



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

Condicionamento Acústico de Salas – Métodos de previsão simplificados versus modelos detalhados

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

Autor

André Filipe Ribeiro Marinho

Orientador

Prof. Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus

Prof.^a Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

Coimbra, Julho, 2012

AGRADECIMENTOS

A Tese é o culminar de um percurso académico, iniciado há cinco anos atrás. Foi um percurso de aprendizagem, crescimento, divertimento e alegria.

Tenho que agradecer a todos os amigos e colegas que se cruzaram na minha vida académica, facilitando-a e ajudando-me a integrar em todas as vivências que só uma Universidade como Coimbra poderá transmitir aos seus estudantes.

Não quero deixar de expressar o meu voto de agradecimento à minha família, em particular os meus pais e irmãos, pois sem eles seria impossível chegar onde cheguei, com a força e convicção que tenho no meu futuro. São as minhas bases e o meu apoio.

Um agradecimento muito especial a todos os professores que cruzaram a minha vida académica, principalmente aqueles que de alguma forma me conseguiram cativar e fazer acreditar que a Engenharia Civil é realmente uma profissão com futuro e na qual vale a pena apostar.

Por fim, mas não com menos importância, tenho de agradecer aos meus Coordenadores, o Professor Doutor Diogo Mateus e a Professora Doutora Andreia Pereira, por me terem conduzido para esta área, mas, sobretudo pela constante disponibilidade, compreensão, orientação e por toda a ajuda preciosa que demonstraram. Eles contribuíram para o desenvolvimento do meu espírito científico, crítico e criador.

RESUMO

No estudo do condicionamento acústico de salas, a estimativa dos tempos de reverberação de um dado local, é essencial para que se aplique um determinado tratamento acústico. Na fase de projeto, o recurso a ferramentas de cálculo muito simplificadas, tal como a fórmula de Sabine conduz em alguns casos a tempos de reverberação significativamente inferiores aos reais, em especial para salas com elevada absorção sonora.

Desta forma, este trabalho tem como principal objetivo estudar uma possível correção nos coeficientes de absorção, variável em função da absorção por banda de frequências, de forma a aproximar os resultados obtidos pela fórmula de Sabine e pela modelação numérica “Ray Tracing”, recorrendo a um programa de cálculo específico, software CATT-AcousticTM. Este estudo é ainda complementado com a realização de uma campanha de medições acústicas em salas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (DEC-FCTUC), com diferentes tipos de revestimentos, cujos resultados serão comparados com as metodologias de previsão referidas anteriormente. Em alguns destes espaços, são ainda utilizados materiais fonoabsorventes adicionais, com o intuito de alterar as condições de reverberação, e desta forma obter um leque mais alargado de situações para comparação de resultados.

A comparação e a análise dos resultados obtidos dos diversos locais (salas de aula) permitiram a determinação de um fator de correção para coeficientes de absorção da fórmula de Sabine, que em fase de projeto, recorrendo apenas a esta fórmula, possibilita a determinação de forma mais exata, do tempo de reverberação de um espaço.

ABSTRACT

In the study of acoustic conditioning of rooms, the reverberation estimating time of a place, is essential to apply a specific acoustic treatment. In the design phase, the use of highly simplified calculation tools, such as the Sabine formula, leads many times the reverberation time is significantly lower than reality, especially in rooms with high sound absorption.

Thus, this research has as main objective to study a possible correction in the absorption coefficients, variable depending on the absorption band, in order to approximate the results obtained by different methods, namely between the Sabine formula and numerical modeling "Ray Tracing ", resorting to the use of a calculation program specific software CATT - AcousticTM. This study will be further complemented with the implementation of sound measurements in the DEC-FCTUC rooms, with different types of coatings, whose results will be compared with the forecasting methodologies mentioned above. In some of these spaces are also used additional absorbing coatings, in order to change the conditions of reverberation, and thus obtain a greatest number of situations to compare results.

The comparison and analysis of results obtained at different locations allows to determine the correction factor for absorption coefficients in the formula of Sabine, which in the design phase, using only this formula makes it possible to determine, more accurately, the time reverberation of a space.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento Geral	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2.	CONCEITOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Generalidades.....	4
2.2	Definições e parâmetros acústicos	5
2.2.1	Coeficiente de absorção sonora	6
2.2.2	Difusão sonora.....	7
2.2.3	Tempo de reverberação	8
2.2.4	Fórmula de Sabine	11
2.2.5	Definição, clareza e inteligibilidade	11
2.3	Outros parâmetros acústicos	12
2.4	Materiais de correção acústica.....	13
2.5	Regulamentação em vigor.....	14
3.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	15
3.1	Descrição dos espaços avaliados	15
3.2	Metodologia experimental	18
3.2.1	Condições de ensaio e equipamento a utilizar.....	18
3.2.2	Métodos de medição e parâmetros a determinar	19
3.2.3	Método de cálculo para determinação do coeficiente de absorção α	21
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	23
4.1	Comparação dos tempos de reverberação dados pelos métodos MLS e MRI.....	23
4.2	Coeficiente de absorção da espuma de poliuretano	25
4.3	Coeficiente de absorção do ripado de madeira da sala SE 4.3.....	26
5.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM RESULTADOS NUMÉRICOS.....	28
5.1	CATT – Acoustic TM / fórmula de Sabine	28
5.2	Calibração do modelo – Ajuste dos coeficientes de absorção dos materiais.....	29
5.3	Comparação CATT - Acoustic TM vs Experimental.....	33
5.4	RASTI.....	37
6.	PROPOSTA DE CORREÇÃO DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO	39
6.1	Comparação CATT - Acoustic TM vs Sabine.....	39

6.1.1	Modelo 1 (sala SE 4.4)	41
6.1.2	Modelo 2 (sala SE 4.3)	42
6.1.3	Modelo 3.....	42
6.2	Validação dos resultados	44
7.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	51
7.1	Considerações Finais	51
7.2	Trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	ANEXO A – Fotografias dos ensaios.....	A-1
A.1	– Ensaio com a câmara reverberante vazia.....	A-1
A.2	– Ensaio com 10 m ² de espuma de poliuretano com 30 mm	A-1
A.3	– Ensaio com a sala SE 4.4 vazia	A-2
A.4	– Ensaio na sala SE 4.4 com 10 m ² de espuma de 30 mm de poliuretano	A-2
A.5	– Ensaio na sala SE 4.4 com espuma de 60 mm em 31 m ² de pavimento.....	A-3
A.6	– Ensaio na sala SE 4.4 com espuma de 30 mm na totalidade do pavimento	A-3
A.7	– Ensaio com a sala SE 4.3 vazia	A-4
A.8	– Ensaio na sala SE 4.3 com espuma de 30 mm na totalidade do pavimento	A-4
A.9	– Ensaio na sala SA 2.10	A-5
A.10	– Ensaio no anfiteatro SA 2.5	A-5
	ANEXO B – Coeficientes de absorção para os vários materiais encontrados nos espaços ensaiados.....	B
	ANEXO C – Exemplo de cálculo.....	C-1
C.1	– Dados da fórmula de Sabine sem correção dos coeficientes de absorção, para o pavimento com um coeficiente de 0.6 (modelo 2)	C-1
C.2	– Dados da fórmula de Sabine com correção dos coeficientes de absorção, para o pavimento com um coeficiente de 0.6 (modelo 2)	C-2
	ANEXO D – Curvas de correção dos modelos 1, 2 e 3.....	D-1
D.1	– Curva de correção do modelo 1 para as várias bandas de frequência	D-1
D.2	– Curva de correção do modelo 2 para as várias bandas de frequência	D-2
D.3	– Curva de correção do modelo 3 para as várias bandas de frequência	D-3

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Designação do som, no domínio da frequência (Patrício, 2010).	5
Figura 2.2 – Energia sonora incidente, refletida e absorvida, (Tadeu et al, 2010).....	5
Figura 2.3 – Progressão de uma onda sonora num espaço fechado, adaptado de Isbert, 1998.	6
Figura 2.4 – Comparação entre os efeitos da absorção (a), reflexão (b) e difusão sonora (c). Adaptado de Isbert, 1998.....	8
Figura 2.5 – Curva de decaimento do nível sonoro (Tadeu et al, 2010).	9
Figura 2.6 – Tempos ótimos de reverberação, a 500 Hz, para diferentes tipos de utilizações (Tadeu et al, 2010).....	10
Figura 3.1 – Figura esquemática das salas SE 4.3 e SE 4.4 do 4º piso do Departamento de Engenharia Civil, adaptado da planta do Departamento.	16
Figura 3.2 – Fotografia do ripado de madeira existente na parede do fundo da sala SE 4.3. .	16
Figura 3.3 – Fotografia do teto acústico perfurado da sala SA 2.10.	17
Figura 3.4 – Figura esquemática das posições da fonte e do recetor nas salas SE 4.3, SE 4.4 e SA 2.10 (unidades em metros).	19
Figura 4.1 – Valores médios do tempo de reverberação obtidos para a câmara reverberante vazia, nas bandas de frequência indicadas, para os métodos MLS e MRI.	24
Figura 4.2 – Valores médios do tempo de reverberação obtidos para a sala SE 4.4 vazia, nas bandas de frequência indicadas, para os métodos MLS e MRI.....	24
Figura 4.3 – Comparação entre os coeficientes de absorção obtidos pelo MRI e MLS com os valores do fabricante: a) na câmara reverberante; b) na sala SE 4.4.	25
Figura 4.4 – Comparação entre a curva experimental dos coeficientes de absorção do ripado de madeira e a do fabricante.	26
Figura 5.1 – Comparação entre o tempo de reverberação obtido experimentalmente e o CATT-Acoustic™, sem correção dos coeficientes de absorção.	32
Figura 5.2 – Comparação entre o tempo de reverberação obtido experimentalmente e o CATT-Acoustic™, com correção dos coeficientes de absorção.....	33
Figura 5.3 – Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos pelo programa, assumindo e desprezando a difusão das paredes, nas bandas de frequência indicadas.	35

Figura 5.4 – Representação do índice RASTI na sala SE 4.4 para três casos distintos.....	37
Figura 5.5 – Representação do índice RASTI na sala SE 4.3 para dois casos distintos.....	37
Figura 6.1 – Modelo 1, sala SE 4.4	39
Figura 6.2 – Modelo 2, sala SE 4.3	40
Figura 6.3 – Modelo 3, sala assimétrica (dimensões em metros).....	40
Figura 6.4 – Curva de correção dos valores médios dos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine, para o caso do modelo 2.....	42
Figura 6.5 – Curva de correção dos valores médios dos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine, para o caso do modelo 3.....	43
Figura 6.6 – Comparação entre os tempos de reverberação da sala SE 4.4 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção, para o pavimento revestido na totalidade com 30 mm de espuma.	45
Figura 6.7 – Comparação entre os tempos de reverberação da sala SE 4.4 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção, para o pavimento revestido em 31 m ² com 60 mm de espuma.	46
Figura 6.8 – Comparação entre os tempos de reverberação da sala SE 4.3 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção, para o pavimento revestido na totalidade com 30 mm de espuma.	47
Figura 6.9 – Comparação entre os tempos de reverberação da sala SA 2.10 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção, para um teto acústico perfurado.	49
Figura 6.10 – Comparação entre os tempos de reverberação do anfiteatro SA 2.5 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção.....	50

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação do parâmetro RASTI.	12
Quadro 3.1 – Características geométricas das salas em estudo e do anfiteatro.....	17
Quadro 3.2 – Campanha de ensaios realizada na câmara reverberante, nas salas de aula e no anfiteatro.	20
Quadro 4.1 – Coeficientes de absorção do ripado de madeira da sala SE 4.3, nas bandas de frequência consideradas.....	26
Quadro 5.1 – Coeficientes de atenuação devido à presença do ar.....	28
Quadro 5.2 – Coeficientes de absorção de diversos materiais, retirados de Patrício (2010)...	30
Quadro 5.3 – Coeficientes de absorção de diversos materiais, retirados de Domingues (2005).	30
Quadro 5.4 – Média dos coeficientes de absorção dados por Patrício (2010) e Domingues (2005).	31
Quadro 5.5 – Tempos de reverberação para o modelo sem calibração, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas.....	31
Quadro 5.6 – Valores dos coeficientes de absorção corrigidos.....	32
Quadro 5.7 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas.....	33
Quadro 5.8 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado com espuma na totalidade do pavimento, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas, para a sala SE 4.4.	34
Quadro 5.9 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado com espuma na totalidade do pavimento e difusão adicional nas paredes, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas, para a sala SE 4.4.....	35
Quadro 5.10 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado com sala vazia, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas para a sala SE 4.3.	36
Quadro 5.11 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado com espuma na totalidade do pavimento, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas, para a sala SE 4.3.	36

Quadro 6.1 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para a sala SE 4.4, com 30mm de espuma em todo o pavimento, para as bandas de frequência centradas.	45
Quadro 6.2 – Comparação entre os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos, para a sala SE 4.4, com 30mm de espuma em todo o pavimento para as bandas de frequência centradas.	45
Quadro 6.3 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para a sala SE 4.4, com 60mm de espuma em 31m ² do pavimento, para as bandas de frequência centradas.	46
Quadro 6.4 – Comparação entre os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos, para a sala SE 4.4, com 60mm de espuma em 31m ² do pavimento, para as bandas de frequência centradas.	47
Quadro 6.5 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para a sala SE 4.3, com 30mm de espuma em todo o pavimento, para as bandas de frequência centradas.	48
Quadro 6.6 – Comparação entre os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos, para o ripado de madeira da sala SE 4.3, para as bandas de frequência centradas.....	48
Quadro 6.7 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para a sala SA 2.10, nas bandas de frequência centradas.	49
Quadro 6.8 – Comparação entre os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos, para o teto acústico da sala SA 2.10, para as bandas de frequência centradas.	49
Quadro 6.9 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para o anfiteatro SA 2.5, para as bandas de frequência centradas.	50

SIMBOLOGIA

α – Coeficiente de absorção

A_T – Área de absorção equivalente

c – Velocidade de propagação do som no ar

$E_{\text{absorvida}}$ – Energia absorvida

$E_{\text{incidente}}$ – Energia incidente

m – Coeficiente de atenuação devido à presença do ar

T_r – Tempo de reverberação

V – Volume

ABREVIATURAS

CATT – Computer Aided Theater Technique
CEN – Comité Européen de Normalisation
DEC - Departamento de Engenharia Civil
ISO – International Organization for Standardization
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MLS – Maximum Length Sequence
MRI – Método do Ruído Interrompido
RASTI – Rapid Speed Transmission Index

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

A acústica de um espaço tem ganho grande relevância ao longo dos anos. Isto deve-se a uma maior exigência por parte dos utilizadores e à mecanização da vida atual de um cidadão. Desta forma, tendo em conta a preocupação crescente na acústica, têm vindo a ser elaborados vários requisitos legais, em vários países, que cobrem uma vasta gama de características do som. Existe um conjunto de normas internacionais previstas pela International Organization for Standardization (ISO) e normas europeias previstas pelo Comité Européen de Normalisation (CEN), que têm refletido a tendência acima mencionada.

A nível nacional, existem regulamentos, que têm como objetivo principal regular a vertente do conforto acústico no âmbito da edificação, contribuindo assim para uma melhoria da qualidade do ambiente acústico e do bem-estar e saúde das populações. Nesta vertente podem ser consideradas três situações diferentes: isolamento acústico, condicionamento acústico e estudo da propagação do som por via sólida. A primeira situação trata do estudo da propagação do som entre dois espaços limitados por uma separação física. A segunda situação aborda o estudo da propagação do som no interior de um espaço fechado, cuja principal função é atribuir a esse espaço características acústicas convenientes às suas finalidades. A terceira situação refere-se ao estudo da propagação do som através de via sólida, pelos elementos da própria construção (Tadeu et al, 2010). Este trabalho será centrado na segunda situação, o condicionamento acústico de um espaço fechado.

O campo sonoro em determinados espaços deve ter um tempo de reverberação adequado às suas finalidades. Desta forma, as necessidades e exigências de conforto acústico em salas de aula, escritórios, refeitórios, recintos públicos de restauração, entre outros, têm adquirido um papel bastante importante na caracterização destes espaços. Quando se avalia o condicionamento acústico de um espaço, é então necessário, ter em conta diversos parâmetros acústicos, tais como: a geometria do espaço, os materiais a utilizar, o posicionamento dos materiais, o volume do espaço e o seu recheio (mobiliário). Um dos parâmetros ensaiados para avaliar o condicionamento acústico é o tempo de reverberação.

Existem várias expressões que permitem fazer uma estimativa do cálculo do tempo de reverberação em espaços fechados, em função do volume V , da área da superfície exposta S e

do coeficiente de absorção do material α , são elas: a fórmula de Sabine, a fórmula de Eyring e a fórmula de Millington.

Neste trabalho a expressão utilizada é a fórmula de Sabine, que tem a vantagem de poder ser aplicada em espaços com dimensões e volumetrias semelhantes às de uma sala de aula, desde que o coeficiente de absorção médio das superfícies expostas não ultrapasse o valor de 0.20.

Em muitas situações de estudo, é necessário proceder a correções acústicas do local, para garantir que o seu tempo de reverberação cumpre os valores estipulados nos regulamentos nacionais (Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Dec. Lei nº 129/2002 de 11 de Maio, com a nova redação dada pelo Dec. Lei nº 96/2008 de 9 de Junho). Essas correções serão realizadas tendo em conta: a superfície e natureza das paredes, tipo de mobiliário, número de ocupantes, localização das fontes sonoras, espectro de frequências do som irradiado pela fonte sonora e volume do recinto (Tadeu et al, 2010).

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo determinar uma curva de correção dos coeficientes de absorção, variáveis em função da absorção por bandas de frequência. É também avaliado o coeficiente de absorção de um material quando ensaiado numa câmara reverberante e num espaço com algumas características semelhantes a uma câmara reverberante (sala de aula). Com estes ensaios pretende-se aferir a possibilidade de utilizar este último espaço para caracterizar o coeficiente de absorção de um material.

De forma a atingir o objetivo proposto, foram realizadas medições em algumas salas de aula do DEC, com volumetrias semelhantes, e onde foram adicionados materiais fonoabsorventes, de modo a alterar as condições acústicas do espaço. Os resultados obtidos das medições foram comparados com os obtidos pela fórmula de Sabine e pelo programa CATT – AcousticTM.

Assim, será possível através da comparação de resultados obter um coeficiente de absorção corrigido para a fórmula de Sabine, que permita determinar de forma mais exata o tempo de reverberação de um espaço com as características de uma sala de aula, ou sala de reuniões.

São ainda comparados dois métodos que permitem obter o tempo de reverberação (Método do ruído interrompido (MRI) e Método da resposta impulsiva (MLS)).

Através dos ensaios experimentais, pretende-se ganhar alguma sensibilidade para os parâmetros acústicos destes espaços.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação será apresentada em sete capítulos diferentes, sendo que cada um deles aborda uma área mais específica do trabalho desenvolvido.

No capítulo 1, o capítulo introdutório, é definido o enquadramento, os principais objetivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2, após uma longa e extensa pesquisa bibliográfica, são apresentados os conceitos teóricos e a revisão bibliográfica, que servirá de base para a realização desta tese.

No capítulo 3, é feita uma descrição dos espaços avaliados. É também neste capítulo onde se apresentam os métodos utilizados nos ensaios experimentais, bem como todas as condicionantes e equipamento utilizado no estudo.

No capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais relativos aos métodos MLS e MRI, bem como os resultados relativos aos coeficientes de absorção.

No capítulo 5, é feita uma comparação entre os resultados experimentais e os dados numéricos obtidos pelo CATT – AcousticTM.

No capítulo 6, são analisados três modelos de salas, de modo a obter um ábaco com os coeficientes de absorção corrigidos. No final será feita a validação de um dos três modelos analisados, para várias situações de estudo.

No capítulo 7, são apresentadas as conclusões finais e os trabalhos futuros.

Após estes capítulos seguir-se-ão as referências bibliográficas que serviram de base à realização deste trabalho e os anexos.

2. CONCEITOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos teóricos relacionados com o condicionamento acústico dos espaços, bem como as normas e os parâmetros regulamentares em vigor.

2.1 Generalidades

A acústica nos edifícios pressupõe o cumprimento de parâmetros regulamentares, bem como a análise e combinação de vários tipos de materiais, de modo a conferir ao espaço analisado todas as condições de conforto acústico necessárias. Isto tem vindo a aumentar as exigências ao nível do isolamento sonoro dos edifícios, em particular dos espaços destinados à palavra.

São várias as fontes de ruído que podem influenciar as características acústicas de um edifício. Entre elas destacam-se os equipamentos de uso coletivo: elevadores e grupos hidropneumáticos; as instalações técnicas; os eletrodomésticos; os habitantes e as suas atividades.

É de referir que se define “som” como vibrações de frequências situadas no intervalo de 20 Hz a 20KHz, que é a gama de frequências audível ao ouvido humano. Podem ainda ser caracterizados os infra-sons e os ultra-sons, que correspondem a vibrações de frequências muito baixas e muito altas, respetivamente. Na Figura 2.1, é possível observar a designação do som, no domínio da frequência.

O condicionamento acústico é o estudo da propagação do som no interior de um espaço fechado, que tem como principal objetivo atribuir a estes espaços características capazes de garantir um ambiente acústico adequado às suas finalidades. Este facto vai depender de várias condicionantes, tais como: geometria do espaço, tipo de revestimento dos interiores e tipo do recheio do espaço (Tadeu et al, 2010).

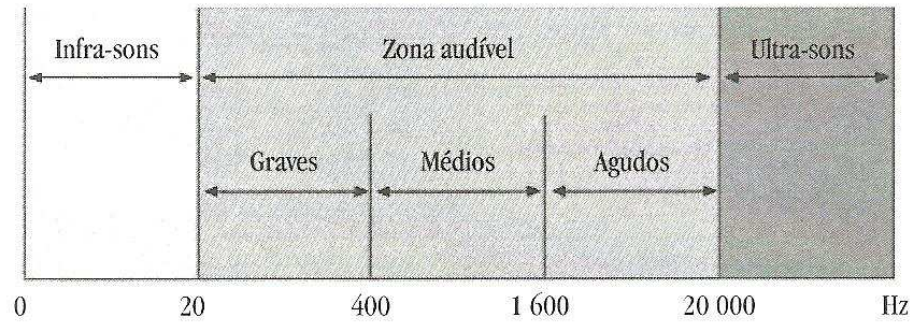


Figura 2.1 – Designação do som, no domínio da frequência (Patrício, 2010).

2.2 Definições e parâmetros acústicos

Num local fechado parte da energia sonora incidente numa superfície é refletida, outra parte é transmitida ao elemento e a restante é dissipada, tal como demonstra a Figura 2.2.

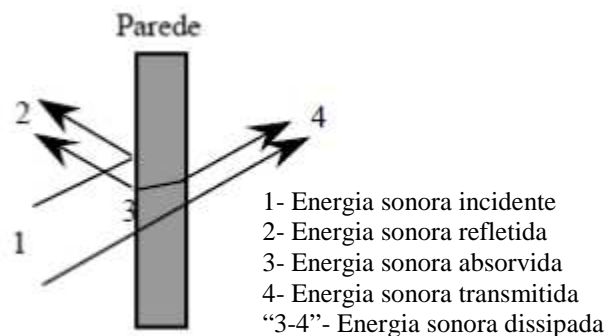


Figura 2.2 – Energia sonora incidente, refletida e absorvida, (Tadeu et al, 2010).

O estudo do espaço a analisar é bastante importante, pois a sua finalidade é que irá determinar a necessidade de maior ou menor absorção por parte dos elementos das superfícies expostas. Em termos de comodidade acústica tanto é desagradável uma sala “surda” como uma sala “reverberante” (Tadeu et al, 2010).

A energia sonora refletida num dado espaço pode ser diferenciada essencialmente em duas fases: uma que engloba todas as reflexões que chegam imediatamente a seguir ao som direto (primeiras reflexões) e outra formada pelas reflexões tardias (Isbert, 1998).

Do ponto de vista prático, é possível estabelecer um limite temporal para a zona das primeiras reflexões, de aproximadamente 100ms desde a chegada do som direto (este valor varia de

caso para caso em função da forma e do volume do espaço). Na Figura 2.3 é representada a progressão de uma onda sonora dentro de um espaço fechado (Isbert, 1998).

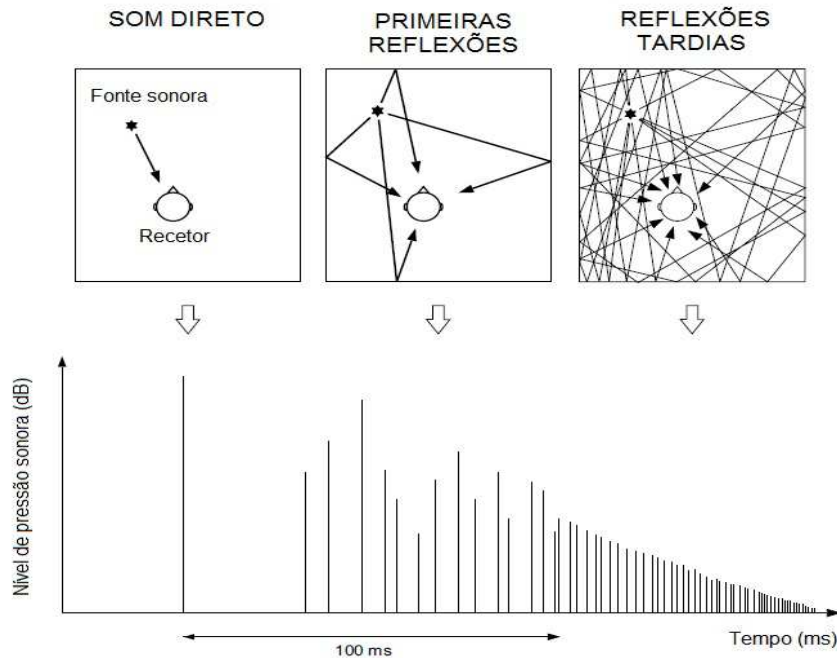


Figura 2.3 – Progressão de uma onda sonora num espaço fechado, adaptado de Isbert (1998).

2.2.1 Coeficiente de absorção sonora

É denominado coeficiente de absorção sonora à relação entre a energia que é absorvida quando as ondas sonoras atingem uma superfície e a energia incidente. O coeficiente de absorção de um material vai depender dele mesmo e da frequência do som que choca contra o material. Assim, um coeficiente de zero indica uma reflexão perfeita, enquanto que um coeficiente de um indica uma absorção perfeita (Harris, 1998).

Define-se uma câmara “surda” ou anecoica, como uma câmara que apresente um coeficiente de absorção médio próximo de um, e uma câmara reverberante, aquela que apresente um coeficiente de absorção médio, próximo de zero.

O coeficiente de absorção sonora, α , é dado pela seguinte expressão (Patrício, 2010):

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.1)$$

O som que chega a uma pessoa que se encontra num espaço fechado (ouvinte) é uma combinação dos efeitos de absorção pelas várias superfícies expostas do compartimento e a atenuação do som direto devido à distância que o som tem de percorrer entre as várias reflexões. Desta forma, se não existir material absorvente nas superfícies expostas do espaço, este é considerado como “muito reverberante” e irá reproduzir-se como uma sala cheia de ecos. No entanto, se as superfícies do espaço forem absorventes, o som direto será dominado e não haverá praticamente ecos. O discurso será mais facilmente entendido sem ecos ou com um tempo de reverberação controlado (Harris, 1997).

2.2.1.1 Absorção conferida pelo ar

A absorção do som devida ao ar pode ser dada por dois processos. O primeiro devido à energia que é extraída das ondas sonoras, pelas perdas decorrentes da condução do calor e da viscosidade do ar. Este primeiro processo só é predominante quando se trata de baixas frequências. O segundo processo é devido à energia que é extraída das ondas sonoras, devido à vibração e ao movimento rotacional, provocado pelo relaxamento das moléculas de oxigénio no ar. No entanto a atenuação sonora devida à presença do ar depende de forma mais decisiva da temperatura (Beranek, 1988).

O coeficiente de atenuação devido à presença do ar é referenciado na EN ISO 354 e representa-se por “m”.

A norma EN ISO 3382-2 refere que a atenuação devida ao ar para grandes salas pode ser significativa nas altas frequências.

Segundo Zannin et al (2004), que fizeram estudos sobre a comparação dos tempos de reverberação para várias situações, concluiu-se que a influência da absorção do ar só seria significativa para grandes volumes e em especial para altas frequências. De acordo com os resultados práticos desta investigação, seria possível desprezar a influência da absorção sonora devida à presença do ar para volumes na ordem dos 400 m³. A contribuição do ar só começaria a ser significativa para volumes superiores a 1000 m³ e em altas frequências.

2.2.2 Difusão sonora

A difusão sonora é considerada como a dispersão ou distribuição aleatória de uma onda sonora quando esta atinge uma superfície. Este fenómeno ocorre quando o tamanho das

saliências de uma superfície se iguala ao comprimento de onda do som incidente. A difusão não vai absorver o som, ela apenas muda a direção da onda sonora (Egan, 1972).

A difusão sonora de um dado espaço é conseguida através da implementação de elementos desenhados especificamente para dispersar o som, de forma uniforme e em múltiplas direções. É possível comparar o efeito da incidência de uma onda sonora num material absorvente, um refletor e um difusor (Figura 2.4). No primeiro caso a energia refletida é mínima. No segundo caso a energia refletida é muito maior e está concentrada em torno da direção da reflexão. No último caso a energia refletida é muito grande, sendo repartida de forma uniforme em todas as direções. Qualquer superfície com alguma irregularidade apresenta um certo grau de difusão sonora (Isbert, 1998).

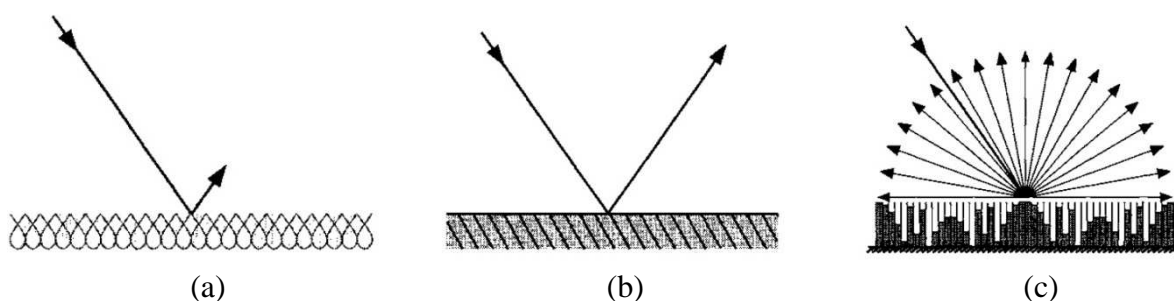


Figura 2.4 – Comparação entre os efeitos da absorção (a), reflexão (b) e difusão sonora (c).
Adaptado de Isbert (1998).

A difusão sonora é mais utilizada em salas de concertos, de forma a garantir que a energia produzida pelo campo reverberante chegue a todos os espectadores de igual modo, em todas as direções do espaço. No entanto, pode também ser utilizada em salas destinadas à palavra, de modo a eliminar anomalias que se possam verificar nestes espaços (tal como os ecos) (Isbert, 1998).

2.2.3 Tempo de reverberação

Se os ouvintes estão num local fechado, as ondas refletidas chegam aos seus ouvidos numa sucessão tão rápida que habitualmente não se ouvem como receções distintas do som original. No lugar dele, os recetores ouvem o som original, prolongado depois da fonte ser interrompida, até que o som se reduz à inaudibilidade. Esta propagação do som depois da fonte ser interrompida, denomina-se reverberação (Harris, 1998).

O tempo de reverberação, T_r , de um espaço fechado, para uma determinada banda de frequência, corresponde ao intervalo de tempo necessário para que se verifique um

decaimento de 60 dB, após ser interrompida a emissão de energia sonora (Figura 2.5). Este é um parâmetro que depende das características geométricas do espaço a analisar, dos objetos existentes e dos coeficientes de absorção sonora dos materiais da envolvente exposta. Desta forma, quando se procede à determinação deste parâmetro, deve-se garantir que o ruído de fundo seja baixo ou mesmo nulo, para que se verifique o decaimento de 60 dB. Contudo, na maioria dos ensaios experimentais, tal não é possível, daí ser necessário utilizar valores de intervalos de decaimento menores, $T_{(20)}$ ou $T_{(30)}$ (que correspondem a valores de decaimento de 20dB e de 30 dB respetivamente). Ao considerar intervalos de decaimentos inferiores, vai implicar uma menor abrangência de níveis sonoros. Os valores dos tempos de reverberação são extrapolados a partir das diferentes reduções (20 e 30 dB) (Tadeu et al, 2010).

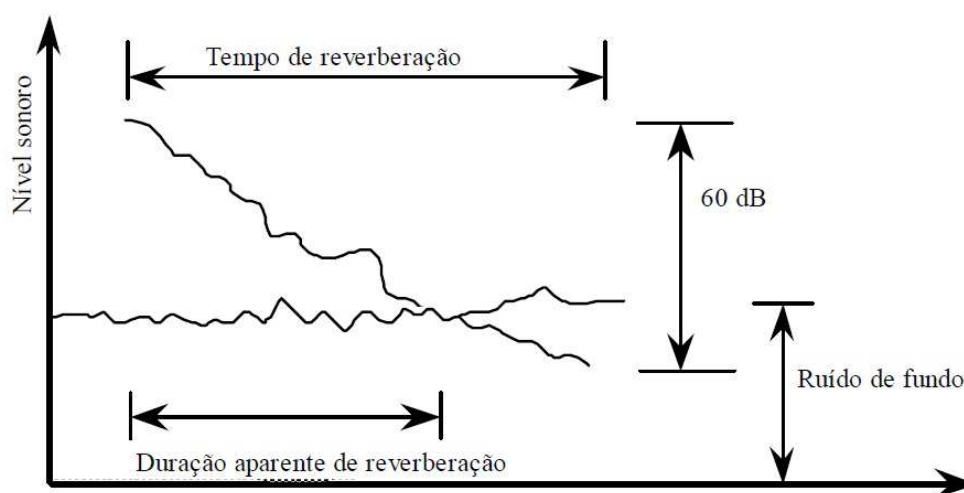


Figura 2.5 – Curva de decaimento do nível sonoro (Tadeu et al, 2010).

Em muitos casos, a curva de decaimento apresenta irregularidades, embora tenda para uma linha reta. O motivo da existência destas irregularidades deve-se ao facto de nenhum espaço apresentar um campo sonoro perfeitamente difuso. Assim, é possível utilizar o método de Schroeder na determinação do tempo de reverberação, que consiste na aproximação da curva de decaimento a uma linha reta, pela integração de todos os valores desde um instante de tempo infinito até ao instante inicial (Isbert, 1998).

O tempo de reverberação é normalmente determinado para todas as bandas de frequência com interesse. Para o discurso, as bandas de frequência com maior relevância são as compreendidas entre os 500 e os 2000 Hz.

Existem vários fatores que podem influenciar os resultados experimentais na determinação deste parâmetro, entre eles destacam-se as irregularidades na curva de decaimento, o posicionamento da fonte e do microfone (Beranek, 1988).

2.2.3.1 Valores de referência para o tempo de reverberação

Nem sempre o tempo de reverberação de um determinado espaço, corresponde ao tempo de reverberação ótimo, daí a necessidade de fazer ajustes a este parâmetro. Os valores ideais do tempo de reverberação vão depender essencialmente do volume do espaço e do fim a que este se destina. Assim, em espaços cuja principal função é a palavra, tal como salas de aula ou salas de conferências, o tempo de reverberação deverá ser baixo, de modo a que se torne clara a inteligibilidade da palavra, sem produzir fadiga no orador e nos ouvintes. Pelo contrário, em espaços como as igrejas esse tempo de reverberação deverá ser mais elevado (Tadeu et al, 2010). Na Figura 2.6 são apresentados os tempos de reverberação ótimos para diferentes tipos de situações.

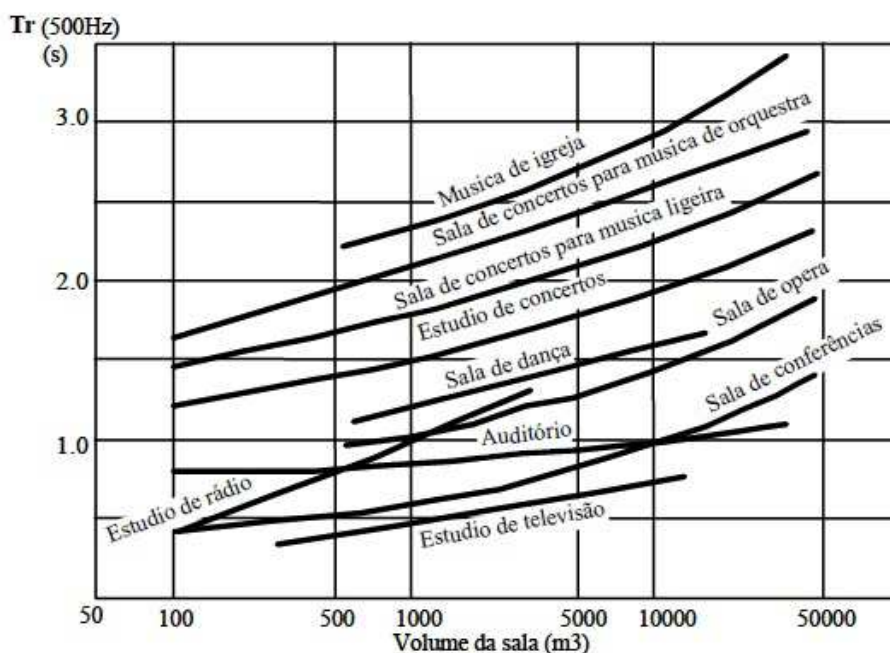


Figura 2.6 – Tempos ótimos de reverberação, a 500 Hz, para diferentes tipos de utilizações (Tadeu et al, 2010).

2.2.4 Fórmula de Sabine

A fórmula de Sabine é dada pela expressão (Tadeu et al, 2010):

$$T_r = 0.163 * \frac{V}{A} \quad (2.2)$$

Onde:

T_r – tempo de reverberação, em s;

V – volume da sala, em m^3 ;

A – área de absorção equivalente, em m^2 , determinada por:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i * A_i + \sum_{j=1}^m A_{obj,j} \quad (2.3)$$

A_i – área do material i , em m^2 ;

α_i – coeficiente de absorção do material i ;

$A_{obj,j}$ – área de absorção sonora do objeto j , em m^2 .

No entanto, será necessário que se verifiquem as hipóteses do modelo de Sabine, para que não existam erros na aplicação da fórmula. Os resultados serão viáveis caso os coeficientes de absorção dos materiais que constituem as superfícies expostas apresentem valores inferiores a 0.2 ($\alpha_{medio} \leq 0.2$) e se estiverem distribuídos de forma mais ou menos uniforme (Tadeu et al, 2010).

2.2.5 Definição, clareza e inteligibilidade

No conforto acústico de um espaço é necessário ter em conta parâmetros como a definição, a clareza e a inteligibilidade. Para obtenção destes parâmetros é necessário recorrer a um equipamento de medição sonora adequado. Pode ser utilizado o método MLS que regista a resposta impulsiva de uma sala.

O ouvido humano não é capaz de distinguir dois sons se eles estiverem intervalados de 50 a 80ms. A ideia base da definição é que a energia que chega durante um intervalo de 50ms é considerada como «útil» e a que chega depois como «inútil», ou secundária (Patrício, 2010).

A clareza resulta da relação entre a energia sonora que chega ao ouvinte nos primeiros 80ms e a energia que é percebida pelo mesmo passado este intervalo de tempo. É um parâmetro a ter em conta em locais de espetáculos musicais e de emissão de palavra (Patrício, 2010).

A inteligibilidade é utilizada para caracterizar a palavra, e avalia a quantidade de sons inteligíveis relativamente à totalidade de sons emitidos. É um parâmetro obtido pelo índice RASTI e classificado de 0 a 1 (inteligibilidade nula e inteligibilidade perfeita, respetivamente) (Tadeu et al, 2010).

Os fatores que afetam a inteligibilidade da palavra são o espectro e a estrutura temporal da fala e do ruído, a reverberação do local, o nível de som da fonte, a distância entre a fonte e o ouvinte e a familiaridade do ouvinte com as palavras preconizadas pela fonte. Também, e não menos importantes, são os aspetos linguísticos e pragmáticos, tais como: dialeto, velocidade da fala, clareza e articulação do discurso (Harris, 1998).

Nas medições experimentais deste parâmetro, a fonte é colocada na posição do orador. O microfone recetor deve ser colocado em vários pontos da sala para determinar o índice RASTI (Long, 2006).

Assim, o parâmetro RASTI pode ser classificado como mau, pobre, razoável, bom e excelente, segundo o Quadro 2.1 (Patrício, 2010).

Quadro 2.1 – Classificação do parâmetro RASTI.

RASTI	0.00 – 0.30	0.30 – 0.45	0.45 – 0.60	0.60 – 0.75	0.75 – 1.00
Classificação	Mau	Pobre	Razoável	Bom	Excelente

2.3 Outros parâmetros acústicos

Para além dos parâmetros acústicos referidos na secção 2.2.5, existem outros, que juntamente com estes permitem caracterizar a qualidade acústica de um espaço. Os parâmetros em causa são: tempo de decaimento inicial (EDT), sonoridade (G), eficiência lateral (LF) e clareza (C80).

Estes parâmetros podem ser obtidos experimentalmente, através de ensaios no local, recorrendo a equipamento especializado e programas informáticos (exemplo: dBBA32).

Contudo, os parâmetros referidos não serão abordados nem analisados no decorrer deste trabalho.

2.4 Materiais de correção acústica

Quando as ondas sonoras atingem a superfície de um material, parte da energia incidente é absorvida mediante a conversão em calor. De certa forma todos os materiais absorvem o som, uns mais que outros; os materiais acústicos são aqueles cuja sua função primária é absorver o som, ou seja, absorvem uma grande parte da energia acústica incidente (Harris, 1998).

O interior de um espaço fechado contém normalmente, nas suas superfícies, materiais rígidos que refletem os sons. Exemplos de grande refletividade são as superfícies constituídas por gesso, plástico, vidro e cerâmica. Nos exemplos de materiais com boa absorção sonora, estão incluídas as decorações e o mobiliário, tais como as carpetes, revestimentos acústicos, entre outros. Os materiais que funcionam como barreiras são na maioria impenetráveis, rígidos e pesados. Pelo contrário, materiais com boa absorção sonora são mais macios e porosos. Como termo de comparação, é possível afirmar que os materiais que são boas barreiras ao som, são resistentes à passagem de ar e água, enquanto que os outros são muito parecidos a uma esponja (Harris, 1997).

Os materiais que mais absorvem energia sonora (maior capacidade de absorção), podem ser classificados segundo 3 categorias: materiais porosos ou fibrosos, membranas e ressoadores.

Os materiais porosos ou fibrosos são constituídos por uma componente sólida que ocupa parte do seu volume, sendo que a parte sobranete é formada por pequenas cavidades cheias de ar, que podem (ou não) comunicar entre si. “O movimento do ar contido nos pequenos orifícios do material permite por efeito da viscosidade, a dissipação da energia cinética em calor” (Tadeu et al, 2010). São exemplos destes materiais a lã de vidro, lã de rocha, espumas com poro aberto, alcatifas e tecidos (Patrício, 2010).

As membranas ou painéis são materiais constituídos por uma placa flexível que está separada da base de suporte através de apoios. A absorção do som dá-se por dissipação de energia sonora aquando do movimento da placa (Tadeu et al, 2010).

Os ressoadores são na maioria painéis perfurados, localizados a alguma distância do elemento de suporte. A absorção do som dá-se por vibrações no ressoador, por atrito, que vão dissipar parte da energia sonora incidente (Tadeu et al, 2010 e Patrício, 2010).

2.5 Regulamentação em vigor

É no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 129/2002, que são definidas as principais exigências relativas às condições acústicas nos edifícios em Portugal, de forma a melhorar a qualidade do ambiente acústico, o bem estar e a saúde das populações. O diploma foi posteriormente alvo de alterações pelo Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de Junho. O regulamento impõe limites aos valores do tempo de reverberação máximo de determinados locais.

No caso específico de salas em edifícios escolares, devem ser cumpridos os requisitos definidos no artigo 7º do Decreto-Lei nº 96/2008.

Na situação particular de salas de aula, utiliza-se a expressão (2.4), dada no Anexo III do Decreto-Lei 96/2008:

$$T \leq 0.15 V^{\frac{1}{3}} [s] \quad (2.4)$$

A expressão (2.4) é ainda válida no caso de refeitórios ou recintos públicos de restauração e escritórios com volume superior a 100 m³.

De acordo com o Decreto-Lei nº 96/2008, em recintos cuja principal função seja a oratória, o tempo de reverberação médio, irá corresponder à média aritmética dos valores obtidos nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz. Em espaços normalmente mobilados e sem ocupação devem ser garantidos os seguintes requisitos:

$$i) T \leq 0.12 V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V < 250 \text{ m}^3 \quad (2.5)$$

$$ii) T \leq 0.32 + 0.17 \text{ Log } V, \text{ se } 250 \leq V \leq 9000 \text{ m}^3 \quad (2.6)$$

$$iii) T \leq 0.05 V^{\frac{1}{3}}, \text{ se } V \geq 9000 \text{ m}^3 \quad (2.7)$$

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é feita uma descrição dos vários espaços analisados neste trabalho, bem como dos métodos utilizados nos ensaios experimentais.

3.1 Descrição dos espaços avaliados

Os espaços avaliados neste trabalho pertencem ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Foram escolhidas três salas com dimensões e volumetrias semelhantes, mas com revestimentos acústicos diferentes umas das outras. Foi ainda escolhido um anfiteatro e foram realizados ensaios na câmara reverberante do Departamento. Os espaços em questão são: a sala SE 4.3, a sala SE 4.4, a sala SA 2.10 e o anfiteatro SA 2.5 (Anexo A).

A sala SE 4.4 é uma sala com dimensões retangulares, possui um comprimento de 8.80m e uma largura de 6.10m. O seu pé direito é de 3.10m e o único mobiliário existente na sala são as mesas e as cadeiras da sala de aula. Contudo, os ensaios foram realizados sem qualquer tipo de mobiliário (com a sala vazia).

O chão é uma laje de betão armado, revestido a tacos de madeira; na lateral da sala existem quatro janelas com caixilho de ferro, cada uma com as dimensões de 1.60x2.00m, distribuídas uniformemente ao longo da parede. O contorno dos bordos das janelas é feito em madeira. Na lateral oposta existem 2 portas com as dimensões e 2.50x1.00m, maioritariamente constituídas por vidro e caixilho de madeira; quatro armários embutidos de madeira com as dimensões de 2.50x1.25m cada um. As paredes e o teto são revestidos com um reboco de argamassa e cimento e uma pintura. Na parede da frente da sala existe um quadro que ocupa toda a largura da sala, tem uma altura de 1.20m e está 0.90m do chão. A lotação máxima admissível é de 30 alunos. A Figura 3.1 mostra uma imagem exemplificativa de duas das salas analisadas.

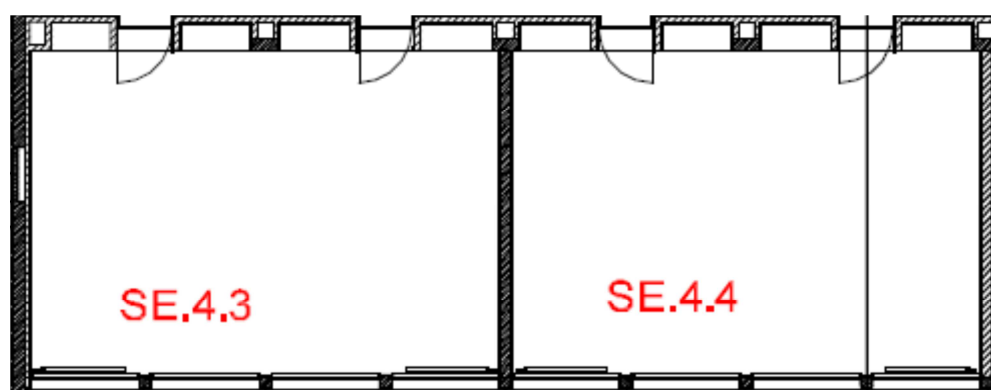


Figura 3.1 – Figura esquemática das salas SE 4.3 e SE 4.4 do 4º piso do Departamento de Engenharia Civil, adaptado da planta do Departamento.

A sala SE 4.3 é em tudo idêntica à sala SE 4.4, mas já foi sujeita a uma intervenção na parede do fundo da sala, para correção das suas características acústicas (Figura 3.2). O material aplicado nessa parede foi um ripado de madeira disposto tanto na horizontal como na vertical, possuindo uma camada de lã de rocha de 4 cm. O ripado tem uma espessura de 2 cm, uma largura de 9 cm e um afastamento entre ripas de 1 cm.



Figura 3.2 – Fotografia do ripado de madeira existente na parede do fundo da sala SE 4.3.

A sala SA 2.10 é em tudo igual à SE 4.4, excetuando o facto de não ter armários de madeira embutidos na parede e de já ter sido alvo de uma intervenção acústica, nomeadamente a colocação de um aglomerado de madeira liso na parede do fundo com 6 cm de espessura e a introdução de um teto falso em gesso perfurado (Figura 3.3). Note-se que esta é uma sala utilizada para videoconferência e as características acústicas do espaço devem satisfazer os requisitos mínimos de conforto acústico.



Figura 3.3 – Fotografia do teto acústico perfurado da sala SA 2.10.

O anfiteatro SA 2.5 é um espaço onde foram utilizadas várias soluções acústicas aquando da sua execução, nomeadamente ripado de madeira nas paredes do fundo e laterais, painéis de aglomerado de madeira na parede da frente e teto em gesso ranhurado na metade de trás da sala. Todo o mobiliário do anfiteatro é em madeira e está fixo ao local.

Os materiais e os respetivos coeficientes de absorção são apresentados em forma de tabela no Anexo B.

Quadro 3.1 – Características geométricas das salas em estudo e do anfiteatro.

Características geométricas	Sala SE 4.3	Sala SE 4.4	Sala SA 2.10	Anfiteatro SA 2.5
Comprimento [m]	8.70	8.80	8.80	15.35
Largura [m]	6.10	6.10	6.10	8.75
Pé direito [m]	3.10	3.10	3.10	de 2.50 a 3.50
Volume [m ³]	166.00	167.00	167.00	470.10

Para além dos espaços descritos anteriormente foram também realizados ensaios em câmara reverberante, existente no DEC. Este espaço apresenta um volume de 111 m³ e os ensaios serviram para verificar o comportamento de um material fonoabsorvente quando ensaiado neste espaço e numa sala com características semelhantes à de uma câmara reverberante (sala SE 4.4).

3.2 Metodologia experimental

3.2.1 Condições de ensaio e equipamento a utilizar

Os ensaios foram realizados num período em que não existiam aulas a decorrer no Departamento, para que não houvesse fatores externos, tais como o ruído de fundo, que pudesse interferir com os resultados.

Alguns dos ensaios para a determinação do tempo de reverberação, foram efetuados revestindo o pavimento das salas com um material fonoabsorvente. O material utilizado foi o “aglomex acoustic” comercializado em placas com dimensões 1.00x1.00m e com uma espessura de 30mm, tal como se observa nas fotografias dos ensaios experimentais (Anexo A). Este material resulta da aglomeração de espuma flexível de poliuretano de diferentes densidades, apresentando uma composição homogénea e estável. É um material poroso e a sua finalidade é resolver problemas acústicos de edifícios.

Todo o mobiliário das salas foi retirado, ficando apenas uma mesa pequena, para apoio do computador.

Os ensaios foram realizados com uma pessoa dentro da sala e todas as portas e janelas fechadas pois, segundo norma EN ISO 3382-2, um grande número de pessoas presentes na sala pode influenciar os tempos de reverberação, mas uma sala com duas pessoas pode ser considerada como desocupada.

O equipamento utilizado nas medições foi uma fonte sonora omnidirecional normalizada de sons aéreos; um microfone; um amplificador com 600W de potência; um analisador portátil de dois canais; um computador portátil; um calibrador de microfone e protetores auriculares. O programa de aquisição e tratamento de dados utilizado foi o dBbati32.

O procedimento de ensaio nas salas de aula é idêntico ao que foi realizado em câmara reverberante. Para cada ensaio foram feitas 12 medições, 2 posições de fonte e 3 posições de microfone, com 2 medições em cada posição, de maneira a satisfazer o número mínimo de posições do microfone e da fonte estipulado na norma EN ISO 354.

As distâncias mínimas são definidas na norma EN ISO 3382-2, que especifica que as posições do microfone devem ter um afastamento superior a 2 m entre si. A distância entre a posição do microfone e as paredes do compartimento deve ser superior a 1 m, e a distância mínima entre a posição do microfone e da fonte é dada pela expressão (3.1).

$$d_{min} = 2 * \sqrt{\frac{V}{c*T}} \quad (3.1)$$

Onde: V – volume, em m³;
 c – velocidade do som, em m/s;
 T – estimativa do tempo de reverberação esperado, em s.

Uma das posições da fonte (F1) está no local do professor, onde normalmente é feito o discurso, a outra (F2) está colocada atrás da sala. As posições do microfone foram distribuídas pela sala, no local dos ouvintes. A disposição das posições da fonte e do microfone é exemplificada na Figura 3.4.

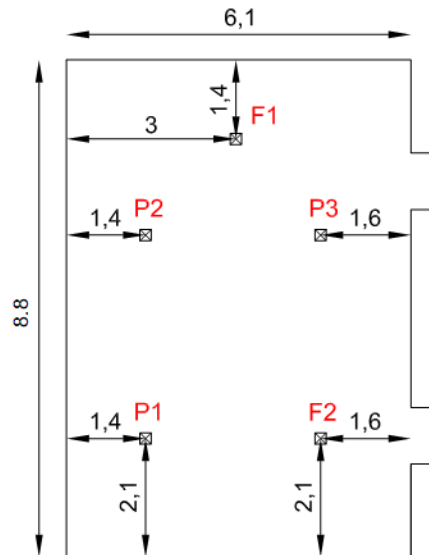


Figura 3.4 – Figura esquemática das posições da fonte e do recetor nas salas SE 4.3, SE 4.4 e SA 2.10 (unidades em metros).

No caso do anfiteatro, devido às duas dimensões, foram realizadas 24 medições, 2 posições de fonte e 6 posições de microfone, com 2 medições em cada posição. A fonte foi colocada no local do orador e a meio da sala e as posições do microfone foram colocadas ao longo dos dois corredores de passagem do anfiteatro (2 atrás, 2 a meio e 2 à frente).

3.2.2 Métodos de medição e parâmetros a determinar

Os ensaios experimentais, foram realizadas consoante a Norma EN ISO 3382-2: “Medição de parâmetros acústicos de salas, Parte2: Tempo de reverberação em espaços correntes”.

Foram utilizadas as duas metodologias definidas na Norma, o Método do ruído interrompido e o Método da resposta impulsiva integrada, os quais serão alvo de comparação no próximo capítulo. A técnica utilizada nas medições baseou-se na observação de cada curva de decaimento utilizando um equipamento de medição.

Os parâmetros a determinar nestes ensaios foram o tempo de reverberação e o RASTI, para as várias situações de ocupação da sala.

Os ensaios realizaram-se para as situações apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Campanha de ensaios realizada na câmara reverberante, nas salas de aula e no anfiteatro.

Ensaio	Finalidade
Câmara Reverberante vazia, método MLS	<ul style="list-style-type: none"> • Obter o coeficiente de absorção da espuma de 30mm; • Comparar os resultados obtidos pelos métodos MRI e MLS.
Câmara Reverberante vazia, método MRI	
Câmara Reverberante com 10 m ² de espuma (30 mm), método MLS	
Câmara Reverberante com 10 m ² de espuma (30 mm), método MRI	
Sala SE 4.4 com 10 m ² de espuma (30 mm), método MLS	
Sala SE 4.4 com 10 m ² de espuma (30 mm), método MRI	
Sala SE 4.4 vazia, método MLS	
Sala SE 4.4 vazia, método MRI	
Sala SE 4.4 com 31 m ² de espuma (60 mm), método MLS	<ul style="list-style-type: none"> • Validação de resultados da curva de correção referenciada no capítulo 6.
Sala SE 4.4 com totalidade do pavimento preenchido a espuma (30 mm), método MLS	
Sala SE 4.3 vazia, método MLS	
Sala SE 4.3 com totalidade do pavimento preenchido a espuma (30 mm), método MLS	
Sala SA 2.10, método MLS	
Anfiteatro SA 2.5, método MLS	

3.2.3 Método de cálculo para determinação do coeficiente de absorção α

Tal como mencionado anteriormente, a norma de ensaio seguida na parte experimental deste trabalho foi a EN ISO 3382-2, e a metodologia de cálculo é aquela que está definida na secção 8 da EN ISO 354.

Para a determinação do coeficiente de absorção, foram medidos os tempos de reverberação da sala em estudo, para a situação com (T_2) e sem provete (T_1). De seguida, com estes tempos de reverberação é possível obter a área de absorção sonora equivalente para ambas as situações, em m^2 . No caso da sala vazia, a expressão é dada por:

$$A_1 = \frac{55.3 V}{c T_1} - 4V m_1 \quad (3.2)$$

$$A_2 = \frac{55.3 V}{c T_2} - 4V m_2 \quad (3.3)$$

Onde: V é o volume da câmara reverberante vazia, em m^3 ;
 T_1 é o tempo de reverberação para a sala vazia, em s;
 T_2 é o tempo de reverberação para a sala com o provete de ensaio, em s;
 m_1 e m_2 são os coeficientes de atenuação devido à presença do ar;
 c é a velocidade de propagação do som no ar, em m/s, dado pela equação:

$$c = (331 + 0.6 * t) \quad (3.4)$$

Onde: t é a temperatura do ar, em $^{\circ}C$.

A área de absorção sonora equivalente (A_T), em m^2 do provete de ensaio é dada pela diferença entre A_2 e A_1 :

$$A_T = A_2 - A_1 = 55.3 V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4 V (m_2 - m_1) \quad (3.5)$$

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora (α_s) do elemento absorvente, utiliza-se a equação (3.6).

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (3.6)$$

Onde: A_T é a área de absorção equivalente do provete de ensaio, em m^2 ;
 S é a área do provete de ensaio, em m^2 .

Uma vez que para os ensaios se irá admitir condições ambientais constantes nas salas a analisar, as parcelas relativas à atenuação devido à presença do ar vão-se anular não tendo qualquer significado no resultado final.

A área de provete analisada nos ensaios foi de $10 m^2$ e a localização do provete foi a meio da sala, cumprindo as distâncias mínimas recomendáveis, tal como se pode observar no Anexo A – secções A.2 e A.4.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais relativos aos métodos MLS e MRI, bem como os resultados relativos aos coeficientes de absorção.

4.1 Comparação dos tempos de reverberação dados pelos métodos MLS e MRI

Na determinação experimental dos tempos de reverberação, foram feitas medições com dois métodos diferentes, o MLS e o MRI. Ambos os métodos permitem obter o tempo de reverberação, no entanto, o MLS dá ainda informação relativa a outros parâmetros que serão necessários para o desenvolvimento desta tese.

Segundo a norma EN ISO 3382-2, o MRI é um método que permite obter as curvas de decaimento, através do registo direto do decaimento do nível de pressão sonora, após uma excitação da sala com ruído de banda larga ou com ruído por bandas de frequência. É uma metodologia bastante usada na determinação do tempo de reverberação, no entanto, não permite obter outros parâmetros acústicos relevantes para o condicionamento acústico de salas, como é o caso do RASTI ou da definição.

O MLS é um método que também permite obter as curvas de decaimento. Este método analisa a evolução temporal da pressão observada num ponto de um compartimento, em resultado da emissão de uma sequência de impulsos, sendo que a resposta a estes impulsos é processada e transformada em resposta impulsiva. A fonte impulsiva deve ter capacidade de produzir um nível de pressão sonora de pico suficiente para garantir que a curva de decaimento se inicie, pelo menos 35 dB acima do nível de ruído de fundo da banda de frequências correspondente, de modo a garantir um decaimento mínimo de 20 dB (norma EN ISO 3382-2).

Observando o tempo de reverberação do gráfico da Figura 4.1, verifica-se que a diferença entre os dois métodos é praticamente nula, havendo um pequeno distanciamento, de 0.35s, na banda de frequências dos 125 Hz.

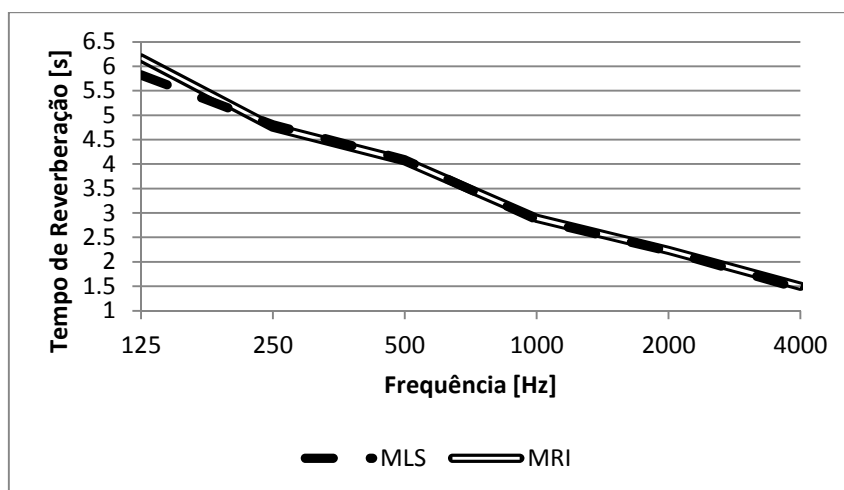


Figura 4.1 – Valores médios do tempo de reverberação obtidos para a câmara reverberante vazia, nas bandas de frequência indicadas, para os métodos MLS e MRI.

Da análise do gráfico da Figura 4.2, verifica-se que os tempos de reverberação são praticamente coincidentes a partir da banda de frequências dos 500Hz. A grande discrepância na banda dos 125Hz pode dever-se a um erro de medição experimental na sala de aula, pois no programa informático dBati32 é necessário definir um tempo de medição de ordem de grandeza idêntica ao conferido pela sala, e apenas se utilizou 2.6s. Estima-se que a curva MLS apresentasse um decaimento semelhante ao obtido para o MRI.

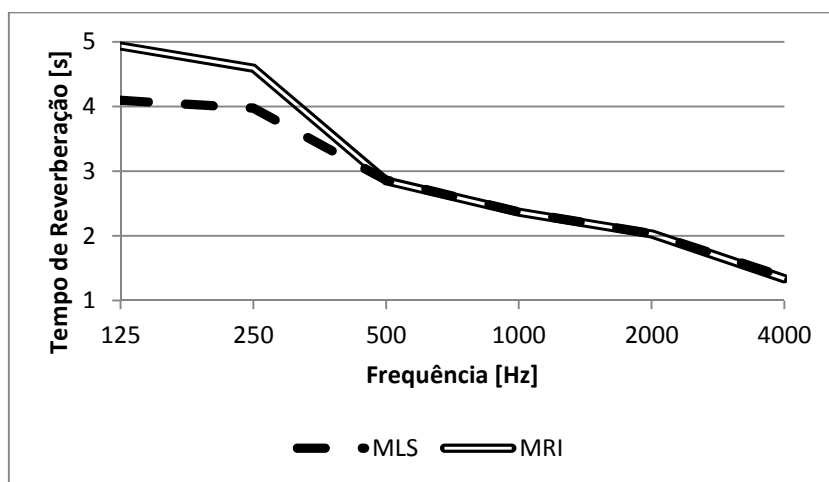


Figura 4.2 – Valores médios do tempo de reverberação obtidos para a sala SE 4.4 vazia, nas bandas de frequência indicadas, para os métodos MLS e MRI.

É possível concluir, pelos dados apresentados anteriormente, que tanto o MLS como o MRI, apresentam resultados muito semelhantes em ambas as situações de ensaio. No entanto

verifica-se que em câmara reverberante a curva é mais linear, apresentando tempos de reverberação superiores nas bandas de frequências até aos 1000 Hz. A partir desta banda de frequência, em ambos os espaços, o tempo de reverberação tende para um valor aproximado de 1.5 s. Note-se que a sala de aula é preenchida numa das laterais por armários de madeira, chão revestido a ladrilho cerâmico, entre outras condicionantes, que contribuem para diminuir a reverberação deste espaço.

4.2 Coeficiente de absorção da espuma de poliuretano

Para determinar o coeficiente de absorção da espuma de poliuretano, foram realizados ensaios na câmara reverberante e na sala SE 4.4. Os coeficientes de absorção obtidos experimentalmente, bem como os retirados do catálogo do fabricante, encontram-se representados nos gráficos da Figura 4.3. Nesta figura apresentam-se os resultados obtidos pelos métodos MLS e MRI, onde se pode observar qual dos métodos se aproxima mais da curva do fabricante.

Da análise dos resultados, conclui-se que a curva que mais se aproxima da curva do fabricante é aquela cujo ensaio é realizado numa sala de aula. Esta discrepância de resultados entre as duas situações de ensaio poderá dever-se ao facto dos ensaios realizados na câmara reverberante terem sido assistidos por três pessoas, enquanto que os ensaios na sala, foram assistidos apenas por uma pessoa. Segundo a norma EN ISO 3382-2, apenas “uma sala onde estejam duas pessoas presentes poderá ser considerada representativa do seu estado desocupado”.

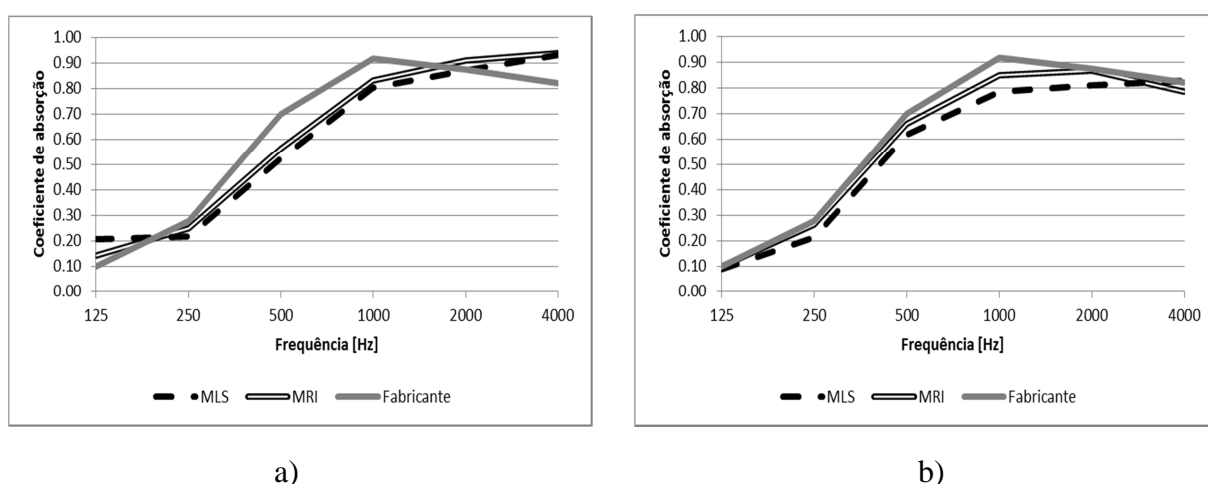


Figura 4.3 – Comparação entre os coeficientes de absorção obtidos pelo MRI e MLS com os valores do fabricante: a) na câmara reverberante; b) na sala SE 4.4.

A presença de pessoas irá influenciar principalmente os sons agudos (frequências mais altas), devido à absorção conferida pelo vestuário, e daí uma possível justificação para um aumento de absorção entre a banda dos 2000 e 4000 Hz, na Figura 4.3 a).

Será ainda de referir que as dimensões do local de ensaio também poderão ter influenciado os resultados. Os valores dados pelo fabricante foram ensaiados na câmara reverberante do LNEC, que possui um volume de 121 m³, enquanto que a câmara do DEC possui um volume de 111 m³ e a sala SE 4.4 um volume de 167 m³.

4.3 Coeficiente de absorção do ripado de madeira da sala SE 4.3

Os coeficientes de absorção para as várias bandas de frequência do ripado de madeira foram determinados experimentalmente, pela comparação entre as salas SE 4.4 e SE 4.3 vazias. Para isto, foi seguido o procedimento da secção 8 da EN ISO 354. No Quadro 4.1 apresentam-se os coeficientes de absorção determinados para este material.

Quadro 4.1 – Coeficientes de absorção do ripado de madeira da sala SE 4.3, nas bandas de frequência consideradas.

Freq. [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha \rightarrow$ MLS	0.46	0.61	0.73	0.45	0.27	0.17
$\alpha \rightarrow$ Fabricante	0.21	0.83	0.74	0.31	0.28	0.36

Na Figura 4.4 apresenta-se a comparação entre a curva experimental e a curva dada pelo fabricante.

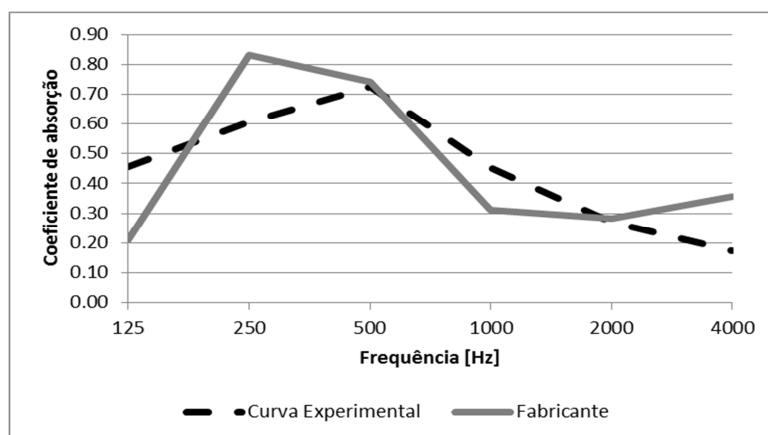


Figura 4.4 – Comparação entre a curva experimental dos coeficientes de absorção do ripado de madeira e a do fabricante.

Da observação da Figura 4.4 verifica-se que os valores do coeficiente de absorção do ripado de madeira, que foram determinados pela campanha de medições nas duas salas, são na sua maioria inferiores àqueles que seriam dados pelo fabricante. Isto acontece porque a área que se analisou é de aproximadamente 20 m², muito superior à área ensaiada em laboratório (10 m²). É de notar que os ensaios realizados pelo fabricante são feitos em câmara reverberante, onde as superfícies são muito mais reverberantes que a sala. Quando se realiza o ensaio numa câmara reverberante, o número de reflexões é muito superior ao da sala, conduzindo a valores de coeficientes de absorção maiores.

5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo é feita uma comparação entre os resultados experimentais e os dados numéricos obtidos pelo CATT – AcousticTM.

5.1 CATT – AcousticTM / fórmula de Sabine

O programa CATT – AcousticTM é um programa de simulação, que nos permite estimar vários parâmetros acústicos. Esta ferramenta parte da modelação do espaço, que pode ser exportada do AutoCAD ou introduzida no programa através da definição de vários pontos. É uma ferramenta bastante importante pois é através dela que se pode tratar a acústica do espaço, de maneira a prever quais as melhores soluções construtivas a adotar ainda na fase de projeto. Neste programa podem ser consideradas as situações em que se assume condições ambientais e as situações em que se desprezam, permitindo definir os parâmetros temperatura, humidade e densidade.

Nos ensaios, as condições ambientais consideradas foram de 20°C de temperatura, 50% de humidade e uma densidade de 1.20Kg/m³.

O valor do coeficiente de atenuação devido à presença do ar, que é dado em função dos parâmetros referidos no parágrafo anterior, foi retirado do programa CATT – AcousticTM e é apresentado no Quadro 5.1, para as bandas de frequência indicadas.

Quadro 5.1 – Coeficientes de atenuação devido à presença do ar.

	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
m	0.000101	0.000302	0.000628	0.001070	0.002280	0.006830

Uma vez que os ensaios experimentais foram realizados sob as condições climatéricas referidas anteriormente, também na fórmula de Sabine foi necessário admitir estes parâmetros. Segundo a norma EN ISO 354, a expressão é dada por:

$$T_r = \frac{55.3}{c} * \frac{V}{A+4*V*m} \text{ (s)} \quad (5.1)$$

Onde: V é o volume do espaço a analisar em m³;
m é o coeficiente de atenuação devido à presença do ar (definido no Quadro 5.1);
c é a velocidade de propagação do som no ar em m/s, e é dado pela expressão:

$$c = (331 + 0.6 * t) \quad (5.2)$$

Onde:
t é a temperatura, em °C.

5.2 Calibração do modelo – Ajuste dos coeficientes de absorção dos materiais

O coeficiente de absorção de um material é um parâmetro importante a ter em conta, aquando da utilização do programa CATT – AcousticTM ou da fórmula de Sabine. Apesar de ser usado um mesmo material ou solução construtiva, a verdade é que o coeficiente de absorção nunca vai ser exatamente igual para dois locais. O recheio do espaço e a dificuldade de quantificação da absorção de determinados elementos, também irá influenciar os resultados dos coeficientes de absorção dos materiais presentes num dado espaço.

Inicialmente foi feita uma pesquisa bibliográfica de diferentes autores, sobre os coeficientes de absorção dos diversos materiais presentes nas salas de aula em estudo. Os resultados encontrados, apresentam-se nos Quadros 5.2 e 5.3.

Quadro 5.2 – Coeficientes de absorção de diversos materiais, retirados de Patrício (2010).

Patrício (2010)	Superfícies	Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
	Paredes e teto	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05
	Pavimento	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
	Armários	0.14	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08
	Janelas e Porta	0.12	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02
	Quadro	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05
	Ripado de madeira	0.30	0.36	0.32	0.24	0.20	0.20

Quadro 5.3 – Coeficientes de absorção de diversos materiais, retirados de Domingues (2005).

Domingues (2005)	Superfícies	Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
	Paredes e teto	-	0.02	0.03	0.04	0.05	-
	Pavimento	0.02	0.04	0.05	0.04	0.10	0.05
	Armários	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10
	Janelas e Porta	0.30	0.20	0.10	0.07	0.05	0.02
	Quadro	-	0.04	0.03	0.03	0.02	-
	Ripado de madeira	0.32	0.82	0.54	0.38	0.28	0.22

A sala usada para efetuar a correção nos coeficientes de absorção foi a sala SE 4.4, pois é aquela que mais se assemelha a uma câmara reverberante, não tendo ainda sido alvo de qualquer correção acústica. Para as restantes salas, serão assumidos os valores dos coeficientes de absorção corrigidos obtidos para a sala SE 4.4.

Para proceder ao ajustamento dos coeficientes de absorção dos materiais da sala, utilizou-se o parâmetro que mais condiciona a caracterização de um dado espaço, o tempo de reverberação. Este procedimento foi realizado pela comparação dos tempos de reverberação obtidos pelo programa CATT – AcousticTM e aqueles que foram obtidos experimentalmente. Partiu-se do princípio que a percentagem de erro obtida não deveria ultrapassar os 5%.

Numa primeira análise utilizou-se a média entre os valores dados por Patrício (2010) e Domingues (2005), mas com um pequeno ajustamento nas baixas frequências (Quadro 5.4)

Quadro 5.4 – Média dos coeficientes de absorção dados por Patrício (2010) e Domingues (2005).

Média dos dois autores	Superfícies	Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
	Paredes e teto	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
	Pavimento	0.02	0.04	0.05	0.05	0.08	0.06
	Armários	0.14	0.10	0.07	0.08	0.09	0.09
	Janelas e Porta	0.21	0.14	0.08	0.06	0.04	0.02
	Quadro	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05

No Quadro 5.5 encontram-se os tempos de reverberação obtidos experimentalmente e pelo CATT – AcousticTM.

Quadro 5.5 – Tempos de reverberação para o modelo sem calibração, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas.

	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ensaio (MLS) [s]	4.09	3.97	2.86	2.37	2.04	1.36
CATT (T-30) [s]	3.21	3.04	3.02	2.66	2.04	1.78
% de erro	-21.67	-23.51	5.39	12.24	0.12	30.20

Como é dado a observar na Figura 5.1, o tempo de reverberação difere de uma curva para outra (até aos 500 Hz verifica-se que existe uma absorção muito maior que a obtida experimentalmente e a partir desta frequência verifica-se o inverso). O principal objetivo da calibração será aproximar os tempos de reverberação, diminuindo a absorção nas bandas de frequência até aos 500 Hz e aumentando a absorção a partir desta banda de frequência. Foram realizados alguns ajustes ao nível dos coeficientes de absorção de todos os materiais, no entanto, aqueles que irão influenciar de forma mais significativa os resultados serão os da parede, teto e pavimento, pois são os materiais que apresentam maior área de superfície exposta.

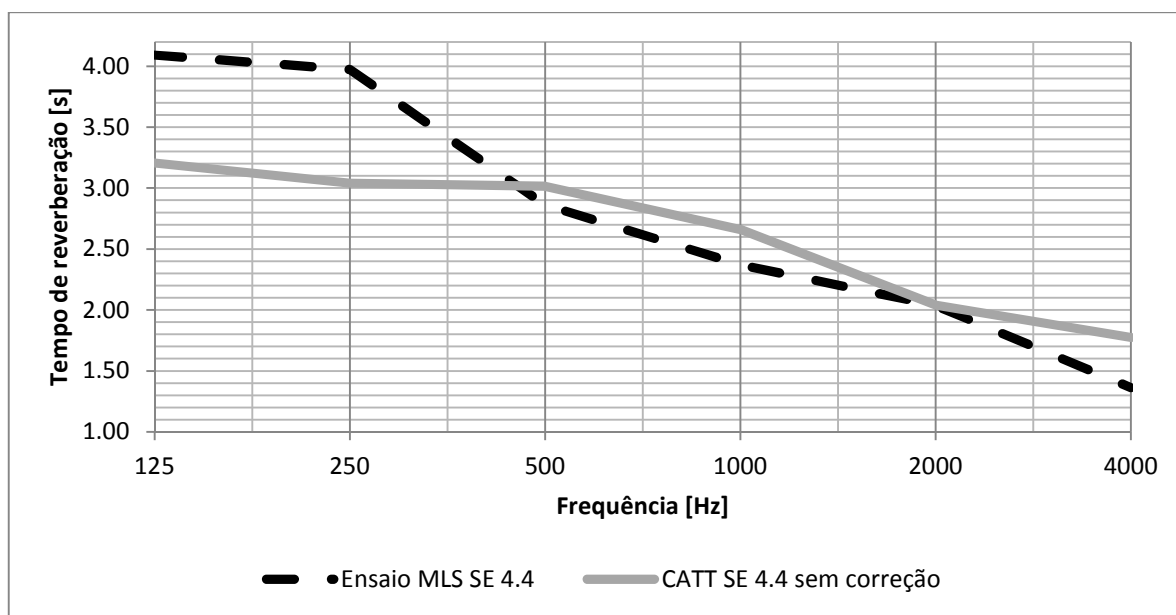


Figura 5.1 – Comparação entre o tempo de reverberação obtido experimentalmente e o CATT-Acoustic™, sem correção dos coeficientes de absorção.

Os coeficientes de absorção já corrigidos, nas várias bandas de frequência, são apresentados no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Valores dos coeficientes de absorção corrigidos.

Valores corrigidos	Superfícies	Frequência [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
	Paredes e teto	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.07
	Pavimento	0.03	0.03	0.07	0.06	0.06	0.09
	Armários	0.03	0.03	0.07	0.06	0.06	0.09
	Janelas e Porta	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05
	Quadro	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05

Introduzindo estes valores corrigidos no programa CATT – Acoustic™, obteve-se então os valores do tempo de reverberação com um erro inferior a 5%, como se observa no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas.

	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ensaio (MLS) [s]	4.09	3.97	2.86	2.37	2.04	1.36
CATT (T-30) [s]	4.08	3.99	2.80	2.35	2.04	1.39
% de erro	-0.41	0.40	-2.13	-0.84	0.00	1.96

Como se constata nos resultados finais (Figura 5.2), foram necessárias alterações significativas em alguns coeficientes de absorção de alguns materiais, para que a curva dada pelo programa CATT – AcousticTM se aproximasse daquela que foi obtida pelo MLS.

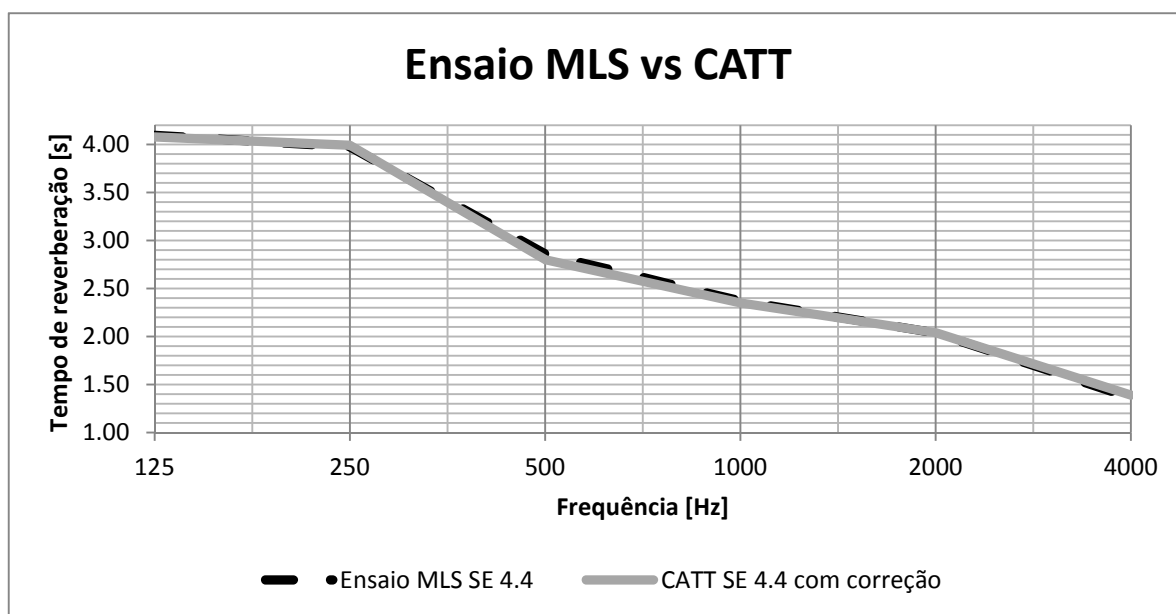


Figura 5.2 – Comparação entre o tempo de reverberação obtido experimentalmente e o CATT – AcousticTM, com correção dos coeficientes de absorção.

5.3 Comparação CATT - AcousticTM vs Experimental

Após terem sido realizados os ajustes necessários aos coeficientes de absorção dos materiais da sala, obtendo a curva representada na Figura 5.2, foram modeladas as salas SE 4.3 e SE 4.4 utilizando o programa CATT – AcousticTM.

Nesta secção pretende-se fazer a comparação entre o programa CATT – Acoustic™ e os dados obtidos nos ensaios, para ambas as salas (SE 4.3 e SE 4.4), de modo a verificar em que situações, o modelo numérico que é utilizado no programa de simulação conduz a melhores resultados.

Em salas com superfícies paralelas e sem absorção, os tempos de reverberação obtidos pelo programa CATT – Acoustic™ tendem a ser tendencialmente superiores aos reais. De modo a minimizar estas diferenças, são introduzidos coeficientes de difusão entre 10 e 50% no programa de simulação. Com este procedimento será possível aproximar os resultados obtidos pelo CATT – Acoustic™ aos resultados experimentais.

No caso da sala SE 4.4 a simulação foi realizada introduzindo uma difusão em todas as superfícies de 10%. Os resultados obtidos estão indicados no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado com espuma na totalidade do pavimento, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas, para a sala SE 4.4.

	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ensaio (MLS) [s]	2.39	1.49	1.34	1.26	1.21	0.91
CATT (T-30) [s]	2.72	1.70	1.28	1.09	1.00	0.85
% de erro	13.44	14.35	-4.49	-13.78	-17.99	-6.08

Da análise do quadro anterior, é possível verificar que ao introduzir o material absorvente na totalidade do pavimento, passamos de erros médios na ordem de 1% (Quadro 5.7) para erros médios na ordem dos 12%.

Visto que o erro em algumas bandas de frequência chega aos 18%, introduziu-se alguma difusão adicional nas paredes do fundo e na zona interior da parede de fachada, de modo a verificar se o programa CATT – Acoustic™ fornece melhores resultados. Note-se que considerar alguma difusão não é um erro significativo, uma vez que o reboco utilizado não é completamente liso.

No Quadro 5.9 apresenta-se a difusão adicional utilizada nas paredes e os resultados obtidos pelo programa CATT – Acoustic™. Neste caso, optou-se por assumir maior difusão nas baixas frequências de forma a aproximar os resultados experimentais com os do programa.

Quadro 5.9 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado com espuma na totalidade do pavimento e difusão adicional nas paredes, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas, para a sala SE 4.4.

	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ensaio (MLS) [s]	2.39	1.49	1.34	1.26	1.21	0.91
CATT (T-30) [s]	2.60	1.52	1.29	1.13	0.97	0.85
Difusão fundo [%]	50	30	10	10	10	10
Difusão lateral [%]	50	20	10	10	10	10
% de erro	8.43	2.24	-3.75	-11.01	-20.05	-6.63

Observando os resultados com a difusão apresentados no gráfico da Figura 5.3, conclui-se que as principais alterações se dão ao nível das baixas frequências, onde a percentagem de erro diminui e a curva se aproxima mais da experimental. Nas restantes frequências, como seria de esperar, os resultados mantêm-se (não houve alteração da difusão).

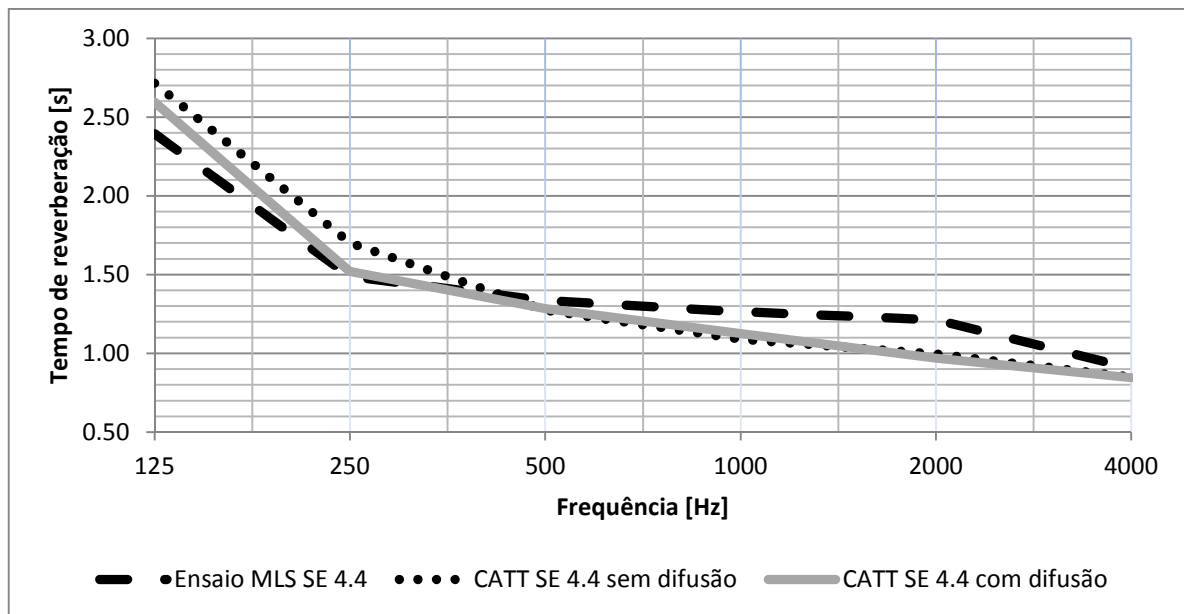


Figura 5.3 – Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos pelo programa, assumindo e desprezando a difusão das paredes, nas bandas de frequência indicadas.

Da mesma forma, procedeu-se à modelação da sala SE 4.3, que é em tudo idêntica à anterior, exceto a parede do fundo, que possui um ripado de madeira, com coeficientes de absorção médios na casa dos 0.45. O coeficiente de absorção do material irá trazer uma difusão sonora superior àquela que existia na sala, antes da introdução do ripado. Assim, foi assumido desde início uma difusão neste material, entre 10 a 20%. A difusão sonora dada para o ripado é aquela que se apresenta no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado com sala vazia, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas para a sala SE 4.3.

	Frequência [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ensaio (MLS) [s]	1.77	1.48	1.17	1.35	1.47	1.17
CATT (T-30) [s]	1.78	1.50	1.17	1.36	1.51	1.23
Difusão do ripado [%]	10	15	20	20	20	20
% de erro	0.42	1.41	0.00	0.49	2.49	5.28

Pela análise do Quadro 5.10 pode verificar-se que o programa CATT – AcousticTM, no caso da sala apenas com o ripado, apresenta valores de tempo de reverberação bem próximos dos experimentais, tendo percentagens de erro comparativamente aos ensaios experimentais aceitáveis.

Procedeu-se da mesma forma para a sala SE 4.3, com o pavimento revestido na sua totalidade por espuma de 30 mm. Também neste caso, apenas se considerou a difusão no ripado de madeira. Os resultados são apresentados no Quadro 5.11.

Quadro 5.11 – Tempos de reverberação para o modelo calibrado com espuma na totalidade do pavimento, comparando com os resultados experimentais, nas bandas de frequência consideradas, para a sala SE 4.3.

	Freq [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ensaio (MLS) [s]	1.28	0.84	0.55	0.73	0.88	0.75
CATT (T-30) [s]	1.43	0.98	0.73	0.75	0.79	0.73
Difusão do ripado [%]	10	15	20	20	20	20
% de erro	11.94	17.13	31.82	2.64	-10.96	-2.68

Com a colocação da espuma no pavimento da sala SE 4.3, observou-se um maior afastamento entre os dados do programa de simulação e os ensaios experimentais.

Pela análise dos resultados obtidos nas duas salas, é possível concluir que o comportamento do programa CATT – AcousticTM é melhor quando existe no espaço em estudo alguma difusão. Note-se que foi necessário introduzir uma difusão maior na sala SE 4.4 para obter resultados mais próximos dos experimentais (difusão nas paredes do fundo e lateral). O mesmo não aconteceu na sala SE 4.3, uma vez que o ripado de madeira é um material com alguma absorção e difusão sonora.

5.4 RASTI

Tal como já foi mencionado na secção 2.2.5 a inteligibilidade da palavra depende de outros fatores, para além da reverberação do espaço. Em Harris (1998), foi realizado um estudo onde se comparava a inteligibilidade com a fala e o ruído, e concluiu-se que a inteligibilidade era tanto maior, quanto menores fossem as sílabas sem sentido e maiores fossem as frases completas ditas pelo orador. Quando isto ocorre, a capacidade do ouvinte associar aquilo que ouve a estruturas já conhecidas e de compreender aquilo que é dito, aumenta significativamente.

Foi analisado o RASTI das salas SE 4.4 e SE 4.3, que foram alvo de medições acústicas, e comparado com os valores dados pelo programa CATT – AcousticTM. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5.

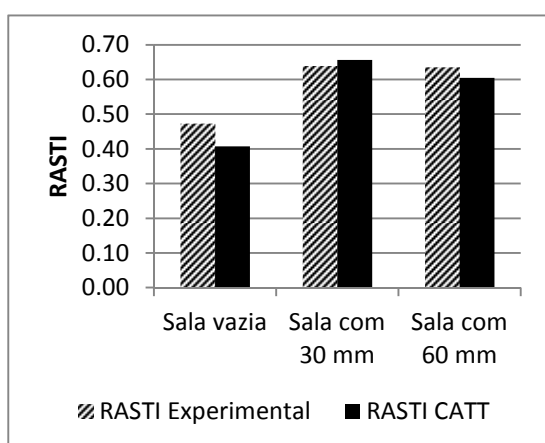


Figura 5.4 – Representação do índice RASTI na sala SE 4.4 para três casos distintos.

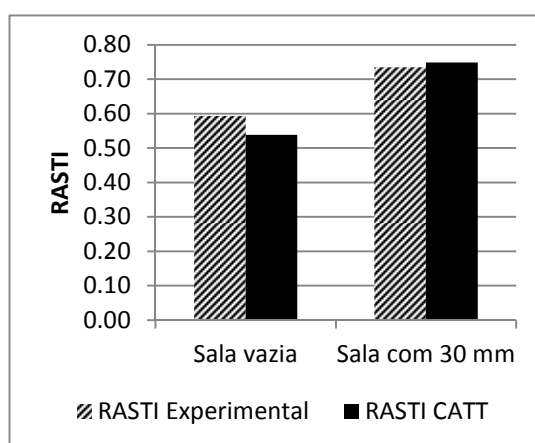


Figura 5.5 – Representação do índice RASTI na sala SE 4.3 para dois casos distintos.

Comparando o modelo numérico com o experimental, observa-se que os valores de RASTI para ambos os modelos são muito próximos. Nas situações da sala vazia e da sala com 60 mm de espuma, da Figura 5.4, verifica-se que o programa de simulação apresenta sempre valores abaixo dos experimentais (embora essa diferença não seja muito significativa). É só no caso da espuma com 30 mm que o CATT – AcousticTM apresenta valores acima dos obtidos experimentalmente (lado da segurança). As diferenças nas situações de sala com 30 mm de espuma e sala com 60 mm de espuma da Figura 5.4, poderão dever-se ao facto de na primeira o pavimento estar coberto na totalidade pela espuma, enquanto que na segunda situação apenas 31 m² do pavimento estava preenchido por esta mesma espuma.

No caso da sala SE 4.3 os resultados obtidos para o índice RASTI são melhores que os da sala SE 4.4. Esta melhoria nos resultados, pode dever-se ao facto de existir nesta sala uma parede revestida a ripado de madeira (permite uma melhor inteligibilidade da palavra).

6. PROPOSTA DE CORREÇÃO DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO

Neste capítulo são analisados 3 modelos de salas, de modo a obter um ábaco com os coeficientes de absorção corrigidos. No final será feita a validação do modelo para várias situações de estudo.

6.1 Comparação CATT - Acoustic™ vs Sabine

Nesta secção analisam-se os dados obtidos pelo programa de simulação CATT – Acoustic™ e os dados obtidos pela fórmula de Sabine, de modo a conseguir elaborar uma correção aos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine, para que a sua curva se aproxime daquela que foi obtida pelo programa de simulação.

Para realizar esta comparação estudaram-se três modelos. No primeiro modelo, referente à sala SE 4.4, considerou-se a difusão apenas na parede do fundo (Figura 6.1). No segundo modelo, referente à sala SE 4.3, considerou-se apenas o ripado de madeira com difusão de 10% (Figura 6.2). O terceiro modelo trata-se de uma sala em que não existe paralelismo entre qualquer superfície, de acordo com o esquema apresentado na Figura 6.3.

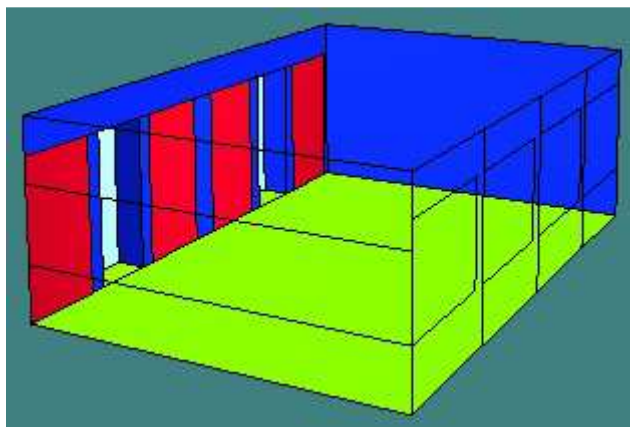


Figura 6.1 – Modelo 1, sala SE 4.4.

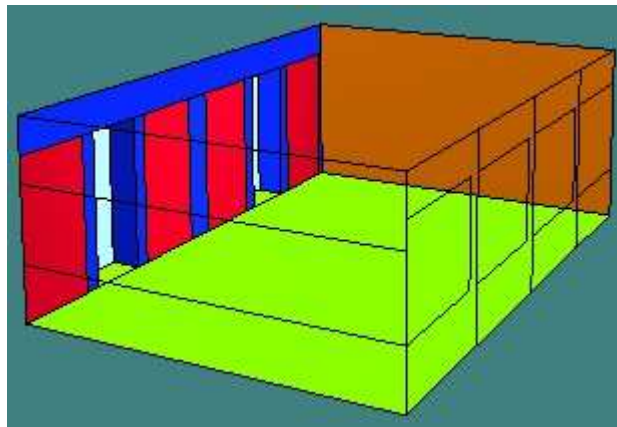


Figura 6.2 – Modelo 2, sala SE 4.3.

O modelo apresentado na Figura 6.3 é um modelo assimétrico, sem qualquer paralelismo entre as várias superfícies. A geometria deste modelo gera um campo difuso, logo não será necessário colocar uma elevada percentagem de difusão nas diversas superfícies (foi assumido uma difusão de 10% em todas as bandas de frequência).

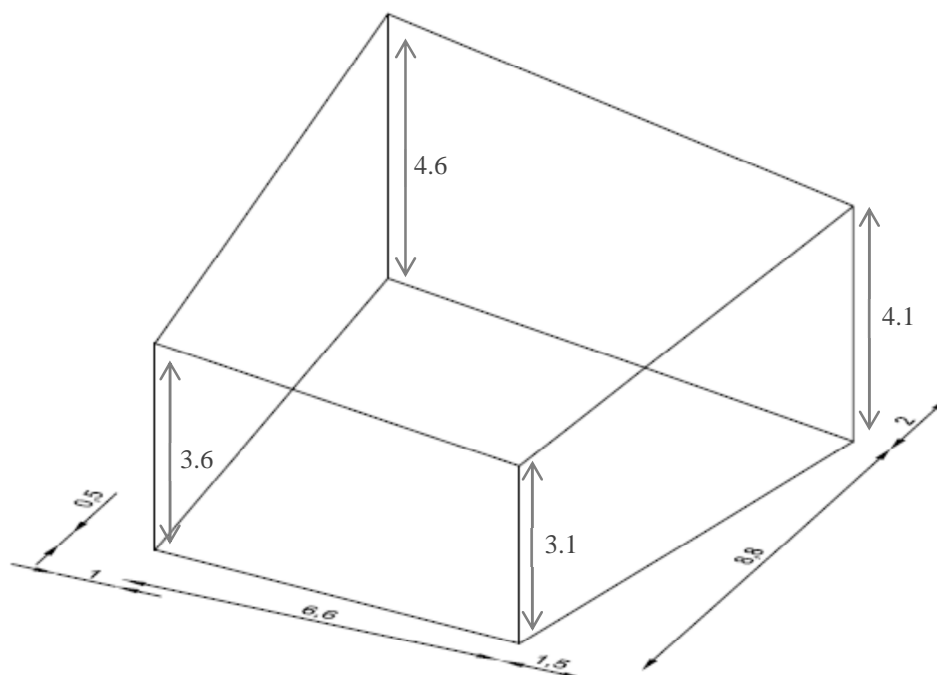


Figura 6.3 – Modelo 3, sala assimétrica (dimensões em metros).

Nas várias salas de aula analisadas observou-se que a gama de coeficientes de absorção dos materiais constituintes era muito limitada, não havendo possibilidade de escolher qual delas seria melhor para servir como modelo base. Desta forma, utilizou-se o programa CATT – AcousticTM para modelar três situações representativas de salas de aula.

A fórmula de Sabine foi programada para os três modelos de salas e para várias situações de coeficiente de absorção do pavimento. Utilizando esta fórmula, calculou-se o tempo de reverberação considerando coeficientes de absorção para o pavimento no intervalo de 0.10 a 0.99 e considerando um incremento de 0.05. Para os restantes materiais constituintes das superfícies expostas, foram assumidos coeficientes de absorção médios iguais para todas as bandas de frequência, de forma a facilitar a comparação dos resultados com o programa de simulação, e a realçar o comportamento da fórmula de Sabine.

A metodologia de cálculo para a obtenção dos coeficientes de absorção corrigidos, baseia-se na comparação entre os resultados obtidos pelo programa de simulação e aqueles que foram obtidos pela fórmula de Sabine. Deste modo, os coeficientes de absorção do pavimento na fórmula de Sabine são ajustados, até obter erros inferiores a 5%, comparativamente com o modelo base.

6.1.1 Modelo 1 (sala SE 4.4)

Neste caso, o intervalo assumido para os coeficientes de absorção foi maior, uma vez que se trata do caso que mais se assemelha a uma câmara reverberante, e tal como se concluiu na secção 5.3, o programa CATT – AcousticTM apresenta um melhor comportamento em salas menos reverberantes e com maior difusão sonora.

Como era previsível, o comportamento da curva de correção dos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine, apresentada na secção D.1 do Anexo D, não é uniforme. Existem frequências a tender para coeficientes de absorção corrigidos de 0.60, distanciando-se muito dos valores médios obtidos pelas outras bandas de frequência (aproximadamente 0.30). Isto poderá dever-se ao facto de existirem paredes paralelas sem absorção, que torna os resultados muito instáveis. Uma mudança de posição da fonte ou uma alteração da temperatura ou da humidade pode conduzir a resultados diferentes dos obtidos.

6.1.2 Modelo 2 (sala SE 4.3)

Também para este modelo foi programada a fórmula de Sabine para coeficientes de absorção intervalados de 0.05 (no Anexo C demonstra-se a correção feita, assumindo um coeficiente de absorção de 0.6 para o pavimento).

Contrariamente ao que aconteceu no modelo 1, a correção a introduzir aos valores dos coeficientes de absorção dos materiais nas várias bandas de frequência, tende para um valor médio de 0.41 (Figura 6.4). É de notar que para coeficientes de absorção baixos a correção a introduzir é praticamente nula, esta só passa a ser significativa a partir de valores de absorção de 0.2.

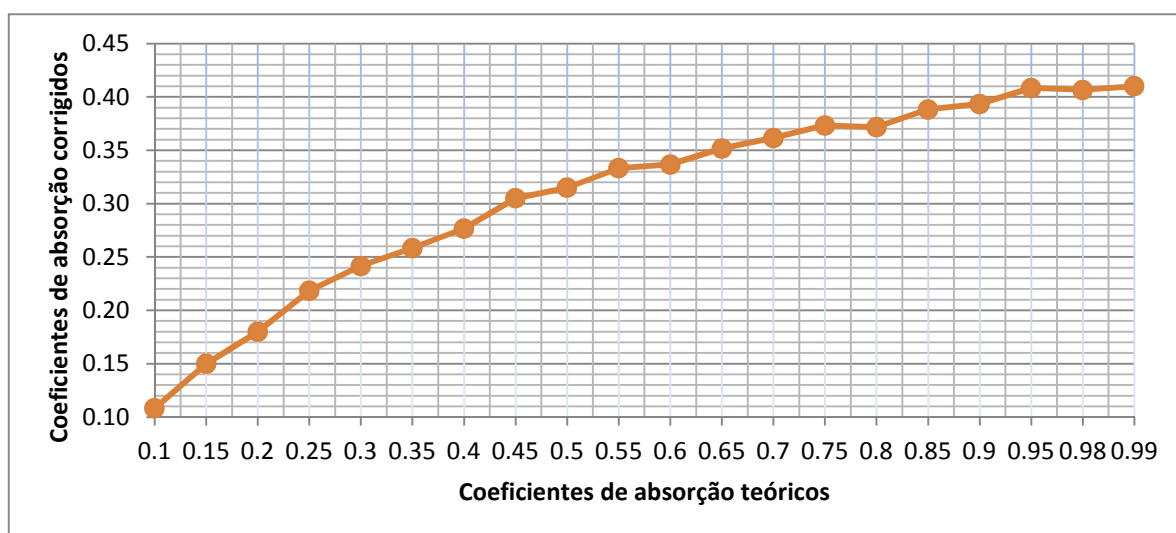


Figura 6.4 – Curva de correção dos valores médios dos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine, para o caso do modelo 2.

6.1.3 Modelo 3

Este modelo é representativo de um modelo teórico, onde não existe qualquer paralelismo entre as várias superfícies do compartimento. As paredes foram desenhadas de modo a crescerem de forma diferente da oposta e o mesmo acontece entre o teto e o pavimento. Neste caso foi assumido que as superfícies expostas são todas constituídas pelo mesmo material e possuem um coeficiente de absorção igual em todas as bandas de frequência de 0.10. O tempo

de reverberação, tal como no modelo 2, foi determinado para intervalos de coeficientes de absorção de 0.05 em 0.05. Na Figura 6.5 apresenta-se a curva de correção para este modelo.

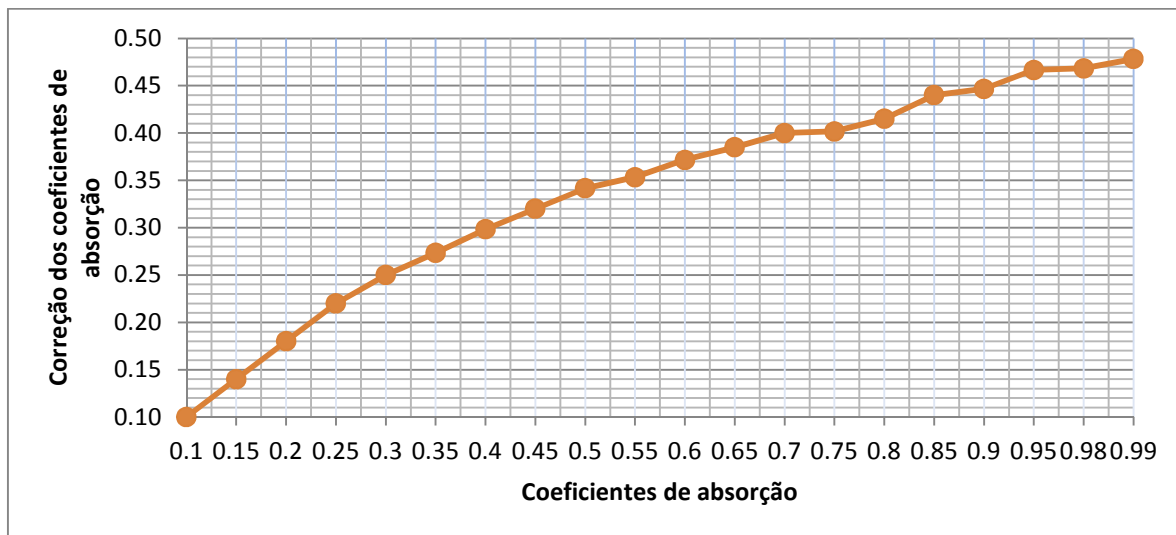


Figura 6.5 – Curva de correção dos valores médios dos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine, para o caso do modelo 3.

Da análise da Figura do modelo 3, apresentada na secção D.3 do Anexo D, verifica-se que existe um desenvolvimento constante das curvas dos coeficientes de correção até ao valor teórico de 0.3. A partir deste, apesar de existir alguma dispersão nos resultados nas diversas bandas de frequência, o crescimento das curvas é praticamente uniforme e tende para um valor médio do coeficiente de absorção corrigido de 0.48. Tal como se verificou no caso do modelo 2, também para o modelo 3, a correção a introduzir nos coeficientes de absorção dos materiais só passa a ser significativa quando estes atingem valores superiores a 0.2.

Para os três modelos apresentados anteriormente foram determinadas curvas de correção médias dos coeficientes de absorção dos materiais. Contudo, o modelo que mais se distancia dos valores esperados é o modelo 1. No modelo 2, onde se considerou o ripado de madeira, obtiveram-se resultados uniformes, à medida que aumentavam os coeficientes de absorção nas várias bandas de frequência. No entanto, este modelo apresenta um problema que não pode ser solucionado. Ao considerar o ripado de madeira estão a ser considerados coeficientes de absorção médios desse material na ordem dos 0.45, coeficientes estes que deveriam ser alvo de correção, uma vez que a partir de 0.2 a correção atribuída a um coeficiente de absorção já é significativa. Desta forma, o modelo que apresentará valores de correção mais exatos será o modelo 3. Este modelo servirá de base para fazer a validação dos casos experimentais analisados na secção 6.2.

6.2 Validação dos resultados

Nesta secção realiza-se a validação do ábaco de correção dos coeficientes de absorção proposto (modelo 3), através da comparação dos tempos de reverberação obtidos pela fórmula de Sabine com os resultados experimentais. Esta validação é realizada para cinco casos experimentais:

- Sala SE 4.4 com a totalidade do pavimento coberta com espuma de 30 mm;
- Sala SE 4.4 com 31 m² coberta com espuma de 60 mm;
- Sala SE 4.3 com a totalidade do pavimento coberta com espuma de 30 mm;
- Sala SA 2.10 vazia;
- Anfiteatro SA 2.5.

Para proceder à validação da curva de correção no caso da sala SE 4.3, é necessário referir que os valores do coeficiente de absorção do ripado de madeira, que foram determinados pela campanha de medições nas duas salas (secção 4.3), são inferiores àqueles que seriam dados pelo fabricante. Desta forma, optou-se por fazer esta análise utilizando os coeficientes de absorção dados pelo fabricante, apresentados no Anexo B.

Na Figura 6.6, Quadro 6.1 e 6.2 são apresentados os dados referentes à sala SE 4.4, com 30 mm de espuma na totalidade do pavimento. Da análise destes dados é possível verificar uma redução da percentagem de erro na ordem dos 26%, após a correção dos coeficientes de absorção na fórmula de Sabine. A partir da frequência dos 250 Hz, a curva com correção da fórmula de Sabine, aproxima-se mais da curva experimental, no entanto continua a desenvolver-se para valores inferiores a esta curva, o que pode ser prejudicial no dimensionamento de um espaço, já que pode conduzir ao incumprimento dos valores regulamentares.

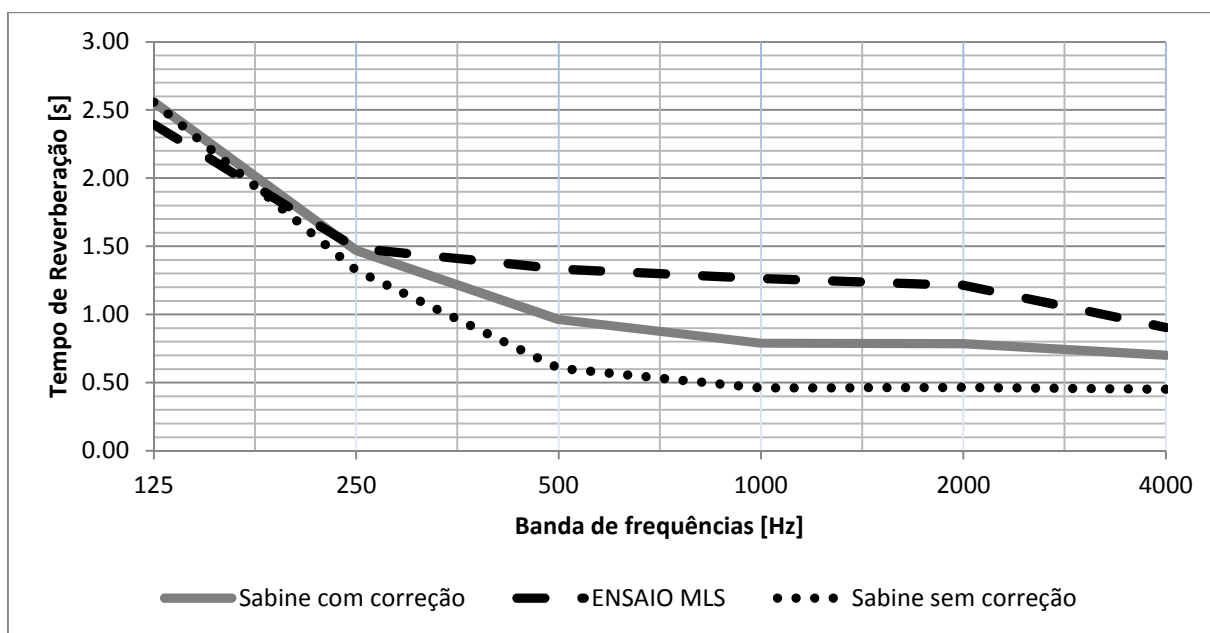


Figura 6.6 – Comparação entre os tempos de reverberação da sala SE 4.4 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção, para o pavimento revestido na totalidade com 30 mm de espuma.

Quadro 6.1 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para a sala SE 4.4, com 30mm de espuma em todo o pavimento, para as bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]			Média
	500	1000	2000	
Erro sem correção [%]	-54.54	-63.63	-61.72	-59.97
Erro com correção [%]	-27.87	-37.62	-35.26	-33.58

Quadro 6.2 – Comparação entre os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos, para a sala SE 4.4, com 30mm de espuma em todo o pavimento para as bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]		
	500	1000	2000
α tabelados	0.70	0.92	0.87
α corrigidos	0.40	0.47	0.44

Quando se aplica a esta mesma sala a espuma com 60mm verifica-se uma melhoria muito significativa na percentagem de erro cometido (Quadro 6.3). Observam-se reduções na ordem dos 34%, sendo que o erro existente com a correção dos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine passa para um valor médio de 3.7%. Pode observar-se no gráfico da Figura 6.7, que a curva da fórmula de Sabine se desenvolve de forma praticamente coincidente com a curva experimental. No Quadro 6.4 são ainda apresentados os coeficientes de absorção da espuma de 60 mm e os mesmos coeficientes corrigidos.

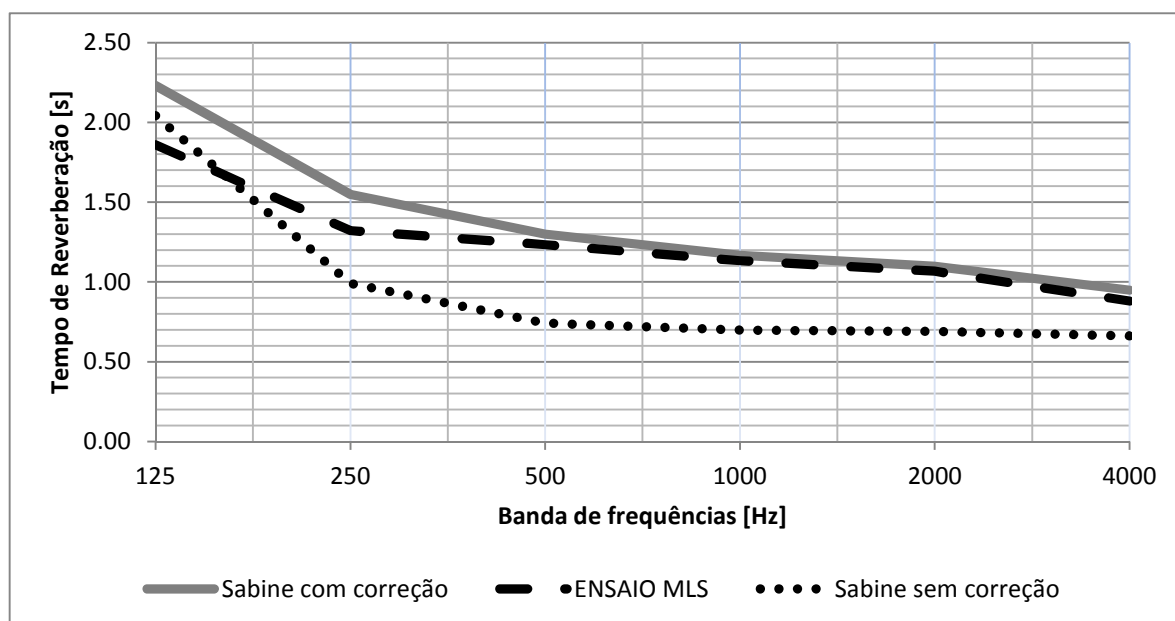


Figura 6.7 – Comparação entre os tempos de reverberação da sala SE 4.4 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção, para o pavimento revestido em 31 m² com 60 mm de espuma.

Quadro 6.3 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para a sala SE 4.4, com 60mm de espuma em 31m² do pavimento, para as bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]			Média
	500	1000	2000	
Erro sem correção [%]	-39.79	-38.51	-35.48	-37.93
Erro com correção [%]	5.39	2.92	2.73	3.68

Quadro 6.4 – Comparação entre os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos, para a sala SE 4.4, com 60mm de espuma em 31m² do pavimento, para as bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]		
	500	1000	2000
α tabelados	0.99	0.99	0.95
α corrigidos	0.48	0.48	0.47

Para a sala SE 4.3 apresentam-se os resultados na Figura 6.8, Quadro 6.5 e 6.6. Neste caso pode notar-se um agravamento do erro na banda de frequência dos 500Hz. No entanto isto não se torna gravoso, uma vez que a curva da fórmula de Sabine corrigida, apresenta valores de tempo de reverberação superiores ao da curva obtida experimentalmente. É a partir da banda de frequência dos 1000 Hz que os resultados são mais críticos, pois a curva com correção passa a desenvolver-se abaixo da curva experimental. Neste caso a correção a aplicar aos coeficientes de absorção dos materiais a partir dos 1000Hz deveria ser maior, de modo a diminuir os seus valores.

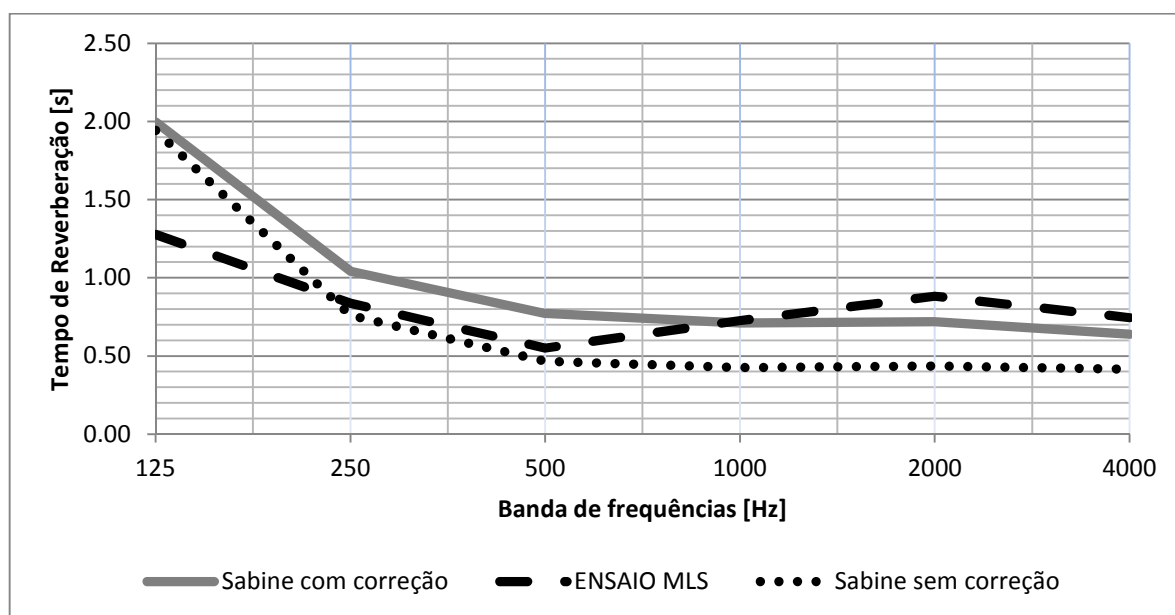


Figura 6.8 – Comparação entre os tempos de reverberação da sala SE 4.3 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção, para o pavimento revestido na totalidade com 30 mm de espuma.

Quadro 6.5 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para a sala SE 4.3, com 30mm de espuma em todo o pavimento, para as bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]			Média
	500	1000	2000	
Erro sem correção [%]	-15.13	-41.34	-50.69	-35.72
Erro com correção [%]	40.30	-2.07	-18.60	6.54

No Quadro 6.6 são apresentados os coeficientes de absorção tabelados e corrigidos para o ripado de madeira existente na parede do fundo da sala SE 4.3. No pavimento foi aplicada espuma de 30 mm, pelo que os valores são os mesmos do Quadro 6.2.

Quadro 6.6 – Comparação entre os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos, para o ripado de madeira da sala SE 4.3, para as bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]		
	500	1000	2000
α tabelados	0.74	0.31	0.28
α corrigidos	0.40	0.25	0.24

Na sala SA 2.10, ao aplicar ao teto a correção nos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine, observa-se que a curva corrigida se desenvolve sempre acima da curva experimental, exceto na banda de frequência dos 4000Hz (Figura 6.9). Assim, é possível garantir as qualidades acústicas da sala sem estar a cometer um erro demasiado grande. No entanto, tanto pode ser prejudicial uma sala muito reverberante como uma sala anecoica. Mas tendo em conta o cumprimento dos valores regulamentares dados pelo Decreto-Lei nº 96/2008 é preferível que a curva obtida por Sabine seja igual ou superior à curva experimental.

No Quadro 6.7 observa-se a percentagem de erro quando se aplica a correção aos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine. No Quadro 6.8 são dados os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos para o teto acústico da sala SA 2.10.

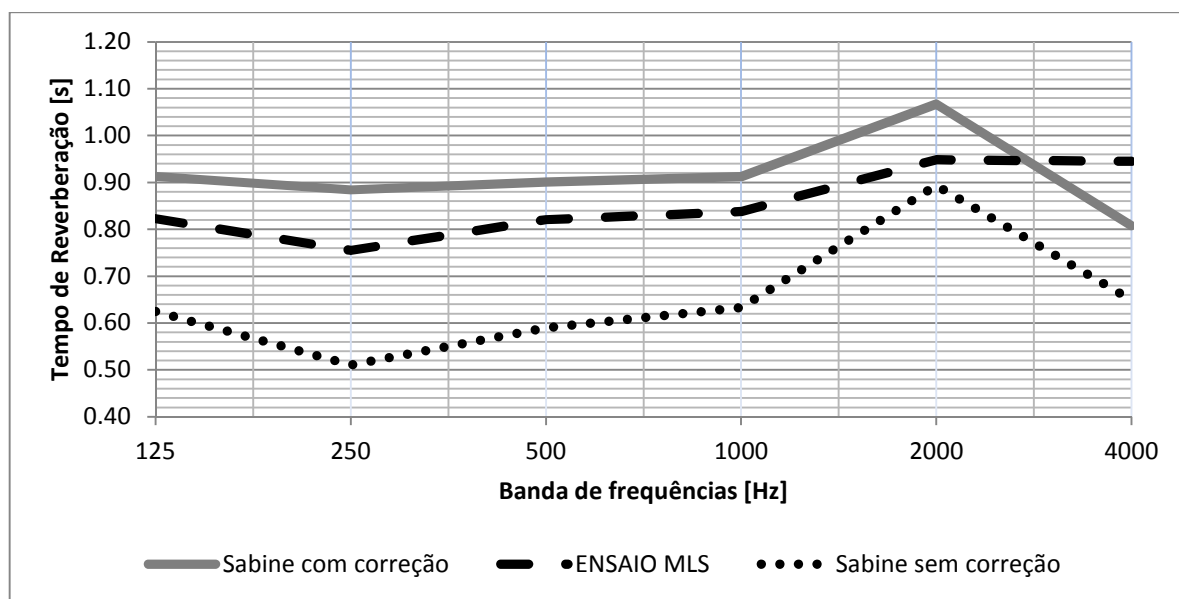


Figura 6.9 – Comparação entre os tempos de reverberação da sala SA 2.10 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção, para um teto acústico perfurado.

Quadro 6.7 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para a sala SA 2.10, nas bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]			Média
	500	1000	2000	
Erro sem correção [%]	-28.18	-24.48	-5.78	-19.48
Erro com correção [%]	9.71	8.92	12.50	10.38

Quadro 6.8 – Comparação entre os coeficientes de absorção tabelados e os corrigidos, para o teto acústico da sala SA 2.10, para as bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]		
	500	1000	2000
α tabelados	0.69	0.62	0.37
α corrigidos	0.40	0.38	0.28

Neste trabalho avaliou-se ainda a possibilidade de utilizar este ábaco num anfiteatro. O espaço em questão é o anfiteatro SA 2.5, e é constituído por diversos materiais com capacidades de absorção diferentes e com mobiliário fixo, os resultados obtidos assemelham-se em muito àqueles que se obtiveram na sala SA 2.10, embora com um agravamento do erro. Aquilo que se verifica, é que a curva da fórmula de Sabine com correção acompanha o desenvolvimento da curva experimental, situando-se sempre a cima desta.

Para definir os coeficientes de absorção do mobiliário presente no anfiteatro, foram utilizados os valores experimentais da tese de mestrado de Borges (2009). Foi ainda verificado o caso em que se utilizam os valores de coeficientes de absorção de Tadeu et al (2010), onde se notou um afastamento maior entre a curva experimental e a curva com correção.

Os dados referentes ao anfiteatro são apresentados no gráfico da Figura 6.10 e no Quadro 6.9.

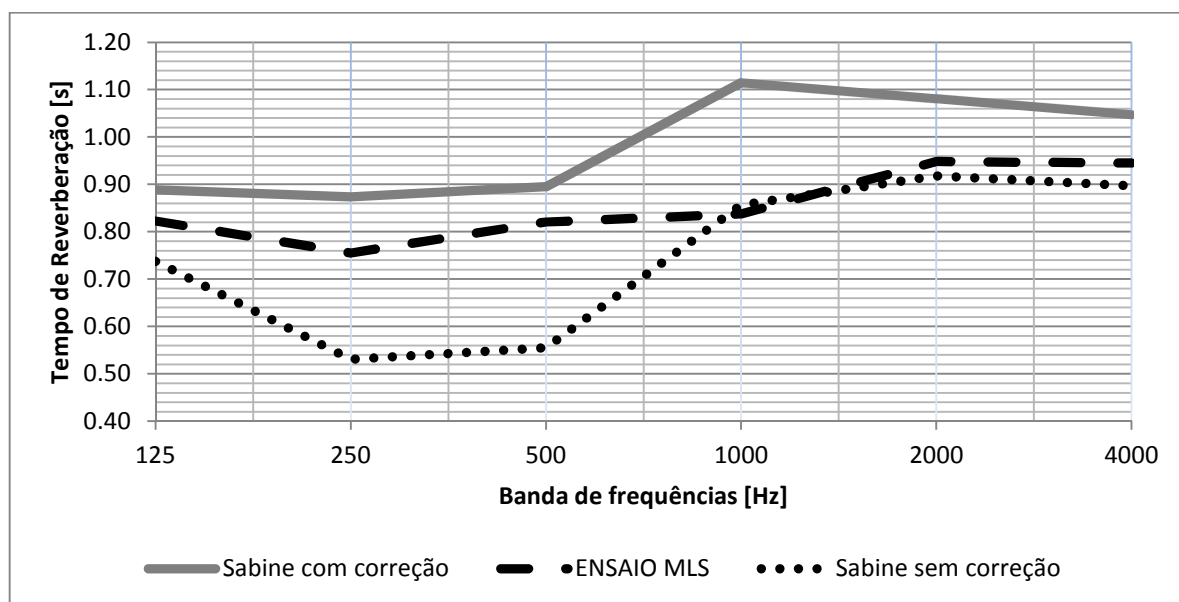


Figura 6.10 – Comparação entre os tempos de reverberação do anfiteatro SA 2.5 obtidos experimentalmente, pela fórmula de Sabine sem correção e pela fórmula de Sabine com correção.

Quadro 6.9 – Redução de erro verificado na correção da fórmula de Sabine, para o anfiteatro SA 2.5, para as bandas de frequência centradas.

	Freq. [Hz]			Média
	500	1000	2000	
Erro sem correção [%]	-32.36	2.24	-3.21	-11.11
Erro com correção [%]	9.05	33.09	13.99	18.71

7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

7.1 Considerações Finais

No decorrer deste trabalho foi desenvolvido e proposto um ábaco de correção dos coeficientes de absorção, dos revestimentos fornecidos pelos fabricantes ou em bibliografia, de modo a aproximar os resultados da fórmula de Sabine aos resultados experimentais. Tal como se sabe, da aplicação desta fórmula, os resultados só serão viáveis caso os coeficientes de absorção dos materiais que constituem as superfícies expostas apresentem valores inferiores a 0.2 ($\alpha_{\text{médio}} \leq 0.2$), mas quando diferem destes valores, a fórmula deverá ser aplicada com reservas.

Na campanha de medições realizada foi observado o comportamento de dois métodos de ensaio (MRI e MLS), onde se concluiu que os resultados do tempo de reverberação fornecidos por ambos os métodos se aproximam.

As medições foram ainda realizadas tendo em conta duas situações distintas (câmara reverberante e sala de aula), onde foi possível observar que os tempos de reverberação mais elevados se registavam na câmara reverberante. Isto deve-se ao facto da sala de aula ser um espaço menos reverberante, pois é constituída por diferentes materiais nas suas superfícies expostas, com maior absorção que as superfícies da câmara reverberante. Ainda assim, os valores nas duas situações aproximam-se.

Outro parâmetro avaliado foi o coeficiente de absorção da espuma de poliuretano, pelos métodos MLS e MRI, em duas situações distintas (câmara reverberante e sala de aula) e comparado com o valor dado pelo fabricante. Daqui concluiu-se, que os valores dos coeficientes de absorção são todos bastante próximos, sendo o MRI aquele que apresenta melhores resultados, pois é o método que mais se aproxima da curva dada pelo fabricante. Na sala de aula os valores dos coeficientes de absorção da espuma aproximam-se mais da curva do fabricante.

De entre os três modelos numéricos considerados, o modelo 1 foi aquele que mais se distanciou dos resultados esperados. Isto terá a ver com o facto do programa CATT – AcousticTM nos conduzir a resultados menos satisfatórios na presença de superfícies paralelas e reverberantes. Estes fatores levaram a que se excluísse este modelo. O modelo 2 é constituído por um ripado de madeira, que possui coeficientes de absorção superiores a 0.2. Os coeficientes do ripado necessitariam de correção, e como tal não seria possível nesta fase, também se excluiu este modelo. O modelo que cobre todas estas lacunas é o modelo 3, pelo que foi utilizado como modelo base de validação dos resultados.

O ábaco de correção dos coeficientes de absorção da fórmula de Sabine é aquele que é dado pelo modelo 3. Este ábaco foi depois utilizado para obter o tempo de reverberação em vários casos de estudo, onde foi também realizada uma campanha de medições para determinação do tempo de reverberação que serviu de base à sua validação. Da aplicação deste ábaco aos vários casos de estudo, observou-se um bom comportamento da curva corrigida em relação à curva experimental, uma vez que os erros inerentes a esta correção não ultrapassam o valor médio de 33.58% para as bandas de frequência centradas. Foi a sala SE 4.4 com 60mm de espuma em 31m² do pavimento que apresentou os melhores resultados (erro médio de 3.68%).

De forma a verificar o comportamento do ábaco num ambiente diferente do estudado neste trabalho, aplicou-se o ábaco de correção a um anfiteatro e comparou-se os resultados com os experimentais. Apesar de se observar um desfasamento em relação à curva experimental, o erro médio é de 18.71 % para as bandas de frequência centradas, o que é um valor aceitável.

Este ábaco, nos diversos casos em que foi estudado (salas de aula e anfiteatro do Departamento de Engenharia Civil), apresentou na maioria das situações uma correção superior àquela que seria necessária. Apesar disto, os resultados encontram-se do lado da segurança e relativamente próximos dos ensaios experimentais, razão pela qual o ábaco não foi revisto.

7.2 Trabalhos futuros

Como trabalho futuro, propõe-se alargar o estudo deste coeficiente de correção a outros espaços, bem como fazer a sua verificação num maior número de salas, com outras configurações e tipologias.

Um outro ponto importante será verificar a aplicação deste ábaco a espaços com volumetrias superiores às estudadas neste trabalho, tais como anfiteatros e auditórios, analisando possíveis

alterações aos resultados obtidos. Os dados apresentados para o anfiteatro podem servir como rampa de lançamento para uma análise mais detalhada em locais com esta tipologia.

Será interessante num trabalho futuro, aplicar novamente o procedimento realizado na secção 6.1 deste trabalho, mas recorrendo a ensaios experimentais, em salas com diversos materiais fonoabsorventes que permitam abranger uma gama de coeficientes de absorção maior, em vez de se utilizar como base o programa de simulação CATT – AcousticTM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências bibliográficas citadas

- Beranek, L. (1988). “*Acoustical Measurements*”. Acoustical Society of America, U.S.A.
- Borges, F. I. F. (2009). “*Condicionamento Acústico de Salas – Influência da Absorção e Difusão das Cadeiras*”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologias, Coimbra.
- Domingues, O. (2005). “*A acústica nos Edifícios: Material e sistemas absorventes sonoros: Coeficientes de absorção sonora*”. LNEC, Lisboa.
- Egan, M. D. (1972). “*Concepts in Architectural Acoustics*”. McGraw-Hill, U.S.A.
- Harris, C. M. (1998). “*Manual de Medidas Acusticas y Control del Ruido*”, 3ª Edição. Impreos y Revistas, S.A., Espanha.
- Harris, D. A. (1997). “*Noise Control Manual for residential buildings*”. Boston, MA, Washington.
- Isbert, Carrión, A. (1998). “*Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*”, Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- ISO 3382-2:2011, “Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 2: Tempo de reverberação em salas correntes”.
- ISO 354:2007, “Acústica – Medição da absorção sonora em câmara reverberante”.
- Long, M. (2006). “*Architectural Acoustics*”. Elsevier Academic Press, London.
- Martins da Silva, P. (2007). “*Engenharia Acústica*”. Ingenium Edições, Lda, Lisboa.
- Patrício, J. V. (2010). “*Acústica nos Edifícios*”, 6ª Edição. Verlag Dashofer, Lisboa.

RRAE – “*Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*”, aprovado pelo Decreto-Lei nº.129/2002 de 11/05, com a nova redação dada pelo Decreto-Lei nº.96/2008 de 09/06”.

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

Vigran, T. E. (2008). “*Building Acoustics*”. Taylor & Francis, New York.

Zannin, P., Ferreira, A., Zwirtes, D., Nunes, E., Stumm, S., Tows, M. (2004). “*Comparação entre tempos de reverberação calculados e medidos*”, Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Panamá, Brasil.

Referências bibliográficas consultadas

Alves, E. V. (2008). “*Estudo das Condições Acústicas de Auditórios*”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Aveiro, Aveiro.

Bastos, L. J. R. (2010). “*Qualidade Acústica de Auditórios*”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Aveiro, Aveiro.

Bies, D. and Hansen, C. (2009). “*Engineering Noise Control: Theory and Practice*”, 4ª Edição. Taylor & Francis, New York.

CATT User’s Manual v8 - (2002). “*Room Acoustics Prediction and Desktop Auralization*”, Suécia.

Costa, C. M. (2009). “*Condicionamento Acústico de Salas e Pequenos Anfiteatros de Um Edifício Escolar*”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologias, Coimbra.

Josse, R. (1975). “*La Acústica en la Construcción*”. Editorial Gustavo Gili, S.A. , Barcelona.

Knauf, (2007). “*Techos Acústicos*”. Espanha.

Kuttruff, H. (2000). “*Room Acoustic*”, 4ª Edição. Spon Press, Londres.

Leão, A. J. (2012). “*Acústica e Isolamento Sonoro nos edifícios*”. Acedido a 16 de Fevereiro, 2012, em: <http://www.engenhariacivil.com/acustica-isolamento-sonoro-edificios>.

Martins da Silva, P. (1978). “*Acústica de edificios*”. LNEC, Lisboa.

Mateus, D., António, J., Tadeu, A. (2001). “*Sound Absorption of Grooved Panels an Experimental Approach.*”. XXIX IAHS World Congress on Housing - Housing in Constant Evolution, 666-676, Ljubljana, Slovenia.

Meisser, M. (1973). “*Acustica De Los Edificios*”. Editores Técnicos Asociados, S.A. , Barcelona.

Pierce, A. D. (1989). “*Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*”. Acoustical Society of America, New York.

Placo, (2009). “*Soluciones Constructivas en Techos*”. Espanha.

Soares, Z. M. (2006). “*Calibração de Microfones com Resposta Impulsiva*”. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Suárez, E., Ramis, J., Alba, J., Arenas, J. (2011). “*Materiales absorbentes ecológicos para pantallas acústicas*”, 1ª Edição. Ediciones Universidad Austral de Chile, Chile.

ANEXO A – FOTOGRAFIAS DOS ENSAIOS

A.1 – Ensaio com a câmara reverberante vazia



A.2 – Ensaio com 10 m² de espuma de poliuretano com 30 mm



A.3 – Ensaio com a sala SE 4.4 vazia



A.4 – Ensaio na sala SE 4.4 com 10 m² de espuma de 30 mm de poliuretano



A.5 – Ensaio na sala SE 4.4 com espuma de 60 mm em 31 m² de pavimento



A.6 – Ensaio na sala SE 4.4 com espuma de 30 mm na totalidade do pavimento



A.7 – Ensaio com a sala SE 4.3 vazia



A.8 – Ensaio na sala SE 4.3 com espuma de 30 mm na totalidade do pavimento



A.9 – Ensaio na sala SA 2.10



A.10 – Ensaio no anfiteatro SA 2.5



ANEXO B – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO PARA OS VÁRIOS MATERIAIS ENCONTRADOS NOS ESPAÇOS ENSAIADOS

	α_i					
	125	250	500	1000	2000	4000
Paredes e teto						
Betão (ou alvenaria de tijolo) rebocado e estucado	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.07
Pavimento						
Revestimentos de piso rígidos ("parquet"), dispostos em pavimento rígido	0.03	0.03	0.07	0.06	0.06	0.09
Armários						
Armários de madeira	0.03	0.03	0.07	0.06	0.06	0.09
Janelas e portas						
Janelas, envidraçados	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05
Quadro						
	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
Ripado de madeira						
Painéis de réguas de madeira (valores do fabricante)	0.21	0.83	0.74	0.31	0.28	0.36
Ripado de madeira						
Painéis de réguas de madeira (obtido experimentalmente)	0.46	0.61	0.73	0.45	0.27	0.17
Contraplacado de madeira						
Painéis de Contraplacado de madeira - Patrício, 2010	0.46	0.61	0.73	0.45	0.27	0.17
Teto acústico						
Teto acústico perfurado - Knauf	0.64	0.85	0.69	0.62	0.37	0.48
Teto acústico						
Teto acústico ranhurado - PladurFon	0.56	0.95	0.94	0.65	0.48	0.41
Teto						
Teto pladur liso - Patrício, 2010	0.29	0.10	0.05	0.05	0.07	0.09

ANEXO C – EXEMPLO DE CÁLCULO

C.1 – Dados da fórmula de Sabine sem correção dos coeficientes de absorção, para o pavimento com um coeficiente de 0.6 (modelo 2)

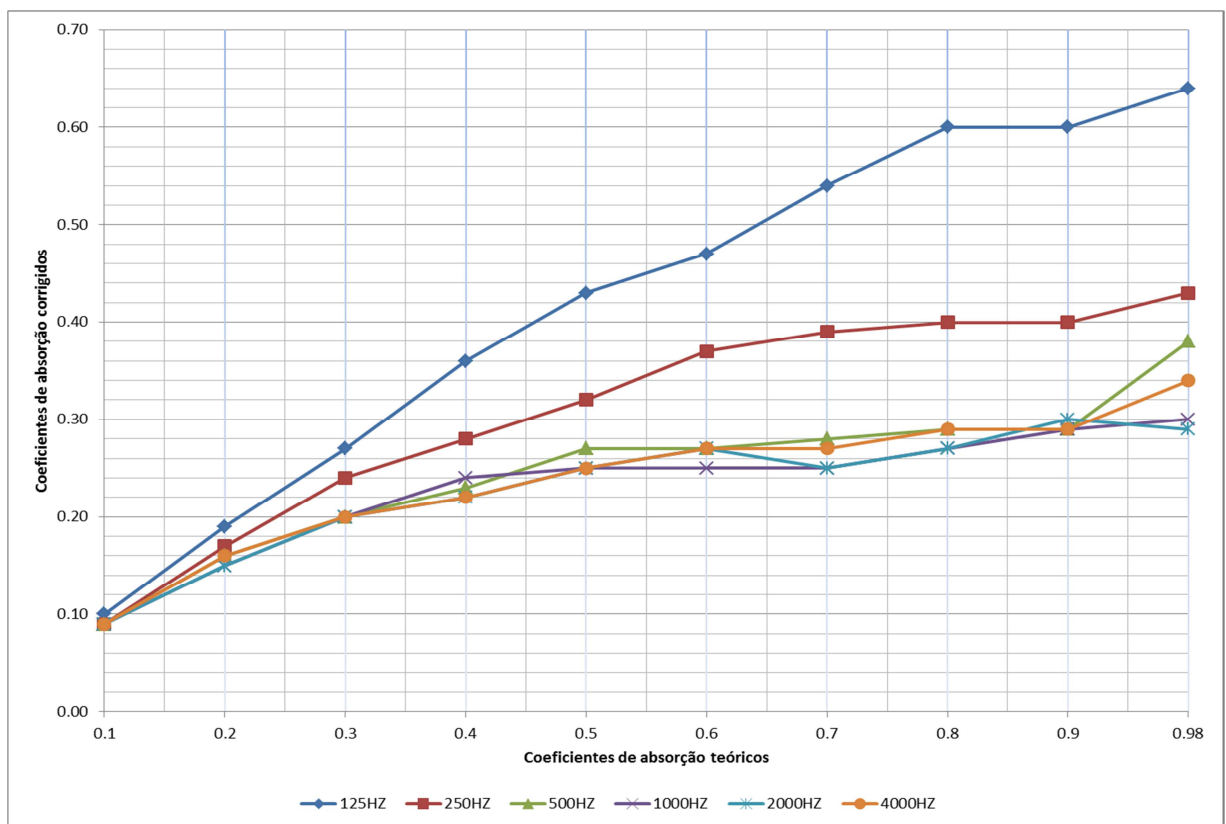
		A_i	α_i					
			125	250	500	1000	2000	4000
Teto		54.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Pavimento		54.07	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Parede lisa		39.98	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Armários		12.75	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Porta		5.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Quadro		7.32	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ripado Madeira		18.91	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Janelas		12.80	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$A_{sem\ objetos} = \sum S_i * \alpha_i$			47.55	47.55	47.55	47.55	47.55	47.55
		Freq (Hz)						
		125	250	500	1000	2000	4000	
Sabine	Tr (s) - sala vazia	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	
Sabine	CATT	0.81	0.82	0.81	0.81	0.80	0.81	
% de erro		43.91	45.68	43.91	43.91	42.13	43.91	

C.2 – Dados da fórmula de Sabine com correção dos coeficientes de absorção, para o pavimento com um coeficiente de 0.6 (modelo 2)

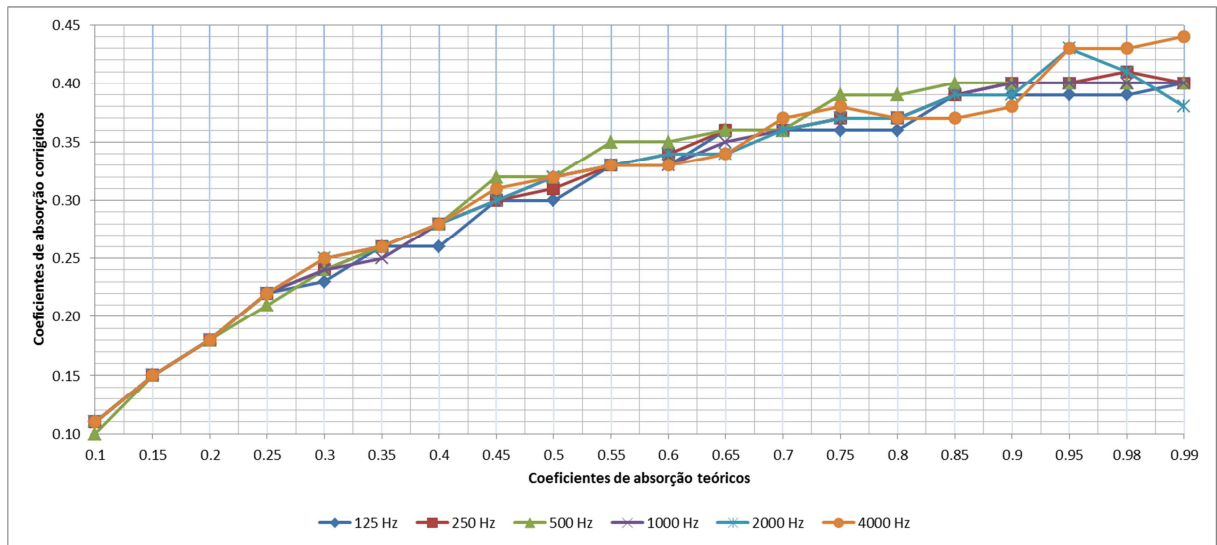
		A_i	α_i					
			125	250	500	1000	2000	4000
Teto		54.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Pavimento		54.07	0.33	0.34	0.35	0.33	0.34	0.33
Parede lisa		39.98	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Armários		12.75	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Porta		5.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Quadro		7.32	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ripado Madeira		18.91	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Janelas		12.80	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$A_{sem\ objetos} = \sum S_i * \alpha_i$			32.95	33.49	34.03	32.95	33.49	32.95
		Freq (Hz)						
		125	250	500	1000	2000	4000	
Sabine	Tr (s) - sala vazia	0.81	0.80	0.79	0.81	0.80	0.81	
Sabine	CATT	0.81	0.82	0.81	0.81	0.80	0.81	
% de erro		0.28	2.61	2.99	0.28	0.11	0.28	

ANEXO D – CURVAS DE CORREÇÃO DOS MODELOS 1, 2 E 3

D.1 – Curva de correção do modelo 1 para as várias bandas de frequência



D.2 – Curva de correção do modelo 2 para as várias bandas de frequência



D.3 – Curva de correção do modelo 3 para as várias bandas de frequência

