onde se integra o bar em causa. O governo civil faz vistorias aos locais, dando um parecer vinculativo. Quando está em causa a segurança e ordem públicas, têm poder para encerrar os estabelecimentos.

in "Jornal de Noticias), 26/06/2004

A.2 Ruído de Transportes Públicos

Amadora

Comboios continuam a ser maus vizinhos

Milene Matos Silva

Os moradores da Praceta de Sagres, na Amadora, vão apresentar queixa no Ministério do Ambiente contra a CP e a Refer. A razão continua a ser o ruído dos comboios da Linha de Sintra.



Ruído dos comboios não deixa em paz os moradores da Praceta de Sagres, na Amadora

Há um ano terminaram as obras de colocação de barreiras acústicas junto às suas habitações, mas novas medições efectuadas pela Câmara Municipal da Amadora (CMA) dão conta de que os níveis de ruído continuam muito acima do permitido por lei.

O relatório das medições efectuadas dentro das habitações de vários moradores dão conta que os níveis de ruído durante o dia, mesmo com as janelas fechadas, são de mais de 14 decibéis, quando o valor permitido por lei é de apenas 5 decibéis. À noite, a situação é ainda mais grave 16 decibéis.

"A CP até agora fugiu sempre à responsabilidade, mas depois da colocação das barreiras acústicas, o problema passa a ser dos comboios que são muito ruidosos. Chegaram a circular na linha de Sintra os comboios de dois pisos que são muito mais silenciosos, mas depois do encerramento do túnel do Rossio desapareceram", critica António Pereira, porta-voz dos moradores da Praceta de Sagres.

Para os moradores o que está em causa é o facto de, "depois do investimento financeiro nas barreiras acústicas, continuar tudo na mesma". E exigem o cumprimento da lei.

Quando foi feita a quadruplicação da linha-férrea, em 1997, as queixas começaram. "Na altura não tínhamos argumentos legais porque só em 2001 é que foi aprovado o regulamento geral do ruído", diz António Pereira.

Em Fevereiro de 2006, a Refer conclui a colocação de barreiras acústicas até à entrada da estação da Amadora, ficando ainda por resolver o problema dos moradores da Avenida Cardoso Lopes. "Iremos realizar uma reunião entre os vários representantes dos moradores, terça-feira, para analisarmos o relatório da Câmara para depois apresentarmos a queixa no Ministério do Ambiente", garante António Pereira.

De acordo com fonte da CP, compete à Refer a responsabilidade de instalar mecanismos eficazes de redução de ruído.

in "Jornal de Noticias), 23/04/2007

A.3 Ruído da Indústria

Matosinhos

Fábrica de alumínio acusada de poluir a Senhora da Hora

III ► polémica Estudo do Instituto Ricardo Jorge faz subir de tom as críticas à Fundínio
Empresa mostra análise do IDIT, segundo a qual todos os parâmetros estão normais

Reis Pinto

Aconfusão está instalada na Senhora da Hora, em Matosinhos. A Fundínio, uma empresa de fundição de alumínio, é acusada, pela Cooperativa das Sete Bicas, de poluir o ar. O presidente da Câmara de Matosinhos criticou o "laxismo" das entidades que "permitiram este crime público". A empresa, por seu turno, mostra a análise efectuada pelo Instituto de Desenvolvimento e Inovação Tecnológica (IDIT), segundo a qual não há problemas de poluição.

A denúncia foi feita por Narciso Miranda, no final da última reunião pública da Câmara. Criticando a excessiva burocracia dos serviços camarários, o autarca revelou os resultados de uma análise pedida pela cooperativa - "10,5% (p/p)" de alumínio foi o valor que fez soar o alarme.

"Como foi possível que os ministérios do Ambiente e da Economia tenham permitido que a empresa tenha andado este anos todos a atentar contra a saúde pública? E que os serviços da Câmara tenham andado a fazer circular papéis?", interrogou Narciso Miranda.

"Está a mais"

Guilherme Vilaverde, presidente da Direcção da Cooperativa Sete Bicas, não poupou críticas à empresa.

"A Fundínio diz que já cá estava. Mas a Senhora da Hora urbanizou-se e a empresa já não cabe aqui. Está a mais. Quando começou, não tinha esta dimensão e não fabricava este tipo de produtos, nem lidava com estes materiais", referiu Guilherme Vilaverde.

Os moradores, por seu turno, dão conta do barulho permanente e dos resíduos que por vezes lhes invadem as casas. "A maior parte dos moradores já se habituou ao barulho. Mas um vizinho meu vendeu a casa por não aguentar mais. A fundição lança, por vezes, um cheiro horrível e um pó que nos queima as plantas", afirmou José Silva Conceição.

Uma fonte da empresa realçou que a Fundínio se encontra instalada na Senhora da Hora desde 1969.

Reconhecendo alguns incómodos em termos de ruído, a empresa desmente que seja uma fonte de forte poluição atmosférica. "Legalmente, o Instituto de Desenvolvimento e Inovação Tecnológica tem de controlar as nossas emissões gasosas duas vezes por ano. Recebemos, na passada semana, os resultados da última análise e aquela entidade considera que respeitamos todos os valores limite dos parâmetros monitorizados. Garanto-lhe que daqui não sai nem um décimo do fumo gerado, por exemplo, pela

refinaria da Petrogal, em Leça da Palmeira", referiu fonte da empresa, que revelou, igualmente, que a Fundínio já há algum tempo que procura uma localização alternativa. Entretanto, no dia 7 do próximo mês, vai realizar-se, na Direcção Regional de Economia do Norte, uma reunião com todas as entidades envolvidas neste processo.

A intoxicação por alumínio raramente se verifica por via respiratória. De tão invulgar, poucos são os trabalhos conhecidos neste domínio.

Segundo Torres da Costa, especialista em Imunoalergologia, a intoxicação acontece, normalmente, por via oral ou por outras vias (como foi o caso da morte dos hemodialisados de Évora, afectados pela concentração daquele metal na água).

"Em concentrações elevadas, o alumínio pode provocar a falência de diversos órgãos. Atinge especialmente o sistema nervoso e pode depositar-se, ainda, no fígado e nos rins, levar a doenças musculares e ósseas. Mas desconheço casos de intoxicação pelas vias respiratórias", referiu aquele especialista.

Por seu turno, uma fonte do Instituto Nacional de Saúde Ricardo Jorge relativizou a importância da análise referida.

"Para estar expressa em p/p (peso/peso) significa que foi analisada uma massa sólida. Ou seja, alguém recolheu poeiras depositadas nalgum local na envolvente da fábrica e trouxe-as para análise. Mas daí não se pode inferir que as pessoas tenham estado expostas a um valor elevado de alumínio no ar. Quer dizer é que havia 10,5% daquele metal na amostra. Não tem qualquer significado", sublinhou a mesma fonte.
Intoxicação por alumínio provoca falência de órgãos

Vozes

José Silva Conceição

Morador

Costumava brincar neste terreno, que era uma bouça. A fábrica realmente já cá estava quando viemos para cá. Mas, actualmente, há formas de ultrapassar os problema do ruído e da poluição atmosférica. Já me queixei por diversas vezes à Administração da empresa e à Direcção da Cooperativa".

António da Conceição Morador

O barulho é infernal. A fábrica labora 24 horas por dia e há gente que não consegue dormir. Além do fumo que de vez em quando sai da chaminé".

in "Jornal de Noticias), 28/09/2005

Anexo B – Validação do programa de cálculo automático do Modelo Teórico.

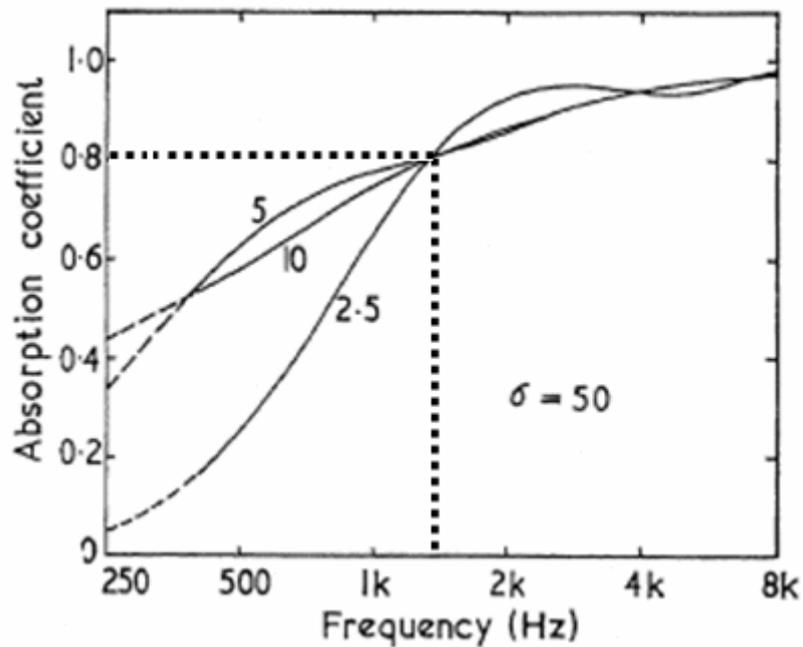


Figura 1 - Coeficiente de absorção sonora para uma incidência normal, para diferentes espessuras (cm), com uma resistência ao fluxo de ar de 50 unidades CGS.

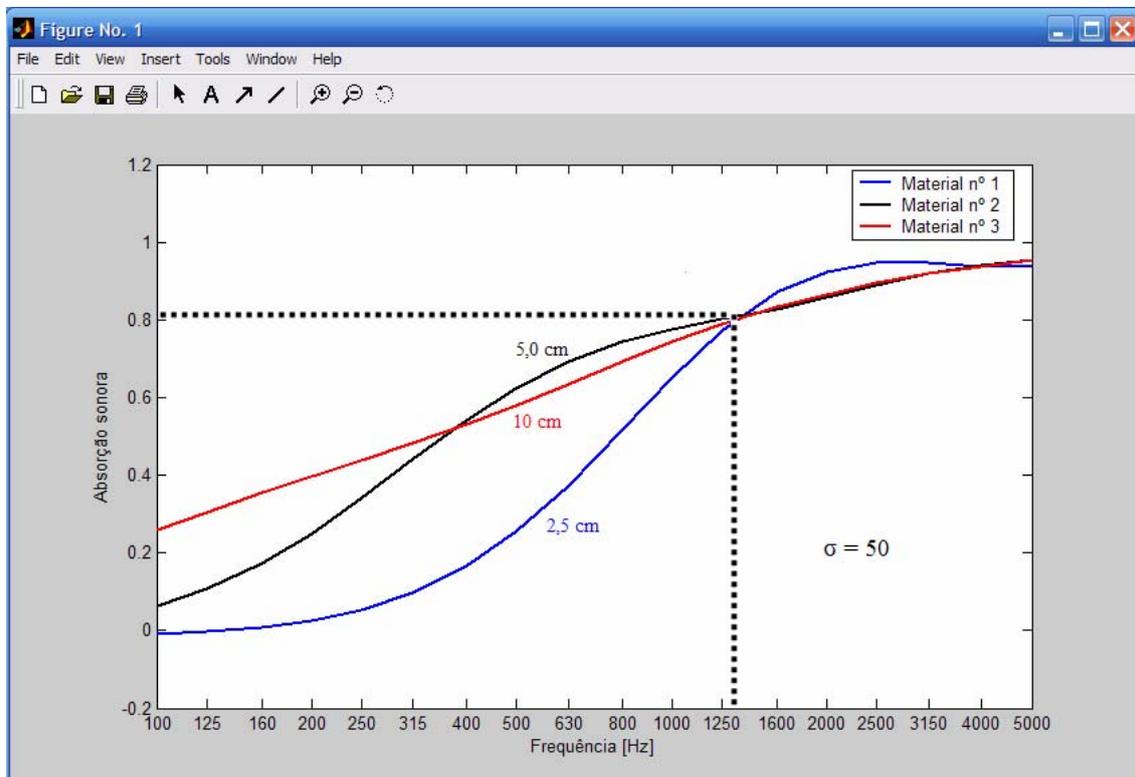


Figura 2 - Coeficiente de absorção sonora para uma incidência normal, para diferentes espessuras (cm), com uma resistência ao fluxo de ar de 50 unidades CGS

Anexo C – Folha de Cálculo para a Atenuação do Tubo de Ondas Estacionárias

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			P ₀	P _{min,n+1}	P _{min,n}	P _{máx,n}	Δn	k ₀ " - Método 1	k ₀ " - Método 2
			L _{min,n+1}	L _{min,n}	L _{max,n}	L _{min,n+1}	L _{min,n}	L _{max,n}	L _{min,n+1}	L _{min,n}	L _{max,n}	L _{min,n+1}	L _{min,n}	L _{max,n}							
100	343,3	3,43																		5,65E-05	5,65E-05
125	343,3	2,75																		6,32E-05	6,32E-05
160	343,3	2,15																		7,15E-05	7,15E-05
200	343,3	1,72																		7,99E-05	7,99E-05
250	343,3	1,37																		8,94E-05	8,94E-05
315	343,3	1,09	56,30	56,20	90,60	56,50	56,30	90,80	56,70	56,40	91,30	56,50	56,30	90,90	2,00E-05	1,34E-02	1,31E-02	7,02E-01	4,34E-04	7,96E-04	1,00E-04
400	343,3	0,86	49,20	48,60	87,20	49,30	49,00	88,00	48,80	48,80	87,30	49,10	48,80	87,50	2,00E-05	5,70E-03	5,51E-03	4,74E-01	4,08E-04	9,51E-04	1,13E-04
500	343,3	0,69	52,30	53,20	87,40	52,70	53,20	87,70	52,50	52,90	88,00	52,50	53,10	87,70	2,00E-05	8,43E-03	9,04E-03	4,85E-01	-1,24E-03	-3,62E-03	1,26E-04
630	343,3	0,54	45,30	44,80	81,90	44,70	45,70	80,10	45,80	45,70	81,60	45,27	45,40	81,20	2,00E-05	3,67E-03	3,72E-03	2,30E-01	-2,47E-04	-9,07E-04	1,42E-04
800	343,3	0,43	49,30	48,20	85,90	49,00	49,00	86,70	48,00	47,80	86,90	48,77	48,33	86,50	2,00E-05	5,49E-03	5,22E-03	4,23E-01	6,32E-04	2,94E-03	1,60E-04
1000	343,3	0,34	55,60	53,00	100,70	55,90	54,00	99,30	55,60	52,90	100,00	55,70	53,30	100,00	2,00E-05	1,22E-02	9,25E-03	2,00E+00	1,47E-03	8,57E-03	1,79E-04
1250	343,3	0,27	56,00	54,90	96,40	56,20	55,80	96,00	55,50	55,80	95,90	55,90	55,50	96,10	2,00E-05	1,25E-02	1,19E-02	1,28E+00	4,40E-04	3,20E-03	5,99E-05
1600	343,3	0,21	51,10	51,30	90,40	51,60	51,70	90,20	51,20	51,20	90,60	51,30	51,40	90,40	2,00E-05	7,35E-03	7,43E-03	6,62E-01	-1,28E-04	-1,20E-03	6,78E-05
2000	343,3	0,17	51,10	51,20	62,00	51,60	51,90	61,20	50,60	50,80	61,90	51,10	51,30	61,70	2,00E-05	7,18E-03	7,35E-03	2,43E-02	-6,87E-03	-8,01E-02	7,58E-05
2500	343,3	0,14	55,20	52,00	90,80	55,10	52,20	90,30	55,90	52,10	90,40	55,40	52,10	90,50	2,00E-05	1,18E-02	8,05E-03	6,70E-01	5,56E-03	8,09E-02	8,48E-05
3150	343,3	0,11	31,80	31,30	60,20	33,00	31,40	60,70	32,20	31,10	60,50	32,33	31,27	60,47	2,00E-05	8,27E-04	7,32E-04	2,11E-02	4,53E-03	8,31E-02	9,51E-05
4000	343,3	0,09	32,00	30,40	58,10	32,40	31,00	57,10	31,70	30,80	57,10	32,03	30,73	57,43	2,00E-05	7,99E-04	6,88E-04	1,49E-02	7,47E-03	1,74E-01	1,07E-04
5000	343,3	0,07	29,60	28,40	61,00	29,90	28,80	59,90	30,20	28,90	60,30	29,90	28,70	60,40	2,00E-05	6,25E-04	5,45E-04	2,09E-02	3,85E-03	1,12E-01	1,20E-04
6000	343,3	0,06	29,80	28,20	59,60	30,00	28,50	59,80	29,60	27,90	60,30	29,80	28,20	59,90	2,00E-05	1,85E+03	1,54E+03	5,92E+04	5,26E-03	1,84E-01	1,31E-04

Anexo D – Folhas de Cálculo para determinação do coeficiente de absorção sonora pelo tubo de ondas estacionárias: Amostra de Teste

D.1 Determinação do coeficiente de absorção sonora com base no Método 1

Frequência (Hz)	c_0 (m/s)	λ_0 (m)	k_0 "-Método 1	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	Sn	r	α_n	α_{dTubo}	α_d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	91,20	48,70	77,00	91,50	49,30	77,50	91,70	49,00	77,50	91,47	49,00	77,33	28,33	26,10	0,94	0,12	0,23	0,22
125	343,3	2,75	6,32E-05	70,00	58,80	88,00	70,50	59,80	88,40	70,40	59,40	88,40	70,30	59,33	88,25	28,92	27,91	0,94	0,12	0,22	0,24
160	343,3	2,15	7,15E-05	56,80	76,40	104,20	57,90	76,70	104,70	57,10	76,30	104,30	57,25	76,45	104,40	27,95	24,97	0,93	0,13	0,24	0,36
200	343,3	1,72	7,99E-05	42,20	67,90	92,40	43,00	69,60	93,00	43,10	67,90	92,90	42,75	68,45	92,75	24,30	16,41	0,89	0,21	0,36	0,42
250	343,3	1,37	8,94E-05	31,40	83,00	106,00	32,00	84,00	106,70	31,90	84,00	106,40	31,75	83,65	106,35	22,70	13,65	0,87	0,25	0,42	0,61
315	343,3	1,09	7,96E-04	23,00	54,90	72,30	23,60	55,50	72,70	23,80	55,60	72,50	23,47	55,33	72,50	17,17	7,22	0,79	0,38	0,61	0,68
400	343,3	0,86	9,51E-04	16,20	86,50	102,10	16,80	87,40	103,10	17,10	87,10	103,20	16,70	87,00	102,80	15,80	6,17	0,74	0,45	0,68	0,91
500	343,3	0,69	-3,62E-03	11,90	80,00	92,20	12,40	80,40	92,70	11,90	80,20	92,50	12,05	80,20	92,45	12,25	4,10	0,56	0,69	0,91	0,97
630	343,3	0,54	-9,07E-04	8,00	80,20	88,30	8,30	80,10	89,00	8,15	80,20	88,70	8,15	80,15	88,65	8,50	2,66	0,45	0,80	0,97	1,02
800	343,3	0,43	2,94E-03	27,50	86,40	90,90	27,00	86,70	91,20	25,60	86,40	91,10	26,70	86,50	91,05	4,55	1,69	0,30	0,91	1,02	1,04
1000	343,3	0,34	8,57E-03	19,30	83,60	84,70	19,60	83,90	85,60	19,30	83,80	84,70	19,40	83,75	85,00	1,25	1,15	0,10	0,99	1,04	1,03
1250	343,3	0,27	3,20E-03	23,20	86,40	89,20	23,50	87,00	89,70	23,50	87,50	89,80	23,40	86,95	89,55	2,60	1,35	0,17	0,97	1,03	0,94
1600	343,3	0,21	-1,20E-03	27,80	73,50	84,00	28,40	73,80	84,50	28,60	73,70	84,30	28,25	73,65	84,25	10,60	3,39	0,51	0,74	0,94	1,03
2000	343,3	0,17	-8,01E-02	2,40	47,60	52,50	2,60	48,00	52,90	2,50	48,10	52,70	2,50	47,90	52,70	4,80	1,74	0,18	0,97	1,03	1,02
2500	343,3	0,14	8,09E-02	2,50	84,50	88,10	2,70	85,10	88,90	2,60	85,10	88,20	2,60	84,90	88,40	3,50	1,50	0,30	0,91	1,02	1,02
3150	343,3	0,11	8,31E-02	2,60	52,00	54,20	2,70	52,30	54,50	2,70	51,40	55,60	2,65	51,90	54,75	2,85	1,39	0,25	0,94	1,02	1,01
4000	343,3	0,09	1,74E-01	3,20	53,20	55,00	3,20	53,40	55,00	3,10	52,40	55,20	3,15	53,00	55,05	2,05	1,27	0,35	0,88	1,01	1,02
5000	343,3	0,07	1,12E-01	2,40	48,00	50,00	2,30	47,30	50,10	2,40	46,20	50,50	2,35	47,15	50,20	3,05	1,42	0,29	0,91	1,02	0,99
6000	343,3	0,06	1,84E-01	2,40	47,00	50,00	2,30	46,80	49,80	2,40	46,90	49,90	2,36	46,90	49,90	3,00	1,41	0,41	0,84	0,99	

D.2 Determinação do coeficiente de absorção sonora com base no Método 2

Frequência(Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 2	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	S _n	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	91,20	48,70	77,00	91,50	49,30	77,50	91,70	49,00	77,50	91,47	49,00	77,33	28,33	26,10	0,94	0,12	0,23	0,22
125	343,3	2,75	6,32E-05	70,00	58,80	88,00	70,50	59,80	88,40	70,40	59,40	88,40	70,30	59,33	88,25	28,92	27,91	0,94	0,12	0,22	0,24
160	343,3	2,15	7,15E-05	56,80	76,40	104,20	57,90	76,70	104,70	57,10	76,30	104,30	57,25	76,45	104,40	27,95	24,97	0,93	0,13	0,24	0,36
200	343,3	1,72	7,99E-05	42,20	67,90	92,40	43,00	69,60	93,00	43,10	67,90	92,90	42,75	68,45	92,75	24,30	16,41	0,89	0,21	0,36	0,42
250	343,3	1,37	8,94E-05	31,40	83,00	106,00	32,00	84,00	106,70	31,90	84,00	106,40	31,75	83,65	106,35	22,70	13,65	0,87	0,25	0,42	0,66
315	343,3	1,09	1,00E-04	23,00	54,90	72,30	23,60	55,50	72,70	23,80	55,60	72,50	23,47	55,33	72,50	17,17	7,22	0,76	0,42	0,66	0,72
400	343,3	0,86	1,13E-04	16,20	86,50	102,10	16,80	87,40	103,10	17,10	87,10	103,20	16,70	87,00	102,80	15,80	6,17	0,72	0,48	0,72	0,86
500	343,3	0,69	1,26E-04	11,90	80,00	92,20	12,40	80,40	92,70	11,90	80,20	92,50	12,05	80,20	92,45	12,25	4,10	0,61	0,63	0,86	0,97
630	343,3	0,54	1,42E-04	8,00	80,20	88,30	8,30	80,10	89,00	8,15	80,20	88,70	8,15	80,15	88,65	8,50	2,66	0,45	0,79	0,97	1,02
800	343,3	0,43	1,60E-04	27,50	86,40	90,90	27,00	86,70	91,20	25,60	86,40	91,10	26,70	86,50	91,05	4,55	1,69	0,26	0,93	1,02	1,04
1000	343,3	0,34	1,79E-04	19,30	83,60	84,70	19,60	83,90	85,60	19,30	83,80	84,70	19,40	83,75	85,00	1,25	1,15	0,07	0,99	1,04	1,03
1250	343,3	0,27	5,99E-05	23,20	86,40	89,20	23,50	87,00	89,70	23,50	87,50	89,80	23,40	86,95	89,55	2,60	1,35	0,15	0,98	1,03	0,91
1600	343,3	0,21	6,78E-05	27,80	73,50	84,00	28,40	73,80	84,50	28,60	73,70	84,30	28,25	73,65	84,25	10,60	3,39	0,55	0,70	0,91	1,02
2000	343,3	0,17	7,58E-05	2,40	47,60	52,50	2,60	48,00	52,90	2,50	48,10	52,70	2,50	47,90	52,70	4,80	1,74	0,27	0,93	1,02	1,03
2500	343,3	0,14	8,48E-05	2,50	84,50	88,10	2,70	85,10	88,90	2,60	85,10	88,20	2,60	84,90	88,40	3,50	1,50	0,20	0,96	1,03	1,03
3150	343,3	0,11	9,51E-05	2,60	52,00	54,20	2,70	52,30	54,50	2,70	51,40	55,60	2,65	51,90	54,75	2,85	1,39	0,16	0,97	1,03	1,03
4000	343,3	0,09	1,07E-04	3,20	53,20	55,00	3,20	53,40	55,00	3,10	52,40	55,20	3,15	53,00	55,05	2,05	1,27	0,12	0,99	1,03	1,03
5000	343,3	0,07	1,20E-04	2,40	48,00	50,00	2,30	47,30	50,10	2,40	46,20	50,50	2,35	47,15	50,20	3,05	1,42	0,17	0,97	1,03	1,03
6000	343,3	0,06	1,31E-04	2,40	47,00	50,00	2,30	46,80	49,80	2,40	46,90	49,90	2,36	46,90	49,90	3,00	1,41	0,17	0,97	1,03	

Anexo E – Folhas de Cálculo para determinação do coeficiente de absorção sonora pelo tubo de ondas estacionárias: Material Talochado

E.1 Método 1

E.1.1 - Amostra 1

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ ''-Método 1	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	S _n	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	82,90	96,60	99,50	84,30	99,60	99,50	84,80	96,50	99,50	84,00	97,57	13,57	4,77	0,66	0,56	0,80	0,11
125	343,3	2,75	6,32E-05	84,70	76,30	110,10	85,00	75,90	109,20	86,20	75,70	109,10	85,30	75,97	109,47	33,50	47,32	0,97	0,06	0,11	0,13
160	343,3	2,15	7,15E-05	60,80	78,70	112,70	61,30	81,10	113,30	61,40	80,60	113,50	61,17	80,13	113,17	33,03	44,84	0,96	0,07	0,13	0,35
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,20	73,90	96,60	44,60	74,30	100,00	45,80	74,50	100,00	45,20	74,23	98,87	24,63	17,05	0,90	0,20	0,35	0,34
250	343,3	1,37	8,94E-05	34,10	87,60	112,50	34,00	87,50	112,30	34,10	87,70	112,60	34,07	87,60	112,47	24,87	17,51	0,90	0,19	0,34	0,50
315	343,3	1,09	7,96E-04	24,70	79,40	98,50	25,10	79,70	99,00	25,10	79,70	98,90	24,97	79,60	98,80	19,20	9,12	0,83	0,30	0,50	0,68
400	343,3	0,86	9,51E-04	18,30	94,70	110,50	18,40	95,00	110,90	18,20	94,90	110,80	18,30	94,87	110,73	15,87	6,21	0,75	0,44	0,68	0,99
500	343,3	0,69	-3,62E-03	13,00	88,50	97,00	13,30	88,50	97,00	13,10	88,50	97,00	13,13	88,50	97,00	8,50	2,66	0,41	0,83	0,99	1,02
630	343,3	0,54	-9,07E-04	13,30	87,90	92,40	13,30	87,90	92,50	13,40	88,30	92,90	13,33	88,03	92,60	4,57	1,69	0,25	0,94	1,02	0,97
800	343,3	0,43	2,94E-03	12,10	86,70	94,60	12,10	86,70	94,60	12,40	86,50	94,40	12,20	86,63	94,53	7,90	2,48	0,46	0,79	0,97	0,96
1000	343,3	0,34	8,57E-03	9,80	87,70	97,90	9,90	87,90	98,20	9,70	87,70	98,00	9,80	87,77	95,00	7,23	2,30	0,47	0,78	0,96	1,03
1250	343,3	0,27	3,20E-03	9,60	100,30	104,30	9,30	100,30	104,40	9,30	100,30	104,30	9,40	100,30	104,33	4,03	1,59	0,24	0,94	1,03	0,97
1600	343,3	0,21	-1,20E-03	6,80	71,70	80,10	6,60	71,80	81,60	7,00	71,70	80,00	6,80	71,73	80,57	8,83	2,76	0,46	0,79	0,97	1,02
2000	343,3	0,17	-8,01E-02	4,30	53,50	64,70	4,40	54,70	65,90	5,30	55,00	66,30	4,67	54,40	65,63	11,23	3,64	0,27	0,93	1,02	-0,68
2500	343,3	0,14	8,09E-02	4,10	77,20	88,60	4,20	77,60	89,30	4,20	77,80	89,50	4,17	77,53	89,13	11,60	3,80	1,14	-0,31	-0,68	0,13
3150	343,3	0,11	8,31E-02	3,20	52,70	58,30	3,30	44,70	58,40	3,30	44,70	58,40	3,27	47,37	58,37	11,00	3,55	0,96	0,07	0,13	-4,59
4000	343,3	0,09	1,74E-01	2,50	53,40	64,80	2,60	50,90	64,90	2,60	51,00	65,00	2,57	51,77	64,90	13,13	4,54	1,56	-1,43	-4,59	0,07
5000	343,3	0,07	1,12E-01	2,10	49,90	59,90	2,10	46,20	59,80	2,10	46,30	59,90	2,10	47,47	59,87	12,40	4,17	0,98	0,04	0,07	-2,83
6000	343,3	0,06	1,84E-01	1,90	34,30	49,80	1,80	34,40	49,50	2,00	34,60	49,60	1,90	34,43	49,63	15,20	5,75	1,42	-1,00	-2,83	

E.1.2 - Amostra 2

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 1	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	Sn	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	84,90	96,60	99,50	84,40	96,70	99,50	84,70	96,50	99,50	84,67	96,60	11,93	3,95	0,60	0,64	0,87	0,11
125	343,3	2,75	6,32E-05	85,10	76,60	110,00	84,80	76,90	110,40	86,80	74,70	108,70	85,57	76,07	109,70	33,63	48,05	0,97	0,06	0,11	0,12
160	343,3	2,15	7,15E-05	60,60	80,50	113,20	60,50	80,30	112,90	60,70	78,50	113,40	60,60	79,77	113,17	33,40	46,77	0,97	0,07	0,12	0,39
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,50	74,90	99,80	45,50	75,00	99,80	45,00	79,30	100,10	45,33	76,40	99,90	23,50	14,96	0,88	0,22	0,39	0,36
250	343,3	1,37	8,94E-05	34,00	88,60	112,80	33,80	89,20	113,30	33,50	88,20	112,60	33,77	88,67	112,90	24,23	16,28	0,89	0,21	0,36	0,52
315	343,3	1,09	7,96E-04	24,70	79,50	98,90	24,80	79,30	98,70	24,30	81,90	99,50	24,60	80,23	99,03	18,80	8,71	0,83	0,32	0,52	0,88
400	343,3	0,86	9,51E-04	18,20	97,40	108,90	18,00	97,50	108,90	18,20	98,20	108,50	18,13	97,70	108,77	11,07	3,58	0,58	0,66	0,88	1,01
500	343,3	0,69	-3,62E-03	14,90	88,70	95,60	15,90	89,10	95,90	15,80	90,00	95,90	15,53	89,27	95,80	6,53	2,12	0,32	0,90	1,01	1,00
630	343,3	0,54	-9,07E-04	15,00	85,20	92,60	15,10	85,30	92,70	15,60	86,10	92,80	15,23	85,53	92,70	7,17	2,28	0,38	0,86	1,00	0,90
800	343,3	0,43	2,94E-03	11,90	84,20	94,60	12,20	84,40	94,80	12,30	84,80	94,70	12,13	84,47	94,70	10,23	3,25	0,57	0,68	0,90	0,95
1000	343,3	0,34	8,57E-03	9,50	86,80	99,40	9,40	88,30	100,90	9,80	87,20	99,50	9,57	87,43	95,00	7,57	2,39	0,48	0,77	0,95	1,02
1250	343,3	0,27	3,20E-03	9,10	100,20	104,60	8,90	100,30	104,60	9,00	100,30	104,50	9,00	100,27	104,57	4,30	1,64	0,26	0,93	1,02	0,98
1600	343,3	0,21	-1,20E-03	6,70	72,50	80,50	6,90	72,10	80,10	7,00	72,20	79,80	6,87	72,27	80,13	7,87	2,47	0,42	0,83	0,98	1,03
2000	343,3	0,17	-8,01E-02	5,30	55,20	65,50	5,20	56,90	67,30	5,10	56,40	66,80	5,20	56,17	66,53	10,37	3,30	0,23	0,95	1,03	-0,33
2500	343,3	0,14	8,09E-02	4,10	78,80	89,60	4,20	79,50	90,30	4,10	79,80	90,60	4,13	79,37	90,17	10,80	3,47	1,08	-0,16	-0,33	-0,42
3150	343,3	0,11	8,31E-02	3,30	44,90	57,90	3,20	44,60	57,80	3,20	44,50	57,80	3,23	44,67	57,83	13,17	4,55	1,10	-0,20	-0,42	-5,55
4000	343,3	0,09	1,74E-01	2,60	51,10	64,90	2,60	51,40	65,10	2,60	51,50	65,10	2,60	51,33	65,03	13,70	4,84	1,62	-1,64	-5,55	0,52
5000	343,3	0,07	1,12E-01	2,10	46,70	60,20	2,10	56,30	59,80	2,00	47,20	60,30	2,07	50,07	60,10	10,03	3,17	0,83	0,31	0,52	-3,63
6000	343,3	0,06	1,84E-01	2,10	34,40	49,30	2,00	34,30	50,10	2,00	34,60	49,50	2,03	34,43	49,63	15,20	5,75	1,49	-1,21	-3,63	

E.1.3 - Amostra 3

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 1										Média			ΔL	Sn	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	84,30	96,90	99,50	84,10	96,90	99,50	83,80	97,10	99,50	84,07	96,97	12,90	4,42	0,64	0,59	0,83	0,12
125	343,3	2,75	6,32E-05	85,80	77,00	109,70	85,10	77,30	110,20	84,80	77,50	110,70	85,23	77,27	110,20	32,93	44,33	0,97	0,07	0,12	0,13
160	343,3	2,15	7,15E-05	61,00	80,00	113,10	61,00	79,60	113,00	60,30	79,50	112,70	60,77	79,70	112,93	33,23	45,88	0,97	0,07	0,13	0,34
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,30	74,60	98,90	45,30	74,50	99,80	45,30	74,90	99,60	45,30	74,67	99,43	24,77	17,31	0,90	0,19	0,34	0,33
250	343,3	1,37	8,94E-05	33,90	87,60	113,10	33,60	88,80	114,00	33,50	88,80	114,00	33,67	88,40	113,70	25,30	18,41	0,90	0,19	0,33	0,52
315	343,3	1,09	7,96E-04	24,60	79,70	98,80	24,70	79,70	98,60	24,50	79,60	98,20	24,60	79,67	98,53	18,87	8,78	0,83	0,32	0,52	0,71
400	343,3	0,86	9,51E-04	18,10	95,20	110,40	18,30	95,20	110,50	18,10	94,90	110,20	18,17	95,10	110,37	15,27	5,80	0,73	0,47	0,71	0,98
500	343,3	0,69	-3,62E-03	13,00	88,40	97,30	13,10	88,70	97,60	13,10	89,20	97,90	13,07	88,77	97,60	8,83	2,76	0,43	0,82	0,98	1,02
630	343,3	0,54	-9,07E-04	12,80	88,10	92,60	13,20	88,40	93,00	13,40	88,60	93,20	13,13	88,37	92,93	4,57	1,69	0,25	0,94	1,02	0,97
800	343,3	0,43	2,94E-03	12,00	86,80	94,50	12,10	86,90	94,70	12,20	86,80	94,70	12,10	86,83	94,63	7,80	2,45	0,45	0,80	0,97	0,96
1000	343,3	0,34	8,57E-03	9,70	87,40	98,20	9,90	88,70	99,60	9,70	88,80	99,80	9,77	88,30	95,50	7,20	2,29	0,46	0,79	0,96	1,02
1250	343,3	0,27	3,20E-03	9,60	100,30	104,50	9,80	100,30	104,50	9,70	100,30	104,40	9,70	100,30	104,47	4,17	1,62	0,25	0,94	1,02	0,97
1600	343,3	0,21	-1,20E-03	7,20	72,10	80,60	7,10	71,70	80,50	7,20	71,90	80,70	7,17	71,90	80,60	8,70	2,72	0,45	0,79	0,97	1,03
2000	343,3	0,17	-8,01E-02	5,50	57,10	67,10	5,50	57,30	67,40	5,40	56,00	65,70	5,47	56,80	66,73	9,93	3,14	0,22	0,95	1,03	-0,44
2500	343,3	0,14	8,09E-02	4,30	77,20	87,90	4,30	77,80	88,50	4,30	76,80	87,50	4,30	77,27	87,97	10,70	3,43	1,10	-0,21	-0,44	-0,45
3150	343,3	0,11	8,31E-02	3,40	45,20	58,10	3,40	45,00	57,90	3,30	45,00	57,80	3,37	45,07	57,93	12,87	4,40	1,10	-0,21	-0,45	-5,62
4000	343,3	0,09	1,74E-01	2,70	51,70	65,00	2,70	51,60	64,90	2,60	51,50	64,80	2,67	51,60	64,90	13,30	4,62	1,63	-1,65	-5,62	-0,22
5000	343,3	0,07	1,12E-01	2,20	46,40	59,50	2,20	46,80	60,20	2,20	46,40	59,70	2,20	46,53	59,80	13,27	4,61	1,05	-0,11	-0,22	-3,49
6000	343,3	0,06	1,84E-01	1,90	34,70	50,00	2,10	34,50	49,80	2,00	34,60	49,90	2,00	34,60	49,90	15,30	5,82	1,47	-1,17	-3,49	

E.2 – Método 2

E.2.1 - Amostra 1

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 2	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	Sn	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	82,90	96,60	99,50	84,30	99,60	99,50	84,80	96,50	99,50	84,00	97,57	13,57	4,77	0,66	0,56	0,80	0,11
125	343,3	2,75	6,32E-05	84,70	76,30	110,10	85,00	75,90	109,20	86,20	75,70	109,10	85,30	75,97	109,47	33,50	47,32	0,97	0,06	0,11	0,13
160	343,3	2,15	7,15E-05	60,80	78,70	112,70	61,30	81,10	113,30	61,40	80,60	113,50	61,17	80,13	113,17	33,03	44,84	0,96	0,07	0,13	0,35
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,20	73,90	96,60	44,60	74,30	100,00	45,80	74,50	100,00	45,20	74,23	98,87	24,63	17,05	0,90	0,20	0,35	0,34
250	343,3	1,37	8,94E-05	34,10	87,60	112,50	34,00	87,50	112,30	34,10	87,70	112,60	34,07	87,60	112,47	24,87	17,51	0,90	0,19	0,34	0,57
315	343,3	1,09	1,00E-04	24,70	79,40	98,50	25,10	79,70	99,00	25,10	79,70	98,90	24,97	79,60	98,80	19,20	9,12	0,81	0,35	0,57	0,71
400	343,3	0,86	1,13E-04	18,30	94,70	110,50	18,40	95,00	110,90	18,20	94,90	110,80	18,30	94,87	110,73	15,87	6,21	0,73	0,47	0,71	0,97
500	343,3	0,69	1,26E-04	13,00	88,50	97,00	13,30	88,50	97,00	13,10	88,50	97,00	13,13	88,50	97,00	8,50	2,66	0,46	0,79	0,97	1,02
630	343,3	0,54	1,42E-04	13,30	87,90	92,40	13,30	87,90	92,50	13,40	88,30	92,90	13,33	88,03	92,60	4,57	1,69	0,26	0,93	1,02	0,98
800	343,3	0,43	1,60E-04	12,10	86,70	94,60	12,10	86,70	94,60	12,40	86,50	94,40	12,20	86,63	94,53	7,90	2,48	0,43	0,82	0,98	0,99
1000	343,3	0,34	1,79E-04	9,80	87,70	97,90	9,90	87,90	98,20	9,70	87,70	98,00	9,80	87,77	95,00	7,23	2,30	0,40	0,84	0,99	1,03
1250	343,3	0,27	5,99E-05	9,60	100,30	104,30	9,30	100,30	104,40	9,30	100,30	104,30	9,40	100,30	104,33	4,03	1,59	0,23	0,95	1,03	0,96
1600	343,3	0,21	6,78E-05	6,80	71,70	80,10	6,60	71,80	81,60	7,00	71,70	80,00	6,80	71,73	80,57	8,83	2,76	0,47	0,78	0,96	0,90
2000	343,3	0,17	7,58E-05	4,30	53,50	64,70	4,40	54,70	65,90	5,30	55,00	66,30	4,67	54,40	65,63	11,23	3,64	0,57	0,68	0,90	0,88
2500	343,3	0,14	8,48E-05	4,10	77,20	88,60	4,20	77,60	89,30	4,20	77,80	89,50	4,17	77,53	89,13	11,60	3,80	0,58	0,66	0,88	0,90
3150	343,3	0,11	9,51E-05	3,20	52,70	58,30	3,30	44,70	58,40	3,30	44,70	58,40	3,27	47,37	58,37	11,00	3,55	0,56	0,69	0,90	0,83
4000	343,3	0,09	1,07E-04	2,50	53,40	64,80	2,60	50,90	64,90	2,60	51,00	65,00	2,57	51,77	64,90	13,13	4,54	0,64	0,59	0,83	0,86
5000	343,3	0,07	1,20E-04	2,10	49,90	59,90	2,10	46,20	59,80	2,10	46,30	59,90	2,10	47,47	59,87	12,40	4,17	0,61	0,62	0,86	0,75
6000	343,3	0,06	1,31E-04	1,90	34,30	49,80	1,80	34,40	49,50	2,00	34,60	49,60	1,90	34,43	49,63	15,20	5,75	0,70	0,50	0,75	

E.2.2 - Amostra 2

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 2	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	Sn	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	84,90	96,60	99,50	84,40	96,70	99,50	84,70	96,50	99,50	84,67	96,60	11,93	3,95	0,60	0,64	0,87	0,11
125	343,3	2,75	6,32E-05	85,10	76,60	110,00	84,80	76,90	110,40	86,80	74,70	108,70	85,57	76,07	109,70	33,63	48,05	0,97	0,06	0,11	0,12
160	343,3	2,15	7,15E-05	60,60	80,50	113,20	60,50	80,30	112,90	60,70	78,50	113,40	60,60	79,77	113,17	33,40	46,77	0,97	0,07	0,12	0,39
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,50	74,90	99,80	45,50	75,00	99,80	45,00	79,30	100,10	45,33	76,40	99,90	23,50	14,96	0,88	0,22	0,39	0,36
250	343,3	1,37	8,94E-05	34,00	88,60	112,80	33,80	89,20	113,30	33,50	88,20	112,60	33,77	88,67	112,90	24,23	16,28	0,89	0,21	0,36	0,58
315	343,3	1,09	1,00E-04	24,70	79,50	98,90	24,80	79,30	98,70	24,30	81,90	99,50	24,60	80,23	99,03	18,80	8,71	0,80	0,36	0,58	0,90
400	343,3	0,86	1,13E-04	18,20	97,40	108,90	18,00	97,50	108,90	18,20	98,20	108,50	18,13	97,70	108,77	11,07	3,58	0,57	0,68	0,90	1,00
500	343,3	0,69	1,26E-04	14,90	88,70	95,60	15,90	89,10	95,90	15,80	90,00	95,90	15,53	89,27	95,80	6,53	2,12	0,36	0,87	1,00	0,99
630	343,3	0,54	1,42E-04	15,00	85,20	92,60	15,10	85,30	92,70	15,60	86,10	92,80	15,23	85,53	92,70	7,17	2,28	0,39	0,85	0,99	0,92
800	343,3	0,43	1,60E-04	11,90	84,20	94,60	12,20	84,40	94,80	12,30	84,80	94,70	12,13	84,47	94,70	10,23	3,25	0,53	0,72	0,92	0,99
1000	343,3	0,34	1,79E-04	9,50	86,80	99,40	9,40	88,30	100,90	9,80	87,20	99,50	9,57	87,43	95,00	7,57	2,39	0,41	0,83	0,99	1,03
1250	343,3	0,27	5,99E-05	9,10	100,20	104,60	8,90	100,30	104,60	9,00	100,30	104,50	9,00	100,27	104,57	4,30	1,64	0,24	0,94	1,03	0,98
1600	343,3	0,21	6,78E-05	6,70	72,50	80,50	6,90	72,10	80,10	7,00	72,20	79,80	6,87	72,27	80,13	7,87	2,47	0,42	0,82	0,98	0,92
2000	343,3	0,17	7,58E-05	5,30	55,20	65,50	5,20	56,90	67,30	5,10	56,40	66,80	5,20	56,17	66,53	10,37	3,30	0,54	0,71	0,92	0,91
2500	343,3	0,14	8,48E-05	4,10	78,80	89,60	4,20	79,50	90,30	4,10	79,80	90,60	4,13	79,37	90,17	10,80	3,47	0,55	0,69	0,91	0,83
3150	343,3	0,11	9,51E-05	3,30	44,90	57,90	3,20	44,60	57,80	3,20	44,50	57,80	3,23	44,67	57,83	13,17	4,55	0,64	0,59	0,83	0,81
4000	343,3	0,09	1,07E-04	2,60	51,10	64,90	2,60	51,40	65,10	2,60	51,50	65,10	2,60	51,33	65,03	13,70	4,84	0,66	0,57	0,81	0,93
5000	343,3	0,07	1,20E-04	2,10	46,70	60,20	2,10	56,30	59,80	2,00	47,20	60,30	2,07	50,07	60,10	10,03	3,17	0,52	0,73	0,93	0,75
6000	343,3	0,06	1,31E-04	2,10	34,40	49,30	2,00	34,30	50,10	2,00	34,60	49,50	2,03	34,43	49,63	15,20	5,75	0,70	0,50	0,75	

E.2.3 - Amostra 3

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 2										Média			ΔL	Sn	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmax _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmax _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmax _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmax _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	84,30	96,90	99,50	84,10	96,90	99,50	83,80	97,10	99,50	84,07	96,97	12,90	4,42	0,64	0,59	0,83	0,12
125	343,3	2,75	6,32E-05	85,80	77,00	109,70	85,10	77,30	110,20	84,80	77,50	110,70	85,23	77,27	110,20	32,93	44,33	0,97	0,07	0,12	0,13
160	343,3	2,15	7,15E-05	61,00	80,00	113,10	61,00	79,60	113,00	60,30	79,50	112,70	60,77	79,70	112,93	33,23	45,88	0,97	0,07	0,13	0,34
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,30	74,60	98,90	45,30	74,50	99,80	45,30	74,90	99,60	45,30	74,67	99,43	24,77	17,31	0,90	0,19	0,34	0,33
250	343,3	1,37	8,94E-05	33,90	87,60	113,10	33,60	88,80	114,00	33,50	88,80	114,00	33,67	88,40	113,70	25,30	18,41	0,90	0,19	0,33	0,58
315	343,3	1,09	1,00E-04	24,60	79,70	98,80	24,70	79,70	98,60	24,50	79,60	98,20	24,60	79,67	98,53	18,87	8,78	0,80	0,36	0,58	0,74
400	343,3	0,86	1,13E-04	18,10	95,20	110,40	18,30	95,20	110,50	18,10	94,90	110,20	18,17	95,10	110,37	15,27	5,80	0,71	0,50	0,74	0,96
500	343,3	0,69	1,26E-04	13,00	88,40	97,30	13,10	88,70	97,60	13,10	89,20	97,90	13,07	88,77	97,60	8,83	2,76	0,47	0,78	0,96	1,02
630	343,3	0,54	1,42E-04	12,80	88,10	92,60	13,20	88,40	93,00	13,40	88,60	93,20	13,13	88,37	92,93	4,57	1,69	0,26	0,93	1,02	0,98
800	343,3	0,43	1,60E-04	12,00	86,80	94,50	12,10	86,90	94,70	12,20	86,80	94,70	12,10	86,83	94,63	7,80	2,45	0,42	0,82	0,98	0,99
1000	343,3	0,34	1,79E-04	9,70	87,40	98,20	9,90	88,70	99,60	9,70	88,80	99,80	9,77	88,30	95,50	7,20	2,29	0,39	0,85	0,99	1,03
1250	343,3	0,27	5,99E-05	9,60	100,30	104,50	9,80	100,30	104,50	9,70	100,30	104,40	9,70	100,30	104,47	4,17	1,62	0,24	0,94	1,03	0,96
1600	343,3	0,21	6,78E-05	7,20	72,10	80,60	7,10	71,70	80,50	7,20	71,90	80,70	7,17	71,90	80,60	8,70	2,72	0,46	0,79	0,96	0,93
2000	343,3	0,17	7,58E-05	5,50	57,10	67,10	5,50	57,30	67,40	5,40	56,00	65,70	5,47	56,80	66,73	9,93	3,14	0,52	0,73	0,93	0,91
2500	343,3	0,14	8,48E-05	4,30	77,20	87,90	4,30	77,80	88,50	4,30	76,80	87,50	4,30	77,27	87,97	10,70	3,43	0,55	0,70	0,91	0,84
3150	343,3	0,11	9,51E-05	3,40	45,20	58,10	3,40	45,00	57,90	3,30	45,00	57,80	3,37	45,07	57,93	12,87	4,40	0,63	0,60	0,84	0,82
4000	343,3	0,09	1,07E-04	2,70	51,70	65,00	2,70	51,60	64,90	2,60	51,50	64,80	2,67	51,60	64,90	13,30	4,62	0,64	0,58	0,82	0,82
5000	343,3	0,07	1,20E-04	2,20	46,40	59,50	2,20	46,80	60,20	2,20	46,40	59,70	2,20	46,53	59,80	13,27	4,61	0,64	0,59	0,82	0,74
6000	343,3	0,06	1,31E-04	1,90	34,70	50,00	2,10	34,50	49,80	2,00	34,60	49,90	2,00	34,60	49,90	15,30	5,82	0,71	0,50	0,74	

Anexo F – Folhas de Cálculo para determinação do coeficiente de absorção sonora pelo tubo de ondas estacionárias: Material Projectado

F.1 Método 1

F.1.1 - Amostra 1

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ ''-Método 1	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	S _n	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	83,60	97,30	99,50	83,10	97,40	99,50	83,10	97,30	99,50	83,27	97,33	14,07	5,05	0,68	0,54	0,78	0,10
125	343,3	2,75	6,32E-05	84,00	78,10	111,60	83,00	78,60	112,40	83,10	77,30	112,60	83,37	78,00	112,20	34,20	51,29	0,97	0,06	0,10	0,11
160	343,3	2,15	7,15E-05	59,80	78,30	112,30	59,90	78,30	112,30	59,80	77,20	112,50	59,83	77,93	112,37	34,43	52,68	0,97	0,06	0,11	0,35
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,10	75,20	99,60	44,90	75,00	99,50	44,80	74,90	99,50	44,93	75,03	99,53	24,50	16,79	0,89	0,20	0,35	0,28
250	343,3	1,37	8,94E-05	33,60	87,70	114,60	33,30	88,30	114,70	33,00	87,70	115,30	33,30	87,90	114,87	26,97	22,30	0,92	0,15	0,28	0,41
315	343,3	1,09	7,96E-04	25,00	77,40	98,40	24,70	77,30	98,10	24,50	76,60	98,00	24,73	77,10	98,17	21,07	11,31	0,87	0,24	0,41	0,64
400	343,3	0,86	9,51E-04	18,60	94,00	110,50	18,50	94,10	110,70	18,20	93,90	110,70	18,43	94,00	110,63	16,63	6,79	0,77	0,41	0,64	0,90
500	343,3	0,69	-3,62E-03	13,70	85,60	98,30	13,70	86,10	98,80	13,70	85,30	98,30	13,70	85,67	98,47	12,80	4,37	0,57	0,68	0,90	0,96
630	343,3	0,54	-9,07E-04	9,70	86,70	95,70	10,10	85,50	94,90	9,80	85,70	95,00	9,87	85,97	95,20	9,23	2,90	0,48	0,77	0,96	1,02
800	343,3	0,43	2,94E-03	9,30	90,90	95,30	9,10	91,10	95,50	9,30	91,20	95,50	9,23	91,07	95,43	4,37	1,65	0,26	0,93	1,02	0,99
1000	343,3	0,34	8,57E-03	9,00	90,60	96,70	8,60	90,70	96,70	8,70	90,60	96,60	8,77	90,63	96,67	6,03	2,00	0,39	0,85	0,99	1,03
1250	343,3	0,27	3,20E-03	4,90	103,80	105,60	4,90	103,80	105,60	5,00	103,80	105,70	4,93	103,80	105,63	1,83	1,23	0,11	0,99	1,03	1,03
1600	343,3	0,21	-1,20E-03	5,70	75,30	78,80	6,20	75,70	79,10	6,30	74,60	78,50	6,07	75,20	78,80	3,60	1,51	0,20	0,96	1,03	1,03
2000	343,3	0,17	-8,01E-02	5,20	54,10	60,10	5,10	54,60	60,30	5,10	56,50	62,40	5,13	55,07	60,93	5,87	1,96	0,14	0,98	1,03	0,66
2500	343,3	0,14	8,09E-02	4,20	81,30	88,30	4,20	80,60	87,70	4,20	80,90	87,90	4,20	80,93	87,97	7,03	2,25	0,76	0,43	0,66	0,53
3150	343,3	0,11	8,31E-02	3,20	46,90	56,10	3,20	47,50	56,50	3,30	47,00	56,10	3,23	47,13	56,23	9,10	2,85	0,82	0,32	0,53	-1,44
4000	343,3	0,09	1,74E-01	2,50	54,70	64,80	2,50	54,70	64,80	2,60	54,80	64,80	2,53	54,73	64,80	10,07	3,19	1,26	-0,59	-1,44	0,55
5000	343,3	0,07	1,12E-01	2,00	49,30	59,10	2,10	49,80	59,70	2,10	49,30	59,10	2,07	49,47	59,30	9,83	3,10	0,81	0,34	0,55	-1,86
6000	343,3	0,06	1,84E-01	2,00	36,50	48,90	2,00	36,80	49,10	2,20	36,40	49,00	2,07	36,57	49,00	12,43	4,18	1,31	-0,72	-1,86	

F.1.2 - Amostra 2

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 1	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	Sn	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	80,70	97,40	99,50	82,90	97,50	99,50	83,00	97,20	99,50	82,20	97,37	15,17	5,73	0,71	0,49	0,74	0,15
125	343,3	2,75	6,32E-05	79,50	83,00	113,20	83,10	80,00	112,30	83,20	80,00	112,40	81,93	81,00	112,63	31,63	38,17	0,96	0,08	0,15	0,18
160	343,3	2,15	7,15E-05	59,30	80,50	111,50	59,30	81,90	112,10	59,60	81,70	112,30	59,40	81,37	111,97	30,60	33,88	0,95	0,10	0,18	0,39
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,20	76,10	99,30	45,30	76,20	99,50	45,30	76,00	99,60	45,27	76,10	99,47	23,37	14,73	0,88	0,23	0,39	0,32
250	343,3	1,37	8,94E-05	33,30	89,30	114,70	33,50	88,90	114,50	33,40	89,10	114,70	33,40	89,10	114,63	25,53	18,91	0,90	0,18	0,32	0,49
315	343,3	1,09	7,96E-04	24,60	78,10	97,40	24,90	78,50	98,10	25,20	78,60	98,20	24,90	78,40	97,90	19,50	9,44	0,84	0,29	0,49	0,69
400	343,3	0,86	9,51E-04	18,60	95,40	110,20	18,80	95,50	110,30	18,80	93,70	110,60	18,73	94,87	110,37	15,50	5,96	0,74	0,45	0,69	0,94
500	343,3	0,69	-3,62E-03	15,00	86,70	97,60	15,20	86,50	97,60	15,10	86,50	97,60	15,10	86,57	97,60	11,03	3,56	0,50	0,75	0,94	0,93
630	343,3	0,54	-9,07E-04	12,10	83,90	94,10	12,30	84,10	94,50	12,20	83,80	94,20	12,20	83,93	94,27	10,33	3,29	0,52	0,73	0,93	0,99
800	343,3	0,43	2,94E-03	9,10	89,30	96,30	9,20	89,80	96,50	9,00	89,30	96,10	9,10	89,47	96,30	6,83	2,20	0,39	0,84	0,99	0,98
1000	343,3	0,34	8,57E-03	8,50	90,50	97,40	8,80	90,40	97,30	8,50	90,20	96,90	8,60	90,37	97,20	6,83	2,20	0,43	0,81	0,98	1,04
1250	343,3	0,27	3,20E-03	5,60	103,60	105,20	5,10	103,70	105,30	5,40	103,60	105,30	5,37	103,63	105,27	1,63	1,21	0,10	0,99	1,04	1,03
1600	343,3	0,21	-1,20E-03	5,80	73,40	77,10	6,30	73,80	77,20	6,20	72,80	77,00	6,10	73,33	77,10	3,77	1,54	0,21	0,96	1,03	1,03
2000	343,3	0,17	-8,01E-02	5,10	56,80	63,40	5,10	55,30	62,20	5,10	56,60	63,40	5,10	56,23	63,00	6,77	2,18	0,16	0,97	1,03	0,47
2500	343,3	0,14	8,09E-02	4,20	77,60	85,30	4,30	80,40	88,50	4,20	79,20	87,30	4,23	79,07	87,03	7,97	2,50	0,85	0,28	0,47	0,33
3150	343,3	0,11	8,31E-02	3,30	46,70	56,90	3,30	47,40	57,40	3,30	48,10	58,00	3,30	47,40	57,43	10,03	3,17	0,90	0,19	0,33	-2,32
4000	343,3	0,09	1,74E-01	2,60	54,00	64,80	2,60	54,10	64,90	2,60	54,30	65,10	2,60	54,13	64,93	10,80	3,47	1,36	-0,86	-2,32	0,37
5000	343,3	0,07	1,12E-01	2,10	48,60	59,40	2,10	48,50	59,40	2,10	48,60	59,40	2,10	48,57	59,40	10,83	3,48	0,89	0,21	0,37	-2,26
6000	343,3	0,06	1,84E-01	2,00	35,80	48,80	2,10	35,10	48,60	2,00	35,60	48,90	2,03	35,50	48,77	13,27	4,61	1,36	-0,84	-2,26	

F.1.3 - Amostra 3

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 1	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	Sn	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	80,30	96,60	99,50	82,70	96,90	99,50	83,50	96,90	99,50	82,17	96,80	14,63	5,39	0,69	0,52	0,76	0,10
125	343,3	2,75	6,32E-05	82,30	77,20	112,40	84,20	76,70	111,10	84,50	76,70	111,10	83,67	76,87	111,53	34,67	54,12	0,97	0,05	0,10	0,09
160	343,3	2,15	7,15E-05	59,50	74,90	110,90	60,40	76,80	112,40	59,90	77,60	112,50	59,93	76,43	111,93	35,50	59,57	0,98	0,05	0,09	0,30
200	343,3	1,72	7,99E-05	44,70	73,00	98,80	45,10	72,80	99,50	45,00	73,70	99,60	44,93	73,17	99,30	26,13	20,26	0,91	0,17	0,30	0,31
250	343,3	1,37	8,94E-05	33,40	88,10	113,90	33,60	87,50	113,50	33,30	88,50	114,40	33,43	88,03	113,93	25,90	19,72	0,91	0,17	0,31	0,46
315	343,3	1,09	7,96E-04	25,00	77,90	98,00	24,90	78,10	98,10	25,20	78,30	98,30	25,03	78,10	98,13	20,03	10,04	0,85	0,27	0,46	0,62
400	343,3	0,86	9,51E-04	18,60	93,70	110,60	16,10	93,90	111,10	18,60	93,90	111,00	17,77	93,83	110,90	17,07	7,13	0,78	0,39	0,62	0,90
500	343,3	0,69	-3,62E-03	13,80	85,10	98,10	13,70	85,60	98,50	13,60	85,90	98,60	13,70	85,53	98,40	12,87	4,40	0,57	0,67	0,90	1,00
630	343,3	0,54	-9,07E-04	10,90	86,30	93,50	10,90	86,70	93,90	11,20	86,70	93,90	11,00	86,57	93,77	7,20	2,29	0,38	0,85	1,00	1,00
800	343,3	0,43	2,94E-03	10,60	88,80	94,80	10,70	89,20	95,30	10,30	89,20	95,20	10,53	89,07	95,10	6,03	2,00	0,36	0,87	1,00	0,97
1000	343,3	0,34	8,57E-03	8,80	89,90	97,00	8,70	90,10	97,20	8,80	90,10	97,30	8,77	90,03	97,17	7,13	2,27	0,45	0,80	0,97	1,03
1250	343,3	0,27	3,20E-03	7,20	102,20	105,50	7,00	102,30	105,50	7,20	102,30	105,50	7,13	102,27	105,50	3,23	1,45	0,19	0,96	1,03	1,01
1600	343,3	0,21	-1,20E-03	6,80	72,60	78,40	5,90	73,60	79,20	6,00	73,60	79,20	6,23	73,27	78,93	5,67	1,92	0,31	0,90	1,01	1,03
2000	343,3	0,17	-8,01E-02	5,00	56,80	64,80	4,90	56,30	64,40	4,70	55,90	65,20	4,87	56,33	64,80	8,47	2,65	0,21	0,96	1,03	0,51
2500	343,3	0,14	8,09E-02	4,10	77,90	86,10	3,90	77,90	85,70	4,00	78,10	86,40	4,00	77,97	86,07	8,10	2,54	0,83	0,31	0,51	0,27
3150	343,3	0,11	8,31E-02	3,30	46,70	57,00	3,20	46,10	56,70	3,20	46,30	56,80	3,23	46,37	56,83	10,47	3,34	0,92	0,15	0,27	-3,19
4000	343,3	0,09	1,74E-01	2,60	53,50	64,90	2,70	53,00	64,60	2,60	53,20	64,70	2,63	53,23	64,73	11,50	3,76	1,45	-1,10	-3,19	0,20
5000	343,3	0,07	1,12E-01	2,20	47,50	58,90	2,20	47,70	59,20	2,10	48,00	59,60	2,17	47,73	59,23	11,50	3,76	0,94	0,11	0,20	-2,04
6000	343,3	0,06	1,84E-01	2,00	35,80	48,50	2,10	35,40	48,60	2,00	35,70	48,60	2,03	35,63	48,57	12,93	4,43	1,33	-0,78	-2,04	

F.2 – Método 2

F.2.1 - Amostra 1

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ ''-Método 2	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	S _n	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	83,60	97,30	99,50	83,10	97,40	99,50	83,10	97,30	99,50	83,27	97,33	14,07	5,05	0,68	0,54	0,78	0,10
125	343,3	2,75	6,32E-05	84,00	78,10	111,60	83,00	78,60	112,40	83,10	77,30	112,60	83,37	78,00	112,20	34,20	51,29	0,97	0,06	0,10	0,11
160	343,3	2,15	7,15E-05	59,80	78,30	112,30	59,90	78,30	112,30	59,80	77,20	112,50	59,83	77,93	112,37	34,43	52,68	0,97	0,06	0,11	0,35
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,10	75,20	99,60	44,90	75,00	99,50	44,80	74,90	99,50	44,93	75,03	99,53	24,50	16,79	0,89	0,20	0,35	0,28
250	343,3	1,37	8,94E-05	33,60	87,70	114,60	33,30	88,30	114,70	33,00	87,70	115,30	33,30	87,90	114,87	26,97	22,30	0,92	0,15	0,28	0,49
315	343,3	1,09	1,00E-04	25,00	77,40	98,40	24,70	77,30	98,10	24,50	76,60	98,00	24,73	77,10	98,17	21,07	11,31	0,84	0,29	0,49	0,68
400	343,3	0,86	1,13E-04	18,60	94,00	110,50	18,50	94,10	110,70	18,20	93,90	110,70	18,43	94,00	110,63	16,63	6,79	0,75	0,44	0,68	0,84
500	343,3	0,69	1,26E-04	13,70	85,60	98,30	13,70	86,10	98,80	13,70	85,30	98,30	13,70	85,67	98,47	12,80	4,37	0,63	0,60	0,84	0,95
630	343,3	0,54	1,42E-04	9,70	86,70	95,70	10,10	85,50	94,90	9,80	85,70	95,00	9,87	85,97	95,20	9,23	2,90	0,49	0,76	0,95	1,02
800	343,3	0,43	1,60E-04	9,30	90,90	95,30	9,10	91,10	95,50	9,30	91,20	95,50	9,23	91,07	95,43	4,37	1,65	0,25	0,94	1,02	1,01
1000	343,3	0,34	1,79E-04	9,00	90,60	96,70	8,60	90,70	96,70	8,70	90,60	96,60	8,77	90,63	96,67	6,03	2,00	0,34	0,89	1,01	1,03
1250	343,3	0,27	5,99E-05	4,90	103,80	105,60	4,90	103,80	105,60	5,00	103,80	105,70	4,93	103,80	105,63	1,83	1,23	0,11	0,99	1,03	1,03
1600	343,3	0,21	6,78E-05	5,70	75,30	78,80	6,20	75,70	79,10	6,30	74,60	78,50	6,07	75,20	78,80	3,60	1,51	0,20	0,96	1,03	1,01
2000	343,3	0,17	7,58E-05	5,20	54,10	60,10	5,10	54,60	60,30	5,10	56,50	62,40	5,13	55,07	60,93	5,87	1,96	0,33	0,89	1,01	1,00
2500	343,3	0,14	8,48E-05	4,20	81,30	88,30	4,20	80,60	87,70	4,20	80,90	87,90	4,20	80,93	87,97	7,03	2,25	0,38	0,85	1,00	0,96
3150	343,3	0,11	9,51E-05	3,20	46,90	56,10	3,20	47,50	56,50	3,30	47,00	56,10	3,23	47,13	56,23	9,10	2,85	0,48	0,77	0,96	0,93
4000	343,3	0,09	1,07E-04	2,50	54,70	64,80	2,50	54,70	64,80	2,60	54,80	64,80	2,53	54,73	64,80	10,07	3,19	0,52	0,73	0,93	0,94
5000	343,3	0,07	1,20E-04	2,00	49,30	59,10	2,10	49,80	59,70	2,10	49,30	59,10	2,07	49,47	59,30	9,83	3,10	0,51	0,74	0,94	0,85
6000	343,3	0,06	1,31E-04	2,00	36,50	48,90	2,00	36,80	49,10	2,20	36,40	49,00	2,07	36,57	49,00	12,43	4,18	0,61	0,62	0,85	

F.2.2 - Amostra 2

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 2	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	S _n	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}	X _{min,n}	L _{min,n}	L _{máx,n}						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	80,70	97,40	99,50	82,90	97,50	99,50	83,00	97,20	99,50	82,20	97,37	15,17	5,73	0,71	0,49	0,74	0,15
125	343,3	2,75	6,32E-05	79,50	83,00	113,20	83,10	80,00	112,30	83,20	80,00	112,40	81,93	81,00	112,63	31,63	38,17	0,96	0,08	0,15	0,18
160	343,3	2,15	7,15E-05	59,30	80,50	111,50	59,30	81,90	112,10	59,60	81,70	112,30	59,40	81,37	111,97	30,60	33,88	0,95	0,10	0,18	0,39
200	343,3	1,72	7,99E-05	45,20	76,10	99,30	45,30	76,20	99,50	45,30	76,00	99,60	45,27	76,10	99,47	23,37	14,73	0,88	0,23	0,39	0,32
250	343,3	1,37	8,94E-05	33,30	89,30	114,70	33,50	88,90	114,50	33,40	89,10	114,70	33,40	89,10	114,63	25,53	18,91	0,90	0,18	0,32	0,55
315	343,3	1,09	1,00E-04	24,60	78,10	97,40	24,90	78,50	98,10	25,20	78,60	98,20	24,90	78,40	97,90	19,50	9,44	0,81	0,34	0,55	0,73
400	343,3	0,86	1,13E-04	18,60	95,40	110,20	18,80	95,50	110,30	18,80	93,70	110,60	18,73	94,87	110,37	15,50	5,96	0,72	0,49	0,73	0,90
500	343,3	0,69	1,26E-04	15,00	86,70	97,60	15,20	86,50	97,60	15,10	86,50	97,60	15,10	86,57	97,60	11,03	3,56	0,56	0,68	0,90	0,92
630	343,3	0,54	1,42E-04	12,10	83,90	94,10	12,30	84,10	94,50	12,20	83,80	94,20	12,20	83,93	94,27	10,33	3,29	0,54	0,71	0,92	1,00
800	343,3	0,43	1,60E-04	9,10	89,30	96,30	9,20	89,80	96,50	9,00	89,30	96,10	9,10	89,47	96,30	6,83	2,20	0,38	0,86	1,00	1,00
1000	343,3	0,34	1,79E-04	8,50	90,50	97,40	8,80	90,40	97,30	8,50	90,20	96,90	8,60	90,37	97,20	6,83	2,20	0,38	0,86	1,00	1,04
1250	343,3	0,27	5,99E-05	5,60	103,60	105,20	5,10	103,70	105,30	5,40	103,60	105,30	5,37	103,63	105,27	1,63	1,21	0,09	0,99	1,04	1,03
1600	343,3	0,21	6,78E-05	5,80	73,40	77,10	6,30	73,80	77,20	6,20	72,80	77,00	6,10	73,33	77,10	3,77	1,54	0,21	0,95	1,03	1,00
2000	343,3	0,17	7,58E-05	5,10	56,80	63,40	5,10	55,30	62,20	5,10	56,60	63,40	5,10	56,23	63,00	6,77	2,18	0,37	0,86	1,00	0,98
2500	343,3	0,14	8,48E-05	4,20	77,60	85,30	4,30	80,40	88,50	4,20	79,20	87,30	4,23	79,07	87,03	7,97	2,50	0,43	0,82	0,98	0,93
3150	343,3	0,11	9,51E-05	3,30	46,70	56,90	3,30	47,40	57,40	3,30	48,10	58,00	3,30	47,40	57,43	10,03	3,17	0,52	0,73	0,93	0,91
4000	343,3	0,09	1,07E-04	2,60	54,00	64,80	2,60	54,10	64,90	2,60	54,30	65,10	2,60	54,13	64,93	10,80	3,47	0,55	0,69	0,91	0,91
5000	343,3	0,07	1,20E-04	2,10	48,60	59,40	2,10	48,50	59,40	2,10	48,60	59,40	2,10	48,57	59,40	10,83	3,48	0,55	0,69	0,91	0,82
6000	343,3	0,06	1,31E-04	2,00	35,80	48,80	2,10	35,10	48,60	2,00	35,60	48,90	2,03	35,50	48,77	13,27	4,61	0,64	0,59	0,82	

F.2.3 - Amostra 3

Frequência (Hz)	c ₀ (m/s)	λ ₀ (m)	k ₀ "-Método 2	Medição 1			Medição 2			Medição 3			Média			ΔL	Sn	r	α _n	α _{dTubo}	α _d
				Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n	Xmin _n	Lmin _n	Lmáx _n						
100	343,3	3,43	5,65E-05	99,50	80,30	96,60	99,50	82,70	96,90	99,50	83,50	96,90	99,50	82,17	96,80	14,63	5,39	0,69	0,52	0,76	0,10
125	343,3	2,75	6,32E-05	82,30	77,20	112,40	84,20	76,70	111,10	84,50	76,70	111,10	83,67	76,87	111,53	34,67	54,12	0,97	0,05	0,10	0,09
160	343,3	2,15	7,15E-05	59,50	74,90	110,90	60,40	76,80	112,40	59,90	77,60	112,50	59,93	76,43	111,93	35,50	59,57	0,98	0,05	0,09	0,30
200	343,3	1,72	7,99E-05	44,70	73,00	98,80	45,10	72,80	99,50	45,00	73,70	99,60	44,93	73,17	99,30	26,13	20,26	0,91	0,17	0,30	0,31
250	343,3	1,37	8,94E-05	33,40	88,10	113,90	33,60	87,50	113,50	33,30	88,50	114,40	33,43	88,03	113,93	25,90	19,72	0,91	0,17	0,31	0,53
315	343,3	1,09	1,00E-04	25,00	77,90	98,00	24,90	78,10	98,10	25,20	78,30	98,30	25,03	78,10	98,13	20,03	10,04	0,82	0,32	0,53	0,66
400	343,3	0,86	1,13E-04	18,60	93,70	110,60	16,10	93,90	111,10	18,60	93,90	111,00	17,77	93,83	110,90	17,07	7,13	0,76	0,43	0,66	0,84
500	343,3	0,69	1,26E-04	13,80	85,10	98,10	13,70	85,60	98,50	13,60	85,90	98,60	13,70	85,53	98,40	12,87	4,40	0,63	0,60	0,84	0,99
630	343,3	0,54	1,42E-04	10,90	86,30	93,50	10,90	86,70	93,90	11,20	86,70	93,90	11,00	86,57	93,77	7,20	2,29	0,39	0,85	0,99	1,01
800	343,3	0,43	1,60E-04	10,60	88,80	94,80	10,70	89,20	95,30	10,30	89,20	95,20	10,53	89,07	95,10	6,03	2,00	0,34	0,89	1,01	0,99
1000	343,3	0,34	1,79E-04	8,80	89,90	97,00	8,70	90,10	97,20	8,80	90,10	97,30	8,77	90,03	97,17	7,13	2,27	0,39	0,85	0,99	1,03
1250	343,3	0,27	5,99E-05	7,20	102,20	105,50	7,00	102,30	105,50	7,20	102,30	105,50	7,13	102,27	105,50	3,23	1,45	0,18	0,97	1,03	1,01
1600	343,3	0,21	6,78E-05	6,80	72,60	78,40	5,90	73,60	79,20	6,00	73,60	79,20	6,23	73,27	78,93	5,67	1,92	0,32	0,90	1,01	0,97
2000	343,3	0,17	7,58E-05	5,00	56,80	64,80	4,90	56,30	64,40	4,70	55,90	65,20	4,87	56,33	64,80	8,47	2,65	0,45	0,80	0,97	0,98
2500	343,3	0,14	8,48E-05	4,10	77,90	86,10	3,90	77,90	85,70	4,00	78,10	86,40	4,00	77,97	86,07	8,10	2,54	0,44	0,81	0,98	0,92
3150	343,3	0,11	9,51E-05	3,30	46,70	57,00	3,20	46,10	56,70	3,20	46,30	56,80	3,23	46,37	56,83	10,47	3,34	0,54	0,71	0,92	0,89
4000	343,3	0,09	1,07E-04	2,60	53,50	64,90	2,70	53,00	64,60	2,60	53,20	64,70	2,63	53,23	64,73	11,50	3,76	0,58	0,66	0,89	0,89
5000	343,3	0,07	1,20E-04	2,20	47,50	58,90	2,20	47,70	59,20	2,10	48,00	59,60	2,17	47,73	59,23	11,50	3,76	0,58	0,66	0,89	0,84
6000	343,3	0,06	1,31E-04	2,00	35,80	48,50	2,10	35,40	48,60	2,00	35,70	48,60	2,03	35,63	48,57	12,93	4,43	0,63	0,60	0,84	

G.2 Câmara Reverberante com Material Talochado

TEMPO REVERBERAÇÃO MATERIAL TALOCHADO/ Tr

HZ	Med.1 (s)	Med. 2 (s)	Med. 3 (s)	Med. 4 (s)	Med. 5 (s)	Med. 6 (s)	Média (s)	Desvio	A ₂	A	α _s
100	10,01	10,58	12,67	12	11,86	10,14	11,21	1,01	3,15	0,90	0,08
125	7,82	7,77	7,25	10,34	9,22	8,15	8,43	1,04	4,19	1,60	0,14
160	4,8	4,76	5,79	5,26	5,19	5,08	5,15	0,34	6,86	4,32	0,37
200	3,47	3,82	3,25	4,06	3,74	3,61	3,66	0,25	9,65	6,66	0,58
250	3	3,17	2,95	3,14	2,99	3,01	3,04	0,08	11,62	8,27	0,72
315	2,99	2,97	3,08	2,9	3,1	3,01	3,01	0,06	11,74	8,30	0,72
400	3,07	2,95	3,16	3	3,17	3,55	3,15	0,19	11,22	7,69	0,67
500	2,72	2,85	2,83	2,77	2,76	2,7	2,77	0,05	12,76	9,09	0,79
630	2,79	2,71	2,72	2,78	2,8	2,82	2,77	0,04	12,76	8,95	0,78
800	2,64	2,64	2,57	2,62	2,53	2,41	2,57	0,08	13,75	9,84	0,85
1000	2,6	2,59	2,6	2,75	2,68	2,61	2,64	0,05	13,38	9,11	0,79
1250	2,54	2,48	2,7	2,68	2,6	2,66	2,61	0,07	13,54	8,81	0,77
1600	2,4	2,48	2,53	2,52	2,4	2,52	2,48	0,05	14,25	9,16	0,80
2000	2,58	2,55	2,56	2,58	2,57	2,52	2,56	0,02	13,80	8,12	0,71
2500	2,49	2,53	2,51	2,52	2,49	2,52	2,51	0,01	14,08	7,71	0,67
3150	2,25	2,29	2,37	2,32	2,31	2,3	2,31	0,03	15,30	7,73	0,67
4K	2,1	2,06	2,1	2,09	2,16	2,12	2,11	0,03	16,75	7,42	0,64
5K	1,81	1,84	1,84	1,76	1,77	1,84	1,81	0,03	19,52	7,82	0,68

Nota: com 2 decaídas por medição de Tr

Área(m²): 11,52

G.3 Câmara Reverberante com Material Projectado

TEMPO REVERBERAÇÃO MATERIAL PROJECTADO

HZ	Med.1 (s)	Med. 2 (s)	Med. 3 (s)	Med. 4 (s)	Med. 5 (s)	Med. 6 (s)	Média (s)	Desvio	A ₂	A	α _s
100	11,46	11,05	10,11	12,76	12,17	10,06	11,27	0,99	3,14	0,88	0,08
125	7,4	10,14	8,66	7	8,66	8,9	8,46	1,02	4,18	1,59	0,14
160	4,67	5,7	5,46	4,67	4,73	4,77	5	0,41	7,07	4,52	0,39
200	3,67	3,66	3,77	3,46	3,65	3,65	3,64	0,09	9,71	6,71	0,58
250	3,12	3,47	3,48	3,4	2,91	2,96	3,22	0,23	10,97	7,62	0,66
315	3,18	2,95	3,18	2,98	2,93	2,8	3	0,13	11,78	8,34	0,72
400	3,31	2,85	3,19	3,03	2,78	3,15	3,05	0,18	11,58	8,06	0,70
500	3	2,97	2,76	3,19	2,87	2,83	2,94	0,13	12,02	8,36	0,73
630	2,77	2,85	2,8	2,87	2,68	2,84	2,8	0,06	12,62	8,81	0,76
800	2,6	2,42	2,59	2,59	2,58	2,55	2,56	0,06	13,80	9,89	0,86
1000	2,86	2,81	2,8	2,8	2,71	2,63	2,77	0,07	12,76	8,48	0,74
1250	2,68	2,73	2,76	2,68	2,64	2,57	2,68	0,06	13,18	8,46	0,73
1600	2,57	2,53	2,55	2,55	2,64	2,54	2,56	0,03	13,80	8,72	0,76
2000	2,57	2,6	2,64	2,59	2,56	2,67	2,61	0,03	13,54	7,86	0,68
2500	2,55	2,43	2,51	2,5	2,5	2,58	2,51	0,04	14,08	7,71	0,67
3150	2,39	2,37	2,38	2,31	2,32	2,36	2,36	0,03	14,97	7,41	0,64
4K	2,09	2,16	2,17	2,17	2,12	2,13	2,14	0,02	16,51	7,19	0,62
5K	1,93	1,92	1,83	1,89	1,85	1,84	1,88	0,03	18,79	7,10	0,62

Nota: com 2 decaídas por medição de Tr

Área(m²): 11,52

Anexo H – Boletins de Ensaio

H.1 Material Talochado

(((NI&DEA-FEUP)))



DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

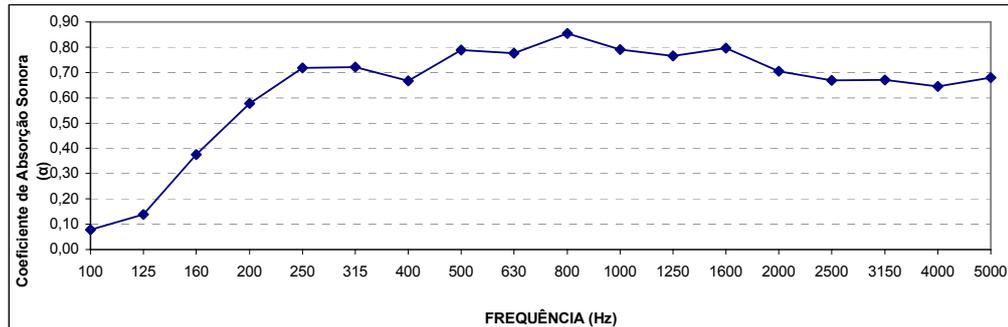
Norma: EN ISO 20 354

REQUERENTE: STIER DESCRIÇÃO: Ensaio de absorção de materiais à base de filmes de polímero monocomponente aplicados com talocha sobre lã mineral fibrada (90kg/m ³). Espessura da amostra 35mm . Dimensão da Amostra = 11,5 m ²	Referência XXXXXX Data de Ensaio 18-01-2008
--	--

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) =	7,37	Altura (m) =	4,65	Temperatura do Ar (°C) =	16
Largura média (m) =	5,79	Volume (m ³) =	217,7	Humidade do Ar (%) =	72
c*V =	35,2954	Sc =	207,369		

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



ESPESSURA = 35mm

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RTref ^{média}	15,7	13,6	13,9	11,8	10,6	10,3	10,0	9,7	9,3	9,0	8,3	7,5	7,0	6,2	5,6	4,7	3,8	3,0
RTamostra ^{médias}	11,2	8,4	5,2	3,7	3,0	3,0	3,2	2,8	2,8	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6	2,5	2,3	2,1	1,8
α_a	0,08	0,14	0,37	0,58	0,72	0,72	0,67	0,79	0,78	0,85	0,79	0,77	0,80	0,71	0,67	0,67	0,64	0,68

Nº de Boletim de ensaio: XXXXXX Laboratório: NI&DEA-FEUP

Data: Assinatura: _____

H.2 Material Projectado

NI&DEA-FEUP



DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA - α

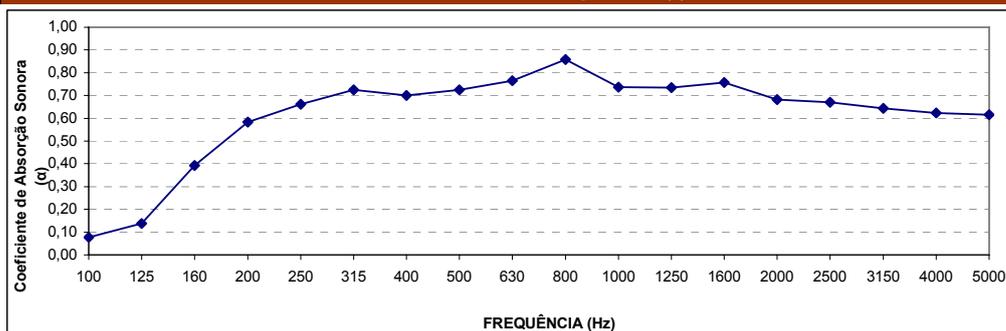
Norma: EN ISO 20 354

REQUERENTE:	STIER	Referência XXXXXX
DESCRIÇÃO:	Ensaio de absorção de materiais à base de filmes de polímero monocomponente projectado sobre lã mineral fibrada (90kg/m ³). Espessura da amostra 35mm .	Data de Ensaio 18-01-2008
	Dimensão da Amostra = 11,5 m ²	

CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE

Comprimento médio (m) =	7,37	Altura (m) =	4,65	Temperatura do Ar (°C) =	16
Largura média (m) =	5,79	Volume (m ³) =	217,7	Humidade do Ar (%) =	72
c*V =	35,2954	Sc =	207,369		

GRÁFICO - Coeficientes de Absorção Sonora (α)



ESPESSURA = 35mm

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RTref ^{média}	15,7	13,6	13,9	11,8	10,6	10,3	10,0	9,7	9,3	9,0	8,3	7,5	7,0	6,2	5,6	4,7	3,8	3,0
RTamostra ^{média}	11,3	8,5	5,0	3,6	3,2	3,0	3,1	2,9	2,8	2,6	2,8	2,7	2,6	2,6	2,5	2,4	2,1	1,9
α_a	0,08	0,14	0,39	0,58	0,66	0,72	0,70	0,73	0,76	0,86	0,74	0,73	0,76	0,68	0,67	0,64	0,62	0,62

Nº de Boletim de ensaio: XXXXXX Laboratório: NI&DEA-FEUP

Data: Assinatura: _____