

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO MUSEU MUNICIPAL ABADE PEDROSA

(Santo Tirso)

SOFIA GOMES BARBOSA

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

Imagination will take you everywhere

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Passados cinco anos, não podia estar mais orgulhosa do meu percurso académico e torna-se necessário demonstrar o meu agradecimento às pessoas que tornaram a minha experiência mais enriquecedora e que contribuíram para a realização desta tese.

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, pela simpatia e interesse e por prestar apoio sempre que necessário nos conteúdos da tese, que incentivou aos “momentos culturais” e guiou o tema da melhor forma para que este estudo se tornasse o mais completo possível.

Ao Eng.º António Eduardo Costa pela disponibilidade e boa disposição que demonstrou na realização dos ensaios no MMAP, assim como as sugestões pertinentes para a organização dos diferentes dados recolhidos.

Ao Museu Municipal Abade Pedrosa, por permitir a realização deste estudo e, em especial, à Sra. Sofia Carneiro, que sempre se disponibilizou para auxiliar e prestar dados essenciais na realização desta tese, mesmo depois de concluída a visita ao museu.

Ao Eng.º Octávio Inácio da empresa *InAcoustics*, por prestar a sessão de esclarecimentos das medidas acústicas que foram possíveis implementar, assim como várias informações relevantes sobre o museu.

Aos meus pais, um agradecimento muito especial, pois são as pessoas que mais me apoiam, que me acompanharam em todo o meu percurso pessoal e académico, sempre me incentivaram a estudar, a não desistir dos meus objetivos e a seguir os meus sonhos.

A todos os meus amigos, os que já tinha antes e os que conheci na faculdade, que sempre me incentivaram nos momentos mais duros a continuar, a estudar quando não apetecia e a relativizar os diferentes problemas que iam surgindo ao longo dos cinco anos.

E, sem dúvida, a mim, que aproveitei o que a vida académica tinha para oferecer, conheci pessoas incríveis que levo para a vida, com quem tive saídas memoráveis e que contribuíram para a minha jornada. Mas também agradeço por ter sempre cumprido com os meus objetivos pessoais, por nunca ter desistido e por ter trabalhado com afinco de forma a levar comigo as melhores partes do que a faculdade tinha para ensinar.

RESUMO

A Acústica é uma área que tem vindo a ganhar cada vez mais relevância em grandes espaços públicos, já que fatores como o ruído de fundo e a reverberação influenciam o conforto sentido pelos utilizadores do espaço. Isto é especialmente importante em museus, em que o ambiente geral é maioritariamente silencioso e há tendência para um maior foco nas peças que estão em exposição, pelo que qualquer tipo de ruído acaba por ser incómodo para os visitantes.

Para a realização deste estudo, é importante refletir sobre a importância dos museus para a sociedade, na medida em que estes são responsáveis pela ligação entre o passado e o presente, contando a história de um ou vários locais de forma visual e criativa, e servindo também como um meio para educar, para que no futuro seja possível ser-se melhor, tendo em conta acontecimentos do passado.

Considerando que o trabalho apresenta conceitos utilizados na área de acústica, é necessário oferecer uma explicação inicial dos mesmos para que o restante trabalho faça sentido, assim como uma descrição de como o tema abordado nesta tese evoluiu no tempo, constituindo o Estado de Arte. Também foi feita uma reflexão tendo em conta a legislação existente.

A história e as intervenções respeitantes à reabilitação do Museu Municipal Abade Pedrosa são também fundamentais para entender o edifício em causa, sendo possível averiguar se o seu uso foi sempre o mesmo ou se foi mudando ao longo dos anos e como é que isso influenciou na requalificação do museu em 2016.

Para a avaliação da qualidade acústica do museu, fez-se um levantamento geométrico do espaço e foram efetuados diversos ensaios, tendo sido efetuadas medições do Tempo de Reverberação (TR), RASTI e o Nível Sonoro Equivalente (LAeq). Estas medições foram efetuadas em todas as salas de exposição. Foram obtidos valores de TR [500, 1k, 2k] entre 2,5 e 3,9 s. Os valores de RASTI médios variaram entre 0,44 e 0,55 s. Os valores de LAeq de ruído de fundo apresentam um máximo de 43 dB(A) na banda dos 1000 Hz e um valor global em todas as salas de 57 dB(A).

De seguida, procedeu-se a uma análise multicritério de forma a caracterizar globalmente o Museu de uma maneira simples e bastante perceptível, utilizando um algoritmo que classifica as diferentes salas subjetivamente, em que, na generalidade, a classificação obtida foi “má”.

A partir dos valores obtidos nas diferentes medições, é possível então comparar estes valores com estudos semelhantes que foram efetuados no Museu Nacional de Soares dos Reis (Porto), no Museu de Serralves (Porto) e com vários museus internacionais, sendo possível verificar que o Museu Municipal Abade Pedrosa globalmente apresenta valores que excedem (de forma prejudicial) os valores restantes museus. Foram também sugeridas possíveis melhorias que contribuíssem para a correção acústica do espaço, com um custo previsível de 27.500 €.

Por último, são apresentadas as conclusões retiradas a partir do estudo feito deste local, assim como possíveis desenvolvimentos futuros, que surgem como sugestões de como esta tese poderia ser mais aprofundada, podendo esta ser um ponto de partida para outros estudos académicos.

PALAVRAS-CHAVE: acústica, museu, tempo de reverberação, RASTI, ruído de fundo.

ABSTRACT

This work, which falls within the study area of Building Acoustics, aims at verifying in what way acoustics interferes in the museum in study and how the rehabilitation of the space modified the acoustic comfort in its interior.

Acoustics is an area that has been getting more relevance in large public spaces, since parameters like the background noise and reverberation influence the comfort felt by the space users. This is especially important in museums, in which the environment is mainly quiet and there is a tendency for a bigger focus on the pieces on display, whereby any type of noise ends up being a nuisance to the visitors.

To carry out this study, it's important to reflect about the significance of museums for the society, in the means that they are responsible for the connection between the past and the present, telling the history of one or various places in a visual and creative way, and serving to educate, so that in the future there is a possibility to be better, taking into account past events.

As this work presents basic concepts used in acoustics, it's necessary to offer an initial explanation of these so that the rest of the work makes sense, as well as a description of how the topic addressed in this dissertation evolved in time, composing the State of the Art. A reflection considering the existing legislation was also done.

The history and interventions concerning the rehabilitation of Museu Municipal Abade Pedrosa are also fundamental to understand the building in question, being possible to ascertain if its use was always the same or if it changed over the years and how that influenced in the museum requalification in 2016.

To evaluate the acoustic quality of the museum, in situ measurements were done: Reverberation Time, RASTI and the Equivalent Sound Level (LAeq). These measurements were performed in every exhibition room. Values were obtained for TR [500, 1k, 2k] between 2,5 and 3,9 s. The RASTI mean values varied between 0,44 and 0,55 s. LAeq values of background noise have a top value of 43 dB(A) in the 1000 Hz frequency band and a global value of 57 dB(A) in every room.

A multicriteria analysis was carried out to globally characterize the museum in a simple and perceptive way, with an algorithm that ranks subjectively all the different rooms, in which they were generally classified as “*bad*”.

From the values obtained in the different measurements, it was possible to compare these values with similar studies that were carried out in the Museu Nacional de Soares dos Reis (Porto), Museu de Serralves (Porto) and other international museums, being possible to verify that Museu Municipal Abade Pedrosa has worse acoustic values compared to the other museums. It was also suggested possible improvements that could contribute for the acoustic correction of the space, with a predictable cost of 27.500 €.

Lastly, the conclusions drawn from the study carried out in this place are presented, as well as possible future developments, that appear as suggestions of how this dissertation could be further expanded, in which this could be a starting point for other academic studies.

KEYWORDS: acoustics, museum, reverberation time, RASTI, background noise.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xv
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA TESE	4
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.1.1. FÍSICA E ACÚSTICA	5
2.1.2. EVOLUÇÃO DO ESTUDO DO SOM	5
2.1.3. ONDAS SONORAS	7
2.1.4. OUVIDO HUMANO	7
2.1.5. SOM E RUÍDO	8
2.1.6. FREQUÊNCIAS E CURVAS DE PONDERAÇÃO	9
2.2. CONCEITOS TEÓRICOS BASE	10
2.2.1. CELERIDADE	10
2.2.2. PRESSÃO SONORA	10
2.2.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	11
2.2.4. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E NÍVEL SONORO	12
2.3. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS	13
2.3.1. ABSORÇÃO SONORA	13
2.3.2. REVERBERAÇÃO	15
2.3.3. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	17
2.3.3.1. INTRODUÇÃO	17
2.3.3.2. AI – <i>ARTICULATION INDEX</i> (ÍNDICE DE ARTICULAÇÃO)	19

2.3.3.3. SIL (Nível de Interferência na Conversação)	19
2.3.3.4. AC (<i>Articulation Class</i>)	19
2.3.3.5. STI e RASTI	19
2.3.4. ISOLAMENTO SONORO E CORREÇÃO ACÚSTICA	20
2.3.4.1. ISOLAMENTO SONORO	20
2.3.4.2. CORREÇÃO ACÚSTICA	21
3. ESTADO DA ARTE	25
3.1. ARQUITETURA AO LONGO DOS SÉCULOS	25
3.2. ACÚSTICA E ARQUITETURA	29
3.2.1. SONS DA PRÉ-HISTÓRIA	29
3.2.2. DESENVOLVIMENTO DA ACÚSTICA	31
3.2.3. MUSEUS: ESTADO DA ARTE	32
3.3. ENQUADRAMENTO DO TEMA	35
3.3.1. MUSEUS NO MUNDO	35
3.3.2. MUSEUS EM PORTUGAL	38
3.3.3. HISTÓRIA DA LEGISLAÇÃO MUSEOLÓGICA EM PORTUGAL	42
4. METODOLOGIA	43
4.1. MUSEU MUNICIPAL ABADE PEDROSA	43
4.2. METODOLOGIA	46
4.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	49
4.3.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E VALORES IDEAIS	49
4.3.2. METODOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO	50
4.4. RASTI	52
4.4.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E VALORES IDEAIS	52
4.4.2. METODOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO	53
4.5. RUÍDO DE FUNDO	55
4.5.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E VALORES IDEAIS	55
4.5.2. METODOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO	55

5. RESULTADOS	57
5.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	57
5.2. RASTI	61
5.3. RUÍDO DE FUNDO	64
6. ANÁLISE MULTICRITÉRIO	69
6.1. INTRODUÇÃO	69
6.2. DEFINIÇÃO DO ALGORITMO	69
6.3. RESULTADOS	73
7. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MUSEUS	75
7.1. INTRODUÇÃO	75
7.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	76
7.3. RASTI	78
7.4. RUÍDO DE FUNDO	79
8. PROPOSTA DE MELHORIAS ACÚSTICAS	81
8.1. INTRODUÇÃO	81
8.2. PROPOSTAS DE CORREÇÃO ACÚSTICA	82
8.3. PREVISÃO DE MELHORIAS	86
8.4. ANÁLISE ECONÓMICA	94
9. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	97
9.1. CONCLUSÕES	99
9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Propagação de ondas sonoras a partir de ondas sonoras pontuais (1) e lineares (2) [Esquemas da autora]	5
Fig. 2.2 - Fonoautógrafo [14].....	6
Fig. 2.3 - Thomas Edison com o primeiro fonógrafo (12 de Agosto de 1877) [17]	6
Fig. 2.4 - Representação esquemática das ondas transversais (1) e das ondas longitudinais (2) [20]	7
Fig. 2.5 - Esquema do ouvido humano [22]	8
Fig. 2.6 - Curvas de ponderação A, B, C e D para as diferentes frequências [30]	9
Fig. 2.7 - Desvios na pressão atmosférica causados por uma onda sonora [34]	10
Fig. 2.8 - Blaise Pascal (1623-1662) [35]	11
Fig. 2.9 - Representação da propagação da intensidade sonora a partir de uma fonte [28]	11
Fig. 2.10 - Alexander Graham Bell (1623-1662) [36].....	12
Fig. 2.11 - Mecanismo da absorção sonora [28]	13
Fig. 2.12 - Esquema de um tubo de ondas estacionárias (esq.) e a geometria de uma câmara reverberante (dir.) (adaptado de [33])	14
Fig. 2.13 - Gráfico exemplificativo para a obtenção de α_w com a representação de valores reais, a curva de referência e os diferentes desvios positivos ($\Delta 1$, $\Delta 2$). Se estes desvios ultrapassarem 0,10, move-se a curva de referência de forma iterativa até obter um resultado $\leq 0,10$ [Gráfico da autora]	15
Fig. 2.14 - Wallace Sabine (1868-1919) [42].....	15
Fig. 2.15 - Representação de Tempo de Reverberação, assim como das ondas sonoras de origem direta e refletida (adaptado de [43])	16
Fig. 2.16 - Emissão da palavra no plano horizontal (adaptado de [44]).....	18
Fig. 2.17 - Transmissão de ruídos aéreos (esq.) e ruídos de percussão (dir.) [52].....	20
Fig. 2.18 - Transmissões Diretas e Transmissões Marginais nos Ruídos Aéreos [53]	20
Fig. 2.19 - Comportamento dos três grupos de materiais em função da frequência.....	21
Fig. 2.20 - Decréscimo das transferências de energia no movimento das fibras, comparando a existência de poros maiores (esq.) e menores (dir.) [33].....	22
Fig. 2.21 - Ressonador agrupado como painel perfurado [55].....	23
Fig. 2.22 - Membrana Acústica [55]	23
Fig. 3.1 – Pártenon, Atenas (esq.) e pormenor de ornamentação numa coluna (dir.) [62]....	25
Fig. 3.2 - Catedral de Santiago de Compostela, Espanha (esq.) e interior da Basílica de St. Sernin, França (dir.) [62]	26

Fig. 3.3 - Catedral de Notre Dame, Paris (esq.) e o seu interior (dir.) [62].....	26
Fig. 3.4 - Catedral de Florença, Itália [62]	27
Fig. 3.5 - Palácio Nacional de Mafra no exterior (esq.) e interior (dir.), Portugal [62].....	27
Fig. 3.6 - Panteão de Paris, França [62].....	27
Fig. 3.7 - <i>Empire State Building</i> , Nova Iorque (esq.) e interior do Teatro dos Campos Elísios, Paris (dir.) [62]	28
Fig. 3.8 - <i>Fallingwater</i> em Pensilvânia, EUA (esq.) e <i>Crown Hall</i> em Chicago, EUA (dir.) [62]	28
Fig. 3.9 - Museu Guggenheim em Bilbao (esq.) e interior do <i>Thompson Center</i> em Chicago, EUA (dir.) [62].....	28
Fig. 3.10 - Guangzhou Opera House (esq.) e Galaxy SOHO, China (dir.) [62].....	29
Fig. 3.11 - Stonehenge (Reino Unido) [57].....	29
Fig. 3.12 - Templo Maia de Kukulkan (México) [57]	30
Fig. 3.13 - Teatro de Epidauro (Grécia) [59].....	30
Fig. 3.14 - Planta do Odeão de Agripa, Atenas (esq.) e monumento atualmente (dir.) [59]	31
Fig. 3.15 - Teatro de Aspendo, Turquia representado em <i>De Architectura</i> (atualmente é o teatro mais bem preservado da antiguidade) [64]	31
Fig. 3.16 - <i>Country Music Hall of Fame and Museum</i> , Nashville, EUA [75]	33
Fig. 3.17 - Galeria Nacional da Dinamarca [80].....	33
Fig. 3.18 - Museu de História da Ciência (esq.) e Museu Ashmoleon (dir.), Oxford [64].....	35
Fig. 3.19 - Museu Capitolino, Roma (esq.) e Museus do Vaticano (dir.) [65].....	35
Fig. 3.20 - Museu Britânico, Londres (esq.) e Louvre, Paris (dir.) [65].....	36
Fig. 3.21 - Exterior do Museu de Arte Moderna, Nova Iorque (esq.) e o seu interior (dir.) [67]	36
Fig. 3.22 - Museu Skansen, Estocolmo [83].....	37
Fig. 3.23 - Museu Muang Boran, Banquecoque [84]	37
Fig. 3.24 - Museu de Orsay, Paris [67].....	38
Fig. 3.25 - Museu da Universidade de Coimbra [68]	38
Fig. 3.26 - Museu Nacional de Soares dos Reis, Porto (esq.) e António Soares dos Reis (dir.) [69]	39
Fig. 3.27 - Exterior do antigo Museu dos Coches (antigo Picadeiro do Palácio de Belém) (esq.) e o seu interior (dir.) [68].....	40
Fig. 3.28 - Ecomuseu Municipal do Seixal [71].....	40
Fig. 3.29 - Museu Calouste Gulbenkian, Lisboa [68].....	41

Fig. 3.30 - Museu de Serralves, Porto; Museu do Oriente, Lisboa (em cima); Museu dos Descobrimentos, Belmonte; e MAAT, Lisboa (em baixo) [68]	41
Fig. 4.1 - Mosteiro de São Bento (esq.) e Museu Municipal Abade Pedrosa instalado na antiga hospedaria, Santo Tirso (dir.) [Fotos da autora]	43
Fig. 4.2 - Corredor interior com desenvolvimento longitudinal (esq.) e janela do piso superior com frontão (dir.) [Fotos da autora]	44
Fig. 4.3 - Auditório (esq.) e diferentes espaços de exposição (dir.) [Fotos da autora]	44
Fig. 4.4 - Coleção da Romanização (esq.) e Época Contemporânea (dir.) [Fotos da autora]	45
Fig. 4.5 - Ligação exterior entre o MMAP e o MIECST (esq.) e o seu interior (dir.) [Foto da direita da autora]	45
Fig. 4.6 - Corredor interior do MIECST (esq.), ligação interior entre o MIECST e o MMAP (centro) e uma das salas de exposição (dir.) [Fotos da autora]	46
Fig. 4.7 - Planta do Museu Municipal Abade Pedrosa, Santo Tirso	47
Fig. 4.8 - Interior das Salas 1 e 2 do MMAP [Fotos da autora]	48
Fig. 4.9 - Interior das Salas 3, 4 e 5 do MMAP [Fotos da autora]	48
Fig. 4.10 - Fonte Sonora <i>Brüel & Kjaer</i> modelo 4224 (esq.) e um sonómetro <i>Brüel & Kjaer</i> modelo 2260 (dir.) [Fotos da autora]	49
Fig. 4.11 - Preparações iniciais da instalação dos cabos e da posição dos diversos equipamentos de medição [Foto da autora]	50
Fig. 4.12 - Medição do Tempo de Reverberação na sala 1, com o sonómetro direccionado para as diagonais esquerda e direita da sala, respetivamente [Fotos da autora]	50
Fig. 4.13 - Medição do TR: Localização da fonte sonora (FS) e da posição dos pontos 1 e 2 medidos na sala 1 (em cima), sala 2 (centro), sala 3, 4 e 5 (em baixo) do MMAP	51
Fig. 4.14 - Fonte Sonora RASTI <i>Brüel & Kjaer</i> modelo 4225 (esq.) e Eng ^o . António Eduardo Costa com o recetor <i>Brüel & Kjaer</i> modelo 4419 (dir.) [Fotos da autora]	52
Fig. 4.15 - Medição do RASTI: Representação esquemática da posição da fonte sonora e dos diferentes pontos medidos na sala 1 do MMAP	53
Fig. 4.16 - Medição do RASTI: Representação esquemática da posição da fonte sonora e dos diferentes pontos medidos na sala 2 (em cima) e nas salas 3, 4 e 5 (em baixo) do MMAP	54
Fig. 4.17 - Diferentes posições do sonómetro na medição do ruído de fundo [Fotos da autora]	55
Fig. 4.18 - Medição do Ruído de Fundo: Representação esquemática das diferentes posições do sonómetro na salas 1 (em cima), na sala 2 (ao centro) e das salas 3, 4 e 5 (em baixo) do MMAP	56
Fig. 5.1 - Planta do Museu Municipal Abade Pedrosa, Santo Tirso	58
Fig. 5.2 - Valores médios do TR em cada uma das salas de exposição do MMAP para as bandas de frequência de 1/3 oitava	58

Fig. 5.3 - Valores médios do TR em cada uma das salas de exposição do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava	59
Fig. 5.4 - Valores médios do TR em cada uma das salas de exposição do MMAP para as bandas de frequência de 500, 1000 e 2000 Hz os limites inferior e superior correspondentes aos valores ideais considerados no estudo (0,8 a 1,4 s)	60
Fig. 5.5 - Valores médios de RASTI para as salas de exposição 1 e 2 do MMAP	62
Fig. 5.6 - Valores médios de RASTI para as salas de exposição 3, 4 e 5 do MMAP	62
Fig. 5.7 - Valores dos níveis de pressão sonora de ruído de fundo para todas as salas de exposição do MMAP na banda de 1/3 de oitava	65
Fig. 5.8 - Valores dos níveis sonoros de ruído de fundo com a aplicação do Filtro A para todas as salas de exposição do MMAP na banda de 1/3 de oitava	67
Fig. 5.9 - Planta de Enquadramento com os principais locais mencionados no estudo dos valores do Ruído de Fundo	68
Fig. 7.1 - Comparação dos Tempos de Reverberação médios de todos os museus	77
Fig. 7.2 – Comparação dos níveis sonoros de Ruído de Fundo médios de todos os museus ..	80
Fig. 8.1 - 1º <i>Farboacoustic</i> , 2º <i>BASWAphon</i> , 3º <i>SonaSpray K-13</i> , 4º <i>SonaSpray FC</i> , 5º <i>Sonacoustic</i> , 6º <i>StoSilent Top Finish</i> , 7º <i>Stosilent Panel A-Tec Top Finish</i> , 8º <i>Alcatifa Densa</i>	90
Fig. 8.2 - Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 1 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual	91
Fig. 8.3 - Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 2 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual	92
Fig. 8.4 - Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 3 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual	92
Fig. 8.5 - Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 4 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual	93
Fig. 8.6 - Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 5 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual	93
Fig. 8.7 - As três melhores soluções para as salas de exposição do MMAP de acordo com a gama de valores recomendada dos Tempos de Reverberação neste estudo: <i>Sonacoustic</i> (em cima, esq.), <i>StoSilent Panel Top-Finish</i> (em cima, dir.) e <i>StoSilent A-Tec Top Finish</i> (em baixo)	95
Fig. 9.1 - Pormenor <i>Sonacoustic</i> 25 mm com caixa de ar e esquema representativo da aplicação da solução nas salas de exposição do MMAP	98

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes (adaptado de [28])	18
Quadro 3.1 - Lista de estudos realizados em museus de acordo com a ordem cronológica de publicação [88].....	34
Quadro 4.1 - Dimensões das salas 1, 2, 3, 4 e 5 do MMAP	47
Quadro 4.2 - Gamas de valores de RASTI em relação com a inteligibilidade da palavra [64]	53
Quadro 5.1 - Valores do Tempo de Reverberação (s) medidos nas salas 1 a 5 em bandas de 1/3 de oitava, dois pontos em cada sala: P1 e P2.....	57
Quadro 5.2 - Valores do Tempo de Reverberação medidos nas salas 1 a 5 em bandas de 1/1 de oitava, o Tempo de Reverberação médio para cada sala e o Tempo de Reverberação médio para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz	59
Quadro 5.3 - Valores de RASTI nas cinco salas de exposição do MMAP, a média em cada um dos pontos, a média da sala e o desvio-padrão em cada sala	61
Quadro 5.4 - Valores dos Níveis de Pressão Sonora do Ruído de Fundo nas cinco salas de exposição do MMAP para banda de frequência de 1/3 oitava.....	64
Quadro 5.5 - Valores de Ruído de Fundo nas cinco salas de exposição do MMAP para a banda de frequência de 1/3 oitava com a ponderação para o Filtro A.....	66
Quadro 6.1 - Escala de cotações para o critério TR.....	71
Quadro 6.2 - Escala de cotações para o critério RASTI	71
Quadro 6.3 - Escala de cotações para o critério LAeq	71
Quadro 6.4 - Escala de cotações para o critério LAeq (AVAC)	71
Quadro 6.5 - Peso de cada critério considerado no algoritmo.....	72
Quadro 6.6 - Escala subjetiva aplicada aos valores do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus quando aplicado o algoritmo.....	72
Quadro 6.7 - Resultados do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus a partir da aplicação do algoritmo e resultados convertidos à escala subjetiva das diferentes salas de exposição do MMAP	73
Quadro 6.8 - Resultados do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus a partir da aplicação do algoritmo e resultados convertidos à escala subjetiva das diferentes salas de exposição do MMAP	74
Quadro 6.9 - Resultados do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus a partir da aplicação do algoritmo e resultados convertidos à escala subjetiva das diferentes salas de exposição do MMAP	74
Quadro 7.1 - Museus objeto de estudo neste capítulo, com as respetivas informações de volume, Tempo de Reverberação para as bandas de frequência de 500, 1000 e 2000 Hz, assim como o Tempo de Reverberação médio de cada um deles	76

Quadro 7.2 - Comparação dos valores de RASTI médio entre o Museu Municipal Abade Pedrosa, o Museu Nacional de Soares dos Reis e o Museu de Serralves	78
Quadro 7.3 - Níveis sonoros do Ruído de Fundo para as bandas de frequência de 1/1 oitava de todos os museus que possuem dados relevantes para este estudo	79
Quadro 8.1 - Valores de Tempo de Reverberação médio e absorção sonora real equivalente das salas de exposição do Museu vs Tempos de Reverberação ideais e absorção sonora necessária para que o TR atinja o valor aconselhável	82
Quadro 8.2 - Coeficientes de absorção sonora existentes no museu e propostos	85
Quadro 8.3 - Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 1 do MMAP	86
Quadro 8.4 - Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 2 do MMAP	87
Quadro 8.5 - Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 3 do MMAP	88
Quadro 8.6 - Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 4 do MMAP	89
Quadro 8.7 - Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 5 do MMAP	90
Quadro 8.8 - Estimativa orçamental para cada uma das salas de exposição do MMAP	94
Quadro 8.8 - Cálculo do ΔTR para cada uma das salas de exposição do MMAP para permitir a escolha entre as melhores soluções	95
Quadro 9.1 - Síntese dos resultados obtidos neste estudo	97

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

MMA – Museu Municipal Abade Pedrosa

MIECST – Museu Internacional de Escultura Contemporânea de Santo Tirso

MS – Museu de Serralves

MNSR – Museu Nacional de Soares dos Reis

c – celeridade do som [m/s]

T – temperatura [°C]

L – Nível de Pressão Sonora [dB]

α – Coeficiente de Absorção Sonora

NRC – *Noise Reduction Coefficient*

TR – Tempo de Reverberação [s]

L_{Aeq} – Nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A [dB]

SPL – *Sound Pressure Level*

EDT – *Early Decay Time*

SNR – *Signal-To-Noise Ratio*

C50 – Claridade recebida nos primeiros 50 ms

D80 – Definição (razão entre energia recebida nos primeiros 80 ms e a energia total recebida)

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

RASTI – *RApid Speech Transmission Index*

TR_{médio} – Tempo de Reverberação médio

TR_{médio} [500, 1k, 2k] – Tempo de Reverberação médio nas frequências de 500, 1.000 e 2.000 Hz

CTR – Cotação do Tempo de Reverberação

CRASTI – Cotação do RASTI

CL_{Aeq} – Cotação do Nível Sonoro Contínuo Equivalente do Ruído de Fundo

CL_{Aeq} (AVAC) – Cotação do Nível Sonoro Contínuo Equivalente do Ruído de Fundo com Equipamentos AVAC

PQAM – Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus

Ab, r – Absorção Real [m²]

Ab, i – Absorção Ideal [m²]

INE – Instituto Nacional de Estatística

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A palavra “museu” tem origem nas nove deusas gregas da inspiração ou “musas”: Calíope (musa da poesia épica e eloquência), Clio (musa da História), Erato (musa da Poesia Lírica ou Erótica), Euterpe (musa da Música), Melpomene (musa da Tragédia), Polímnia (musa da Poesia sagrada), Terpsicore (deusa da Dança), Tália (musa da Comédia) e Urania (musa da Astronomia e Astrologia) [1].

O famoso *Mouseion* de Alexandria (também denominado “templo das musas”) era, no entanto, uma espécie de universidade para o estudo de filosofia, poesia e música, contendo uma importante biblioteca, em vez de se tratar de um espaço dedicado à exposição de objetos [2]. O *Mouseion* era utilizado como uma instituição filosófica ou como um espaço de contemplação (este último um dos propósitos dos museus atualmente).

A primeira vez que a palavra “museu” foi utilizada para descrever algo similar a um espaço deste género com o propósito que tem atualmente foi no século XV na coleção de Lorenzo de Medici em Florença [3]. Este foi o principal catalisador artístico desta época, incentivando os cidadãos a encomendar obras dos principais artistas de Florença, incluindo Michelangelo Buonarroti e Leonardo da Vinci [4].

Os museus, tais como se conhecem hoje, foram primeiramente identificados nos séculos XVII e XVIII, em que havia coleções de objetos e locais em exposição, incluindo praças públicas, estátuas, tesouros medievais e religiosos, e santuários japoneses [2].

Um museu é, então, uma instituição dedicada a procurar, preservar, estudar, interpretar e exibir os indícios da vida humana e do ambiente, contribuindo para a educação, cultura, qualidade de vida e turismo para a região [5].

Atualmente, existem vários tipos de museus de acordo com o seu propósito, nomeadamente [5]:

- Museus Gerais – não apresentam um único tema ou propósito, tendo sido muitos deles criados nos séculos XVIII, XIX e início do século XX (também denominados de museus interdisciplinares). Muitos tiveram origem em coleções privadas, promovendo o conhecimento e cultura de uma certa área;
- Museus de História Natural e Ciências Naturais – contêm espécimes de pássaros, mamíferos, insetos, plantas, rochas, minerais ou fósseis, provenientes dos “Gabinets de Curiosidades” proeminentes na Europa durante o Renascimento. Os “Gabinets de

Curiosidades” eram pequenas coleções organizadas e categorizadas, que mostravam frequentemente a história de objetos que não eram comuns no mundo ocidental;

- Museus de Ciências e Tecnologias – dedicam-se à amostragem do desenvolvimento e aplicação de ideias científicas e instrumentação, possuindo normalmente modelos de demonstração e uma alta interatividade, sendo muito interessantes do ponto de vista educativo;
- Museus de História – são encontrados a um nível local/regional e podem ter um caráter geral ou particular, tais como museus de antiguidades/arqueológicos (quando contêm artefactos arqueológicos), museus etnográficos (quando apresentam exposições de um ponto de vista pertencente a uma certa cultura, cronologicamente ou não, como acontece na maioria dos museus de História), ou até mesmo museus que lembram/comemoram eventos, como Memoriais de Guerra;
- Museus de Arte – também denominados por Museus de Belas Artes ou até galerias de arte, apresentam o valor estético como a maior importância nos artigos expostos, tais como quadros ou esculturas, transmitindo uma imagem visual em vez de educativa, como acontece na maior parte dos museus;
- Museus Virtuais – é uma ideia relativamente mais recente na forma de experienciar um museu e contêm uma coleção de imagens, ficheiros de som, documentos escritos e outros tipos de informação relevantes, como histórica, científica ou cultural. Normalmente são financiados por museus institucionais e estão dependentes nas coleções existentes dos mesmos. Não possuem as características únicas presentes num museu físico, mas tiram proveito das potencialidades da Internet, sendo bastante interativos e de fácil acesso [5].

Também a arquitetura dos museus foi-se modificando ao longo dos séculos, adaptando-se à época em que eram construídos e à forma como evoluiu a arquitetura. A arquitetura tradicional ou clássica característica da Grécia ou Roma Antiga é caracterizada pela simetria, repetição, grandes cúpulas, decorações esculpidas, colunas e amplas bases em forma de terraço.

Já a arquitetura moderna é habitualmente caracterizada por interiores minimalistas, planos e formas simples [7]. Tanto a arquitetura tradicional como a moderna influenciam largamente a acústica dos espaços, pelo que é necessário cada vez mais o trabalho conjunto entre o Arquitecto e o Projetista de Acústica para colmatar as possíveis fraquezas acústicas destes espaços.

Também a necessidade de preservar artefactos em condições de ambiente controladas, durante o século XX, levou a que os edifícios fossem mais selados, com funcionamento constante de sistemas AVAC, controlo de humidade e, em alguns casos, até da luminosidade. No fim do século XX foi novamente introduzida a luz natural nestes espaços de um modo controlado (de forma a convergir para os requisitos de preservação) [6, 13].

1.2. OBJETIVOS

O objeto de estudo desta tese é o Museu Municipal Abade Pedrosa (MMAP), localizado em Santo Tirso, que apresenta em exposição objetos arqueológicos desde o Paleolítico Médio até à época da Industrialização, estando inserido, por isso, na categoria dos Museus de História. A sua ampliação ficou a cargo do Arquitecto Álvaro Siza Vieira, conhecido por desenhar obras simultaneamente modernas e tradicionais [8], com simplicidade dos planos e sofisticação minimalista.

As características da arquitetura nas décadas mais recentes, incluindo as obras de Siza Vieira, com as superfícies lisas altamente refletoras, grandes vãos e áreas envidraçadas, tetos altos e o uso em grande escala de materiais pétreos ou cerâmicos vitrificados, levam ao crescimento de problemas relacionados com a Acústica [9].

Dependendo dos materiais utilizados, a simplicidade na arquitetura leva a que muito pouco som seja absorvido e é possível ouvir todos os sons presentes no espaço, sendo refletida quase toda a energia sonora e criando ausência de inteligibilidade, ruído elevado de fundo e reverberação [10].

Os museus são espaços usados para muitas finalidades e tipos de exposição, pelo que é necessário ter em conta boas soluções acústicas que permitam que os visitantes consigam concentrar-se nas peças em exposição e que, em simultâneo, seja possível assegurar uma boa comunicação nas diferentes salas, para o caso de existirem visitas guiadas ou apresentações [11].

A Acústica é muitas vezes negligenciada ou vista como uma matéria de segundo plano na arquitetura dos edifícios. Isto afeta não só a transmissão dos sons no interior do espaço, mas também pode ser prejudicial ao orçamento do projeto, pois medidas para assegurar uma boa acústica terão de ser implementadas após a construção do espaço, o que é quase sempre mais dispendioso [12].

A caracterização acústica dos museus pode levar a um maior conforto acústico aos utilizadores, conduzindo a uma melhor qualidade destes edifícios. Devido à grande gama de diferentes condições acústicas presentes quer nos espaços existentes, quer nos espaços novos, é importante entender critérios acústicos específicos, que são geridos de acordo com o uso dos espaços. Assim, os principais aspetos a considerar são [6]:

- O ruído geral e o ruído de fundo dos sistemas AVAC, que precisa de ser controlado de forma adequada de acordo com o uso dos espaços;
- Os níveis expectados de ocupação e como estes irão influenciar a acústica das salas – uma maior ocupação, como frequentes visitas guiadas ou visitas de estudo das escolas requerem mais atenção;
- Espaços com uma função mais educacional, com elementos mais interativos, precisam de mais infraestruturas de áudio e vídeo que outros espaços, assim como condições acústicas diferentes;
- Espaços em que as exposições sejam a sua função primária, os curadores terão de decidir se haverá salas com condições acústicas mais controladas que outras;
- A propagação do som entre espaços (entre salas) é frequentemente uma importante consideração, especialmente em museus com menos barreiras físicas entre diferentes áreas.

Assim, é possível afirmar que o principal objetivo desta tese consiste na caracterização acústica do Museu Municipal Abade Pedrosa e a realização de medições de parâmetros acústicos objetivos, de forma a analisar a adequação acústica dos espaços às suas funções.

É também efetuada uma comparação com dois museus: o Museu Nacional de Soares dos Reis, inserido na arquitetura de tipologia “tradicional” e o Museu de Serralves, considerado como um museu de tipologia “moderna”.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

De forma a garantir uma organização estruturada da tese, esta foi dividida em oito capítulos.

O Capítulo 1 corresponde à introdução dos temas e os aspetos essenciais estudados nesta tese, apresentando a origem, definição, evolução e tipos de museus, e como a arquitetura destes espaços tem vindo a evoluir ao longo dos séculos. São apresentados os objetivos principais que se pretendem atingir com este estudo, assim como a importância da Acústica nos museus.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos acústicos essenciais para a compreensão e realização deste documento.

O Capítulo 3 refere-se a um estudo mais aprofundado da evolução dos museus até aos dias de hoje, com especial foco em Portugal, a sua importância na sociedade e exemplos dos museus mais emblemáticos ao longo dos séculos, assim como os diferentes movimentos de arquitetura que foram surgindo. Também é abordado o Estado da Arte, em que se refere as origens da Acústica, especificamente na construção de espaços destinados a receber público, tal como os museus.

No Capítulo 4 começa por se expor a história do Museu Municipal Abade Pedrosa, os diferentes usos que o espaço teve ao longo dos anos, a caracterização do espaço e respetivas reabilitações, assim como o tipo de artefactos expostos no mesmo. Também aqui faz-se uma descrição detalhada dos ensaios realizados no Museu, sendo especificados os aparelhos de medição utilizados e as gamas de valores recomendados para cada um dos parâmetros acústicos. A partir do uso dos aparelhos de medição é especificada a localização em que foram colocados, os valores medidos, e os esquemas da realização dos ensaios.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com as medições *in situ*, sendo organizados em diversos gráficos e quadros com a comparação com as gamas de valores “normais” para cada um destes parâmetros.

No Capítulo 6 é efetuada uma breve análise multicritério para a caracterização do MMAP.

No Capítulo 7, considerando os valores obtidos no Museu Nacional de Soares dos Reis (Porto) e no Museu de Serralves (Porto), é efetuada uma análise comparativa dos resultados destes museus e de outros museus internacionais com o museu em estudo, referindo o que poderia eventualmente ser melhorado.

O Capítulo 8 tem como propósito apresentação de propostas de intervenções para melhorar acusticamente o MMAP.

O Capítulo 9 é dividido em dois subcapítulos importantes: as conclusões retiradas deste estudo e sugestões possíveis para os desenvolvimentos futuros.

Por fim, é ainda incluída a lista de Referências Bibliográficas, incluindo o acesso a cada um dos documentos ao longo da elaboração da tese.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

2.1.1. FÍSICA E ACÚSTICA

Considerando que o âmbito desta dissertação consiste na caracterização acústica do Museu Municipal Abade Pedrosa, é necessário entender de forma clara e precisa conceitos básicos que serão mencionados ao longo deste estudo, nomeadamente de física e acústica.

A física é a ciência que lida com a massa e a energia e as respetivas interações, sendo a base para as outras áreas científicas, tal como a engenharia e a acústica [14].

A acústica é o ramo da física que se preocupa com o estudo do som, com aplicação em quase todos os aspetos da sociedade, em áreas como medicina, arquitetura, engenharia, entre outros. [15]

2.1.2. EVOLUÇÃO DO ESTUDO DO SOM

O âmbito deste trabalho prende-se fundamentalmente com o som e a forma como este se propaga.

O som é uma perturbação mecânica a partir de um estado de equilíbrio que se propaga por meio de um material elástico, tal como o ar, a água ou até mesmo materiais sólidos [17]. É uma variação de pressão que resulta da vibração, que pode ter origem num instrumento musical, nas cordas vocais ou basicamente tudo o que vibre numa frequência audível pelo ouvido humano (aproximadamente entre os 20 e os 20.000 Hz) [18].

A maioria dos sons que se manifestam diariamente são de fontes que podem ser caracterizadas como pontuais ou lineares (Fig. 2.1). Se uma fonte sonora produz ondas que se propagam esfericamente em todas as direções, trata-se de uma fonte pontual (1). Se a fonte sonora produz ondas que se propagam de forma cilíndrica, é considerada uma fonte linear (2) [19].

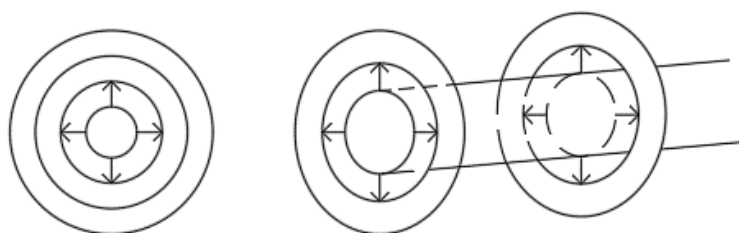


Fig. 2.1 – Propagação de ondas sonoras a partir de ondas sonoras pontuais (1) e lineares (2) [Esquemas da autora]

Leonardo da Vinci (1452-1519), o famoso pensador e artista italiano, é normalmente a pessoa a quem se dá crédito por descobrir que o som se move na forma de ondas. Esta descoberta foi feita aproximadamente em 1500. No entanto, algumas fontes afirmam que o filósofo romano Seneca descobriu, na realidade, as ondas sonoras no primeiro século A.D. É sabido com certeza que mais tarde outro italiano, Galileu Galilei, descobriu mais propriedades das ondas sonoras aproximadamente em 1660 – mostrou que a frequência da onda é o fator que determina o tom que o som vai ter [16].

O primeiro som a ser capturado foi em Paris, por Édouard-Léon de Martinville (1817-1879) usando o fonoautógrafo (Fig. 2.2), no final de 1850, quase duas décadas antes da primeira chamada telefônica de Alexander Graham Bell (1876) ou o fonógrafo de Thomas Edison (1877), mas Scott nunca imaginou que essa gravação pudesse ser voltada a ser ouvida, pelo que não está claro que estes sons contem como gravações.

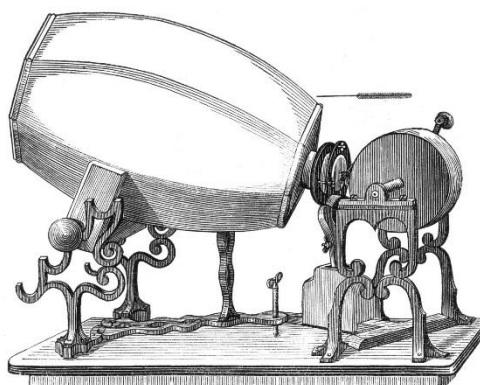


Fig. 2.2 – Fonoautógrafo [14]

Assim, o “primeiro som gravado” seria especificamente entre as primeiras experiências e a reconhecida gravação “Au Clair de la Lune”, mas é difícil afirmar com certeza se as primeiras gravações tiveram sucesso ou qual é que deveria contar como a primeira.

Em 1877, quase 20 anos depois, Thomas Edison (1847-1931) criou um telégrafo repetidor, que conseguia automaticamente repetir mensagens em código Morse e acelerar as mesmas para além das capacidades humanas, tendo mais tarde inventado o fonógrafo [17] (Fig. 2.3).

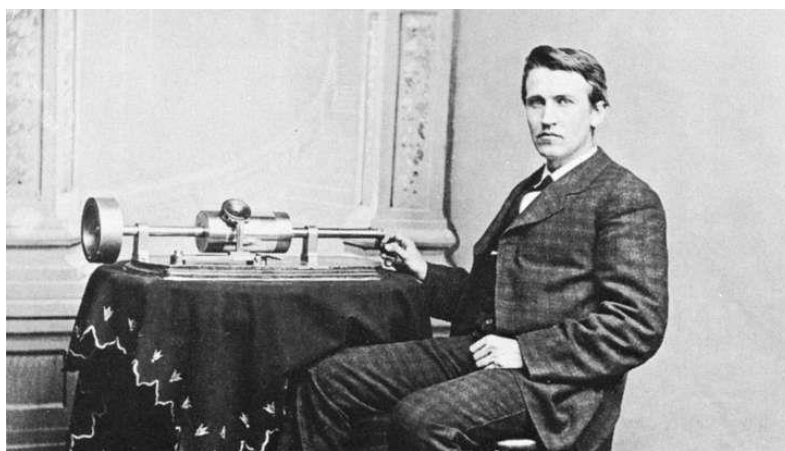


Fig. 2.3 – Thomas Edison com o primeiro fonógrafo (12 de Agosto de 1877) [17]

2.1.3. ONDAS SONORAS

Existem dois tipos de ondas: transversais e longitudinais, que se diferenciam pela forma como se propagam [16]. As ondas transversais fazem com que o meio em que as ondas se propagam se mova perpendicularmente à direção da onda, enquanto que as ondas longitudinais fazem com que o meio se mova paralelamente à direção da onda [20] (Fig. 2.4).

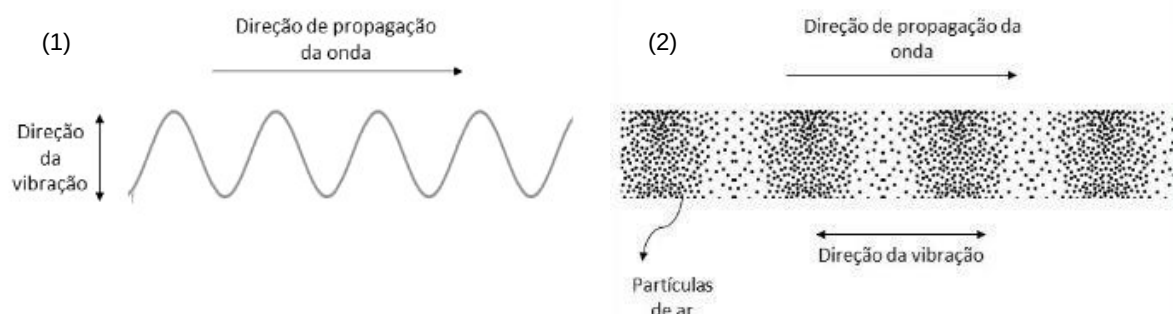


Fig. 2.4 – Representação esquemática das ondas transversais (1) e das ondas longitudinais (2) [20]

As ondas sonoras são ondas longitudinais porque as partículas do meio em que o som é transportado vibram paralelamente à direção que a onda sonora se move [14]. Este movimento cria áreas onde as partículas se encontram mais concentradas (áreas de alta pressão ou compressão) e áreas onde as partículas se encontram mais espaçadas (áreas de baixa pressão ou rarefações) [20].

2.1.4. OUVIDO HUMANO

O ouvido humano está dividido essencialmente em três partes (Fig. 2.5) [21]:

- Ouvido externo – é a porção visível do ouvido, constituído pelo pavilhão auditivo, o lóbulo, o canal auditivo e o tímpano. É responsável por captar as ondas sonoras até a uma membrana oval e flexível (o tímpano), fazendo com que este vibre;
- Ouvido médio – o tímpano encontra-se ligado aos ossículos e estes fazem a conexão entre o ouvido médio e o ouvido interno. O Tubo de Eustáquio que se alarga no ouvido médio é o responsável por equilibrar a pressão entre o ar no exterior do ouvido e o que se encontra no ouvido médio;
- Ouvido interno – é constituído pela cóclea e no seu interior a membrana basilar, que quando se movimenta, faz com que as células sensoriais aí presentes (cílios) vibrem, transformando estas vibrações em impulsos elétricos que por sua vez percorrem o nervo acústico até ao cérebro, tornando-o num som que os humanos reconhecem e entendem.

As ondas sonoras são captadas pelo ouvido externo e percorrem o canal auditivo até ao tímpano, que encaminha estas vibrações para os ossículos presentes no ouvido médio: o martelo, a bigorna e o estribo.

Os ossículos amplificam as vibrações sonoras e conduzem as mesmas para a cóclea, que se encontra preenchida por um líquido, a perilinfa. A vibração deste líquido induz o movimento dos cílios, transmitindo a informação transformada ao cérebro [22].

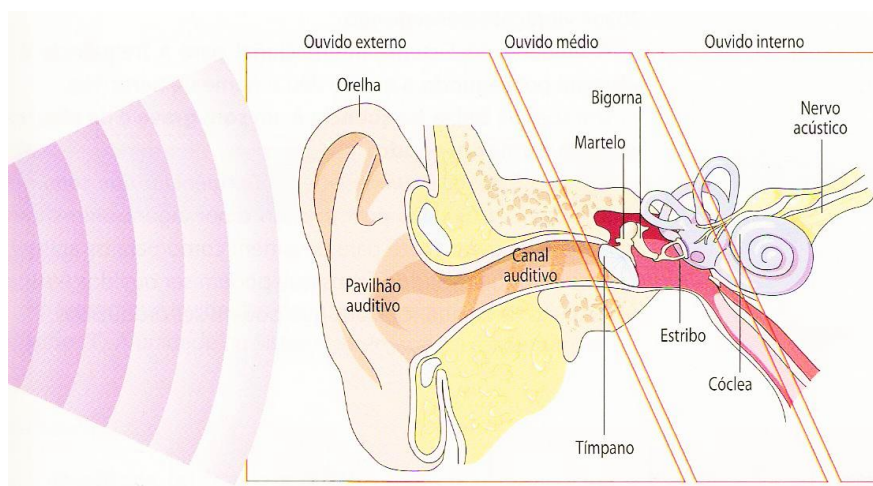


Fig. 2.5 – Esquema do ouvido humano [22]

2.1.5. SOM E RUÍDO

A um nível científico, som e ruído são tecnicamente a mesma coisa – são vibrações no ar que são detetadas pelo ouvido humano [23]. No entanto, o som constitui tudo o que se ouve, enquanto que o ruído são sons indesejados (podendo alguns ser até prejudiciais para a audição), dependendo, portanto, da pessoa e das circunstâncias. Música rock pode ser cativante para uma pessoa (som) e desagradável para outra (ruído).

O cérebro consegue diferenciar entre som e ruído e automaticamente foca-se nos sons que quer ouvir. Isto acontece devido à intenção da pessoa que ouve, ou seja, um único som pode ser considerado tanto um som como um ruído dependendo da forma como se quer ouvir (é por essa razão que muitas pessoas precisam de alarme de manhã para acordar.). Por exemplo, se numa situação ruidosa se estiver atenta à voz de uma pessoa, o cérebro concentra-se na voz e reduz o ruído de fundo. Mas se estiver a ver televisão e alguém começar a falar, o cérebro presta atenção ao som em que a pessoa está mais interessada [23]:

- Se preferir interagir numa conversa com a pessoa, a televisão é o ruído;
- Se preferir continuar concentrado na televisão, a voz da pessoa é o ruído.

Na Acústica, existem dois tipos de ruídos que são bastante úteis: o ruído branco e o ruído rosa. O ruído branco é um sinal que cobre toda a gama de frequências audíveis, em que todas elas possuem a mesma energia, se analisado linearmente [24]. Em bandas de frequências, o ruído apresenta um crescimento de 3 decibéis por oitava. O ruído branco é frequentemente “comparado” à luz branca, que contém aproximadamente iguais intensidades em todas as frequências da luz visível [25].

O ruído rosa contém as frequências de todo o espectro audível, mas com uma energia que diminui à medida que a frequência aumenta a um ritmo de 3 decibéis por oitava (se analisado linearmente). Em bandas de frequências apresenta igual energia por oitava. Este ruído tem sido usado para verificar as características acústicas de auditórios, tal como a reverberação e a ressonância [25]. Chama-se “rosa” pois tem mais componentes nas baixas frequências [26], sendo menos abrasivo para os ouvintes, já que as altas frequências são mais fracas e mais baixas [25].

2.1.6. FREQUÊNCIAS E CURVAS DE PONDERAÇÃO

Heinrich Hertz (1857-1894) foi um físico alemão que demonstrou a teoria do eletromagnetismo de James Maxwell (1831-1879) e facilitou assim inúmeros avanços na tecnologia da comunicação [31]. A frequência é medida em hertz (Hz) em virtude deste físico alemão.

A frequência é uma das principais propriedades das ondas sonoras e consiste no número de vezes por segundo que uma onda sonora se repete, ou seja, o número de ciclos completos por segundo. Altas frequências produzem mais oscilações, enquanto que baixas frequências produzem menos oscilações. Humanos com uma audição normal podem ouvir sons entre os 20 e os 20.000 Hz. Frequências acima dos 20.000 Hz são os ultrassons e os sons abaixo dos 20 Hz são os infrassons [27].

Existem três grandes zonas de frequências [27]:

- Frequências graves: 20 a 355 Hz;
- Frequências médias: 355 a 1.410 Hz;
- Frequências agudas: 1.410 a 20.000 Hz.

O ouvido interpreta as diferentes frequências e atribui-lhes maior ou menor importância conforme as pressões sejam emitidas em frequências graves, médias ou agudas [28]. A resposta do ouvido tem uma variação não linear, respondendo mais a frequências entre os 500 e os 8.000 Hz e sendo menos sensível a sons muito graves ou muito agudos.

Assim, foram introduzidos nos sonómetros os filtros de ponderação (Fig. 2.6). Estes filtros estão relacionados com a resposta do ouvido humano, assegurando que o sonómetro mede de forma precisa o que realmente é ouvido. A curva de ponderação mais usada é o Filtro A. Tal como o ouvido humano, esta corta as frequências mais baixas e mais altas que as pessoas normalmente não conseguem ouvir. [29]

O Filtro B já não se usa atualmente, mas inicialmente foi desenvolvido para cobrir a gama média de intensidade dos ruídos, sendo usado especialmente na indústria de motores [30]. O Filtro C é usado para ruídos mais intensos, relacionando-se melhor com a resposta humana para elevados níveis sonoros e, por isso, com as perdas de audição. O Filtro D, também já em desuso, era utilizado principalmente para medir o ruído de aviões [29].

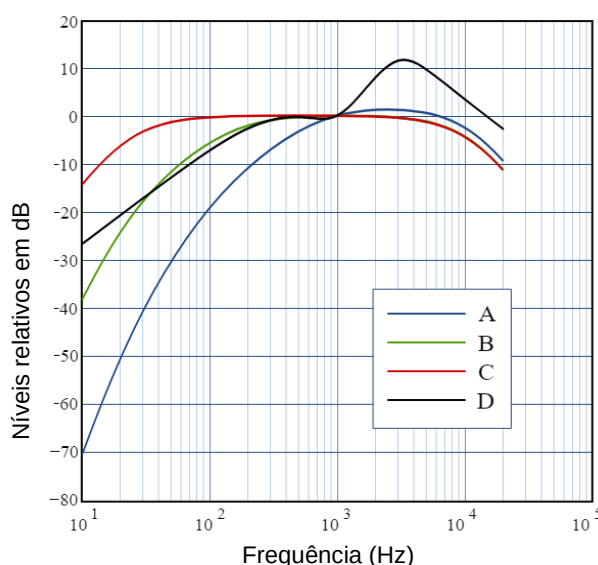


Fig. 2.6 – Curvas de ponderação A, B, C e D para as diferentes frequências [30]

2.2. CONCEITOS TEÓRICOS BASE

2.2.1. CELERIDADE

As reações de um fluido submetido a pressões e dilatações depende do estado do fluido e das suas propriedades elásticas. A onda sonora propaga-se a diferentes velocidades em função de determinadas características do meio que atravessa [32]:

- Elasticidade – capacidade de voltar à forma original após deformação;
- Densidade – grau de compactação de uma substância.

A celeridade é a velocidade de transmissão de uma pequena perturbação num meio homogéneo, isotrópico, sem viscosidade e em repouso. As perturbações são transmitidas por um gás como resultado de colisões entre moléculas em movimento no gás. A celeridade depende do tipo de gás e da sua temperatura. Na Terra, a atmosfera é composta maioritariamente por nitrogénio e oxigénio, e a temperatura está dependente da altitude de uma forma complexa [33].

Moléculas a temperaturas mais elevadas têm mais energia, vibrando mais depressa e permitindo que as ondas sonoras viagem com maior celeridade. Assim, a velocidade de propagação das ondas no ar apenas depende da temperatura, tal como se pode verificar na expressão seguinte:

$$c = 20,045 + \sqrt{T} \quad (2.1)$$

Em que a celeridade c expressa-se em metros por segundo (m/s) e T corresponde à temperatura do meio expressa em kelvin (K). Como habitualmente a temperatura é indicada em graus celsius (°C), utiliza-se a seguinte fórmula de conversão:

$$T(K) = 273,15 + \theta (^{\circ}\text{C}) \quad (2.2)$$

θ é a temperatura do meio em graus celsius.

2.2.2. PRESSÃO SONORA

A pressão sonora é uma quantidade escalar usada para indicar o nível de amplitude do som numa localização específica do espaço. É um desvio da pressão atmosférica e é causada pela onda sonora (Fig. 2.7). A pressão sonora depende da distância que a medição é efetuada e do meio em que se encontra. As unidades para a pressão sonora é o Pascal (Pa), nome dado em honra a Blaise Pascal [34]. A pressão atmosférica tem o valor aproximado de 101.400 Pa.

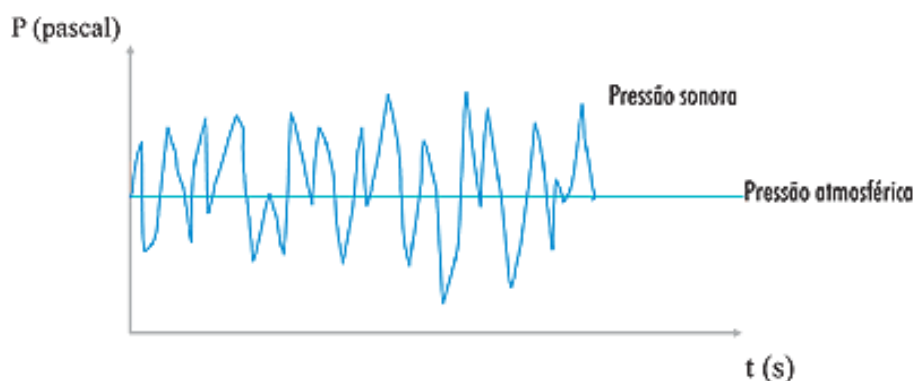


Fig. 2.7 – Desvios na pressão atmosférica causados por uma onda sonora [34]

Blaise Pascal (Fig. 2.8) era um matemático, físico, filósofo religioso e mestre de prosa francês. Foi o responsável por estabelecer a fundação para a teoria das probabilidades moderna, formulou o princípio de pressões de Pascal e propagou uma doutrina religiosa que ensinou a experiência de Deus pelo coração em vez de assentar na razão [35].



Fig. 2.8 – Blaise Pascal (1623-1662) [35]

O ouvido humano pode tolerar uma gama muito ampla de pressões sonoras. A mínima pressão possível para o ouvido humano captar é aproximadamente $20 \mu\text{Pa}$, o desconforto começa a ser sentido nos 20 Pa e a dor é sentida tipicamente quando a pressão sonora se encontra nos 60 Pa . Para colocar em perspetiva, 20 Pa é, por norma, a pressão sonora num concerto de rock e 60 Pa é o equivalente a soprar um trompete a $0,5 \text{ m}$ do ouvido. O valor de referência da pressão sonora para humanos é de $20 \mu\text{Pa}$, sensivelmente por ser o menor ruído que é possível ouvir [34].

2.2.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A intensidade de uma onda sonora é definida como a quantidade de energia transmitida por unidade de tempo, por 1 m^2 de área perpendicular à direção em que a onda sonora se propaga. É uma quantidade vetorial tendo como unidades watts por metro quadrado (W/m^2) [28]. Faz sentido falar então da intensidade sonora como um campo vetorial (Fig. 2.9) [27].

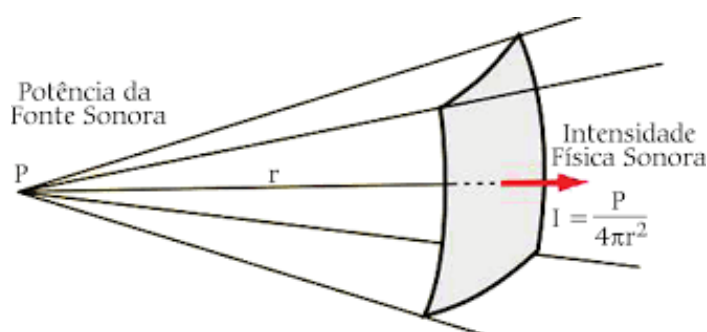


Fig. 2.9 – Representação da propagação da intensidade sonora a partir de uma fonte [28]

A potência sonora é a energia total que é emitida de uma fonte num segundo. Tem como unidade SI o watt (W) [27, 35]. É uma característica de uma fonte sonora e não depende da distância da fonte, da localização do microfone, nem do estímulo sonoro produzido pela mesma (como é o caso da pressão e da intensidade) [36].

A intensidade e a potência sonora podem ser relacionadas a partir da expressão 2.3:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.3)$$

Em que I corresponde à intensidade sonora (W/m^2), W é a potência sonora (W), r a distância à fonte (m), p é a pressão sonora (Pa), ρ a massa volúmica do ar ($\approx 1.2 \text{ kg/m}^3$) e c corresponde à celeridade (com ar seco, ao nível do mar e uma temperatura de 15°C tem o valor de 340 m/s).

2.2.4. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E NÍVEL SONORO

A intensidade de um som pode ser comparado à de outro com a mesma frequência a partir do uso de um rácio. Quando o rácio é de 10, a diferença de intensidade nos sons é de um bel, uma unidade nomeada em honra ao inventor norte-americano Alexander Graham Bell (Fig. 2.10) [36].

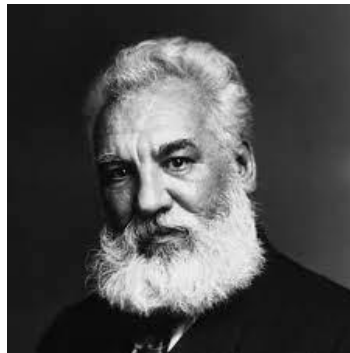


Fig. 2.10 – Alexander Graham Bell (1623-1662) [36]

A unidade geralmente utilizada é o decibel, que corresponde a 0,1 bel. Assim, o nível de intensidade sonora (L_I) pode ser descrito pela seguinte equação:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} (dB) \quad (2.4)$$

Em que $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Uma equação semelhante pode ser escrita para o nível de potência sonora (L_W):

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} (dB) \quad (2.5)$$

Em que $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

A pressão sonora também é dada normalmente em decibéis (dB) pelas seguintes razões: muitos dos sons que se ouvem diariamente têm muito baixas pressões (uma conversa normal tem como pressão sonora aproximadamente $0,01 \text{ Pa}$); e a gama de pressões normalmente vai desde μPa até aos kPa , o que é uma gama muito larga. Quando expressa em decibéis, é referida como nível de pressão sonora, apresentando a seguinte expressão:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} (dB) \quad (2.6)$$

Em que $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ (que corresponde aproximadamente ao limiar da audição).

2.3. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

2.3.1. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora (Fig. 2.11) refere-se ao processo pelo qual um material, estrutura ou objeto absorve energia sonora quando encontra ondas sonoras – em oposição a refletir a energia. Parte da energia é absorvida, parte é transformada em calor e a outra parte é transmitida para o meio [28].

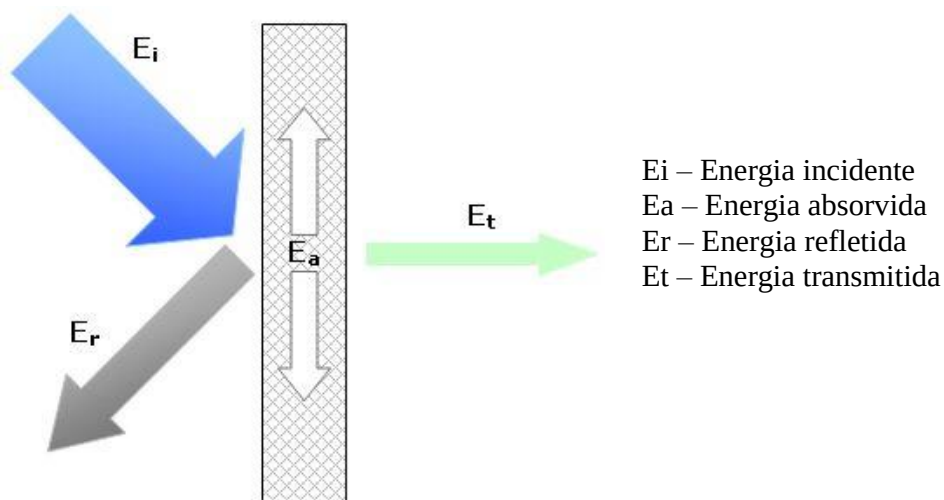


Fig. 2.11 – Mecanismo da absorção sonora [28]

A absorção que as ondas sonoras sofrem quando incidem sobre distintos materiais absorventes utilizados como revestimentos das superfícies, assim como a sua dependência em função da frequência, variam consideravelmente de um material para outro [37]. Para além da frequência, o ângulo de incidência também faz variar o valor do coeficiente de absorção sonora.

Todos os materiais absorvem mais ou menos energia sonora. O coeficiente de absorção sonora (α) especifica a relação entre a quantidade de energia absorvida e a energia incidente [29].

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.7)$$

O coeficiente de absorção sonora varia entre zero e um. O zero significa que o material é totalmente refletor; o 1 indica que a energia sonora é toda absorvida. Por exemplo, um coeficiente de 0.2 significa que 20% da energia sonora que entra em contacto através do material é absorvida e 80% da energia é refletida [45]. Os materiais absorventes, para serem eficientes, têm α superior a 0,5.

O coeficiente de absorção sonora pode ser obtido através de dois métodos normalizados (Fig. 2.12) [36]:

- Tubo de ondas estacionárias – trata-se de um longo tubo metálico onde numa extremidade se coloca a amostra e na outra existe um altifalante que cria ondas estacionárias, captadas pelo microfone ligado ao sistema. No entanto é um método limitado pois o α obtido resulta apenas de uma incidência perpendicular;
- Câmara reverberante – para além de permitir amostras de maiores dimensões, trata-se de uma sala em que as suas superfícies são todas refletoras, pelo que pode calcular-se valores de α para incidências com todos os ângulos, formando um campo difuso. São valores mais próximos dos reais.

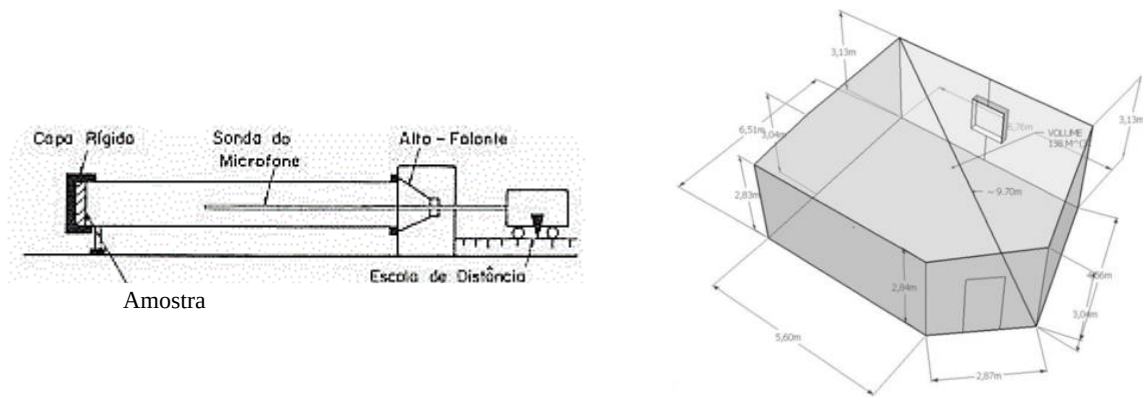


Fig. 2.12 – Esquema de um tubo de ondas estacionárias (esq.) e a geometria de uma câmara reverberante (dir.) (adaptado de [33])

Muitas vezes, em vez de fazer uso de todos os valores dos coeficientes de absorção por bandas de frequência, o grau de absorção sonora de um material é indicado por um único coeficiente, denominado NRC (*noise reduction coefficient*) [27]. Este parâmetro é definido como a média aritmética dos valores de α correspondentes às bandas de 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz:

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1.000} + \alpha_{2.000}}{4} \quad (2.8)$$

Quanto maior o NRC, melhor o material absorve o som, podendo variar entre 0 e 1. Normalmente utilizado nos EUA e no Canadá, o NRC possui algumas limitações entre as quais podem especificar-se [33]:

- A gama de frequências usada para obter o NRC abrange as frequências típicas do discurso humano, mas uma gama mais abrangente deve ser usada para aplicações como a música, já que as mais baixas e altas frequências não são consideradas;
- O NRC fornece uma indicação muito simplista das propriedades absorventes dos materiais, porque é simplesmente a média dos coeficientes de absorção nas diferentes frequências (dois materiais podem ter NRC semelhantes, mas não terem a mesma prestação em bandas individuais de frequências).

Na Europa, seguindo a norma EN ISO 11654 usa-se outro método para efetuar comparações simples e rápidas do desempenho da absorção sonora, denominado α_w (coeficiente de absorção sonora ponderado ou *weighted*). Este método converte uma ampla gama de frequências de valores de coeficientes de absorção sonora num único valor, usando para isso um processo de curva de ajuste. Apesar de ser mais complexo, α_w é considerado mais representativo de como o ouvido humano interpreta o som [33].

É traçada então uma curva usando as bandas de oitava de 250 até 4.000 Hz e determina-se as somas dos desvios positivos a curva de referência e os valores reais [27]. Esta é deslocada verticalmente em múltiplos de 0,05 até que a soma dos desvios seja no máximo 0,10 (Fig. 2.13). O α_w é lida na banda de 500 Hz. Desempenhos em que o coeficiente de absorção sonora ultrapasse em pelo menos 0,25 do valor de referência expressam-se pelas seguintes letras: L (250-500 Hz), M (1.000-2.000 Hz) ou H (4.000 Hz) [39].

O α_w também atribui seis classes de absorção sonora, identificadas sucessivamente de A a E e “não classificado”. Estas podem ser ordenadas de forma decrescente da seguinte forma: A ($\alpha_w \geq 0,90$); B ($0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$); C ($0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$); D ($0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$); E ($0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$); Não classificado ($\alpha_w \leq 0,10$) [36].

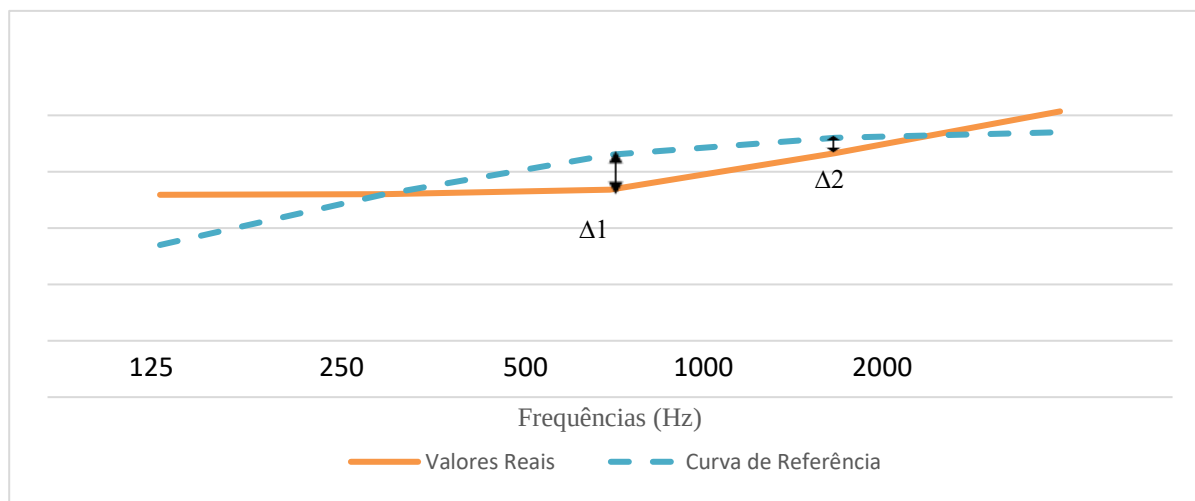


Fig. 2.13 – Gráfico exemplificativo para a obtenção de α_w com a representação de valores reais, a curva de referência e os diferentes desvios positivos ($\Delta 1$, $\Delta 2$). Se estes desvios ultrapassarem 0,10, move-se a curva de referência de forma iterativa até obter um resultado $\leq 0,10$ [Gráfico da autora].

2.3.2. REVERBERAÇÃO

A acústica tem sido importante na arquitetura dos edifícios, especialmente em teatros e salas de espetáculos pelo menos nos últimos 2500 anos. A acústica desenvolveu-se nos séculos XVIII e XIX, maioritariamente com conexão a instrumentos musicais [40]. No entanto, métodos de projeto para acústica de salas em edifícios tornou-se científica apenas no início do século XX. Em 1895, o físico Wallace Sabine (Fig. 2.14) salientou que a grandeza mais importante para a determinação da adequação acústica de uma sala para um uso particular é o seu tempo de reverberação, e forneceu uma base científica pela qual o tempo de reverberação pode ser determinado ou previsto [42].



Fig. 2.14 – Wallace Sabine (1868-1919) [42]

Quando uma fonte cria uma onda sonora num compartimento, o recetor é atingido não só pela onda sonora que se propaga diretamente a partir da fonte, mas também pelas múltiplas reflexões das paredes, piso e teto (Fig. 2.15), que se vão tornando cada vez mais fracas não só pelas consecutivas absorções em cada reflexão, mas também devido à absorção do ar [27, 44]. As ondas sonoras com origem refletida são muito mais complexas do que as ondas diretas porque as superfícies estão a diferentes distâncias da fonte e têm diferentes propriedades refletoras. Interiores que contêm muitas superfícies “duras” (vidro, mármore, metal) têm uma alta

refletividade, enquanto que materiais suaves ou porosos, como alcatifas ou cortinas, “amortecem” o som [42].

O Tempo de Reverberação é definido como o intervalo de tempo (em segundos) que qualquer som demora a extinguir-se por completo, após múltiplas reflexões. Por definição, é o tempo em que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB desde que a fonte sonora para de emitir [27]. Há uma explicação para o uso de 60 dB visto que o crescendo mais intenso da música orquestral é cerca de 100 dB e o ruído de fundo numa sala típica é cerca de 40 dB. Assim, é medido o tempo necessário para que o ruído mais intenso numa sala de concertos desvaneça até ao ruído de fundo [43].

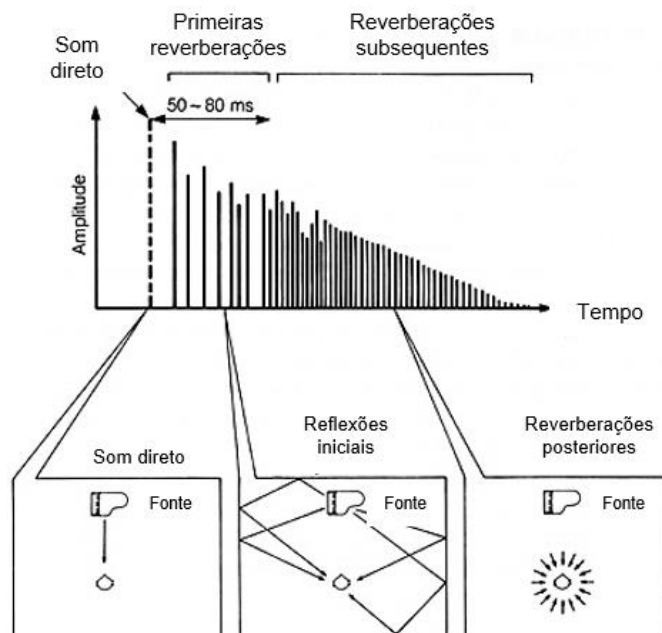


Fig. 2.15 – Representação de Tempo de Reverberação, assim como das ondas sonoras de origem direta e refletida (adaptado de [43])

Em geral, o Tempo de Reverberação varia com a frequência, tendendo a diminuir à medida que esta aumenta. Isto deve-se, em parte, às características de absorção dos materiais normalmente usados como revestimentos em relação às diferentes frequências, assim como a absorção do ar, que se manifesta especialmente em grandes salas e em altas frequências [38].

Sabine reconheceu que o tempo de reverberação de um compartimento está relacionado com o volume do mesmo e a capacidade de absorção sonora das paredes, teto, piso e conteúdo do compartimento [41]. Assim, Sabine relacionou estes parâmetros para o cálculo do Tempo de Reverberação, denominada hoje como Fórmula de Sabine:

$$T = \frac{0,16 * V}{A} \quad (2.9)$$

Em que T corresponde ao tempo de reverberação (s), V é o volume do compartimento (m^3) e A trata-se da absorção sonora equivalente (m^2), que pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$A = \sum \alpha_i . S_i \quad (2.10)$$

Que relaciona a superfície real do material S (m^2) com o respetivo coeficiente de absorção sonora do material α , efetuando-se o somatório de todas as superfícies do compartimento.

No entanto, a Fórmula de Sabine apresenta três limitações [43]:

- Apenas é válida para locais com campos sonoros difusos;
- A absorção sonora total num compartimento seria fácil de encontrar se todas as superfícies fossem uniformemente absorventes, mas isto raramente ocorre (paredes, piso e teto podem estar revestidos por materiais diferentes e tem de se ter em consideração que existem portas e janelas);
- Para obter valores próximos da realidade, o coeficiente de absorção sonora médio tem de ser inferior a 0,20.

Assim, é possível formular em termos genéricos a fórmula de Sabine para se adaptar a todo o tipo de problemas, como é demonstrado na expressão seguinte:

$$T = \frac{0.16 \cdot V}{\sum \alpha_i \cdot S_i + \sum A_j + mV} \quad (2.11)$$

Em que A_j correspondem às absorções sonoras localizadas (como móveis ou pessoas) e m a absorção sonora do ar em função da humidade relativa, utilizando-se usualmente o valor *default* de 60%.

2.3.3. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.3.3.1. INTRODUÇÃO

A comunicação constitui a forma principal de uma pessoa exprimir as suas ideias, conhecimento e emoções e é essencial para o desenvolvimento de relações humanas e na compreensão dos outros. O que uma pessoa comunica deve ser claramente entendido, senão todo o propósito da passagem de informação fica perdido.

A inteligibilidade da palavra foi um conceito criado no início de 1920, devido à telefonia da época, de forma a estabelecer uma meta para uma superior qualidade das chamadas. O primeiro modelo criado, chamado “Índice de Articulação” foi criado por investigadores americanos que tentavam melhorar a rede de telefones existente [45], tendo sido o ponto de partida para a criação de novos modelos utilizados atualmente.

Em acústica, a inteligibilidade da palavra indica quão perceptível é a comunicação num espaço. O tempo de reverberação tem um papel muito importante na inteligibilidade das palavras num recinto [54]. Como já foi observado anteriormente, o tempo de reverberação está relacionado com as condições geométricas e com as características de absorção do espaço [27]

O que distingue os diferentes idiomas entre si é a sua estrutura sonora. A língua portuguesa apresenta mais consoantes que vogais, mas são as vogais que são mais dominantes na constituição silábica, possuindo uma maior intensidade e uma maior duração do que as consoantes (Quadro 2.1) [44]. Este fator é muito importante, pois tendo as consoantes uma duração cerca de 4,5 vezes mais curta que as vogais e uma baixa intensidade, facilmente serão dominadas pela sonoridade das vogais que as antecedem se a sala apresentar uma elevada reverberação.

Por isso, quanto maior o tempo de reverberação, menor a inteligibilidade da palavra.

TIPO	FREQUÊNCIA	INTENSIDADE	DURAÇÃO	DIRECCIONALIDADE
Vogais	Baixas (150-300 Hz)	Elevado	≈ 90 ms	-5 dB p/ -180°
Consoantes	Altas (3.500-7.000Hz)	Baixo	≈ 20 ms	-20 dB p/ -180°

Quadro 2.1 – Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes (adaptado de [27])

Ainda é de referir, a partir dos dados do Quadro 2.1, as diferenças de direccionalidade apresentadas para as vogais e para as consoantes. A direccionalidade tem a ver com a forma como as sondas sonoras são emitidas. A voz humana emite preferencialmente para a frente [44], tendo em conta a localização da boca. Tal é facilmente compreendido nas diferenças que existem se duas pessoas estiverem a falar voltadas uma para a outra ou de costas uma para a outra. De costas voltadas, a perda de informação é muito maior, principalmente nas altas frequências, como se pode observar na Fig. 2.16:

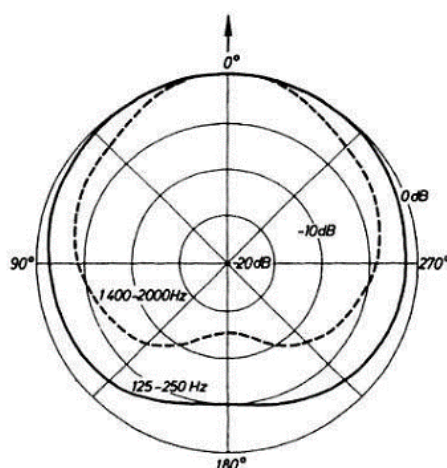


Fig. 2.16 – Emissão da palavra no plano horizontal (adaptado de [44])

Existem vários parâmetros para avaliar a inteligibilidade da palavra, divididos em dois grandes grupos: Subjetivos e Objectivos. Os testes Subjetivos baseiam-se na realização de leituras de frases ou palavras, com nível crescente de dificuldade, para um grupo de auditores que devem identificar corretamente aquilo que ouvem. O grau de acerto é proporcional à inteligibilidade do local. Os testes Objectivos não necessitam da intervenção humana subjetiva, pois são realizados por aparelhos na determinação dos parâmetros, pelo que a probabilidade de erro é menor [34, 45].

Os principais testes objectivos são:

- AI – *Articulation Index* (Índice de Articulação);
- SIL (Nível de Interferência na Conversação);
- AC (*Articulation Class*);
- STI e RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

2.3.3.2. AI – Articulation Index (ÍNDICE DE ARTICULAÇÃO)

O trabalho original do Índice de Articulação data aos anos entre 1930 e 1940, em que o engenheiro acústico H. Fletcher *et al.* publicaram os seus estudos sobre a inteligibilidade da palavra. Mais tarde, este foi oficialmente adicionado como um parâmetro de medida pela ANSI (*American National Standards Institute*) [47].

É um parâmetro de medida que foi desenvolvido para indicar quanto os níveis de ruído de fundo podem interferir na inteligibilidade da palavra. Tem um valor que varia entre 0% (nenhuma palavra entendida) até 100% (todo o discurso entendido) [48]. É obtido pela diferença entre o nível de conversação de referência e o ruído de fundo pesado de acordo com cada uma das bandas de frequências. Obtendo o somatório, divide-se por 10.000 e obtém-se o valor de AI [27].

2.3.3.3. SIL (NÍVEL DE INTERFERÊNCIA NA CONVERSAÇÃO)

Este parâmetro surgiu a partir de estudos na eficiência de comunicação nos aviões durante os voos, em que se verificou que o número de palavras ouvidas estava altamente correlacionado com a média dos ruídos de fundo em três bandas de frequências: 600-1.200, 1.200-2.400 e 2.400-4.800 Hz. Em 1967, a *Acoustical Society of America* padronizou as bandas de oitava para análise do ruído [48]. O SIL é o sucessor do Índice de Articulação, fornecendo um método para calcular a inteligibilidade da palavra usando os níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo nas bandas de oitava dos 500, 1.000 e 2.000 Hz [27].

$$SIL (dB) = \frac{RF\ 500\ Hz + RF\ 1kHz + RF\ 2kHz}{3} \quad (2.12)$$

2.3.3.4. AC (ARTICULATION CLASS)

O AC é um sistema de classificação de número único (como o AI) que verifica a capacidade de materiais acústicos na atenuação de ruído de fundo, que podem levar a distrações em cubículos adjacentes em escritórios *open space* [56]. Mede a eficácia da atenuação fornecida pelos tetos, paredes e móveis de escritório [49]. A análise é efetuada por bandas de 1/3 de oitava, dos 200 Hz até aos 5.000 Hz [27].

2.3.3.5. STI E RASTI

O STI foi desenvolvido em 1970 e desde aí tem sofrido várias atualizações, tal como o RASTI. Na prática, o cálculo do STI pode ser muito demorado, requer medições especializadas e equipamento de processamento, pois calcula 98 valores de índice de modelação. Níveis altos de STI representam níveis elevados da inteligibilidade da palavra, pelo que quando é necessário privacidade, é necessário obter baixos níveis de STI.

O RASTI simplifica o processo, utilizando apenas 5 valores em vez dos anteriores 98 usados no STI. Para isso utiliza um equipamento constituído por um transmissor e um recetor. O transmissor gera um ruído de referência para as bandas de frequência de 500 e 2.000 Hz, emitindo-o com frequências modeladas para cada uma das bandas (quatro para a banda de 500 Hz e cinco para a banda de 2.000 Hz) para reproduzir o efeito do ouvido humano, obtendo-se assim os 9 índices. O recetor mede a onda sonora recebida. Tanto o STI como o RASTI variam entre zero (nula inteligibilidade) e 1 (ótima inteligibilidade) [27, 45, 50].

2.3.4. ISOLAMENTO SONORO E CORREÇÃO ACÚSTICA

2.3.4.1. ISOLAMENTO SONORO

Considerando que desde 1800, a população mundial aumentou de mil milhões para 7,8 mil milhões de pessoas, cada vez mais começou a ser sentida uma necessidade de construir edifícios que crescessem em altura. Isto levou a que as grandes cidades comessem logo a sentir os efeitos da concentração de um maior número de pessoas no mesmo espaço existente. Os processos de construção passaram a usar novas técnicas e novos materiais, como as estruturas metálicas leves e as cortinas de vidro, o que levou a uma modernização do mundo como se conhece atualmente, mas também houve um aumento do número de erros construtivos.

Para além deste fator, começou-se a ter em conta os ruídos provenientes do tráfego aéreo, rodoviário e ferroviário, áreas que também sofreram bastantes mudanças, e também os próprios ruídos criados dentro dos edifícios, quer pelo funcionamento de equipamentos como elevadores, quer pelo uso normal dos espaços pelas pessoas que os habitam.

Existem dois grandes tipos de ruído (Fig. 2.17) pela forma como se propagam no meio: ruídos aéreos e os ruídos de percussão. Os ruídos aéreos apresentam menos expressividade em comparação com os ruídos de percussão, fazendo-se sentir apenas nos compartimentos contíguos à fonte sonora, enquanto que os ruídos de percussão têm influência em todo o edifício devido à transmissão do ruído pelos diversos elementos construtivos [52].

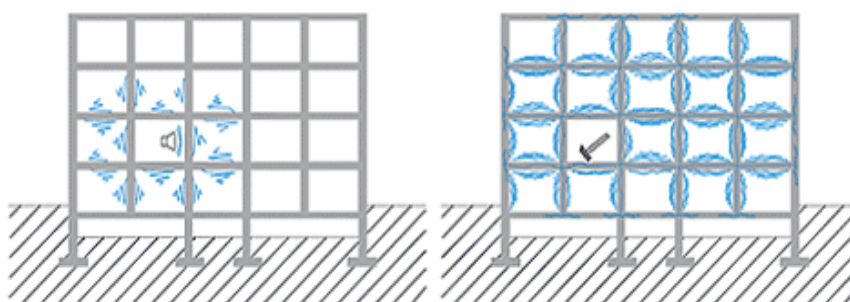


Fig. 2.17 – Transmissão de ruídos aéreos (esq.) e ruídos de percussão (dir.) [52]

Nos ruídos aéreos, a transmissão é feita unicamente por vibração do ar sem contacto direto do estímulo original com a estrutura. A transmissão sonora, por via aérea, é um fenómeno complexo que envolve, geralmente, transmissões diretas (quando existe um elemento de separação comum aos dois recintos) e transmissões indiretas ou secundárias (através dos elementos adjacentes) (Fig. 2.18) [53]. São exemplos o ruído de vozes, de equipamentos ou o tráfego rodoviário.

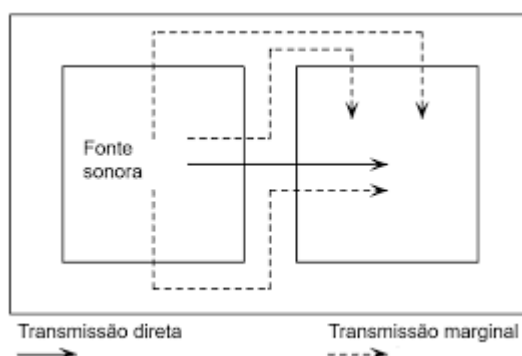


Fig. 2.18 – Transmissões Diretas e Transmissões Marginais nos Ruídos Aéreos [53]

Nos ruídos de percussão, há solicitação mecânica direta da fonte de irradiação sobre os elementos de construção, podendo o ruído ter origem em fontes estáticas ou fontes de impacto. São exemplos de fontes estáticas os sistemas de ar condicionado ou máquinas de lavar e de fontes de impacto o ruído de passos, portas a bater ou arrastar móveis [27, 52].

Enquanto que nos ruídos aéreos para aumentar o isolamento sonoro atua-se ao nível da massa e/ou duplicação física do material, nos ruídos de percussão o mais eficaz é atuar sobre os revestimentos das superfícies ou desligando os elementos, de forma a criar descontinuidades e reduzir a capacidade de propagação do estímulo [27].

2.3.4.2. CORREÇÃO ACÚSTICA

Ao contrário do isolamento sonoro, a correção acústica não tem como objetivo o controlo de ruídos aéreos ou de percussão entre espaços contíguos, mas sim garantir que a qualidade acústica de um espaço é adequada para a finalidade pretendida. A correção acústica permite resolver problemas a nível das divisões de um edifício permitindo obter um ambiente sonoro agradável, ajustando a duração da reverberação do espaço, e reduzindo o ruído de fundo criado por diversas fontes [53].

Para atingir a acústica desejada no compartimento, existem diversos tipos de materiais e sistemas absorventes sonoros que atuam na correção acústica do espaço e podem dividir-se em três grupos (Fig. 2.19) de acordo com a gama de frequências que atuam [27]:

- Porosos e fibrosos – altas frequências;
- Ressonadores – médias frequências;
- Membranas – baixas frequências.

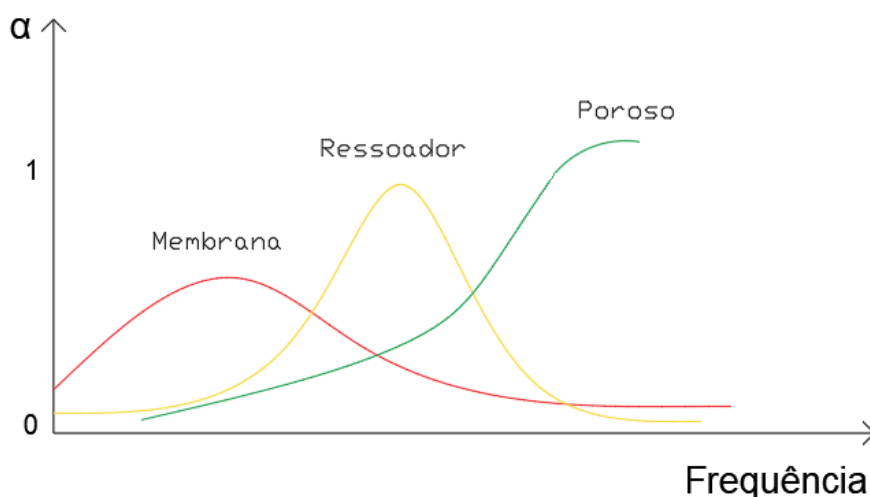


Fig. 2.19 – Comportamento dos três grupos de materiais em função da frequência

Materiais porosos e fibrosos

Os materiais porosos ou fibrosos são aqueles em que a parte sólida que os constitui ocupa apenas uma parte do seu volume, sendo a restante parte ocupada por poros ou interstícios, que são responsáveis pelo mecanismo de absorção sonora destes materiais [27, 53].

Se uma superfície não apresentar poros, a energia incidente será refletida novamente para o ambiente; mas se a superfície for altamente porosa, uma parte substancial da onda sonora atravessa o material e a partir de um grande número de reflexões internas, pode transferir parte da sua energia a partir de fricções entre as fibras e absorver o som [54]. Esta dispersão é essencial para o desempenho de materiais acústicos absorventes, tais como [27]:

- Tecidos e alcatifas;
- Massas porosas (para projeção);
- Aglomerados de fibras de madeira;
- Fibras minerais (mantas e painéis);
- Materiais plásticos (poliestireno expandido, poliuretano expandido, espumas flexíveis de poliuretano);
- Aglomerados de cortiça (aglomerado negro, aglomerado composto).

Para atingir um grande número de interações dentro do material poroso, é necessário que a onda sonora penetre de forma profunda no material para que esta não seja imediatamente refletida para o meio. À medida que o tamanho dos poros diminuem, menos energia é transferida e mais é refletida da superfície, tornando o material menos útil como um absorvedor, como se pode ver na Fig. 2.20 [54]. Assim, a eficácia deste tipo de materiais está dependente da sua densidade e espessura.

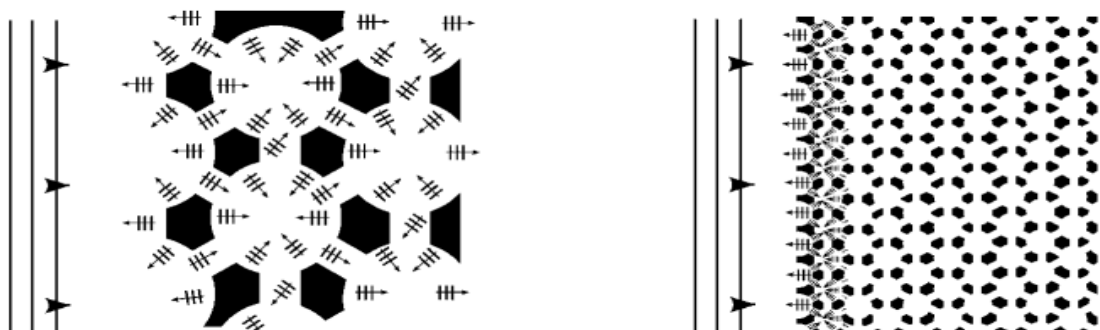


Fig. 2.20 – Decréscimo das transferências de energia no movimento das fibras, comparando a existência de poros maiores (esq.) e menores (dir.) [33]

Ressoadores

Existem dois tipos de ressoadores: ressoadores isolados ou agrupados. Os ressoadores isolados (ou ressoadores de Helmholtz) são os mais eficazes na gama das médias frequências e baseiam-se na propriedade de dissipar energia em torno de uma frequência de ressonância [55], que é função das características geométricas do sistema:

$$f = \frac{c}{2\pi} * \sqrt{\frac{S}{V(1 + 1,6r)}} \quad (2.13)$$

Em que c corresponde à celeridade, S é a área do gargalo, V é o volume do ressoador e r o raio de cada perfuração.

O ressoador de Helmholtz é composto por uma cavidade de paredes rígidas, com uma única abertura estreita, em que o ar no gargalo é colocado em vibração [27]. Quando o ar interior desses ressoadores entra em vibração para certa frequência de ressonância, pode dissipar a energia sonora transformando-a em energia mecânica, sob forma de atrito e funcionando, então, como absorvedor de som [55]. Resumidamente, é um sistema vibratório do tipo massa/mola, em que o ar no gargalo é a massa e o ar na cavidade funciona como a mola [55].

Os ressoadores agrupados (Fig. 2.21) surgem frequentemente na forma de painéis perfurados, em que a diferentes raios de perfuração correspondem diferentes frequências de ressonância. O aumento da taxa de furação faz aumentar a eficácia, atingindo o máximo aos 25% [27].



Fig. 2.21 – Ressorador agrupado como painel perfurado [55]

Apresentam o mesmo tipo de funcionamento que os ressoadores isolados, mas têm uma expressão de cálculo diferente para frequência correspondente à eficácia máxima:

$$f = \frac{10 \cdot c}{2\pi} * \sqrt{\frac{P}{(e + 1,6r)d}} \quad (2.14)$$

Em que c é a celeridade, P a percentagem da área perfurada (%), e a espessura da placa perfurada (cm), r o raio de cada perfuração (cm) e d a largura da caixa de ar (cm).

Membranas

As membranas (Fig. 2.22) ou painéis ressonantes são muito eficazes para atenuação nas baixas frequências, quando a distância ao elemento rígido a que deveriam ser colocados os sistemas porosos começa a ser demasiado elevada. Estes sistemas absorvem as ondas sonoras pela vibração de toda a sua estrutura, constituída por grandes painéis de pequena espessura e através de perdas de calor por fricção nas suas fibras quando o material entra em flexão [27].



Fig. 2.22 – Membrana Acústica [55]

3

ESTADO DA ARTE

3.1. ARQUITETURA AO LONGO DOS SÉCULOS

A arquitetura existe há quase tanto tempo quanto a história do ser humano, já que o tipo de arquitetura era justificada pelos aspetos sociais e funcionais que os espaços serviam à população. A arquitetura desempenha um papel importante no tipo de acústica que o espaço vai ter, pelo que é essencial entender como é que esta se foi desenvolvendo ao longo dos séculos.

Existem principalmente dez estilos arquitetónicos que foram amplamente aplicados em estruturas em todo o mundo [62]:

- Arquitetura Clássica (século VII a IV BC) – refere-se ao estilo predominantemente usado na Grécia e Roma antiga (Fig. 3.1), em que grandes obras foram construídas com o uso de materiais como mármore e betão e detalhes interiores como frontões quebrados e ornamentação. Caracterizado pela simetria, ordem e proporção;

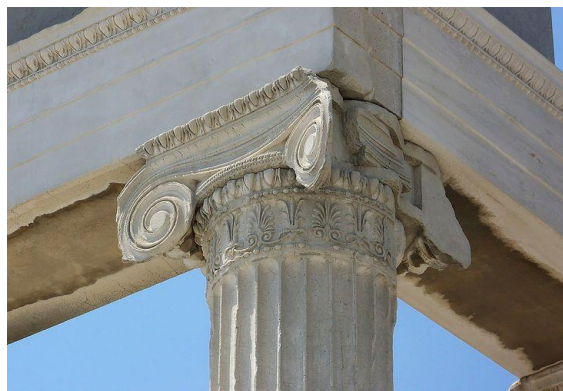


Fig. 3.1 – Pártenon, Atenas (esq.) e pormenor de ornamentação numa coluna (dir.) [62]

- Arquitetura Românica (1050-1170) – caracterizada por paredes grossas e pesadas, janelas estreitas, vitrais, arcos semicirculares e torres, tipicamente encontrada em obras da época Medieval, como a Catedral de Santiago de Compostela em Espanha ou a Basílica de St. Sernin em França (Fig. 3.2);



Fig. 3.2 – Catedral de Santiago de Compostela, Espanha (esq.) e interior da Basílica de St. Sernin, França (dir.) [62]

- Arquitetura Gótica (1100-1450) – influenciado pela arquitetura românica, distingue-se pelo uso de arcobotantes, paredes mais finas e leves, torres pontiagudas e grandes vitrais (Fig. 3.3), levando a uma maior graciosidade na arquitetura;



Fig. 3.3 – Catedral de Notre Dame, Paris (esq.) e o seu interior (dir.) [62]

- Arquitetura do Renascimento (1400-1600) – inspirada nos ideais gregos e romanos, o estilo é caracterizado pela perfeição, simetria, geometria, proporção e o uso de arcos, abóbadas, cúpulas e colunas. O arquiteto que ficou conhecido por ser o pai da Renascença foi Filippo Brunelleschi, responsável pela Catedral de Florença (Fig. 3.4);



Fig. 3.4 – Catedral de Florença, Itália [62]

- Arquitetura Barroca (1600-1755) – tem uma abordagem mais dramática à Arquitetura do Renascimento, apresentando formas irregulares, ornamentação exagerada, pinturas opulentas e contrastes arrojados (Fig. 3.5);



Fig. 3.5 – Palácio Nacional de Mafra no exterior (esq.) e interior (dir.), Portugal [62]

- Arquitetura Neoclássica (1750-1920) – trata-se da redescoberta da Arquitetura Clássica Grega e Romana que floresceu nos séculos XVIII e XIX. Tem linhas elegantes, uma aparência simétrica e proporcional, frontões triangulares, cúpulas e uso de materiais nobres como mármore, granito e pedra (Fig. 3.6);



Fig. 3.6 – Panteão de Paris, França [62]

- Estilo Art-Déco – surgiu em 1920 e representa o progresso social e tecnológico combinado com materiais luxuosos, padrões, materiais opulentos, vidro decorativo, aço, alumínio e cerâmica (Fig. 3.7);



Fig. 3.7 – *Empire State Building*, Nova Iorque (esq.) e interior do Teatro dos Campos Elísios, Paris (dir.) [62]

- Modernismo (1917-1965) – incorpora diferentes estilos que acentuam a funcionalidade, arquitetura “limpa”, sem ornamentações e uso de materiais como aço, vidro e betão (Fig. 3.8);



Fig. 3.8 – *Fallingwater* em Pensilvânia, EUA (esq.) e *Crown Hall* em Chicago, EUA (dir.) [62]

- Pós-Modernismo (1950-2007) – foi uma reação contra a abordagem do modernismo, usando ornamentação artística, assimetria, humor, criatividade, complexidade e elementos decorativos (Fig. 3.9);



Fig. 3.9 – Museu Guggenheim, Bilbao (esq.) e interior do *Thompson Center*, Chicago, EUA (dir.) [62]

- Parametricismo – é a “última” inovação em arquitetura, desenvolvida usando equações logarítmicas para criar todos os possíveis modelos com a ajuda de ferramentas modernas como o CAD e o BIM.



Fig. 3.10 – Guangzhou Opera House (esq.) e Galaxy SOHO, China (dir.) [62]

3.2. ACÚSTICA E ARQUITETURA

3.2.1. SONS DA PRÉ-HISTÓRIA

Vários estudos têm vindo a demonstrar que o pensamento ocorre ao mesmo ritmo que o reconhecimento visual, exigindo apenas uma fração de segundo. A reação a um som novo ou repentino ocorre pelo menos dez vezes mais depressa. Isto é resultado de uma relação evolucionária fundamental que o ser humano tem com o som, que é muitas vezes esquecida ou tomada como garantida. A audição é um dos cinco sentidos primários que trabalham em três dimensões. Tem sido a chave para a sobrevivência humana como espécie, pois sempre foi o primeiro sentido a alertar para o perigo, sendo possível determinar quão longe está o som, em que direção está e se é provável que cause dano [57].

Nos último 20 anos, investigadores descobriram em locais pré-históricos fenómenos acústicos notáveis. O Stonehenge (Fig. 3.11), o local neolítico em Wiltshire, no Reino Unido, tem sido sujeito a crescentes estudos acústicos, já que as suas pedras mais pequenas (também designadas como *bluestones*) “cantam” quando se dá pancadas [57]. Estas são também altamente reverberantes quando outros sons ocorrem no interior do círculo, tal como sons de instrumentos musicais.



Fig. 3.11 – Stonehenge (Reino Unido) [57]

Também o Templo Maia de Kukulkan (ou El Castillo) no México (Fig. 3.12), apresenta um fenómeno acústico bem conhecido. Quando alguém bate palmas perpendicularmente às escadas, o som de uma “serpente” pode ser ouvido a subir as mesmas, seguido do chilrear de um pássaro que parece emanar de uma sala pequena no topo da pirâmide. O chilrear do pássaro é, na realidade, um som que resulta das reflexões sonoras das escadas.



Fig. 3.12 – Templo Maia de Kukulkan (México) [57]

Este som é bastante representativo do pássaro Quetzal, estando as suas penas representadas na divindade de Kukulkan. Dada a experiência e a prolífica construção que os Maias desenvolveram na altura, é de notar que provavelmente um grande processo refletivo à atenção e ao detalhe foi considerado, resultando um som muito importante na arquitetura do templo [57].

Outro exemplo encontra-se na civilização grega, o berço da representação teatral, tendo sido compostas peças de música, dança e drama com o objetivo de prestar tributo a Dionísio, deus do teatro. Estas peças eram transmitidas em teatros com estruturas a céu aberto [59], como é o caso do Teatro de Epidauro (Fig. 3.13), conhecido mundialmente pela sua acústica excecional. A sua localização, aninhado nas colinas e voltado de costas para a cidade, é muito eficiente para limitar a quantidade de ruído que poderia penetrar no espaço e as árvores à volta do teatro criam um ruído de fundo agradável. Os degraus de pedra em curva ajudam a propagar o som no teatro e ampliam o som vindo dos artistas, usando a forma côncava para otimizar e influenciar positivamente a acústica do espaço [57].



Fig. 3.13 – Teatro de Epidauro (Grécia) [59]

3.2.2. DESENVOLVIMENTO DA ACÚSTICA

Os primeiros teatros cobertos desenvolveram-se a partir dos antigos teatros a céu aberto, apresentando aberturas estratégicas nas laterais e paredes traseiras, como é o caso do Odeão de Agripa (Fig.3.14), que era uma sala de concertos e conferências coberta situado no centro da ágora de Atenas [57, 58].

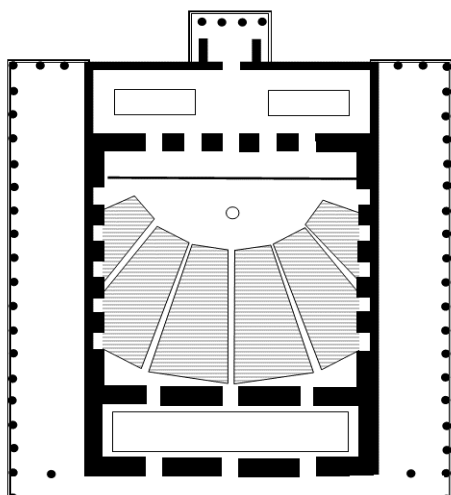


Fig. 3.14 – Planta do Odeão de Agripa, Atenas (esq.) e monumento atualmente (dir.) [57]

Mais tarde, os Romanos desenvolveram técnicas de arquitetura e engenharia acusticamente bem sucedidas e em estruturas cada vez mais arrojadas, em que cúpulas, arcos e outras superfícies curvas foram desenvolvidas para criar novas experiências acústicas [57]. É impossível mencionar a acústica de teatros antigos sem mencionar o arquiteto romano Vitruvius, que deu origem à ideia de que os edifícios deviam ter três atributos: *firmitas* (solidez), *utilitas* (utilidade) e *venustas* (beleza), tendo sido amplamente utilizados na arquitetura romana. Para além destes princípios, Vitruvius introduziu o uso de vasos em nichos entre os assentos do teatro, atuando como ressoadores utilizados atualmente para a absorção sonora, bem especificado na sua obra *De Architectura* (Fig. 3.15) [59]. Estes foram os primeiros registos escritos que é possível verificar o entendimento da acústica de acordo com a geometria dos espaços.

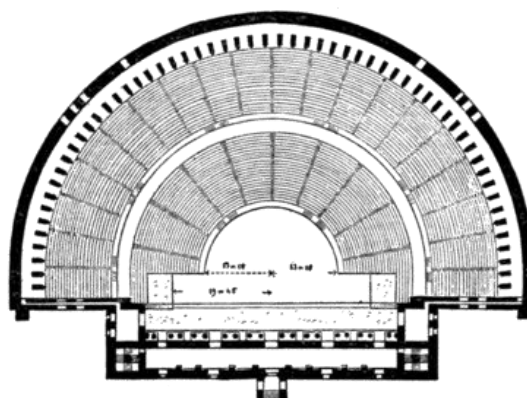
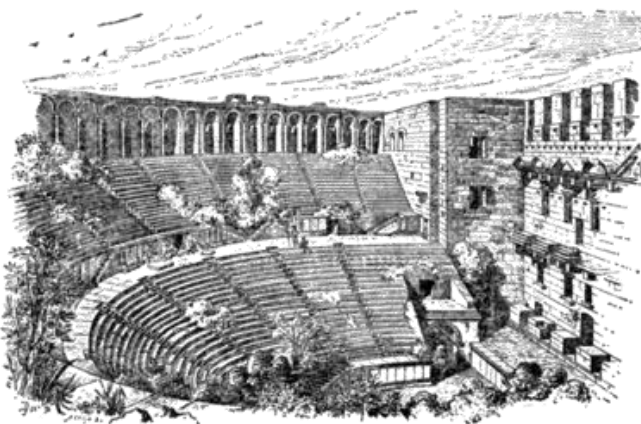


Fig. 3.15 – Teatro de Aspendo, Turquia representado em *De Architectura* (atualmente é o teatro mais bem preservado da antiguidade) [59]

As mesmas abordagens desenvolvidas pelos Romanos foram utilizadas posteriormente para criar experiências imersivas em espaços religiosos, como igrejas, em que as novas complexidades da arquitetura e engenharia permitiam adaptar os espaços também para a melhoria da palavra e da música [57]. O facto de o principal material usado nas igrejas e catedrais ser a pedra permite a existência uma longa reverberação que dá uma profundidade rica ao som dos instrumentos. As colunas também auxiliam o transporte do som pelo ar, ressaltando graciosamente de umas superfícies para outras e permitindo que a audiência ouça o mesmo som numa só vez [60].

No Renascimento, as formas de edifícios mais grandiosas eram aqueles utilizados tipicamente para composições musicais desenvolvidas simbioticamente com a arquitetura e a engenharia. Compositores como Haydn, Mozart, Beethoven ou depois Tchaikovsky criavam peças especificamente para os espaços onde estas iam ser tocadas, fossem catedrais, salões, salas de espetáculos ou os diferentes palácios da Europa [57].

O século XIX foi bastante importante para a acústica, contando com o trabalho de vários cientistas como Alexander Graham Bell e Thomas Edison (referidos no capítulo 2); Tyndall, responsável por estudos da propagação sonora na água; Helmholtz, que demonstra como o ouvido é capaz de separar os vários componentes de um som complexo; e Rayleigh, um gigante da acústica, descrevendo no seu livro “*Theory of Sound*” a teoria das vibrações e a propagação de ondas sonoras em fluídos [61]. No decurso da Revolução Industrial, eram necessárias estruturas de dimensões monumentais para fábricas e linhas de produção, assim como estações que pudessem acomodar as diferentes locomotivas, o ruído, o calor e o vapor associados [57], havendo então também a necessidade de tornar estes espaços menos ruidosos. Como sociedade, o ser humano foi desenvolvendo afeto emocional e histórico por muitos destes espaços, convertendo muitos deles em museus.

3.2.3. MUSEUS: ESTADO DA ARTE

Os museus são habitualmente edifícios de grande valor histórico, arquitetónico e educacional. Apesar de já existirem numerosos exemplos da utilização de soluções acústicas noutras áreas, em museus ainda se trata de uma prática relativamente recente. Isto, ao contrário das salas de espetáculos ou auditórios, onde encontrar soluções que melhorassem a qualidade da música, a inteligibilidade da palavra ou o conforto acústico era uma prioridade.

Uma das explicações para este desinteresse relaciona-se com o aparecimento de problemas acústicos, que apenas se torna mais aparente numa fase mais tardia do processo de conceção. Frequentemente dá-se ênfase às características visuais do museu e apenas quando o museu abre é que os problemas se tornam aparentes [78]. Existem bastantes museus novos e antigos que sofrem com sistemas demasiado ruidosos e mistura significativa de sons de múltiplas fontes sonoras.

Peter D’Antonio é pioneiro na indústria da difusão sonora e desenvolveu significativamente o número de superfícies absorvedoras e difusoras usadas atualmente. Em 2003, com a apresentação no *Journal of the Acoustical Society of America* do artigo intitulado “*Shape Optimization: Good looks and acoustics too!*”, Peter referia os desafios da acústica na arquitetura dos museus e outros espaços públicos, mencionando que as superfícies acústicas muitas vezes satisfaziam a acústica do espaço, mas não a estética do mesmo. O uso de programas de otimização podem auxiliar na introdução de materiais acústicos no museu e, ao mesmo tempo, satisfazer o arquitetura e a estética do espaço [76].

Também em 2003, refere numa outra publicação do *Journal of the Acoustical Society of America*, intitulada “A new seamless, smooth, interior, absorptive finishing system”, o uso de novos materiais (como betão e gesso) em edifícios governamentais e em como muitas delas a inteligibilidade da palavra ou a qualidade sonora tinha ficado comprometida [77].

Na *145th Meeting: Acoustical Society of America* (2003), Steve Haas apresentou uma sessão sobre o mais recente museu de música aberto nos Estados Unidos, o *Country Music Hall of Fame and Museum* em Nashville (Fig. 3.16), em que foram utilizadas abordagens únicas e a mais recente tecnologia acústica para fornecer alta qualidade sonora, assim como alto controlo sonoro [75]. Este museu é um dos exemplos dos vários usos que estes espaços podem ter atualmente. Em museus com multimédia é necessário criar um equilíbrio acústico nas várias salas integrantes, pois esse tipo de exibição requer que a qualidade sonora seja elevada.



Fig. 3.16 – Country Music Hall of Fame and Museum, Nashville, EUA [75]

A nível nacional é possível verificar a existência de algumas teses focadas no tema da acústica de museus, tendo como exemplos os estudos efetuados no Museu de Serralves e o Museu Nacional de Soares dos Reis, focando-se em importantes parâmetros acústicos, como o RASTI, Tempo de Reverberação e o *Articulation Index* (AI) [46, 78].

A nível internacional, encontram-se de igual forma alguns exemplos. É de destacar a tese de mestrado de Cemre Orhan [79], na área da Arquitetura e Design de Interiores da Universidade de Ancara, em que o tema se refere a um estudo comparativo da sonoridade interior de museus na zona histórica de Ancara. Foram efetuadas medições do STI, T30 e Laeq; e a tese de mestrado de Guðrún Jónsdóttir [80], que efetuou ensaios em três museus diferentes na Dinamarca (Galeria Nacional da Dinamarca (Fig. 3.17), Museu Arken, Museu Aros, sendo este último o mais recente, e o Museu Nacional da Islândia, como projeto colaborativo).



Fig. 3.17 – Galeria Nacional da Dinamarca [80]

Também diversos congressos de acústica têm sido realizados ao longo dos anos. Salienta-se o 23º Congresso Internacional de Acústica (2019), em que se discutiu uma análise das características acústicas no Museu de Arte de São Paulo, tais como o tempo de reverberação, a clareza e a definição. No *International Symposium on Room Acoustics* (2019) foram apresentados estudos acústicos do museu Pinacoteca de São Paulo (um museu neoclássico), que apresenta materiais de revestimento extremamente refletivos [81].

De acordo com Francesco Tingting e Jian Kang, após uma pesquisa realizada no Scopus, foi possível verificar a existência de mais estudos efetuados em museus (Quadro 3.1), assim como os ensaios e métodos que foram realizados em cada um deles [82]. Destes estudos, nem todos serão utilizados como comparação com o Museu Municipal Abade Pedrosa, já que, os ensaios realizados diferem e o termo de comparação entre eles estaria limitado à similaridade dos ensaios, não sendo possível obter bons resultados comparativos entre eles.

Vários museus têm vindo a ser corrigidos acusticamente, como é o caso do Museu do Louvre ou a Museu Metropolitano de Arte em Nova Iorque. O *Danish Music Museum* na Dinamarca é considerado um dos melhores espaços acústicos que existem atualmente [72].

Quadro 3.1 – Lista de estudos realizados em museus de acordo com a ordem cronológica de publicação [82]

Autores	Edifício(s)	Usos	Medições efetuadas
Orhan e Yilmazer	Museu Rahmi M. Koç (Istambul); Museu Erimtan de Arqueologia e Artes (Ankara)	Museu/Espaço de Exibições	LAeq-20min, LAmin, LAmax
Sü Gül	Hagia Sophia (Istambul)	Catedral/Museu/Espaço de Exibições	SPL, T30
D’Orazio <i>et al.</i>	Museu de Arqueologia (Florença)	Museu/Espaço de Exibições	LAeq-1min, SNR
Yang e Kang	Tate Modern (Londres)	Museu/Espaço de Exibições	LAeq-1min
Mónica <i>et al.</i>	Museu Arqueológico do Carmo (Lisboa)	Museu/Espaço de Exibições	T, C50, EDT, STI, D80
Martellotta and Pon	Catedral de S. João, o Divino (Nova Iorque)	Museu/Espaço de Exibições/Concertos/Sopa dos Pobres	SNR, T15
Pon <i>et al.</i>	Museu Meadows (Dallas)	Museu/Espaço de Exibições	T20
Than Vi <i>et al.</i>	Tate Britain Art Gallery (Londres)	Museu/Espaço de Exibições	-
Zimmermann and Lorenz	Kunst museum (Bona)	Museu/Espaço de Exibições	-

3.3. ENQUADRAMENTO DO TEMA

3.3.1. MUSEUS NO MUNDO

De acordo com Geoffrey Lewis, Presidente do ICOM (*International Council of Museums*) entre 1983 e 1989: “Os museus preservam a propriedade cultural mundial e interpretam-na ao público. Faz parte do património natural e cultural mundial e pode ser de carácter tangível ou intangível. Muitas vezes, o bem cultural providencia também a referência primária em vários temas da área, tais como arqueologia e ciências naturais, e por isso representa uma contribuição importante para o conhecimento. É também, um componente significativo na definição da identidade cultural, a nível nacional e internacional.” [63].

O Museu Ashmolean em Oxford (Fig. 3.18) é geralmente considerado o museu público mais antigo do mundo, estabelecido em 1682 quando o antiquário Elias Ashmole doou a sua coleção à Universidade de Oxford. Este obteve a sua coleção a partir da família Tradescant, que tinha viajado pelo mundo e adquiriu uma coleção de objetos botânicos, geológicos e zoológicos, assim como objetos feitos à mão. Inicialmente este museu abriu no edifício que é hoje o Museu de História da Ciência em Oxford (Fig. 3.18). Neste momento o edifício utilizado para o Museu Ashmolean foi projetado num estilo Neoclássico e construído entre 1841 e 1845 [64].



Fig. 3.18 – Museu de História da Ciência (esq.) e Museu Ashmolean (dir.), Oxford [64]

Alguns dos mais antigos museus do mundo surgiram em Itália durante o Renascimento, como é o caso do Museu Capitolino em Roma (Fig. 3.19), e foi inicialmente fundado em 1471 pela Papa Sisto IV, que doou a sua coleção de bronzes à cidade. No entanto, este apenas foi aberto ao público em 1734. Outro exemplo são os Museus do Vaticano (Fig. 3.19), fundados em 1506 pelo Papa Júlio II, expondo uma coleção de esculturas. Tal como o Museu Capitolino, apenas abriu ao público em 1771 por vontade do Papa Clemente XIV [65].



Fig. 3.19 – Museu Capitolino, Roma (esq.) e Museus do Vaticano (dir.) [65]

Como conceito, o “museu ideal” evoluiu no início do século XVIII, numa altura em que as coleções eram expostas quase exclusivamente nos palácios reais. Os palácios eram frequentemente húmidos, as entradas de luz miseráveis e os objetos não eram catalogados ou protegidos do fogo ou outros danos possíveis, já que os proprietários os tratavam como ornamentos. O primeiro esboço de um museu foi criado em 1704 pelo alemão Christoph Sturm que criticava de forma indireta a falta de acesso ao público às coleções, propondo assim um edifício separado do palácio com apenas um piso [63].

A partir daí, outros museus começaram a surgir por toda a Europa. Esta proliferação de espaços públicos que permitiam à população geral adquirir conhecimento através da história surgiram devido ao espírito enciclopédico denominado “Esclarecimento Europeu”. Dois exemplos famosos são o Museu Britânico, aberto em Londres em 1759 e o Louvre, aberto em Paris em 1793 (Fig. 3.20). Ambos os museus foram iniciativas dos respetivos governos e foram o resultado da aquisição de obras privadas e posterior exibição das coleções reais [65, 66].



Fig. 3.20 – Museu Britânico, Londres (esq.) e Louvre, Paris (dir.) [65]

No caso dos Estados Unidos da América, os museus eram considerados uma luxúria até ao século XIX, em que as cidades americanas em expansão começaram a imitar os modelos de museus europeus, com as suas grandes escadarias e as suas práticas em termos de coleções (esculturas clássicas, pinturas renascentistas, ect.). No entanto, foi nos Estados Unidos que algumas das maiores influências nos museus de arte moderna emergiram. Uma delas é a abordagem do “cubo branco” que foi explorada no Museu de Arte Moderna em Nova Iorque (Fig. 3.21) por Alfred H. Barr. Minimizando as distrações visuais, Barr esperava direcionar a atenção dos visitantes para a arte exposta, com a introdução de paredes brancas, espaços vazios e molduras minimalistas. Atualmente estes aspetos são tão comuns que já nem se repara neles [67].

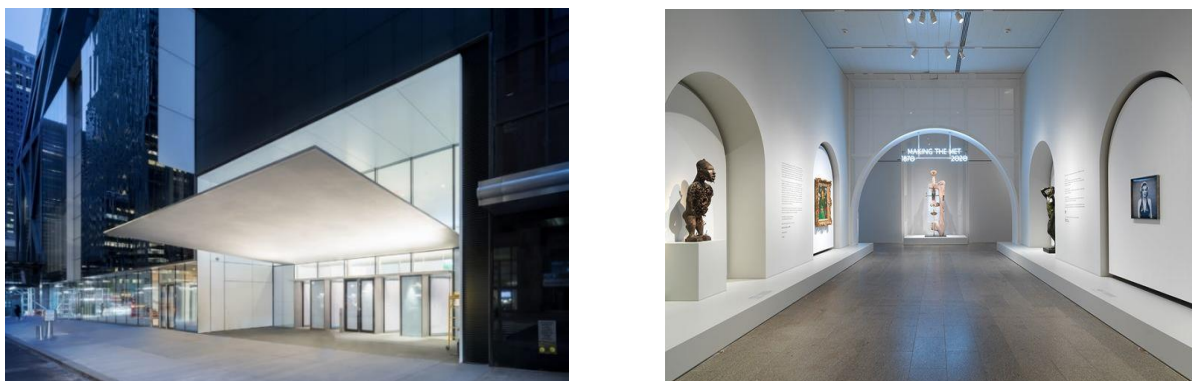


Fig. 3.21 – Exterior do Museu de Arte Moderna, Nova Iorque (esq.) e o seu interior (dir.) [67]

Também no século XIX começaram a surgir os museus ao ar livre, com o intuito de preservar aspetos etnográficos do povo ou da vida tradicional da nação [66], como é que o caso do Museu Skansen (Fig. 3.22) fundado em 1891, considerado o museu ao ar livre mais antigo do mundo [83].



Fig. 3.22 – Museu Skansen, Estocolmo [83]

Esta mudança na forma como os museus eram apresentados inspirou a que muitos outros museus ao ar livre fossem criados ao longo dos séculos, não só na Europa, mas no mundo. Um dos melhores exemplos trata-se do museu Muang Boran (Fig. 3.23) em Banguecoque com 300 hectares de réplicas de muitos templos e edifícios históricos da Tailândia [84].



Fig. 3.23 – Museu Muang Boran, Banquecoque [84]

Na primeira metade do século XX existiram consequências sociais profundas derivadas das duas guerras mundiais, a Revolução Russa em 1917 e períodos de recessão económica. Para os museus foi também um período de mudanças, principalmente na Rússia e na Alemanha. Na Rússia não só exibiam a herança artística, histórica e científica, mas também objetos relacionados com as revoluções. Abriram também o primeiro museu memorial em Moscovo. Na Alemanha muitos museus foram criados depois da II Guerra Mundial para promover a história e figuras importantes da nação. Tanto os novos museus da Rússia como das Alemanha eram também uma forma para disseminar propaganda política [85].

Nos anos imediatamente a seguir à II Guerra Mundial, os museus passaram a ter um papel educativo e serviam como fonte de entretenimento. A reconstrução dos museus afetados pela guerra permitiu oportunidades para realizar ideias vindas da primeira metade do século, em que equipas de cientistas, designers, educadores e gestores de marketing trabalhavam em conjunto para promover o museu, atraindo cada vez mais visitantes. Também no século XX aumentou a

conscientização com o ambiente e a sua necessidade de preservação, levando ao desenvolvimento de museus em paisagens históricas e naturais [85]. Também muitos edifícios com significância histórica foram adaptados para museus, tal como o Museu de Orsay (Fig. 3.24) - antes uma antiga estação de caminhos de ferro de Paris - e o Tate Modern (na reformada central elétrica de Bankside) em Londres [67].

No século XXI a experiência dos visitantes nos museus passou a ser a prioridade, expandindo os seus usos para visitas guiadas, palestras, concertos e ainda a adição de espaços próprios para reuniões, jantar ou para lojas.



Fig. 3.24 – Museu de Orsay, Paris [67]

3.3.2. MUSEUS EM PORTUGAL

O colecionismo existe desde os primórdios da Nação, com exemplos nos tesouros das famílias reais, nobres e religiosos. Estas coleções foram organizadas desde o século XVI, uma altura em que Portugal estava na vanguarda do processo das navegações e conquistas na África, Ásia e América. Nesta altura, as coleções estavam repletas de material arqueológico, epigráfico e artístico, assim como elementos da fauna e flora trazidos dos diferentes continentes. As coleções serviam os gostos pessoais, à devoção ou propósitos de prestígio, como foi o caso das coleções reais. [68, 69]. No século XVIII foram criados o museu da Ajuda e o museu da Universidade de Coimbra (Fig. 3.25), enquadrados na tipologia de museus de história natural.



Fig. 3.25 – Museu da Universidade de Coimbra [68]

No entanto, a institucionalização moderna dos museus produz-se no século XIX. A escolha da cidade do Porto para sede do primeiro museu público de arte a estabelecer em Portugal obedece a dois critérios: um notoriamente político; o outro baseado nas condições objetivas das coleções, particulares e eclesiásticas, artísticas, da cidade e arredores. No primeiro caso, o reconhecimento pelo apoio recebido à sua causa levou D. Pedro IV a procurar instituir um estabelecimento de utilidade pública; no segundo, devido à influência britânica (havia na cidade diversas famílias em cujas casas figuravam apreciáveis coleções de arte) [70].

A história, iniciada em pleno cerco do Porto, parece ter sido impulsionada por um artista da cidade, o pintor João Baptista Ribeiro (1790-1868). Lente de desenho na Academia de Marinha e Comércio do Porto, ele tinha sido convidado para realizar um retrato de D. Pedro IV, tendo sugerido nessa altura a necessidade de criar um museu de Pinturas e Estampas e outros objetos de Belas-Artes [70].

Com a derrota dos miguelistas e a extinção das ordens religiosas em 1834, o país confiscou um espólio gigantesco de obras de arte, ficando agora responsável pela sua valorização, para o bem coletivo. O paralelo com a criação do Museu do Louvre em 1792 pelas forças revolucionárias francesas é evidente. Portugal junta-se assim ao movimento europeu do desenvolvimento das ideias liberais [69]. Assim, foi fundado o Museu Portuense em 1840, atualmente denominado como Museu Nacional de Soares dos Reis (Fig. 3.26), em homenagem ao escultor gaiense.

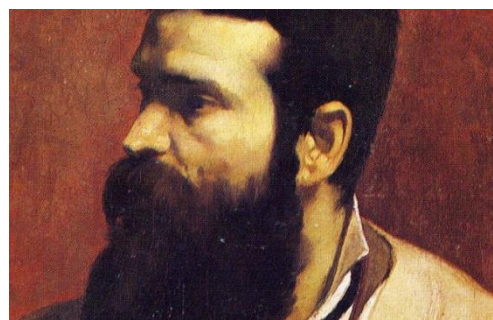


Fig. 3.26 – Museu Nacional de Soares dos Reis, Porto (esq.) e António Soares dos Reis (dir.) [69]

Com a implantação da República foi reforçada a vontade política de desenvolver e instituir uma rede de museus nacionais e regionais, de acordo com uma visão pedagógica, patrimonial e artística essencialmente divulgadora e descentralizadora. Entre 1912 e 1924 criaram-se treze museus regionais (de arte, arqueologia, história e numismática), ainda que quase todos originários de iniciativas já fundamentadas no período anterior. Criaram-se dois museus nacionais (o de Arte Antiga e o de Arte Contemporânea), assim como museus de tipologia inovadora: Museu da Cidade de Lisboa, Museu-Escola João de Deus, Museu Antoniano e várias casas-museu, nomeadamente a Casa dos Patudos de Alpiarça. O Museu dos Coches (Fig. 3.27), criado em 1905 por iniciativa da rainha D. Amélia, foi elevado em 1911 à categoria de museu nacional [68].



Fig. 3.27 – Exterior do antigo Museu dos Coches (antigo Picadeiro do Palácio de Belém) (esq.) e o seu interior (dir.) [68]

Após a Segunda Guerra Mundial (1947) nasce o ICOM (*International Council of Museums*) que é a organização mundial dos museus e dos profissionais de museus. O ICOM dedica-se à promoção e proteção do património natural e cultural, presente e futuro, material e imaterial. O ICOM Portugal é referido, em publicação do ICOM, como já existente no início da década de 1950 [73].

O longo período do Estado Novo implantou uma dinâmica para os museus baseada numa "restauração material, restauração moral, restauração nacional" preconizada por António de Oliveira Salazar e traduzida a partir do culto a edifícios simbólicos, da instituição de uma série de comemorações e da valorização do enclausuramento de obras de arte que pudessem consagrar o passado. O universo museológico passou a ser alvo de constantes intervenções do Estado, diversos museus foram reformulados e a etnografia regional passou a ocupar espaço preponderante nos museus locais [71].

Tiveram especial relevo os museus etnográficos regionais, pensados para cada capital de província. Em 1965 vai ser criada a Associação Portuguesa de Museologia. Na década de 1970, o “meio ambiente” entra no panorama dos museus. É em 1982 quando nasce o primeiro ecomuseu em Portugal, o Ecomuseu do Seixal (Fig. 3.28), na Área Metropolitana de Lisboa. Promovido pelo concelho do Seixal, este ecomuseu representa uma bandeira fundamental da museologia antropológica do país [71].



Fig. 3.28 – Ecomuseu Municipal do Seixal [71]

Com o regime democrático fundado em 1974, assistiu-se a um renovado interesse pelo património natural e cultural, que, por um lado, originou a proteção e musealização de numerosos sectores do panorama português e, por outro, veio a culminar num aumento significativo dos museus do país [71]. A década de 1970 testemunhou, também, a fundação de uma das principais instituições museológicas de Portugal: trata-se do Museu da Fundação Calouste Gulbenkian, em Lisboa (Fig. 3.29) [68].



Fig. 3.29 – Museu Calouste Gulbenkian, Lisboa [68]

Outros museus proeminentes em Portugal foram sendo criados nos anos seguintes, tais como o Museu de Serralves, o Museu do Carro Elétrico (ambos no Porto), o Museu do Oriente, o MAAT (ambos em Lisboa) e o Museu dos Descobrimentos (Belmonte) (Fig. 3.30).

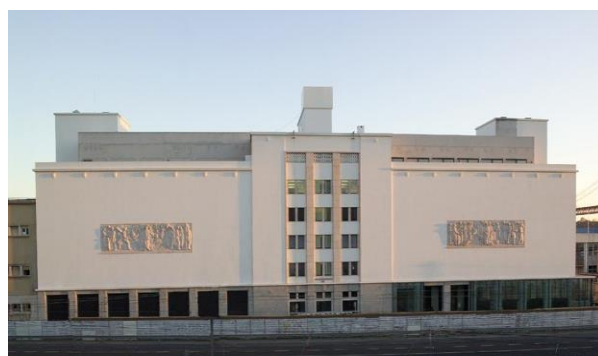


Fig. 3.30 – Museu de Serralves, Porto (esq. em cima); Museu do Oriente, Lisboa (dir. em cima); Museu dos Descobrimentos, Belmonte (esq. em baixo); e MAAT, Lisboa (dir. em baixo) [68]

3.3.3. HISTÓRIA DA LEGISLAÇÃO MUSEOLÓGICA EM PORTUGAL

Como já foi referido, a primeira república (1910-1926) estabeleceu uma coesa e promissora rede de museus nacionais e regionais. Da importante documentação legal produzida neste período deve ser destacado o Decreto n.º 1 do Governo Provisório, datado de 26 de Maio de 1911, visando a reorganização do ensino de Belas Artes, dos serviços de Museus e da proteção do Património artístico e arqueológico [74].

No entanto, foi a partir de 1860 que haveria de resultar o primeiro grande diploma de reflexão e regulamentação de uma política museológica à escala nacional: o Decreto-Lei n.º 46 758, de 18 de Dezembro de 1965 [74]. Este Regulamento Geral dos Museus de Arte, História e Arqueologia entendia o Museu como instituição de vocação cultural, centro de divulgação e de comunicação com os diferentes públicos.

A criação do Instituto Português de Museus (IPM) permitiu a elaboração do “Documento preparatório para uma lei de bases do sistema museológico nacional” (1995). Aspirando a servir de base ao reordenamento do sistema museológico português, o documento constituiu um marcante momento de reflexão e diagnóstico, assim como de produção de grandes linhas orientadoras [74].

Mais recentemente, a preparação da Lei-quadro dos Museus Portugueses – Lei n.º 47/2004, de 19 de Agosto baseou-se no conhecimento da realidade portuguesa, na experiência recente desenvolvida pelo IPM de criação da RPM (Rede Portuguesa de Museus) e na atenção às orientações internacionais. A Lei é composta por onze capítulos, que podem ser agrupados em cinco grandes áreas temáticas: um capítulo introdutório, requisitos para ser considerado museu, património móvel incorporado nos museus e à sua propriedade, o sistema organizacional da realidade museológica e o regime de contraordenações e disposições finais [74].

Vários decretos-lei têm saído ao longo dos anos, tal como o DL n.º 78/2019 – Autonomia dos Museus e o DL n.º 27/2020 de 17 de junho, que introduzem complementos ou alterações à Lei-quadro dos Museus Portugueses.

No ramo da acústica, é importante referir o “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios”, ou simplesmente RRAE, que tem como principais objetivos a melhoria do conforto acústico nas edificações para permitir um maior bem estar nas populações. Apresenta valores limite para diversos tipos de edifícios, como habitações, escritórios, hospitais, escolas, bibliotecas, refeitórios, ginásios ou enfermarias. Apesar de não ter referência a museus, estes podem ser comparáveis à categoria de salas de aulas, bibliotecas e salas polivalentes [27].

4

METODOLOGIA

4.1. MUSEU MUNICIPAL ABADE PEDROSA

Após a primeira exposição efetuada em 1915 com os trabalhos desenvolvidos por Abade Pedrosa, o Museu Municipal Abade Pedrosa (Fig. 4.1) apenas foi “reativado” novamente em 1985 na antiga hospedaria do Mosteiro de Santo Tirso. No entanto, só em 1989 é que foi inaugurado e aberto ao público com a primeira exposição de conteúdos arqueológicos do concelho [87].



Fig. 4.1 – Mosteiro de São Bento (esq.) e Museu Municipal Abade Pedrosa instalado na antiga hospedaria, Santo Tirso (dir.) [Fotos da autora]

O edifício onde se encontra inserido o Museu tem uma planta retangular, possuindo um corredor com desenvolvimento longitudinal (Fig. 4.2), que segue a orientação da igreja matriz. Apresenta granito nos principais elementos estruturantes, como os pilares e as caixilharias e as janelas são trabalhadas e com frontões vazados [88].

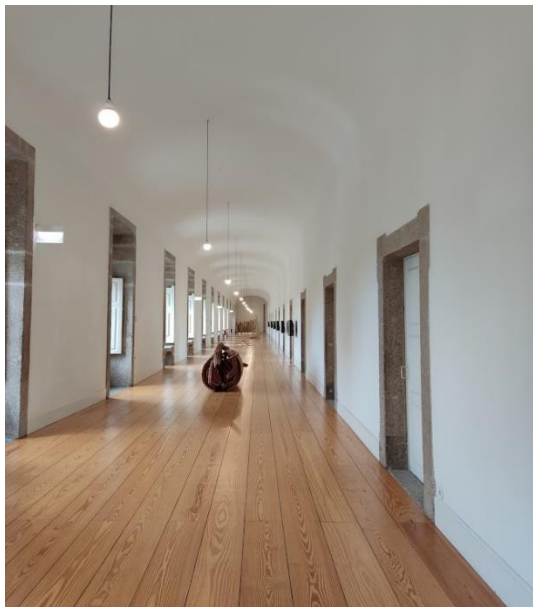


Fig. 4.2 – Corredor interior com desenvolvimento longitudinal (esq.) e janela do piso superior com frontão (dir.) [Fotos da autora]

Em 1997, criaram-se novos espaços de exposição. A exposição permanente foi alvo de uma remodelação e em 2000 foi incluído um auditório (Fig. 4.3) com possibilidade de instalar 72 pessoas [87].

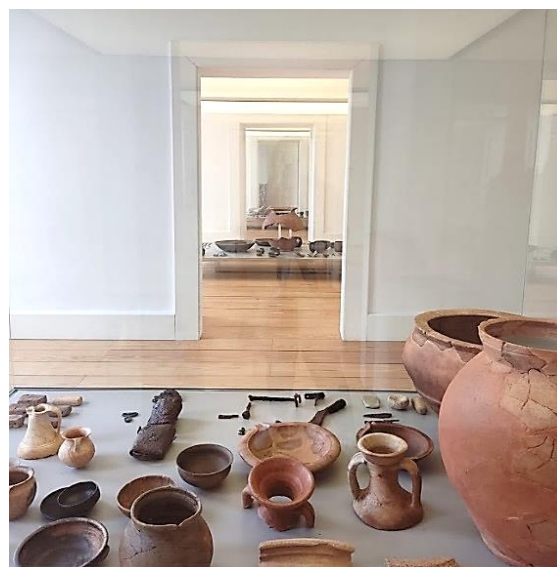


Fig. 4.3 – Auditório (esq.) e diferentes espaços de exposição (dir.) [Fotos da autora]

Em 2002 o Museu Municipal Abade Pedrosa passou a integrar a Rede Portuguesa de Museus, que se trata de um grupo de certa forma restrito e do qual fazem parte várias instituições museológicas certificadas pelo IPM/RPM. Ficaram também mais claras as vocações e os objetivos do Museu, entre os quais se destacam [88]:

- Estudar, documentar, conservar e divulgar as coleções que possui;
- Valorizar os objetos históricos como testemunho da história da região;
- Promover e divulgar a história arqueológica do concelho;
- Estabelecer práticas culturais num público alargado e diversificado;
- Implementar parcerias com diversas instituições ligadas ao estudo do património cultural.

A coleção exposta possui diversos objetos arqueológicos, de diferentes áreas da região, e de seis períodos históricos, distribuídos por cinco salas diferentes: Pré-História, Proto-história, Romanização, Idade Média, Idade Moderna e Época Contemporânea (Fig. 4.4). Ao visitar as diferentes salas de exposição, é possível efetuar uma viagem cronológica pelas diferentes épocas e entender, através do material exposto, a forma como as populações viviam em cada um dos períodos históricos [88].

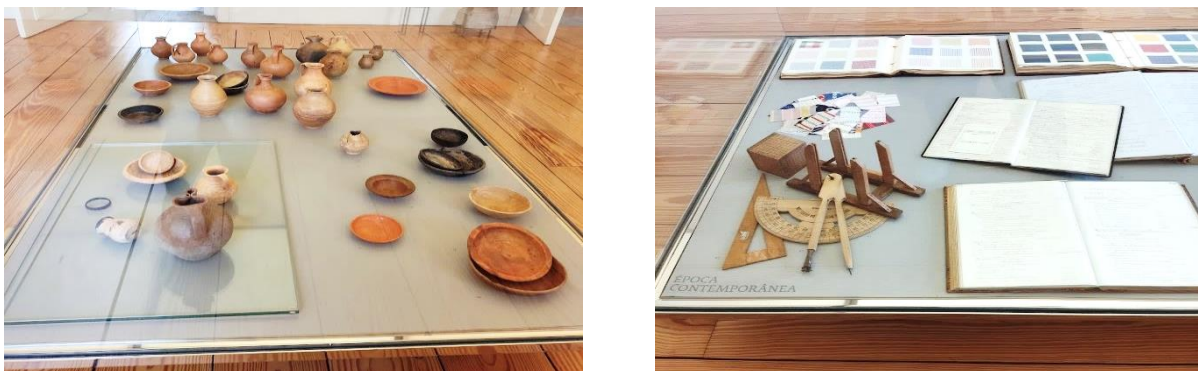


Fig. 4.4 – Coleção da Romanização (esq.) e Época Contemporânea (dir.) [Fotos da autora]

Em 2016, os arquitetos Álvaro Siza Vieira e Eduardo Souto de Moura foram os responsáveis por projetar a requalificação do Museu Municipal Abade Pedrosa (MMAP) e a construção do Museu de Escultura Contemporânea de Santo Tirso (MIECST) (Fig. 4.5). O facto dos dois edifícios se encontrarem ligados permitiu a concentração de recursos humanos e financeiros e também a partilha de espaços e recursos, como a Loja, Área Administrativa, Casas de Banho, a Cafetaria e o Auditório [86, 88].

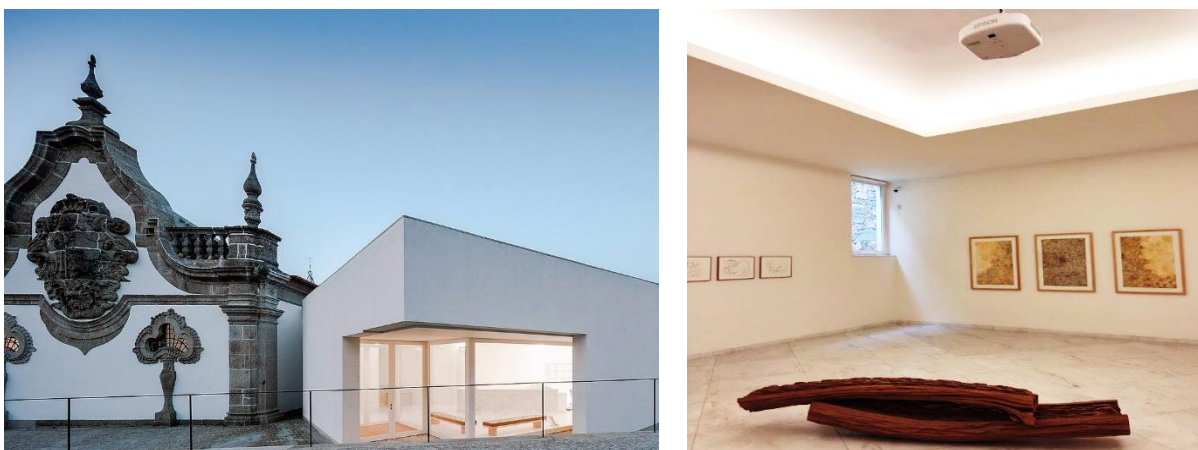


Fig. 4.5 – Ligação exterior entre o MMAP e o MIECST (esq.) e o seu interior (dir.) [Foto da direita da autora]

Com a reabilitação efetuada, foi possível criar um espaço com mais fluidez de circulação, uma boa visibilidade das peças (Fig. 4.6) em exposição e a garantia que o espólio apresenta condições excecionais de conservação e preservação [87]. Para além disso, o ambiente no interior é confortável e espaçoso, permitindo aos visitantes usufruírem de uma experiência calma e enriquecedora.

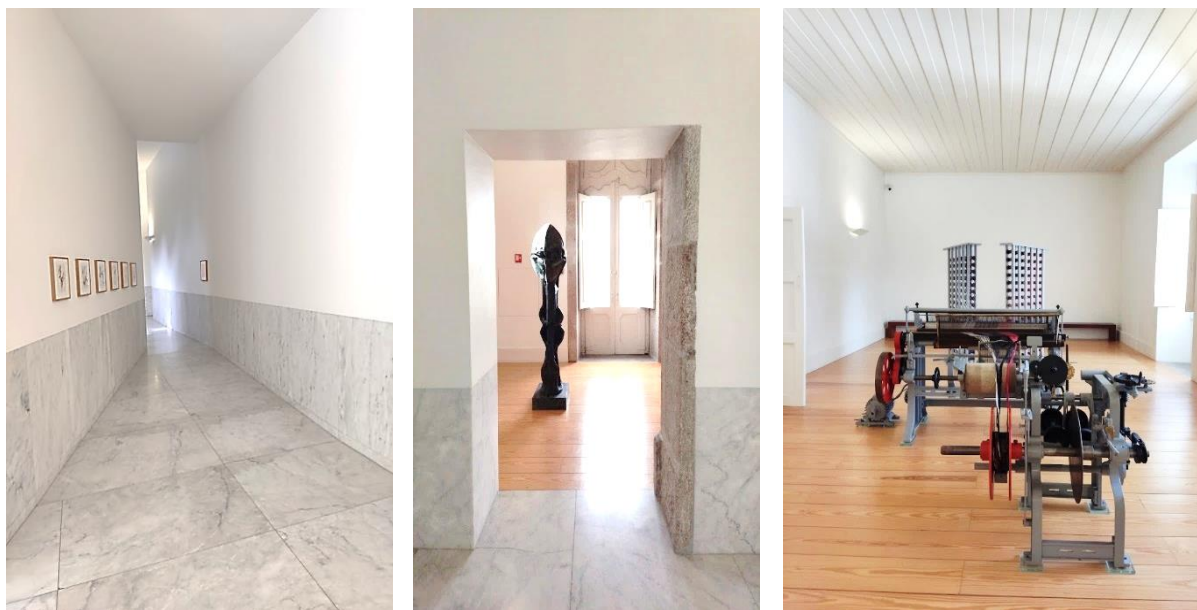


Fig. 4.6 – Corredor interior do MIECST (esq.), ligação interior entre o MIECST e o MMAP (centro) e uma das salas de exposição (dir.) [Fotos da autora]

4.2. METODOLOGIA

A caracterização acústica do Museu Municipal Abade Pedrosa foi efetuada com base numa análise objetiva. Esta realiza-se através de ensaios que permitem determinar parâmetros acústicos necessários para descrever o edifício acusticamente. Foi efetuada a medição dos seguintes parâmetros acústicos:

- Tempo de Reverberação (TR);
- *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI);
- Nível sonoro do ruído de fundo (LAeq).

Estes parâmetros foram medidos com recurso a equipamentos do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, operados pelo Engenheiro António Eduardo Costa com o auxílio da autora.

Este estudo foi efetuado no dia 9 de maio de 2022, das 14h30 às 17h30 no interior do Museu Municipal Abade Pedrosa, nas salas de exposição 1, 2, 3, 4 e 5 (Fig. 4.7). A visita ao Museu foi efetuada numa segunda-feira, que corresponde ao dia em que este está fechado aos visitantes.

As salas encontram-se todas ligadas entre elas, não sendo possível isolá-las para efetuar os ensaios. Todas as salas apresentam aberturas com porta para o corredor que liga o Museu Municipal Abade Pedrosa com o Museu Internacional de Escultura Contemporânea. Visto que as salas 1 e 2 (Fig. 4.8) são as maiores, e talvez as que apresentam problemas acústicos maiores, começou por se efetuar as medições nas mesmas. Devido à existência de vitrinas expositoras, também se decidiu que a fonte sonora seria colocada na sala 1, uma das salas maiores, pois assim seria possível a propagação do som até à última sala (sala 5). Se a fonte sonora fosse colocada, por exemplo, na sala 5 (Fig. 4.9), a existência de uma grande vitrina logo a seguir à fonte sonora iria afetar de forma substancial a forma como o som se propagava. As salas apresentam as dimensões expostas no Quadro 4.1.

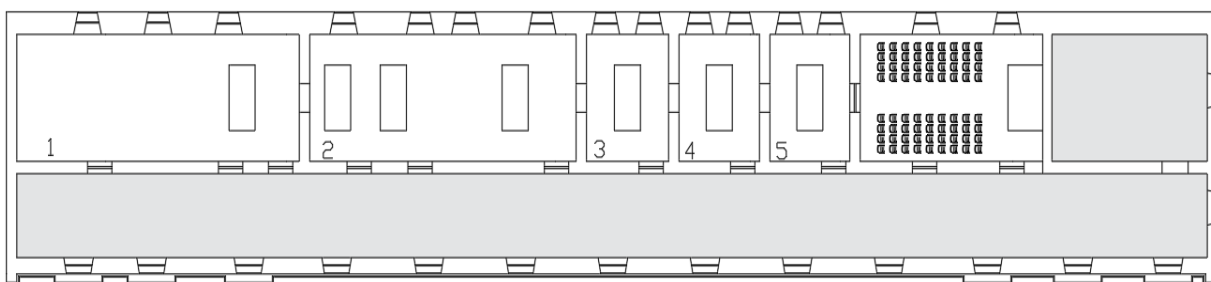


Fig. 4.7 – Planta do Museu Municipal Abade Pedrosa, Santo Tirso

Quadro. 4.1 – Dimensões das salas 1, 2, 3, 4 e 5 do MMAP

SALA	COMPRIMENTO (m)	LARGURA (m)	PÉ-DIREITO (m)	VOLUME (m ³)
1 (Fig. 4.8)	16,25	6,2	4,15	418,1
2 (Fig. 4.8)	15,33	6,2	4,15	394,4
3 (Fig. 4.9)	4,72	6,2	4,15	121,4
4 (Fig. 4.9)	4,63	6,2	4,15	119,1
5 (Fig. 4.9)	4,60	6,2	4,15	118,4



Fig. 4.8 – Interior das Salas 1 e 2 do MMAP [Fotos da autora]



Fig. 4.9 – Interior das Salas 3, 4 e 5 do MMAP [Fotos da autora]

4.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

4.3.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E VALORES IDEAIS

A medição do Tempo de Reverberação, por ser o ensaio mais trabalhoso e o mais importante, foi o primeiro a ser preparado. Para isto, foi necessária uma primeira instalação dos equipamentos. Começou por se posicionar a fonte sonora *Brüel & Kjaer* (modelo 4224) na sala 1 e um sonómetro *Brüel & Kjaer* (modelo 2260), apoiado num tripé, que funcionou como recetor nas diferentes salas (Fig. 4.10).

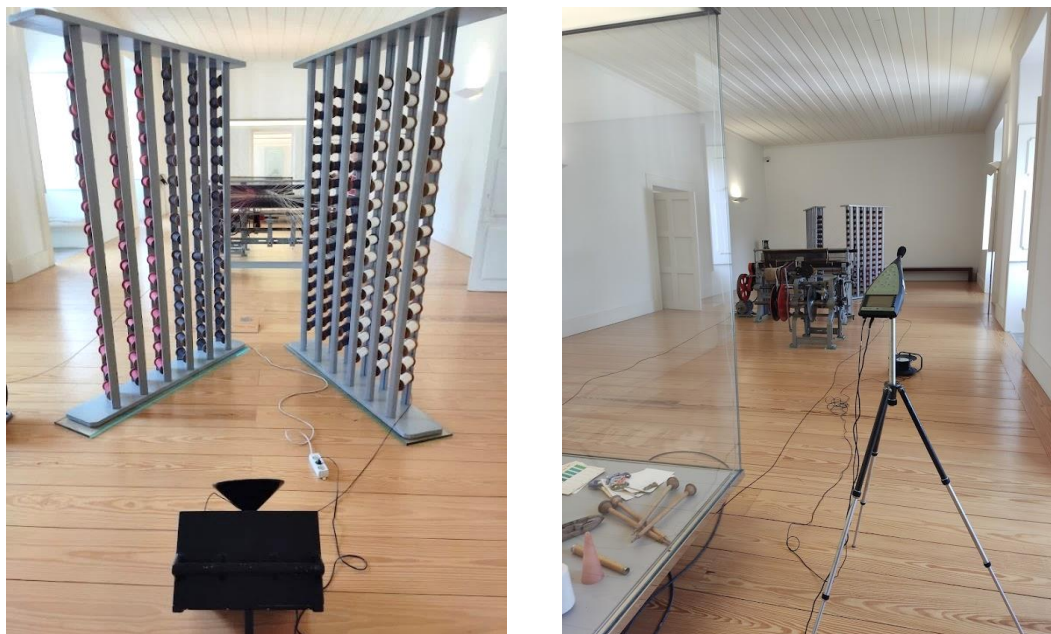


Fig. 4.10 – Fonte Sonora *Brüel & Kjaer* modelo 4224 (esq.) e um sonómetro *Brüel & Kjaer* modelo 2260 (dir.)
[Fotos da autora]

Esta fonte sonora foi especificamente projetada para medições acústicas em edifícios e é constituída por um altifalante com um amplificador e um gerador de som. O sonómetro tem a possibilidade de registar medições em bandas de oitava ou 1/3 de oitava, apresenta filtros de ponderação e é constituído por um microfone responsável por captar os sons, estando de acordo com os padrões Tipo 1 ANSI. [89, 90].

O Tempo de Reverberação é um parâmetro acústico que pode apresentar gamas de valores ideais muito distintas de acordo com o uso que o edifício tem e das características do próprio espaço. Não existindo valores de referência para museus, estes também dependem de autor para autor, baseados na experiência e em estudos anteriores. Também na legislação nacional, como já foi referido no Capítulo 3, não existe um guia específico para a acústica em museus. O RRAE (2008) não faz menção de museus, mas apresenta algumas fórmulas de cálculo, nomeadamente para a categoria de salas de aulas, bibliotecas, salas polivalentes ou refeitórios, que poderá porventura exibir valores satisfatórios também para museus devido ao tipo de uso que apresentam:

$$TR = 0.15 V^{1/3} \quad (4.1)$$

Consideram-se os valores ideais de Tempo de Reverberação baseados no documento “*Acoustics of Modern and Old Museums*” de A.P.O. Carvalho *et al.* no estudo do Museu Nacional Soares dos Reis e do Museu de Serralves, correspondendo a uma gama de valores entre 0,8 e 1,4 s, de forma a comparar os resultados obtidos neste estudo com os dos museus mencionados.

4.3.2. METODOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO

A fonte sonora foi colocada no pavimento da sala 1 a uma distância da parede de fundo de 1,80 m. Depois de instalados os cabos (Fig. 4.11) ao longo de todas as salas de exposição, estes foram ligados à fonte sonora e ao sonómetro. A fonte sonora emite um ruído rosa que possibilita o decaimento acima do ruído de fundo e, após este cessar, é captado o nível de pressão sonora pelo sonómetro nas bandas de frequência na banda de 1/3 de oitava. O sonómetro apresenta os resultados já extrapolados para um decaimento de 60 dB, sendo, no entanto, de notar que o decaimento medido foi de 30 dB.



Fig. 4.11 – Preparações iniciais da instalação dos cabos e da posição dos diversos equipamentos de medição [Foto da autora]

Foram medidos dois pontos em cada uma das salas e, para cada um deles, foram efetuadas duas medições, uma com o sonómetro rodado a 45° para a direita e outra com o sonómetro rodado 45° para a esquerda (Fig. 4.12).

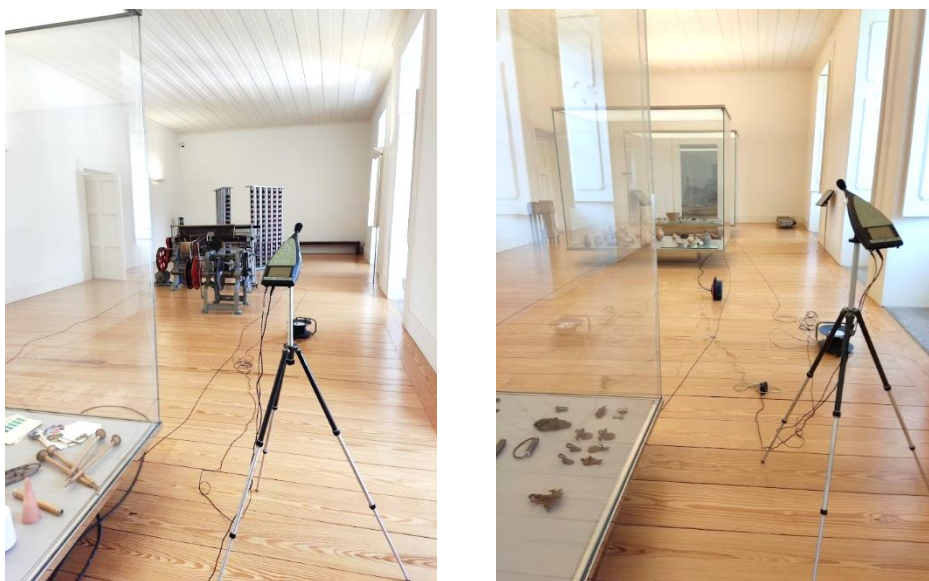


Fig. 4.12 – Medição do Tempo de Reverberação na sala 1, com o sonómetro direccionado para as diagonais esquerda e direita da sala, respetivamente [Fotos da autora]

Dos dois pontos medidos em cada sala, seguiu-se sempre o mesmo esquema, em que o primeiro ponto era medido no eixo central da sala e o segundo ponto no lado direito das vitrinas expositoras, como se pode verificar a partir dos seguintes esquemas da disposição espacial da fonte sonora e dos pontos medidos (Fig. 4.13):

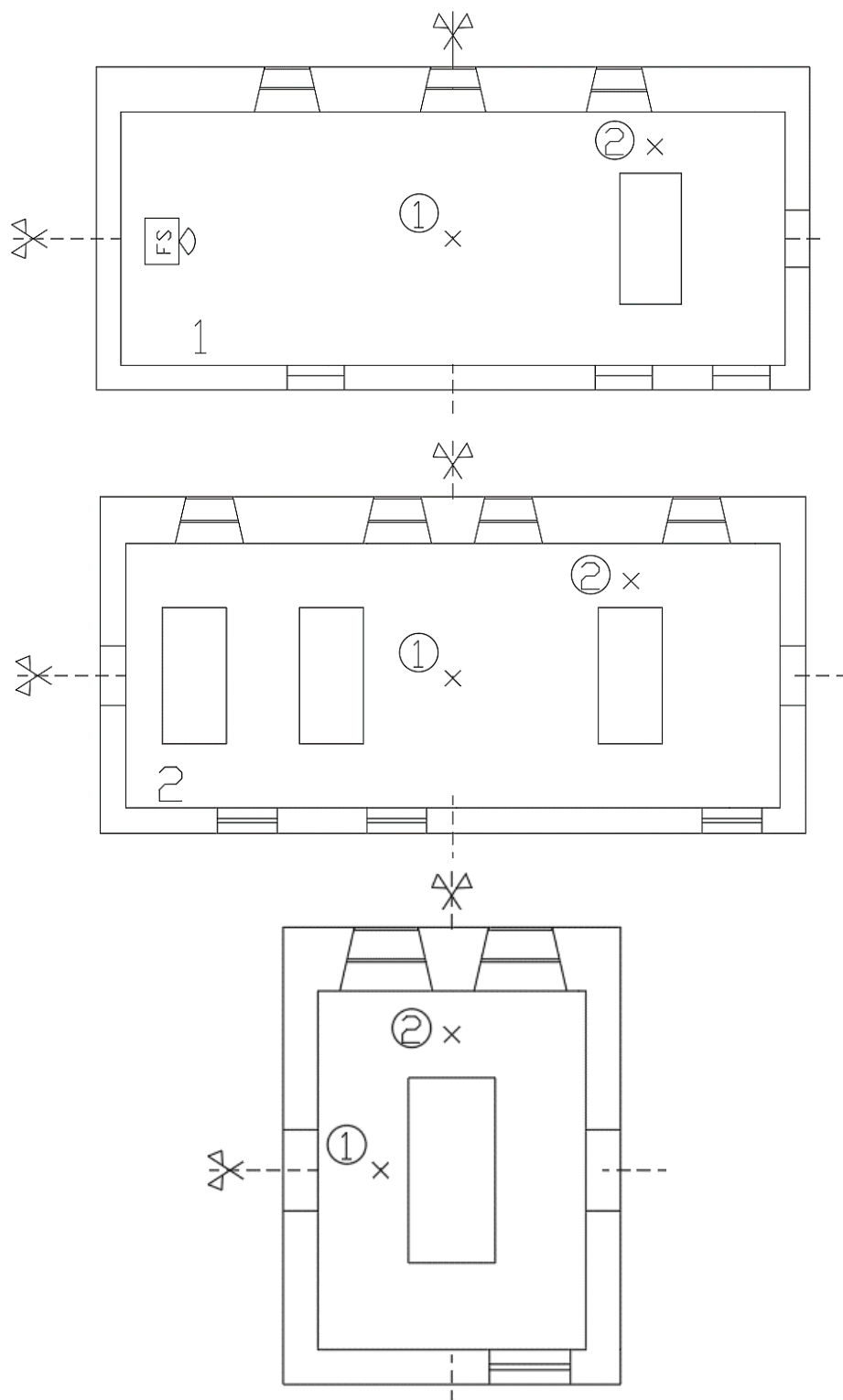


Fig. 4.13 – Medição do TR: Localização da fonte sonora (FS) e da posição dos pontos 1 e 2 medidos na sala 1 (em cima), sala 2 (centro), sala 3, 4 e 5 (em baixo) do MMAP

4.4. RASTI

4.4.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E VALORES IDEAIS

Para a medição do RASTI, foi necessário utilizar uma fonte sonora do RASTI da *Brüel & Kjaer* (modelo 4225) e um recetor *Brüel & Kjaer* (modelo 4419) (Fig. 4.14).



Fig. 4.14 – Fonte Sonora RASTI *Brüel & Kjaer* modelo 4225 (esq.) e Eng^o. António Eduardo Costa com o recetor *Brüel & Kjaer* modelo 4419 (dir.) [Fotos da autora]

O emissor para a determinação do RASTI foi colocado num tripé para representar a altura em que normalmente se encontram os oradores. No caso do Museu Municipal Abade Pedrosa foi possível averiguar que é habitual este receber visitas guiadas de várias turmas de escolas básicas e secundárias, pelo que este ensaio é bastante importante para perceber se as características acústicas atuais são aceitáveis para este tipo de atividades.

O RASTI é um parâmetro acústico bastante importante, principalmente quando é essencial que exista uma boa perceção do que é dito no espaço. No caso do Museu Municipal Abade Pedrosa, é essencial que a inteligibilidade da palavra seja, no mínimo, suficiente para que os visitantes tenham uma boa experiência quando se encontram numa visita guiada pelas diferentes salas e, no máximo, boa, para que exista alguma privacidade. Condições excelentes não são recomendáveis exatamente por esta razão, pelo que os valores para o parâmetro acústico RASTI estão na gama de valores iguais ou superiores a 0,60.

No Quadro 4.2 está exposta a correspondência do parâmetro RASTI em relação à inteligibilidade da palavra.

RASTI	INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA
$[0 - 0,30[$	Má
$[0,30 - 0,45[$	Pobre
$[0,45 - 0,60[$	Aceitável
$[0,60 - 0,75[$	Boa
$[0,75 - 1,00]$	Excelente

Quadro 4.2 – Gamas de valores de RASTI em relação com a inteligibilidade da palavra [51]

4.4.2. METODOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO

O emissor *Brüel & Kjaer* (modelo 4225) foi colocado na direção do eixo central de cada uma das salas e emite um ruído bastante específico, que representa a forma como a voz humana se propaga para as bandas de frequências de 500 e 2000 Hz, com as diversas flutuações que existem na formação das palavras. O emissor foi colocado no eixo central para simular a conversa entre o guia do museu num ponto central e virado para o fundo da sala para que se percebesse como o som se propagava em todo o espaço. O recetor recebe o sinal a partir do microfone integrado que possui, podendo ser verificada a modificação que existe no ruído entre a emissão do sinal e a sua receção.

Para este ensaio, devido às salas 1 e 2 serem as maiores, foram efetuadas seis medições distintas, três alinhadas com o eixo central da sala e três junto às janelas, como se pode verificar na Fig. 4.15. Nas salas 3, 4 e 5, não era necessário proceder a tantas medições, visto as dimensões serem bastante mais reduzidas, pelo que apenas foram efetuadas duas medições distintas (Fig. 4.16). Em cada um dos pontos, foram efetuadas três medições.

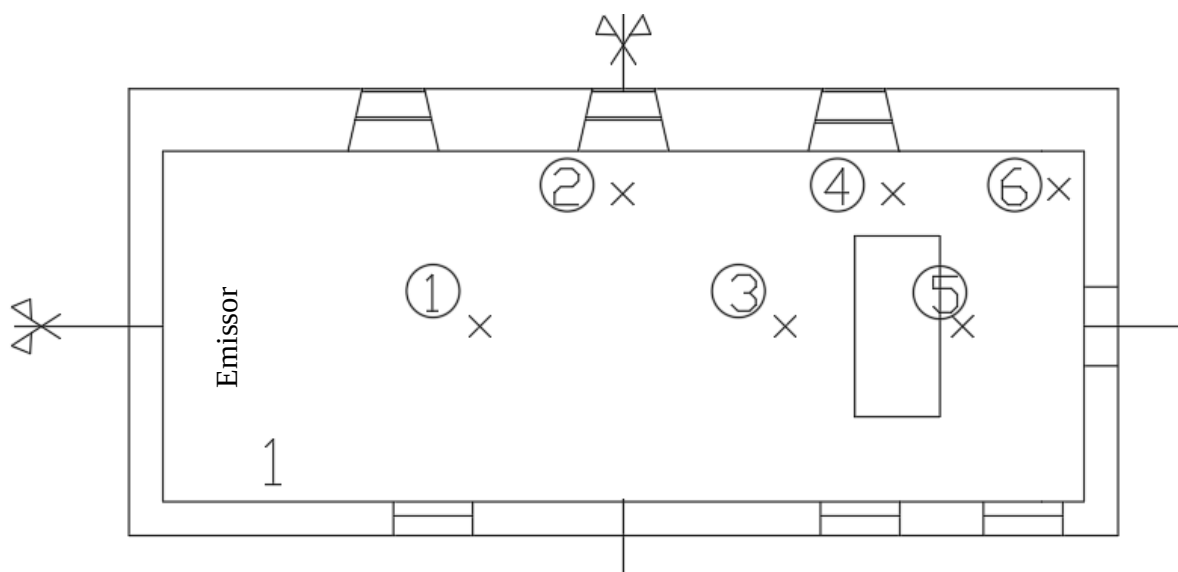


Fig. 4.15 – Medição do RASTI: Representação esquemática da posição da fonte sonora e dos diferentes pontos medidos na sala 1 do MMAP

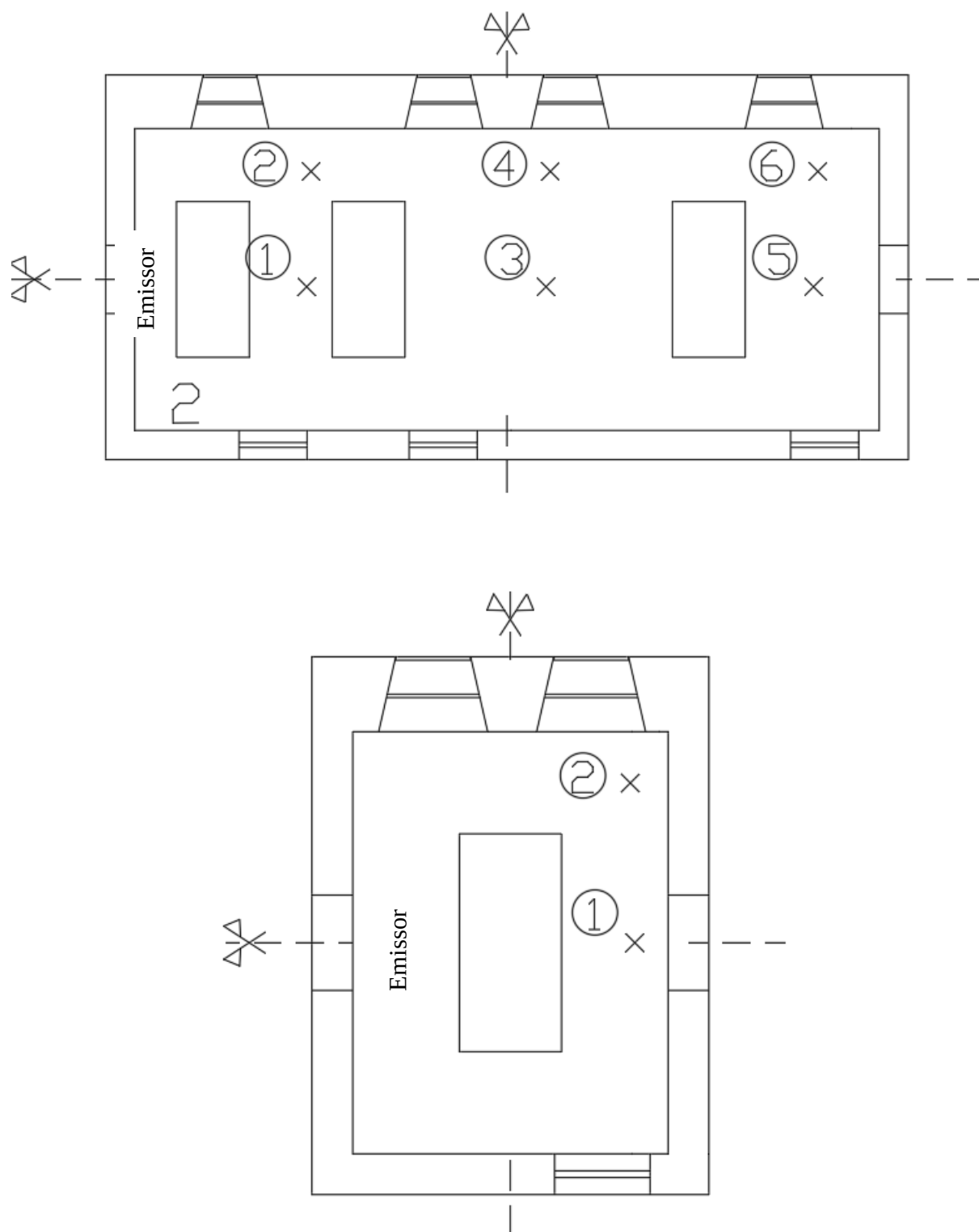


Fig. 4.16 – Medição do RASTI: Representação esquemática da posição da fonte sonora e dos diferentes pontos medidos na sala 2 (em cima) e nas salas 3, 4 e 5 (em baixo) do MMAP

4.5. RUÍDO DE FUNDO

4.5.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E VALORES IDEAIS

O Museu Municipal Abade Pedrosa apenas apresenta ar condicionado no auditório, que não era objeto de estudo desta tese. As restantes salas de exposição não apresentam qualquer tipo de dispositivo AVAC ou similar. Como já foi referido, a visita ao Museu foi efetuada no dia em que este se encontra encerrado, pelo que não existiam visitantes nesse dia. As únicas pessoas presentes era a autora da tese, o Eng^o António Eduardo Costa e a responsável pelo museu naquele dia.

Por isso, apenas foi efetuado o ensaio do nível sonoro do ruído de fundo sem visitantes. Para isto, foi somente necessário o uso do sonómetro *Brüel & Kjaer* (modelo 2260), apoiado num tripé (Fig. 4.17).

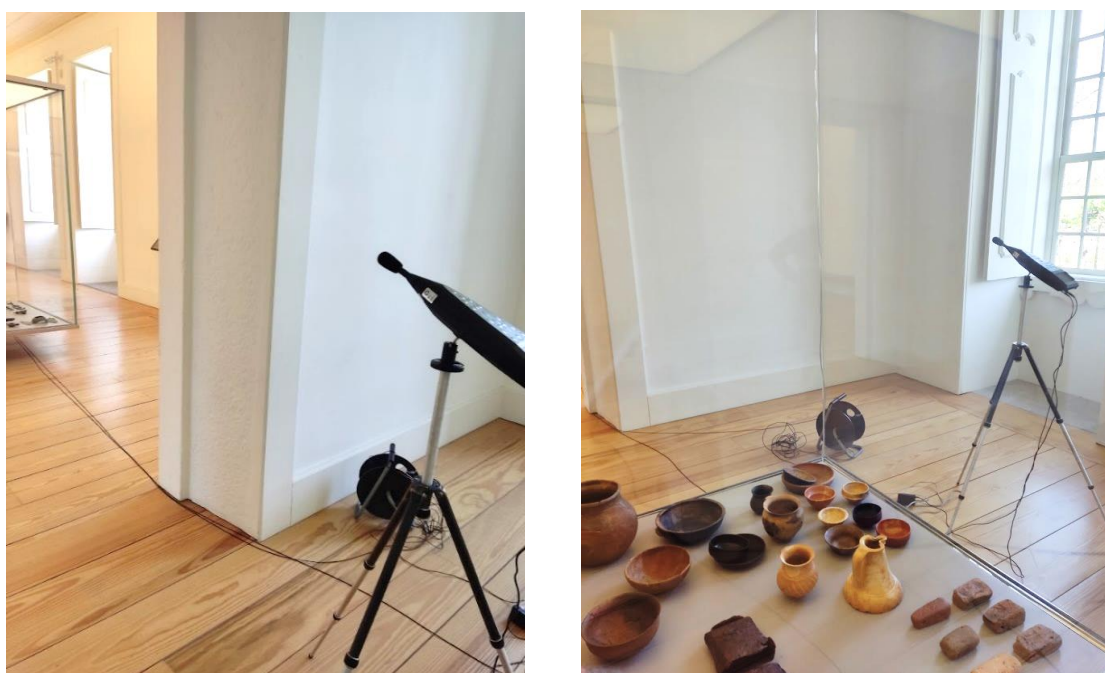


Fig. 4.17 – Diferentes posições do sonómetro na medição do ruído de fundo [Fotos da autora]

Neste tese não será possível efetuar o estudo com as curvas NC e NR de incomodidade, devido à inexistência de um sistema AVAC como já foi referido. Por isso, apenas foi efetuado o ensaio do nível sonoro do ruído de fundo sem visitantes. De acordo com o livro “Acústica Ambiental e de Edifícios, de A. P. Oliveira de Carvalho, o valor limite que se deve considerar para museus deverá ser o mesmo que se utiliza para as escolas, correspondendo a 40 dB(A), valor também tomado nos estudos do Museu Nacional de Soares dos Reis e no Museu de Serralves.

4.5.2. METODOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO

Com as janelas e as portas fechadas, foi colocado o sonómetro ponderado para o Filtro A para a banda de frequências de 1/3 de oitava, nas mesmas posições em que tinha sido colocado na medição do Tempo de Reverberação, em que um dos pontos estava localizado no eixo central de cada uma das salas e o outro ponto na parte lateral das vitrinas de exposição (Fig. 4.18).

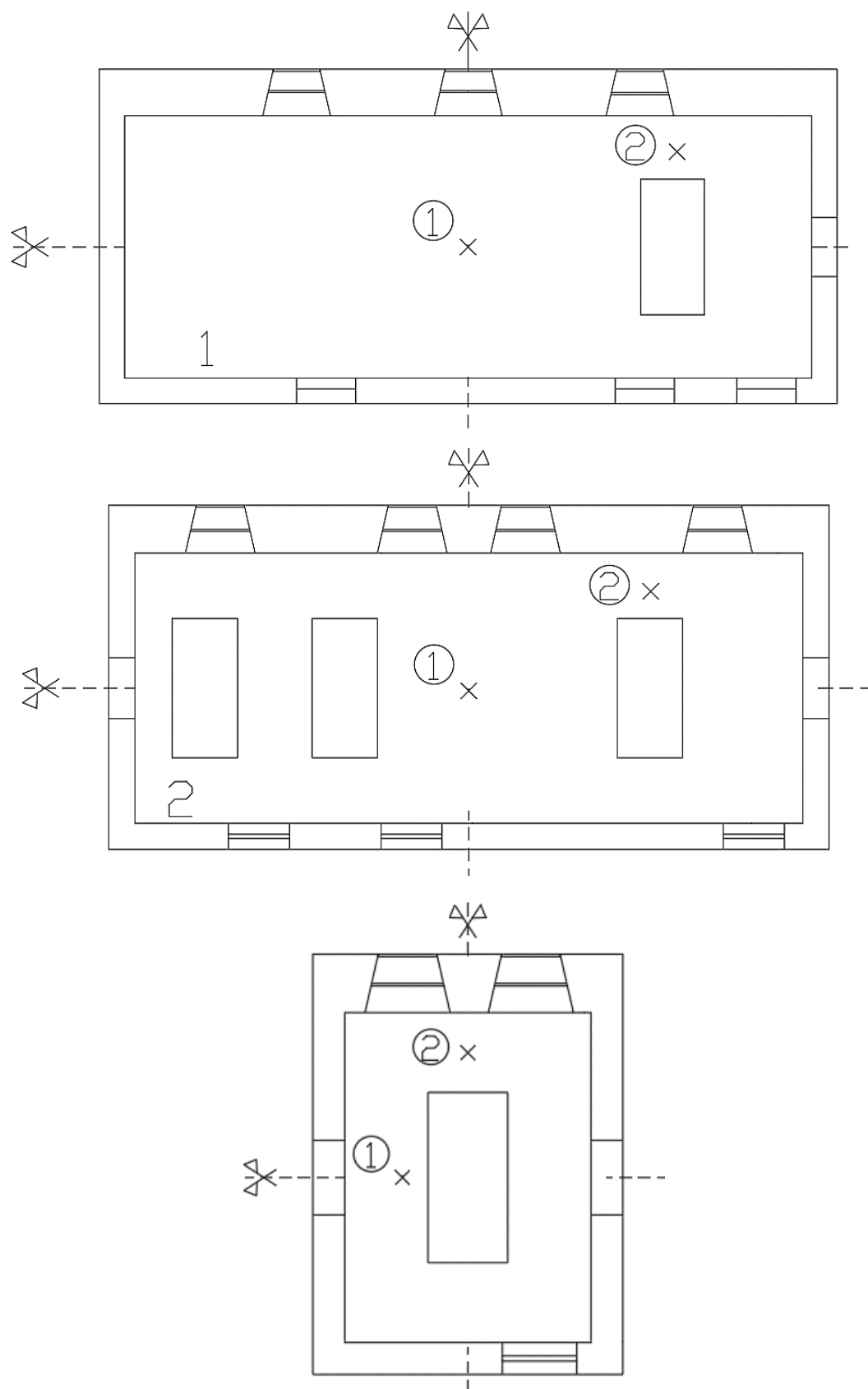


Fig. 4.18 – Medição do Ruído de Fundo: Representação esquemática das diferentes posições do sonómetro na sala 1 (em cima), na sala 2 (ao centro) e das salas 3, 4 e 5 (em baixo) do MMAP

5

RESULTADOS

5.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Os resultados do Tempo de Reverberação de cada uma das salas do Museu Municipal Abade Pedrosa apresentam-se no Quadro 5.1 para as bandas de 1/3 de oitava.

Quadro 5.1 – Valores do Tempo de Reverberação (s) medidos nas salas 1 a 5 do MMAP em bandas de 1/3 de oitava, dois pontos em cada sala: P1 e P2

Frequência (Hz)	Sala 1		Sala 2		Sala 3		Sala 4		Sala 5	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
100	2,24	2,23	3,30	3,57	3,79	4,09	4,29	4,49	3,71	3,88
125	1,82	1,80	3,04	3,19	3,34	4,29	4,22	5,01	3,57	3,79
160	1,58	1,81	3,19	2,87	3,22	4,07	4,37	4,73	2,94	4,04
200	1,77	2,05	3,02	2,62	2,44	3,08	3,44	4,42	2,81	3,74
250	1,93	2,11	3,27	2,95	2,97	2,84	2,96	3,82	3,29	3,32
315	2,04	2,30	2,91	3,50	3,17	2,65	3,21	3,59	3,42	3,47
400	2,29	2,23	3,03	3,27	2,88	3,42	3,38	3,35	3,25	3,61
500	2,29	2,23	3,01	3,22	3,66	3,29	3,15	3,11	3,69	3,41
630	2,45	2,67	3,28	3,34	3,47	3,46	3,49	3,16	3,30	3,52
800	2,77	2,57	3,85	3,42	3,66	3,48	4,43	4,01	4,04	3,56
1.000	2,55	2,75	3,97	3,56	4,83	4,88	4,77	4,96	4,12	3,63
1.250	2,59	2,68	3,63	3,54	4,66	4,43	4,58	4,69	4,19	3,83
1.600	2,62	2,46	3,58	3,78	3,43	3,44	3,88	3,87	3,94	3,41
2.000	2,34	2,47	3,53	3,28	3,28	3,20	3,64	3,48	3,45	3,60
2.500	2,35	2,31	3,06	3,05	3,24	3,10	3,30	3,31	3,13	3,36
3.150	2,21	2,18	2,83	3,22	3,06	3,14	3,34	3,36	3,03	3,19
4.000	1,81	1,92	2,41	2,50	2,61	3,15	2,65	2,65	2,58	2,56
5.000	1,54	1,59	2,00	1,98	2,13	2,38	2,77	2,65	2,51	2,44

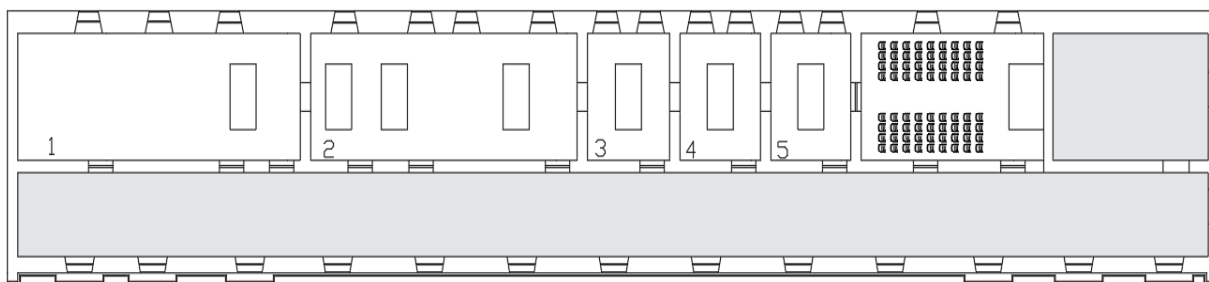
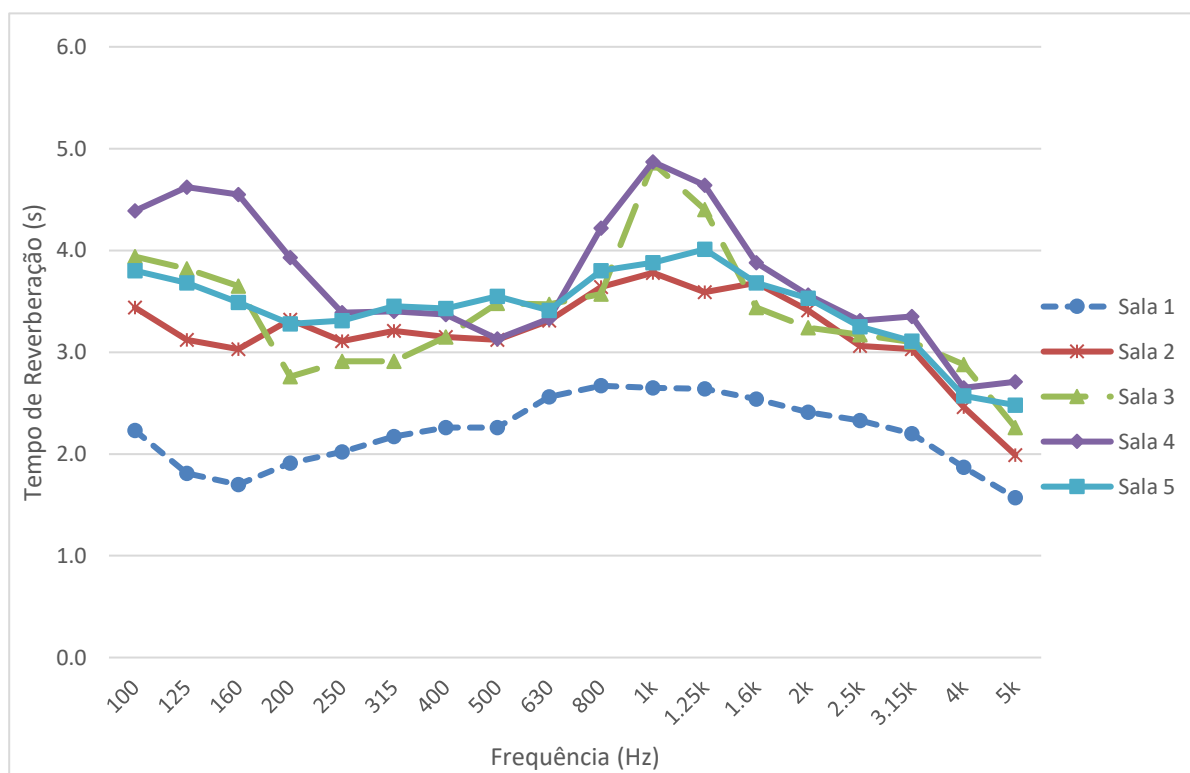


Fig. 5.1 – Planta do Museu Municipal Abade Pedrosa, Santo Tirso

Como se pode ver na Fig. 5.2, a sala 1 é a que apresenta a menor variabilidade entre os valores, com um ligeiro decréscimo até aos 160 Hz e um valor máximo na banda dos 800 Hz. A sala 2 e a sala 5, apesar de apresentarem volumetrias bastante diferentes, possuem valores de Tempo de Reverberação bastante semelhantes em todas as bandas de frequência, assim como uma variabilidade também idêntica. As salas 3 e 4 são as que contêm os maiores valores de Tempo de Reverberação. Na sala 4 existem dois picos bastante notórios: um na banda dos 125 Hz e outro na banda de 1.000 Hz. Nas frequências mais elevadas, todas as salas se aproximam com valores entre 1,6 e 2,7 s. A maior diferença encontra-se entre as salas 1 e 4 na gama dos 1.000 Hz, com um Tempo de Reverberação de 2,22 s.

Fig. 5.2 – Valores médios do TR em cada uma das salas de exposição do MMAP para as bandas de frequência de 1/3 oitava



Para efetuar um estudo mais interessante do ponto de vista da acústica e da legislação existente, foram organizados os valores para bandas de frequência de 1/1 oitava dos 125 aos 4000 Hz e apresentam-se também no Quadro 5.2 o Tempo de Reverberação médio para todas as salas. Para os valores ficarem em bandas de 1/1 oitava, foi necessário efetuar a média aritmética de cada uma das três bandas de frequências de 1/3 oitava.

A partir deste primeiro estudo dos valores do Tempo de Reverberação é possível verificar que os valores mais altos situam-se na banda de frequência de 1000 Hz, correspondentes aos Pontos 1 e 2 medidos na sala 4. Esta é uma das salas com menores dimensões e a vitrina instalada ocupa a maior parte do espaço, pelo que contribui para tempos de reverberação superiores devido à sua superfície altamente refletora. Esta sala é a que, por norma, apresenta os maiores tempos de reverberação para todas as bandas de frequência.

Quadro 5.2 – Valores do Tempo de Reverberação medidos nas salas 1 a 5 em bandas de 1/1 de oitava, o Tempo de Reverberação médio para cada sala e o Tempo de Reverberação médio para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz

Frequência (Hz)	Sala 1		Sala 2		Sala 3		Sala 4		Sala 5	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
125	1,88	1,95	3,18	3,21	3,45	4,15	4,29	4,74	3,41	3,90
250	1,91	2,15	3,07	3,02	2,86	2,86	3,20	3,94	3,17	3,51
500	2,34	2,38	3,11	3,28	3,34	3,39	3,34	3,21	3,41	3,51
1.000	2,64	2,67	3,82	3,51	4,28	4,26	4,59	4,55	4,12	3,67
2.000	2,44	2,41	3,39	3,37	3,32	3,25	3,61	3,55	3,51	3,46
4.000	1,85	1,90	2,41	2,57	2,60	2,89	2,92	2,89	2,71	2,73
TR _{médio} (s)	2,18	2,24	3,16	3,16	3,31	3,47	3,66	3,81	3,39	3,46
TR _{médio} [500, 1k, 2k]	2,47	2,49	3,44	3,39	3,65	3,63	3,85	3,77	3,68	3,55

Como se pode verificar pelo TR_{médio}, a sala que apresenta valores mais baixos é a 1, seguida pela sala 2, correspondendo aos espaços com maior volume do Museu. Novamente, a sala 4 é a que apresenta valores mais desfavoráveis, tanto no ponto 1 como no ponto 2. As salas 3 e 5 apresentam valores de TR médio semelhantes.

De acordo com a Fig. 5.3, os valores de Tempo de Reverberação apresentam um aumento até à banda de frequência de 1.000 Hz, decaindo depois nas bandas de frequências mais altas. O decréscimo nas altas frequências pode ser parcialmente justificado pela atenuação do ar, que é tanto mais significativa quanto maior o volume da sala. No entanto, entre as bandas de frequência de 1.000 e 4.000 Hz, os maiores decréscimos verificam-se na sala 4, uma das menores salas, o que poderá ser devido ao comprimento de onda destas frequências. Existe também uma diminuição significativa entre as bandas dos 125 e de 250 Hz na sala 3, o que poderá ser justificado pela presença de algum material com propriedades absorventes presente nesta sala e que atue tanto na banda de 250 Hz como nas bandas das altas frequências.

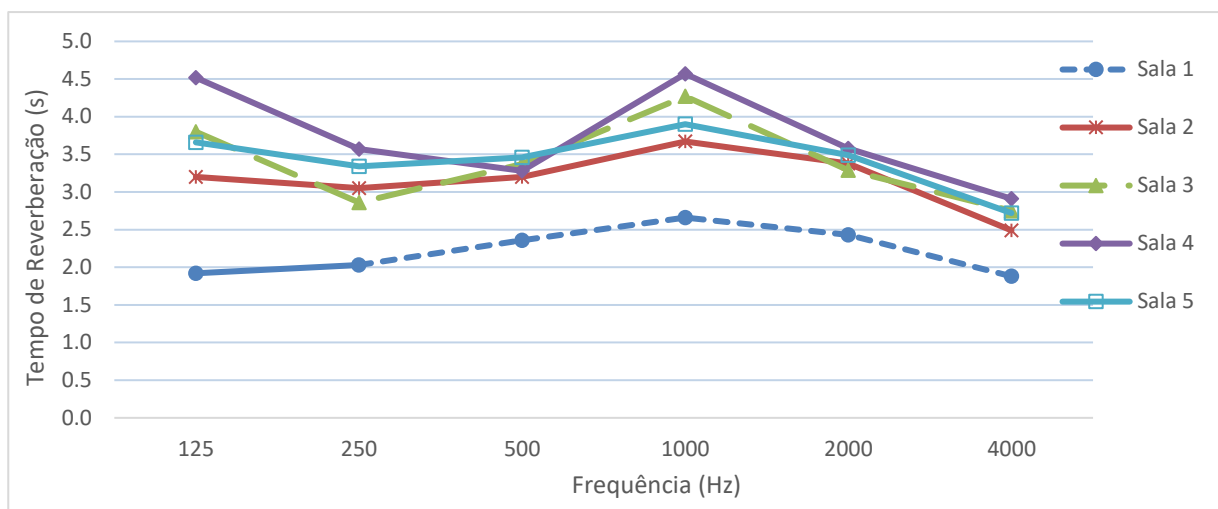
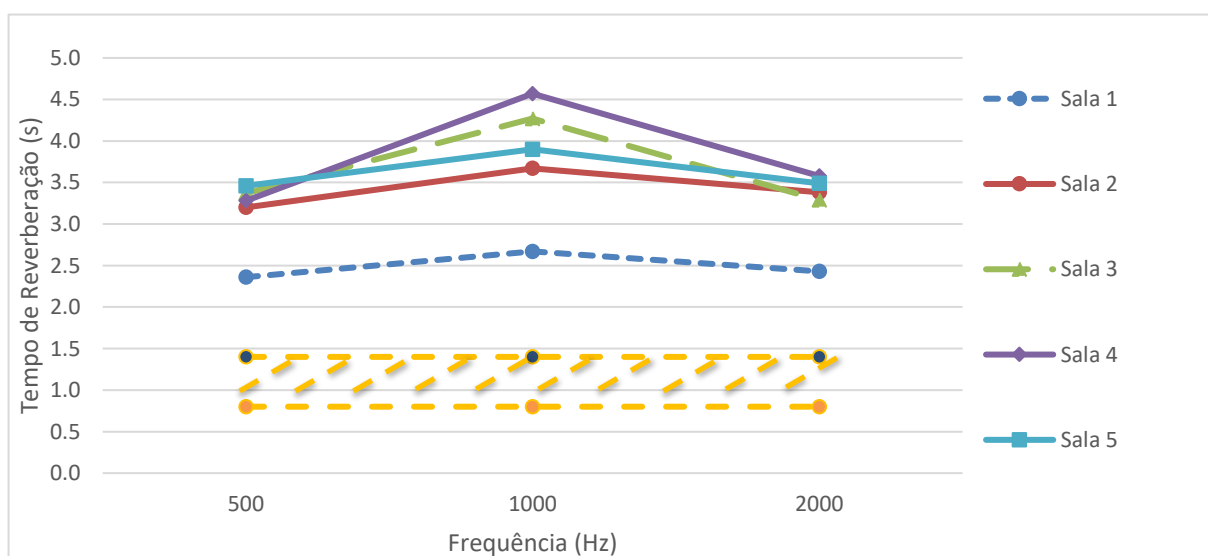


Fig. 5.3 – Valores médios do TR em cada uma das salas de exposição do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava

De acordo com o RRAE, e usando o limite para edifícios escolares ou similares, o Tempo de Reverberação é calculado nas bandas de oitava de 500, 1.000 e 2.000 Hz a partir da média aritmética dos valores correspondentes, como se verifica pela fórmula 5.1. Assim, foram organizados os valores de $TR_{\text{médio}}$ [500, 1k, 2k] Hz no Quadro 5.2, para de seguida, se proceder à sua interpretação.

$$TR_{\text{médio}} = \frac{TR(500 \text{ Hz}) + TR(1.000 \text{ Hz}) + TR(2.000 \text{ Hz})}{3} \text{ (s)} \quad (5.1)$$

É possível verificar a partir do $TR_{\text{médio}}$ [500, 1k, 2k Hz] que a sala 4 apresenta os maiores valores em comparação com as restantes salas, seguida da sala 3 e a sala 5. Estas três salas apresentam vitrinas idênticas e os seus volumes também são similares (119 m³, 121 m³, 118 m³ respetivamente), daí os seus valores serem os mais elevados. O TR [500, 1k, 2k Hz] varia entre 2,5 e 3,8 s, em que o menor valor se encontra na sala 1. Esta sala é a que apresenta os melhores valores de Tempo de Reverberação, mas continuam a estar longe dos valores máximos considerados ideais (entre 0,8 s e 1,4 s, a amarelo), como se pode verificar a partir da Fig. 5.4.



Quadro 5.4 – Valores de RASTI nas cinco salas de exposição do MMAP, a média em cada um dos pontos, a média da sala e o desvio-padrão em cada sala

5.2. RASTI

No Quadro 5.3 apresentam-se os resultados para os ensaios RASTI para cada uma das salas de exposição. O aparelho efetuou três medições em cada ponto e foi calculada a média aritmética por ponto e a média de cada uma das salas.

	Pontos	Medições			Média aritmética	Média da sala	Desvio-Padrão
		1	2	3			
Sala 1	1	0,52	0,52	0,52	0,52	0,44	0,05
	2	0,47	0,47	0,48	0,47		
	3	0,45	0,44	0,44	0,44		
	4	0,41	0,42	0,42	0,42		
	5	0,38	0,39	0,39	0,39		
	6	0,40	0,40	0,41	0,40		
Sala 2	1	0,49	0,49	0,49	0,49	0,47	0,05
	2	0,55	0,55	0,54	0,55		
	3	0,44	0,44	0,45	0,44		
	4	0,48	0,48	0,47	0,48		
	5	0,41	0,41	0,42	0,41		
	6	0,43	0,42	0,42	0,42		
Sala 3	1	0,53	0,53	0,52	0,53	0,55	0,02
	2	0,57	0,57	0,56	0,57		
Sala 4	1	0,53	0,53	0,54	0,53	0,55	0,02
	2	0,57	0,57	0,56	0,57		
Sala 5	1	0,51	0,51	0,51	0,51	0,53	0,02
	2	0,55	0,56	0,55	0,55		

A partir de uma primeira análise geral dos valores obtidos do RASTI, é possível verificar que à medida que estes se afastam da fonte sonora, vai existindo um decréscimo dos mesmos (Fig. 5.5). Isto significa que a inteligibilidade vai diminuindo à medida que aumenta a distância à fonte sonora, já que as ondas sonoras vão sendo atenuadas maioritariamente nas altas frequências devido à absorção do ar.

Também é possível verificar que os pontos que foram medidos atrás das vitrinas de exposição tiveram valores inferiores aos pontos medidos a partir da lateral de cada uma das salas, o que implica que as vitrinas têm um efeito prejudicial na inteligibilidade da palavra. Não existindo vitrinas que ocupem a sala toda, como é o caso da Sala 1, confirma-se que até ao ponto 4 os valores que se encontram no eixo central da sala, em frente à fonte sonora, apresentam valores mais elevados, enquanto que nas laterais são mais baixos. Isto acontece porque as ondas que chegam ao recetor são provenientes maioritariamente do campo direto, enquanto que nas laterais do campo reverberado. O ponto 5 já foi medido atrás de uma vitrina e, portanto, sofre os efeitos prejudiciais da mesma. Os picos que é possível visualizar na sala 2 a partir da Fig. 5.5 correspondem aos pontos medidos nas laterais da sala. Esta apresenta três vitrinas e os pontos 1, 3 e 5 foram medidos atrás das mesmas, sofrendo a inteligibilidade da palavra uma atenuação nessas áreas. Sem o efeito das vitrinas e, mesmo existindo o campo reverberado, as medições nos restantes pontos acabam por ser superiores

Nas salas mais pequenas o Ponto 1 fica atrás das vitrinas pelo que apresenta sempre valores inferiores aos pontos medidos na lateral (Ponto 2).

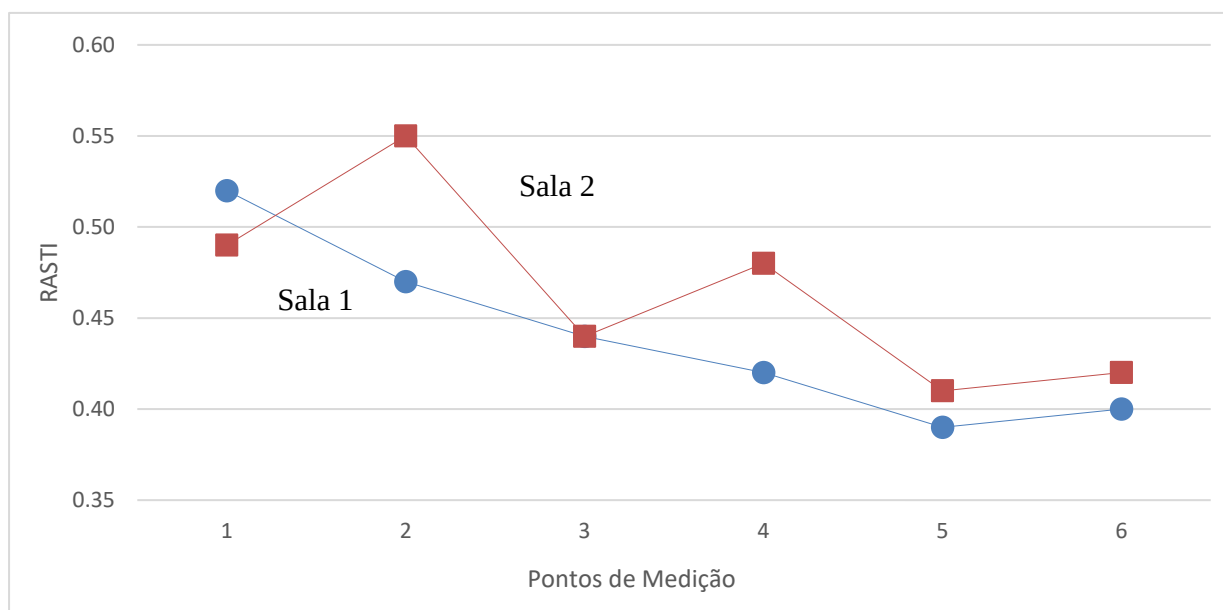


Fig. 5.5 – Valores médios de RASTI para as salas de exposição 1 e 2

Nas salas 3, 4 e 5 os valores foram todos semelhantes, já que as salas apresentam dimensões e vitrinas idênticas. No caso das salas 3 e 4 a média dos valores é igual nas duas salas, pelo que as retas que se visualizam no gráfico da Fig. 5.6 estão sobrepostas. Comparativamente às salas 1 e 2 de maiores dimensões, estas apresentam valores de RASTI superiores de uma forma geral, pelo que a inteligibilidade da palavra também é melhor nestas três salas.

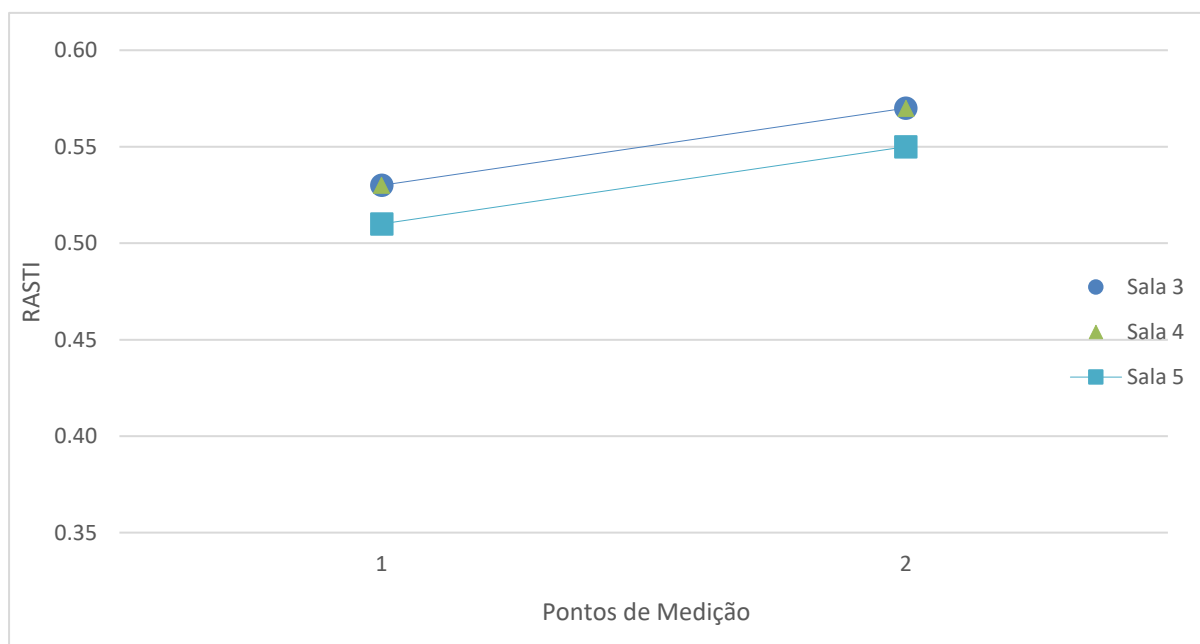


Fig. 5.6 – Valores médios de RASTI para as salas de exposição 3, 4 e 5

Passando para uma análise mais específica e examinando os valores da sala 1, conclui-se que os dois primeiros pontos, mais próximos da fonte sonora, apresentam valores considerados “aceitáveis”, enquanto que os restantes já se encontram na gama de valores “pobres”. A média total da sala é de 0,44, pelo que se considera que a sala tem um valor de RASTI considerado “pobre”. Esta trata-se de uma sala ampla e com o maior volume entre todas as salas. Apesar dos valores do Tempo de Reverberação desta sala serem bastante inferiores aos das restantes, estes ainda se encontram bastante acima do valor recomendável para museus (entre 0,8 e 1,4 s), o que implica que um som que seja emitido nesta sala vai demorar a extinguir-se, o que por sua vez, faz com que a inteligibilidade da palavra também diminua.

Na sala 2, os pontos 1, 3 e 4 encontram-se na sua maioria com valores considerados “aceitáveis”, enquanto que os restantes pontos são considerados “pobres”. A média total da sala é de 0,47, pelo que se considera que a sala tem um valor de RASTI considerado “aceitável”. Apesar de possuir três vitrinas (ao contrário da sala 1 que apresenta apenas uma), a sala 2 apresenta uma inteligibilidade ligeiramente superior à da sala 1. Apesar das vitrinas interferirem na propagação das ondas diretas, as dimensões da sala, por serem inferiores, podem ter alguma interferência nos valores ligeiramente mais elevados do RASTI, não obstante o facto de possuir um Tempo de Reverberação superior.

As salas 3, 4 e 5 são as que apresentam os maiores valores em todos os pontos de medição, mas mesmo assim são considerados apenas “aceitáveis”. As médias totais das salas são bastante semelhantes, pelo que se considera que as salas têm valores de RASTI considerados “aceitáveis”. Trata-se das salas que possuem os maiores Tempos de Reverberação e, por sua vez, menor absorção sonora, mas possuem volumes cerca de três vezes inferiores em comparação com as salas 1 e 2. Apesar da vitrina ocupar a maior parte do espaço da sala, a distância da fonte sonora aos pontos medidos acaba por ser inferior em comparação com os pontos medidos nas salas 1 e 2.

De uma forma geral, nota-se uma maior variação de valores quando o recetor se encontra atrás de uma vitrina, como é o caso do ponto 5 medido na sala 1. Em comparação com os pontos 1 e 3 medidos na mesma no eixo central da sala, apresenta um decréscimo de respetivamente 0,13 e 0,05 em relação aos pontos anteriormente referidos.

Na sala 2, os decréscimos que se verificam são idênticos entre cada um dos pontos centrais e cada um dos pontos laterais. Esta sala acaba por ser mais uniforme devido à presença das vitrinas desde o início, pelo que a interferência das mesmas também se sente logo desde o primeiro ponto medido. Nas salas 3, 4 e 5, as variações dos valores de RASTI não se prendem com a distância, mas sim com a presença da vitrina no ponto 1 de cada uma das salas.

As salas 1 e 2 são as que apresentam os maiores valores de desvio-padrão, enquanto que as salas 3, 4 e 5 apresentam todos valores bastante semelhantes e cerca de duas vezes inferiores aos das salas 1 e 2. Como as salas 1 e 2 são as que apresentam maior volumetria, a homogeneidade dos pontos medidos é inferior ao das salas com menos volume. Os pontos mais próximos são, por norma, os mais elevados e os pontos mais afastados apresentam um grande decréscimo, pelo que o desvio-padrão é tanto mais elevado quanto menos homogêneo for o parâmetro RASTI.

Globalmente, nenhuma das salas apresenta um valor de RASTI igual ou superior a 0,60, que para um museu, seria considerado o valor recomendável, permitindo não só boas condições de inteligibilidade nas visitas guiadas, mas também privacidade entre as salas, o que contribuiria para o conforto dos visitantes. Assim, nenhuma delas cumpre o requisito mínimo esperado para salas de exposição de um museu.

5.3. RUÍDO DE FUNDO

O Museu Municipal Abade Pedrosa não apresenta um sistema de AVAC nas salas de exposição e as medições foram efetuadas num dia em que este estava fechado ao público. Os valores que foram registados apresentam-se no Quadro 5.4. Foram medidos na banda de frequências de 1/3 de oitava.

Quadro 5.4 – Valores dos Níveis de Pressão Sonora do Ruído de Fundo (dB) nas cinco salas de exposição do MMAP para banda de frequência de 1/3 oitava

Frequência		Sala 1	Sala 2	Sala 3	Sala 4	Sala 5
L (dB)	12	55,4	58,8	55,6	52,2	53,8
	16	52,5	54,6	55,2	51,1	51,7
	20	49,8	50,7	48,2	48,4	50,1
	25	54,4	53,7	54,4	51,6	50,4
	31	53,5	53,1	49,1	45,5	45,9
	40	50,4	50,1	47,6	45,0	42,4
	50	49,6	49,9	48,2	49,3	47,7
	63	46,2	47,6	52,2	48,1	46,4
	80	49,4	49,0	44,4	41,9	45,7
	100	47,0	46,2	42,8	40,1	43,8
	125	45,2	44,3	46,0	41,6	42,4
	160	44,5	43,8	43,1	39,3	38,7
	200	45,6	44,9	41,2	37,6	36,6
	250	51,0	49,9	41,7	37,6	36,9
	315	48,3	47,3	41,3	37,1	36,1
	400	44,6	43,8	39,0	35,8	34,5
	500	40,8	40,5	39,5	36,8	35,6
	630	39,7	39,4	38,5	36,5	36,1
	800	41,4	41,1	40,7	39,6	39,0
	1k	42,7	42,6	42,1	42,3	40,7
	1,25k	41,5	41,3	40,7	40,5	38,4
	1,6k	38,3	37,8	38,2	37,1	34,8
	2k	38,7	38,1	37,3	35,8	33,5
	2,5k	36,7	36,2	35,7	33,7	31,1
	3,15k	33,8	33,2	31,0	29,2	27,3
	4k	34,6	33,8	29,6	26,4	23,8
	5k	33,5	32,6	29,9	25,7	22,0
	6k	28,6	27,7	24,0	22,0	18,9
	8k	24,4	23,7	21,1	18,1	17,0
	10k	22,8	21,9	18,6	15,7	17,0
	12k	19,6	18,9	15,9	14,1	15,9
	16k	15,4	14,8	12,6	12,0	12,0
	20k	16,6	16,4	15,1	15,4	14,8
Leq (dB)		62,8	64,0	62,1	59,3	59,6

A partir de uma primeira análise do Quadro 5.4, é possível verificar que o nível de pressão sonora nas baixas frequências é bastante superior comparativamente às altas frequências, justificando-se com o facto que a absorção do ar atua de forma mais expressiva nas altas frequências.

Na banda dos 500 Hz verifica-se uma diminuição dos valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo, seguido de um aumento na banda dos 1.000 Hz. As salas com os níveis de pressão sonora equivalente superiores são as salas 1 e 2.

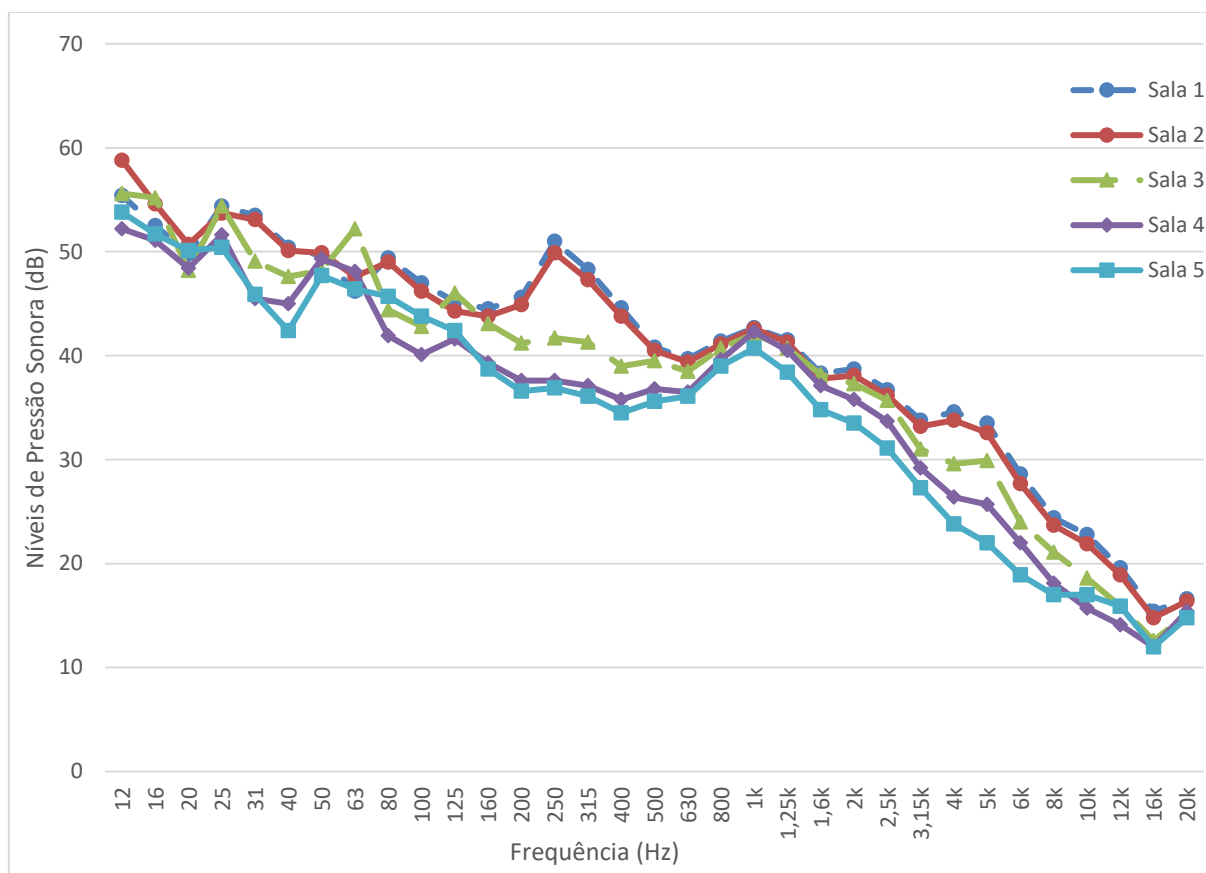


Fig. 5.7 – Valores dos níveis de pressão sonora de ruído de fundo para todas as salas de exposição na banda de 1/3 de oitava

Como se pode verificar pelo gráfico da Fig. 5.7, os níveis de pressão sonora do Ruído de Fundo têm uma tendência descendente à medida aumentam as gamas de frequências. Entre os 1.000 Hz e os 16.000 Hz, na generalidade as curvas apresentam um comportamento quase linear, apresentando um ligeiro aumento nos 20.000Hz.

A sala 1 e a sala 2 apresentam um pico característico na banda dos 250 Hz, que pode ter sido resultado das janelas abertas no corredor, sendo possível ouvir com clareza o ruído no exterior, tanto de música a tocar como de tráfego rodoviário. Também existe uma Escola Profissional Agrícola em frente às salas de exposição e, na altura em que se efetuaram as medições, estavam pessoas a sair das aulas.

Também de notar os picos mais pequenos nas salas 3, 4 e 5 para as frequências dos 25, 50 e 63 Hz, apresentando todas um comportamento semelhante para estas bandas, o que pode ser devido à iluminação presente nas vitrinas. No geral, as curvas das salas 4 e 5 são muito semelhantes para todas as bandas de frequências.

Para uma análise mais interessante, os valores anteriores foram ajustados para a sensibilidade do ouvido humano, ou seja, com um ajuste a partir do uso do Filtro A (Quadro 5.5), em que se dá mais importância às médias e altas frequências.

Quadro 5.5 – Valores de Ruído de Fundo nas cinco salas de exposição do MMAP para a banda de frequência de 1/3 oitava com a ponderação para o Filtro A

Frequência	Sala 1	Sala 2	Sala 3	Sala 4	Sala 5
LA (dB)	12	< 0,0	< 0,0	< 0,0	< 0,0
	16	< 0,0	< 0,0	< 0,0	< 0,0
	20	< 0,0	0,2	< 0,0	< 0,0
	25	9,7	8,4	9,7	6,9
	31	14,9	13,7	9,7	6,1
	40	15,8	15,5	13,0	10,4
	50	19,4	19,7	18,0	19,1
	63	20,0	21,4	26,0	21,9
	80	26,9	26,5	21,9	19,4
	100	27,9	27,1	23,7	21,0
	125	29,1	28,1	29,9	25,5
	160	31,1	30,4	29,7	25,9
	200	34,7	34,0	30,3	26,7
	250	42,4	41,3	33,1	29,0
	315	41,7	40,7	34,7	30,5
	400	39,8	39,0	34,2	31,0
	500	37,6	37,3	36,3	33,6
	630	37,8	37,5	36,6	34,6
	800	40,6	40,3	39,9	38,8
	1k	42,7	42,6	42,1	42,3
	1,25k	42,1	41,9	41,3	41,1
	1,6k	39,3	38,8	39,2	38,1
	2k	39,9	39,3	38,5	37,0
	2,5k	38,0	37,5	37,0	35,0
	3,15k	35,0	34,4	32,2	30,4
	4k	35,6	34,8	30,6	27,4
	5k	34,0	33,1	30,4	26,2
	6k	28,5	27,6	23,9	21,9
	8k	23,3	22,6	20,0	17,0
	10k	20,3	19,4	16,1	13,2
	12k	15,3	14,6	11,6	9,8
	16k	8,8	8,2	6,0	5,4
	20k	7,3	7,1	5,8	6,1
LAeq (dB)		51,7	51,1	49,3	48,1
				48,1	46,5

Como se pode verificar, os valores mais elevados nas baixas frequências foram os que se tornaram menos expressivos, visto que a sensibilidade do ouvido humano tem mais dificuldade em captar este tipo de frequências. Também as salas 3, 4 e 5 sofriam especialmente com o ruído do tráfego automóvel presente na Avenida Unisco Godiniz (Fig. 5.9), uma das principais ruas de circulação junto ao centro histórico e que dá tanto acesso à autoestrada como ao centro da cidade. O maior valor encontra-se na sala 1 para a banda de frequências de 1.000 Hz.

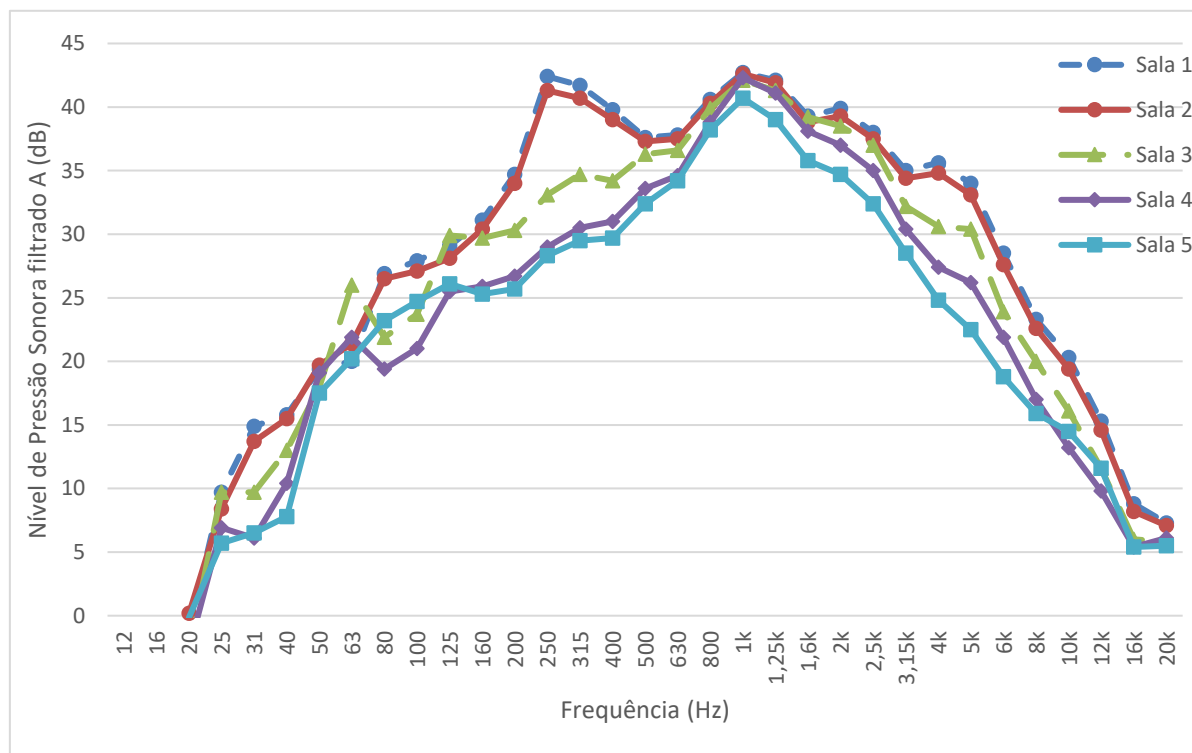


Fig. 5.8 – Valores dos níveis sonoros de ruído de fundo com a aplicação do Filtro A para todas as salas de exposição do MMAP na banda de 1/3 de oitava

Como se pode visualizar pela Fig. 5.8, os valores dos níveis sonoros apresentam ligeiras variações nas frequências mais elevadas. No entanto, para a banda de frequências de 31 Hz, é possível verificar que as salas 4 e 5 apresentam valores mais baixos do que as restantes salas. A sala 3, apesar de possuir um volume similar às salas 4 e 5, apresenta valores superiores e também foi nesta sala em que o ruído dos automóveis no exterior do museu era mais premente. No caso das salas 1 e 2, ambas apresentam um pico na banda de frequências dos 250 Hz e todas as salas apresentam valores superiores na banda de frequências de 1.000 Hz, que corresponde a uma das frequências que o ser humano tem mais sensibilidade.

Considerando que o valor limite utilizado neste estudo é de 40 dB(A), é possível verificar que há um incumprimento das salas 1 e 2 na frequência de 250 Hz e em todas as salas este valor é ultrapassado na banda dos 1.000 Hz. São, portanto, valores de níveis sonoros inapropriados de Ruído de Fundo.

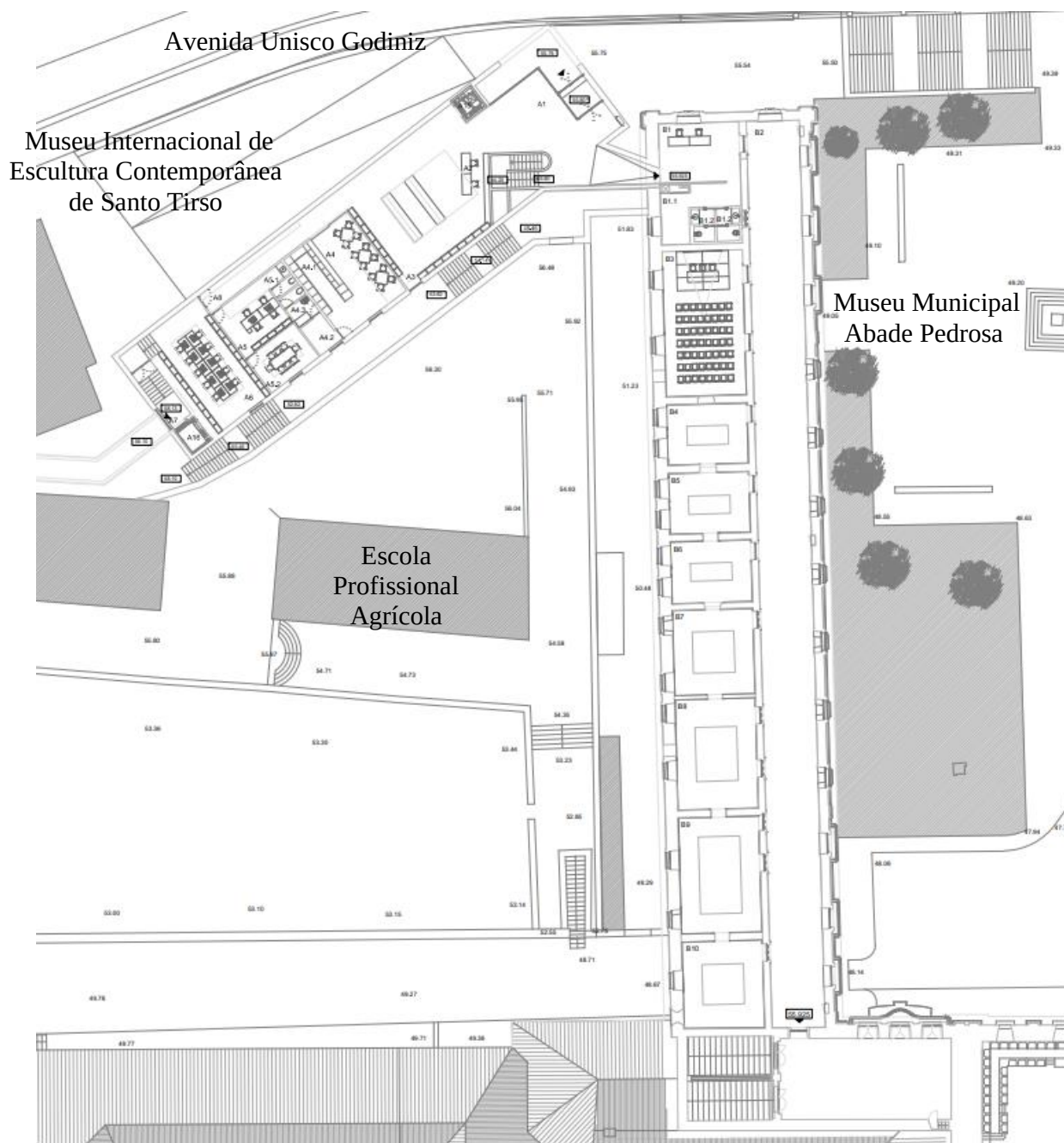


Fig. 5.9 – Planta de Enquadramento com os principais locais mencionados no estudo dos valores do Ruído de Fundo

6

ANÁLISE MULTICRITÉRIO

6.1. INTRODUÇÃO

Um método de análise multicritério pode ser bastante útil na caracterização global de espaços públicos, como é o caso dos museus. A chegada a um resultado promissor neste estudo pode não corresponder ao mesmo resultado que foi obtido seguindo critérios diferentes de avaliação, sendo, portanto, um método com carácter subjetivo. De forma resumida, para formular o algoritmo utilizado, será necessário [91]:

- Definir os parâmetros acústicos relevantes ao estudo;
- Definir o valor e o peso que cada critério de decisão acústico vai ter;
- Definir o tipo de algoritmo que se irá usar, assim como a forma de aplicação ao caso em estudo;
- Retirar conclusões do modelo proposto e da qualidade dos espaços estudados.

6.2. DEFINIÇÃO DO ALGORITMO

Para este estudo vai ser usado o Método Aditivo Simples, que se trata de uma fórmula linear de agregação dos valores pesados segundo a relevância que assumem para o decisor, podendo ser representada pela equação 6.1.

$$v(z_i) = \sum_{j=1}^{na} w_j * c_{i,j} \quad (6.1)$$

Em que v trata-se do resultado final, w é a importância relativa ou peso dado a cada critério, a cada atributo em estudo e c a cotação de cada um dos parâmetros avaliados. De forma simples, são atribuídos pesos aos parâmetros acústicos definidos de acordo com a importância que assumem para satisfazer o critério de avaliação (c) que estão relacionados [91].

Assim, os parâmetros acústicos que vão ser considerados para a avaliação da qualidade acústica global do museu (PQAM) são:

- Tempo de Reverberação (TR);
- Inteligibilidade da Palavra a partir do RASTI;
- Nível sonoro de Ruído de Fundo (LAeq);
- Nível sonoro de Ruído de Fundo com AVAC (LAeq (AVAC)).

Visto que o Tempo de Reverberação, o RASTI e a Nível Sonoro de Ruído de Fundo foram todos parâmetros ensaiados nesta tese, faz todo o sentido que sejam considerados para caracterizar acusticamente o museu pela análise multicritério. O Nível Sonoro de Ruído de Fundo com AVAC interessa considerar, pois os equipamentos podem ser responsáveis por um aumento significativo do ruído de fundo.

É necessário criar uma escala adequada para os diferentes critérios que são utilizados. Considerou-se que uma escala de 0 na 10 valores era adequada, visto que a análise multicritério realizada não se trata do foco desta tese e já permite uma caracterização adequada do museu, em que a cotação de 0 corresponde ao pior valor e 10 valores ao melhor.

Começando pelo Tempo de Reverberação (Quadro 6.1), atribuiu-se a classificação máxima de 10 valores no intervalo de [1,0; 1,2[visto que o intervalo admissível de valores que se considerou neste estudo foi [0,8; 1,4] e o valor médio neste intervalo é 1,1 s. Uma classificação (*CTR*) positiva é toda aquela que seja superior a 5 valores.

No caso do RASTI (Quadro 6.2), valores superiores a 0,60 são ideais para a inteligibilidade da palavra, mas também não é aconselhável atingir valores no intervalo [0,80; 1,0] pois dessa forma a privacidade da palavra é afetada negativamente. Optou-se por se atribuir classificação máxima ao intervalo de [0,60; 0,65[e a classificação de 0 valores para valores ou muito baixos ou muito elevados de RASTI.

Para o nível sonoro de ruído de fundo (Quadro 6.3), consideram-se que os valores iguais ou inferiores a 40 dB(A) são ideais, pelo que se atribui cotação máxima a esses valores. Para os restantes a classificação é tanto mais inferior quanto maiores os valores em estudo.

Ao contrário dos valores do TR, RASTI e LAeq, o LAeq (AVAC) não teve avaliação neste estudo, visto que o MMAP não possui equipamentos de ar condicionado nas salas de exposição, como já foi referido em capítulos anteriores. No entanto, isto não significa que valores não possam ser atribuídos a este parâmetro, visto que o auditório, com ligação às salas de exposição apresenta AVAC e também seria possível verificar o comportamento das salas se existisse este tipo de equipamentos.

Assim, considera-se que os valores recomendados para este parâmetro são todos os que não ultrapassem os 40 dB (A), que corresponde às curvas de incomodidade NC-35 e NR-35. A cotação CLA_{eq} (AVAC) é máxima para valores inferiores a 40 dB (A), tal como no LAeq (Quadro 6.4). Considera-se uma cotação média de 5 valores da contribuição deste parâmetro para o estudo.

Quadro 6.1 – Escala de cotações para o critério TR

TR [500, 1k, 2k] (s)	Cotação C _{TR}
[0,0 ; 0,2[	0
[0,2 ; 0,4[	2
[0,4 ; 0,6[	4
[0,6 ; 0,8[	6
[0,8 ; 1,0[	8
[1,0 ; 1,2[	10
[1,2 ; 1,4[	9
[1,4 ; 1,6[	9
[1,6 ; 1,8[	8
[1,8 ; 2,0[	8
[2,0 ; 2,2[	7
[2,2 ; 2,4[	7
[2,4 ; 2,6[	6
[2,6 ; 2,8[	5
[2,8 ; 3,0[	4
[3,0 ; 3,2[	3
[3,2 ; 3,4[	2
[3,4 ; 3,8[	1
≥ 3,8	0

Quadro 6.2 – Escala de cotações para o critério RASTI

RASTI médio	Cotação C _{RASTI}
[0,0 ; 0,10[	0
[0,10 ; 0,15[	0
[0,15 ; 0,20[	1
[0,20 ; 0,25[	2
[0,25 ; 0,30[	3
[0,30 ; 0,35[	4
[0,35 ; 0,40[	5
[0,40 ; 0,45[	6
[0,45 ; 0,50[	7
[0,50 ; 0,55[	8
[0,55 ; 0,60[	9
[0,60 ; 0,65[	10
[0,65 ; 0,70[	9
[0,70 ; 0,75[	8
[0,75 ; 0,80[	7
[0,80 ; 0,85[	5
[0,85 ; 0,90[	3
[0,90 ; 0,95[	1
[0,95 ; 1,00]	0

Quadro 6.3 – Escala de cotações para o critério LAeq

LAeq (dB)	Cotação C _{LAeq}
≤ 40	10
]40 ; 42[	9
[42 ; 44[	8
[44 ; 46[	7
[46 ; 47[	6
[47 ; 48[	5
[48 ; 49[	4
[49 ; 50[	3
[50 ; 51[	2
[51 ; 52[	1
≥ 52	0

Quadro 6.4 – Escala de cotações para o critério LAeq (AVAC)

LAeq (AVAC) (dB)	Cotação C _{LAeq (AVAC)}
≤ 40	10
]40 ; 42[	9
[42 ; 44[	8
[44 ; 46[	7
[46 ; 47[	6
[47 ; 48[	5
[48 ; 49[	4
[49 ; 50[	3
[50 ; 51[	2
[51 ; 52[	1
≥ 52	0

Definidos os critérios e as cotações de cada parâmetro, é necessário atribuir os pesos a cada um, considerando a sua influência na acústica do museu. Para o Tempo de Reverberação é dado um peso de 40%, pois é o parâmetro mais influencia a qualidade acústica dos espaços, possuindo, neste caso, valores bastante elevados.

O RASTI, sendo um parâmetro também com bastante influência nos museus devido à importância da inteligibilidade da palavra para as visitas guiadas, atribui-se um peso de 35%. Para o LAeq (AVAC) atribui-se um peso de 15%, visto que, considerando estudos efetuados no Museu de Serralves e no Museu Nacional de Soares dos Reis, existiam aumentos significativos nos níveis de pressão sonora de ruído de fundo quando estes dispositivos se encontravam em funcionamento.

Os restantes 10% atribuem-se ao LAeq como se pode verificar no Quadro 6.5. Assim, o Parâmetro da Qualidade Acústica de Museus (PQAM) pode ser expresso pela equação 6.2.

Quadro 6.5 – Peso de cada critério considerado no algoritmo

Critério	Peso (%)
TR	40
RASTI	35
LAeq	10
LAeq (AVAC)	15

$$PQAM = 0,40 \times C_{TR} + 0,35 \times C_{RASTI} + 0,10 \times C_{LAeq} + 0,15 \times C_{LAeq (AVAC)} \quad (6.2)$$

O mais interessante desta análise trata-se da conversão dos resultados PQAM para uma escala subjetiva de avaliação a partir da conversão das escalas, como se demonstra no Quadro 6.6. Todos os resultados inferiores a 5 valores são considerados “Maus” ou “Péssimos”, enquanto que superiores a 5 trata-se dos valores que é desejável atingir.

Quadro 6.6 – Escala subjetiva aplicada aos valores do Parâmetro da Qualidade Acústica de Museus quando aplicado o algoritmo

PQAM	Classificação
[0 ; 2,5[	<i>Péssimo</i>
[2,5 ; 5[	<i>Mau</i>
[5 ; 6[	<i>Suficiente</i>
[6 ; 8[	<i>Bom</i>
[8 ; 10]	<i>Excelente</i>

6.3. RESULTADOS

A partir da definição de todos os dados, é de forma simples que se aplica o algoritmo ao problema proposto. Todos os dados se encontram de forma resumida no Quadro 6.7, assim como os resultados obtidos. Como se pode verificar, globalmente as salas não apresentam uma boa qualidade acústica, sendo, no entanto, resultados previsíveis considerando os resultados dos ensaios já comentados no Capítulo 5. A sala que apresenta os únicos resultados positivos, mas mesmo assim inseridos apenas na categoria “Suficiente” é a sala 1, com um PQAM de 5,4 valores, seguida pela sala 3 e a sala 5, ambas com 4,6 valores (já inseridas na categoria “Mau”). Aquando a visita ao Museu, a sensação foi que todas as salas apresentavam comportamentos semelhantes, não se distinguindo subjetivamente se umas apresentavam uma qualidade acústica melhor que outras.

No caso das salas 2 e 4, os resultados são considerados “Maus” com valores globais de PQAM de 3,7 e 4,3 respetivamente, os valores mais baixos que se verificaram. As salas 3, 4 e 5 apresentam valores bastantes próximos uns dos outros, diferenciando-se apenas por uma questão de décimas. A pior sala avaliada é a 2, pois apresenta elevados valores de TR e LAeq, o que contribui para cotações baixas nesses parâmetros.

Quadro 6.7 – Resultados do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus a partir da aplicação do algoritmo e resultados convertidos à escala subjetiva das diferentes salas de exposição do MMAP

	TR	CTR	RASTI	CRASTI	LAeq	CLAeq	LAeq (AVAC)	CLAeq (AVAC)	PQAM	Resultado
Sala 1	2,48	6	0,44	6	51,7	1	n.a.	5	5,4	<i>Suficiente</i>
Sala 2	3,42	1	0,47	7	51,1	1	n.a.	5	3,7	<i>Mau</i>
Sala 3	3,64	1	0,55	9	49,3	3	n.a.	5	4,6	<i>Mau</i>
Sala 4	3,81	0	0,55	9	48,1	4	n.a.	5	4,3	<i>Mau</i>
Sala 5	3,62	1	0,53	8	46,5	6	n.a.	5	4,6	<i>Mau</i>

n.a. – não avaliado *in situ*

A partir da variação do LAeq (AVAC), foi possível verificar a influência deste parâmetro no resultado do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus. Considerando que os dispositivos AVAC teriam um comportamento excelente, ou seja, que os níveis de ruído produzidos por estes sistemas não influenciariam de forma substancial o LAeq das salas de exposição, apresentam-se os resultados obtidos no Quadro 6.8.

Neste caso, o que se verifica é que a qualidade acústica subjetiva das salas melhorou bastante na generalidade dos casos. A sala 1 passou de uma classificação “Suficiente” para “Bom”, com um PQAM de 6,1. As salas 3, 4 e 5 também obtiveram uma classificação superior, passando para “Suficiente”. A sala 2 é a única que não obteve uma classificação diferente apesar do aumento do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus, visto que o Tempo de Reverberação e o Nível Sonoro de Ruído de Fundo apresentarem cotações baixas.

Quadro 6.8 – Resultados do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus a partir da aplicação do algoritmo e resultados convertidos à escala subjetiva das diferentes salas de exposição do MMAP

	TR	CTR	RASTI	CRASTI	LAeq	CLAeq	LAeq (AVAC)	CLAeq (AVAC)	PQAM	Resultado
Sala 1	2,48	6	0,44	6	51,7	1	n.a.	10	6,1	<i>Bom</i>
Sala 2	3,42	1	0,47	7	51,1	1	n.a.	10	4,5	<i>Mau</i>
Sala 3	3,64	1	0,55	9	49,3	3	n.a.	10	5,4	<i>Suficiente</i>
Sala 4	3,81	0	0,55	9	48,1	4	n.a.	10	5,1	<i>Suficiente</i>
Sala 5	3,62	1	0,53	8	46,5	6	n.a.	10	5,3	<i>Suficiente</i>

n.a. – não avaliado *in situ*

É também de notar que o LAeq (AVAC) é responsável por uma contribuição de 15% em cada uma das salas, fazendo toda a diferença no tipo de resultados obtidos. Sendo aplicado com subjetividade pela autora, é também interessante verificar quais seriam os resultados obtidos se este índice não fosse considerado. Neste caso, o LAeq passaria a ter uma contribuição de 25% em todas as salas (o que não deixa igualmente de ser uma soma subjetiva aplicada ao LAeq), como se pode verificar pela equação 6.3. Os resultados encontram-se no Quadro 6.9.

$$PQAM = 0,40 \times CTR + 0,35 \times CRASTI + 0,25 \times CLAeq \quad (6.3)$$

Como é possível comprovar pelo quadro 6.8, a sala 1 que apresentava um comportamento “Suficiente” passou para a categoria “Mau”, e tal como era esperado, todos os valores apresentaram um decréscimo, em alguns casos bastante significativo, com diferenças até 0,6 valores (na sala 1).

Quadro 6.9 – Resultados do Parâmetro de Qualidade Acústica de Museus a partir da aplicação do algoritmo e resultados convertidos à escala subjetiva das diferentes salas de exposição do MMAP

	TR	CTR	RASTI	CRASTI	LAeq	CLAeq	PQAM	Resultado
Sala 1	2,48	6	0,44	6	51,7	1	4,8	<i>Mau</i>
Sala 2	3,42	1	0,47	7	51,1	1	3,1	<i>Mau</i>
Sala 3	3,64	1	0,55	9	49,3	3	4,3	<i>Mau</i>
Sala 4	3,81	0	0,55	9	48,1	4	4,1	<i>Mau</i>
Sala 5	3,62	1	0,53	8	46,5	6	4,7	<i>Mau</i>

7

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MUSEUS

7.1. INTRODUÇÃO

A interpretação dos resultados obtidos nas medições efetuadas constitui, por si só, apenas uma parte da análise que pode ser efetuada ao Museu Municipal Abade Pedrosa. A comparação de resultados entre museus é bastante importante para obter uma perspetiva global de como medidas acústicas vão sendo implementadas neste tipo de espaços e se são suficientes. É também de notar que a abordagem que se efetua em museus tradicionais, já construídos há décadas quando não havia este tipo de preocupações acústicas, é diferente da que podem ser implementadas em museus modernos na fase de execução. Os materiais usados são diferentes, assim como a geometria dos espaços, que de acordo com a sua forma e volume necessitam de materiais responsáveis pela absorção do ruído excessivo que se possa vir a sentir. Os principais parâmetros acústicos objetivos que irão ser objeto de comparação são o Tempo de Reverberação, o RASTI e o nível sonoro do Ruído de Fundo, os mesmos parâmetros em que se obtiveram resultados nesta tese.

Como já foi referido no Capítulo 3, são poucos os estudos acústicos que têm sido efetuados em museus, pelo que apesar do Museu Municipal Abade Pedrosa se enquadrar na tipologia considerada tradicional, a comparação realizada neste estudo engloba museus tanto da tipologia tradicional como moderna.

Os museus que vão ser objeto de estudo neste capítulo, devido à similaridade dos ensaios realizados, como comparação ao Museu Municipal Abade Pedrosa são: de tipologia tradicional, o Museu Nacional de Soares dos Reis (Porto), o Museu Nacional de Arqueologia (Lisboa), o Museu de Arte Moderna de Kristinehamn (Suécia), o Museu Rahmi M. Koç, e o Museu Erimtan de Arqueologia e Artes (Turquia) e o Museu de Arqueologia de Florença (Itália); de tipologia moderna, o Museu de Serralves (Porto), o Museu Nacional da Islândia e o Novo Museu da Acrópole (Atenas).

Para obter os elementos necessários a este estudo adicional foi necessário: consultar as teses de mestrado da FEUP de Helder Gonçalves com o tema “A Acústica de Museus Modernos - estudo de Caso o Museu de Serralves (Porto)” [46] e de Luísa Garcia com o tema “A Acústica de Museus Tradicionais – Estudo de caso, o Museu Nacional Soares dos Reis (Porto)” [78]; a tese de mestrado da Universidade da Dinamarca desenvolvida por Guðrún Jónsdóttir intitulada “Museums Acoustics para o Museu Nacional da Islândia [80]; a publicação de Cemre Orhan e Semiha Yilmazer pela Universidade Bilkent com o tema “*Harmony of context and the built*

environment: Soundscapes in museum environments via GT” para os museus turcos [80]; e a publicação intitulada “*Museums- Energy Efficiency and Sustainability in Retrofitted and New Museum Buildings Handbook*” [46] para o Museu Nacional de Arqueologia em Lisboa, o Museu de Arte Moderna de Kristinehamn e o Novo Museu da Acrópole.

7.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Começou-se por se organizar os volumes dos diferentes espaços (Quadro 7.1) para se entenderem as diferenças espaciais entre eles. O volume, apesar de ser uma característica importante na acústica dos espaços, a qualidade dos mesmos não deve depender desta característica. Também são apresentados (nos trabalhos em que foi possível retirar os dados) os valores do Tempo de Reverberação, assim como a média global do museu.

Quadro 7.1 – Museus objeto de estudo neste capítulo, com as respetivas informações de volume, Tempo de Reverberação médio para as bandas de frequência de 500, 1000 e 2000 Hz, assim como o Tempo de Reverberação médio de cada um deles

MUSEU	ESPAÇOS	VOLUME (m ³)	TR [500, 1k, 2k] (s)	TR médio (s)
Museu Municipal Abade Pedrosa (Santo Tirso)	Sala 1	418	2,48	3,39
	Sala 2	394	3,42	
	Sala 3	121	3,64	
	Sala 4	119	3,81	
	Sala 5	118	3,62	
Museu Nacional de Soares dos Reis (Porto)	Sala 2	348	1,60	3,10
	Sala 5	507	2,60	
	Sala 7	990	5,10	
	Sala 16	709	3,10	
Museu Nacional de Arqueologia (Lisboa)	Galeria 1	-	3,40	3,40
Museu de Arte Moderna (Suécia)	Casa da Antiga Caldeira	3.000	4,50	4,50
Museu de Arqueologia de Florença	<i>Salone del Nicchio</i>	1.700	3,30	3,30
Museu de Serralves (Porto)	Sala 11	1.760	4,10	3,90
	Sala 12	1.350	3,80	
	Sala 14	1.070	3,80	
Museu Nacional da Islândia	<i>Arc Hall</i>	115	1,70	1,60
	<i>Gallery of Photography</i>	1.450	1,50	
Novo Museu da Acrópole (Atenas)	Galeria das Encostas	4.750	1,80	1,90
	Galeria Arcaica	10.115	2,10	
	Galeria Parthenon	-	1,70	

Como se pode verificar pelo Quadro 7.1, existe uma grande variedade nos volumes apresentados, variando desde 115 m³ no Museu Nacional da Islândia até 10.115 m³ no Novo Museu da Acrópole em Atenas. Quanto aos valores dos tempos de reverberação média [500, 1k, 2k], estes encontram-se entre 1,50 na *Gallery of Photography* (Museu Nacional da Islândia) e 5,10 na sala 7 do Museu Nacional de Soares dos Reis. O Museu Nacional da Islândia já sofreu algumas melhorias acústicas aquando a sua renovação extensiva em 2004, pelo que o facto de apresentar um valor mais baixo é expectável. No caso do Museu Nacional de Soares dos Reis, tinha já sido efetuada uma renovação em 1992 com projeto do arquiteto Fernando Távora.

De uma forma geral, visualizando apenas os TR médios, é possível verificar que o Museu Nacional da Islândia é o que apresenta um valor acusticamente mais positivo (1,60 s), enquanto que o Museu de Arte Moderna (Kristinehamn), com uma única medição, é o que apresenta o valor mais elevado, 4,50 s, seguido pelo Museu de Serralves com um valor de Tempo de Reverberação médio de 3,90 s. O Museu Municipal Abade Pedrosa é o quarto museu com o maior TR médio (Fig. 7.1).

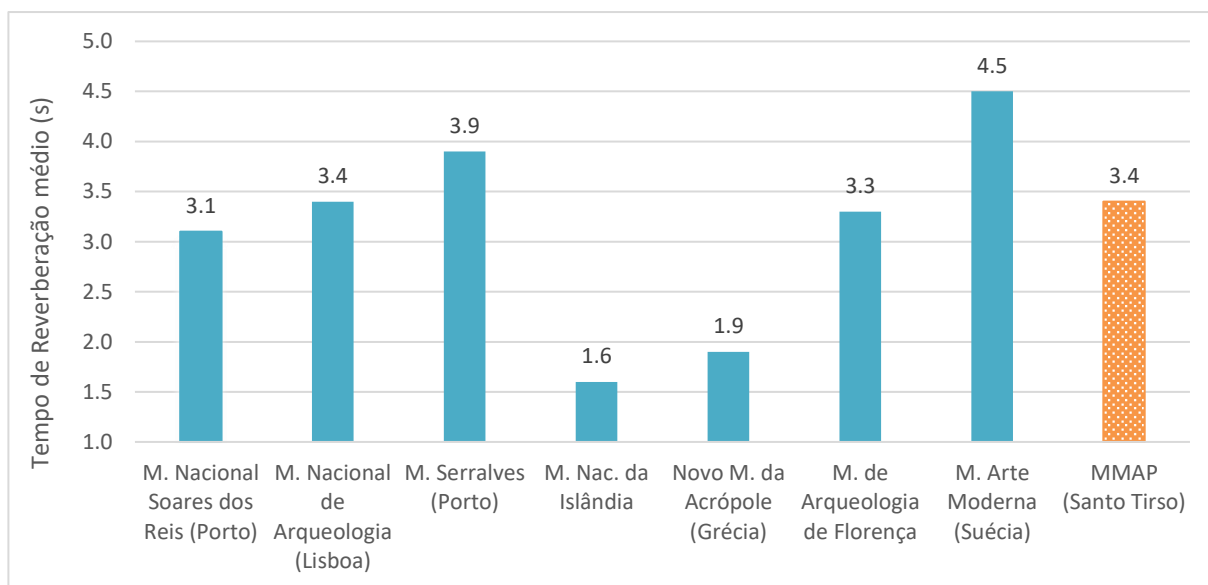


Fig. 7.1 – Comparação dos Tempos de Reverberação médios de todos os museus

Enquanto que os valores do Tempo de Reverberação do Museu Municipal Abade Pedrosa são todos similares entre as cinco salas, os valores das diferentes salas do Museu Nacional de Soares dos Reis apresentam uma grande variabilidade, desde 1,60 até 5,10 s, o máximo registado entre todos os museus. A sala 7 apresenta um valor bastante elevado devido à existência de superfícies altamente refletoras e num estilo moderno. Neste museu, é possível verificar uma relação entre o aumento do volume com o aumento do Tempo de Reverberação.

Nenhum dos museus cumpre os valores considerados ideais para o Tempo de Reverberação (entre 0,8 e 1,4 s), no entanto, os que ficam mais próximos são o Museu Nacional da Islândia e o Novo Museu da Acrópole, seguido do Museu Nacional de Soares dos Reis, este já muito mais distanciado dos primeiros referidos e com problemas bastante graves na sala 7.

7.3. RASTI

Para o RASTI, efetuou-se a comparação entre os três museus portugueses, visto não terem efetuado este tipo de ensaio nas restantes publicações. Como já se referiu anteriormente, a inteligibilidade da palavra em museus não pode ser excessiva, mas tem de apresentar boas condições para que seja possível entender tudo o que é dito em cada uma das salas.

Quadro 7.2 – Comparação dos valores de RASTI médio entre o Museu Municipal Abade Pedrosa, o Museu Nacional de Soares dos Reis e o Museu de Serralves

MUSEU	RASTI médio	
	Subjetivo	Objetivo
Museu Municipal Abade Pedrosa (Santo Tirso)		
Sala 1	Pobre	0,44
Sala 2	Aceitável	0,47
Sala 3	Aceitável	0,55 (Melhor)
Sala 4	Aceitável	0,55 (Melhor)
Sala 5	Aceitável	0,53
Museu Nacional de Soares dos Reis (Porto)		
Sala 2	Aceitável	0,53
Sala 5	Aceitável	0,47
Sala 7	Pobre	0,41
Sala 16	Aceitável	0,47
Museu de Serralves (Porto)		
Sala 11	Pobre	0,40 (Pior)
Sala 12	Pobre	0,42
Sala 14	Aceitável	0,45

Como se verifica no Quadro 7.2, os valores de RASTI encontram-se essencialmente entre as categorias consideradas “pobre” e “aceitável”. O Museu Municipal Abade Pedrosa é o que apresenta os maiores valores nas salas 3 e 4, enquanto que o valor menos favorável se encontra na sala 11 do Museu de Serralves. As salas com maior volumetria são as que, no geral, possuem valores de inteligibilidade da palavra inferiores.

Considerando um valor recomendável igual ou superior a 0,60, são as salas 3 e 4 do Museu Municipal Abade Pedrosa que mais se aproximam deste valor, seguidas da sala 2 do mesmo museu e das salas 5 e 16 do Museu Nacional de Soares dos Reis.

7.4. RUÍDO DE FUNDO

Para se proceder a uma comparação acertada dos níveis sonoros do ruído de fundo dos diversos museus, estes foram organizados no Quadro 7.3 de forma a que se consiga visualizar a variação dos níveis sonoros para todas as frequências (sempre que seja possível). No caso do Museu Municipal Abade Pedrosa, o Museu Nacional de Soares dos Reis e o Museu de Serralves (MS) estão expostos os valores nas condições em que não existiam visitantes e o AVAC se encontrava desligado. No caso dos museus turcos, os únicos valores que foi possível obter foi os níveis sonoros de ruído de fundo com visitantes. No Museu Nacional da Islândia evidenciam-se os valores com o sistema de AVAC ligado.

Quadro 7.3 – Níveis sonoros do Ruído de Fundo para as bandas de frequência de 1/1 oitava de todos os museus que possuem dados relevantes para este estudo

Frequência	LA (dB)										LAeq (dB)
	16	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Museu Municipal Abade Pedrosa (Porto)											
Sala 1	2,5	13,5	20,2	29,7	42,5	37,8	42,7	39,7	35,6	21,4	47,5
Sala 2	4,6	13,1	21,6	28,8	41,4	37,5	42,6	39,1	34,8	22,7	47,0
Sala 3	5,2	19,1	26,2	30,5	33,2	36,5	42,1	38,5	30,6	20,1	45,1
Sala 4	1,1	5,5	22,1	26,1	29,1	33,8	42,3	36,8	27,4	17,1	44,2
Sala 5	1,7	5,9	20,4	26,9	28,4	32,6	40,7	34,5	24,8	16,0	42,6
Museu Nacional de Soares dos Reis (Porto)											
Sala 2	0,7	17,0	31,7	32,4	31,3	32,3	36,9	35,1	28,5	15,3	41,5
Sala 5	-	2,6	12,7	16,4	18,1	19,7	23,6	24,0	20,0	14,1	29,1
Sala 7	-	4,4	16,3	17,1	19,3	24,2	22,1	18,9	17,2	13,2	28,5
Sala 16	-	15,4	30,7	34,2	30,9	34,4	37,5	34,8	27,7	15,8	42,0
Museu de Serralves (Porto)											
Sala 11	-	7,9	9,4	18,1	19,6	26,5	28,7	22,9	15,7	11,7	32,0
Sala 12	-	-	2,6	9,2	13,6	18,7	19,8	17,7	14,4	11,5	24,8
Sala 14	-	8,0	14,4	15,9	19,8	19,4	19,0	16,8	14,3	11,3	25,8
Museu Nacional da Islândia (com AVAC)											
Arc Hall	-	21,0	30,0	39,0	37,0	37,0	37,0	33,0	30,0	-	44,0
GoP	-	7,0	17,0	20,0	32,0	29,0	30,0	27,0	25,0	-	36,0
Museu Rahmi M. Koç (Turquia) (com visitantes)											
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95,6
Museu Erimtan de Arqueologia e Artes (Turquia) (com visitantes)											
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	94,4

Como se pode verificar a partir dos níveis de pressão sonora filtrados A, o Museu Municipal Abade Pedrosa apresenta na sua generalidade os valores mais elevados de ruído de fundo, destacando-se proeminentemente dos restantes principalmente na banda dos 1.000 Hz. É um Museu que apresenta muitas janelas ao longo das salas de exposição e também pelo corredor de ligação às mesmas, sendo mais suscetível de captar ruídos vindos do exterior. O Museu de Serralves, que se destacou por ser o segundo museu com maior Tempo de Reverberação, apresenta aqui valores baixos de níveis sonoros de ruído de fundo, destacando-se em comparação com os restantes museus.

No entanto, este está enquadrado num espaço em que as vias de comunicação da cidade encontram-se longe das salas de exposição do museu, contribuindo para que o nível sonoro de ruído de fundo seja inferior ao dos restantes museus. No geral, os seus valores apresentam todos pouca variabilidade entre as diferentes salas.

O Museu Nacional de Soares dos Reis (Fig. 7.2) apresenta valores ligeiramente inferiores aos do Museu Municipal Abade Pedrosa. Como se tratam ambos de museus tradicionais, é interessante efetuar um estudo mais cuidado entre os dois museus. Em todas as bandas de frequências, verifica-se que o Museu Nacional Soares dos Reis (MNSR) possui valores inferiores aos do Museu Municipal Abade Pedrosa. As salas 3, 4 e 5 deste museu possuem um volume em muito inferior às salas menores do Museu Nacional Soares dos Reis e apresentam valores de ruído de fundo em muito superiores. As salas 2 de ambos os museus apresentam volumetrias bastante semelhantes e uma diferença de 6 dB(A) entre elas. No caso do Museu Nacional da Islândia, apesar de se encontrar com o sistema AVAC ligado, apresenta um valor de ruído de fundo de 36 dB(A) na *Gallery of Photography*, inferior a qualquer um dos valores que se pode ver no Museu Municipal Abade Pedrosa. Mesmo o seu valor mais elevado no *Arc Hall* é apenas superior ao da sala 5 do MMAP, ambos os espaços com volumetrias também bastantes semelhantes.

Tanto no Museu Rahmi M. Koç como no Museu Erimtan de Arqueologia e Artes na Turquia, apenas foi possível obter os valores do ruído de fundo equivalente, destacando-se devido aos seus valores muito elevados. Não foi possível também obter informação se o sistema de AVAC se encontrava ligado na altura, mas os valores foram medidos durante um fim de semana em que ambos os museus tiveram uma grande afluência. Considerando que se localizam no centro histórico da cidade, é usual que a construção seja antiga, tendo o Museu Rahmi M. Koç sido fundado em 1994 e Museu Erimtan de Arqueologia e Artes em 2015, transformando três casas antigas de Ancara no que hoje se conhece como o museu.

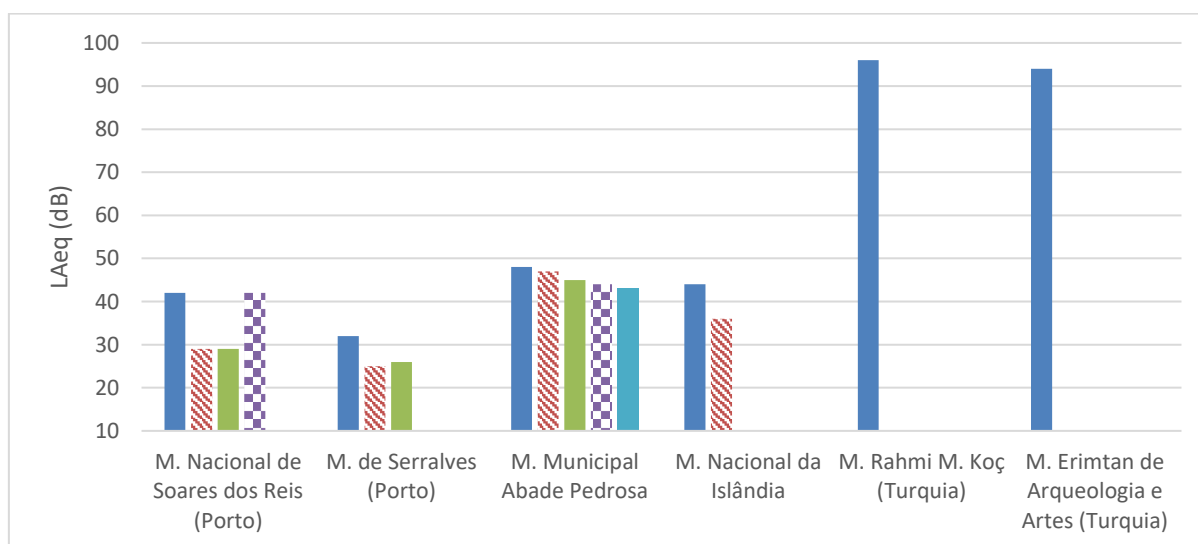


Fig. 7.2 – Comparação dos níveis sonoros de Ruído de Fundo médios de todos os museus

Considerando 40 dB(A) como o valor máximo admissível para o ruído de fundo neste tipo de espaços proposto neste estudo, o Museu de Serralves é o único que cumpre em todas as suas salas. O Museu Nacional de Soares dos Reis apresenta apenas as salas 5 e 7 com boas condições e no Museu Nacional da Islândia a *Gallery of Photography* também cumpre o limite.

8

PROPOSTA DE MELHORIAS ACÚSTICAS

8.1. INTRODUÇÃO

Como já tem vindo a ser referido nos capítulos anteriores, um espaço com uma boa acústica traz bastantes benefícios na medida em que, no caso dos museus, é possível uma maior concentração na apreciação das obras de arte, uma maior privacidade em equilíbrio com uma boa perceção da palavra e um ambiente sereno.

O MMAP apresenta as condições ideais para se proporem medidas acústicas adequadas ao espaço, de forma a que este se torne ainda mais atrativo para os visitantes que possam ter interesse na história arqueológica de Santo Tirso. Mesmo sem visitantes, o Museu apresenta valores elevados de Tempo de Reverberação, RASTI e de níveis sonoros do Ruído de Fundo, tratando-se de uma problema generalizado por todo o espaço. Tendo sido reconvertido a partir de uma antiga hospedaria monástica, apresenta corredores muito extensos, pés-direitos elevados, as salas de exposição acopladas umas às outras e janelas grandes.

Considerando as principais fragilidades apresentadas nos Capítulos 5 e 7, efetuou-se um estudo com algumas sugestões que podem, porventura, melhorar a acústica do MMAP. Com o objetivo de otimizar o Tempo de Reverberação, utilizou-se a Fórmula de Sabine (8.1) para determinar a absorção sonora equivalente de cada uma das salas de exposição (Quadro 8.1).

$$T = \frac{0,16 V}{A} \text{ (s)} \quad (8.1)$$

Como se pode verificar, as salas 3, 4 e 5 apresentam valores de absorção sonora muito reduzidos, destacando-se das restantes salas. Foi calculada a absorção ideal para todas as salas e bandas de frequência de 1/3 de oitava considerando um valor de TR_{médio} ideal de 1,1 s.

No entanto, é nas salas de maior volume que mais se notam as diferenças entre a Absorção considerada ideal e a Absorção que o Museu apresenta atualmente, já que para conseguir um valor de Tempo de Reverberação admissível, com um volume elevado, a absorção também terá de ser maior do que nas salas com menor volumetria. A sala 2, apesar de não ser a maior, possui os défices de absorção mais elevados pois possui Tempos de Reverberação mais elevados do que os da sala 1.

Quadro 8.1 – Valores de Tempo de Reverberação médio e absorção sonora real equivalente das salas de exposição do Museu vs Tempos de Reverberação ideais e absorção sonora necessária para que o TR atinja o valor aconselhável

Salas	Volume (m³)	Frequência (Hz)					
		125	250	500	1.000	2.000	4.000
Sala 1	418	1,92	2,03	2,36	2,66	2,43	1,88
Sala 2	394	3,20	3,05	3,20	3,67	3,38	2,46
Sala 3	121	3,80	2,86	3,37	4,27	3,29	2,75
Sala 4	119	4,52	3,57	3,28	4,57	3,58	2,91
Sala 5	118	3,66	3,34	3,46	3,90	3,49	2,72
Absorção real Ab,r (m²)							
Sala 1		34,8	32,9	28,3	25,1	27,5	35,6
Sala 2		19,7	20,7	19,7	17,2	18,7	25,6
Sala 3		5,1	6,8	5,7	4,5	5,9	7,04
Sala 4		4,2	5,3	5,8	4,2	5,3	6,5
Sala 5		5,2	5,7	5,5	4,8	5,4	6,9
TR ideais (s)		[0,4 - 1,8]					
Absorção ideal Ab,i (m²)							
Sala 1		60,8					
Sala 2		57,3					
Sala 3		17,6					
Sala 4		17,3					
Sala 5		17,2					
Défice de Absorção = Ab,i – Ab,r (m²)							
Sala 1		26,0	27,9	32,5	35,7	33,3	25,2
Sala 2		37,6	36,6	37,6	40,1	38,7	31,7
Sala 3		12,5	10,8	11,9	13,1	11,7	10,56
Sala 4		13,1	12,0	11,5	13,1	12,0	10,8
Sala 5		12,0	11,5	11,7	12,3	11,8	10,2

8.2. PROPOSTAS DE CORREÇÃO ACÚSTICA

O principal objetivo trata-se da correção acústica das salas de exposição do MMAP. No entanto, visto que o edifício tem um caráter histórico bastante evidenciado, mudanças no interior que tenham impacto estético na arquitetura existente poderá não ser a solução correta quando este tipo de decisões forem tomadas.

Algo que é necessário refletir logo desde início são as principais características dos elementos construtivos do museu que podem ser alterados. Como se verificou no Capítulo 4, os pés-direitos de todas as salas são extremamente elevados (4,15 m). O teto é formado por madeira já existente pintado com uma tinta branca. A diminuição do pé-direito, não sendo uma condição necessária ou obrigatória para a diminuição dos Tempos de Reverberação, poderia contribuir para a mesma.

Os painéis de madeira com propriedades acústicas apresentam já uma aplicação bastante generalizada em espaços públicos, o que poderia contribuir para a melhoria do Tempo de Reverberação, mas estes são normalmente fixados em estruturas leves, pelo que, em princípio,

seria necessário retirar a madeira existente e construir uma estrutura própria para fixar os painéis, sendo uma solução mais cara.

Algo que também pode contribuir para a melhoria das propriedades acústicas do espaço seria a colocação de uma alcatifa no pavimento ou uma passadeira que rodeasse as vitrinas de exposição, pois permitiria isolar o ruído provocado pelos passos dos visitantes e, desta forma, não era necessário efetuar qualquer tipo de substituição ou levantamento do pavimento existente em madeira. No entanto, esteticamente seria uma solução que iria prejudicar o espaço em termos visuais, pelo que, apesar das suas propriedades de absorção sonora terem sido estudadas, esta não será considerada como uma solução final, visto que existem alternativas que não interferem com a estética do espaço.

Como também já foi referido, o ruído do exterior, principalmente da Avenida Unisco Godiniz, é bastante notório. Mesmo com as janelas fechadas é possível ouvir o ruído do tráfego. Visto que as janelas possuem grandes dimensões e caixilharias tradicionais em madeira, o uso de janelas duplas pelo interior constitui, porventura, uma melhor solução.

Resumindo, poderia ser aplicado em todas as salas de exposição uma solução de teto suspenso com a aplicação de um material com um bom desempenho de absorção sonora; uma alcatifa que cubra todo o pavimento ou apenas as áreas em que exista a circulação de visitantes; ou a colocação de janelas duplas, pelo interior. Uma solução de teto suspenso seria a que menos ia interferir na estética das salas de exposição.

Considerando que se efetua uma escolha de materiais para aplicar no teto, estes foram selecionados com base não só nas exigências acústicas das diferentes salas, principalmente nas bandas de frequência de 500, 1.000 e 2.000 Hz, mas também tendo em consideração o valor estético do espaço (Fig. 8.1). Assim, para efetuar uma comparação e optar pelo melhor tipo de solução para o museu, foram selecionados os seguintes materiais:

- *FARBOACOUSTIC*;
- *BASWAphon*;
- *SonaSpray*;
- *Sonacoustic*;
- *StoSilent Top Finish* ou *StoSilent Panel A-Tec Top Finish*.

A *FARBOACOUSTIC* é uma argamassa de absorção sonora à base de gesso com o objetivo de diminuir a reverberação dos espaços. É adequada para espaços públicos e pode ser aplicada em qualquer tipo de superfície. *BASWAphon* consiste numa solução de painéis de lã mineral constituídos por várias camadas, variando entre 30 e 70 mm. É constituído por poros microscópicos, pelo que o acabamento final é liso.

O *SonaSpray* é um produto feito com um teor de 80% de produtos reciclados e é aplicado pela pulverização em áreas em que seja necessário melhorar o tempo de reverberação. O sistema *Sonacoustic* é idêntico ao *BASWAphon*, mas a espessura é bastante inferior, de 25 mm.

Para o sistema *StoSilent Top Finish* ou *StoSilent Panel A-Tec Top Finish* são perfis de aço galvanizado para fixar os painéis que, por si só, não apresentam um acabamento liso. É necessário posteriormente aplicar uma massa da mesma marca para que o acabamento seja esteticamente melhor.

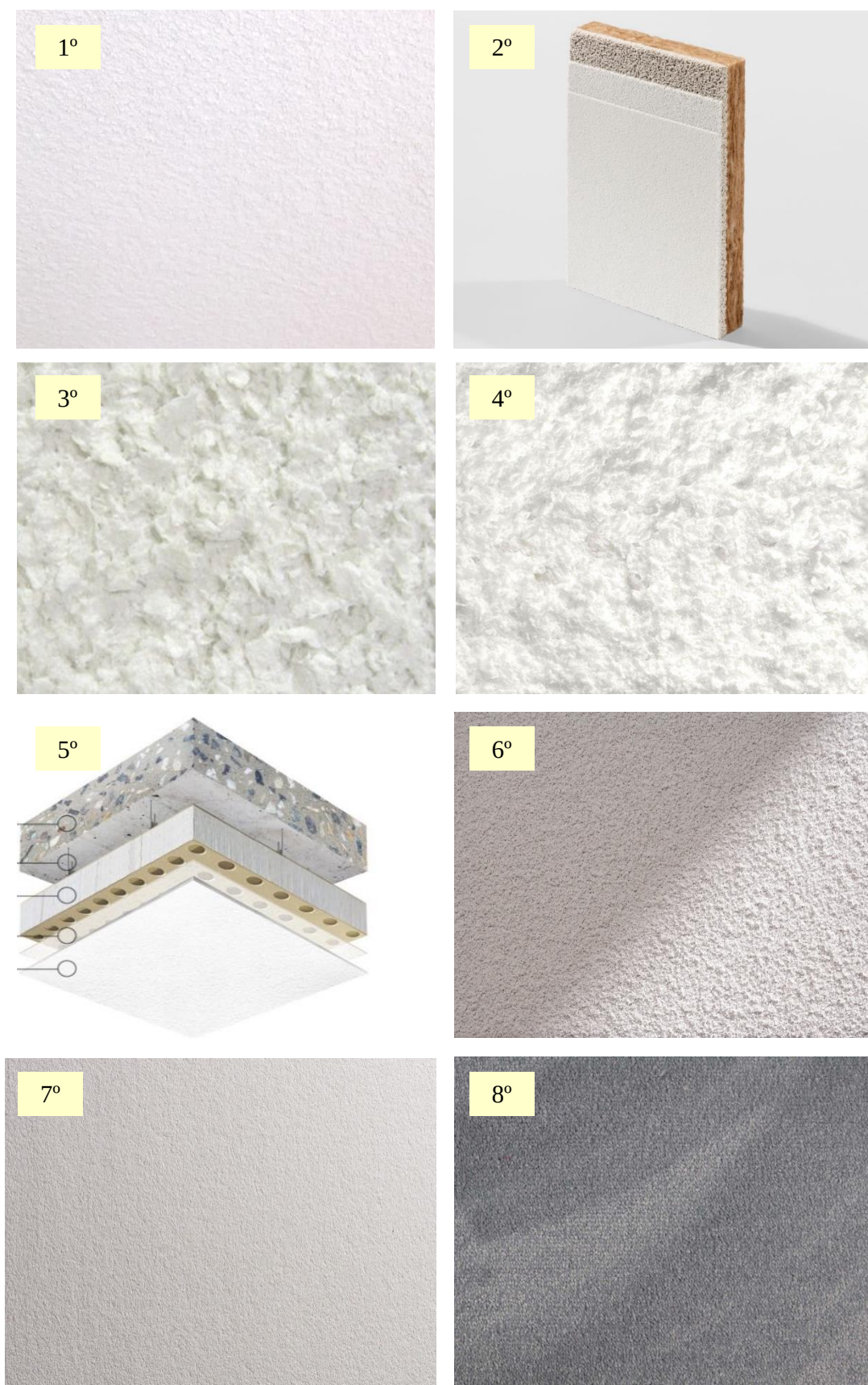


Fig. 8.1 – 1° Farboacoustic, 2° BASWAphon, 3° SonaSpray K-13, 4° SonaSpray FC, 5° Sonacoustic, 6° StoSilent Top Finish, 7° Stosilent Panel A-Tec Top Finish, 8° Alcatifa Densa

No Quadro 8.2 apresentam-se valores dos coeficientes de absorção sonora aproximados dos materiais existentes neste momento nas salas do museu e coeficientes dos materiais anteriormente mencionados. Também se apresentam os valores de absorção adicional que se verificaria pela aplicação dos diferentes materiais propostos.

A partir destes dados, é possível verificar que na banda de frequência dos 125 Hz muitas vezes não se verificam melhorias na absorção da sala, enquanto que nas bandas de frequências de 500, 1.000 e 2.000 Hz, as gamas em que se queria atuar mais, em princípio as melhorias verificadas serão significativas.

Quadro 8.2 – Coeficientes de absorção sonora existentes no museu e propostos [27, 46, 92, 93, 94]

		α_{125}	α_{250}	α_{500}	$\alpha_{1.000}$	$\alpha_{2.000}$	$\alpha_{4.000}$	NRC
No Museu (valores aproximados)								
M1	Madeira com caixa de ar 25 mm	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,09
M2	Soalho (sobre vigas de madeira c/ caixa de ar	0,15	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15
M3	Vidro	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05
Propostas								
P1	Alcatifa densa	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,55
P2	<i>Farboacoustic</i> (45 mm)	0,15	0,55	0,85	0,85	0,85	0,85	0,80
P3	<i>BASWAphon Classic</i> (30 mm)	0,16	0,47	1,01	0,95	0,83	0,82	0,70
P4	<i>BASWAphon Classic</i> (40 mm)	0,14	0,45	1,01	1,02	0,91	0,85	0,85
P5	<i>BASWAphon Classic</i> (70 mm)	0,45	1,06	1,02	0,93	0,86	0,72	0,95
P6	<i>SonaSpray fc</i> (25 mm)	0,22	0,38	0,88	1,16	1,15	1,12	0,90
P7	<i>K-13 Standard</i> (50mm)	0,31	0,89	1,01	1,06	1,08	1,00	1,00
P8	<i>Sonacoustic</i> (25 mm)	0,65	0,91	0,78	0,77	0,85	0,88	0,80
P9	<i>StoSilent Panel Top Finish</i>	0,50	0,65	0,60	0,55	0,55	0,65	0,60
P10	<i>StoSilent Panel A-Tec Top Finish</i>	0,60	0,75	0,70	0,75	0,80	0,75	0,75
Variação dos coeficientes de absorção ($\Delta\alpha$)								
De M2 para P1		-0,07	0,04	0,47	0,59	0,61	0,63	0,40
De M1 para P2		-0,04	0,41	0,76	0,79	0,79	0,80	0,71
De M1 para P3		-0,03	0,33	0,92	0,89	0,77	0,77	0,61
De M1 para P4		-0,05	0,31	0,92	0,96	0,85	0,80	0,76
De M1 para P5		0,26	0,92	0,93	0,87	0,80	0,67	0,86
De M1 para P6		0,03	0,24	0,79	1,10	1,09	1,07	0,81
De M1 para P7		0,12	0,75	0,92	1,00	1,02	0,95	0,91
De M1 para P8		0,46	0,77	0,69	0,71	0,79	0,83	0,71
De M1 para P9		0,31	0,51	0,51	0,49	0,49	0,60	0,51
De M1 para P10		0,41	0,61	0,61	0,69	0,74	0,70	0,66

8.3. PREVISÃO DE MELHORIAS

Considerando a área de cada uma das salas, efetuou-se o cálculo do acréscimo de Absorção Sonora Equivalente e, utilizando a Fórmula de Sabine, calcularam-se os novos tempos de reverberação previsíveis para cada uma das salas.

Quadro 8.3 – Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 1 do MMAP

	Absorção sonora equivalente adicional (m ²)							
	Área (m ²)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
Alcatifa densa	101	-7	4	47	60	62	64	
Farboacoustic (45 mm)	101	-4	41	77	80	80	81	
BASWAphon Classic (30 mm)	101	-3	33	93	90	78	78	
BASWAphon Classic (40 mm)	101	-5	31	93	97	86	81	
BASWAphon Classic (70 mm)	101	26	93	94	88	81	68	
SonaSpray fc (25 mm)	101	3	24	80	111	110	108	
K-13 Standard (50mm)	101	12	76	93	101	103	96	
Sonacoustic (25 mm)	101	46	78	70	72	80	84	
StoSilent Panel Top Finish	101	31	52	52	49	49	61	
StoSilent Panel A-Tec Top Finish	101	41	62	62	70	75	71	
	Volume (m ³)	Tempo de Reverberação previsível (s)						TR [500, 1k, 2k] (s)
Alcatifa densa	419	2,4	1,8	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8
Farboacoustic (45 mm)	419	2,2	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
BASWAphon Classic (30 mm)	419	2,1	1,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
BASWAphon Classic (40 mm)	419	2,3	1,0	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6
BASWAphon Classic (70 mm)	419	1,1	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
SonaSpray fc (25 mm)	419	1,8	1,2	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
K-13 Standard (50mm)	419	1,4	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Sonacoustic (25 mm c/ caixa de ar)	419	0,8	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7
StoSilent Panel Top Finish	419	1,0	0,8	0,8	0,9	0,9	0,7	0,9
StoSilent Panel A-Tec Top Finish	419	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
TR atual (s)		2,2	3,2	3,4	3,8	3,7	3,4	-

Quadro 8.4 – Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 2 do MMAP

	Absorção sonora equivalente adicional (m ²)							
	Área (m ²)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
Alcatifa densa	95	-7	4	45	56	58	60	
<i>Farboacoustic</i> (45 mm)	95	-4	39	72	75	75	76	
<i>BASWAphon Classic</i> (30 mm)	95	-3	31	87	85	73	73	
<i>BASWAphon Classic</i> (40 mm)	95	-5	29	87	91	81	76	
<i>BASWAphon Classic</i> (70 mm)	95	25	87	88	83	76	64	
<i>SonaSpray fc</i> (25 mm)	95	3	23	75	105	104	102	
<i>K-13 Standard</i> (50mm)	95	11	71	87	95	97	90	
<i>Sonacoustic</i> (25 mm)	95	44	73	66	67	75	79	
<i>StoSilent Panel Top Finish</i>	95	29	48	48	47	47	57	
<i>StoSilent Panel A-Tec Top Finish</i>	95	39	58	58	66	70	67	
	Volume (m ³)	Tempo de Reverberação previsível (s)						TR [500, 1k, 2k] (s)
Alcatifa densa	394	4,8	2,6	1,0	0,9	0,8	0,7	0,9
<i>Farboacoustic</i> (45 mm)	394	4,0	1,1	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
<i>BASWAphon Classic</i> (30 mm)	394	3,7	1,2	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6
<i>BASWAphon Classic</i> (40 mm)	394	4,2	1,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>BASWAphon Classic</i> (70 mm)	394	1,4	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6
<i>SonaSpray fc</i> (25 mm)	394	2,8	1,4	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6
<i>K-13 Standard</i> (50mm)	394	2,0	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6
<i>Sonacoustic</i> (25 mm c/ caixa de ar)	394	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
<i>StoSilent Panel Top Finish</i>	394	1,3	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	1,0
<i>StoSilent Panel A-Tec Top Finish</i>	394	1,1	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
TR atual (s)		2,2	3,2	3,4	3,8	3,7	3,4	-

Quadro 8.5 – Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 3 do MMAP

	Absorção sonora equivalente adicional (m ²)							
	Área (m ²)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
Alcatifa densa	29	-2	1	14	17	18	18	
<i>Farboacoustic</i> (45 mm)	29	-1	12	22	23	23	23	
<i>BASWAphon Classic</i> (30 mm)	29	-1	10	27	26	22	22	
<i>BASWAphon Classic</i> (40 mm)	29	-1	9	27	28	25	23	
<i>BASWAphon Classic</i> (70 mm)	29	8	27	27	25	23	19	
<i>SonaSpray fc</i> (25 mm)	29	1	7	23	32	32	31	
<i>K-13 Standard</i> (50mm)	29	3	22	27	29	30	28	
<i>Sonacoustic</i> (25 mm)	29	13	22	20	21	23	24	
<i>StoSilent Panel Top Finish</i>	29	9	15	15	14	14	17	
<i>StoSilent Panel A-Tec Top Finish</i>	29	12	18	18	20	21	20	
	Volume (m ³)	Tempo de Reverberação previsível (s)						TR [500, 1k, 2k] (s)
Alcatifa densa	121	6,3	2,4	1,0	0,9	0,8	0,8	0,9
<i>Farboacoustic</i> (45 mm)	121	4,9	1,0	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
<i>BASWAphon Classic</i> (30 mm)	121	4,6	1,2	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6
<i>BASWAphon Classic</i> (40 mm)	121	5,3	1,2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>BASWAphon Classic</i> (70 mm)	121	1,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>SonaSpray fc</i> (25 mm)	121	3,2	1,4	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6
<i>K-13 Standard</i> (50mm)	121	2,3	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6
<i>Sonacoustic</i> (25 mm c/ caixa de ar)	121	1,0	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6	0,8
<i>StoSilent Panel Top Finish</i>	121	1,4	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	1,0
<i>StoSilent Panel A-Tec Top Finish</i>	121	1,1	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
TR atual (s)		2,2	3,2	3,4	3,8	3,7	3,4	-

Quadro 8.6 – Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 4 do MMAP

	Absorção sonora equivalente adicional (m ²)							
	Área (m ²)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
Alcatifa densa	29	-2	1	14	17	18	18	
Farboacoustic (45 mm)	29	-1	12	22	23	23	23	
BASWAphon Classic (30 mm)	29	-1	10	27	26	22	22	
BASWAphon Classic (40 mm)	29	-1	9	27	28	25	23	
BASWAphon Classic (70 mm)	29	8	27	27	25	23	19	
SonaSpray fc (25 mm)	29	1	7	23	32	32	31	
K-13 Standard (50mm)	29	3	22	27	29	30	28	
Sonacoustic (25 mm)	29	13	22	20	21	23	24	
StoSilent Panel Top Finish	29	9	15	15	14	14	17	
StoSilent Panel A-Tec Top Finish	29	12	18	18	20	21	20	
	Volume (m ³)	Tempo de Reverberação previsível (s)						TR [500, 1k, 2k] (s)
Alcatifa densa	119	8,8	2,9	1,0	0,9	0,8	0,8	0,9
Farboacoustic (45 mm)	119	6,3	1,1	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
BASWAphon Classic (30 mm)	119	5,7	1,3	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6
BASWAphon Classic (40 mm)	119	6,9	1,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
BASWAphon Classic (70 mm)	119	1,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6
SonaSpray fc (25 mm)	119	3,8	1,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6
K-13 Standard (50mm)	119	2,5	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6
Sonacoustic (25 mm c/ caixa de ar)	119	1,1	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6	0,7
StoSilent Panel Top Finish	119	1,4	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	1,0
StoSilent Panel A-Tec Top Finish	119	1,2	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
TR atual (s)		2,2	3,2	3,4	3,8	3,7	3,4	-

Quadro 8.7 – Valores da absorção sonora adicional prevista por material e previsão para os respetivos tempos de reverberação na sala 5 do MMAP

	Absorção sonora equivalente adicional (m ²)							
	Área (m ²)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	
Alcatifa densa	29	-2	1	14	17	18	18	
<i>Farboacoustic</i> (45 mm)	29	-1	12	22	23	23	23	
<i>BASWAphon Classic</i> (30 mm)	29	-1	10	27	26	22	22	
<i>BASWAphon Classic</i> (40 mm)	29	-1	9	27	28	25	23	
<i>BASWAphon Classic</i> (70 mm)	29	8	27	27	25	23	19	
<i>SonaSpray fc</i> (25 mm)	29	1	7	23	32	32	31	
<i>K-13 Standard</i> (50mm)	29	3	22	27	29	30	28	
<i>Sonacoustic</i> (25 mm)	29	13	22	20	21	23	24	
<i>StoSilent Panel Top Finish</i>	29	9	15	15	14	14	17	
<i>StoSilent Panel A-Tec Top Finish</i>	29	12	18	18	20	21	20	
	Volume (m ³)	Tempo de Reverberação previsível (s)						TR [500, 1k, 2k] (s)
Alcatifa densa	118	6,0	2,8	1,0	0,9	0,8	0,8	0,9
<i>Farboacoustic</i> (45 mm)	118	4,7	1,1	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
<i>BASWAphon Classic</i> (30 mm)	118	4,4	1,2	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6
<i>BASWAphon Classic</i> (40 mm)	118	5,0	1,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>BASWAphon Classic</i> (70 mm)	118	1,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6
<i>SonaSpray fc</i> (25 mm)	118	3,1	1,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6
<i>K-13 Standard</i> (50mm)	118	2,2	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6
<i>Sonacoustic</i> (25 mm c/ caixa de ar)	118	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
<i>StoSilent Panel Top Finish</i>	118	1,3	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	1,0
<i>StoSilent Panel A-Tec Top Finish</i>	118	1,1	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
TR atual (s)		2,2	3,2	3,4	3,8	3,7	3,4	-

Na sala 1 (Quadro 8.3), verifica-se que os materiais propostos que apresentam melhores valores de Tempo de Reverberação, considerando a gama de valores ideais entre 0.8 e 1.4 s são a alcatifa densa, o *StoSilent Panel A-Tec Top Finish* e o *StoSilent Panel Top Finish*. Como se pode examinar, existem materiais que apresentam valores até inferiores ao que seria considerado ideal neste estudo, tendo estes muito boas propriedades acústicas, como é o caso do *BASWAphon Classic* em todas as espessuras (Fig. 8.2). A introdução deste material no museu poderá ser demasiado considerando o propósito e os custos elevados que apresenta.

Na sala 2, a alcatifa densa por si só é capaz de reduzir o tempo de reverberação de forma expressiva (Quadro 8.4). No entanto, neste caso existem três materiais que apresentam tempos de reverberação de aproximadamente 1,0 s, um valor acusticamente bastante favorável. Estes materiais são o *Sonacoustic* (25 mm), *StoSilent Panel Top Finish* e o *StoSilent Panel A-Tec Top Finish* (Fig 8.3). A *Farboacoustic* (45mm) apresenta valores mais elevados no geral, mas mesmo assim considerados bons.

Na sala 3, a alcatifa densa volta a apresentar valores bastantes favoráveis de tempos de reverberação (Quadro 8.5) e novamente as soluções que mais se voltam a destacar são o *Sonacoustic* (25 mm), *StoSilent Panel Top Finish* e o *StoSilent Panel A-Tec Top Finish*, seguidos da *Farboacoustic* (45mm). Na banda dos 125 Hz é onde todas os materiais apresenta frequências mais elevadas (Fig. 8.4). Na sala 4, novamente verifica-se a superioridade do *Sonacoustic* (25 mm c/ caixa de ar), *StoSilent Panel Top Finish*, *StoSilent Panel A-Tec Top Finish* e *Farboacoustic* (45mm) (Quadro 8.6), podendo a alcatifa servir como complemento à redução do tempo de reverberação (Fig. 8.5). Na sala 5 (Quadro 8.7), repetem-se os mesmos resultados, sendo estes muito idênticos ao que foi obtido nas salas 3 e 4, com diminuições significativas do TR em todas as frequências.

Assim, as soluções que se consideram melhores tendo em conta os tempos de reverberação ideais num museu são a alcatifa densa, o *Sonacoustic* (25 mm), o *StoSilent Panel Top Finish* e o *StoSilent Panel A-Tec Top Finish*. Para se escolher o melhor entre as últimas três soluções, decidiu efetuar-se uma breve análise económica para verificar qual das soluções, tendo em conta a sua qualidade, ficaria mais barata e esteticamente mais integrada no espaço. Não se considera a alcatifa densa devido à componente estética referida anteriormente.

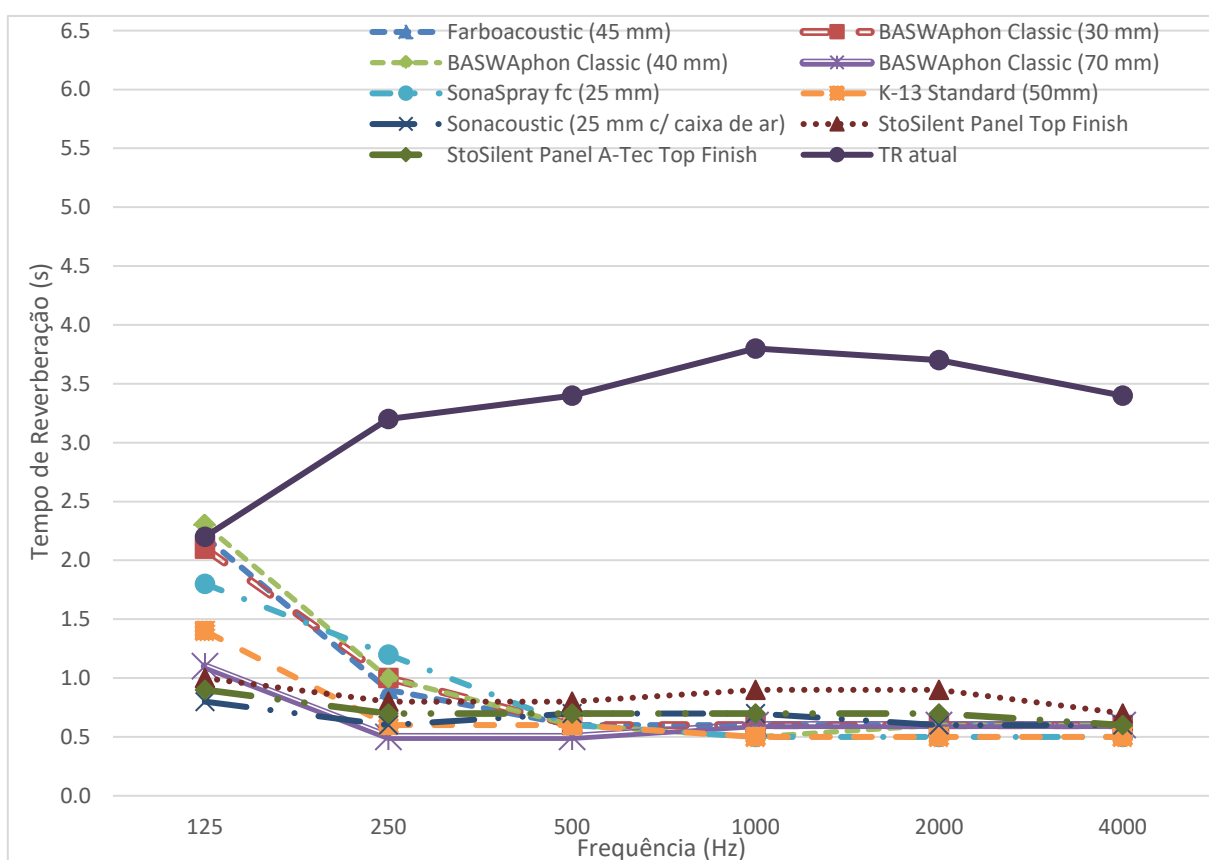


Fig. 8.2 – Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 1 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual

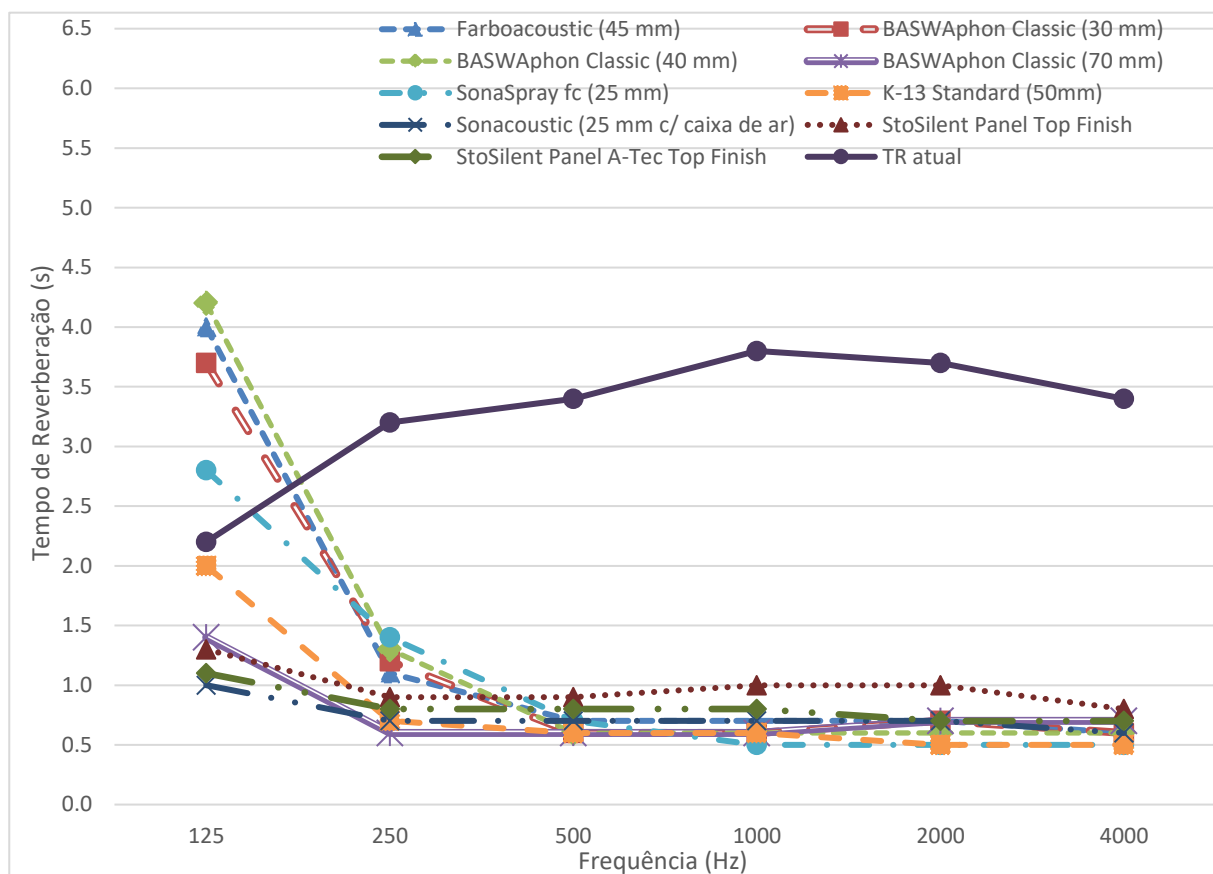


Fig. 8.3 – Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 2 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual

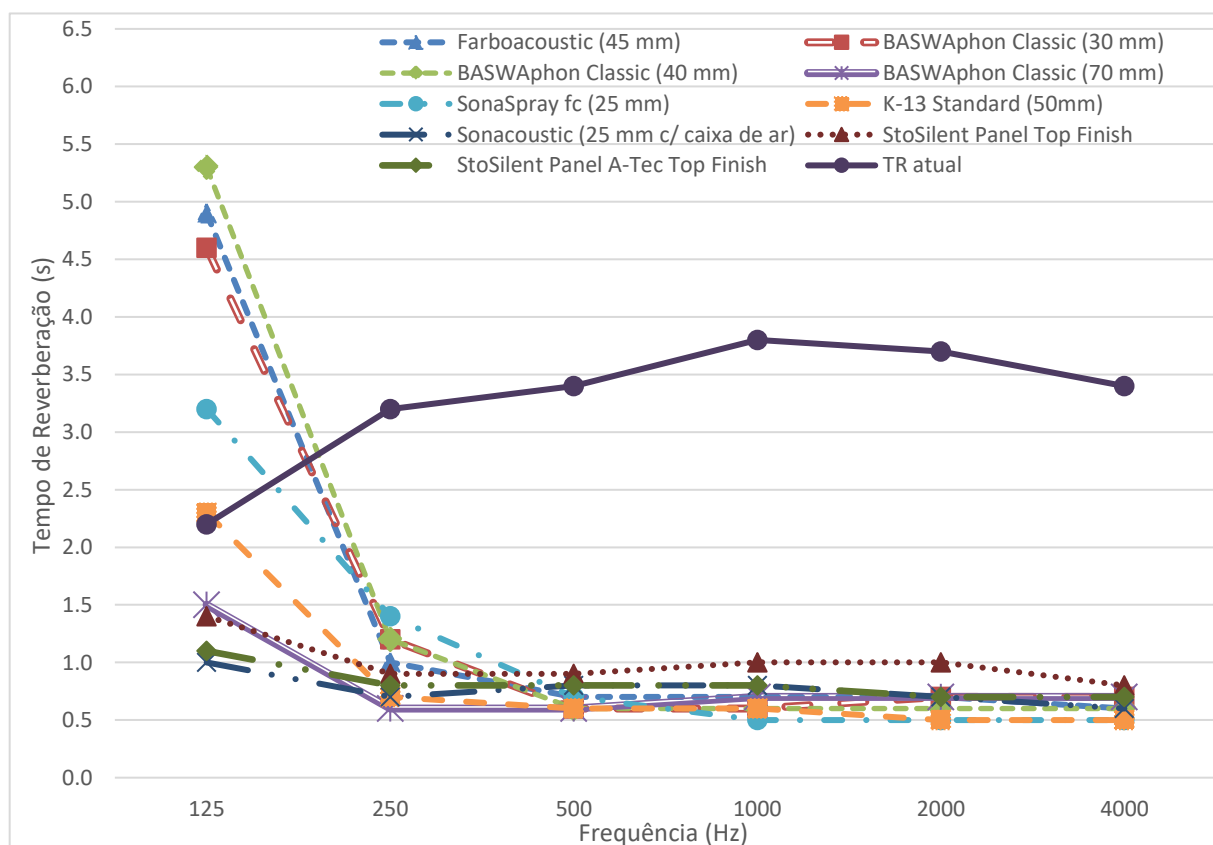


Fig. 8.4 – Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 3 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual

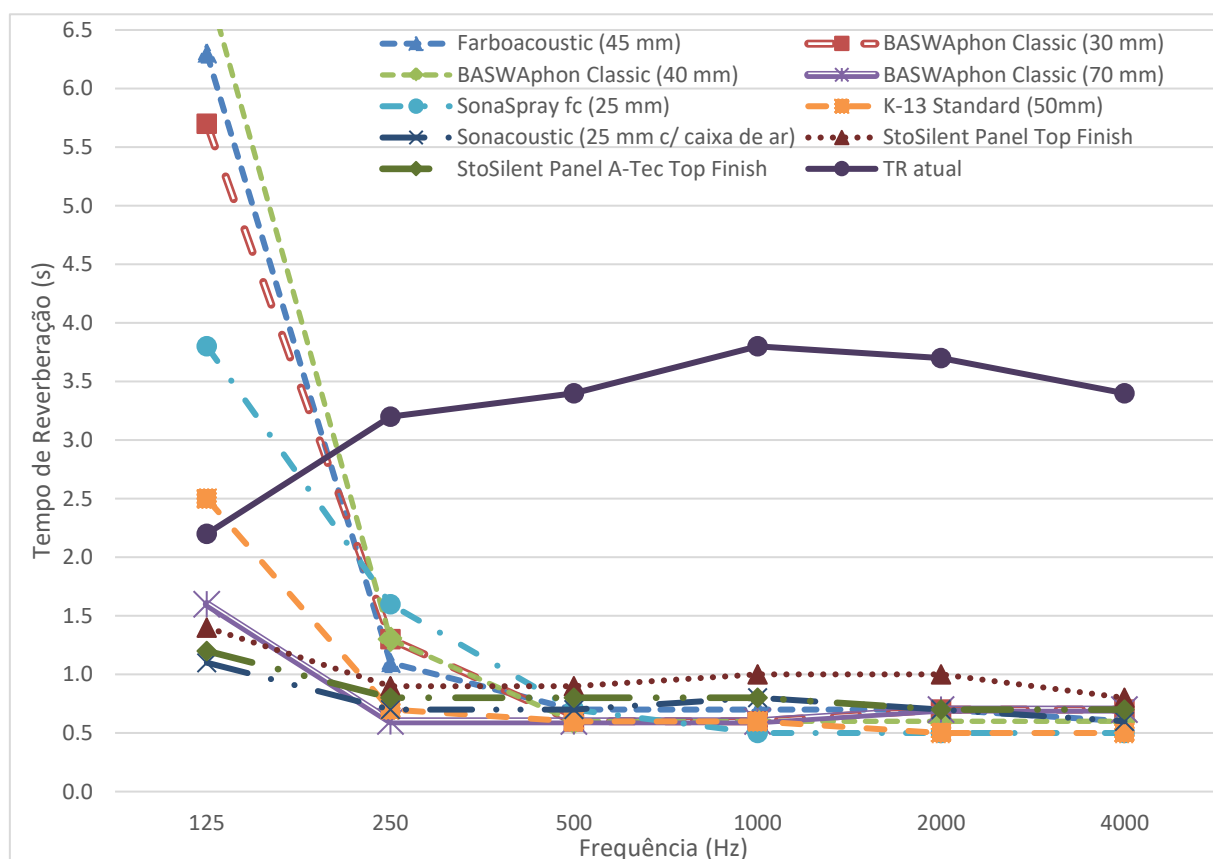


Fig. 8.5 – Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 4 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual

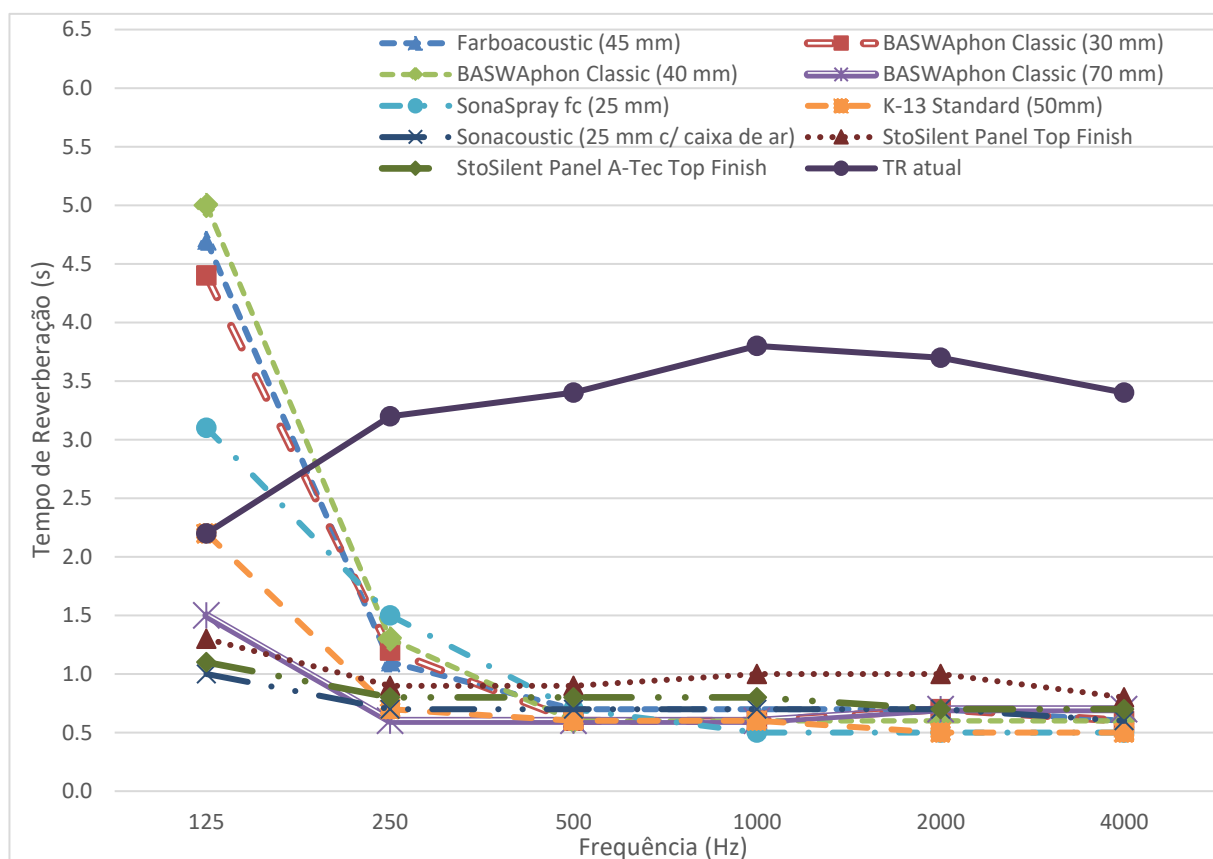


Fig. 8.6 – Valores de Tempos de Reverberação previstos para a sala 5 do MMAP para as bandas de frequência de 1/1 oitava para os diferentes materiais propostos e TR atual

8.4. ANÁLISE ECONÓMICA

A análise económica foi efetuada a partir das estimativas orçamentais apresentadas na tese de mestrado de H. Gonçalves “A Acústica de Museus Modernos. Estudo de caso, o Museu de Serralves (Porto)” [46]. A partir do Portal do INE [95], foi possível atualizar os valores de 2012 presentes na tese para o ano de 2021 (o último ano disponível no portal), como se apresenta no Quadro 8.8.

Como se pode verificar pela análise do Quadro 8.8, verifica-se que para além da qualidade, a *Sonacoustic* é a solução mais económica entre os materiais selecionados para aplicar nos tetos das salas, com um custo total de 27.500 € e apresentado uma diferença de aproximadamente 10.000 € comparativamente à *StoSilent Panel Top Finish* e uma diferença ainda maior quando comparado com a solução *StoSilent Panel A-Tec Top Finish*. A implementação desta solução permitiria uma redução significativa dos Tempos de Reverberação medidos no Museu e podendo potenciar também a redução dos ruídos de fundo elevados. A caixa de ar presente na solução atuaria de forma expressiva nas baixas frequências.

Para efetuar a análise económica, foi necessário o cálculo dos Tempos de Reverberação para calcular o custo por cada segundo reduzido com a aplicação dos produtos selecionados. O preço por ΔTR foi calculado a partir da diferença do TR medido [500, 1k, 2k] em cada uma das salas e o TR previsto [500, 1k, 2k] a partir dos cálculos efetuados anteriormente, como se apresenta no Quadro 8.9.

Quadro 8.8 – Estimativa orçamental para cada uma das salas de exposição do MMAP [46]

Material	Sala	Área (m ²)	Preço (€/m ²)	Preço parcial (€)	Preço Total (€)	Preço por ΔTR (€/s)
<i>Sonacoustic</i> (25 mm c/ caixa de ar)	Sala 1	101	97	9.797	27.451	5.443
	Sala 2	95		9.215		3.413
	Sala 3	29		2.813		1.005
	Sala 4	29		2.813		907
	Sala 5	29		2.813		970
<i>StoSilent Panel Top Finish</i>	Sala 1	101	131	13.231	37.073	7.351
	Sala 2	95		12.445		5.185
	Sala 3	29		3.799		1.461
	Sala 4	29		3.799		1.357
	Sala 5	29		3.799		1.461
<i>StoSilent Panel A-Tec Top Finish</i>	Sala 1	101	137	13.837	38.771	7.687
	Sala 2	95		13.015		5.006
	Sala 3	29		3.973		1.419
	Sala 4	29		3.973		1.324
	Sala 5	29		3.973		1.419

Quadro 8.9 – Cálculo do ΔTR para cada uma das salas de exposição do MMAP para permitir a escolha entre as melhores soluções

Material	Sala	TR previsto (s)						TRprevisto [500, 1k, 2k] (s)	TRmedido [500, 1k, 2k] (s)	ΔTR (s)
		125	250	500	1.000	2.000	4.000			
Sonacoustic (25 mm)	Sala 1	0,8	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	2,48	1,8
	Sala 2	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	3,42	2,7
	Sala 3	1,0	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6	0,8	3,64	2,8
	Sala 4	1,1	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6	0,7	3,81	3,1
	Sala 5	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	3,62	2,9
TR atual		2,2	3,2	3,4	3,8	3,7	3,4	-	-	-
StoSilent Panel Top Finish	Sala 1	0,8	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	2,48	1,8
	Sala 2	1,3	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	1,0	3,42	2,4
	Sala 3	1,4	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	1,0	3,64	2,6
	Sala 4	1,4	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	1,0	3,81	2,8
	Sala 5	1,3	0,9	0,9	1,0	1,0	0,8	1,0	3,62	2,6
TR atual		2,2	3,2	3,4	3,8	3,7	3,4	-	-	-
StoSilent Panel A- Tec	Sala 1	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	2,48	1,8
	Sala 2	1,1	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	3,42	2,6
	Sala 3	1,1	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	3,64	2,8
	Sala 4	1,2	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	3,81	3,0
	Sala 5	1,1	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	3,62	2,8
TR atual		2,2	3,2	3,4	3,8	3,7	3,4	-	-	-

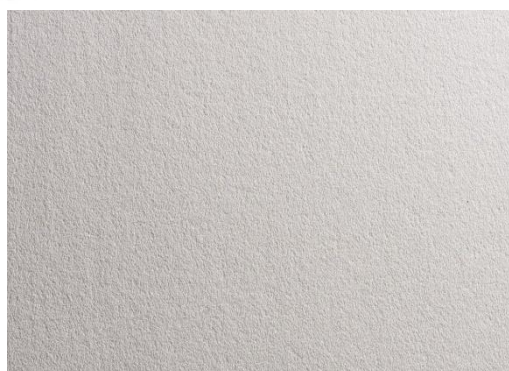
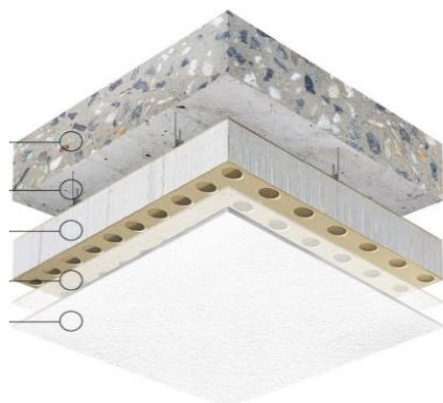


Fig. 8.7 – As três melhores soluções para as salas de exposição do MMAP de acordo com a gama de valores recomendada dos Tempos de Reverberação neste estudo: *Sonacoustic* (em cima, esq.), *StoSilent Panel Top-Finish* (em cima, dir.) e *StoSilent A-Tec Top Finish* (em baixo)

9

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

9.1. CONCLUSÕES

A Acústica é uma área que ainda possui muito espaço para se desenvolver e cada vez mais ser considerada um foco em especial quando se pretender construir um espaço aberto ao público. Como se verificou ao longo desta tese, os museus têm apresentado um crescimento expressivo nas últimas décadas e cada vez mais se encontram diferentes tipos de museus espalhados pelo mundo. A visita a museus é um momento com bastante importância cultural, em que os visitantes pretendem explorar de forma confortável todos os espaços expositivos, apreciar a arte e a arquitetura presente no recinto. Para além do conforto térmico, o conforto acústico torna-se cada vez mais importante em museus, numa altura em que arquitetura se torna cada vez mais minimalista e com uso de materiais cada vez mais refletores.

O estudo do Museu Municipal Abade Pedrosa foi importante para verificar como a acústica “funcionava” em espaços reabilitados. Não é só a arquitetura moderna que apresenta problemas devido aos seus planos simples e lisos; no caso da arquitetura tradicional, não existia a perceção de como alguns materiais ou como a dimensão dos espaços poderia afetar a boa acústica do espaço. Ao contrário da arquitetura moderna, em que se podem colmatar possíveis falhas acústicas ainda numa fase de projeto, na arquitetura tradicional torna-se mais complexo resolver os problemas existentes, visto que o trabalho tem de ser incorporado num edifício já construído. No entanto, o que se verifica é que existe ainda alguma resistência em incluir projetos acústicos na fase de projeto e, mesmo quando existem, são muitas vezes alterados para que esteticamente o edifício mantenha a “boa forma” idealizada pela arquitetura.

Cada vez mais museus têm efetuado diversos ensaios acústicos para verificar se o espaço apresenta boas condições acústicas, destacando-se países como Portugal, a Turquia, os Estados Unidos da América e o Reino Unido. Considerando o crescente interesse por parâmetros como o Tempo de Reverberação, o Ruído de Fundo ou a inteligibilidade da palavra, encontram-se já alguns estudos sobre o tema, destacando-se em todos eles as necessidades e as preocupações que devem começar a existir em espaços de exposição.

Para além da implementação de medidas acústicas adequadas, também o uso de materiais absorventes com boas propriedades é essencial no futuro. Para além disto, o desenvolvimento de novos materiais que sejam bons do ponto de vista ambiental e em que se execute os trabalhos com o menor desperdício possível será cada vez mais uma preocupação nas próximas décadas.

Nesta tese, foi possível caracterizar o Museu Municipal Abade Pedrosa a partir de ensaios acústicos simples realizados *in situ*, permitindo obter uma perspetiva global do seu comportamento face ao ruído. Os três parâmetros que foram medidos são o Tempo de Reverberação, o RASTI e os níveis de pressão sonora do ruído de fundo. No Quadro 9.1 apresenta-se, em resumo, os resultados dos ensaios no museu, assim como os respetivos valores recomendáveis.

Quadro 9.1 – Síntese dos resultados obtidos neste estudo

Salas	TR _{médio} [500, 1k, 2k] (s)	RASTI médio	L _{Aeq} (dB)
Sala 1	2,5	0,44	48
Sala 2	3,4	0,47	47
Sala 3	3,6	0,55	45
Sala 4	3,8	0,55	44
Sala 5	3,6	0,53	43
Valores ideais	0,8 a 1,4	≥ 0,60	≤ 40

Como se pode verificar pelos resultados das medições efetuadas, nenhuma das salas cumpre os valores ideais esperados para um museu. O valor médio do Tempo de Reverberação para as bandas de frequência de 500, 1.000 e 2.000 Hz apresenta valores claramente excessivos, entre 1,5 a quase 3 vezes maiores que o máximo valor recomendável. As salas 3 e 4 são as que apresentam os resultados mais excessivos, seguidas pela sala 5, correspondendo às três salas com menores dimensões. Mesmo considerando um valor de Tempo de Reverberação recomendado até 2,0 s, tendo em conta a experiência profissional dos projetos da InAcoustics para museus, o MMAP continua a não apresentar resultados satisfatórios em nenhuma das salas de exposição.

Os níveis sonoros do ruído de fundo encontram-se todos acima do limite esperado, sem sistema de AVAC e sem visitantes, pelo que os resultados ainda seriam piores com visitantes presentes no museu. As salas mais desadequadas são a sala 1 e a sala 2, as salas de maiores dimensões.

No RASTI, os valores são também insuficientes, sofrendo também este parâmetro com as más prestações verificadas no Tempo de Reverberação e no ruído de fundo. Não é conseguida uma inteligibilidade da palavra ideal, mas existem boas condições de privacidade nos espaços.

Globalmente, o Museu Municipal Abade Pedrosa tem espaço para efetuar diversas melhorias nos espaços estudados. Sem visitantes presentes, já é possível verificar o incómodo devido aos elevados Tempos de Reverberação e, associando aos elevados ruídos de fundo, a experiência no museu não é a melhor.

Após uma comparação com diversos estudos efetuados em museus tradicionais e modernos, foi possível verificar que os resultados do Museu Municipal Abade Pedrosa apresenta valores de Tempo de Reverberação em linha com os do Museu Nacional de Soares dos Reis, Museu

Nacional de Arqueologia e Museu de Serralves (todos museus portugueses), mas muito acima de museus internacionais até com volumetrias superiores.

No caso do RASTI, os valores que foi possível estudar entre o MMAP, o MNSR e o MS são todos muito semelhantes, podendo, portanto, todos ser sujeitos a melhorias. Os níveis sonoros de ruído de fundo do MMAP são todos, em geral, superiores aos dos restantes museus, sendo um dos parâmetros em que mais se destaca negativamente.

A partir de uma análise multicritério, foi possível verificar que a qualidade subjetiva em todas as salas no museu era no geral, *má* e, no máximo, *suficiente*.

Com a proposta de soluções adequadas para a melhoria da absorção sonora do Museu e o desenvolvimento de uma análise económica, foi possível selecionar a *Sonacoustic* como a melhor solução. Tem um custo previsível de 27.500 €. Com a aplicação deste produto, vai ao mesmo tempo proceder-se à diminuição do pé-direito das salas de exposição do MMAP.

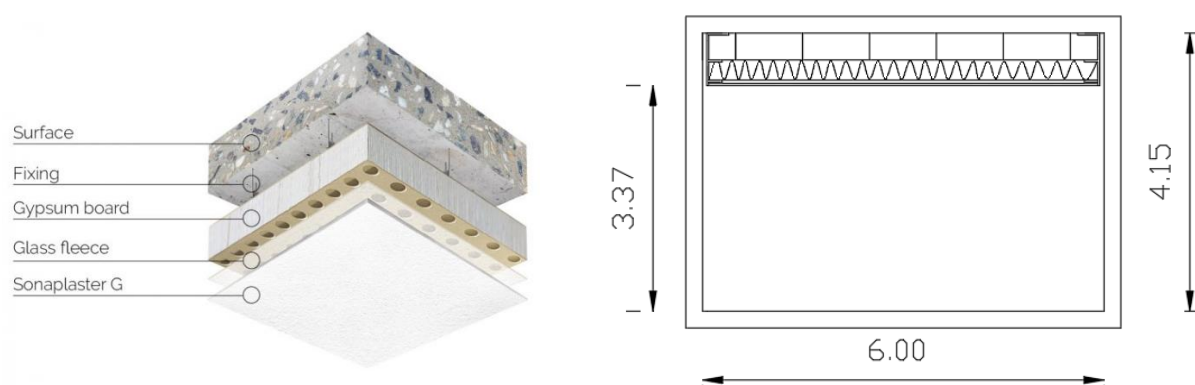


Fig. 9.1 – Pormenor *Sonacoustic* 25 mm com caixa de ar [94] e esquema representativo da aplicação da solução nas salas de exposição do MMAP

9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Esta tese apresenta resultados que podem vir a servir de comparação a outros estudos semelhantes no futuro. Para além do estudo de parâmetros objetivos, o estudo de parâmetros subjetivos teria sido importante, por exemplo, a partir de inquéritos efetuados quer ao pessoal responsável pelo funcionamento do museu, quer aos visitantes que frequentam o espaço.

A comparação deste inquérito com outros já efetuados poderia dar uma melhor perspetiva do funcionamento dos museus em Portugal. Se efetuados estes inquéritos num dia em que o museu estivesse aberto ao público, também teria sido positivo se as medições do Tempo de Reverberação, RASTI e nível sonoro de ruído de fundo fossem efetuadas, de forma a comparar as diferenças sentidas com e sem visitantes.

Para este trabalho, seria interessante que uma renovação acústica fosse executada no Museu Municipal Abade Pedrosa e que novas medições fossem efetuadas para ser possível proceder-se a uma comparação entre os valores atuais e os valores futuros e verificar as melhorias acústicas do espaço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Silva, Y. *The 9 muses of Greek mythology. Do you want to know them?*. <https://www.britannica.com/science/scientific-method>. Acedido em 08/03/2022.
- [2] Rodini, E. *A brief history of the art museum*. <https://www.khanacademy.org/humanities/approaches-to-art-history/tools-for-understanding-museums/museums-in-history/a/a-brief-history-of-the-art-museum-edit>. Acedido em 08/03/2022.
- [3] *History of Museums*. <https://www.khanacademy.org/humanities/approaches-to-art-history/tools-for-understanding-museums/museums-in-history/a/a-brief-history-of-the-art-museum-edit>. Acedido em 09/03/2022.
- [4] History. Leonardo da Vinci. [https://www.history.com/topics/renaissance/leonardo-da-vinci#:~:text=Leonardo%20da%20Vinci%20\(1452%2D1519\)%20was%20born%20in%20Anchiano,an%20artist%2C%20inventor%20and%20thinker](https://www.history.com/topics/renaissance/leonardo-da-vinci#:~:text=Leonardo%20da%20Vinci%20(1452%2D1519)%20was%20born%20in%20Anchiano,an%20artist%2C%20inventor%20and%20thinker). Acedido em 09/03/2022.
- [5] Lewis, G. *Museum cultural institution*. <https://www.britannica.com/topic/museum-cultural-institution>. Acedido em 08/03/2022.
- [6] Patel, R. *Architectural Acoustics: A guide to integrated thinking*. RBA Publishing, Londres, 2020.
- [7] NMAH. *The museum's architecture: Classical with modern details*. <https://americanhistory.si.edu/blog/2011/06/the-museums-architecture-classical-with-modern-details.html>. Acedido em 09/03/2022.
- [8] Brandão, L. *Álvaro Siza Vieira, a construção de uma carreira única*. <https://comunidadeculturaearte.com/alvaro-siza-vieira-a-construcao-de-uma-carreira-unica/>. Acedido em 10/03/2022.
- [9] Carvalho, A. *et al. Acoustics of Modern and Old Museums*. <https://web.fe.up.pt/~carvalho/tecni12ms.pdf>. Acedido em 09/03/2022.
- [10] ASI. *Creating great acoustics in museums*. Acoustics in Museums: The Science of Sound | ASI Architectural (asiarchitectural.com). Acedido em 10/03/2022.
- [11] Resonics. *Museum Acoustics*. <https://resonics.co.uk/museum-acoustics/#:~:text=Get%20A%20Quote-,Communication,hear%20and%20understand%20each%20other>. Acedido em 10/03/2022.
- [12] Insights, T. *Case Study: Building Silently – Acoustics Design at Smithsonian's NMAAHC*. <https://www.smwllc.com/building-silently-acoustics-design-at-smithsonians-nmaahc/>. Acedido em 10/03/2022.
- [13] Haas, S. *Effectively Managing Sound in Museum Exhibits*. Microsoft Word - Effectively Managing Sound in a Museum.docx (shacoustics.com). Acedido em 10/03/2022.
- [14] Merriam-Webster. *Physics*. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/physics>. Acedido em 14/03/2022.
- [15] toprr. *Acoustics*. Acoustics: Definition, Meaning, Types of Acoustics and Questions (toprr.com). Acedido em 14/03/2022.
- [16] Schimmel, I. *Who discovered the sound wave and when was that? Who discovered the sound wave and when was that?* - eNotes.com. Acedido em 15/03/2022.
- [17] E. Berg, R. *sound physics*. <https://www.britannica.com/science/sound-physics>. Acedido em 15/03/2022.
- [18] The Physics of Sound (wmich.edu). Acedido em 15/03/2022.
- [19] Environmental Protection Department. *Propagation of Sound*. Sound and Noise - Propagation of Sound (epd.gov.hk). Acedido em 15/03/2022.
- [20] Transverse and Longitudinal waves (fscj.edu). Acedido em 15/03/2022.

- [21] How Do We Hear? | NIDCD (nih.gov). Acedido em 16/03/2022.
- [22] *How the Ear Works*. <https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/how-the-ear-works>. Acedido em 16/03/2022.
- [23] Saini, H. *Sound vs. Noise*. <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/sound-vs-noise>. Acedido em 16/03/2022.
- [24] MED-EL. *What is Sound? What is Noise? What Is Sound? What Is Noise?* - The MED-EL Blog (medel.com). Acedido em 16/03/2022.
- [25] *Acoustics*. <https://www.britannica.com/science/noise-acoustics#ref894665>. Acedido em 17/03/2022.
- [26] softdb. *Understanding the Difference Between White Noise, Pink Noise, and Sound Masking*. <https://www.softdb.com/what-is-white-noise/>. Acedido em 17/03/2022.
- [27] Carvalho, A. *Acústica Ambiental e de Edifícios*. FEUP, Porto, 2021.
- [28] NPS. *Understanding Sound*. *Understanding Sound - Natural Sounds* (U.S. National Park Service) (nps.gov). Acedido em 17/03/2022.
- [29] *Noções Elementares*. http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959__NocElementares_P2_FC.pdf. Acedido em 17/03/2022.
- [30] *Frequency Weightings - A-Weighted, C-Weighted or Z-Weighted* (noisemeters.com). Acedido em 17/03/2022.
- [31] Heinrich Hertz - MagLab (nationalmaglab.org). Acedido em 18/03/2022.
- [32] Lorenzi, A., Chaix, B. *O que é o som?* <http://www.cochlea.eu/po/som>. Acedido em 18/03/2022.
- [33] NASA. *Speed of Sound*. *Speed of Sound* (nasa.gov). Acedido em 18/03/2022.
- [34] Williams, M. *Fundamentals of Acoustics: Sound Pressure, Sound Power and Sound Intensity*. <https://onscale.com/blog/fundamentals-of-acoustics-sound-pressure-sound-power-and-sound-intensity>. Acedido em 18/03/2022.
- [35] Orcibal, J. *Blaise Pascal. French philosopher and scientist*. *Blaise Pascal | Biography, Facts, & Inventions* | Britannica. Acedido em 21/03/2022.
- [36] *Sound Intensity*. <https://www.britannica.com/science/sound-intensity>. Acedido em 21/03/2022.
- [37] Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. 1998. <disec3b1o-acc3bastico-de-espacios-arquitectc3b3nicos.pdf> (wordpress.com). Acedido em 22/03/2022.
- [38] Climat, A. *Eléments théoriques de base en acoustique*. *Eléments théoriques de base en acoustique - Energie Plus Le Site* (energieplus-lesite.be). Acedido em 22/03/2022.
- [39] Addis, B. *A Brief History of Design Methods for Building Acoustics*. <https://structurae.net/en/literature/conference-paper/brief-history-of-design-methods-for-building-acoustics>. Acedido em 24/03/2022.
- [40] Berg, R. *Reverberation time*. <https://www.britannica.com/science/acoustics/Reverberation-time>. Acedido em 24/03/2022.
- [41] Carlsson, S. *Direct Sound and Reflected Sound*. *Direct Sound and Reflected Sound* (filmsound.org). Acedido em 25/03/2022.
- [42] Davis, L. *Reverberation Time Measurements*. *Reverberation Time in Room Acoustics* (larsondavis.com). Acedido em 25/03/2022.
- [43] Shalkouhi, P. introduction. In *Classroom Reverberation Time Based on The Sabine Equation*, 357-359, Department of Environmental Engineering, Teerão, 2009.

- [44] Scheidiger, C. *Assessing speech intelligibility in hearing impaired listeners*. Dissertação de Doutoramento, Technical University of Denmark, 2017.
- [45] Speech intelligibility and speech intelligibility goals (troidtekt.com). Acedido em 126/03/2022.
- [46] Gonçalves, H. *A Acústica de Museus Modernos. Estudo de Caso o Museu de Serralves (Porto)*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da U. do Porto, 2012.
- [47] Schaldenbrand, P. *Articulation Index*. Articulation Index (siemens.com). Acedido em 28/03/2022.
- [48] Stout, J. *Speech Privacy Standards*. 2015. *Speech-Privacy-Standards.pdf*(cambridgesound.com). Acedido em 28/03/2022.
- [49] Macdonald. *Sound Metrics: Speech Interference Level*. Sound Metrics: Speech Interference Level (siemens.com). Acedido em 29/03/2022.
- [50] Menchetti, B. *How articulation class ratings help offices*. How Articulation Class Ratings Help Offices (ngctestingservices.com). Acedido em 29/03/2022.
- [51] Silva, C. *O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da U. Porto, 2013.
- [52] Duarte, D. *O Desempenho Acústico dos Edifícios e os Pormenores Construtivos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da U. de Coimbra, 2015.
- [53] Imperialum,. <https://www.imperialum.com/en/?solucoes=materiais-porosos>. Acedido em 31/03/2022.
- [54] Kuczmarski, M., Johnston, J. *Acoustic Absorption in Porous Materials*. 2015. Microsoft Word - E-17656TM_Interspersed.docx (nasa.gov). Acedido em 31/03/2022.
- [55] Lisot, A., Soares, P. *Ressoadores de Helmholtz em Barreiras Acústicas: Avaliação do Desempenho na Atenuação do Ruído de Tráfego*. 2008. Microsoft Word - Aline Lisot - Acústica 2008.doc (sea-acustica.es). Acedido em 31/03/2022.
- [56] Oliveira, P. *Desenvolvimento e Caracterização Acústica de Elementos Autoportantes para Absorção Sonora em Espaços Tipo Open Space*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da U. Porto, 2009.
- [57] Patel, R. *Architectural Acoustics. A guide to integrated thinking*. RIBA Publishing, Londres, 2020.
- [58] Izenour, G. *Stage design*. <https://www.britannica.com/art/theater-building>. Acedido em 12/04/2022.
- [59] Rindel, J. *Echo Problems in Ancient Theatres and a comment to the “Sounding Vessels” described by Vitruvius*. The Acoustics of Ancient Theatres, 18-21, 2011, Patras, Odeon A/S, Lyngby. Acedido em 14/04/2022.
- [60] Asher, S. *Why does music sound so good in Cathedrals, Churches or Chapels? Why Does Music Sound So Good in Cathedrals, Churches or Chapels?* (theatreinparis.com). Acedido em 14/04/2022.
- [61] D. Rossing, Thomas. *Springer Handbook of Acoustics*. Springer Science+Business Media, Nova Iorque, 2007. Acedido em 14/04/2022.
- [62] Arora, J. *Timeline of prominent architectural styles*. Timeline of prominent architectural styles - RTF | Rethinking The Future (re-thinkingthefuture.com). Acedido em 15/04/2022.
- [63] Frankenberg, P. *Museum Utopia. A Brief Architectural History of the Ideal Museum*. ahs-23 (vonfrankenberg.cc). Acedido em 18/04/2022.
- [64] Ashmolean. <https://www.ashmolean.org/history-ashmolean>. Acedido em 18/04/2022.
- [65] *The world's oldest Museums*. <http://museums.eu/highlight/details/105317/the-worlds-oldest-museums>. Acedido em 18/04/2022.

- [66] Boylan, Patrick. *Como gerir um Museu. Manual Prático*. ICOM, Paris, 2004. Acedido em 18/04/2022.
- [67] Rodini, E. *A brief history of the art museum*. <https://www.khanacademy.org/humanities/approaches-to-art-history/tools-for-understanding-museums/museums-in-history/a/a-brief-history-of-the-art-museum-edit>. Acedido em 19/04/2022.
- [68] Bruno, C. *Impressões de Viagem: Um olhar sobre a museologia portuguesa*. U. Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 1996. Acedido em 20/04/2022.
- [69] Da Silva, José. *Como surgiram os primeiros museus em Portugal*. <https://caminhosdeportugal.com/como-surgiram-museus-portugal/>. Acedido em 20/04/2022.
- [70] Ferreira, E. *O Museu Portuense, um projeto pedagógico*. O Museu Portuense, um projecto pedagógico (openedition.org). Acedido em 20/04/2022.
- [71] Pérez, X. *Turismo Cultural. Uma visão antropológica*. PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural, Tenerife, 2009. Acedido em 20/04/2022.
- [72] Brigola, J. *Museus, Património e Ciência, Ensaios de História da Cultura*. Scielo Books, Campina Grande, 2012. Acedido em 24/04/2022.
- [73] Quem somos | ICOM Portugal (icom-portugal.org). Acedido em 24/04/2022.
- [74] DGPC | Legislação (patrimoniocultural.gov.pt). Acedido em 24/04/2022.
- [75] Acoustical Society of America - 145th Meeting Press Release (acoustics.org). Acedido em 26/04/2022.
- [76] D'Antonio, P. *Shape optimization: Good looks and acoustics too!* Shape optimization: Good looks and acoustics too!: The Journal of the Acoustical Society of America: Vol 113, No 4 (scitation.org). Acedido em 26/04/2022.
- [77] NASA/ADS (harvard.edu). Acedido em 26/04/2022.
- [78] Garcia, L. *A Acústica de Museus Tradicionais – Estudo de Caso, O museu Nacional Soares dos Reis (Porto)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da U. Porto, 2012. Acedido em 03/05/2022.
- [79] Orhan C. *A comparative study on indoor soundscape in museum environments*. Dissertação de Mestrado, U. de Bilkent, 2019. Acedido em 04/05/2022.
- [80] Jónsdóttir, G. *Museum Acoustics*. U. Técnica da Dinamarca, Dinamarca, 2008. Acedido em 04/05/2022.
- [81] Barbo, M. *et al.* Acoustic Studies of a Neoclassical Museum Through simulations in a three-dimensional model. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, 2019, Amesterdão, 159-165, U. Federal de Santa Maria, Brasil. Acedido em 04/05/2022.
- [82] Yang, T *et al.* *Applied Acoustics*. UCL Institute for Environmental Design and Engineering, Londres, 2020. Acedido em 05/05/2022.
- [83] Skansen. <https://www.skansen.se/en/>. Acedido em 05/05/2022.
- [84] Muangboran – The world's largest private outdoor museum. <https://www.muangboranmuseum.com/en/>. Acedido em 05/05/2022.
- [85] Lewis, J. *Museum – The 20th and 21st centuries – Early period of reassessment*. <https://www.britannica.com/topic/museum-cultural-institution/The-20th-and-21st-centuries>. Acedido em 08/05/2022.
- [86] Museu Municipal Abade Pedrosa. *História*. <http://mmap.cm-stirso.pt/historia/>. Acedido em 11/05/2022.

- [87] Museu Municipal Abade Pedrosa. *Projeto Arquitetónico*. <http://mmap.cm-stirso.pt/projeto-arquitetonico/>. Acedido em 11/05/2022.
- [88] Museu Municipal Abade Pedrosa. *Apresentação*. <http://mmap.cm-stirso.pt/apresentacao/>. Acedido em 11/05/2022.
- [89] Brüel & Kjaer. *Product Data*. <https://www.bksv.com/media/doc/bp0066.pdf>. Acedido em 21/05/2022.
- [90] Brüel & Kjaer. *Product Data*. <https://www.bksv.com/media/doc/bp1750.pdf>. Acedido em 21/05/2022.
- [91] Loureiro, P. *Metodologia Multi-Critério para Análise da Qualidade Acústica em Igrejas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da U. do Porto, 2008.
- [92] BASWA Acoustic. *Test Data Sheet – BASWA Acoustical Plaster*. https://uploads-ssl.webflow.com/5dd319e0c0716e24f0a4fb4a/5e2ff4795251e10873251c50_BASWA_Test_Data_Sheet_BASWA_Acoustical_Plaster_EN_19-0412.pdf. Acedido em 15/06/2022.
- [93] FARBOACOUSTIC. Ficha Técnica. <https://www.silentium.pt/wp-content/uploads/2021/12/FT-Farbocooustic-pt.pdf>. Acedido em 15/06/2022.
- [94] Sonaspray fc. <https://www.soprema.ca/product/sonaspray-fc-1433/#:~:text=SONASPRAY%20%22FC%22%20is%20a%20spray,new%20construction%20and%20renovation%20projects>. Acedido em 15/06/2022.
- [95] INE. <https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ipc>. Acedido em 15/06/2022.

