



M 2014

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE GRUTAS TURÍSTICAS - ESTUDO DE CASOS

AS GRUTAS DAS SERRAS DE AIRE E CANDEEIROS

JOANA ISABEL VIEIRA DE SOUSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM

MIEC - MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE GRUTAS TURÍSTICAS – ESTUDO DE CASOS

As grutas das serras de Aire e Candeeiros

JOANA ISABEL VIEIRA DE SOUSA

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 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

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 e Irmão, que sempre me apoiaram

Não sou da altura que me vêem, mas sim da altura que os meus olhos podem ver.

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, meu orientador, por todo o apoio prestado na realização deste trabalho, por todas as sugestões, discussões e correções, pelo entusiasmo e boa disposição constantes e pela ajuda a fazer-me ir mais longe nos meus objetivos.

Ao Engenheiro António Eduardo da Costa pela ajuda nas medições e na realização de todo o trabalho, pelas sugestões e pela tão genuína simpatia e colaboração.

À administração das Grutas da Moeda, na pessoa do Dr. Danilo Guimarães, pela generosa disponibilidade demonstrada e por todo o apoio prestado, e também a toda a equipa de guias, pela tão preciosa ajuda durante as medições e durante o período de recolha de inquéritos.

À administração das Grutas de Santo António e Alvados, na pessoa do Arquiteto Carlos Galamba, pela pronta disponibilidade e ajuda prestada durante todo o trabalho, em especial na preparação das medições e recolha dos inquéritos, e ao Dr. Rodrigo Pedroso que nos acompanhou durante as medições e cuja ajuda e paciência foram tão importantes. Também à Dra. Arminda Galo e ao Sr. Carlos Alberto Bico pela tão generosa disponibilidade e ajuda prestada nas segundas medições efetuadas nas Grutas de Santo António.

Ao Doutor Noé Jiménez González pelo esclarecimento das minhas dúvidas e pelo apoio e dados fornecidos que ajudaram a enriquecer o meu trabalho.

À minha Mãe, por toda a paciência, ajuda, amor e carinho que sempre me deu, por estar comigo nos bons e maus momentos, e por me ter motivado sempre neste percurso.

Ao meu Pai, por todas as conversas, por todo o apoio e por toda a força e determinação que sempre me transmitiu e sem as quais o meu percurso teria sido muito mais árduo.

Ao Pedro, o meu irmão, que esteve sempre ao meu lado em tudo o que precisei, e que sempre me apoiou e animou nos momentos mais difíceis.

Ao José, por toda a paciência, apoio e carinho que me deu nos momentos mais difíceis, e por todo o interesse que sempre demonstrou durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus grandes amigos, que tornaram a minha vida num caminho animado, alegre, cheio e, acima de tudo, muito feliz.

RESUMO

A utilização dada aos espaços naturais depende em grande parte das condições que estes proporcionam para as atividades pretendidas e da qualidade da fruição que estas proporcionam.

Desde cedo, o Homem aproveitou as condições acústicas dos espaços naturais para as suas reuniões e os seus rituais, como é estabelecido por diversos estudos referidos neste trabalho, que ligam a existência de pinturas rupestres às condições acústicas excecionais existentes em algumas grutas.

Neste trabalho é feita a caracterização acústica de três casos de estudo: as Grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados, localizadas nas serras de Aire e Candeeiros. Pretende-se assim fazer uma caracterização de grutas turísticas que permita concluir acerca das potencialidades destes espaços.

A caracterização acústica de espaços desta natureza é escassa, pelo que não há ainda uma base de dados que permita definir uma caracterização-tipo de acordo com as características dos espaços. São utilizados os fundamentos, conceitos e conhecimentos adquiridos na acústica arquitetónica para caracterizar e justificar as conclusões obtidas, e são também estudadas neste trabalho outras grutas que têm já uma utilização que tira partido das características acústicas, como as grutas de Luray (EUA), de St. Michael (Gibraltar), as Cuevas del Drach (Espanha), ou que foram já alvo de estudos semelhantes, como as grutas de Parpalló (Espanha) ou de Pertosa (Itália), entre outros casos mencionados neste trabalho.

O estudo dos casos das Grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados implica o conhecimento detalhado das condições, materiais e processo de formação destes espaços. Localizados no Maciço Calcário Estremenho, o maior maciço calcário de Portugal, e de formação cársica, estas grutas apresentam processos de formação semelhantes mas que, na realidade, deram origem a três grutas com morfologia, percursos e espaços distintos entre si.

Apresentam-se e analisam-se os resultados das medições *in situ* do tempo de reverberação, nível sonoro do ruído de fundo e RASTI e da determinação do coeficiente de absorção sonora da rocha que constitui a envolvente no tubo de ondas estacionárias. Obtiveram-se tempos de reverberação médios para os 500 Hz e 1 kHz de 1,3 segundos, 1,7 segundos e 1,5 segundos e valores do nível sonoro médio do ruído de fundo sem equipamentos em funcionamento, em período chuvoso, de 40 dB(A), 33 dB(A) e 32 dB(A), respetivamente para as grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados, e de 23dB(A) e 22 dB(A) em período seco para as duas primeiras grutas, demonstrando que se tratam de ambientes muito silenciosos. O RASTI médio obtido foi de 0,54. Estes valores indicam que estes espaços têm uma boa inteligibilidade da palavra e um baixo tempo de reverberação, apesar da baixa absorção dos materiais que constituem a envolvente, o que, para além de melhorar a experiência de visita aos turistas, permite afirmar que têm as características acústicas adequadas para a realização de espetáculos de teatro, música de câmara, ópera, e alguns tipos de música sinfónica. Não se tratam de locais adequados para concertos de música que exijam elevados tempos de reverberação, como o canto gregoriano ou a atuação de coros, já que o som percecionado se apresentaria demasiado “seco”.

Conclui-se que as grutas turísticas deste tipo apresentam diversas potencialidades e interesse não só no ponto de vista geológico e científico mas também como espaços a dinamizar sob o ponto de vista utilitário e cultural, já que permitem conjugar a geologia e a acústica de forma única e proveitosa. Importa ainda referir que a manutenção destes espaços deve ser feita de modo a preservar as suas características naturais, caso contrário estas condições acústicas podem alterar-se significativamente.

PALAVRAS-CHAVE: acústica, grutas, reverberação, ruído de fundo, absorção.

ABSTRACT

The use given to natural places largely depends on their characteristics and on the possibilities they provide.

Since ancient eras, Man has taken advantage of the acoustics of natural sites to perform his rituals and reunions, as stated in several studies that link the presence of prehistoric rock art to exceptional acoustics and resonance existing in some caves.

The main objective of this study is to acoustically characterize tourist caves in order to evaluate their potential by analyzing three particular cases: Moeda, Santo António and Alvados caves, all located in the mountains of Aire and Candeeiros.

There is few data on the acoustical characterization of caves, so it is not possible to set a specific pattern for this type of site. Architectural acoustics concepts were used in this study to evaluate and justify the obtained conclusions. Some other caves that already have acoustic related purposes are referred in this study, such as the ones in Luray (USA), St. Michael (Gibraltar) or the Cuevas del Drach (Spain), as well as caves that have been studied for scientific purposes, such as Parpalló caves (Spain) or Pertosa caves (Italy), amongst other cases also mentioned.

To do a correct analysis on the data obtained in this study it is essential to know the geological and morphological characteristics of the caves, located in a massive formation composed mainly by limestone. The three caves have similar formation processes but their characteristics are very different.

The result of the several acoustical parameters measured *in situ* is presented. The average reverberation time (500/1k) was 1.3 seconds, 1.7 seconds and 1.5 seconds and the average sound level for the situation with no equipment working was 40 dB(A), 33 dB(A) and 32 dB(A), for Moeda caves, Santo António Caves and Alvados caves, respectively, and in dry periods was 23 dB(A) and 22 dB(A) for the first two caves, which represent remarkably low values. The average RASTI was 0.54. These values indicate that the sites have a good speech intelligibility and a reduced reverberation time, even with low sound absorption surfaces, which allows to conclude that these sites have acoustical characteristics appropriate not only to touristic visits but also to be a place for theatre performances, chamber music and some types of symphonic music. However, they are not appropriate for performances that require long reverberation times, such as choirs or Gregorian chant.

It is possible to say that these type of caves has a great potential also as sites to promote cultural attractions, since they conjugate geology and acoustics in an very interesting way.

KEY-WORDS: acoustics, caves, reverberation, background noise, absorption.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE QUADROS	xix
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE.....	2
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. CONCEITOS BASE.....	3
2.2.1. PROPAGAÇÃO E PRESSÃO SONORA	3
2.2.2. CELERIDADE.....	4
2.2.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	4
2.2.4. NÍVEIS.....	5
2.2.5. BANDAS DE FREQUÊNCIA	6
2.2.6. CURVAS DE PONDERAÇÃO.....	7
2.3. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS.....	8
2.3.1. ABSORÇÃO SONORA	8
2.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	10
2.3.3. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO	13
2.4. REFLEXÕES E ECOS.....	13
2.5. DIFUSÃO	14
2.6. OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS.....	14
2.6.1. PARÂMETROS OBJETIVOS	14
2.6.1.1. Introdução.....	14
2.6.1.2. Tempo de decaimento curto (EDT)	15

2.6.1.3. Rácios de baixos.....	15
2.6.1.4. RASTI	15
2.6.2. PARÂMETROS SUBJETIVOS.....	15
2.6.2.1. Introdução.....	15
2.6.2.2. Ruído de Fundo	15
2.6.2.3. Intensidade do Som	15
2.6.2.4. Clareza do discurso musical	16
2.6.2.5. Reverberância.....	16
2.6.2.6. Eco	16
2.6.2.7. Intimidade	16
2.6.2.8. Direccionalidade	16
2.6.2.9. Envolvimento	16
2.6.2.10. Equilíbrio tímbrico	16

3. AS GRUTAS E A SUA ACÚSTICA

17

3.1. ALGUNS CONCEITOS ESPELEOLÓGICOS

17

3.2. APLICABILIDADE DA ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS A GRUTAS.....

18

3.3. IMPORTÂNCIA DA CONFIGURAÇÃO E CONSTITUIÇÃO DA ENVOLVENTE.....

19

3.3.1. CONFIGURAÇÃO E MORFOLOGIA DA ENVOLVENTE

19

3.3.2. CONSTITUIÇÃO DA ENVOLVENTE

21

3.4. ACÚSTICA EM GRUTAS COM PINTURAS RUPESTRES

21

3.5. CASOS PARTICULARES

23

3.5.1. GRUTAS DE LURAY (EUA)

23

3.5.2. GRUTAS DE ST. MICHAEL (GILBRALTAR)

24

3.5.3. CUEVAS DEL DRACH (ESPANHA).....

25

3.5.4. GRUTAS DE BATU (MALÁSIA)

25

3.5.5. GRUTA DE PARPALLÓ (ESPANHA)

26

3.5.6. GRUTAS DE PERTOSA, CASTELCIVITA E CASTELLANA (ITÁLIA)

27

3.6. VALORES ADEQUADOS DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

31

4. CASOS DE ESTUDO: GRUTAS DAS SERRAS DE AIRE E CANDEEIROS

33

4.1. INTRODUÇÃO

33

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	33
4.2.1. LOCALIZAÇÃO	33
4.2.2. MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO.....	34
4.2.3. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E GEOLÓGICA	36
4.2.3.1. Introdução.....	36
4.2.3.2. Grutas da Moeda	37
4.2.3.3. Grutas de Santo António.....	40
4.2.3.4. Grutas de Alvados	43
4.2.3.5. Comparação de características morfológicas.....	45
4.3. UTILIZAÇÃO ATUAL DAS GRUTAS	46
5. MEDIÇÕES	49
5.1. INTRODUÇÃO	49
5.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	50
5.2.1. METODOLOGIA.....	50
5.2.1.1. Equipamento.....	50
5.2.1.2. Procedimentos	51
5.2.2. PONTOS DE MEDIÇÃO	52
5.2.2.1. Grutas da Moeda	52
5.2.2.2. Grutas de Santo António.....	53
5.2.2.3. Grutas de Alvados	54
5.2.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	55
5.2.3.1. Grutas da Moeda	55
5.2.3.2. Grutas de Santo António.....	56
5.2.3.3. Grutas de Alvados	58
5.2.3.4. Comparação de Resultados.....	59
5.3. RUÍDO DE FUNDO.....	61
5.3.1. METODOLOGIA.....	61
5.3.1.1. Equipamento.....	61
5.3.1.2. Procedimentos	61
5.3.2. PONTOS DE MEDIÇÃO	62
5.3.2.1. Grutas da Moeda	62
5.3.2.2. Grutas de Santo António.....	62

5.3.2.3. Grutas de Alvados	62
5.3.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	62
5.3.3.1. Grutas da Moeda	62
5.3.3.2. Grutas de Santo António.....	66
5.3.3.3. Grutas de Alvados	70
5.3.3.4. Comparação de Resultados.....	72
5.4. RASTI	74
5.4.1. METODOLOGIA.....	74
5.4.1.1. Equipamento.....	74
5.4.1.2. Procedimentos	74
5.4.2. PONTOS DE MEDIÇÃO	74
5.4.2.1. Grutas da Moeda	74
5.4.2.2. Grutas de Santo António.....	75
5.4.2.3. Grutas de Alvados	75
5.4.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	75
5.4.3.1. Grutas da Moeda	75
5.4.3.2. Grutas de Santo António.....	76
5.4.3.3. Grutas de Alvados	77
5.4.3.4. Comparação de Resultados.....	78
6. COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA	81
6.1. MEDIÇÃO EM TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS	81
6.1.1. EQUIPAMENTO	81
6.1.2. PROCEDIMENTOS.....	82
6.1.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	84
6.2. “FATOR DE FORMA” DAS GRUTAS.....	85
6.2.1. METODOLOGIA DE CÁLCULO	85
6.2.2. GRUTAS DA MOEDA	87
6.2.3. GRUTAS DE SANTO ANTÓNIO.....	88
6.2.4. GRUTAS DE ALVADOS	89

7. ANÁLISE ACÚSTICA SUBJETIVA	91
7.1. INTRODUÇÃO	91
7.2. METODOLOGIA	91
7.3. INQUÉRITOS	92
7.4. RESULTADOS	93
7.4.1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	93
7.4.2. RESPOSTAS	94
8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	101
8.1. CONCLUSÕES	101
8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – A propagação das ondas sonoras ocorre através de ciclos de compressão (zonas C) e rarefação (zonas R) do meio elástico em que estas se movimentam. Do instante A para o instante B a onda representada movimentou-se ligeiramente para a direita. [3].....	4
Figura 2.2 – À medida que a onda sonora se propaga, a sua área de influência A_i aumenta. Uma vez que a energia sonora mantém o mesmo valor global, o aumento da área leva à diminuição da intensidade sonora detetada com o aumento da distância r à fonte. [3]	5
Figura 2.3 – As linhas a tracejado representam o nível de pressão sonora obtido para bandas de frequência de 1/1 oitava. As linhas a cheio representam o mesmo parâmetro para as bandas de largura 1/3 de oitava. Uma vez que as bandas de 1/1 oitava implicam a adição logarítmica de um maior número de sinais sonoros, a sua intensidade é maior do que a obtida para as de 1/3 de oitava. [2]	7
Figura 2.4 – Curvas de decaimento para medição do tempo de reverberação. No caso A, o ruído de fundo apresenta um nível de pressão sonora suficientemente baixo para que seja detetável a redução de 60 dB no nível de pressão sonora do ruído de teste. No caso B o ruído de fundo não tem um nível de pressão sonora suficientemente baixo para que essa redução seja detetável, pelo que se faz uma extrapolação para os 60 dB a partir da redução medida. [3].....	10
Figura 2.5 – Tempos de reverberação ideais de acordo com o tipo de uso. Verifica-se que espaços destinados à palavra têm T ideal mais curto, e espaços destinados à música ou a liturgias têm T ideal mais longo. [2]	12
Figura 3.1 – A frente da onda sonora, reta, sofre reflexão deformada de acordo com a forma da superfície, difundindo a sua energia em todas as direções.	20
Figura 3.2 – A frente da onda sonora, reta, sofre reflexão deformada de acordo com a forma da superfície, concentrando a sua energia num só ponto, o centro da concavidade.	20
Figura 3.3 – <i>Stalacpipe Organ</i> (grutas de Luray, EUA) sendo tocado manualmente. O seu funcionamento é habitualmente automático, utilizando martelos de borracha que ao percutir as estalactites produzem sons, funcionando como um litofone. [18].....	23
Figura 3.4 – Auditório das grutas de St. Michael (Gibraltar). Acolhe diversos eventos, desde concertos a óperas, passando por espetáculos de ballet e teatro. [21]	24
Figura 3.5 – Barco circulando no lago Martel, no interior das Cuevas del Drach. [22].....	25
Figuras 3.6 e 3.7 – À esquerda: entrada na Temple Cave, nas grutas de Batu. É visível o acesso ao algar pela escadaria interior; à direita: interior da Temple Cave, onde é visível um dos templos [27].....	26
Figura 3.8 – Entrada da Gruta de Parpalló. [30]	27
Figura 3.9 – Planta esquemática das grutas de Pertosa com indicação dos pontos de medição dos parâmetros acústicos. [34].....	28
Figura 3.10 – Planta esquemática do percurso turístico nas grutas de Castelcivita com indicação dos pontos de medição dos parâmetros acústicos. [34]	28

Figuras 3.11 e 3.12 – Interior das grutas de Castelvita. À esquerda: parte do percurso turístico; à direita: parte do percurso para espeleólogos amadores. [32]	29
Figuras 3.13 e 3.14 – Interior das grutas de Castellana. À esquerda: interior da Grotta Bianca; à direita: algar da Caverna dei Monumenti. [33].....	30
Figura 3.15 – Planta esquemática do percurso turístico nas grutas de Castellana com indicação dos pontos de medição dos parâmetros acústicos. [34]	30
Figura 4.1 – Localização das grutas da Moeda e de Alvados no território continental português.	33
Figura 4.2 – Vista aérea da envolvente das três grutas objeto de estudo.....	34
Figura 4.3 – A tracejado, os limites do Maciço Calcário Estremenho, localizado entre as cidades de Leiria, Alcobaça, Rio Maior, Torres Novas e Ourém [38]. Os pontos representam as grutas que serão objeto de estudo: Moeda (M), Alvados (A) e Santo António (SA).....	35
Figura 4.4 – Principais períodos de formação dos materiais constituintes do território. Grande parte do Maciço Calcário Estremenho corresponde a calcários de formação no Jurássico. [38]	36
Figuras 4.5 e 4.6 – Pormenores do interior da Sala do Pastor e Cascata, nas Grutas da Moeda. À esquerda: superfícies irregulares causadas pela deposição da calcite transportada com a água; à direita: variedade de texturas e formas no espaço. [fotografias da autora]	37
Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 – Pormenores do interior da Sala do Pastor e Cascata, nas Grutas da Moeda. À esquerda: superfícies irregulares, estalactites e estalagmites; ao centro: maciço central; à direita: escorrência de água da cascata artificial, que utiliza a água das infiltrações para alimentar os cursos de água nas Grutas da Moeda. [fotografias da autora].....	38
Figura 4.10 – Mapa esquemático das Grutas da Moeda. [11].....	39
Figura 4.11 – Divisão da zona estudada nas Grutas da Moeda em dez zonas, incluindo a Sala do Pastor, Recanto das Comparações e a Cascata.	39
Figura 4.12 – Mapa esquemático das Grutas de Santo António onde se podem distinguir as duas salas que as compõem, bem como a ligação entre elas pelo túnel natural. [12].....	41
Figuras 4.13 e 4.14 – Pormenores do interior da Grande Sala, nas Grutas de Santo António. À esquerda: percurso pedestre de visita entre as estalactites e estalagmites do espaço inferior da sala; à direita: cortinas, estalactites, estalagmites e colunas. [fotografias da autora].....	41
Figura 4.15 – Vista panorâmica da parte inferior da Grande Sala nas Grutas de Santo António. [fotografia da autora].....	41
Figura 4.16 – Divisão da Grande Sala das Grutas de Santo António em onze zonas.....	42
Figuras 4.17 e 4.18 – Pormenores do interior da sala de maiores dimensões nas grutas de Alvados. À esquerda: teto da sala, com algumas superfícies lisas e pequenas formações cársicas; à direita: pormenor do teto e parede da sala, com formações do tipo cortina. [fotografias da autora]	43

Figura 4.19 – Vista geral do interior da sala em estudo nas Grutas de Alvados. [fotografia da autora].....	44
Figura 4.20 – Mapa esquemático das Grutas de Alvados. [13]	44
Figura 4.21 – Divisão da zona estudada nas Grutas de Alvados em sete zonas	45
Figura 4.22 – Cartaz publicitário a um Concerto de Saxofone comemorativo do Dia da Criança nas Grutas de Santo António. [12]	46
Figuras 5.1 e 5.2 – À esquerda: Fonte sonora para medição do T Brüel & Kjaer – modelo 4224; à direita: sonómetro Brüel & Kjaer – modelo 2260. [fotografias da autora].....	51
Figura 5.3 – Localização dos pontos de medição no espaço estudado nas Grutas da Moeda (pontos 1 a 6, e localização da fonte sonora – ponto S)	52
Figura 5.4 – Localização dos pontos de medição no espaço estudado nas Grutas de Santo António (pontos 1 a 6, e localização da fonte sonora – ponto S).	53
Figura 5.5 – Localização dos pontos de medição no espaço estudado nas Grutas de Alvados (pontos 1 a 5, e localização da fonte sonora – ponto S).	54
Figura 5.6 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 de oitava nas Grutas da Moeda	56
Figura 5.7 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 de oitava nas Grutas de Santo António	58
Figura 5.8 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 de oitava nas Grutas de Alvados	58
Figura 5.9 – Valores dos tempos de reverberação médio, máximo e mínimo registados em cada uma das grutas estudadas	60
Figura 5.10 – Valores dos tempos de reverberação médio (500/1k), máximo e mínimo (em frequência) registados em cada uma das grutas estudadas e expressão que relaciona o $T_{médio}[500,1k]$ com o volume.....	60
Figura 5.11 – Níveis de pressão sonora, L (dB), do ruído de fundo nas grutas da Moeda em período chuvoso nas situações de ruído da cascata e música de fundo (CM), música de fundo (M) e só água natural (SA).	62
Figura 5.12 – Níveis sonoros LA (dB) do ruído de fundo nas grutas da Moeda nas situações de ruído da cascata e música de fundo (CM), música de fundo (M) e só água natural (SA)	64
Figuras 5.13 e 5.14 – Curvas NC (à esquerda) e NR (à direita) para as Grutas da Moeda, nas situações de ruído da cascata e música de fundo (CM), música de fundo (M) e só água natural (SA).....	66
Figura 5.15 – Níveis de pressão sonora, L (dB), do ruído de fundo em período chuvoso nas grutas de Santo António para as situações de estarem a ocorrer visitas (CV) e de não estarem a decorrer visitas e sem equipamentos ligados (SV).	67

Figura 5.16 – Níveis sonoros, LA (dB), do ruído de fundo em período chuvoso nas grutas de Santo António para as situações de estarem a ocorrer visitas (CV) e de não estarem a decorrer visitas e sem equipamentos ligados (SV).	67
Figuras 5.17 e 5.18 – Curvas NC (à esquerda) e NR (à direita) para as grutas de Santo António, para as situações de estarem a ocorrer visitas (CV) e de não estarem a decorrer visitas e sem equipamentos ligados (SV).	70
Figura 5.19 – Níveis de pressão sonora, L (dB), e nível sonoro, LA (dB), do ruído de fundo em período chuvoso para a situação sem visitas nem equipamentos, apenas com o ruído da infiltração de água, nas grutas de Alvados.	70
Figuras 5.20 e 5.21 – Curvas NC (à esquerda) e NR (à direita) para as grutas de Alvados, para a situação de não estarem a decorrer visitas e sem equipamentos ligados.	72
Figura 5.22 – Níveis de pressão sonora filtrados com o filtro A por banda de frequência de terço de oitava em cada uma das grutas para a situação de ruído apenas resultante da infiltração de água, sem visitas ou equipamentos ligados	73
Figuras 5.23 e 5.24 – À esquerda: emissor de sinal RASTI Brüel & Kjaer modelo 4225; à direita: utilização do recetor modelo 4419 e analisador modelo 3361 da Brüel & Kjaer. [fotografias da autora].....	74
Figura 5.25 – Valores do RASTI em cada ponto de medição nas grutas da Moeda.....	76
Figura 5.26 – Valores do RASTI em cada ponto de medição nas grutas de Santo António.	77
Figura 5.27 – Valores do RASTI em cada ponto de medição nas grutas de Alvados.....	78
Figura 5.28 – Valores mínimos, máximos e médios do RASTI para cada uma das grutas, e valor médio	79
Figura 6.1 – Tubo Bruël & Kjaer modelo 4002, com tubo de 3 cm de diâmetro, analisador Bruël & Kjaer modelo 1024, e sonómetro Bruël & Kjaer modelo 2231 com filtro de 1/3 de oitava modelo 1625. [fotografia da autora]	82
Figuras 6.2 e 6.3 – À esquerda: tubo de ondas estacionárias para baixas e médias frequências com diâmetro de 10 cm e respetiva base para colocação da amostra; à direita: tubo de ondas estacionárias para altas frequências com diâmetro de 3 cm e respetiva base para colocação da amostra. [fotografias da autora]	82
Figuras 6.4 e 6.5 – À esquerda: material da amostra I – calcário jurássico; à direita: material da amostra II – calcário biogénico. [fotografias da autora].....	84
Figura 6.6 – Valores de e obtidos para cada banda de frequência de 500 a 4k Hz.....	85
Figuras 7.1 e 7.2 – À esquerda: caracterização etária da amostra (Menos de 18 anos: 75%; 18-30: 17%; 31-45: 5%; 46-65: 2%; Mais de 65 anos: 1%); À direita: Caracterização da amostra por género (Masculino: 43%; Feminino: 57%).	93
Figuras 7.3 e 7.4 – À esquerda: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 1, “Qual o motivo que o/a levou a visitar as grutas da Moeda/de Santo António/de Alvados?”; à direita: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 2, “Ouve ruído vindo do exterior?”.....	95

- Figuras 7.5 e 7.6 – À esquerda: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 3, “Ouve ruído de lâmpadas, repuxos de água ou outros aparelhos?”; à direita: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 4, “Ouve “Ecos” em alguma parte da gruta?”. 96
- Figuras 7.7 e 7.8 – À esquerda: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 5, “O ruído de conversações de outros visitantes incomoda-o/a?”; à direita: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 6, “Caso tenha um guia, consegue ouvi-lo bem?” 97
- Figuras 7.9 e 7.10 – À esquerda: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 7, “Durante a sua visita preferia ter:”; à direita: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 8, “Gostaria de assistir a um evento neste espaço (eventos musicais, teatro, palestras, etc.)?”. 99

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível. [2].....	8
Quadro 2.2 – Valores ideais para os tempos de reverberação médios (500/1k) dos espaços, de acordo com a sua utilização. [2]	12
Quadro 3.1 – Valores de alguns dos parâmetros acústicos medidos nas grutas de Pertosa. [34]	28
Quadro 3.2 – Valores de alguns dos parâmetros acústicos medidos nas grutas de Castelvita. [34, 35]	29
Quadro 3.3 – Valores de alguns dos parâmetros acústicos medidos nas grutas de Castellana. [34] ..	30
Quadro 4.1 – Valores aproximados da área, altura média e volume de cada zona definida na figura 4.11 para o espaço de estudo nas grutas da Moeda. A altura média foi estimada por comparação visual com as alturas medidas nos pontos de medição definidos no ponto 5.2.2.	40
Quadro 4.2 – Valores aproximados da área, altura média e volume de cada zona definida na figura 4.16 para o espaço em estudo nas grutas de Santo António. A altura média foi estimada por comparação visual com as alturas medidas nos pontos de medição definidos no ponto 5.2.2	42
Quadro 4.3 – Valores aproximados da área, altura média e volume de cada zona definida na figura 4.21 para o espaço em estudo nas grutas de Alvados. A altura média foi estimada por comparação visual com as alturas medidas nos pontos de medição definidos no ponto 5.2.2.	45
Quadro 4.4 – Valores aproximados da área e volume de cada um dos espaços estudados... ..	46
Quadro 5.1 – Valores medidos da temperatura e humidade relativa no interior das três grutas. O valor registado para a humidade relativa foi o primeiro detetado pelo equipamento eletrónico, já que este saturava passados poucos segundos de exposição ao ar.	50
Quadro 5.2 – Distâncias à fonte sonora e alturas da sala em cada um dos pontos representados na figura 5.3 nas grutas da Moeda.	52
Quadro 5.3 – Distâncias à fonte sonora e alturas da sala em cada um dos pontos representados na figura 5.4 nas grutas de Santo António	53
Quadro 5.4 – Distâncias à fonte sonora e alturas da sala em cada um dos pontos representados na figura 5.5 nas grutas de Alvados.	54
Quadro 5.5 – Valores de T (medidos como T30) medidos nas grutas da Moeda, com a fonte sonora no ponto S e o sonómetro nos pontos 1 a 6 (figura 5.3).	55
Quadro 5.6 – Valores de T (medidos como T30) medidos nas grutas de Santo António, com a fonte sonora no ponto S e o sonómetro nos pontos 1 a 6 (figura 5.4).	57
Quadro 5.7 – Valores de T (medidos como T30) medidos nas grutas de Alvados, com a fonte sonora no ponto S e o sonómetro nos pontos 1 a 5 (figura 5.5).	59

Quadro 5.8 - Valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo em período chuvoso por banda de frequência de terço de oitava para cada uma das três situações medidas nas grutas da Moeda.	63
Quadro 5.9 – Valores do nível sonoro do ruído de fundo por banda de frequência para cada uma das três situações medidas nas grutas da Moeda.	65
Quadro 5.10 – Valores do nível sonoro do ruído de fundo medidos em período seco (sem atividade ou equipamentos ligados) nas grutas da Moeda.....	65
Quadro 5.11 - Valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo em período chuvoso por banda de frequência de terço de oitava nas grutas de Santo António.....	68
Quadro 5.12 – Valores do nível sonoro do ruído de fundo em período chuvoso por banda de frequência para cada uma das duas situações medidas nas grutas de Santo António....	69
Quadro 5.13 – Valores do nível sonoro do ruído de fundo medidos em período seco (sem atividade ou equipamentos ligados) nas grutas de Santo António.	69
Quadro 5.14 - Valores do nível de pressão sonora e nível sonoro do ruído de fundo por banda de frequência de terço de oitava para nas grutas de Alvados sem visitas ou equipamentos ruidosos, apenas com o ruído da infiltração de água.	71
Quadro 5.15 – Níveis sonoros contínuos equivalentes nas três grutas para a situação de ruído apenas resultante da infiltração de água, sem visitas ou equipamentos ligados, em período chuvoso e seco.....	73
Quadro 5.16 – Valores do RASTI para o espaço estudado nas grutas da Moeda, medidos nos pontos 1 a 6, excluindo o ponto 5 (figura 5.3).	75
Quadro 5.17 – Valores do RASTI para o espaço estudado nas grutas de Santo António, medidos nos pontos 1 a 6 (figura 5.4).....	76
Quadro 5.18 – Valores do RASTI para o espaço estudado nas grutas de Alvados, medidos nos pontos 1 a 5 (figura 5.5).....	77
Quadro 5.19 – Valores do RASTI médio para cada uma das grutas estudadas.	78
Quadro 6.1 – Valores dos coeficientes de absorção sonora com incidência normal obtidos pelo método do tubo de ondas estacionárias para as amostras I e II e respetivos valores corrigidos com o fator de 0,9 devido ao excesso de área.	84
Quadro 6.2 – Valores do coeficiente m a adotar no cálculo do coeficiente de absorção sonora, por banda de oitava [2].	86
Quadro 6.3 – Valores da absorção sonora localizada A_p provocada por uma pessoa de pé a adotar no cálculo do coeficiente de absorção sonora, por banda de oitava [2].	86
Quadro 6.4 – Dados geométricos para a definição da área da superfície envolvente do espaço nas grutas da Moeda. Os valores obtidos da área resultam da soma das áreas das faces das formas assumidas, subtraídos do valor da área de zonas sobrepostas.	87
Quadro 6.5 – Cálculo do fator de forma da área da envolvente do espaço estudado nas grutas da Moeda, de acordo com os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de absorção sonora do material que constitui a envolvente.	88

Quadro 6.6 – Dados geométricos para a definição da área da superfície envolvente do espaço nas grutas de Santo António. Os valores obtidos da área resultam da soma das áreas das faces dos paralelepípedos, subtraídos do valor da área de zonas livres ou sobrepostas..	88
Quadro 6.7 – Cálculo do fator de forma da área da envolvente do espaço estudado nas grutas de Santo António, de acordo com os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de absorção sonora do material que constitui a envolvente.	89
Quadro 6.8 – Dados geométricos de definição da área da superfície envolvente do espaço nas grutas de Alvados. Os valores obtidos da área resultam da soma das áreas das faces do espaço em estudo...	89
Quadro 6.9 – Cálculo do fator de forma da área da envolvente do espaço estudado nas grutas de Alvados, de acordo com os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de absorção sonora do material que constitui a envolvente.	90
Quadro 7.1 – Distribuição dos inquéritos recolhidos por gruta em estudo.	93
Quadro 7.2 – Totalidade de respostas válidas a cada uma das perguntas descritas no ponto 7.3	94
Quadro 7.3 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 1, “Qual o motivo que o/a levou a visitar as grutas da Moeda/de Santo António/de Alvados?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	94
Quadro 7.4 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 2, “Ouve ruído vindo do exterior?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	95
Quadro 7.5 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 3, “Ouve ruído de lâmpadas, repuxos de água ou outros aparelhos?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	95
Quadro 7.6 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 3a, “Se respondeu SIM à questão 3, esse ruído incomoda-o/a”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	96
Quadro 7.7 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 4, “Ouve “Ecos” em alguma parte da gruta?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	96
Quadro 7.8 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 5, “O ruído de conversações de outros visitantes incomoda-o/a?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	97
Quadro 7.9 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 6, “Caso tenha um guia, consegue ouvi-lo bem?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	98
Quadro 7.10 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 7, “Durante a sua visita preferia ter:”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	98
Quadro 7.11 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 8, “Gostaria de assistir a um evento neste espaço (eventos musicais, teatro, palestras, etc.)?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais	98
Quadro 8.1 – Valores de $T_{\text{médio}}[500,1k]$, L_{Aeq} e RASTI obtidos para cada uma das grutas em estudo.	101

Quadro 8.2 – Valores ideais para os tempos de reverberação dos espaços de acordo com a sua utilização, (500 a 1k Hz, e indicação da adequabilidade dos espaços ao uso referido. .103

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A	– absorção sonora equivalente (m^2)
A_j	– absorções sonoras localizadas (m^2)
B	– largura de banda (Hz)
BR_{RT}	– <i>Bass Ratio</i> baseado no Tempo de Reverberação
c	– celeridade (m/s)
C_{80}	– Claridade (dB)
D_{50}	– Definição (dB)
EDT	– tempo de decaimento curto (s) (<i>Early Decay Time</i>)
f	– frequência (Hz)
I	– intensidade sonora (W/m^2)
I_0	– intensidade sonora de referência ($10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$)
L_{eq}	– nível de pressão sonora contínua equivalente (dB)
L_p	– nível de pressão sonora (dB)
L_I	– nível de intensidade sonora (dB)
L_W	– nível de potência sonora (dB)
m	– absorção sonora do ar (m^{-1})
MCE	– Maciço Calcário Estremenho
NRC	– <i>Noise Reduction Coefficient</i>
p_0	– pressão sonora de referência ($2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$)
p_t	– pressão sonora (Pa)
P_{at}	– pressão atmosférica (Pa)
Q	– coeficiente de direccionalidade da fonte sonora
RASTI	– <i>Rapid Speech Transmission Index</i>
S	– área (m^2)
T	– período (s) ou temperatura (K) ou tempo de reverberação (s)
V	– volume (m^3)
W	– potência sonora (W)
W_0	– potência sonora de referência (10^{-12} W)
α	– coeficiente de absorção sonora
α_w	– coeficiente de absorção sonora ajustado
λ	– comprimento de onda (m)

Θ – temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

ρ – massa volúmica (kg/m^3)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A presença do Homem nas grutas remonta já a Eras distantes, como o Paleolítico. Já nessa época, uma das características que levava a uma maior utilização e fruição de determinadas grutas era o seu interesse acústico, a sua capacidade de potenciar ou modificar o som de acordo com o que seria pretendido para a realização do que se pensam terem sido rituais ou comunicação entre indivíduos. [1]

Uma vez que, ao longo dos tempos, os rituais tão comuns no ser humano se foram deslocando para espaços construídos pelo Homem, as grutas deixaram de ser um ponto comum para habitação e permanência humana e, conseqüentemente, o possível aproveitamento e conhecimento das suas características acústicas foi-se perdendo.

No entanto, hoje em dia podem encontrar-se em vários pontos do mundo grutas que são já aproveitadas como espaço de realização de várias atividades, desde visitas turísticas, celebrações ou locais de culto religioso, concertos ou outros espetáculos, pelo que importa saber se estes espaços são de facto adequados às atividades para os quais são utilizados e se escondem outras potencialidades interessantes a nível científico, histórico e também económico. Sendo o aparecimento destas atividades um fenómeno relativamente recente, o desempenho acústico destes espaços influi na sua utilização numa perspetiva de potenciar a sua rentabilização e reconhecimento.

Esta dissertação tem como objetivo principal a caracterização acústica de grutas turísticas, para a qual serão utilizadas como amostra as grutas da Moeda, Santo António e Alvados, localizadas nas serras de Aire e Candeeiros, nos distritos de Leiria e Santarém.

Como objetivos secundários procurar-se-á estabelecer uma comparação com outras grutas sobre as quais já existe alguma informação acerca do seu comportamento acústico e o seu aproveitamento, e estabelecer potenciais utilizações para as grutas que serão caso de estudo.

Com estes objetivos em mente, foram realizados ensaios *in situ*, nomeadamente a medição do tempo de reverberação, RASTI e ruído de fundo, nos casos de estudo. Foi também feita a medição do coeficiente de absorção sonora da envolvente destes espaços com o tubo de ondas estacionárias e foram feitos inquéritos aos visitantes. Após analisados os resultados, estes foram comparados com valores considerados ideais para determinadas atividades e com resultados dos mesmos parâmetros noutras grutas, podendo a partir daí sugerir-se utilizações proveitosas para os referidos espaços.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação está dividida em oito capítulos.

O primeiro e presente capítulo procura fazer um enquadramento geral e uma justificação para a importância da matéria em estudo, bem como definir os seus objetivos principais, e pretende ainda explicar a estrutura deste trabalho.

O segundo capítulo consiste na introdução e análise de alguns conceitos e definições importantes na área da acústica para a compreensão deste trabalho.

No terceiro capítulo faz-se uma análise dos fenómenos acústicos já conhecidos em grutas. Para isso são definidos alguns conceitos espeleológicos relevantes neste estudo e são estabelecidos os princípios da acústica de edifícios aplicáveis a grutas, bem como os fatores da envolvente que influem na acústica das mesmas. É realizada uma análise dos conhecimentos já existentes relativos a outras grutas, tanto no que toca às grutas utilizadas pelos antepassados longínquos da civilização atual, bem como as grutas que são atualmente utilizadas para fins turísticos, como salas de espetáculos, ou que foram estudadas com propósitos somente científicos.

O quarto capítulo introduz os casos em estudo: as grutas turísticas das serras de Aire e Candeeiros. São aqui definidas a localização, morfologia, características geológicas e a presente utilização das grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados, que serão utilizadas como amostra para as medições realizadas.

No quinto capítulo são explicados quais os ensaios *in situ* realizados, a metodologia utilizada e os resultados obtidos para cada um dos casos de estudo para o tempo de reverberação, nível de pressão sonora do ruído de fundo e RASTI, e é ainda feita a análise desses mesmos resultados.

No sexto capítulo é feita a análise do coeficiente de absorção sonora da envolvente obtido por via experimental, recorrendo a um tubo de ondas estacionárias. Os valores do coeficiente de absorção sonora obtidos permitem ainda determinar de forma simplificada qual a área superficial da envolvente e qual a relação entre esse valor e a área estimada.

O sétimo capítulo apresenta os resultados relativos à análise acústica subjetiva, isto é, os resultados recolhidos a partir dos inquéritos realizados aos visitantes das grutas em estudo.

Por fim, o oitavo capítulo apresenta as conclusões da presente dissertação e a sugestão de possíveis desenvolvimentos futuros para o enriquecimento do tema em estudo.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

Para a perfeita compreensão do assunto em estudo nesta dissertação importa conhecer e compreender os conceitos a ele associados, particularmente os que têm maior importância para a acústica em grutas, que será tratada de forma semelhante à acústica de edifícios.

Sob este prisma, apresentar-se-ão neste capítulo conceitos envolvidos na área da acústica, que estuda as ondas sonoras, ou seja, toda a perturbação no meio passível de ser detetada pelo ouvido humano [2]. Pode-se considerar que as ondas sonoras representam então um estímulo que é responsável pelo som, que é por sua vez uma sensação detetada pelo sistema auditivo. Assim, o estudo da acústica apresenta uma componente física, relacionada com o estímulo, e uma componente psicofísica, que estuda a sensação criada pelo cérebro humano após a deteção das ondas sonoras [3].

2.2. CONCEITOS BASE

2.2.1. PROPAGAÇÃO E PRESSÃO SONORA

O som corresponde à sensação criada pelo cérebro face à deteção de estímulos sonoros, ou seja, alterações de pressão que se propagam no meio, habitualmente o ar, mas que pode ser qualquer outro meio elástico, através de ciclos de compressão e rarefação em ondas esféricas concêntricas [2]. Estas ondas propagam-se através da movimentação das partículas do meio que, após receberem um estímulo que as desloca, tendem a voltar à sua posição inicial. No entanto, a inércia dessas mesmas partículas faz com que ultrapassem essa posição no sentido contrário ao do movimento inicial, entrando então em ação forças elásticas do meio na direção oposta e criando um ciclo de propagação da energia através da colisão das partículas do meio, até que esta seja dissipada [3].

Em resumo, um estímulo sonoro corresponde à vibração das moléculas de um meio elástico, que transmitem a energia às moléculas adjacentes, criando zonas de compressão e de rarefação do meio (figura 2.1) que se propagam até atingirem o sistema auditivo, momento em que o cérebro descodifica esse sinal e o identifica como som (agradável ou desejado) ou ruído (desagradável ou indesejado). [2]

O comportamento de uma onda sonora ao longo do tempo pode ser representado, para um dado ponto, por uma curva sinusoidal que relaciona a pressão sonora com o tempo, que permite obter informação importante acerca das propriedades dessa onda, como a frequência (f), comprimento de onda (λ) e período (T). [3]

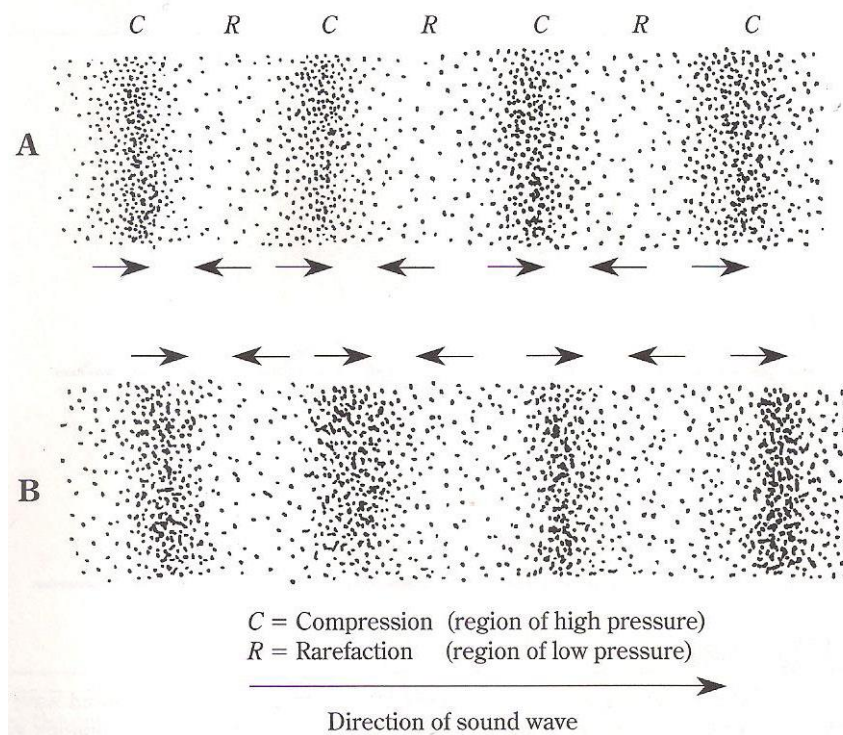


Figura 2.1 – A propagação das ondas sonoras ocorre através de ciclos de compressão (zonas C) e rarefação (zonas R) do meio elástico em que estas se movimentam. Do instante A para o instante B a onda representada movimentou-se ligeiramente para a direita. [3]

A pressão sonora (p_s) representa o valor da variação de pressão relativamente ao valor de referência da pressão do meio que, no ar, corresponde ao valor da pressão atmosférica (P_{at}), de cerca de 101400 Pa. A propagação das ondas sonoras causa variações deste valor devido à criação de zonas de compressão e de rarefação – são essas variações de pressão que são detetadas pelo sistema auditivo. [2]

2.2.2. CELERIDADE

A celeridade (c) ou velocidade de propagação das ondas sonoras depende do meio e da temperatura do mesmo. É tanto maior quanto mais denso for o meio, isto é, aumenta com a diminuição da distância entre moléculas, já que a maior proximidade permite uma transmissão mais rápida da energia sonora [2].

Para o ar seco, ao nível do mar, a celeridade é traduzida pela expressão 2.1, em função da temperatura:

$$c = 20,045\sqrt{T} \text{ (m/s)} \quad (2.1)$$

sendo T a temperatura: $T(K) = 273,15 + \theta(^{\circ}C)$. [2]

2.2.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A intensidade sonora (I) traduz, para uma dada direção, a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de 1m^2 normal à direção dada, em W/m^2 . Trata-se de uma grandeza vetorial que permite definir um campo de intensidade sonora, caracterizando o som de acordo com a direção em análise [2]. Esta grandeza diminui à medida que a distância à fonte sonora aumenta, já que as ondas sonoras, na ausência de obstáculos, se propagam uniformemente em todas as direções, causando uma

distribuição da energia por uma maior área à medida que se propagam, como ilustrado na figura 2.2 [3].

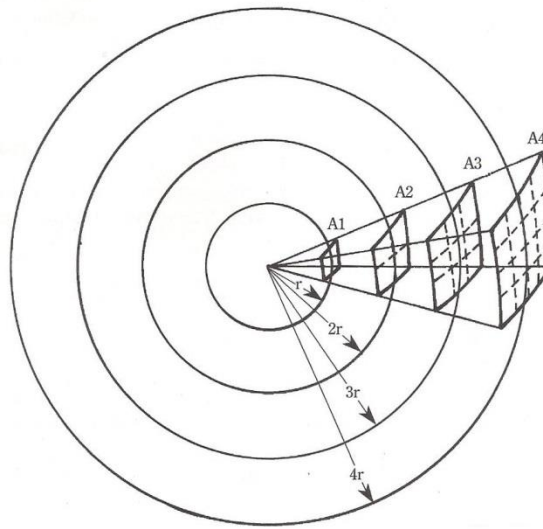


Figura 2.2 – À medida que a onda sonora se propaga, a sua área de influência A_i aumenta. Uma vez que a energia sonora mantém o mesmo valor global, o aumento da área leva à diminuição da intensidade sonora detetada com o aumento da distância r à fonte. [3]

A potência sonora (W) representa a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte, em *watt* (W). É uma característica da fonte, ao contrário da intensidade, que é uma característica do estímulo [2].

Pressão, intensidade e potência sonora estão relacionadas entre si de acordo com a expressão 2.2.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (W/m^2) \quad (2.2) [2]$$

sendo:

- I – intensidade sonora (W/m^2);
- W – potência sonora (W);
- r – distância à fonte (m);
- p_t – pressão sonora (Pa);
- ρ – massa volúmica do meio (ar: $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$);
- c – celeridade (m/s).

2.2.4. NÍVEIS

O ouvido humano não responde de forma linear aos estímulos sonoros, mas sim de modo aproximadamente logarítmico [2]. Esta realidade comprova-se devido à necessidade de, na presença de um estímulo sonoro, a pressão sonora ter de sofrer um aumento de cerca de 10 vezes o valor inicial para que haja uma perceção de ter havido uma duplicação do volume [3].

Posto isto e porque a gama de audibilidade humana, em termos de pressão sonora, é de cerca de 10^7 Pa (desde os 10^{-5} Pa, valor correspondente ao limiar da audição, até pressões sonoras da ordem dos 100 Pa, que corresponde ao limiar da dor) é mais adequado utilizar uma escala logarítmica para medir a pressão sonora, pelo que a unidade usada é o *decibel* (dB). [2]

A pressão sonora é então convertida para nível de pressão sonora a partir da expressão 2.3.

$$L_p = 10 \log \frac{p_t^2}{p_0^2} \text{ (dB)} \quad (2.3) [2]$$

sendo:

- L_p – nível de pressão sonora (dB);
- p_t – pressão sonora (Pa);
- p_0 – pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

Os níveis podem ser também definidos a partir de outras grandezas que não a pressão sonora, como são os casos dos níveis de intensidade sonora (L_I , expressão 2.4) ou os níveis de potência sonora (L_W , expressão 2.5).

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB)} \quad (2.4) [2]$$

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ (dB)} \quad (2.5) [2]$$

sendo:

- L_I – nível de intensidade sonora (dB);
- L_W – nível de potência sonora (dB);
- I – intensidade sonora (W/m^2);
- I_0 – intensidade sonora de referência (10^{-12} W/m^2);
- W – potência sonora (W);
- W_0 – potência sonora de referência (10^{-12} W).

A adição de níveis é dada pela expressão 2.6.

$$L_{soma} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \text{ (dB)} \quad (2.6) [2]$$

2.2.5. BANDAS DE FREQUÊNCIA

A frequência é uma das propriedades de uma onda sonora que melhor a caracteriza e que permite distinguir diferentes sons. Mede-se em *hertz* (Hz) e representa o número de ciclos de compressão e rarefação do meio completos num segundo num dado ponto. A frequência está relacionada com o comprimento de onda (λ) e com o seu período (T). O comprimento de onda representa a distância entre dois pontos idênticos consecutivos de uma mesma onda periódica, ou seja, com o mesmo valor de pressão sonora. O período corresponde ao tempo, em segundos, que decorre entre duas fases iguais para um dado ponto. [2] A relação entre as grandezas é expressa segundo as expressões 2.7, 2.8 e 2.9.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.7) [3]$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.8) [3]$$

$$\lambda = c \times T \quad (2.9) [3]$$

sendo:

- λ – comprimento de onda (m);
- c – celeridade (m/s);
- f – frequência (Hz);
- T – período (s).

Normalmente definem-se três grandes grupos de frequências, tendo em conta que a gama de audibilidade do ser humano jovem, com ouvidos saudáveis, está entre os 20 e os 20 000 Hz:

- De 20 a 355 Hz: Frequências graves;
- De 355 a 1410 Hz: Frequências médias;
- De 1410 a 20000 Hz: Frequências agudas. [2]

Uma análise de um som raramente procura analisar apenas uma só frequência, já que os sons são habitualmente compostos, isto é, resultam da sobreposição de vários sons com diferentes frequências únicas denominados por sons puros. Isto leva a que a análise de um som composto tenha que ser feita em diferentes frequências, já que a perceção do som varia de acordo com a frequência com que este é emitido. No entanto, fazer uma análise o mais contínua possível tornaria a mesma muito pesada, pelo que os sons e ruídos são divididos em *agrupamentos de frequências* denominados “*bandas de frequências*”, para as quais existe um limite inferior (f_1) e um superior (f_2), englobando todas as frequências entre esses limites. O seu valor médio (f_0) define qual a banda em estudo. [2]

A largura de banda (B) é definida como a diferença entre os seus limites superior e inferior, e depende do detalhe da análise a realizar. Habitualmente utilizam-se bandas de largura de 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava, que agrupam as diferentes frequências de diferente modo (figura 2.3). Definem-se os seguintes valores médios das bandas de frequências:

- 1/1 oitava: 16 Hz, 31 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz e 16 kHz;
- 1/3 oitava: 20 Hz, 25 Hz, 31 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1 kHz, 1250 Hz, 1600 Hz, 2 kHz, 2500 Hz, 3150 Hz, 4 kHz, 5 kHz, 6300 Hz, 8 kHz, 10 kHz, 12500 Hz, 16 kHz, e 20 kHz. [2]



Figura 2.3 – As linhas a tracejado representam o nível de pressão sonora obtido para bandas de frequência de 1/1 oitava. As linhas a cheio representam o mesmo parâmetro para as bandas de largura 1/3 de oitava. Uma vez que as bandas de 1/1 oitava implicam a adição logarítmica de um maior número de sinais sonoros, a sua intensidade é maior do que a obtida para as de 1/3 de oitava. [2]

2.2.6. CURVAS DE PONDERAÇÃO

O ouvido humano não é igualmente sensível a todas as frequências. Para uma mesma intensidade, a gama de frequências mais audível situa-se entre os 2300 e os 2800 Hz, ao passo que a sensibilidade para frequências inferiores a 125 Hz é muito pequena. Justifica-se que o estudo de um som ou ruído tenha isto em conta, adaptando-se os resultados obtidos pelos aparelhos de medição, que detetam as ondas sonoras com total fidelidade. Para este efeito utilizam-se filtros sonoros que alteram o valor do nível de pressão sonora registado numa dada frequência de acordo com a sensibilidade do ouvido

humano à mesma. Estes filtros são representados por curvas de ponderação, isto é, curvas que representam as correções efetuadas em função das frequências do som captado. A curva mais utilizada é a curva de ponderação do tipo A, ou filtro A (quadro 2.1). Este filtro, inicialmente criado para sons de baixa intensidade, é hoje universalmente aceite. O nível sonoro em dB(A) representa a energia acústica de um som ou ruído filtrado pela curva de ponderação do tipo A. [2]

Quadro 2.1 – Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível. [2]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)	Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 oitava (dB)
25	-44,7		800	-0,8	
31	-39,4	-40	1000	0	0
40	-34,6		1250	0,6	
50	-30,2		1600	1,0	
63	-26,2	-26	2000	1,2	+1
80	-22,5		2500	1,3	
100	-19,1		3150	1,2	
125	-16,1	-15,5	4000	1,0	+1
160	-13,4		5000	0,5	
200	-10,9		6300	-0,1	
250	-8,6	-8,5	8000	-1,1	-1
315	-6,6		10000	-2,5	
400	-4,8		12500	-4,3	
500	-3,2	-3	16000	-6,6	-7
630	-1,9		20000	-9,3	

2.3. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

2.3.1. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é a capacidade de certos materiais de transformar energia sonora, isto é, energia cinética das partículas do meio, noutro tipo de energia, habitualmente energia térmica. O coeficiente de absorção sonora (α) traduz a relação entre a energia absorvida pelo material em estudo e a energia nele incidente, assumindo valores entre 0 e 1. Para um material ser considerado absorvente deverá ter α superior a 0,5 [2]. É um coeficiente adimensional, mas pode ser também medido em *sabins* [3].

O valor de α depende da dimensão dos seus poros, que influencia as frequências que este será capaz de absorver, devido aos diferentes λ correspondentes a cada frequência. Geralmente, os materiais absorventes são mais eficazes na absorção de elevadas frequências, já que estas têm λ menor e os

interstícios existentes nos materiais são de pequena dimensão. A energia sonora que os atinge faz vibrar as fibras ou membranas entre poros, causando fricção, transformando assim energia sonora em energia cinética e calor. Também a sua elasticidade influi na sua capacidade de absorver a energia sonora [3]. No entanto, verifica-se que a elasticidade do material tem uma influência reduzida quando comparada à porosidade [4].

Importa ainda referir que o valor do coeficiente de absorção varia de acordo com o ângulo de incidência da energia sonora e a frequência do som incidente, para um dado material [2]. A medição do valor deste coeficiente deverá por isso ser feita para várias frequências, e pode ser feita utilizando um dos seguintes métodos, entre outros disponíveis:

- *Tubo de ondas estacionárias*: trata-se de um aparelho de medição constituído por um longo tubo metálico, no extremo do qual é colocada uma amostra do material que ocupa a totalidade da secção transversal do tubo. Na outra extremidade existe um pequeno altifalante que cria ondas estacionárias no interior do tubo, provocadas pela interação entre as ondas emitidas e as ondas refletidas pela amostra. Existe também um orifício pelo qual passa uma vareta equipada com um microfone que se pode mover dentro do tubo. A forma da onda estacionária obtida irá permitir caracterizar a amostra em estudo. Este método apresenta no entanto um defeito: apenas é estudado o caso de incidência normal das ondas sonoras em relação à amostra. Como o ângulo de incidência tem influência sobre a absorção, importa aplicar uma correção média que tenha este defeito em conta:

$$\alpha_d = 1,9277\alpha_n - 0,891\alpha_n^2 \quad (2.10) [2]$$

Sendo α_d o coeficiente de absorção sonora efetivo, para campo difuso, e α_n o coeficiente de absorção sonora medido, para incidência perpendicular. Esta correção é no entanto imprecisa, já que não varia com a frequência;

- *Câmara reverberante*: a câmara reverberante tem a capacidade de analisar a absorção de uma amostra sobre todos os ângulos utilizando uma amostra de 10 a 12 m². Trata-se de uma sala de grandes dimensões, com superfícies não paralelas e altamente refletoras. A amostra é colocada no piso e o valor da absorção é calculado tendo em conta o valor do tempo de reverberação no interior da sala com e sem a amostra, com o auxílio da fórmula de Sabine (ver 2.3.2). Este método apresenta também uma limitação: devido à difração nas extremidades da amostra, no caso de esta ser altamente absorvente podem obter-se valores de α ligeiramente superiores a 1, o que se trata de uma impossibilidade física, não existindo nenhum método para ajustar este valor à realidade [2].

A obtenção de um valor único para a caracterização da absorção de um material tem que entrar em conta com os diferentes valores de α para as diferentes frequências [2]. Assim sendo, existem dois parâmetros habitualmente utilizados:

- Um parâmetro frequentemente utilizado nos EUA e no Canadá é o NRC (*noise reduction coefficient*) que é a média aritmética dos valores de α nas bandas de oitava dos 250 aos 2k Hz.

$$NRC = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1k} + \alpha_{2k})/4 \quad (2.11) [2]$$

- O parâmetro mais comum na Europa trata-se do α_w , obtido a partir do ajuste ponderado de uma curva de referência usando as bandas de oitava dos 250 aos 4k Hz, conforme a norma EN ISO 11654:1997 [5]. Para esta determinação deve ser ajustada uma curva de valores α_i , $\alpha_i + 0,20$, $\alpha_i + 0,20$, $\alpha_i + 0,20$ e $\alpha_i + 0,10$, respetivamente para cada banda de frequência acima referida, e procurar o valor de α_i para o qual a soma das diferenças positivas entre os valores da curva de referência e a curva determinada sejam o maior possível sem

ultrapassar os 0,10. Os acréscimos ou decréscimos no valor de α_i deverão ser feitos em múltiplos de 0,05. O valor de α_w será o valor obtido na curva ajustada para α_{500} [2].

2.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A reverberação consiste no fenómeno de permanência do som no espaço após o final da emissão do estímulo sonoro, por ação das ondas sonoras que são refletidas pelas superfícies do espaço [3]. Este fenómeno ocorre devido à diferença de percurso entre as ondas sonoras denominadas como diretas, que chegam aos ouvidos diretamente a partir do recetor, e as ondas refletidas, que após a sua emissão são refletidas pelas superfícies e só depois atingem o ouvido, chegando por isso com um atraso que prolonga o som após o fim da sua emissão [2]. O tempo de reverberação é definido como o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora detetado após o fim da emissão sonora decaia 60 dB [2].

No entanto, em medições, como muitas vezes o nível de pressão sonora de ruído de fundo presente no espaço em estudo não permite detetar um decaimento de 60 dB, é comum considerar um decaimento mais pequeno, de 20 ou 30 dB, e extrapolar o resultado obtido para o decaimento de 60 dB pretendido (figura 2.4). O valor de 20 a 30 dB é representativo já que é o intervalo mais facilmente detetado pelo ouvido humano, e facilita a determinação do tempo de reverberação em espaços comuns que facilmente atingem os 60 dB de ruído de fundo, o que obrigaria à utilização de fontes sonoras muito potentes para a determinação do tempo de decaimento de 60 dB. [3]

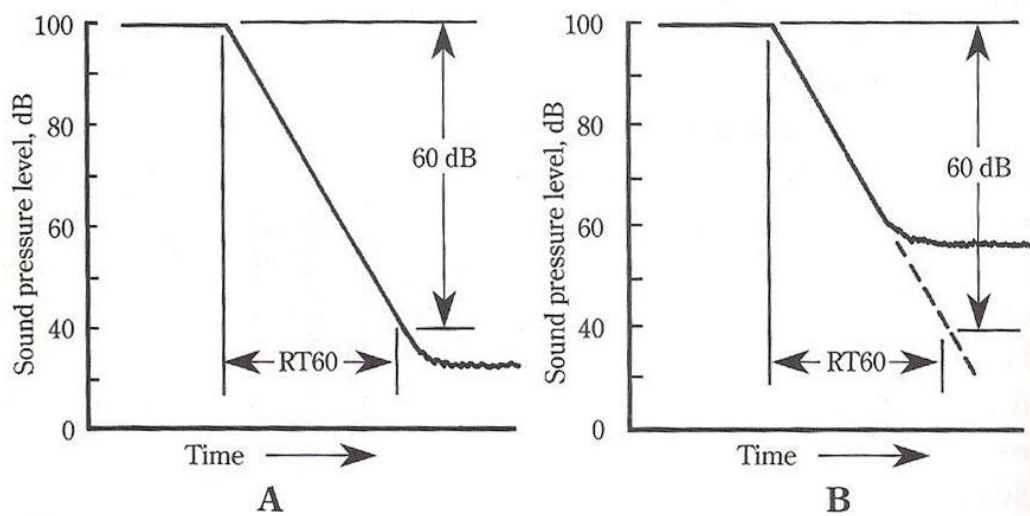


Figura 2.4 – Curvas de decaimento para medição do tempo de reverberação. No caso A, o ruído de fundo apresenta um nível de pressão sonora suficientemente baixo para que seja detetável a redução de 60 dB no nível de pressão sonora do ruído de teste. No caso B o ruído de fundo não tem um nível de pressão sonora suficientemente baixo para que essa redução seja detetável, pelo que se faz uma extrapolação para os 60 dB a partir da redução medida. [3]

O tempo de reverberação de um espaço pode ser determinado através da sua medição ou, aproximadamente, por determinação analítica. Existem várias fórmulas que permitem o seu cálculo, adaptando-se cada uma de forma mais adequada a diferentes situações. [2]

- a) Fórmula de Sabine: adequada para ambientes sonoros difusos e com um $\alpha_{\text{médio}}$ inferior a 0,20.

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad (2.12) [2]$$

sendo:

- T – tempo de reverberação (s);
- V – volume do compartimento (m^3);
- A – absorção sonora equivalente (m^2):

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (2.13)$$

com: α_i – coeficiente de absorção sonora do material i ; S_i – área da superfície do material i (m^2);

- b) Fórmula de Eyring: adequada a espaços onde todas as superfícies da envolvente têm α_w semelhantes.

$$T = \frac{0,16V}{-S \times \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (2.14) [2]$$

sendo $\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i}$ (2.15);

- c) Fórmula de Millington-Sette: adequada para espaços em que existem diferenças significativas entre os coeficientes de absorção sonora das diversas superfícies;

$$T = \frac{0,16V}{-\sum_{i=1}^N S_i \times \ln(1-\alpha_i)} \quad (2.16) [2]$$

- d) Formulação genérica da fórmula de Sabine: deu origem a todas as outras variações, e pode ser genericamente definida pela expressão 2.17.

$$T = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (2.17) [2]$$

em que:

- A_j – absorções sonoras localizadas (m^2);
- m – absorção sonora do ar (m^{-1}) em função da humidade relativa.

Observa-se experimentalmente e analiticamente que o tempo de reverberação tende a diminuir com o aumento da absorção sonora média das superfícies da envolvente e com a diminuição do volume do espaço em estudo. Pode-se observar também que varia de acordo com as frequências emitidas devido às diferentes absorções dos materiais em função da frequência mas também ao diferente comportamento das ondas sonoras no espaço [3].

Há ainda outros efeitos com grande influência no tempo de reverberação que importa referir pela sua possível aplicação nos casos que serão objeto de estudo desta dissertação. A posição da fonte sonora e do recetor no interior do espaço pode fazer variar os tempos de reverberação, já que as distintas reflexões atingem diferentes pontos do espaço em diferentes momentos [3]. A posição da fonte terá mais influência que a do recetor [6]. Também a presença de espaços acoplados ao espaço em estudo pode ter influência no tempo de reverberação de uma dada sala. Caso a sala adjacente seja altamente refletora e tenha passagem direta para a sala em estudo, o decaimento do som na primeira pode ser mais lento do que na segunda, provocando um atraso das ondas refletidas da sala adjacente para a inicial em relação ao decaimento na sala inicial [3].

O efeito da reverberação tem como consequências o aumento do nível sonoro detetado no espaço, por sobreposição do som direto e do som refletido e, pelo mesmo motivo, mascara os sons diretos, perturbando a sua clara compreensão [2]. Um valor do tempo de reverberação ideal de acordo com a utilização pretendida conduz a um ambiente agradável para seu propósito. Caso seja demasiado curto pode conduzir a uma sensação de desconforto, sonolência ou, no caso da música, à excessiva claridade das notas musicais. Se for demasiado longo, conduz à mistura das sílabas e consequente

incompreensibilidade da palavra ou ao chamado “empastelamento” da música, a sobreposição excessiva de notas e sons [6].

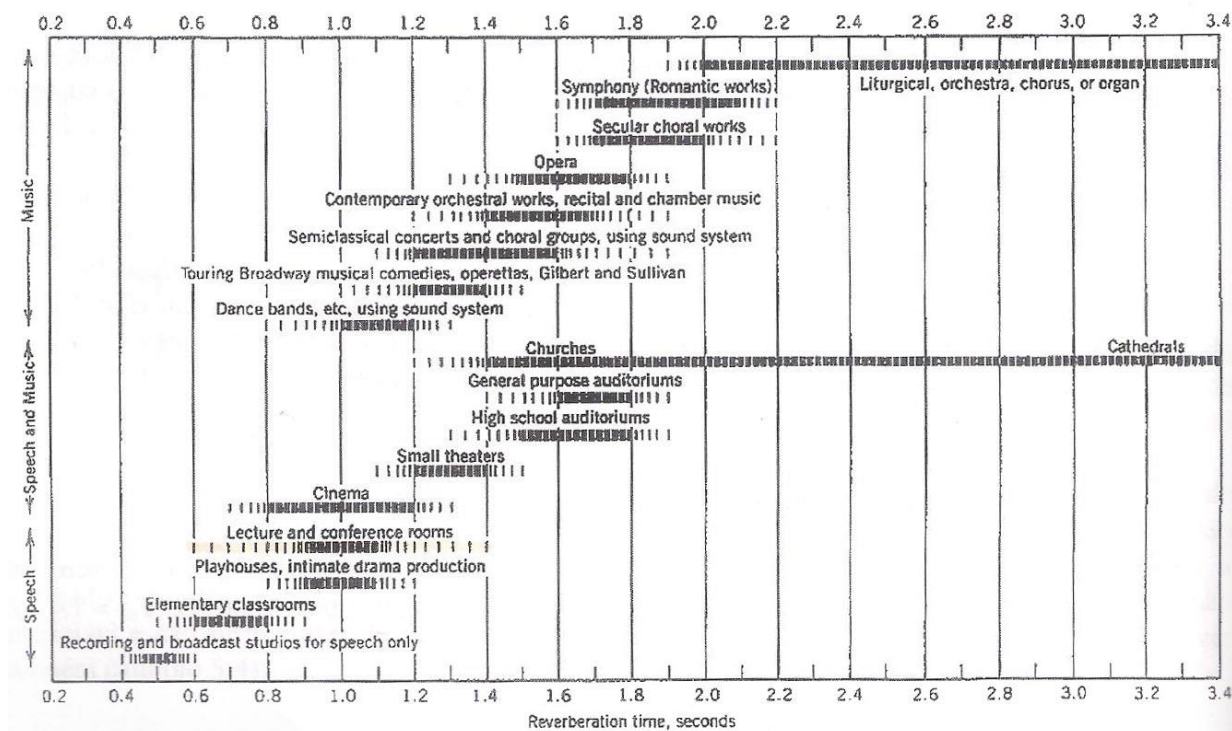


Figura 2.5 – Tempos de reverberação ideais de acordo com o tipo de uso. Verifica-se que espaços destinados à palavra têm T ideal mais curto, e espaços destinados à música ou a liturgias têm T ideal mais longo. [2]

Quadro 2.2 – Valores ideais para os tempos de reverberação médios (500/1k) dos espaços, de acordo com a sua utilização. [2]

Tipo de utilização	T mínimo (s)	T máximo (s)
Conferências ou palestras	0,7	0,8
Teatro	0,7	0,9
Auditórios polivalentes	1,4	1,9
Igrejas e catedrais	1,2	>3,4
Música sinfónica ou de coro com sistema de som	1,1	1,9
Orquestras contemporâneas, recitais ou música de câmara	1,2	1,9
Ópera	1,3	4
Canto gregoriano	3	4
Música sinfónica	1,4	2,2
Coro ou órgão	1,9	> 3,4

O tempo de reverberação tem então uma grande influência na inteligibilidade da palavra e na fruição da música, pelo que é um fator de grande importância na acústica de qualquer sala onde a acústica é relevante. O seu valor ideal, ao contrário do que se afirmou durante muitos anos, não depende da configuração ou volume da sala, mas apenas do uso que lhe é destinado (figura 2.5 e quadro 2.2), já que o ouvido humano não se adapta ao volume dos espaços. Importa ainda referir que, para espaços destinados à música, o T ideal nas frequências baixas deve ser superior ao T ideal para os 1000 Hz, o que é facilitado para salas de elevado volume, em que o ar absorve mais a energia sonora correspondente a ondas sonoras de frequências altas. [2]

Outros fatores como a ausência de ecos e o isolamento sonoro dos espaços são também de extrema importância [6]. O fenómeno dos ecos será convenientemente desenvolvido no ponto 4 do presente capítulo. O isolamento sonoro do espaço repercute-se na intensidade sonora do ruído de fundo, que deverá ser suficientemente baixo para não se sobrepor nunca ao som que se produz na sala – o seu valor máximo ideal depende então do valor da intensidade sonora do som desejado [2].

2.3.3. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO

Como referido no ponto 2.3.2, a percepção de um som ocorre aquando da chegada das ondas sonoras que provêm diretamente da fonte sonora mas também quando as ondas refletidas na envolvente atingem o recetor. Há por isso uma diferença de percurso entre essas ondas, criando dois campos sonoros que se sobrepõem: o campo direto, onde as ondas diretas predominam no som captado, cuja intensidade decresce com o aumento da distância à fonte emissora, e o campo reverberado, onde o som provém essencialmente de ondas refletidas, cuja intensidade se mantém constante com a distância à fonte emissora. O nível de intensidade sonora resultante num dado ponto de um espaço é dado pela expressão 2.18. [2]

$$L_I = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2.18) [2]$$

onde:

- L_I – nível de intensidade sonora perceptível ($\approx L_p$) (dB);
- L_W – nível de potência sonora da fonte (dB);
- Q – coeficiente de direccionalidade da fonte sonora;
- r – distância entre a fonte sonora e o recetor (m);
- $R = \frac{A}{(1-\alpha_{\text{médio}})} \text{ (m}^2\text{)}.$

O conceito de campo reverberado é praticamente inaplicável a salas de pequeno volume, já que o recetor nunca poderá estar muito afastado do campo direto, pelo que o campo reverberado nunca chega a atingir níveis de intensidade sonora capazes de se sobrepor ao direto. [3]

2.4. REFLEXÕES E ECOS

Após emitidas, as ondas sonoras viajam em todas as direções, sendo refletidas quando encontram obstáculos. O seu comportamento depende do seu comprimento de onda e, consequentemente, da sua frequência: ondas de baixa frequência, ou seja, comprimento de onda grandes, necessitam de superfícies refletoras de dimensões consideráveis para serem de facto totalmente refletidas, caso contrário podem simplesmente ultrapassar os obstáculos; já ondas de alta frequência, com pequenos comprimentos de onda, são refletidas por superfícies de pequena dimensão. [3]

Também a forma das superfícies tem grande influência no comportamento das reflexões [3]. Este assunto será desenvolvido com maior detalhe no ponto 3.3.1.

Os ecos tratam-se de um tipo particular de reflexões, que chegam suficientemente atrasadas, mas suficientemente fortes, para poderem ser captadas pelo ouvido humano como sons distintos do som direto. Isto acontece sempre que a diferença entre a percepção do som direto e a reflexão é superior a 50 ms [2], o que corresponde a uma diferença de percurso de cerca de 17 m entre a onda sonora compondo o som direto e a onda sonora que propaga o eco. A deteção de ecos ocorre com maior facilidade no exterior porque neste caso as restantes reflexões são mais dispersas, pelo que não são tão eficazes a mascarar possíveis ecos. Já no interior, é necessário que as paredes que não são origem do eco sejam mais absorventes e/ou que existam superfícies côncavas ou cantos que potenciem a sua intensidade para que estes sejam facilmente detetados [6].

2.5. DIFUSÃO

A difusão corresponde ao fenómeno de reflexão da energia sonora em todas as direções. Para que seja possível obter este efeito é necessário que a superfície refletora possua irregularidades, sendo que as suas dimensões terão influência nas frequências que sofrem reflexão. [2]

Segundo Randall e Ward [3] existem seis características mensuráveis essenciais para que uma sala tenha a difusão perfeita:

- i. A frequência e irregularidades espaciais obtidas por medição de ondas estacionárias devem ser negligenciáveis;
- ii. Picos no decaimento sonoro devem ser negligenciáveis;
- iii. O decaimento sonoro deve ser perfeitamente exponencial, isto é, deve ser representado por uma linha reta numa escala logarítmica;
- iv. O tempo de reverberação deve ser igual em qualquer ponto da sala;
- v. O decaimento deve ser igual para qualquer frequência;
- vi. O decaimento deve ser independente das características direcionais do microfone de medição.

Este fenómeno está muitas vezes ligado também ao fenómeno da ressonância, que ocorre quando uma onda sonora atinge um espaço de dimensões limitadas e sofre diversas reflexões no seu interior antes de ser devolvida ao espaço principal, em todas as direções – ocorre assim um fenómeno de difusão devido às reflexões ocorridas no ressoador. Este princípio foi aplicado desde a antiguidade para aumentar os tempos de reverberação e a difusão sonora em diversos espaços. [3]

2.6. OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS

2.6.1. PARÂMETROS OBJETIVOS

2.6.1.1. Introdução

Os parâmetros acústicos objetivos permitem avaliar a acústica de um espaço recorrendo a valores medidos por equipamentos através de relações energéticas ou temporais do sinal sonoro por eles recolhido. Permitem caracterizar a audibilidade e as condições ideais para a audição da palavra ou música, entre muitos outros usos. [2]

2.6.1.2. Tempo de decaimento curto (EDT)

É uma adaptação do tempo de reverberação. Representa o tempo que o nível de pressão sonora demora a cair 60 dB, medido a partir de um decaimento de 10 dB e multiplicado por um fator de 6. [2]

2.6.1.3. Rácios de baixos

São rácios utilizados para comparar os tempos de reverberação ou a intensidade sonora entre baixas e altas frequências, de modo a avaliar o balanço tonal. O rácio mais utilizado é normalmente o BR_{RT} (*Bass Ratio* baseado no Tempo de Reverberação).

$$BR_{RT} = \frac{T_{r,125} + T_{r,250}}{T_{r,500} + T_{r,1k}} \quad (2.21) [2]$$

2.6.1.4. RASTI

O RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) mede a inteligibilidade da palavra por meios objetivos indiretos, podendo variar entre 0 (nula inteligibilidade) e 1 (ótima inteligibilidade) [2]. É medido com recurso a um altifalante capaz de reproduzir certas características da voz humana e um recetor. [7]

2.6.2. PARÂMETROS SUBJETIVOS

2.6.2.1. Introdução

Embora todos os parâmetros objetivos de caracterização acústica de um espaço possam corresponder aos valores pretendidos e ideais para a sua utilização, nem sempre os utilizadores dos espaços apreciam a sua acústica, e o contrário pode também acontecer. Uma vez que qualquer espaço é primariamente destinado a satisfazer as necessidades dos seus utilizadores, importa que esses se sintam satisfeitos com a acústica do local. [6]

Qualquer juízo deverá ser feito não baseado numa mera opinião de qualquer utilizador, mas fundamentado na opinião de especialistas treinados: músicos, engenheiros acústicos, críticos, etc., mesmo tendo em conta que a sua opinião pode não ser fundamentada em nenhum dado científico. Este juízo subjetivo, tendo em conta que a perceção sonora varia de pessoa para pessoa, é normalmente muito variável de indivíduo para indivíduo e difícil de estabelecer, mesmo nos casos em que é garantida a ausência de influências externas, pelo que este tipo de parâmetros é então difícil de quantificar ou qualificar e não é representativo pela sua grande variabilidade. Ainda assim, estes são estudos interessantes que permitem perceber como é fruído o som num espaço e quais as possíveis alterações a fazer para melhorar o seu desempenho acústico. [6]

2.6.2.2. Ruído de Fundo

É constituído por todos os ruídos que não são provenientes diretamente da fonte sonora ou do recetor. São habitualmente um efeito indesejado, podendo atingir níveis de pressão sonora consideráveis. [2]

2.6.2.3. Intensidade do Som

Resulta da sobreposição do som direto e do som refletido, e traduz a intensidade ou o volume que é percecionado pelo recetor. [2]

2.6.2.4. Clareza do discurso musical

Depende do tipo de reflexão existente no espaço, representando a definição com que os sons são percebidos. Uma elevada clareza conduz ao que normalmente se chama um espaço com uma acústica *seca*. [2]

2.6.2.5. Reverberância

Associada ao tempo de reverberação, ilustra a persistência do som no espaço após a cessação da emissão sonora. [2]

2.6.2.6. Eco

Como explicado no ponto 2.4, os ecos consistem em reflexões que chegam ao recetor com um atraso significativo (mais de 50 ms) e com uma intensidade sonora elevada. [2]

2.6.2.7. Intimidade

A intimidade consiste na sensação de proximidade à fonte sonora, isto é, uma elevada intimidade acústica conduz à sensação de que o recetor se situa numa sala pequena. [2]

2.6.2.8. Direccionalidade

A sensação de que o som se propaga ao longo de um eixo que liga o recetor à fonte deve-se ao efeito da direccionalidade. Por vezes, este efeito é quebrado e o recetor tem a sensação que o som vem de outro local que não a fonte sonora. [2]

2.6.2.9. Envolvimento

Depende da reverberação e difusão do som no espaço. O envolvimento traduz a sensação de se estar imerso no som, fazendo com que aparente chegar ao recetor a mesma energia sonora de todas as direcções. [2]

2.6.2.10. Equilíbrio tímbrico

Consiste na sensação de equilíbrio entre frequências graves e agudas, isto é, da não existência de desigualdades na receção dos diferentes sons. [2]

3

ACÚSTICA EM GRUTAS

3.1. ALGUNS CONCEITOS ESPELEOLÓGICOS

A espeleologia é a ciência que estuda as grutas, englobando os seus fenómenos geológicos e biológicos, dividindo-se então em geoespeleologia e bioespeleologia. O estudo da morfologia cársica inclui-se na geoespeleologia, estudando os fenómenos de transformação das formações rochosas por ação de reações físico-químicas entre a água e a rocha solúvel, como é o caso do calcário. O termo “carso” surge de Kras, uma região na Eslovénia e Croácia na zona do Adriático em que o calcário está fortemente esculpido por fenómenos deste tipo. [8]

A água é a principal responsável pelas diversas formações ocorridas em maciços calcários. O seu poder de dissolução e de erosão esculpe o calcário formando passagens para os cursos de água. Sendo o calcário uma rocha pouco porosa mas solúvel, a permeabilidade e a significativa infiltração de água nestes maciços ocorre através de fendas que permitem que a água se infiltre e que vá esculpindo o seu caminho no interior da rocha, dando assim origem a formações como as grutas. Podemos então definir três tipologias de formações cársicas [8]:

- a) Formas de absorção: constituem todas as formas que permitem a infiltração da água na rocha;
- b) Formas de condução: conjunto de formas que permitem a circulação da água no interior da rocha calcária (onde se incluem as grutas);
- c) Formas de emissão: conjunto de formas que permitem a restituição da água à superfície (exurgências).

O fenómeno de dissolução do calcário ocorre quando a água que com ele entra em contacto possui uma dada acidez devido à dissolução de dióxido de carbono na mesma, originando ácido carbónico. Quando este ácido entra em contacto com o calcário reage com o mesmo, dando origem a bicarbonato de cálcio que se dissolve facilmente em água. No entanto, nem todo o dióxido de carbono dissolvido na água dá origem a ácido carbónico, sendo que o que não o faz procura o equilíbrio combinando-se com o ar ou com o CO_2 presente no bicarbonato de cálcio. Esta última reação causa a precipitação de carbonato de cálcio, ou seja, calcário, quando há um desequilíbrio nas reações do CO_2 por alteração da quantidade de CO_2 no ar, que ocorre constantemente em espaços como grutas. [8]

É importante referir que quanto mais ácida for a água, ou seja, quanto mais CO_2 nela estiver dissolvido, mais agressiva esta será para o calcário e que os calcários mais puros (com mais CO_3Ca) são mais solúveis. [8]

A carsificação origina várias formações típicas, das quais se salientam as seguintes [8]:

- a) *Dolinas*: originadas pela infiltração de água na interseção de duas diáclases, criando-se uma zona de maior dissolução de calcário e consequente perda de volume de rocha localizada. Forma-se assim uma depressão circular na superfície;
- b) *Uvalas*: criadas pela junção de duas ou mais dolinas, quando estas se desenvolvem mais rapidamente à superfície do que em profundidade;
- c) *Poljes*: zonas de depressão planas extensas, com vários km² de área. Podem formar-se através da junção de dolinas e uvalas, por desenvolvimento de uvalas sobre falhas tectónicas ou por carsificação de uma zona tectónica;
- d) *Vales mortos, perdidos e cegos*: formam-se através da ação de águas superficiais que não se infiltram rapidamente, formando cursos de água superficiais que esculpem o calcário, aquando de períodos de grande pluviosidade. Terminam num ponto de infiltração da água no solo;
- e) *Algares*: aberturas no solo habitualmente devidas à evolução de uma dolina em profundidade. À medida que a dolina vai ganhando profundidade, e caso exista já um espaço oco abaixo desta, a camada de calcário que separa esse espaço oco da superfície acaba por ceder e cria uma passagem direta da superfície para os canais subterrâneos. Podem também surgir por processos tectónicos, pela ação de erosão da água que se infiltra por fendas ou por erosão a partir de ascensão de água presente no subsolo;
- f) *Grutas*: são as formas de condução de água que são penetráveis com desenvolvimento horizontal, designadas também por covas ou cavernas. Caso sejam ainda um percurso de condução de água, são designadas por *ativas* ou *vivas*, caso contrário, designam-se por *inativas* ou *mortas*. As diferentes partes de uma gruta têm diferentes designações [8]:
 - i. *Corredores*, quando são estreitas e longas;
 - ii. *Passagens*, quando são baixas, estreitas e curtas;
 - iii. *Galerias*, quando são muito altas;
 - iv. *Salas*, quando se estendem por uma área ampla;
 - v. *Salões*, quando têm uma área ampla e tetos altos.

O processo de formação das grutas acima referidas dá-se através do avanço progressivo da água no interior do maciço, originando assim esses espaços onde posteriormente se formam estalactites (teto), estalagmites (solo) e outras formações semelhantes: depósitos do CO₃Ca (carbonato de cálcio) que se precipita. [8]

3.2. APLICABILIDADE DA ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS A GRUTAS

A acústica de edifícios estuda e trata as características acústicas de espaços fechados produzidos pelo Homem, podendo ter como objetivo a correção acústica de um espaço, centrando-se no som nele emitido, ou o seu isolamento sonoro, procurando evitar que exista transmissão de/para o exterior. [2]

Sob este ponto de vista, é então possível estabelecer um paralelismo para o estudo e caracterização acústica de grutas: tratam-se de espaços fechados, sobre os quais o Homem não tem tanto controlo como nos edifícios mas acerca dos quais pode investigar para conhecer as características da envolvente e da própria gruta, podendo por isso recolher os dados necessários para fazer um estudo satisfatório, nomeadamente ao nível de volumetria, materiais, transmissões sonoras, absorção sonora, tempo de reverberação, etc.. Os pontos 3.4 e 3.5 referem alguns exemplos de estudos já realizados nesta área.

A maior diferença entre as grutas e os edifícios, no âmbito do estudo acústico destes espaços, terá necessariamente que passar pelas características da envolvente: num edifício, sendo um ambiente totalmente artificial e controlado, é possível conhecer com facilidade as propriedades dos materiais que têm um papel relevante no desempenho acústico. As formas são geralmente regulares e os materiais homogêneos e bem conhecidos. Já no caso de uma gruta, à semelhança de outros espaços naturais e criados sem a interferência do Homem, um dos fatores que importa estudar são os materiais e características espaciais da envolvente, já que podem ter propriedades desconhecidas e com grande influência acústica. Também a volumetria e morfologia do espaço, normalmente muito irregulares e heterogêneas, são fatores a ter em conta. Todos estes fatores terão um grande efeito nos tempos de reverberação, na reflexão, absorção e difusão das ondas sonoras.

Sob este ponto de vista, será importante fazer um paralelismo entre os parâmetros que serão relevantes para caracterizar os espaços em estudo e os que habitualmente são estudados em espaços similares construídos pelo Homem, tendo em conta a utilização prevista – espaços como salas de espetáculos, concertos ou teatro, galerias de arte e museus, igrejas, etc.. Assim sendo, e de acordo com estudos previamente desenvolvidos como são os casos dos estudos da acústica em grutas feitos por Reznikoff [1] ou os diversos estudos da acústica em igrejas desenvolvidos por Carvalho [9, 10] ao nível de parâmetros objetivos e subjetivos, os parâmetros a considerar, com as devidas adaptações, serão o tempo de reverberação, o nível sonoro do ruído de fundo, o RASTI e o coeficiente de absorção sonora da envolvente, e ainda, por interpretação subjetiva, a impressão geral e a inteligibilidade da palavra.

3.3. IMPORTÂNCIA DA CONFIGURAÇÃO E CONSTITUIÇÃO DA ENVOLVENTE

3.3.1. CONFIGURAÇÃO E MORFOLOGIA DA ENVOLVENTE

A envolvente tem um papel preponderante no que toca ao comportamento acústico dos espaços em estudo. Pode-se destacar a importância do volume e também da forma das superfícies da envolvente, que influenciam fortemente o tempo de reverberação e as reflexões. Como referido no ponto 2.3.2, as diversas formulações que permitem calcular o tempo de reverberação no interior de um compartimento indicam que o aumento do volume implica alterações no tempo de reverberação registado. O volume do espaço tem também influência na absorção sonora proporcionada pelo ar, que aumenta com o aumento do volume, já que esta aumenta de acordo com a quantidade de ar presente no espaço e tende a ser maior nas altas frequências do que nas baixas. [3]. Ainda assim, uma vez que o volume está no numerador e no denominador da equação 2.17, o valor do tempo de reverberação depende também de outros parâmetros, pelo que não pode ser analisado de modo simples.

O coeficiente de absorção sonora do material da envolvente tem também uma grande influência sobre o tempo de reverberação, já que dele depende a energia sonora refletida [2]. Os casos em estudo, à semelhança de grande parte das grutas a nível mundial e como será possível verificar no quarto capítulo, são formações cársticas, esculpidas pela água no calcário ao longo dos tempos. A escorrência da água nas suas superfícies, transportando e depositando partículas de calcite [11], dá origem a superfícies de aspeto complexo, polido e compacto e, por isso, previsivelmente pouco absorventes, o que se confirma no capítulo 6 da presente dissertação. [2]

No que toca à forma da envolvente, o seu efeito no comportamento acústico dos espaços sente-se principalmente no comportamento das reflexões e na difusão do som. Como previamente referido no ponto 2.4, as diferentes formas da envolvente provocam diferentes comportamentos ao nível da direção tomada pelas ondas sonoras refletidas pelas superfícies. Assim, salientam-se as seguintes formas e respetivos efeitos na reflexão sonora [3]:

- a) Superfícies planas: refletem a energia sonora como se de um espelho se tratasse. Há assim uma difusão da energia sonora. Verifica-se também que o ângulo de incidência das ondas sonoras na superfície é igual ao ângulo de reflexão;
- b) Superfícies convexas: provocam a difusão da energia sonora em todas as direções (figura 3.1). A frente de onda sonora tende a tornar-se reta com a distância, logo a reflexão desta onda sofre deformação;

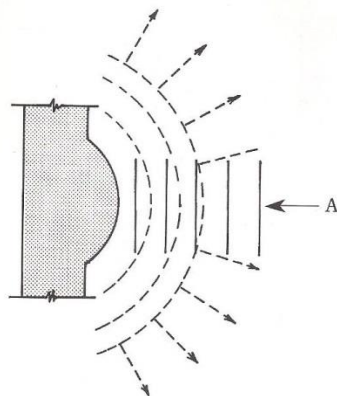


Figura 3.1 – A frente da onda sonora, reta, sofre reflexão deformada de acordo com a forma da superfície, difundindo a sua energia em todas as direções.

- c) Superfícies côncavas: provocam a concentração das ondas sonoras refletidas num ponto em particular (figura 3.2), já que a frente de onda é desta vez refletida de modo a que toda a energia sonora se dirige ao ponto central da concavidade. Há então uma concentração de toda a energia sonora num só ponto [6]. Podem ser prejudiciais quando existem em espaços onde se procura o efeito contrário, a difusão;

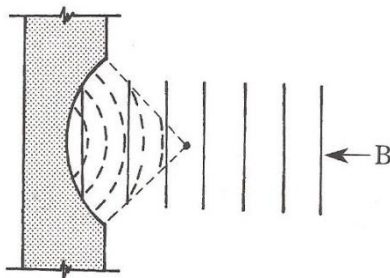


Figura 3.2 - A frente da onda sonora, reta, sofre reflexão deformada de acordo com a forma da superfície, concentrando a sua energia num só ponto, o centro da concavidade.

- d) Superfícies parabólicas: provocam o mesmo efeito de concentração causado pelas superfícies côncavas, podendo no entanto ser úteis para a produção de ondas sonoras planas e paralelas quando a fonte se encontra na sua proximidade da superfície parabólica;
- e) Superfícies cilíndricas: provocam a condução das ondas sonoras ao longo da superfície quando estas têm uma direção quase tangente à mesma;
- f) Superfícies planas paralelas: podem provocar a ocorrência de ondas estacionárias quando as ondas sonoras resultantes das sucessivas reflexões entre as duas superfícies se sobrepõem em fase; [3] quando estas superfícies são refletoras podem gerar ressonância. Este efeito é por vezes conhecido como *flutter echo* [2];
- g) Cantos: a existência de cantos provoca a reflexão das ondas sonoras na mesma direção que estas têm inicialmente, sendo estas, no entanto, reflexões de intensidade mais baixa já que têm que embater em duas superfícies antes de serem detetadas pelo recetor, perdendo energia.

No que diz respeito aos casos em estudo, tendo em conta que o material predominante numa gruta se trata de rocha calcária compacta, seria de esperar que houvesse bastante reflexão e que houvesse reflexões distintas e nítidas [2]. No entanto, existe também um grande efeito de difusão devido à grande irregularidade das superfícies da envolvente e à existência de protuberâncias como as estalactites, estalagmites e outras formações [11-13], que provocam reflexões totalmente dispersas, levando assim à difusão da energia sonora e a uma homogeneização do som no espaço.

3.3.2. CONSTITUIÇÃO DA ENVOLVENTE

Os materiais que constituem a envolvente dos espaços terão uma grande influência na absorção e reflexão da energia sonora, como referido no ponto anterior. O valor do coeficiente de absorção sonora (α) varia de acordo com as propriedades dos materiais que constituem as superfícies [2]. Como foi acima referido, o material que reveste a envolvente das grutas é geralmente calcário compacto e polido, resultante dos depósitos de calcite transportada pelas águas infiltradas [11]. Assim, é de esperar um coeficiente de absorção sonora baixo. O seu valor será determinado para uma pequena amostra no tubo de ondas estacionárias, como será desenvolvido no sexto capítulo deste trabalho.

3.4. ACÚSTICA EM GRUTAS COM PINTURAS RUPESTRES

A “arqueologia acústica” estuda o uso do som pelas sociedades passadas. Inicialmente esta área centrava a sua investigação no estudo de instrumentos musicais das diversas sociedades e o seu papel e funcionalidade. No entanto, na década de 1980, surgiu uma nova corrente que estuda não os instrumentos mas sim os espaços em que se supõe que teriam sido realizadas atividades acusticamente importantes, como a música, com recurso a instrumentos ou à voz. Foi sob este ponto de vista que se deu início ao estudo da acústica de grutas onde existiam marcas da presença de sociedades do Paleolítico, por Reznikoff e Dauvois. [14]

Segundo Reznikoff, muitos estudos mostraram que diversos monumentos, datados desde o Paleolítico à Era Medieval, têm qualidades ressonantes [15]. São, de facto, vários os estudos que pretendem demonstrar a coexistência de arte rupestre com comportamentos acústicos dignos de registo em várias grutas: Le Portel, Niaux, Isturitz, Arcy-sur-Cure, Oxocelhaya (França), La Valltorta (Espanha), entre outras [1, 14].

Desde cedo o ser humano utilizou as grutas como espaço de abrigo e para realização de rituais. Segundo Scarre e Lawson [15], não se pode afirmar com completa certeza que a ressonância num local tenha sido de facto utilizada ou apreciada pelos povos que pintaram e gravaram as grutas em estudo, nem existem estudos que provem efetivamente a utilização da ressonância. Não existem testemunhos escritos pelos povos da Antiguidade que provem essa hipótese, portanto apenas é possível basear a investigação na relação existente entre as pinturas encontradas e as características acústicas dos espaços em que se encontram.

A hipótese colocada por Reznikoff previamente à realização dos seus estudos defendia que existiriam mais pinturas ou sinais em locais com melhor ressonância ou qualidade do som. Esta hipótese foi posteriormente verificada, demonstrando-se assim a existência de uma relação entre as características acústicas dos locais e as pinturas neles contidas [1]. Como “melhor ressonância” definem-se alguns cenários possíveis: a ocorrência de amplificação sonora numa dada frequência causada pela concentração da energia sonora nessa mesma frequência após refletida, uma duração da ressonância superior a 3 segundos, a possibilidade de se ouvir essa mesma ressonância a mais de 25 metros do ponto de reflexão ou a ocorrência de pelo menos 5 ecos [16].

De facto, verifica-se uma maior presença de pinturas, gravuras ou pontos pintados em locais com maior ressonância no interior das grutas, bem como de pontos vermelhos em passagens, túneis ou nichos (que funcionam quase como ressoadores), permitindo assim colocar a hipótese de que estas imagens e pontos marcariam de facto locais com condições acústicas especiais. Presume-se que estas marcações e outros desenhos mais complexos foram feitos para efeitos de orientação no interior das grutas, já que o som era utilizado como um sonar, devido à falta de iluminação, mas também para marcar pontos onde a ressonância poderia ajudar na comunicação entre pessoas ou para engrandecer os rituais e cânticos [15], já que parecia que a gruta estaria “viva” e que a rocha envolvente responderia aos cânticos nela realizados [1]. A crença de que os ecos e a ressonância eram um meio de comunicação de deuses ou seres místicos é relativamente comum entre os povos da antiguidade, o que levaria a que os locais onde estes fossem comuns se tornassem locais sagrados e, consequentemente, locais de ritual que eram frequentemente decorados, dando origem às pinturas e figuras que hoje se encontram em locais que, de outro modo, não teriam justificação para estarem pintados [17].

As investigações realizadas por Reznikoff [1] centraram-se então em três princípios:

- i. A maioria das imagens localiza-se em locais ressonantes ou na sua proximidade imediata [1], e há uma relação proporcional entre a ressonância do local e a quantidade de imagens nele existentes [16];
- ii. A maioria dos locais de ressonância ideal é também local onde existem imagens (há imagens localizadas no local possível mais próximo). Entre os locais de ressonância ideal, os melhores estão sempre decorados ou pelo menos marcados;
- iii. Alguns sinais apenas podem ser explicados relacionando-os com o som.

Todos estes princípios inicialmente supostos se confirmaram:

- i. Este princípio confirmou-se nas suas investigações nas grutas de Le Portel, Niaux, Isturitz, Arcy-sur-Cure e Oxocelhaya (França), considerando a hipótese de o local de maior ressonância não ser apropriado para a decoração e, por isso, estas poderem estar num raio até 2 m ou na superfície adequada mais próxima. No entanto, nem todos os locais com ressonância estão marcados, já que em muitas grutas estes existem em grande número, pelo que apenas os melhores justificariam a sua decoração, o que conduz ao segundo princípio;
- ii. Também este princípio se verifica: a observação dos espaços e da sua ressonância permite concluir que há uma muito maior concentração de gravuras e desenhos nos locais com melhor ressonância, sendo por isso locais prioritários para este efeito;
- iii. Marcas circulares vermelhas e desenhos de animais foram frequentemente encontrados em locais com uma excecional ressonância. Produzindo sons semelhantes aos que produziram os animais representados, obtêm-se os melhores resultados. As marcas vermelhas apresentavam-se tanto mais destacadas ou em maior quantidade quanto melhores as características ressonantes no local, pelo que também este princípio se verifica [1].

Uma vez que os princípios acima descritos se verificaram em grande parte dos locais estudados, Reznikoff afirma que, nas grutas estudadas, a localização das gravuras se deve principalmente às características sonoras dessas mesmas localizações: *A picture requires sound; sound calls for a picture*. Como confirmação, houve sinais que foram descobertos pelo processo inverso: o estudo da ressonância conduziu à descoberta de novas figuras em locais com boa ressonância. [1]

Importa ressaltar a subjetividade dos resultados obtidos: os estudos desenvolvidos por Reznikoff tiveram por base medições feitas com recurso a diapasões e fontes sonoras controladas mas também a estímulos vocais não tão bem controlados. O “aparelho de medição” de eleição foi o ouvido de profissionais treinados com extrema sensibilidade auditiva, já que a ressonância acabava por saturar os

recetores eletrónicos, fornecendo dados incorretos [1]. No entanto, os estudos por ele desenvolvidos procuraram fazer uma análise não só acústica ou geofísica, mas essencialmente antropológica, pelo que importava utilizar as mesmas ferramentas que deram origem ao fenómeno – a voz humana [16].

As experiências conduzidas nas grutas de La Valltorta (Espanha), recorrendo a métodos semelhantes, conduziram a conclusões equivalentes. Procurou-se perceber se os locais com mais gravuras correspondiam a locais com melhor ressonância do que aqueles com menos gravuras, e em simultâneo procurou-se encontrar os locais com maior ressonância e mais ecos dentro da gruta. Verificou-se, mais uma vez, que a localização das áreas com mais gravuras era a mesma das áreas com melhor ressonância e ecos. De facto, nenhum dos pontos testados fora das áreas com gravuras revelou resultados interessantes ao nível acústico. Concluiu-se então que também aqui existia uma relação entre os locais com mais gravuras e os locais com melhores características acústicas. [14]

3.5. CASOS PARTICULARES

3.5.1. GRUTAS DE LURAY (EUA)

As grutas de Luray localizam-se no estado da Virgínia, nos Estados Unidos da América. O seu interesse neste estudo centra-se na utilização que é dada a parte da gruta: para além de ser uma gruta turística com as convencionais visitas, dispõe de um instrumento musical considerado único, o *Stalacpipe Organ* - um órgão que utiliza as estalactites como elemento de percussão, um litofone. [18]

De origem cársica, a sua envolvente é formada em rocha calcária e dolomite, tendo sido erodida ao longo dos tempos pela ação da água, e sendo também fortemente adornada por estalactites, estalagmites e outras formações semelhantes resultantes da deposição da calcite. [19]



Figura 3.3 – *Stalacpipe Organ* (grutas de Luray, EUA) sendo tocado manualmente. O seu funcionamento é habitualmente automático, utilizando martelos de borracha que ao percutir as estalactites produzem sons, funcionando como um litofone. [18]

Estas grutas foram descobertas em 1878, e desde então tornaram-se um ponto turístico de referência. Atualmente estão adaptadas a esse fim, com iluminação, caminhos e todas as infraestruturas necessárias, mas mantém a sua riqueza natural: colunas, estalactites, estalagmites, lagos, salas com altura de edifícios de 10 andares, entre outras formações naturais de grande interesse. [18]

O *Stalacpipe Organ* (figura 3.3) consiste num dispositivo criado em 1954 pelo matemático e cientista Leland W. Sprinkle, que levou 36 anos a desenhar, conceber e criar. O seu interesse surgiu após uma visita feita às grutas em que Sprinkle ficou fascinado com a sonoridade obtida quando o guia bateu

numa das estalactites e a ressonância obtida [19]. O seu teclado está ligado através de cerca de 8 km de cabos a diversas câmaras da gruta, já que as estalactites a utilizar foram escolhidas por toda a gruta de acordo com o som que emitiam ao ser batidas com um martelo – procurou-se aplicar o mesmo funcionamento dos litofones pré-históricos. Habitualmente este órgão é ativado automaticamente, sendo tocado manualmente apenas em ocasiões especiais [18].

3.5.2. GRUTAS DE ST. MICHAEL (GIBRALTAR)

As grutas de St. Michael são uma rede de grutas localizadas na Reserva Natural de Upper Rock, em Gibraltar, de origem cársica. Esta gruta é já utilizada pelo Homem desde tempos pré-históricos: a presença de alguns artefactos, pinturas rupestres e ossadas humanas indica a sua utilização pelo Homem de Neandertal e posteriormente no período Neolítico; outros artefactos mostram que foi utilizada pelos Gregos, Romanos e Fenícios, existindo mesmo descrições feitas por Pompónio Mela, um geógrafo romano, e pelo poeta Homero. [20]

Como em exemplos anteriores em que as grutas tinham utilizações ou significados relacionados com o sagrado, esta gruta também tem em seu torno uma série de crenças: enquanto a gruta não era suficientemente conhecida, acreditou-se que uma das grutas deste complexo – a gruta de Leonora – não teria fundo e que seria o início de uma passagem subterrânea de cerca de 24 km até África por baixo do estreito de Gibraltar, por onde teriam chegado os macacos que hoje habitam a área [21]; os Gregos acreditavam que a Upper Rock seria um dos pilares de Hércules e que as grutas de St. Michael constituíam os Portões de Hades, a entrada para o submundo [20]; em 1840 o mistério destas grutas adensou-se após o desaparecimento de uma equipa de exploradores do exército britânico no seu interior, não tendo sido encontrados quaisquer vestígios seus em diversas explorações futuras, colocando de novo a hipótese de existirem saídas desconhecidas ou uma rede tão intrincada de passagens onde alguém se pudesse perder [21].



Figura 3.4 – Auditório das grutas de St. Michael (Gibraltar). Acolhe diversos eventos, desde concertos a óperas, passando por espetáculos de ballet e teatro. [21]

Atualmente, esta é uma gruta turística que recebe mais de um milhão de visitas anualmente. Tem um auditório na sua maior sala, a Catedral, que acolhe espetáculos de diversos tipos, desde concertos de música clássica ou de rock, a ballet, teatro, entre outros eventos (figura 3.4). [20, 21]

Esta formação consiste num complexo de grutas interligado. A sala inicial, chamada *Upper Hall*, tem cinco ligações a outras grutas. Outras ligações a partir daqui conduzem a outras câmaras que chegam a estar a 63 m abaixo do nível da entrada. [21]

3.5.3. CUEVAS DEL DRACH (ESPAÑA)

As Cuevas del Drach, situadas na ilha de Maiorca, em Espanha, são uma das principais atrações turísticas da ilha. Têm um desenvolvimento de cerca de 1200 m e uma profundidade máxima de 25 m. Estas grutas eram já conhecidas durante a Idade Média. No século XIX foram exploradas mais minuciosamente, tendo sido descobertas novas partes. A sua abertura ao público deu-se em 1935, após obras de remodelação e adaptação às condições de segurança necessárias para o efeito. [22]

A visita a esta gruta inclui uma passagem de barca no seu lago, durante a qual o visitante assiste a um concerto de música clássica (figura 3.5). [22]

A sua formação é de origem cársica, estando situadas num terreno constituído por calcário do Miocénico que, moldado pela passagem da água, deu origem às grutas e às formações que a decoram: estalactites, estalagmites, colunas, telas e estalactites arborescentes. [22]



Figura 3.5 – Barco circulando no lago Martel, no interior das Cuevas del Drach. [22]

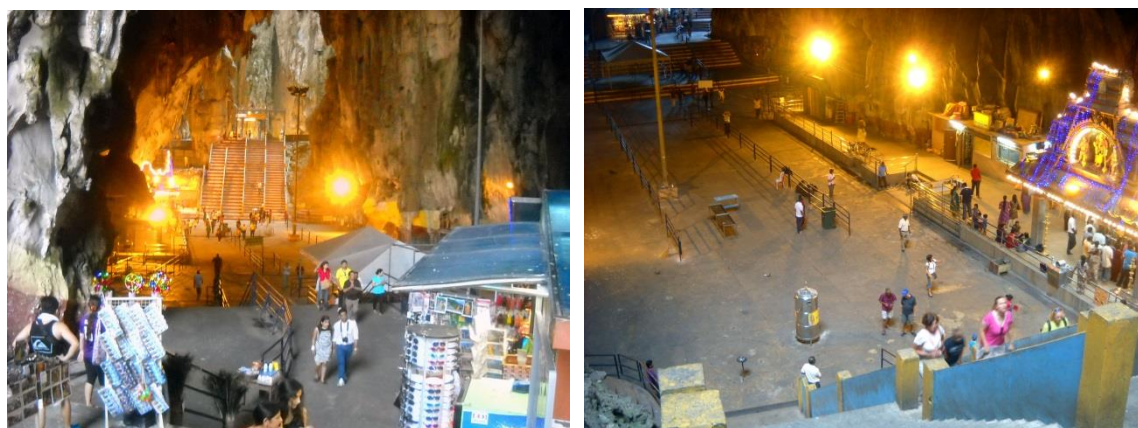
3.5.4. GRUTAS DE BATU (MALÁSIA)

As grutas de Batu, localizadas a cerca de 15 km a norte de Kuala Lumpur, Malásia, são uma das atrações turísticas mais populares da sua região [23]. São constituídas por uma rede de diversas cavernas calcárias de formação cársica, existindo mesmo diversos locais onde a erosão levou à abertura de algares de grandes dimensões que constituem autênticas claraboias. O seu ambiente diferencia-se da grande parte das restantes formações semelhantes do hemisfério norte por se tratarem das grutas mais próximas do equador, o que lhes confere um clima tropical no seu interior e, devido às frequentes tempestades, são constantemente percorridas por água, levando a que sejam das grutas mais ativas e de maiores dimensões [24].

O maciço que contém estas grutas tem uma espessura de cerca de 100 m, contando com diversos canais, salas e algares escavados pela água. Apenas duas destas salas são acessíveis ao público: a mais pequena, a *Temple Cave*, contém um templo dedicado a Sri Maniam, sendo local de devoção desde o fim do século XIX. Numa das extremidades desta caverna existe um grande algar, que constitui passagem de luz e seres vivos para o interior das grutas (figura 3.6). [25] A segunda sala acessível, muito maior, conhecida como *Dark Cave*, está num nível inferior e é paralela à *Temple Cave*, desenvolvendo-se para além desta, sendo parte de um conjunto de cavernas e canais extenso e

complexo. Ambas as salas são acessíveis através da escadaria principal, com 272 degraus [26]. Ao longo de toda esta formação existem diversos algares que fazem a ligação entre o interior e o exterior das grutas, o que, juntamente com o seu clima tropical, as torna num ecossistema ativo e com variedade de fauna e flora [25].

Estas grutas são um dos mais famosos centros de turismo religioso da Malásia, conhecidas por serem palco de uma celebração religiosa hindu chamada *Thaipusam*, iniciada em 1892 após a construção de um templo a *Murukan* no seu interior (figura 3.7). Visitantes chegam um pouco de todo o mundo tanto para assistir a esta celebração religiosa de penitência e agradecimento que ocorre geralmente entre o fim de janeiro e o início de fevereiro, como para visitar o interior das grutas e os templos nelas construídos. Apesar da grande afluência turística, estas grutas e os seus templos mantêm ainda a sua identidade cultural, preservando os costumes e rituais sem ceder à pressão do turismo. [23]



Figuras 3.6 e 3.7 – À esquerda: entrada na *Temple Cave*, nas grutas de Batu. É visível o acesso ao algar pela escadaria interior; à direita: interior da *Temple Cave*, onde é visível um dos templos. [27]

O espaço correspondente à *Dark Cave* mantém-se quase natural, podendo ver-se todas as suas formações cársticas, como é o caso das estalactites e estalagmites. Já a *Temple Cave* foi transformada num espaço de culto, contando com pequenos altares, figuras e estátuas um pouco por toda a sua extensão, incluindo as paredes do algar onde esta sala termina. [26]

3.5.5. GRUTA DE PARPALLÓ (ESPANHA)

A Gruta de Parpalló, em Espanha, localizada no maciço de Monduber, em Valência, foi descoberta em 1872 por Vilanova y Piera, tendo sido objeto de escavação entre 1922 e 1931 por Pericot [28]. O seu registo estratográfico e os artefactos nela encontrados revelaram que esta gruta teria sido utilizada pelo Homem entre o Paleolítico superior e o Neolítico [29]. Nesta gruta foram encontradas, entre diversos outros artefactos, mais de 5000 plaquetas e blocos de calcário decorados que datam de diversos períodos do Paleolítico, servindo como catálogo da evolução estilística da arte das sociedades da região [28].

As características acústicas desta gruta revelam-se surpreendentes: a sua grande abertura ao exterior (figura 3.8) provoca uma redução na persistência do som no seu interior, o que justifica um tempo de reverberação anormalmente baixo em relação ao que seria espectável dado o seu volume e material envolvente. [29]



Figura 3.8 – Entrada da Gruta de Parpalló. [30]

Dada a elevada quantidade de artefactos encontrados no seu interior que provam a sua grande influência como ponto de reunião e a existência de um patamar no seu interior, adequado para servir de palco para um orador, González [29] procurou encontrar uma ligação entre estes factos e as características acústicas deste local.

As medições realizadas *in situ* permitiram obter valores de 1,1 segundos para o EDT[500/1k] em três posições diferentes do espaço, segundo dados fornecidos após contacto com o autor do estudo, e um RASTI médio de 0,58, valores estes que revelam uma boa inteligibilidade da palavra e um tempo de reverberação adequado para utilizar este espaço como auditório e espaço de reuniões. Verifica-se ainda que existe uma amplificação sonora para as frequências que correspondem às frequências da voz humana. [29]

3.5.6. GRUTAS DE PERTOSA, CASTELCIVITA E CASTELLANA (ITÁLIA)

As grutas de Pertosa, Castelvita e Castellana são três grutas localizadas no sul de Itália, junto às cidades de Pertosa, Castelvita e Castellana, respetivamente. Todas elas são espaços caracterizados por um longo desenvolvimento na horizontal, com salas capazes de acolher atividades que vão para além das visitas turísticas, como atuações musicais ou mesmo representações teatrais, como é o caso d’*O Inferno de Dante* que anualmente é encenado em todos estes espaços. [31-33]

As grutas de Pertosa são conhecidas pelo Homem desde há cerca de 40000 anos, tendo sido mais utilizadas durante a Idade do Bronze, segundo artefactos descobertos na mesma em explorações arqueológicas. Estas grutas são hoje visitáveis por turistas, dispondo de três percursos distintos. [31]

A entrada destas grutas é atravessada pelo rio Negro, que imerge e se torna num rio subterrâneo durante cerca de 200 m, emergindo na entrada das grutas com uma pequena cascata. As visitas iniciam-se por isso com um atravessamento desse rio em barcos, iniciando-se depois um percurso pedestre que percorre os diferentes túneis e salas destas grutas de origem cársica (figura 3.9). [34]

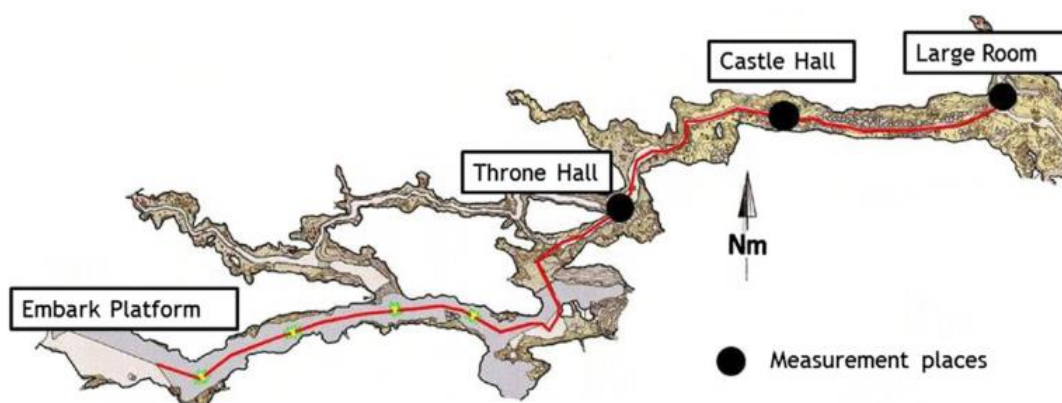


Figura 3.9 – Planta esquemática das grutas de Pertosa com indicação dos pontos de medição dos parâmetros acústicos. [34]

A morfologia e ambiente das grutas de Pertosa possibilitam e estimulam a realização de diversas atividades no seu interior para além das visitas turísticas. Adicionalmente às diversas atuações musicais ou teatrais, é também realizado todos os anos um festival de música étnica neste espaço. [34]

Foram realizadas medições acústicas nestas grutas, com maior atenção para as salas e espaços onde as atividades desenvolvidas se concentram. Nas medições em três espaços distintos, a *Large Hall*, a *Castle Hall* e a *Throne Hall*, obtiveram-se os resultados médios apresentados no quadro 3.1. [34]

Quadro 3.1 – Valores de alguns dos parâmetros acústicos medidos nas grutas de Pertosa. [34]

Sala	Volume (m ³)	T_{30} [500,1k]	RASTI
Table Hall	1300	4,6	0,44
Castle Hall	220	1,6	0,55
Throne Hall	1000	3,0	0,31

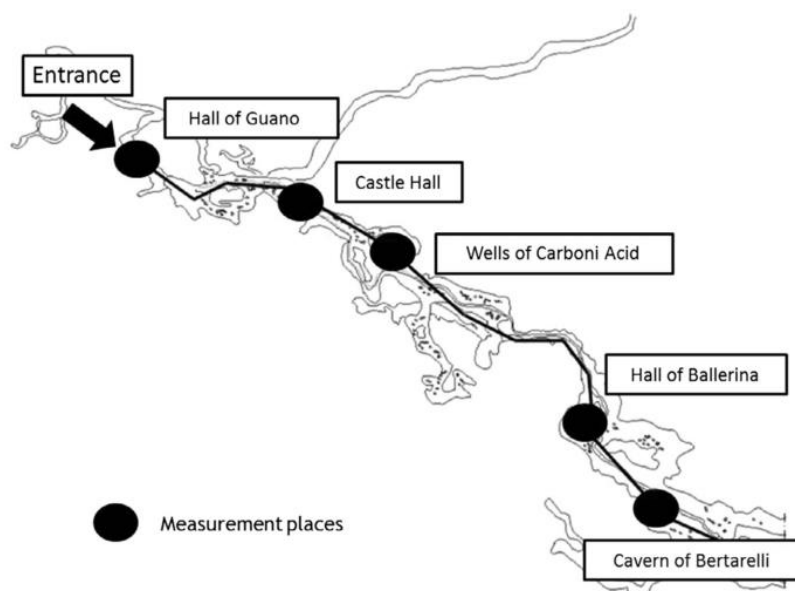


Figura 3.10 – Planta esquemática do percurso turístico nas grutas de Castelvita com indicação dos pontos de medição dos parâmetros acústicos. [34]

As grutas de Castelvita foram também utilizadas pelo Homem desde tempos remotos, havendo evidências da sua presença desde o Paleolítico. Apesar de a sua exploração ter sido iniciada em 1889, apenas há poucas décadas estão abertas para visitas ao público, num percurso turístico de cerca de 1300 m (figura 3.10). [34] A sua extensão total é de cerca de 5000 m, pelo que dispõe ainda de duas outras modalidades de visita, dirigidas a espeleólogos amadores e profissionais, que exploram a fundo as galerias principal e secundárias deste espaço. Esta é também uma gruta de origem cársica, rica em estalactites, estalagmites, colunas e outras formações daí resultantes (figuras 3.11 e 3.12). [32]

Estas grutas recebem as mais variadas atividades nas salas do seu percurso turístico, passando por atuações musicais, teatrais ou até mesmo festivais gastronómicos [32].

As medições acústicas realizadas nestas grutas conduziram aos resultados apresentados no quadro 3.2.



Figuras 3.11 e 3.12 – Interior das grutas de Castelvita. À esquerda: parte do percurso turístico; à direita: parte do percurso para espeleólogos amadores. [32]

Quadro 3.2 – Valores de alguns dos parâmetros acústicos medidos nas grutas de Castelvita. [34, 35]

Sala	Volume (m ³)	$T_{30}[500,1k]$	RASTI
<i>Guano Hall</i>	1800	1,7	0,53
<i>Castle Hall</i>	2750	1,2	0,64
Poços de ácido carbónico	2000	2,7	0,49
<i>Ballerina Hall</i>	2500	2,7	0,53
<i>Cavern of Bertarelli</i>	5600	2,5	0,58

As grutas de Castellana, também de origem cársica, foram descobertas em 1938 e são desde então um dos pontos de atração turística da zona onde estão inseridas. Toda a gruta pode ser visitada, existindo uma modalidade em que apenas é percorrido 1 km do interior da gruta, e outra em que é percorrida a totalidade dos seus 3 km de extensão, podendo ainda ser visitada após o horário de fecho ao público numa modalidade que permite ao visitante percorrer a gruta em situação semelhantes aos exploradores iniciais. Destaca-se pela grande dimensão das suas diferentes salas e pela *Grotta Bianca*, uma sala notável pela coloração esbranquiçada de todas as formações cársicas existentes no seu interior (figura 3.13). [33]

Estas grutas são utilizadas também como espaço para a realização de encenações teatrais e diversos eventos musicais, sendo mesmo organizados festivais de coros no seu interior, tirando partido dos seus espaços de grande dimensão (figura 3.14). [34]



Figuras 3.13 e 3.14 – Interior das grutas de Castellana. À esquerda: interior da *Grotta Bianca*; à direita: algar da *Caverna dei Monumenti*. [33]

Os pontos de medição escolhidos para a realização das medições acústicas foram aqueles que teriam mais utilizações nas atividades desenvolvidas no interior destas grutas. Estes espaços localizam-se no troço de 1 km percorrido na modalidade de visita mais curta (figura 3.15). Os resultados são apresentados no quadro 3.3. [34]

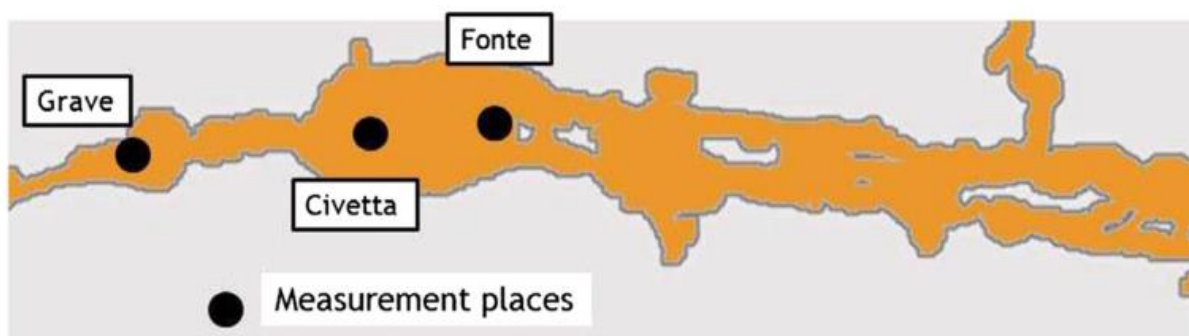


Figura 3.15 – Planta esquemática do percurso turístico nas grutas de Castellana com indicação dos pontos de medição dos parâmetros acústicos. [34]

Os valores obtidos para as três grutas permitem afirmar que estas cumprem no geral os critérios acústicos adequados para a sua utilização como auditórios, particularmente para atuações de música clássica ou sinfónica, sendo os tempos de reverberação baixos tendo em conta o grande volume das salas, devido ao efeito de absorção e difusão sonora provocadas pelas superfícies envolventes. [34]

Quadro 3.3 – Valores de alguns dos parâmetros acústicos medidos nas grutas de Castellana. [34]

Sala	Volume (m ³)	$T_{30}[500,1k]$	RASTI
Grave	30000	5,8	0,40
Civetta	1000	2,3	0,53
La Fonte	3300	2,1	0,51

3.6. VALORES ADEQUADOS DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

Os valores dos parâmetros usados na caracterização acústica dos espaços indicam a sua adequabilidade aos diferentes usos – diversos estudos foram compilando, ao longo do tempo, quais os melhores valores para determinados parâmetros de acordo com o uso pretendido do espaço, como já foi analisado no ponto 2.3.2., referente ao tempo de reverberação. Fazendo uma análise ao quadro 2.2, de acordo com as utilizações comuns em grutas como espaço turístico, religioso ou de espetáculos, podem salientar-se os valores de T que se referem a espetáculos musicais ou teatrais ou palestras ou eventos semelhantes como sendo os mais relevantes.

No que diz respeito aos valores ideais do ruído de fundo, podem definir-se diferentes tolerâncias de acordo com a utilização pretendida para os espaços. Neste caso, e de acordo com Egan [36], os valores ideais do nível de pressão sonora contínua equivalente para espaços para concertos deverão ser inferiores a 30 dB(A) e para espaços para palavra, como é o caso das visitas guiadas, o valor máximo deverá ser de 40 dB(A).

O RASTI deverá ter um valor adequado à utilização pretendida. Preferencialmente o seu valor deverá ser o mais próximo de 1,0 possível, para garantir a boa inteligibilidade da palavra. No entanto, há que ter em conta que uma maior inteligibilidade implica menos reflexões e menor tempo de reverberação, pelo que, nos casos em que se pretenda um tempo de reverberação elevado, como, por exemplo, em espaços onde se possam realizar concertos de música de orquestra, não é vantajoso ter um RASTI muito elevado.

4

CASOS DE ESTUDO: GRUTAS DAS SERRAS DE AIRE E CANDEEIROS

4.1. INTRODUÇÃO

Entre as várias grutas existentes em Portugal, as grutas das serras de Aire e Candeeiros estão entre as mais conhecidas e visitadas, beneficiando também da proximidade ao Santuário de Nossa Senhora de Fátima que atrai milhares de visitantes todos os anos.

Os casos de estudo que constituem a amostra utilizada nesta dissertação são as grutas da Moeda, Santo António e Alvados. Pela sua configuração e corrente utilização constituem uma amostra representativa de um grande conjunto de grutas a nível mundial, e que poderão tirar proveito do estudo aqui desenvolvido.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

4.2.1. LOCALIZAÇÃO



Figura 4.1 – Localização das grutas da Moeda, Santo António e Alvados no território continental português.

As grutas em estudo localizam-se no conjunto das serras de Aire e Candeeiros. As grutas da Moeda localizam-se na freguesia de São Mamede, concelho da Batalha, distrito de Leiria [11]. As grutas de Alvados e de Santo António localizam-se na freguesia de Alvados, concelho de Porto de Mós, distrito de Santarém [13]. Distam, em linha reta, cerca de 12 km entre si e 22 km por estrada. A entrada das grutas da Moeda localiza-se a cerca de 370 m de elevação em relação ao nível do mar, e a entrada das grutas de Santo António e Alvados está cerca de 360 m de altitude.

Embora relativamente próximas e de características semelhantes a nível geológico, estas grutas têm entre si toda a Serra de Aire e Candeeiros, como se pode ver nas figuras 4.1 e 4.2. As três estão num território que faz parte do Maciço Calcário Estremenho, uma área cuja geologia está caracterizada e que será descrita no ponto seguinte deste trabalho.

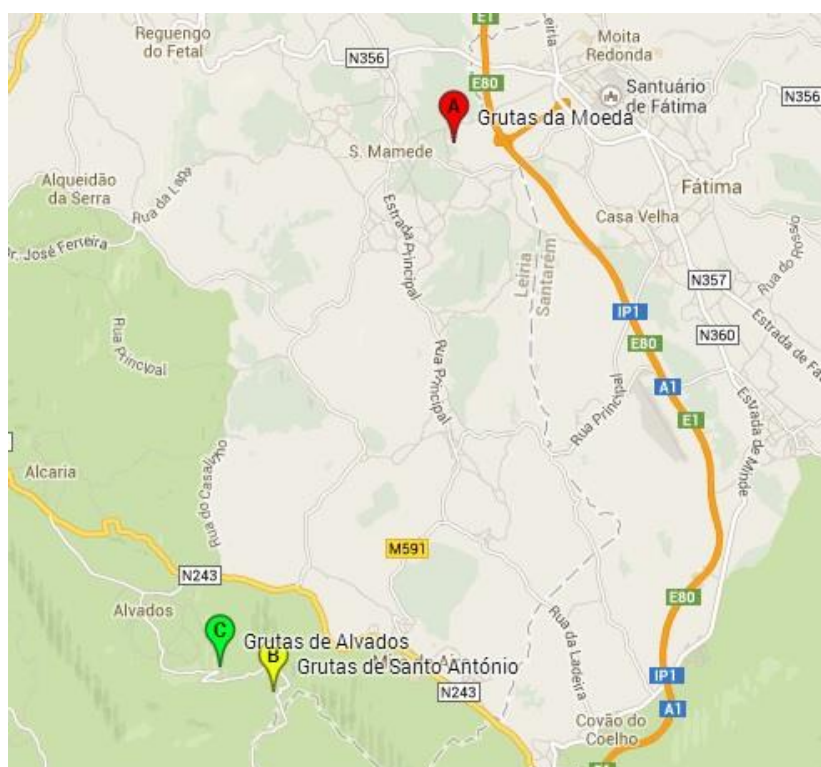


Figura 4.2 – Vista aérea da envolvente das três grutas objeto de estudo .

4.2.2. MACIÇO CALCÁRIO ESTREMENHO

O Maciço Calcário Estremenho (MCE) foi definido como uma unidade geomorfológica por A. Fernandes Martins na sua tese de Doutoramento em 1949 [37], sendo este ainda um trabalho de referência no estudo da geologia desta área. Constitui uma reserva de calcário, principalmente do período Jurássico, de grande extensão, estando localizado na fronteira entre os distritos de Leiria e Santarém, coincidente com as serras de Aire e Candeeiros, enquadrado pelas cidades de Leiria, Alcobaça, Rio Maior, Torres Novas e Ourém (figura 4.3) [38]. Destaca-se da sua envolvente pela sua orografia acidentada e pela sua elevação, sendo possível distinguir, numa carta topográfica, três zonas elevadas separadas pelas depressões de Minde-Alvados e da Mendiga, que coincidem com falhas tectónicas que atravessam o Maciço [37].

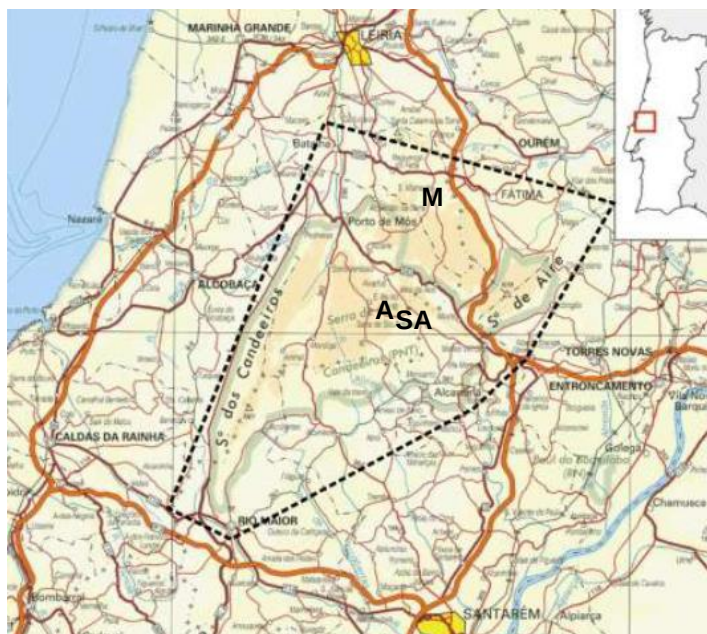


Figura 4.3 – A tracejado, os limites do Maciço Calcário Estremenho, localizado entre as cidades de Leiria, Alcobça, Rio Maior, Torres Novas e Ourém [38]. Os pontos representam as grutas que serão objeto de estudo: Moeda (M), Alvados (A) e Santo António (SA).

A formação das serras de Aire e Candeeiros é explicada pelos movimentos tectónicos e pela ocupação da zona na era mesozoica pelo mar: a erosão, sedimentação e os movimentos das placas que constituem a crosta deram origem às formações existentes, levando à rutura nas zonas limítrofes quebradiças do MCE, e à formação de dobras, relevos e sobreposição de camadas nas zonas com material mais elástico como o calcário [37], o que explica o facto de o MCE se elevar bastante em relação à área envolvente [39]. Esta ductilidade do Maciço permitiu que este adaptasse o seu relevo de acordo com os movimentos da crosta, formando-se também falhas, fendas e fraturas resultantes dos esforços dinâmicos a ele aplicados [37].

O calcário presente neste maciço é principalmente pertencente ao período Jurássico médio, o chamado *Dogger* (figura 4.4). Todo o MCE apresenta grandes influências marinhas, com algumas zonas influenciadas também por águas doces ou salobras. [40]

Embora grande parte da sua constituição seja feita por calcários do período Jurássico, tem ainda outras camadas de épocas distintas, mas nenhuma de impermeabilidade significativa. Assim sendo, esta é uma região que, à superfície, não tem qualquer curso de água, excetuando na sua zona periférica – sem que nenhum desses cursos de água chegue a atingir zonas de calcário do período Jurássico médio. A permeabilidade dos calcários deve-se à presença frequente de fendas relacionadas com fraturas e diaclases e não à sua porosidade. Estas fendas levam à infiltração rápida da água no solo em profundidade, pelo que esta se torna uma zona de grande dispersão hidrográfica [37] ocupando mais de 760 km² [38], mas apenas a nível subterrâneo e de difícil acesso. Estas águas surgem à superfície na periferia do MCE. [37]

As grutas e algares, entre outras formações, tiveram a sua génese na ação dessa água que circula no interior do MCE, através de fenómenos cárnicos. Dois fenómenos são de importância relevante: a solubilidade do calcário na água foi permitindo à última que fosse formando as galerias, lagos, grutas, poljes, dolinas, entre outras formações, que hoje se conhecem; a erosão pela ação mecânica da água,

que, por atrito e choque, transporta as partículas rochosas ao longo dos cursos de água, criando novas passagens, principalmente nos cursos com maior pressão. [37]

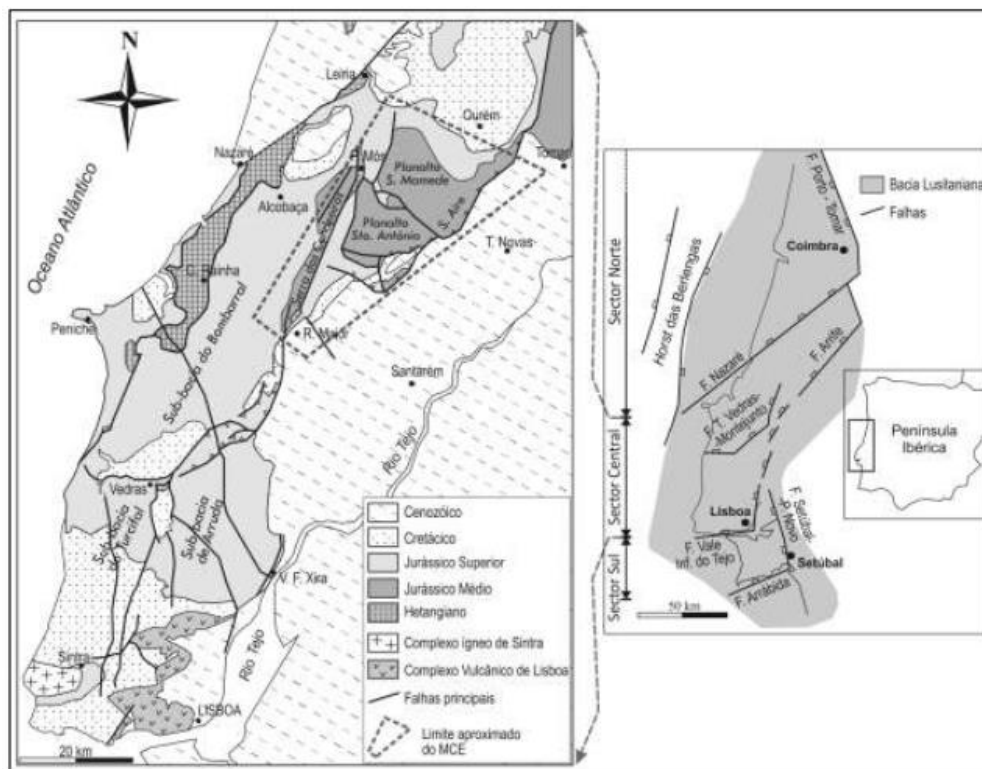


Figura 4.4 – Principais períodos de formação dos materiais constituintes do território. Grande parte do Maciço Calcário Estremenho corresponde a calcários de formação no Jurássico. [38]

Como em qualquer maciço cárstico, o acesso à água a partir da superfície é muito difícil, já que a água tende a correr em galerias e redes que ligam nascentes perenes ou cursos temporários de água. No entanto, a formação de lagos subterrâneos ou os pontos de descarga das redes subterrâneas permitem um mais fácil acesso à água. Esta quase constante movimentação da água leva a que seja importante salientar mais duas características deste tipo de maciços que se verificam neste caso: são de evolução progressiva, levando à evolução lenta dos efeitos da erosão e dissolução; existe uma hierarquização de afluentes, havendo uma união ao longo da rede dos vários cursos de água: a área de quase 800 km² de recarga chega a ser servida apenas por cinco nascentes perenes de elevado caudal. [38]

Os maciços cársticos como é o MCE representam cerca de 5% do território português, tendo características próprias a nível mineralógico, hidrológico, ecológico e ambiental. Este maciço e as suas formações são então de grande importância no estudo da geologia nacional. [41]

4.2.3. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E GEOLÓGICA

4.2.3.1. Introdução

Será de seguida feita uma descrição das particularidades de cada uma das grutas e dos espaços que foram escolhidos no seu interior para a caracterização acústica. O nível de detalhe desta descrição é o conseguido através observação visual e medições expeditas, da recolha dos dados oficiais fornecidos pelas respetivas administrações, equipas de gestão e guias, e pelo seu cruzamento com a informação recolhida acerca do MCE.

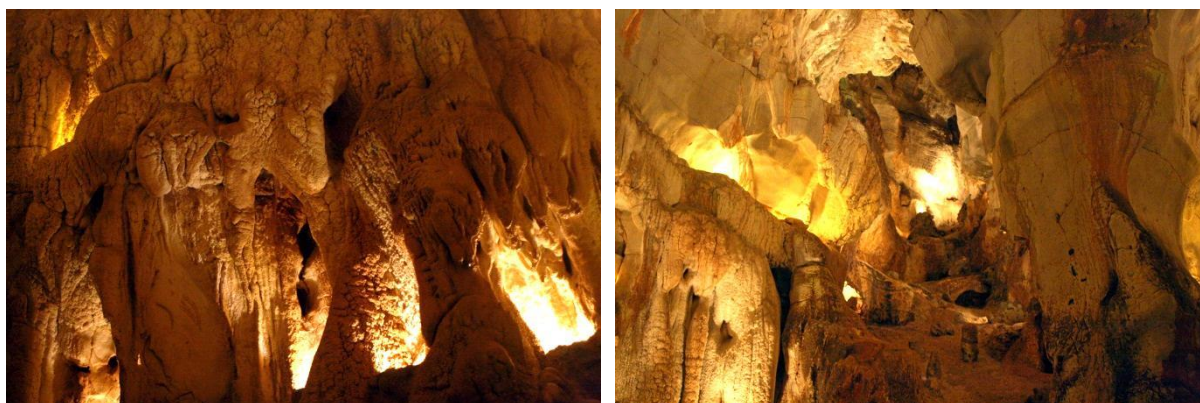
Para uma correta localização dos pontos de medição, a indicar no capítulo 5, e breve caracterização volumétrica das salas analisadas em cada gruta, foi feito um breve levantamento topográfico dos espaços com recurso a um medidor de distâncias eletrónico. As representações obtidas tratam-se de simplificações, já que este tipo de espaço é extremamente irregular, sendo por isso impossível fazer um levantamento detalhado no curto espaço de tempo do qual se dispôs para este efeito. Os volumes, áreas e distâncias obtidos são então valores, resultantes das medições feitas e do cálculo de áreas e estimativas de alturas médias por zonas em cada uma das grutas com recurso às plantas fornecidas pelos gestores das mesmas e ao *software* de desenho AutoCAD. Nas figuras 4.11, 4.16 e 4.21 podem visualizar-se as divisões dos espaços caracterizados por zonas em que se considerou que a altura média era próxima para todos os pontos no seu interior. A altura média atribuída a essas zonas foi arbitrada por comparação visual com a altura nos pontos onde esta foi medida (correspondentes aos pontos de medição dos parâmetros acústicos e a alguns pontos adicionais para caracterização morfológica), já que não era possível medir a altura em todas as zonas por impossibilidade de acesso.

Com recurso às figuras 4.10, 4.12 e 4.20 e escalando as mesmas de acordo com as medições de distâncias realizadas *in situ*, foram estimadas as áreas de cada zona com recurso ao *software* AutoCAD e posteriormente foram calculados os volumes correspondentes a cada uma das zonas, de acordo com as alturas médias estimadas. Os resultados estão apresentados nos quadros 4.1, 4.2 e 4.3 para as grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados, respetivamente.

A análise dos volumes livres obtidos para cada gruta deverá ter em conta que estes se tratam de valores resultantes de grandes aproximações, devido à incerteza das medições, à irregularidade das superfícies, à grande e abrupta variação de alturas no interior das grutas e também à impossibilidade de confirmar as alturas em extensões consideráveis destes espaços.

4.2.3.2. Grutas da Moeda

As grutas da Moeda foram descobertas em 1971 por dois caçadores que descobriram um Algar no meio do mato que funcionou como entrada para posterior exploração, descobrindo-se assim todas as galerias, lagos e percursos que as compõem. Têm um percurso visitável de cerca de 350 m de comprimento, atingindo os 45 m de profundidade abaixo da cota de entrada. De acordo com os dados fornecidos pela administração da gruta, esta mantém uma temperatura constante durante todo o ano rondando os 18 °C [11].



Figuras 4.5 e 4.6 – Pormenores do interior da *Sala do Pastor* e *Cascata*, nas Grutas da Moeda. À esquerda: superfícies irregulares causadas pela deposição da calcite transportada com a água; à direita: variedade de texturas e formas no espaço. [fotografias da autora]

Tal como a generalidade das formações do MCE, estas têm origem em fenómenos cársticos, com a dissolução do calcário provocada pela água sendo o maior fator de formação das diferentes galerias e túneis, acrescentando também o efeito da erosão mecânica, de menor importância. Também aqui se encontram formações características deste tipo de espaços, resultantes da deposição de calcite transportada pela água: estalactites, estalagmites, colunas, cortinas de calcite, entre outras [11].

A visita a estas grutas permitiu recolher algumas informações adicionais acerca da sua composição. O revestimento das superfícies tem diversas tipologias, desde superfícies onde o calcário do período Jurássico está exposto, a calcário de formação cristalina, com um interior e exterior cristalizado em pequenas formações irregulares, desgastadas pela erosão no exterior, passando pelas superfícies compactas, densas, mas muito irregulares causadas pela acumulação da calcite transportada pela água (figuras 4.5 a 4.9). Existem também zonas onde existem acumulações de *terra rossa*, um tipo de argila mole que comumente preenche alguns vazios existentes no calcário do MCE.



Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 – Pormenores do interior da *Sala do Pastor* e *Cascata*, nas Grutas da Moeda. À esquerda: superfícies irregulares, estalactites e estalagmites; ao centro: maciço central; à direita: escorrência de água da cascata artificial, que utiliza a água das infiltrações para alimentar os cursos de água nas Grutas da Moeda.

[fotografias da autora]

A morfologia destas grutas consiste em salas que se ligam entre elas como se de um túnel se tratasse, existindo uma zona (a *Cascata*), onde há um espaço de maior volume com a ligação de duas partes distintas desse túnel e ainda a ligação ao algar por onde se deu a descoberta da gruta, criando assim um espaço amplo (figura 4.10). Este foi o local escolhido para fazer a caracterização acústica, já que é o espaço que é mais frequentemente utilizado em apresentações e atuações no interior destas grutas.

Nas grutas da Moeda, como foi referido acima, o espaço estudado foi a zona que engloba a *Sala do Pastor*, o *Recanto das Comparações* e a *Cascata*. De acordo com o exposto no ponto 4.2.3.1, segue-se a divisão deste espaço em zonas de diferentes alturas médias na figura 4.11 e respetivos valores de áreas, altura e volumes no quadro 4.1.



Figura 4.10 – Mapa esquemático das grutas da Moeda. [11]

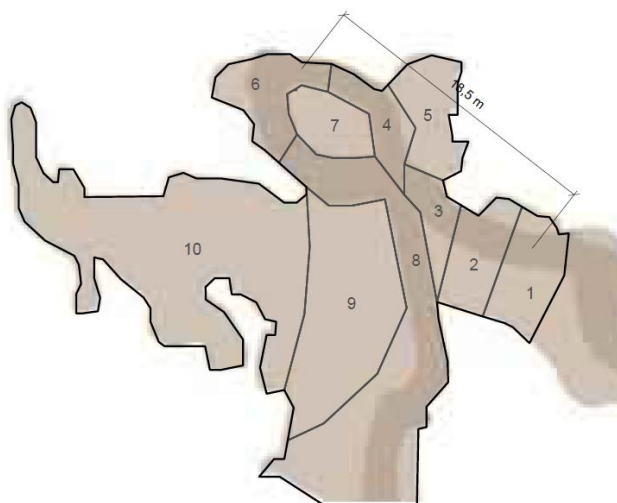


Figura 4.11 – Divisão da zona estudada nas grutas da Moeda em dez zonas, incluindo a *Sala do Pastor*, *Recanto das Comparações* e a *Cascata*.

O comportamento destas grutas, como é comum em qualquer gruta do género, sofre alterações sazonais: durante o inverno e em períodos de chuva frequente e intensa ocorre a infiltração de água a partir da superfície de forma bastante abrangente e em elevada quantidade, sendo por isso uma fonte de ruído. Já durante o estio, estas infiltrações reduzem-se a um mínimo que corresponde à circulação de água no interior da própria gruta, reduzindo também o nível sonoro do ruído produzido pela água.

Quadro 4.1 – Valores aproximados da área, altura média e volume de cada zona definida na figura 4.11 para o espaço de estudo nas grutas da Moeda. A altura média foi estimada por comparação visual com as alturas medidas nos pontos de medição definidos no ponto 5.2.2.

Zona	Área (m ²)	Altura média estimada (m)	Volume (m ³)
1	27	4,2	112
2	23	5,6	132
3	14	7,2	99
4	17	4,8	81
5	24	4,0	97
6	26	6,3	162
7	18	6,8	125
8	105	8,3	868
9	73	10,0	733
10	148	-	523
TOTAL	476	-	2930

4.2.3.3. Grutas de Santo António

As grutas de Santo António foram descobertas em 1955. Inicialmente, o único acesso a estas grutas era feito pelo algar localizado na *Primeira Sala*, através do qual foram descobertas por um jovem de cinco anos e um grupo de pedreiros que trabalhavam na área que, ao investigar esse mesmo algar, se aperceberam que este daria acesso a uma gruta de grande dimensão. O seu nome é resultado da coincidência entre o nome do responsável pela sua descoberta, que vivia na freguesia de Santo António, e a data da sua descoberta, que ocorreu no mês de junho. [12]

Posteriormente, com o aumento do número de visitantes, urgiu melhorar os acessos, que até então eram feitos por uma longa escadaria de madeira colocada nesse mesmo algar. Assim sendo, foi escavado um túnel artificial que liga a superfície à sala menor e preparado o percurso para visitas. Tiveram a sua reabertura ao público em 1971. [12]

É uma gruta de formação cársica como todas as formações deste maciço, originada pela dissolução e erosão provocada pela acumulação ou escorrência dos cursos de água subterrâneos que percorrem o Maciço Calcário Estremenho.

Na *Primeira Sala* pode observar-se o *Lago da Felicidade*, um lago natural que veda o acesso a uma outra sala contígua. Do lado oposto, existe um túnel natural que liga esta primeira sala à chamada *Grande Sala*, uma câmara de grandes dimensões com diferentes recantos e com uma grande densidade de estalactites, estalagmites, colunas e cortinas formadas através da deposição da calcite transportada pelas águas de infiltração que dissolvem o calcário do MCE (figura 4.12). [12] Também aqui se verifica a presença da água influenciada pela sazonalidade: durante o período de chuvas a infiltração da água é intensa e audível, havendo uma sensível diminuição da mesma durante períodos sem chuva.

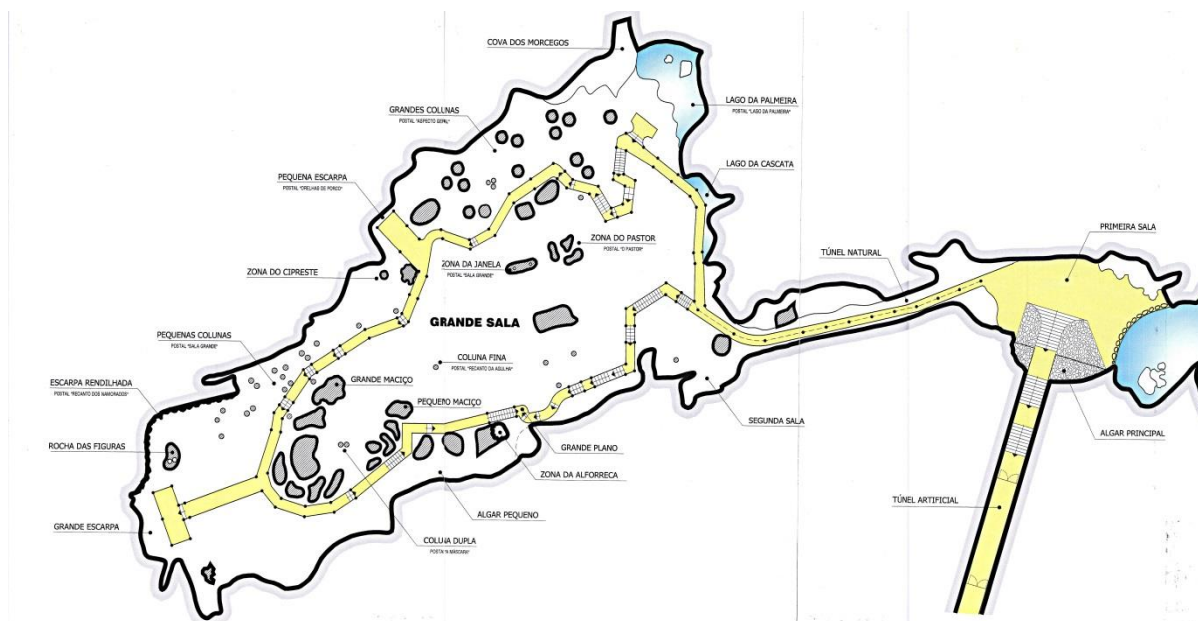


Figura 4.12 – Mapa esquemático das grutas de Santo António onde se podem distinguir as duas salas que as compõem, bem como a ligação entre elas pelo túnel natural. [12]

No interior da *Grande Sala* existem conjuntos de formações tão densas que acabam por formar “cortinas” separando diferentes espaços, sem que haja uma verdadeira separação física (figuras 4.13 a 4.15). Esta sala é muito desnivelada tanto ao nível do solo como no que toca à sua altura, tendo uma forma muito irregular e também muito ampla. Esta é no entanto uma gruta que, no seu interior, em geral, não tem desníveis abruptos no solo.



Figuras 4.13 e 4.14 – Pormenores do interior da *Grande Sala*, nas grutas de Santo António. À esquerda: percurso pedestre de visita entre as estalactites e estalagmites do espaço inferior da sala; à direita: cortinas, estalactites, estalagmites e colunas. [fotografias da autora]



Figura 4.15 – Vista panorâmica da parte inferior da *Grande Sala* nas grutas de Santo António. [fotografia da autora]

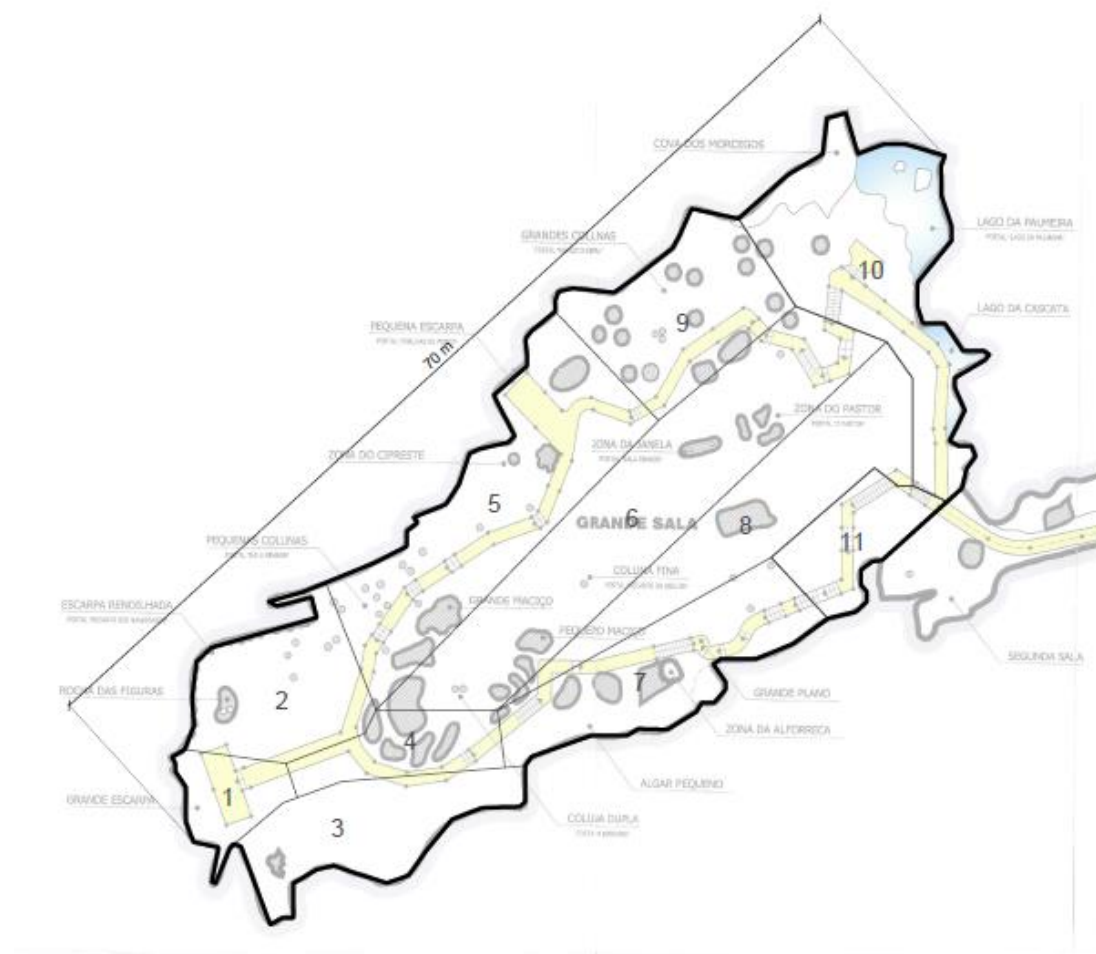


Figura 4.16 – Divisão da *Grande Sala* das grutas de Santo António em onze zonas.

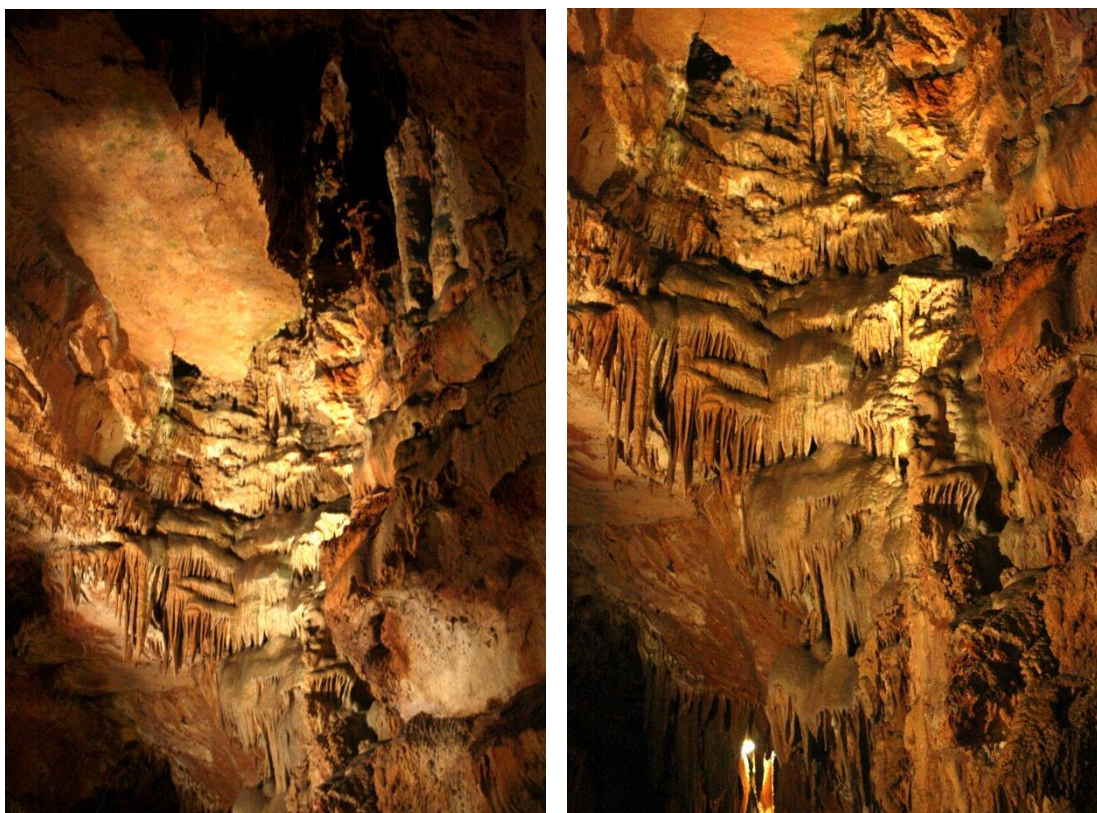
Quadro 4.2 – Valores aproximados da área, altura média e volume de cada zona definida na figura 4.16 para o espaço em estudo nas grutas de Santo António. A altura média foi estimada por comparação visual com as alturas medidas nos pontos de medição definidos no ponto 5.2.2.

Zona	Área (m ²)	Altura média estimada (m)	Volume (m ³)
1	40	8,9	357
2	103	4,8	490
3	101	10,2	1024
4	55	15,2	834
5	209	4,0	835
6	243	6,0	1461
7	125	7,0	877
8	142	8,0	1138
9	121	4,5	546
10	185	4,0	735
11	57	6,0	341
TOTAL	1382	-	8640

Utilizando o processo referido em 4.2.3.1, também o volume desta *Grande Sala* foi estimado através de aproximações do valor da sua área e das suas alturas médias por zona. Na figura 4.16 distinguem-se as zonas definidas para este espaço com diferentes alturas médias, detalhadas no quadro 4.2.

4.2.3.4. Grutas de Alvados

As grutas de Alvados são constituídas por dois corpos principais: as chamadas gruta velha e *gruta nova*. A *gruta velha* é uma formação conhecida há mais de 400 anos, sendo utilizada como abrigo desde tempos remotos a pastores e seus rebanhos. A *gruta nova* foi descoberta em 1964 por um grupo de trabalhadores que ficaram intrigados com a demora e ressonância do som de uma pedra caindo num algar – explorando-o, descobriram este novo espaço, mais amplo e profundo. Foram precisos cerca de dois anos e meio para que estas grutas fossem abertas ao público, já que houve uma grande necessidade de escavação de túneis artificiais de ligação entre câmaras e para saída, e criação de restantes condições de visita em segurança. [13]



Figuras 4.17 e 4.18 – Pormenores do interior da sala de maiores dimensões nas grutas de Alvados. À esquerda: teto da sala, com algumas superfícies lisas e pequenas formações cársicas; à direita: pormenor do teto e parede da sala, com formações do tipo cortina. [fotografias da autora]

As grutas de Alvados são constituídas por um conjunto de diversas salas interligadas e pequenos lagos desnivelados, com acesso direto a partir do exterior às três primeiras salas que estão ligadas por um túnel natural, que conduz os visitantes por uma sucessão de espaços e algares de altura notável. Têm uma extensão visitável de 450 m, sendo a largura máxima entre salas de 75 m e a altura máxima atinge os 95 m (figura 4.20). [13]

As formações presentes nestas grutas são também as habituais das formações cársticas: a ação de dissolução da água levou à abertura dos diversos algares, salas e túneis que as ligam, bem como à formação de estalactites, estalagmites, colunas e outras formações que decoram todos os espaços. [13]

Esta é uma gruta em que as formações naturais estão mais concentradas em certos locais, já que foi um espaço alterado para que pudesse ser visitável, o que criou um contraste considerável entre os espaços naturais e os espaços artificiais. Nos locais não alterados, verifica-se que as paredes são consideravelmente verticais, pelo que a acumulação de calcite se dá de uma forma dispersa, originando espaços mais amplos, altos e regulares quando comparados com as outras grutas em estudo (figuras 4.17 a 4.19).

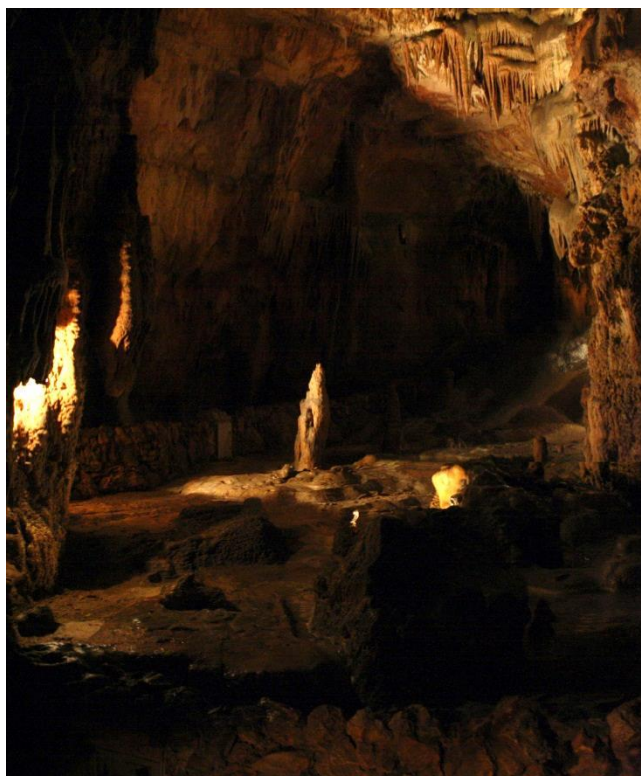


Figura 4.19 – Vista geral do interior da sala em estudo nas grutas de Alvados. [fotografia da autora]



Figura 4.20 – Mapa esquemático das grutas de Alvados. [13]

Também nestas grutas foi feito um estudo volumétrico do espaço caracterizado, utilizando o mesmo método que foi escolhido para as restantes grutas. Este espaço correspondeu à sala de maior volume, correspondente à primeira sala de grandes dimensões encontrada durante o percurso da visita (visível na figura 4.20 na parte superior esquerda).

Também nesta gruta o comportamento sazonal das infiltrações da água é verificado, criando um ruído significativo em épocas chuvosas.

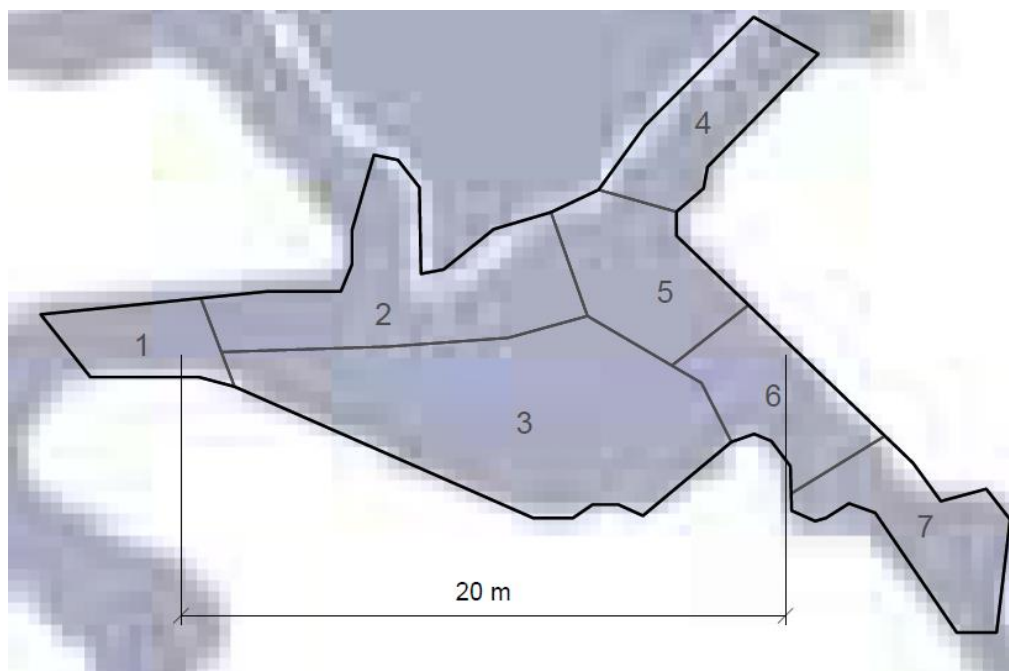


Figura 4.21 – Divisão da zona estudada nas grutas de Alvados em sete zonas.

Quadro 4.3 – Valores aproximados da área, altura média e volume de cada zona definida na figura 4.21 para o espaço em estudo nas grutas de Alvados. A altura média foi estimada por comparação visual com as alturas medidas nos pontos de medição definidos no ponto 5.2.2.

Zona	Área (m ²)	Altura média estimada (m)	Volume (m ³)
1	12	5,0	61
2	38	7,6	293
3	67	8,8	592
4	18	5,0	92
5	21	6,5	139
6	19	4,7	90
7	21	4,0	82
TOTAL	198	-	1350

4.2.3.5. Comparação de características morfológicas

Os três espaços estudados apresentam grandes diferenças a nível morfológico. No que toca à sua área e volume, como é possível analisar no quadro 4.4, a *Grande Sala* das grutas de Santo António é claramente mais extensa e volumosa que os restantes espaços, e existe também uma grande diferença

entre os espaços estudados nas grutas da Moeda e nas grutas de Alvados. Também a forma e ocupação dos espaços é muito distinta de gruta para gruta, já que nas grutas da Moeda existe uma formação clara em túnel, enquanto que nas grutas de Santo António a *Grande Sala* consiste numa sala ampla e de grandes dimensões mas fortemente ocupada por formações cársticas, e nas grutas de Alvados o espaço estudado é também amplo mas muito mais livre de formações cársticas, mais pequeno e mais regular que nas outras duas grutas.

Quadro 4.4 – Valores aproximados da área e volume de cada um dos espaços estudados.

Sala (Gruta)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Moeda	476	2330
Sto. António	1382	8640
Alvados	198	1350

4.3. UTILIZAÇÃO ATUAL DAS GRUTAS

Atualmente, todas as grutas objeto de estudo neste trabalho funcionam como grutas turísticas, abertas a visitas de público geral.

As grutas da Moeda podem ser visitadas em visitas guiadas, onde o visitante percorre a gruta com música de fundo e a presença de sistemas artificiais de circulação de água. Esporadicamente são realizadas atuações musicais para pequenos grupos na *Sala do Pastor*, na *Cascata* ou na *Marítima*, onde já atuaram coros, violinistas, entre outros. Foi já também realizada uma emissão de rádio a partir do interior desta gruta, e também já foi cenário para a rodagem de filmes. Dispõem também de atividades complementares à visita que permitem enriquecer a experiência turística e de aprendizagem. O CICA (Centro de Interpretação Científico-Ambiental) pretende explicar o processo de formação das grutas e a sua mineralogia, entres outros aspetos. [11]



Figura 4.22 – Cartaz publicitário a um Concerto de Saxofone em 1/6/2014 comemorativo do Dia da Criança, nas grutas de Santo António. [12]

As grutas de Santo António e as grutas de Alvados, beneficiando da sua proximidade, são atualmente geridas por uma só entidade. Ambas podem ser visitadas também em visitas guiadas, com grande

proximidade às formações naturais das grutas. As grutas de Alvados abrem para visitas apenas durante os fins de semana, ou todos os dias no período de verão.

As grutas de Santo António, abertas todo o ano, receberam já grupos corais e outros tipos de concertos na sua *Grande Sala*, onde existe um pequeno palco artificial para o efeito (tal como é o caso do concerto de saxofone publicitado na figura 4.22), sendo possível ter um público de 60 a 70 pessoas no interior do espaço. As grutas de Alvados receberam também já alguns grupos corais que, segundo informações fornecidas pelo *staff* da gruta, apreciaram bastante as condições acústicas do local [12, 13].

5

MEDIÇÕES

5.1. INTRODUÇÃO

Para poder fazer uma correta caracterização acústica dos espaços dentro das grutas estudadas e caracterizadas no capítulo 4, foram realizadas medições que permitiram a análise de parâmetros acústicos objetivos cujos procedimentos e resultados serão focados neste capítulo.

Os parâmetros acústicos objetivos determinados por medição foram o tempo de reverberação, de acordo com a norma EN ISO 3382-2 [42], o nível sonoro do ruído de fundo e o RASTI. Também o coeficiente de absorção sonora do material que constitui a envolvente de uma das grutas foi determinado recorrendo ao teste em tubo de ondas estacionárias, de acordo com a norma ISO 10534-1 [43], cuja análise será feita no capítulo 6. Obtendo estes valores, torna-se possível classificar objetivamente as características acústicas destes espaços, permitindo assim concluir acerca dos usos a que estes poderão ser adequados.

O critério de escolha dos parâmetros e pontos a analisar passou pela utilidade desses mesmos parâmetros e pela pertinência dos resultados obtidos de acordo com os pontos em análise. À partida, pode-se, por exemplo, referir que a medição do tempo de reverberação é mais útil nos espaços com maior volume, já que nos de menor volume este em princípio não é um fator decisivo na utilização que o espaço poderá vir a ter já que o campo reverberado não é tão significativo e estes tratam-se de espaços menos versáteis. Como observado no capítulo 4, a *Grande Sala* das grutas de Santo António é a mais volumosa das três salas estudadas, com um volume de cerca de 8640 m³. Segue-se a sala analisada nas grutas da Moeda, com um volume de aproximadamente 2930 m³ e, por último, a sala estudada nas grutas de Alvados, com cerca de 1350 m³.

As medições indicadas neste capítulo referentes ao tempo de reverberação, nível de pressão sonora do ruído de fundo em período chuvoso e RASTI foram realizadas no dia 8 de abril de 2014, entre as 9h00 e as 12h30 nas grutas da Moeda, entre as 13h00 e as 15h nas grutas de Santo António e entre as 15h15 e as 17h45 nas grutas de Alvados. Foram ainda medidos os valores da temperatura e humidade relativa no interior das grutas com recurso a um medidor eletrónico, obtendo-se os valores indicados no quadro 5.1. As medições relativas ao nível sonoro do ruído de fundo em período seco foram feitas no dia 15 de junho de 2014, entre as 9h00 e as 11h00 nas grutas da Moeda e entre as 13h00 e as 14h00 nas grutas de Santo António. Uma vez que este último período de medições se realizou já em época de elevada afluência de visitantes às grutas em estudo houve condicionantes que não possibilitaram a visita às grutas de Alvados.

O valor das temperaturas foi bastante superior ao esperado com base nas informações disponibilizadas pela gestão das grutas, especialmente nas grutas da Moeda, com uma temperatura de 25,5 °C sem

influência da presença de pessoas ou iluminação, já que foi um valor registado logo após a sua abertura.

Quadro 5.1 – Valores medidos da temperatura e humidade relativa no interior das três grutas. O valor registado para a humidade relativa foi o primeiro detetado pelo equipamento eletrónico, já que este saturava passados poucos segundos de exposição ao ar.

Sala (Gruta)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)
Moeda	25,5	96
Santo António	20,1	97
Alvados	21,5	97

5.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.2.1. METODOLOGIA

5.2.1.1. Equipamento

De acordo com a norma EN ISO 3382-2 [42], o equipamento necessário para realizar as medições do tempo de reverberação numa sala é o seguinte:

- i. *Fonte sonora*: a fonte sonora deve ser tão omnidirecional quanto possível e deve ser capaz de gerar um nível de pressão sonora suficientemente elevado para produzir curvas de decaimento (figura 2.4) com a gama dinâmica mínima necessária sem ser contaminada pela presença do ruído de fundo. O aparelho utilizado foi uma fonte sonora *Brüel & Kjaer* – modelo 4224 (figura 5.1);
- ii. *Microfones e equipamento de análise*: os microfones utilizados devem ser omnidirecionais para deteção da pressão sonora e o seu sinal de saída deverá ser enviado para um amplificador, filtros, equipamento de visualização das curvas de decaimento ou equipamento de análise e processamento das respostas impulsivas. Estes elementos devem ter as seguintes características:
 - a. *Microfone e filtros*: Os microfones devem ser tão pequenos quanto possível, de preferência com um diafragma de diâmetro até 14 mm. Os filtros de oitava ou terço de oitava devem estar de acordo com a IEC 61260. Neste caso, optou-se por utilizar um sonómetro *Brüel & Kjaer* – modelo 2260, com microfone de 13 mm (figura 5.2), apoiado num tripé, com filtros de terço de oitava;
 - b. *Equipamento para produzir o registo do decaimento do nível*: O equipamento deve produzir o registo através de média exponencial, tendo como resultado uma curva contínua ou pontos sucessivos, ou média linear. O tempo de integração do dispositivo ideal deve ser o menor possível, e depende da técnica de registo e do tempo de reverberação a medir. Neste estudo o registo foi feito automaticamente pelo sonómetro utilizado;
 - c. *Saturação*: deve ser evitada a entrada em saturação dos equipamentos. Ao utilizar fontes impulsivas, devem ser utilizados detetores de pico para prevenir a entrada em saturação de qualquer um dos equipamentos.



Figuras 5.1 e 5.2 – À esquerda: Fonte sonora para medição do T Brüel & Kjær – modelo 4224; à direita: sonómetro Brüel & Kjær – modelo 2260. [fotografias da autora]

5.2.1.2. Procedimentos

Os procedimentos na medição do tempo de reverberação deveriam garantir a precisão necessária para o método de engenharia, que visa a medição para efeitos de verificação do desempenho acústico no que toca às especificações de tempo de reverberação. Este método pressupõe a utilização de duas localizações distintas para a fonte sonora, e seis combinações independentes microfone/fonte sonora [42]. Devido à dificuldade em definir mais do que uma localização viável para a fonte sonora, tanto devido à topografia do piso das salas como devido ao difícil acesso à energia elétrica, apenas foi definida uma localização para esta, com a utilização de pontos de medição que serão definidos no ponto 5.2.2.

A medição foi feita com recurso a um altifalante pelo método de ruído interrompido. Na aplicação deste método, o altifalante deve emitir ruído de características semelhantes ao ruído branco, com um nível de pressão sonora no mínimo 35 dB superior ao ruído de fundo, para medição do T_{30} . Para medição em bandas de terço de oitava, a largura de banda do sinal de ruído aleatório emitido pela fonte deve ser igual ou superior a um terço de oitava. Assim sendo, na prática, o sinal emitido é modulado de forma a produzir um espectro branco do som no campo reverberante estacionário da sala, desde 88 até 5657 Hz, abrangendo as bandas de um terço de oitava com frequências centrais desde 100 a 5k Hz. A duração do sinal deve ser suficiente para que o campo sonoro atinja um regime estacionário antes da fonte ser desligada, sendo por isso essencial que a duração do sinal seja pelo menos de $T/2$ s [42]. Neste caso, a fonte emitiu o sinal sonoro durante 3 a 5 segundos.

Para atingir uma incerteza aceitável, é necessário fazer uma média sobre um determinado número de medições em cada posição. Neste caso foram feitas duas medições para cada ponto de medição definido no ponto 5.2.2., com o altifalante colocado ao nível do solo e o microfone a cerca de 1,30 m de altura, com uma medição a 45° para a esquerda da direção altifalante/microfone, e outra a 45° para a direita. Para obter o tempo de reverberação, é feita a média do conjunto dos decaimentos do quadrado da pressão sonora e este é determinado a partir da curva de decaimento resultante. A potência sonora da emissão deve ser mantida constante para todas as medições. [42]

5.2.2. PONTOS DE MEDIÇÃO

5.2.2.1. Grutas da Moeda

De acordo com as recomendações da norma EN ISO 3382-2 [42], foram escolhidos pontos no percurso de visita das grutas da Moeda onde fosse possível haver permanência de público ou onde o som pudesse sofrer reflexões com importância no resultado final, procurando ainda abranger uma área significativa do espaço. A fonte sonora foi colocada num local onde houve já atuações para as quais a acústica foi um fator importante, na parte inferior do espaço. Os pontos de medição foram colocados em locais próximos à fonte sonora, no túnel que liga a parte inferior do espaço à parte superior, e o último ponto localizava-se junto ao grande espaço aberto que liga os dois níveis da sala, na parte superior. A localização precisa dos pontos está representada na figura 5.3, com indicação no quadro 5.2 das distâncias de cada ponto à origem (d_i em m), de acordo com o caminho mais curto percorrido pelo som desde a fonte até ao ponto de medição, e das alturas da sala em cada um dos pontos, h_i .

Quadro 5.2 – Distâncias à fonte sonora e alturas da sala em cada um dos pontos representados na figura 5.3 nas grutas da Moeda.

Ponto	Distância à fonte sonora (m)	Altura da sala (m)
S	-	4,2
1	4,4	5,6
2	7,9	7,2
3	14,0	4,8
4	19,4	5,4
5	27,7	6,3
6	23,1	8,3



Figura 5.3 – Localização dos pontos de medição no espaço estudado nas grutas da Moeda (pontos 1 a 6, e localização da fonte sonora – ponto S).

O cálculo das distâncias nos pontos 3 e 4 foi pelo pela soma das distâncias sucessivas entre os pontos, já que estes estão localizados num túnel curvado que abre antes do ponto 5 para a parte superior da sala, onde o som sofre reflexões. O cálculo de d_5 foi feito através da soma de d_6 com d'_5 já que o caminho mais direto para o som atingir o ponto 5 é pela abertura que liga a zona próxima ao ponto 6 à zona inferior da sala.

5.2.2.2. Grutas de Santo António



Figura 5.4 – Localização dos pontos de medição no espaço estudado nas grutas de Santo António (pontos 1 a 6, e localização da fonte sonora – ponto S).

Quadro 5.3 – Distâncias à fonte sonora e alturas da sala em cada um dos pontos representados na figura 5.4 nas grutas de Santo António.

Ponto	Distância à fonte sonora (m)	Altura da sala (m)
S	-	8,9
1	4,3	6,3
2	8,3	4,3
3	13,1	2,8
4	14,6	2,9
5	20,3	3,4
6	27,6	3,8

Os pontos de medição escolhidos na *Grande Sala* das grutas de Santo António procuraram ser representativos dos locais onde poderia haver acumulação de público ou visitas, tendo também em conta a quase simetria de planta da sala em relação ao eixo que a divide longitudinalmente, embora a nível planimétrico haja diferenças acentuadas (que causam também uma separação fictícia que impossibilita a visibilidade para a zona do palco existente e visível na figura 4.12, pelo que existiu mais interesse em avaliar a parte inferior da sala). Na figura 5.4 estão representadas as posições da fonte sonora (S) e dos pontos de medição (pontos 1 a 6). No quadro 5.3 registam-se os valores das distâncias de cada ponto à fonte sonora e as alturas da sala registadas em cada um dos mesmos.

5.2.2.3. Grutas de Alvados

A localização dos pontos de medição do *T* nas grutas de Alvados foi escolhida de forma a obter uma distribuição o mais homogénea possível dos mesmos pela sala (tendo em conta que o espaço central não pode ser ocupado por visitantes), já que esta não apresentava irregularidades muito relevantes no espaço principal, tendo sempre em conta as entradas e saídas da sala que poderiam perturbar as reflexões do som. Na figura 5.5 estão representados os pontos de medição e respetivas distâncias, registadas no quadro 5.4, bem como a altura da sala em cada ponto.

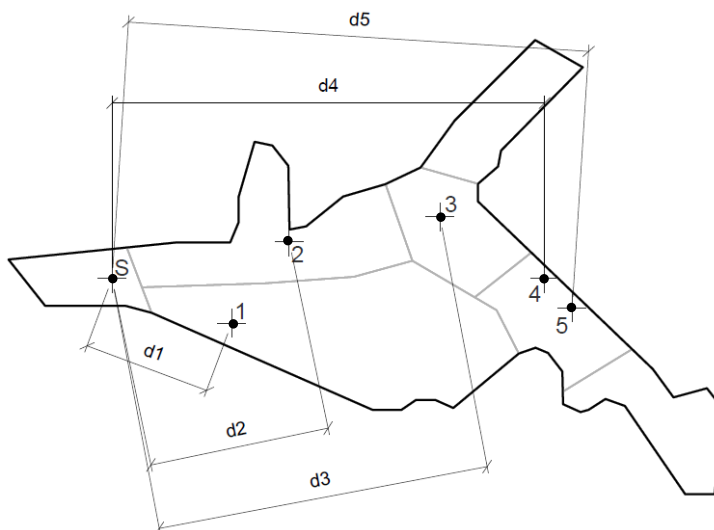


Figura 5.5 – Localização dos pontos de medição no espaço estudado nas grutas de Alvados (pontos 1 a 5, e localização da fonte sonora – ponto S).

Quadro 5.4 – Distâncias à fonte sonora e alturas da sala em cada um dos pontos representados na figura 5.5 nas grutas de Alvados.

Ponto	Distância à fonte sonora (m)	Altura da sala (m)
S	-	5,4
1	5,7	8,8
2	8,1	7,6
3	15,0	6,5
4	19,5	5,4
5	20,7	4,1

5.2.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.2.3.1. Grutas da Moeda

Os valores de T obtidos para o espaço estudado nas grutas da Moeda foram obtidos com uma análise em bandas de terço de oitava. Os valores obtidos em cada ponto são apresentados no quadro 5.5 e os valores médios por banda são representados na figura 5.6. Analisando os valores médios em bandas de oitava, obtém-se um $T_{\text{médio}}[500,1k]$ de 1,3 s. O valor de $T_{\text{médio}} [500,1k,2k]$ de 1,2 s, embora calculado, não será considerado na comparação entre os espaços já que espaços deste tipo não têm condicionantes regulamentares e este valor tem em significativa conta o efeito de absorção sonora do ar presente na gruta, já que inclui altas frequências.

Quadro 5.5 – Valores de T (medidos como T_{30}) medidos nas grutas da Moeda, com a fonte sonora no ponto S e o sonómetro nos pontos 1 a 6 (figura 5.3).

Banda de frequência (Hz)	Valor de T no ponto de medição i (s)						$T_{\text{médio}}$ (s)	Desvio padrão (s)
	1	2	3	4	5	6		
100	1,71	1,94	2,04	2,07	2,10	2,01	1,98	0,13
125	1,53	1,63	1,74	1,64	1,64	2,00	1,70	0,15
160	1,42	1,51	1,46	1,69	1,67	1,59	1,56	0,10
200	1,20	1,61	1,66	1,87	1,88*	1,82	1,63	0,24
250	1,21	1,35	1,46	1,61	1,54	1,57	1,46	0,14
315	1,18	1,39	1,35	1,56	1,37	1,44	1,38	0,11
400	1,25	1,30	1,27	1,41	1,51	1,40	1,36	0,09
500	1,11	1,15	1,32	1,32	1,31	1,39	1,27	0,10
630	1,15	1,17	1,27	1,28	1,45	1,32	1,27	0,10
800	1,13	1,09	1,23	1,30	1,34	1,32	1,24	0,10
1k	1,02	1,19	1,19	1,32	1,31	1,36	1,23	0,11
1,25k	0,98	1,10	1,14	1,27	1,27	1,23	1,17	0,10
1,6k	1,00	1,02	1,17	1,18	1,24	1,22	1,14	0,09
2k	1,00	1,01	1,08	1,09	1,17	1,15	1,08	0,06
2,5k	0,92	0,93	1,03	1,06	1,10	1,08	1,02	0,07
3,15k	0,87	0,94	1,03	1,11	1,84*	1,04	1,00	0,08
4k	0,84	0,83	0,97	1,09	2,16*	1,01	0,95	0,10
5k	0,77	0,80	1,57	0,98	2,12*	1,00	1,02	0,29
$T_{\text{médio}}[500,1k]$							1,3	
$T_{\text{médio}}[500,1k,2k]$							1,2	

* Valores eliminados do cálculo devido à clara dissonância dos restantes, devidos a perturbações provocadas pelo ruído provocado pelo cair das gotas de água próximo dos equipamentos.

Tendo em conta a rigidez e compacidade do material da envolvente e o volume da sala em estudo, com um valor estimado de 2930 m³, os valores obtidos para o tempo de reverberação aparentam ser bastante baixos em relação ao valor espectável. No entanto, uma análise mais detalhada do espaço, da sua morfologia e dos materiais que constituem a envolvente permite justificar estes valores: todas as

superfícies são altamente rugosas, irregulares e com relevos complexos, ao mesmo tempo que se encontram por todo o espaço diversas concavidades, protuberâncias, espaços em túnel, entre outras formas, que difundem ou confinam as ondas sonoras até que estas percam energia suficiente para serem inaudíveis sem que tenham sido antes refletidas de novo para o espaço ocupado pelos visitantes. Este efeito acontece a grande e a pequena escala: irregularidades de grandes dimensões conduzem à diminuição do tempo de reverberação em frequências mais baixas, com maiores comprimentos de onda, e as irregularidades de pequena dimensão conduzem à diminuição do tempo de reverberação nas frequências mais altas. Estas irregularidades são ainda responsáveis pela existência de uma grande área de superfície envolvente, como se verá no sexto capítulo da presente dissertação, fazendo assim com que, apesar da baixa capacidade de absorção sonora do material, esta ocorra com algum significado, conduzindo a um baixo tempo de reverberação.

A análise da figura 5.6 permite verificar que os valores médios do tempo de reverberação são mais altos nas baixas frequências do que nas altas frequências. Este facto deve-se à morfologia e ao volume do espaço, uma vez que este tem características que levam à maior dissipação das altas frequência dos que das baixas: as zonas 1, 2 e 3 (figura 4.11), constituem a parte inferior do espaço, em que a altura aumenta gradualmente até haver uma ligação entre a zona 3 e a zona 8, por cima do maciço central do espaço, havendo ainda uma passagem inferior a esse maciço que liga a zona 3 à zona 9, que percorre toda a altura desde o nível inferior até ao topo da sala; as zonas 4, 5 e 6 fazem parte de um túnel de ligação entre a parte inferior e a parte superior do espaço que, por sua vez, é mais amplo. Deste modo, existem desníveis e espaços de pequena dimensão que absorvem a energia de ondas de médias e altas frequências mas que não o fazem tão eficazmente para ondas de baixas frequências, que conseguem ser refletidas para o espaço de medição, criando assim uma diferença entre os tempos de reverberação. O volume de ar tem também influência na redução do tempo de reverberação dos sinais de frequência acima dos 1 kHz.

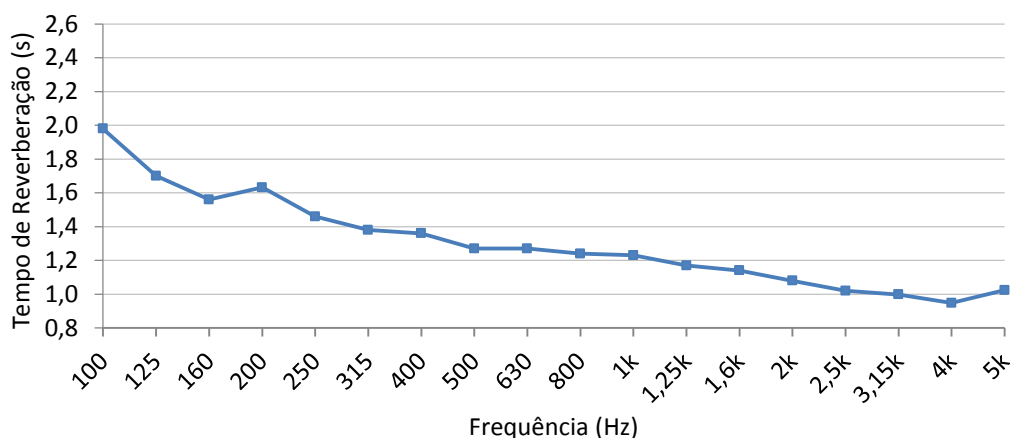


Figura 5.6 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 de oitava nas grutas da Moeda.

5.2.3.2. Grutas de Santo António

A existência de constantes infiltrações e consequente ruído das gotas de água a cair na proximidade do ponto 4 (figura 5.4), juntamente com a interrupção por visitas no espaço em estudo fizeram com que a medição do T nas grutas de Santo António tivesse de ser interrompida para evitar erros na medição, resultando daí dois valores para a média do T por banda de terço de oitava: um correspondente à medição nos pontos 1, 2 e 3, e outro correspondente à medição nos pontos 4, 5 e 6. Assim sendo o valor médio final por banda foi obtido a partir da média aritmética dos dois valores médios resultantes

da média aritmética dos valores médios por banda, para cada uma das medições. Fazendo a análise em bandas de oitava, obtém-se os valores médios de $T_{\text{medio}}[500,1k]$ de 1,7 s e $T_{\text{medio}}[500,1k,2k]$ de 1,7 s.

Quadro 5.6 – Valores de T (medidos como T_{30}) medidos nas grutas de Santo António, com a fonte sonora no ponto S e o sonómetro nos pontos 1 a 6 (figura 5.4).

Banda de frequência (Hz)	Valor de T no ponto de medição i (s)						T_{medio} (s)	Desvio padrão (s)
	1	2	3	4	5	6		
100	1,64	1,48	1,73	1,57	1,46	1,76	1,61	0,11
125	1,48	1,62	1,62	1,82	1,85	1,87	1,71	0,15
160	1,57	1,79	1,33	1,66	1,70	1,94	1,67	0,19
200	1,37	1,63	1,51	1,87	1,84	1,85	1,68	0,19
250	1,63	1,49	1,65	1,55	1,81	1,85	1,66	0,13
315	1,71	1,59	1,69	1,58	1,79	1,95	1,72	0,13
400	1,60	1,69	1,71	1,65	1,76	1,94	1,73	0,11
500	1,60	1,51	1,62	1,86	1,94	2,01	1,76	0,19
630	1,52	1,57	1,54	1,63	1,74	1,99	1,67	0,16
800	1,57	1,60	1,59	1,68	1,68	1,94	1,68	0,13
1k	1,57	1,66	1,62	1,64	1,62	1,82	1,66	0,08
1,25k	1,44	1,62	1,62	1,64	1,63	1,83	1,63	0,11
1,6k	1,54	1,59	1,52	1,59	1,7	1,81	1,63	0,10
2k	1,48	1,52	1,51	1,57	1,56	1,64	1,55	0,05
2,5k	1,50	1,53	1,48	1,57	1,57	1,62	1,55	0,05
3,15k	1,38	1,41	1,46	1,51	1,44	1,53	1,46	0,05
4k	1,33	1,32	1,36	2,26*	1,39	1,46	1,38	0,05
5k	1,26	1,22	1,24	1,43	2,57*	1,63	1,36	0,16
$T_{\text{medio}}[500,1k]$							1,7	
$T_{\text{medio}}[500,1k,2k]$							1,7	

* Valores eliminados do cálculo devido à clara dissonância dos restantes, devidos a perturbações provocadas pelo ruído provocado pelo cair das gotas de água próximo dos equipamentos.

O tempo de reverberação obtido na *Grande Sala* para cada banda de frequências é relativamente constante, como se pode observar na figura 5.7. O seu valor médio é bastante baixo tendo em conta o valor do volume estimado para este espaço: 8640 m³. Nesta sala, com espaços bastantes amplos mas com numerosas protuberâncias e concavidades de dimensão variada e superfícies muito irregulares, o som sofre muita difusão e é dispersada muita energia nessas mesmas formações, fazendo com que as reflexões tenham pouca energia e, conseqüentemente, baixando o tempo de reverberação. Também nestas grutas o efeito da grande área das superfícies que constituem a envolvente se faz sentir, já que dá origem a uma absorção considerável que diminui o tempo de reverberação, mesmo com superfícies com um coeficiente de absorção sonora baixo. O facto de ser um espaço amplo em que não existem percursos intrincados faz com que não exista uma absorção específica nas altas frequências para além da que é proporcionada pelo ar, tornando assim o tempo de reverberação bastante uniforme independentemente da banda de frequências em análise. Há no entanto que ter em conta que estas altas

frequências sofrem sempre mais alguma absorção do que as baixas, já que o ar absorve mais energia nas médias e altas.

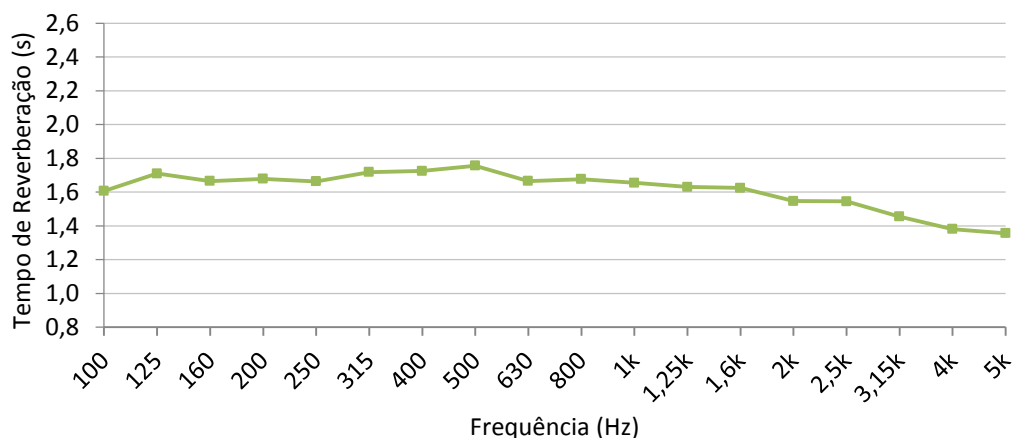


Figura 5.7 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 de oitava nas grutas de Santo António.

5.2.3.3. Grutas de Alvados

Os valores de T medidos nas grutas de Alvados foram obtidos e processados da mesma forma que os anteriormente apresentados. Fazendo a análise em bandas de oitava, obtém-se valores médios de $T_{\text{médio}}[500,1k]$ de 1,5 s e $T_{\text{médio}}[500,1k,2k]$ de 1,5 s, partindo dos valores apresentados no quadro 5.7 e representados no gráfico da figura 5.8.

As causas dos baixos valores do tempo de reverberação podem ser de novo atribuídas à grande dissipação de energia sonora nas superfícies irregulares e de grande área que constituem a envolvente do espaço em estudo e às deformações do calcário, havendo neste caso também alguma influência das quatro passagens de acesso ao espaço que têm uma dimensão relevante em relação às dimensões da sala (cada uma com cerca de 3 m de altura e 1 m de largura), por onde tanto baixas como altas frequências penetram e acabam por perder energia sem que voltem ao espaço de análise.

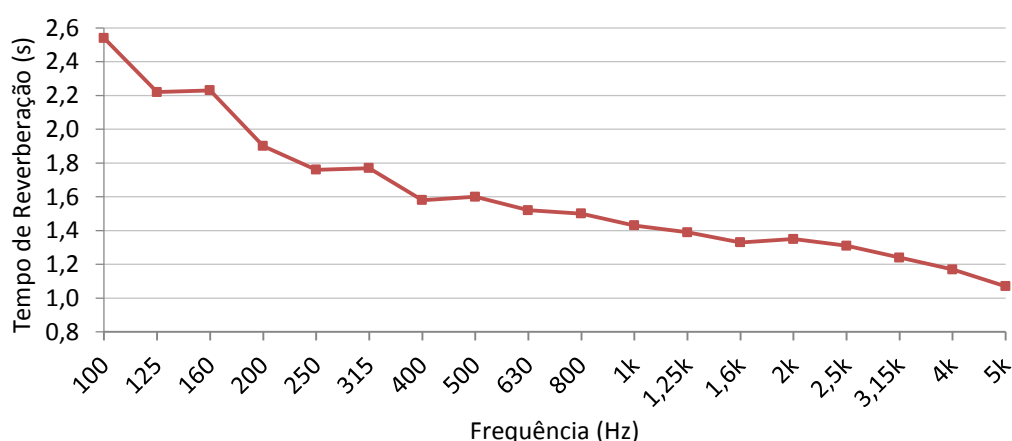


Figura 5.8 – Valores médios do tempo de reverberação por banda de 1/3 de oitava nas grutas de Alvados.

Uma análise da figura 5.8 permite verificar que os valores do tempo de reverberação descem quase continuamente dos 100 aos 5k Hz, com uma diferença de cerca de 1,4 segundos entre o T entre estas bandas de frequências. A sala analisada nas grutas de Alvados trata-se de um espaço amplo, sem

formações de grandes dimensões no seu interior, com uma forma aproximadamente regular, de planta similar a um trapézio, em que o piso e o teto são aproximadamente paralelos, bem como duas das suas paredes. As suas superfícies são rugosas, mas com poucas deformações, protuberâncias ou concavidades de grande dimensão. A regularidade do espaço, a existência das superfícies paralelas e a ausência de deformações de grande dimensão faz com que não exista muita dissipação da energia das ondas sonoras de baixas frequências, enquanto que as pequenas deformações e formações resultantes da deposição da calcite, juntamente com o ar, fazem com que haja uma forte dissipação da energia das ondas sonoras de baixas frequências.

Quadro 5.7 – Valores de T (medidos como T_{30}) medidos nas grutas de Alvados, com a fonte sonora no ponto S e o sonómetro nos pontos 1 a 5 (figura 5.5).

Banda de frequência (Hz)	Valor de T no ponto de medição i (s)						$T_{\text{médio}}$ (s)	Desvio padrão (s)
	1	2	3	4	5	6		
100	1,97	2,31	2,53	2,52	2,81	3,12	2,54	0,36
125	2,19	1,79	1,97	2,63	2,48	2,24	2,22	0,28
160	2,11	2,19	2,10	2,21	*	2,54	2,23	0,15
200	2,17	1,89	1,78	1,77	1,95	1,85	1,90	0,13
250	1,63	1,78	1,64	1,86	1,68	1,95	1,76	0,12
315	1,70	1,82	1,74	1,86	1,73	1,74	1,77	0,06
400	1,29	1,49	1,61	1,78	1,61	1,67	1,58	0,15
500	1,55	1,53	1,66	1,57	1,61	1,68	1,60	0,06
630	1,48	1,49	1,53	1,59	1,52	1,51	1,52	0,04
800	1,46	1,53	1,47	1,57	1,54	1,43	1,50	0,05
1k	1,36	1,50	1,52	1,36	1,44	1,40	1,43	0,06
1,25k	1,33	1,34	1,42	1,38	1,39	1,46	1,39	0,04
1,6k	1,29	1,32	1,35	1,36	1,33	1,33	1,33	0,02
2k	1,32	1,37	1,36	1,37	1,35	1,34	1,35	0,02
2,5k	1,27	1,31	1,35	1,29	1,29	1,32	1,31	0,03
3,15k	1,20	1,23	1,27	1,23	1,23	1,25	1,24	0,02
4k	1,11	1,16	1,19	1,18	1,15	1,20	1,17	0,03
5k	0,98	1,08	1,09	1,09	1,10	1,08	1,07	0,04
$T_{\text{médio}}[500,1k]$							<u>1,5</u>	
$T_{\text{médio}}[500,1k,2k]$							<u>1,5</u>	

* Valores eliminados do cálculo devido à clara dissonância dos restantes, devidos a perturbações provocadas pelo ruído provocado pelo cair das gotas de água próximo dos equipamentos.

5.2.3.4. Comparação de Resultados

A análise dos valores do tempo de reverberação nos três espaços permite tirar conclusões acerca da relação entre este parâmetro, o volume e as características morfológicas dos mesmos, podendo

verificar-se diferenças significativas a partir da figura 5.9. O valor médio dos tempos de reverberação das três grutas é de 1,5 s.

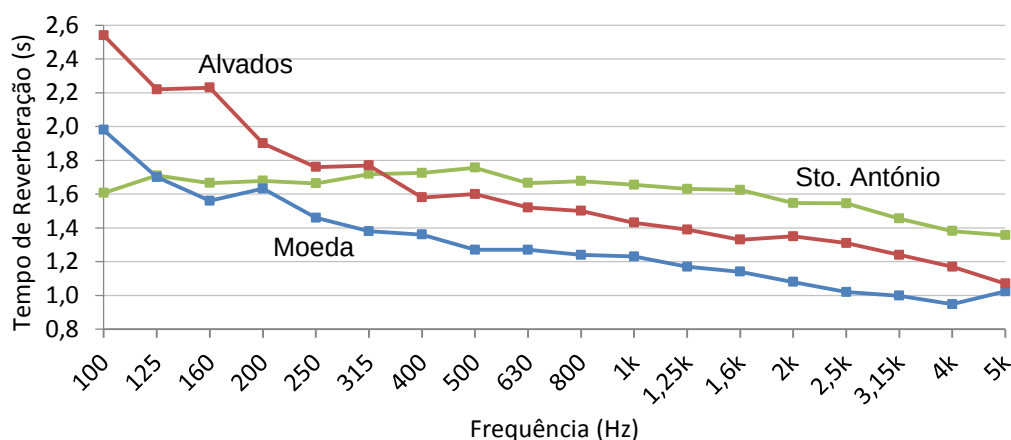


Figura 5.9 – Valores dos tempos de reverberação determinados por banda de frequência de terço de oitava para cada uma das grutas estudadas.

O maior tempo de reverberação é registado nas grutas de Santo António. Sendo estas as grutas em que o espaço estudado tinha o maior volume livre, de cerca de 8640 m³, este facto confirma o princípio de que um maior volume conduzirá em princípio a um maior tempo de reverberação. Como neste caso o volume era quase o triplo do volume do espaço estudado nas grutas da Moeda, de 2930 m³, e mais do sêxtuplo do volume do espaço estudado nas grutas de Alvados, de 1350 m³, este efeito sobrepõe-se à complexidade do relevo das suas superfícies que, embora seja mais evidente neste espaço do que nos restantes, não é suficiente para anular o efeito do volume acrescido.

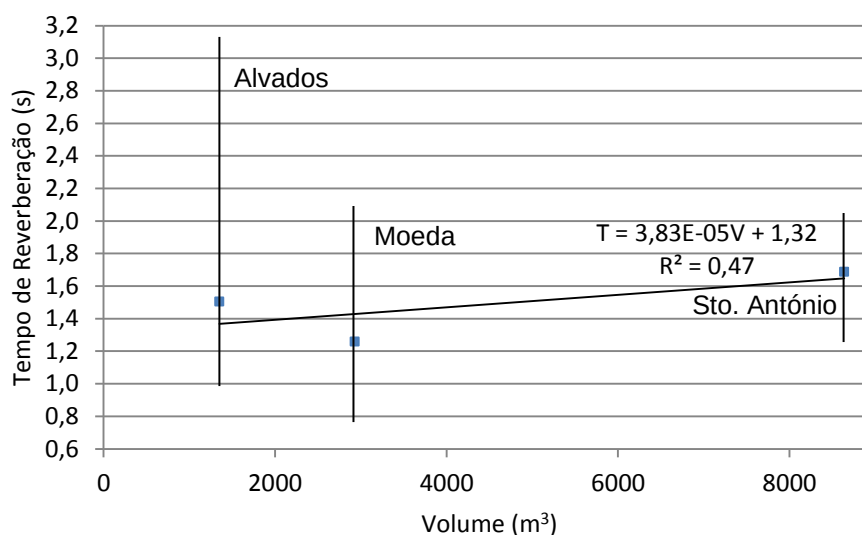


Figura 5.10 – Valores dos tempos de reverberação médio (500/1k), máximo e mínimo (em frequência) registados em cada uma das grutas estudadas e expressão que relaciona o $T_{médio}[500,1k]$ com o volume.

No entanto, e uma vez que apenas 47% da variação do tempo de reverberação pode ser explicada pela variação do volume, como nos indica o R^2 obtido para a curva de ajuste na figura 5.10, a comparação das grutas da Moeda com as grutas de Alvados indica que o aumento de volume não implica necessariamente o aumento do tempo de reverberação: apesar de o volume do espaço estudado nas

grutas da Moeda ser consideravelmente maior do que o do espaço estudado nas grutas de Alvados, o seu tempo de reverberação é menor. Esta diferença deve-se provavelmente ao facto de estas salas terem configurações com características antagónicas: o espaço estudado nas grutas da Moeda trata-se de um espaço intrincado, com passagens, dois níveis distintos, e zonas volumosas com superfícies envolventes muito irregulares, com muitas concavidades e concreções de dimensão considerável; já o espaço estudado nas grutas de Alvados é um espaço amplo, sensivelmente sempre ao mesmo nível, sem grandes deformações das suas superfícies e relativamente regular, com concreções de pequeno desenvolvimento, sem formarem grandes protuberâncias ou concavidades. Assim sendo, as ondas sonoras têm muito mais facilidade em perder energia no espaço nas grutas da Moeda do que no espaço das grutas de Alvados, sendo assim o primeiro tempo de reverberação mais baixo do que o segundo. Também a relação entre área superficial da envolvente e volume é maior nas grutas da Moeda do que nas grutas de Alvados, pelo que a absorção sonora terá mais relevância nas primeiras do que nas segundas.

Conclui-se então que o tipo de relevo das superfícies das grutas e a sua morfologia tem uma importância crucial no seu comportamento acústico. Nestes casos, os valores do tempo de reverberação são sempre baixos tendo em conta a volumetria dos espaços, e verifica-se que quanto mais intrincada for a morfologia do espaço e quanto mais complexos forem os relevos na sua superfície, menor será o tempo de reverberação. Isto deve-se à maior dissipação e absorção de energia sonora, já que a área da superfície envolvente é maior, o que leva ao aumento da absorção sonora equivalente.

5.3. RUÍDO DE FUNDO

5.3.1. METODOLOGIA

5.3.1.1. Equipamento

A medição do nível de pressão sonora contínua equivalente (L_{eq}) do ruído de fundo em condições controladas em período chuvoso foi feita com recurso a um sonómetro *Brüel & Kjaer* – modelo 2260, apoiado num tripé, com filtros de terço de oitava (figura 5.2). Para as medições em tempo seco foi utilizado um sonómetro *Brüel & Kjaer* – modelo 2236 com filtros de terço de oitava e na escala mínima disponível, de 20 a 100 dB(A).

5.3.1.2. Procedimentos

A medição do nível de pressão sonora contínua equivalente do ruído de fundo em período chuvoso foi feita por um período de 10 minutos, para que o nível registado pudesse estabilizar (por acumulação e cálculo do valor médio global pelo sonómetro). Foram registados os valores globais e por banda de terço de oitava obtidos, sendo posteriormente feita uma análise do valor médio. Posteriormente os valores obtidos foram ponderados com recurso ao filtro A para adaptar os resultados à sensibilidade do ouvido humano.

A medição do nível sonoro em período seco foi feita de modo expedito, sob monitorização constante, procurando não perturbar as visitas que, à data destas medições, eram já frequentes. Sendo o objetivo procurar os valores mais baixos possíveis, qualquer ruído condicionaria fortemente os resultados, pelo que o tempo de medição varia com a medição em causa, e será indicado oportunamente.

Garantiu-se que não ocorriam picos de ruído quer no interior, quer no exterior dos espaços, mantendo-os o mais isolados e controlados possível durante a medição.

5.3.2. PONTOS DE MEDIÇÃO

5.3.2.1. Grutas da Moeda

A medição do ruído de fundo nas grutas da Moeda foi feita de modo a que o ruído captado fosse o mais representativo possível de todo o espaço em estudo. Todas as medições em período chuvoso foram feitas na *Sala do Pastor*, no ponto 6 (figura 5.3) por se tratar de um ponto central de ligação entre a parte superior e inferior da gruta, onde são realizados alguns dos eventos destas grutas, e onde a influência do som da água da cascata artificial a cair não se sobrepõe tanto ao restante ruído de fundo.

As medições em período seco foram realizadas na sala *Marítima* (figura 4.10), também esta uma sala onde já foram realizadas outras atividades que não as visitas guiadas, devido à constante presença indesejada nas medições do ruído de água na zona que compreendia a *Sala do Pastor* e a *Cascata*.

5.3.2.2. Grutas de Santo António

A localização do ponto de medição do ruído de fundo na Gruta de Santo António foi escolhida tentando minimizar a influência do ruído da queda das gotas de água resultantes das infiltrações. Deste modo, para ambas as medições optou-se pelo espaço mais amplo e com uma altura até ao teto da gruta considerável: o ponto S (figura 5.4).

5.3.2.3. Grutas de Alvados

Nas grutas de Alvados a escolha do ponto de medição do ruído de fundo em período chuvoso obedeceu aos mesmos critérios anteriores: foi escolhido o ponto 1 para efetuar as medições (figura 5.5), já que era sensivelmente central ao espaço e por isso sofreria menos influência de possíveis gotejamentos que ocorressem próximos às paredes.

5.3.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.3.3.1. Grutas da Moeda

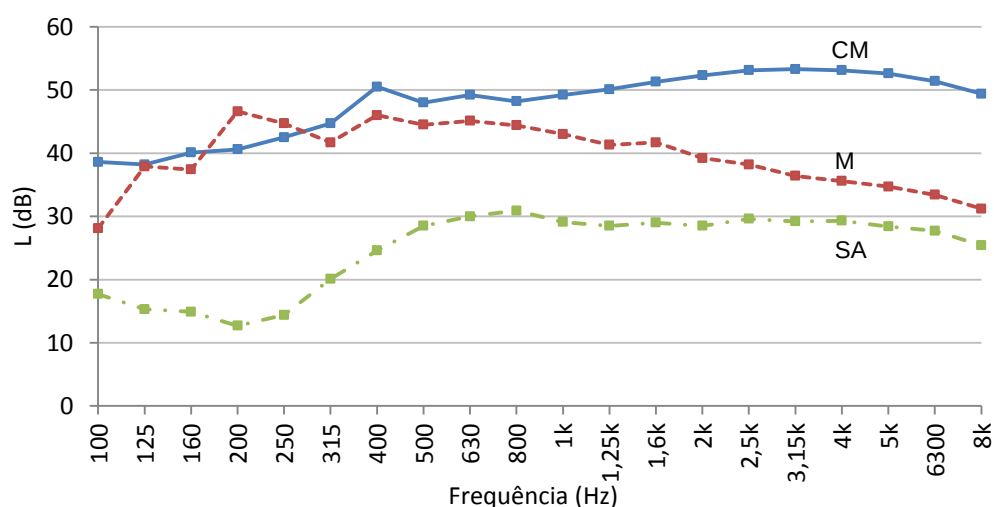


Figura 5.11 – Níveis de pressão sonora, L (dB), do ruído de fundo nas grutas da Moeda em período chuvoso nas situações de ruído da cascata e música de fundo (CM), música de fundo (M) e só água natural (SA).

A medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo nas grutas da Moeda em período chuvoso foi feita em três momentos distintos: com a cascata artificial ligada e a música de fundo em simultâneo, depois apenas com a música de fundo ligada e por último sem nenhuma das fontes de ruído ativada, sempre sem visitantes. Os valores obtidos para o nível de pressão sonora em cada uma das situações referidas são apresentados no quadro 5.8 e na figura 5.11.

Importa referir que o facto de a cascata ter sido ligada para a primeira medição teve influência nas medições seguintes por aumentar quantidade de água percorrendo a gruta e consequentemente o ruído, mesmo depois de ter sido desligada. De acordo com as informações fornecidas pelo guia, a percepção sonora então ocorrida seria semelhante à que ocorreria naturalmente no interior da gruta num período de precipitação muito elevada, mesmo com a bombagem de água desligada, pelo que podemos assumir que os valores obtidos para o nível de pressão sonora com a cascata desligada correspondem aos valores normais durante o período de um inverno chuvoso. Foi feita uma medição expedita antes da cascata e a música terem sido ligadas que apontou um L_{eq} só com ruído natural de cerca de 32 dB.

Quadro 5.8 – Valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo em período chuvoso por banda de frequência de terço de oitava para cada uma das três situações medidas nas grutas da Moeda.

Banda de frequência (Hz)	L (dB)		
	Cascata e música	Só música	Só água natural (sem cascata)
100	38,6	28,1	17,7
125	38,2	37,9	15,3
160	40,1	37,4	14,9
200	40,6	46,6	12,7
250	42,5	44,7	14,4
315	44,7	41,7	20,1
400	50,5	46,0	24,6
500	48,0	44,5	28,5
630	49,2	45,1	30,0
800	48,2	44,4	30,9
1k	49,2	43,0	29,1
1,25k	50,1	41,3	28,5
1,6k	51,3	41,7	29,0
2k	52,3	39,2	28,5
2,5k	53,1	38,2	29,6
3,15k	53,3	36,4	29,2
4k	53,1	35,6	29,3
5k	52,6	34,7	28,4
6300	51,4	31,2	25,4
8k	49,4	28,4	23,6
L_{eq}	62,8	54,9	40,3
ΔL_{eq}	+22,5	+14,6	-

Aplicando o filtro A aos resultados obtidos e apresentados no quadro 5.8 obtêm-se os valores presentes no quadro 5.9 e no gráfico da figura 5.12.

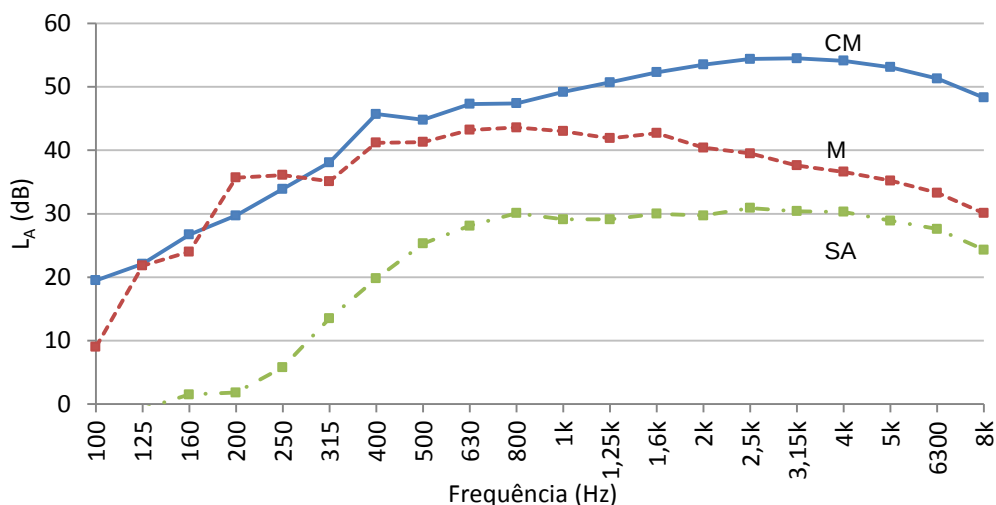


Figura 5.12 – Níveis sonoros L_A (dB) do ruído de fundo nas grutas da Moeda nas situações de ruído da cascata e música de fundo (CM), música de fundo (M) e só água natural (SA).

A análise destes valores permite concluir que a música de fundo e a cascata aumentam significativamente o nível de ruído no interior do espaço estudado, com uma diferença de cerca de 23 dB(A). A diferença entre a curva que representa o nível sonoro para a situação da cascata e música ligada e a que representa apenas a música ligada demonstra que a cascata provoca a emissão de ruído principalmente nas médias e altas frequências, já que as curvas se afastam notoriamente a partir dos 800 Hz. Qualquer uma destas duas situações se sobrepõe aos ruídos naturais da gruta. A análise da curva correspondente à situação de ter todos os equipamentos desligados permite confirmar que o cair de gotas de água, fonte principal de ruído nessa situação, emite sinais sonoros com frequências médias a altas, já que é a única fonte de perturbação do silêncio instalado nestes espaços, completamente estanques ao ruído da superfície.

Com os resultados obtidos em período chuvoso é possível avaliar a incomodidade causada pelo ruído de equipamentos, da música ou mesmo da queda das gotas de água para visitantes ou atividades que preferissem o maior silêncio possível. Analisando os valores de L obtidos através das medições realizadas, obtemos os parâmetros NC e NR a partir dos gráficos da figura 5.13 e 5.14. Importa referir que estes são parâmetros que são utilizados não em situações de ruídos desejados mas sim em situações de ruídos de equipamentos incómodos, o que não é o caso, pelo que estes são valores indicativos e para efeitos de comparação.

Obtém-se assim os seguintes valores de NC e NR, para cada uma das situações:

- Cascata e música de fundo: NC-60 e NR-63, condicionados pelos valores de L na banda de frequência dos 4 kHz;
- Música de fundo: NC-48 e NR-48, condicionados pelos valores de L na banda de frequência dos 1 kHz;
- Sem equipamento: NC-36 e NR-39, condicionados pelos valores de L na banda de frequência dos 4 kHz. Este valor é meramente indicativo, já que não se aplicam estes fatores ao estudo de ruídos naturais.

Os valores obtidos são bastante altos devido ao maior nível sonoro obtido para as médias e altas frequências, mais perceptíveis de acordo com a sensibilidade do ouvido humano.

Quadro 5.9 – Valores do nível sonoro do ruído de fundo por banda de frequência para cada uma das três situações medidas nas grutas da Moeda.

Banda de frequência (Hz)	Filtro A (dB)	L_A (dB)		
		Cascata e música	Só música	Só água natural (sem cascata)
100	-19,1	19,5	9,0	<0
125	-16,1	22,1	21,8	<0
160	-13,4	26,7	24,0	1,5
200	-10,9	29,7	35,7	1,8
250	-8,6	33,9	36,1	5,8
315	-6,6	38,1	35,1	13,5
400	-4,8	45,7	41,2	19,8
500	-3,2	44,8	41,3	25,3
630	-1,9	47,3	43,2	28,1
800	-0,8	47,4	43,6	30,1
1k	0,0	49,2	43,0	29,1
1,25k	0,6	50,7	41,9	29,1
1,6k	1,0	52,3	42,7	30,0
2k	1,2	53,5	40,4	29,7
2,5k	1,3	54,4	39,5	30,9
3,15k	1,2	54,5	37,6	30,4
4k	1,0	54,1	36,6	30,3
5k	0,5	53,1	35,2	28,9
6300	-0,1	51,3	33,3	27,6
8k	-1,1	48,3	30,1	24,3
L_{Aeq}		63,0	52,4	40,3
ΔL_{Aeq}		+22,7	+12,1	-

Quadro 5.10 – Valores do nível sonoro do ruído de fundo medidos em período seco (sem atividade ou equipamentos ligados) nas grutas da Moeda.

Parâmetro	dB(A)
L_{eq}	23,1
L_{10}	25,0
L_{50}	21,0
L_{90}	20,0

A medição em período seco, sem qualquer equipamento ligado no interior do espaço onde foi realizada, conduziu aos valores indicados no quadro 5.10. Embora o período de medição tenha sido curto, de apenas 1 minuto, pode-se assumir que estes serão os resultados obtidos para uma medição de

acordo com as recomendações quando a gruta se encontra no seu estado natural, sem qualquer intervenção humana. Importa referir que mesmo estes valores foram influenciados pela queda de água de cursos artificiais, já que estes foram desligados poucos minutos antes da realização da medição. Mesmo com a interferência referida, verifica-se que o nível sonoro contínuo equivalente é notoriamente baixo, estando abaixo dos 25 dB e sendo por isso possível considerar este espaço como verdadeiramente silencioso. Durante 10% do tempo de medição o nível sonoro encontrou-se mesmo abaixo dos 20 dB(A) e durante 50% do tempo esteve abaixo dos 21 dB(A), o que demonstra que, caso o período de medição fosse mais extenso, o valor do L_{Aeq} tenderia a baixar.

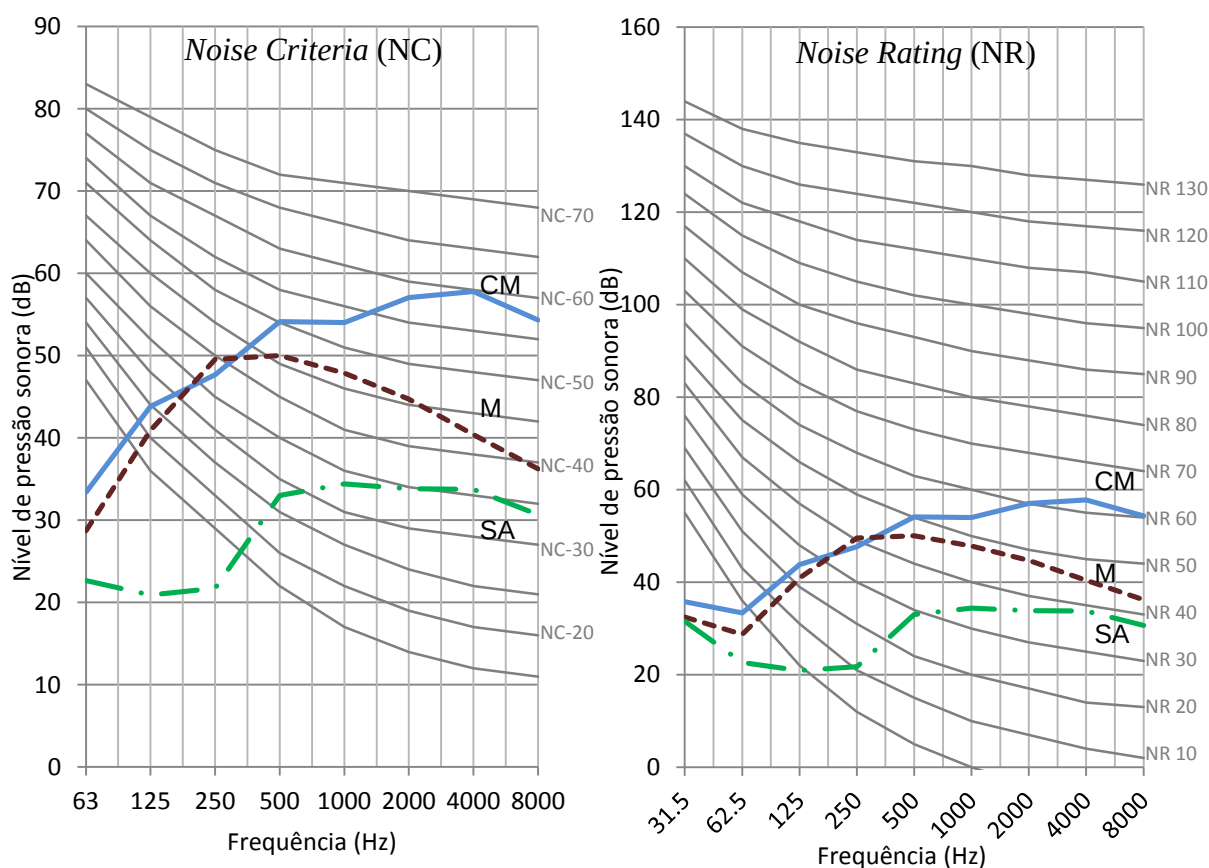


Figura 5.13 e 5.14 – Curvas NC (à esquerda) e NR (à direita) para as Grutas da Moeda, nas situações de ruído da cascata e música de fundo (CM), música de fundo (M) e só água natural (SA).

Com um nível sonoro contínuo equivalente em período chuvoso, sem equipamentos ligados, de 40 dB(A), e em período seco, na mesma situação, de 23 dB(A) pode-se concluir que a circulação de água tem uma grande influência na acústica deste espaço, provocando uma variação de mais de 17 dB(A) no nível sonoro contínuo equivalente detetado.

5.3.3.2. Grutas de Santo António

Nas grutas de Santo António o nível de pressão sonora do ruído de fundo em período chuvoso foi medido quer durante um período de visitas à gruta, com um grupo de cerca de dez pessoas percorrendo a *Grande Sala*, quer durante um período sem visitas. Os valores do nível de pressão sonora registados nestas medições são os apresentados no quadro 5.11 e na figura 5.15. Ponderando esses mesmos valores com o filtro A, obtêm-se os resultados apresentados no quadro 5.12 e na figura 5.16.

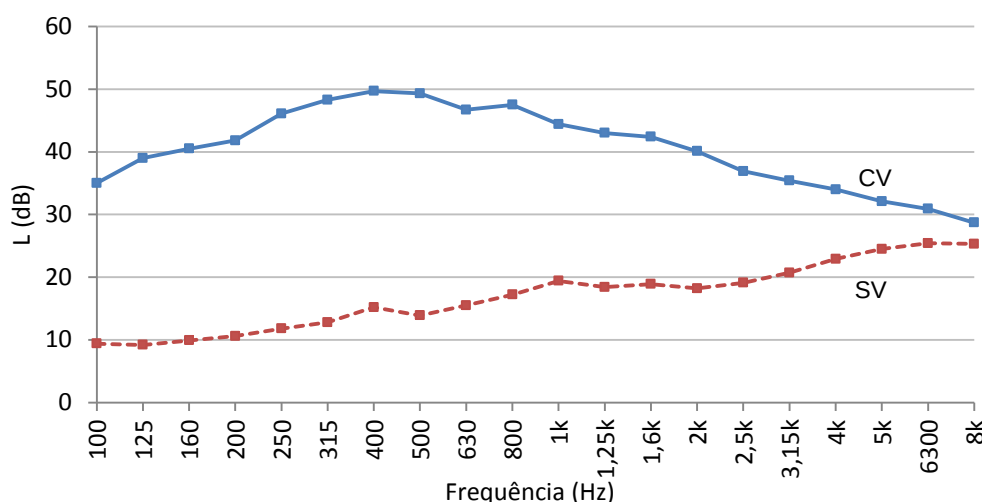


Figura 5.15 – Níveis de pressão sonora, L (dB), do ruído de fundo em período chuvoso nas grutas de Santo António para as situações de estarem a ocorrer visitas (CV) e de não estarem a decorrer visitas e sem equipamentos ligados (SV).

Os valores de L_A para cada uma das situações demonstram que as visitas provocam um aumento do nível sonoro em todas as bandas sonoras, com maior incidência nas baixas e médias frequências, resultante dos passos e voz dos visitantes, entre outros ruídos naturais de uma situação semelhante. A perturbação induzida pelas visitas é bastante notável com um acréscimo de cerca de 22 dB(A) no nível sonoro contínuo equivalente.

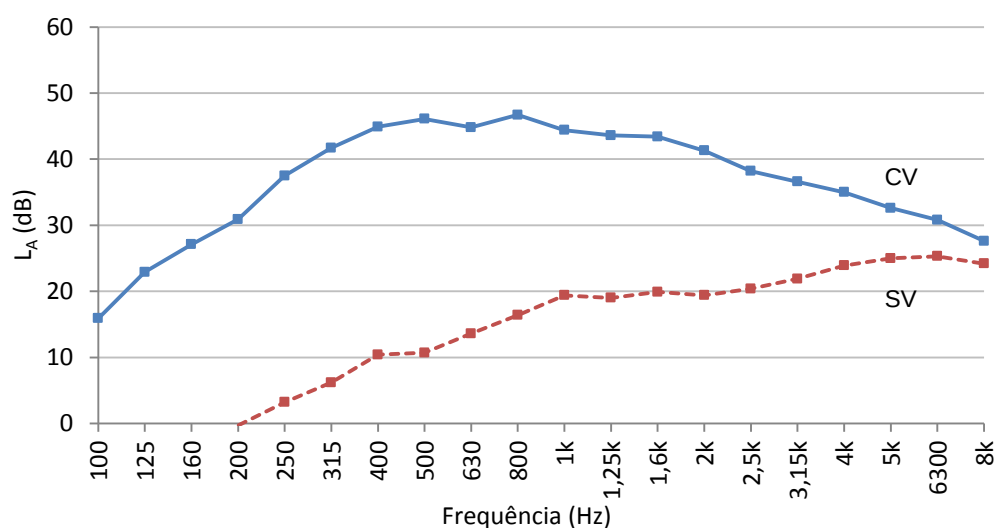


Figura 5.16 – Níveis sonoros, L_A (dB), do ruído de fundo em período chuvoso nas grutas de Santo António para as situações de estarem a ocorrer visitas (CV) e de não estarem a decorrer visitas e sem equipamentos ligados (SV).

Na situação sem visitas, o valor bastante mais elevado do nível sonoro nas altas frequências em comparação com os valores obtidos para as baixas frequências deve-se principalmente ao efeito da queda das gotas de água sobre o solo e o material disposto na gruta, que necessariamente emitia frequências diferentes das que eram emitidas quando as gotas caíam no solo. Ainda assim, o valor de L_{Aeq} para esta situação corresponde a um valor próximo do silêncio, que habitualmente se considera situado nos 25 dB(A).

Quadro 5.11 – Valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo em período chuvoso por banda de frequência de terço de oitava nas grutas de Santo António.

Banda de frequência (Hz)	L (dB)		ΔL (dB) (CV-SV)
	Com visitas	Sem visitas	
100	35,0	9,4	25,6
125	39,0	9,2	29,8
160	40,5	9,9	30,6
200	41,8	10,6	31,2
250	46,1	11,8	34,3
315	48,3	12,8	35,5
400	49,7	15,2	34,5
500	49,3	13,9	35,4
630	46,7	15,5	31,2
800	47,5	17,2	30,3
1k	44,4	19,4	25
1,25k	43,0	18,4	24,6
1,6k	42,4	18,9	23,5
2k	40,1	18,2	21,9
2,5k	36,9	19,1	17,8
3,15k	35,4	20,7	14,7
4k	34,0	22,9	11,1
5k	32,1	24,5	7,6
6300	30,9	25,4	5,5
8k	28,7	25,3	3,4
L_{eq}	57,1	32,7	24,4

Também aqui apenas para efeitos de comparação foram determinados os valores de NC e NR, obtendo-se NC-35 e NR-37, ambos condicionados pela banda de frequências dos 8 kHz, que revelam um valor baixo, com um maior valor do nível de pressão sonora nas altas frequências (figuras 5.17 e 5.18).

Nas medições do nível sonoro do ruído de fundo em período seco nas grutas de Santo António obtiveram-se resultados que demonstram o quão silenciosos são estes espaços, para uma medição de 4 minutos (quadro 5.13). Com um nível sonoro contínuo equivalente de 21,6 dB(A), um L_{10} de 24 dB(A) e um L_{90} inferior a 20 dB(A), possivelmente entre os 19 dB(A) e os 20 dB(A), valores dificilmente atingidos fora de câmaras reverberantes ou câmaras anecoicas, pode-se mesmo afirmar que este será dos espaços naturais mais silenciosos em Portugal, mesmo com a interferência de algumas gotas de água resultantes de infiltrações que existem em permanência, das correntes de ar existentes no espaço devidas aos algares e da possível presença de fauna no interior da gruta.

Quadro 5.12 – Valores do nível sonoro do ruído de fundo em período chuvoso por banda de frequência para cada uma das duas situações medidas nas grutas de Santo António.

Banda de frequência (Hz)	Filtro A (dB)	L_A (dB)		ΔL_A (dB) (CV-SV)
		Com visitas	Sem visitas	
100	-19,1	15,9	<0	25,6
125	-16,1	22,9	<0	29,8
160	-13,4	27,1	<0	30,6
200	-10,9	30,9	<0	31,2
250	-8,6	37,5	3,2	34,3
315	-6,6	41,7	6,2	35,5
400	-4,8	44,9	10,4	34,5
500	-3,2	46,1	10,7	35,4
630	-1,9	44,8	13,6	31,2
800	-0,8	46,7	16,4	30,3
1k	0,0	44,4	19,4	25,0
1,25k	0,6	43,6	19,0	24,6
1,6k	1,0	43,4	19,9	23,5
2k	1,2	41,3	19,4	21,9
2,5k	1,3	38,2	20,4	17,8
3,15k	1,2	36,6	21,9	14,7
4k	1,0	35,0	23,9	11,1
5k	0,5	32,6	25,0	7,6
6300	-0,1	30,8	25,3	5,5
8k	-1,1	27,6	24,2	3,4
L_{Aeq}		54,4	32,7	21,7

Quadro 5.13 – Valores do nível sonoro do ruído de fundo medidos em período seco (sem atividade ou equipamentos ligados) nas grutas de Santo António.

Parâmetro	dB(A)
L_{eq}	21,6
L_{10}	24,0
L_{50}	20,5
L_{90}	<20,0

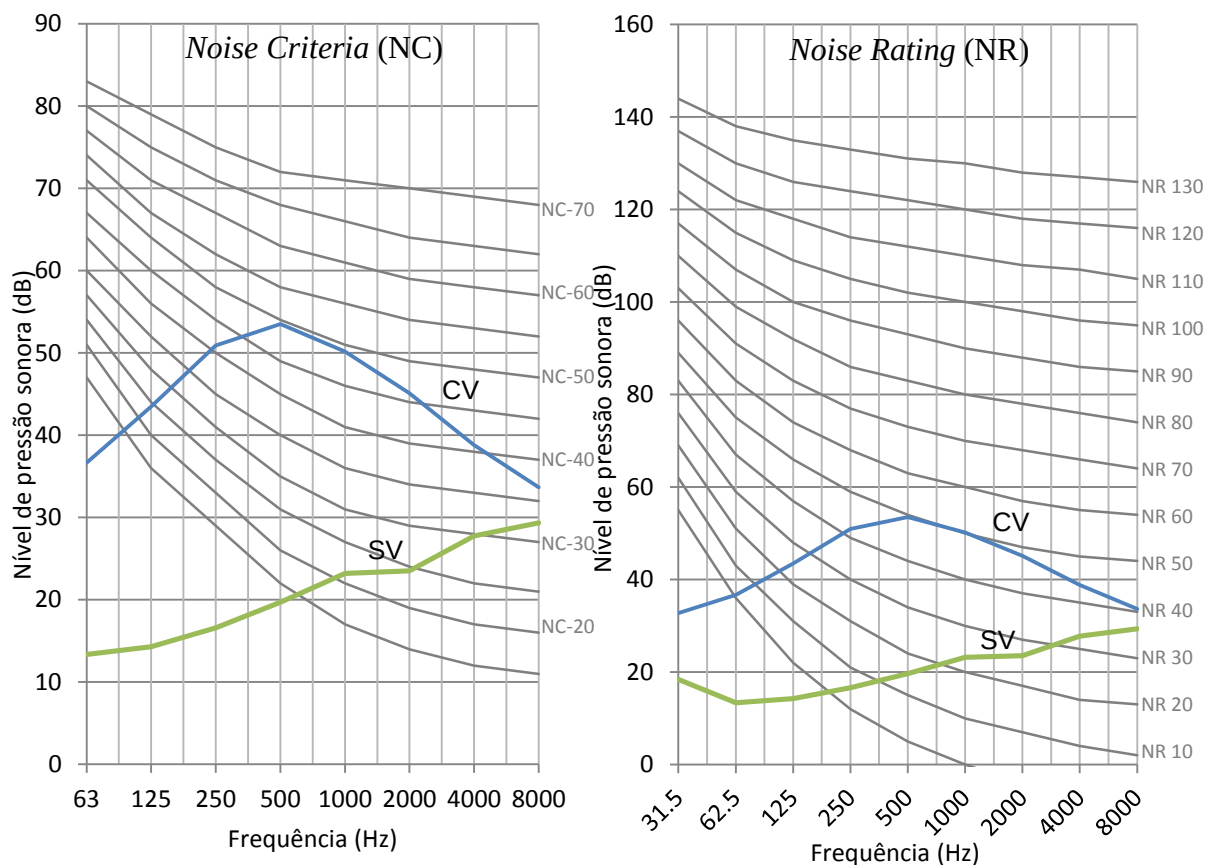


Figura 5.17 e 5.18 – Curvas NC (à esquerda) e NR (à direita) para as grutas de Santo António, para as situações de estarem a ocorrer visitas (CV) e de não estarem a decorrer visitas e sem equipamentos ligados (SV).

5.3.3.3. Grutas de Alvados

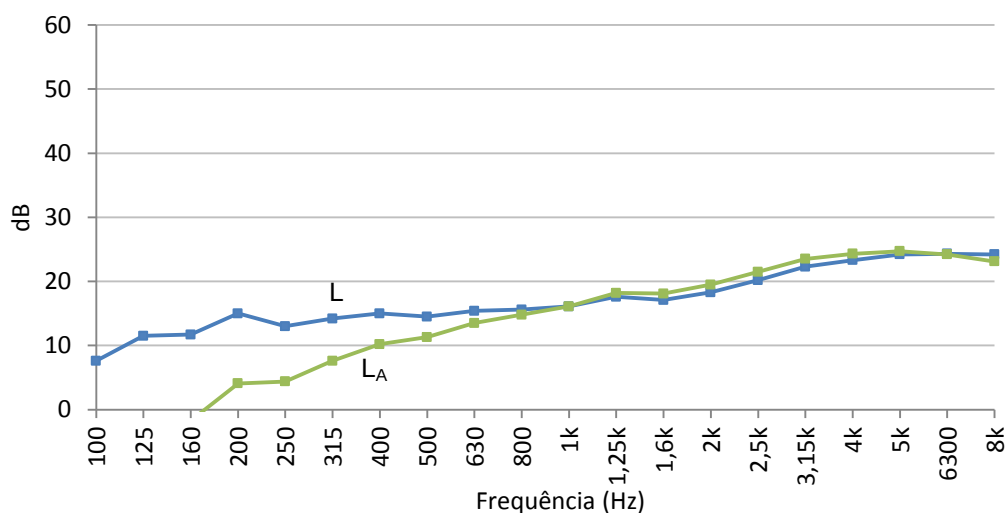


Figura 5.19 – Níveis de pressão sonora, L (dB), e nível sonoro, L_A (dB), do ruído de fundo em período chuvoso para a situação sem visitas nem equipamentos, apenas com o ruído da infiltração de água, nas grutas de Alvados.

As grutas de Alvados apenas se encontram abertas ao público na época alta e não têm qualquer equipamento que possa ser fonte de ruído, pelo que apenas se analisaram os ruídos naturais do espaço em estudo em período chuvoso. Nesta gruta, como foi referido anteriormente, não foi possível fazer a medição do nível sonoro contínuo equivalente para o período seco devido à maior afluência de visitantes e consequente necessidade de não perturbar o normal funcionamento das visitas. No quadro 5.14 e na figura 5.19 são apresentados os valores obtidos para o nível de pressão sonora e para o nível sonoro na medição sem equipamentos ou visitas.

A análise do gráfico que representa o nível sonoro do ruído de fundo no espaço estudado nas grutas de Alvados permite concluir que, à semelhança do que acontece nas duas outras grutas estudadas, também aqui a fonte principal de ruído está na queda das gotas de água, já que não há qualquer outra interferência sonora vinda do interior ou exterior do espaço. Obtém-se então um L_{Aeq} de 32,4 dB, que, embora denote algum ruído, é um valor muito baixo.

Quadro 5.14 – Valores do nível de pressão sonora e nível sonoro do ruído de fundo por banda de frequência de terço de oitava para nas grutas de Alvados sem visitas ou equipamentos ruidosos, apenas com o ruído da infiltração de água.

Banda de frequência (Hz)	L (dB)	Filtro A (dB)	L_A (dB)
100	7,6	-19,1	<0
125	11,5	-16,1	<0
160	11,7	-13,4	<0
200	15	-10,9	4,1
250	13	-8,6	4,4
315	14,2	-6,6	7,6
400	15	-4,8	10,2
500	14,5	-3,2	11,3
630	15,4	-1,9	13,5
800	15,6	-0,8	14,8
1k	16,1	0,0	16,1
1,25k	17,6	0,6	18,2
1,6k	17,1	1,0	18,1
2k	18,3	1,2	19,5
2,5k	20,2	1,3	21,5
3,15k	22,3	1,2	23,5
4k	23,3	1,0	24,3
5k	24,2	0,5	24,7
6300	24,3	-0,1	24,2
8k	24,2	-1,1	23,1
L_{eq}	32,4	L_{Aeq}	32,4

É importante notar que os valores de L_{eq} e L_{Aeq} são semelhantes, diferindo apenas em algumas centésimas, diferença essa não perceptível após o arredondamento. Trata-se de um resultado pouco comum mas que provavelmente se deverá às compensações aplicadas pelo filtro A.

A avaliação dos valores de NC e NR nas grutas de Alvados pretende caracterizar apenas o nível sonoro na situação sem visitas ou equipamentos ruidosos ativados. Os valores obtidos para NC e NR nas grutas de Alvados foram NC-34 e NR-36, condicionados pelos valores do nível de pressão sonora para a banda de frequências dos 8 kHz, revelam valores de incomodidade baixos, com o seu valor superior para as altas frequências, como seria de esperar devido à constante queda de gotas de água. Importa de novo salientar que este tipo de análise é meramente comparativo, já que os valores de NC e NR são habitualmente relevantes apenas no estudo da incomodidade causada por equipamentos como os sistemas de AVAC, o que não é o caso.

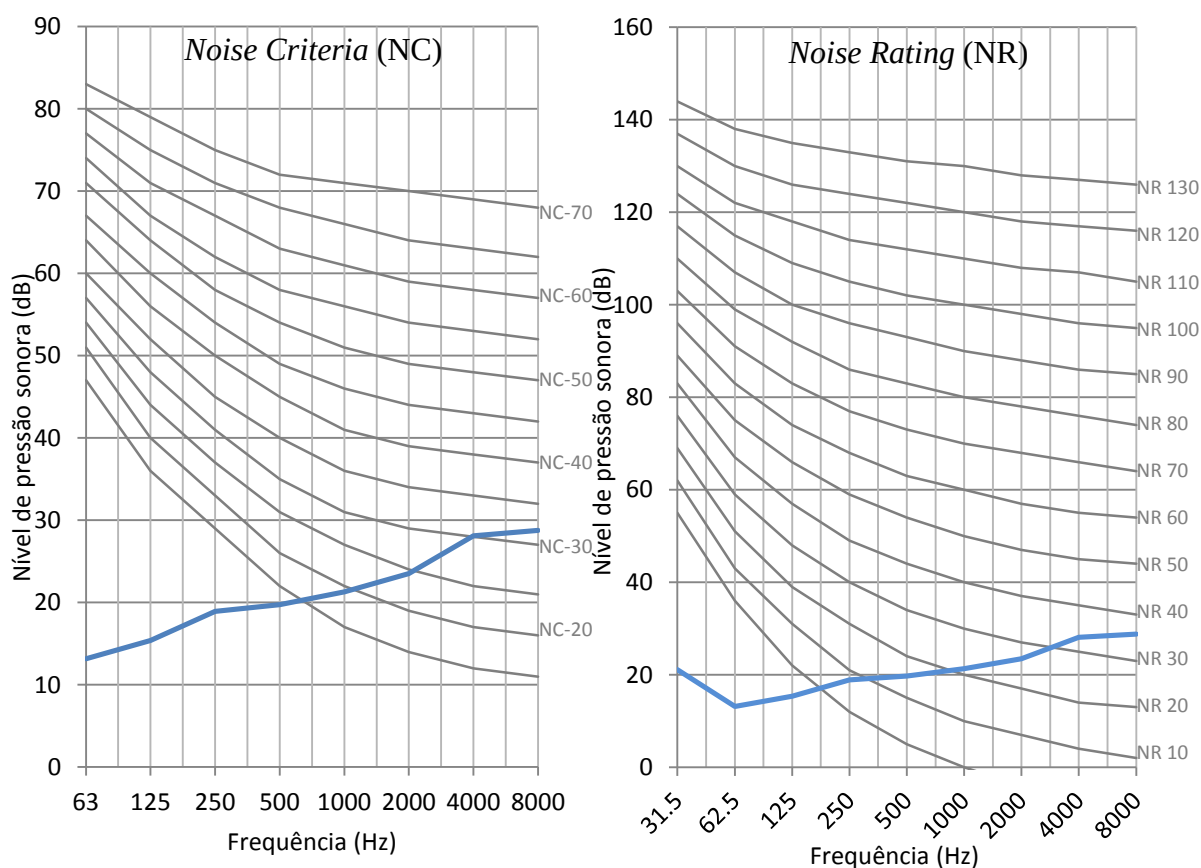


Figura 5.20 e 5.21 – Curvas NC (à esquerda) e NR (à direita) para as grutas de Alvados, para a situação de não estarem a decorrer visitas e sem equipamentos ligados.

5.3.3.4. Comparação de Resultados

A comparação entre as três grutas no que toca ao ruído de fundo apenas poderá incidir sobre a situação de não estarem equipamentos ruidosos ligados e de não estarem a ocorrer visitas, em período chuvoso, já que foi a única situação que foi possível determinar em comum entre as três. Os resultados obtidos conduzem-nos ao gráfico da figura 5.22 e os níveis sonoros contínuos equivalentes são apresentados no quadro 5.15. Para efeitos de comparação entre os dois períodos foram também considerados no quadro 5.15 os valores referentes às medições em período seco.

A análise da figura 5.22 permite afirmar que as grutas da Moeda serão as mais ruidosas no período chuvoso, com a sua principal fonte de ruído sendo a constante queda e circulação de água, já que esta é a única das três que dispõe de cursos ativos no seu interior. Como referido anteriormente, as infiltrações em período chuvoso são significativas, levando à existência de frequente queda de gotas de água que causaram o aumento do nível sonoro nas altas frequências em todas as grutas. Este facto pode ser prejudicial para algumas utilizações que requeiram ruídos de fundo reduzidos.

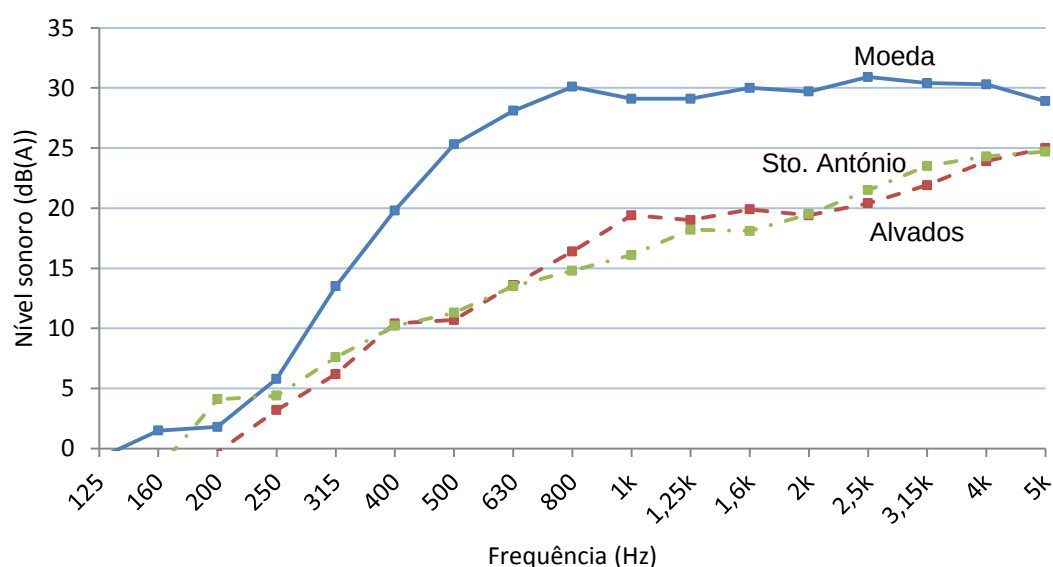


Figura 5.22 – Níveis de pressão sonora filtrados com o filtro A por banda de frequência de terço de oitava em cada uma das grutas para a situação de ruído apenas resultante da infiltração de água, sem visitas ou equipamentos ligados.

Ainda assim, mesmo durante o período chuvoso, pode-se considerar que o ruído de fundo nestes espaços tem um valor bastante baixo, com um valor médio de L_{Aeq} de 34 dB.

Quadro 5.15 – Valores dos níveis sonoros contínuos equivalentes nas três grutas para a situação de ruído apenas resultante da infiltração de água, sem visitas ou equipamentos ligados, em período chuvoso e seco.

Sala (Gruta)	$L_{Aeq,chuva}$ (dB)	$L_{Aeq,seco}$ (dB)
Moeda	40,3	23,1
Sto. António	32,7	21,6
Alvados	32,4	-

Comparando a situação de período chuvoso com valor com os obtidos para o período seco pode-se concluir que a infiltração de água é a grande responsável pelo ruído no interior destes espaços, já que o valor médio de L_{Aeq} nessa situação é de 22 dB, havendo então um acréscimo de 12 dB(A) graças à circulação de água.

5.4. RASTI

5.4.1. METODOLOGIA

5.4.1.1. Equipamento

O RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) foi medido com recurso a um medidor de RASTI, um aparelho capaz de produzir um sinal sonoro com características “semelhantes” em termos de frequências à voz humana e de avaliar a inteligibilidade desse sinal. O equipamento usado neste estudo tratou-se de um emissor (altifalante) modelo 4225, apoiado num tripé, um recetor modelo 4419 e um analisador modelo 3361, todos da *Brüel & Kjaer* (figuras 5.23 e 5.24).

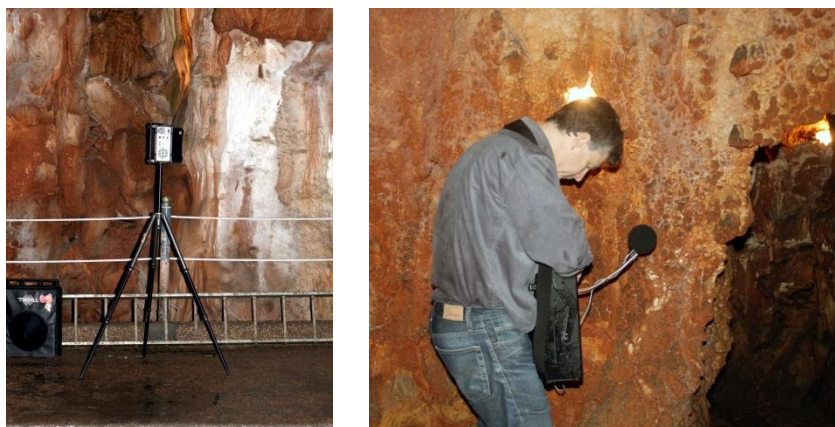


Figura 5.23 e 5.24 – À esquerda: emissor de sinal RASTI *Brüel & Kjaer* modelo 4225; à direita: utilização do recetor modelo 4419 e analisador modelo 3361 da *Brüel & Kjaer*. [fotografias da autora]

5.4.1.2. Procedimentos

A medição do RASTI é realizada colocando o emissor do sinal RASTI numa posição semelhante à que seria a do orador e fazendo a medição com recurso ao recetor e analisador numa posição provável para o ouvinte. Neste caso foram consideradas as hipóteses de haver visitas guiadas às grutas em estudo ou possíveis palestras de pequena dimensão organizadas no seu interior.

O sinal emitido, com características de frequência semelhantes à da voz humana, é então captado e analisado pelo equipamento, obtendo-se assim o índice que indica a inteligibilidade da palavra naquela posição. Idealmente deverão ser feitas duas ou mais medições por cada posição do recetor, e escolhidas várias posições do recetor que permitam fazer uma análise de todos os pontos do espaço onde é importante este índice.

5.4.2. PONTOS DE MEDIÇÃO

5.4.2.1. Grutas da Moeda

Os pontos em que foi medido o RASTI foram coincidentes com os pontos em que foi medido o tempo de reverberação, representados na figura 5.3, à exceção do ponto 5, que não foi utilizado na medição do RASTI. A fonte sonora de RASTI foi colocada no ponto S. Os pontos 1, 2, 3, 4 e 6 são representativos das posições comumente adotadas pelos visitantes durante as visitas e eventos, e o ponto S é representativo do local onde habitualmente se localiza o locutor.

5.4.2.2. Grutas de Santo António

Os pontos de medição do RASTI nas grutas de Santo António foram os mesmos seis pontos utilizados para a medição do T (figura 5.4), com a fonte emissora do sinal no ponto S. Partiu-se do princípio que a inteligibilidade da palavra seria importante quando o locutor se localizasse no espaço do palco.

5.4.2.3. Grutas de Alvados

Na Gruta de Alvados optou-se também por seguir os mesmos critérios para a escolha dos pontos de medição que foram utilizados para a escolha dos pontos para a medição do T , motivo pelo qual os pontos de medição 1 a 5 são os mesmos (figura 5.5) e a fonte do sinal RASTI localiza-se também neste caso no ponto S.

5.4.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.4.3.1. Grutas da Moeda

Os valores do RASTI obtidos estão apresentados no quadro 5.16 e na figura 5.25. O valor médio obtido para todo o espaço foi de 0,54. Este valor indica que a percepção da palavra no espaço analisado é satisfatória, e pode-se verificar que para distâncias até à fonte de cerca de 8 metros o valor do RASTI é ainda superior a 0,60, o que indica uma percepção muito boa para uma distância já considerável. Este facto é muito vantajoso para o bom funcionamento das visitas guiadas neste espaço e para possíveis atuações em que a clareza e a boa percepção da palavra sejam importantes.

Quadro 5.16 – Valores do RASTI para o espaço estudado nas grutas da Moeda, medidos nos pontos 1 a 6, excluindo o ponto 5 (figura 5.3).

Ponto	d (m)	RASTI						Valor médio
		1º	2º	3º	4º	5º	6º	
1	4,4	0,70	0,71	0,72	0,72	0,73	0,74	0,72
2	7,9	0,60	0,61	0,62	0,60	0,61	-	0,61
3	14,0	0,49	0,49	0,49	0,52	0,49	-	0,50
4	19,4	0,43	0,42	0,44	0,44	0,45	-	0,44
6	23,1	0,47	0,47	0,48	0,40	0,47	-	0,46
Média	-	-	-	-	-	-	-	0,54

A análise do quadro 5.16 e da figura 5.25 permite ainda verificar que o valor do RASTI em geral decresce com o aumento da distância à fonte de forma não uniforme. A distância entre a fonte emissora e os pontos 1 e 2 é percorrida sem qualquer obstáculo, pelo que a percepção da palavra diminui de forma constante. Tendo em conta que a distância até à fonte quase duplica entre o ponto 2 e o ponto 3, pode-se afirmar que este último e o ponto 4, por se situarem no interior do túnel que faz a ligação entre a parte inferior e a parte superior da gruta, contam com obstáculos no caminho direto das ondas sonoras até si, pelo que a percepção da palavra é bastante afetada. Regista-se um aumento do RASTI no ponto 6 porque, apesar da distância, este ponto beneficia do efeito direto da passagem inferior que liga a parte superior do espaço à parte inferior, onde está situado o emissor.

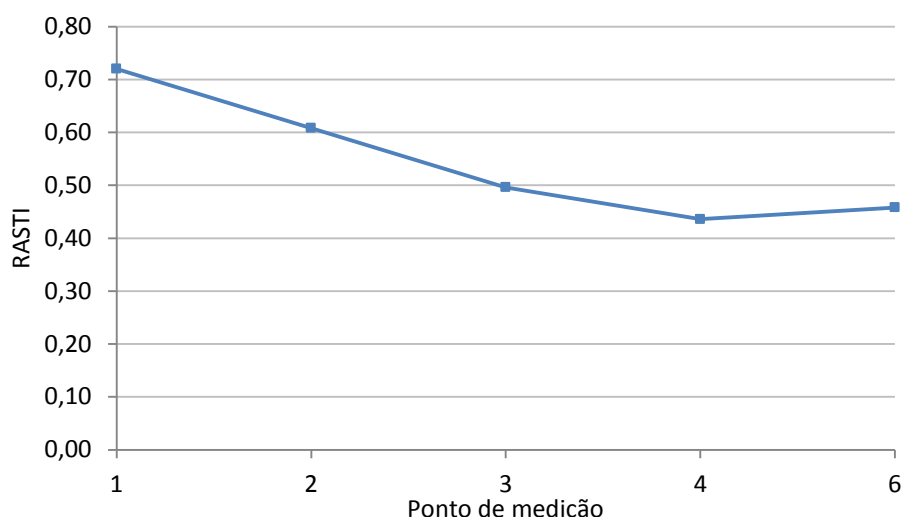


Figura 5.25 – Valores do RASTI em cada ponto de medição nas grutas da Moeda.

5.4.3.2. Grutas de Santo António

Os valores obtidos para o RASTI na *Grande Sala* das grutas de Santo António estão apresentados no quadro 5.17 e representados na figura 5.26, e o valor médio é de 0,50. Este é um valor aceitável, tendo em conta o relevo das superfícies e o volume do espaço, que levam a que a energia sonora seja mais difundida e não seja tão direcionada, diminuindo assim a percepção da palavra.

Quadro 5.17 – Valores do RASTI para o espaço estudado nas grutas de Santo António, medidos nos pontos 1 a 6 (figura 5.4).

Ponto	d_i (m)	RASTI						Valor médio
		1º	2º	3º	4º	5º	6º	
1	4,3	0,63	0,64	0,63	0,62	0,66	-	0,64
2	8,3	0,57	0,58	0,57	0,68	0,57	-	0,59
3	13,1	0,54	0,53	0,53	0,51	0,51	-	0,52
4	14,6	0,45	0,46	0,46	0,46	0,45	0,46	0,46
5	20,3	0,43	0,43	0,42	0,44	0,44	-	0,43
6	27,6	0,38	0,38	0,39	0,39	0,38	-	0,38
Média	-	-	-	-	-	-	-	0,50

A análise da variação do RASTI com a distância, possível através do quadro 5.17 e da figura 5.26, permite verificar que este segue duas tendências de decréscimo. Tendo em conta as distâncias entre os pontos e a fonte emissora, ao verificar que a distância entre os pontos 3 e 4 é de apenas 1,5 m e que há um decréscimo de 0,08 no valor de RASTI, pode-se verificar que há aqui uma quebra na percepção da palavra, que acontece devido à mudança no nível da receção do sinal: há entre estes dois pontos um desnível na cota do piso, contando ainda com uma barreira de estalactites e estalagmites que dificultam a passagem das ondas sonoras. Do ponto 4 em diante há um decréscimo quase constante

relacionado com o aumento da distância à fonte. Pode-se então concluir que a zona de melhor percepção da palavra será no patamar que inclui os pontos S, 1, 2 e 3.

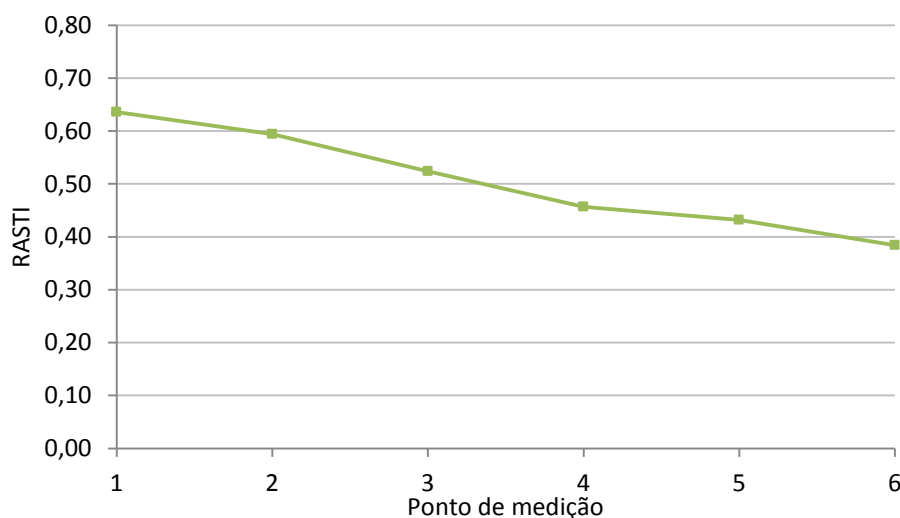


Figura 5.26 – Valores do RASTI em cada ponto de medição nas grutas de Santo António.

5.4.3.3. Grutas de Alvados

A medição do RASTI nas grutas de Alvados foi feita nos pontos 1 a 5 assinalados na figura 5.5, e os resultados obtidos são apresentados no quadro 5.18 e na figura 5.27. O espaço estudado tem um RASTI de valor médio de 0,57. Este é um valor muito satisfatório, já que indica que a percepção da palavra é boa em grande parte da sala, mesmo tendo esta um volume considerável.

Quadro 5.18 – Valores do RASTI para o espaço estudado nas grutas de Alvados, medidos nos pontos 1 a 5 (figura 5.5).

Ponto	d_i (m)	RASTI						Valor médio
		1º	2º	3º	4º	5º	6º	
1	5,7	0,71	0,71	0,70	0,70	0,70	-	0,70
2	8,1	0,64	0,64	0,63	0,65	0,64	-	0,64
3	15,0	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	-	0,54
4	19,5	0,50	0,50	0,52	0,51	0,52	-	0,51
5	20,7	0,49	0,47	0,48	0,48	0,47	-	0,48
Média	-	-	-	-	-	-	-	0,57

O espaço estudado apresenta valores do RASTI bastante elevados, acima dos 0,70, para distâncias de quase 6 metros à fonte emissora, junto ao limite mais próximo da zona inacessível no centro da sala. Pode-se concluir assim que a percepção da palavra na zona da sala onde foi colocada a fonte emissora é sempre muito satisfatória, já que mesmo para o limite mais afastado esse valor é de 0,64. Na zona oposta, já separada pelo espaço inacessível, caracterizada nos pontos 3, 4 e 5, o RASTI tem valor médio de 0,51, o que representa uma percepção aceitável, mesmo já a uma distância considerável.

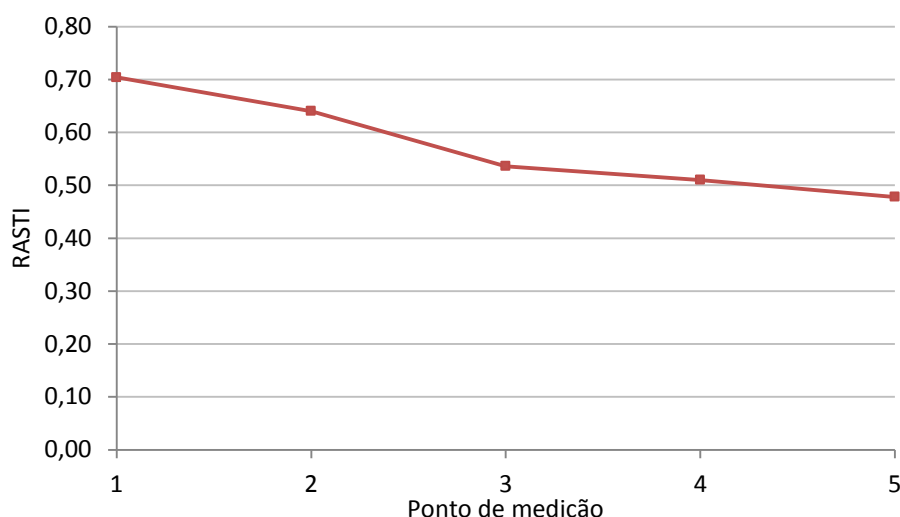


Figura 5.27 – Valores do RASTI em cada ponto de medição nas grutas de Alvados.

5.4.3.4. Comparação de Resultados

A comparação dos valores do RASTI conduz à percepção de qual das grutas proporcionará uma melhor percepção da palavra, um fator de extrema importância na realização de visitas guiadas, espetáculos de teatro ou conferências. Os valores médios para cada uma das grutas são apresentados no quadro 5.19. Verifica-se que a inteligibilidade da palavra é considerada, em média, de aceitável a boa, o que significa que há uma boa percepção em todo o espaço.

Quadro 5.19 - Valores do RASTI médio para cada uma das grutas estudadas.

Sala (Gruta)	RASTI médio
Moeda	0,54
Sto. António	0,50
Alvados	0,57

Com um valor médio para todas as grutas de 0,54 e valores mínimos próximos dos 0,40 (figura 5.28), pode-se afirmar que a percepção da palavra em todos os espaços estudados é bastante boa, tendo em conta que as medições foram feitas até distâncias bastantes consideráveis. Verifica-se que a maior variação ocorre nas grutas da Moeda, onde o desnível entre o ponto de emissão do sinal e o ponto de receção mais distante causou uma maior diferença entre o valor obtido neste e no ponto mais próximo. A sua complexa morfologia causa grandes perdas de inteligibilidade à medida que o recetor se afasta da fonte sonora. Justifica-se ainda que a menor variação tenha sido registada nas grutas de Alvados, já que este é o espaço onde existiam menos obstáculos entre o ponto de emissão do sinal RASTI e os diferentes pontos de receção.

Importa referir que o baixo tempo de reverberação nas três grutas contribui para um aumento da percutibilidade da palavra, já que não ocorre o empastelamento dos sons emitidos.

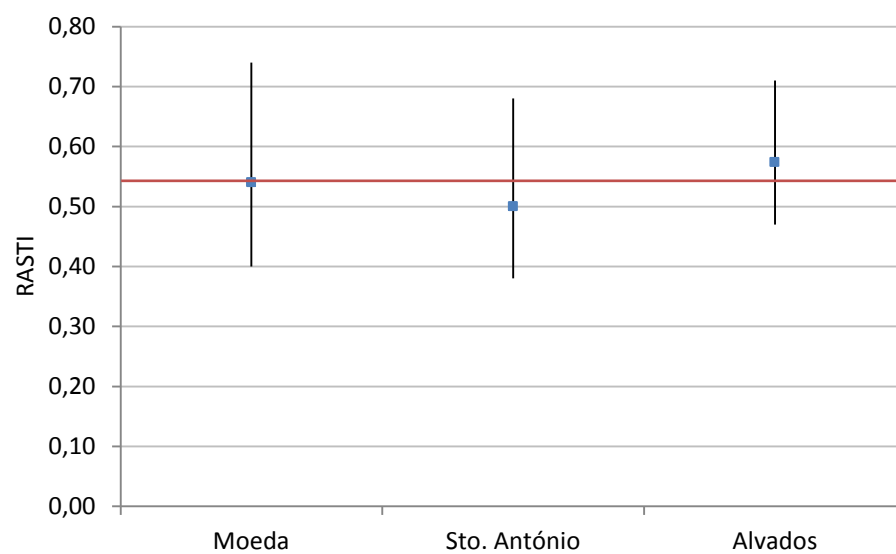


Figura 5.28 – Valores mínimos, máximos e médios do RASTI para cada uma das grutas, e valor médio.

6

COEFICIENTE DE ABSORÇÃO
SONORA

6.1. MEDIÇÃO EM TUBO DE ONDAS ESTACIONÁRIAS

6.1.1. EQUIPAMENTO

A determinação experimental do coeficiente de absorção sonora das amostras recolhidas nas grutas em estudo foi feita através do tubo de ondas estacionárias devido à reduzida dimensão das amostras.

O tubo de ondas estacionárias é um equipamento que, de acordo com a norma ISO 10534-1 [43], é constituído por um tubo de impedância, uma base para colocação da amostra, um microfone tipo sonda, um dispositivo para mover este último, um equipamento de processamento do sinal recebido pelo microfone, um altifalante, um gerador de sinal e um termómetro para garantir que a celeridade não varia. Neste estudo foi utilizado um tubo *Bruël & Kjaer* modelo 4002, um analisador *Bruël & Kjaer* modelo 1024, e um sonómetro *Bruël & Kjaer* modelo 2231 com filtro de 1/3 de oitava modelo 1625.

O tubo utilizado é reto, com uma secção constante, com paredes rígidas, suaves e não porosas, sem buracos ou fendas, espessas e pesadas, de metal, de modo a evitar que vibrem ou que entrem em ressonância devido aos sinais sonoros. No caso em estudo foram utilizados dois tubos: um de diâmetro de 10 cm e comprimento de 1 m para as frequências entre os 100 e os 800 Hz, e um de 3 cm de diâmetro e comprimento de 30 cm para as frequências entre os 630 e os 5k Hz, ambos de secção circular. As frequências de 630 e 800 Hz foram analisadas em ambos os tubos para cruzamento de dados. As frequências que o tubo permite testar dependem da sua secção e comprimento. O seu comprimento mínimo deverá ser de $l \geq \frac{3}{4}\lambda$, para a frequência mais baixa a testar. A frequência mais alta que será possível testar deverá ser tal que se verifique que, para tubos circulares, o diâmetro cumpre a condição $d \leq 0,5\lambda$.

A base para colocação da amostra trata-se de uma peça separada que é fixada com precisão na extremidade do tubo, posicionada de modo a que exista uma caixa de ar atrás de si.

O microfone, que permite encontrar os máximos e mínimos de pressão da onda estacionária e registar os seus níveis de pressão sonora, consiste num equipamento móvel que dispõe de uma sonda que entra no tubo pela extremidade oposta àquela em que se encontra a amostra. O dispositivo para o mover dispõe de uma régua de medição que permite definir um plano de referência para a posição do microfone. O equipamento de processamento do sinal recebido, acoplado ao microfone, contém um amplificador, um filtro de terço de oitava e um medidor do nível de pressão sonora.

A extremidade oposta àquela em que está colocada a amostra é ocupada por um altifalante de membrana coaxial, colocado numa caixa com isolamento sonoro para evitar interferências exteriores. O gerador do sinal é constituído por um gerador de ondas sinusoidais, um amplificador e um medidor de frequências.

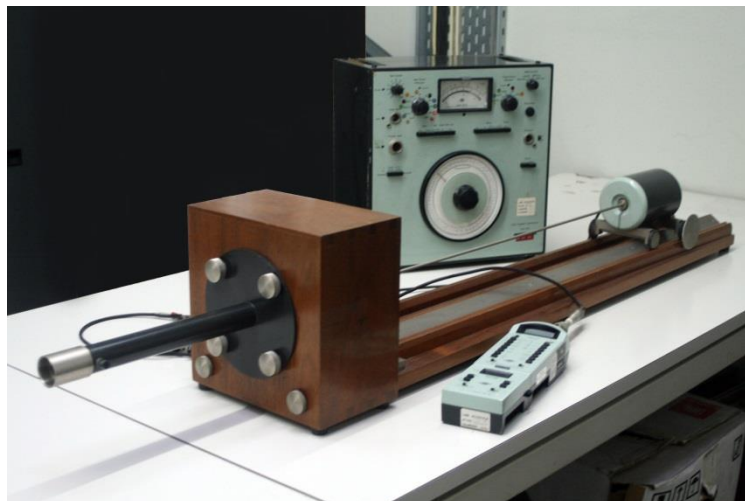


Figura 6.1 – Tubo *Bruël & Kjaer* modelo 4002, com tubo de 3 cm de diâmetro, analisador *Bruël & Kjaer* modelo 1024, e sonómetro *Bruël & Kjaer* modelo 2231 com filtro de 1/3 de oitava modelo 1625. [fotografias da autora]



Figuras 6.2 e 6.3 – À esquerda: tubo de ondas estacionárias para baixas e médias frequências com diâmetro de 10 cm e respetiva base para colocação da amostra; à direita: tubo de ondas estacionárias para altas frequências com diâmetro de 3 cm e respetiva base para colocação da amostra. [fotografias da autora]

6.1.2. PROCEDIMENTOS

De acordo com o princípio exposto no ponto 2.3.1 e com a ISO 10534-1 [43], os procedimentos seguidos na realização da medição serão descritos de acordo com o efeito pretendido neste estudo, que se prende apenas com a medição do coeficiente de absorção sonora das amostras recolhidas:

- i. Testar o equipamento de acordo com as indicações do anexo B da norma ISO 10534-1 [43] para determinação do rácio de ondas estacionárias, que não deverá ser inferior a 45 dB, para determinar o alcance do microfone e para verificar se o tubo sofre excitação;

- ii. Definição do plano de referência, isto é, do plano da superfície da amostra, onde se considera $x = 0$. No caso em estudo, como a superfície das amostras era irregular, considerou-se o plano de referência um pouco à frente da superfície real;
- iii. Definição das frequências a estudar, de preferência com bandas não superiores a um terço de oitava. Neste caso foram estudadas as frequências de 100 a 5k Hz, mas apenas foram considerados válidos os valores obtidos a partir dos 400 Hz;
- iv. Realizar as medições indicadas no anexo A da norma ISO 10534-1 [43], com a base para colocação da amostra vazia, com o objetivo de encontrar o centro acústico do microfone, determinar a velocidade de propagação do som c_0 e as correções a aplicar devidas à atenuação do tubo;
- v. Montar a amostra de teste de modo a que a mesma fique acondicionada de forma justa às paredes do tubo, preenchendo possíveis vazios com vaselina ou plasticina, já que a existência de falhas poderá condicionar fortemente os resultados. A superfície mais lisa da amostra deverá ser colocada ortogonalmente ao eixo do tubo. Idealmente, deverão ser utilizadas no mínimo duas amostras para a medição, o que no presente caso é impossível porque apenas se dispunha de uma amostra de cada tipo;
- vi. Seleção da amplitude do sinal, de preferência em 10 dB acima no nível de pressão sonora do ruído de fundo;
- vii. Determinação do coeficiente de absorção sonora por medição, para cada frequência, da amplitude e posição do primeiro mínimo da onda estacionária, $|p(x_{min,1})|$ e $x_{min,1}$, e do primeiro máximo da mesma, $|p(x_{max,1})|$ e $x_{max,1}$. A partir destes dados obtém-se

$$s_1 = |p(x_{min,1})|/|p(x_{max,1})| \quad (6.1) [43]$$

Daqui, tem-se, com $n=1$,

$$|r| = e^{2k_0'' x_{min,n}} \left(\frac{s_n - e^{k_0'' \lambda_0/4}}{s_n + e^{-k_0'' \lambda_0/4}} \right) \quad (6.2) [43]$$

Onde k_0'' corresponde à atenuação do tubo determinada no ponto v. O coeficiente de absorção sonora é dado por

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (6.3) [43]$$

Para garantir a exatidão dos resultados apenas foram considerados os valores obtidos para as bandas de frequência de 1/1 oitava a partir dos 500 Hz, inclusive, já que para frequências abaixo desse valor o tubo de ondas estacionárias não é um método adequado.

Os valores obtidos por este método para o coeficiente de absorção sonora correspondem à situação de incidência normal à amostra. Neste caso, como se verá no ponto 6.1.3, as amostras não têm uma face exposta paralela à base de suporte, pelo que a incidência na realidade não é normal à amostra e a área de absorção real é maior do que a área da secção do tubo. Assim, os valores obtidos para o coeficiente de absorção sonora devem ser multiplicados por um fator menor que a unidade para se obter o valor real dos mesmos. Assumiu-se que a área das amostras é superior em 10% à área da secção transversal do tubo e, por isso, os resultados serão afetados de um fator multiplicativo de 0,9.

Sabe-se que o valor do coeficiente de absorção sonora real de um material engloba a sua capacidade de absorção das ondas incidentes em todas as direções e não só na direção normal. No entanto, e apesar de todas as aproximações existentes, não existe um método preciso que permita converter os valores obtidos no tubo de ondas estacionárias (para incidência normal) em valores para incidência difusa que também diferencie por bandas de frequência em análise e que não acrescente erros consideráveis aos valores obtidos. Assim, não será feita nenhuma conversão neste trabalho.

6.1.3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados obtidos são indicativos pois a recolha foi feita a partir de fragmentos recolhidos anteriormente que, por esse motivo, não tinham as dimensões ideais para este tipo de utilização. Assim sendo, foi necessário cortar e compor as amostras de modo a ocuparem a base de colocação das mesmas de modo satisfatório, sendo necessário ter em conta que o ajuste nunca poderá ser perfeito devido à necessidade de quebrar as amostras. Também a sua morfologia não é representativa da totalidade de tipos de materiais encontrados nos espaços em estudo: as amostras obtidas não contêm fragmentos das formações geradas pela deposição da água em estado natural, que dominam as superfícies das grutas.

As amostras foram recolhidas das grutas da Moeda. A amostra I é constituída por calcário do período Jurássico, com algumas fendas, pouco poroso, com algumas incrustações de partículas possivelmente de origem biológica (figura 6.4). A amostra II é constituída por calcário biogénico, com origem na deposição de calcite e estrutura cristalina (figura 6.5).



Figuras 6.4 e 6.5 – À esquerda: material da amostra I – calcário jurássico; à direita: material da amostra II – calcário biogénico. [fotografias da autora]

Os procedimentos descritos no ponto 6.1.2 foram aplicados, obtendo-se assim os resultados apresentados no quadro 6.1 e na figura 6.6.

Quadro 6.1 – Valores dos coeficientes de absorção sonora com incidência normal obtidos pelo método do tubo de ondas estacionárias para as amostras I e II e respetivos valores corrigidos com o fator de 0,9 devido ao excesso de área.

Banda de freq. (Hz)	α_I	$\alpha_{I,corrigido}$	α_{II}	$\alpha_{II,corrigido}$
500	0,10	0,09	0,08	0,07
1k	0,09	0,08	0,09	0,08
2k	0,09	0,08	0,09	0,08
4k	0,10	0,09	0,10	0,09

Como referido no ponto 6.1.2, sabe-se que os valores do quadro 6.1 e da figura 6.6 não correspondem exatamente aos valores reais do coeficiente de absorção sonora das amostras, já que não foram obtidos por campo sonoro difuso. No entanto, permitem ainda assim verificar que estes materiais são muito pouco absorventes. Ainda assim, o ambiente no interior destes espaços é pouco reverberante também devido à grande área da superfície da envolvente que permite que estes materiais sejam responsáveis por uma absorção sonora relevante.

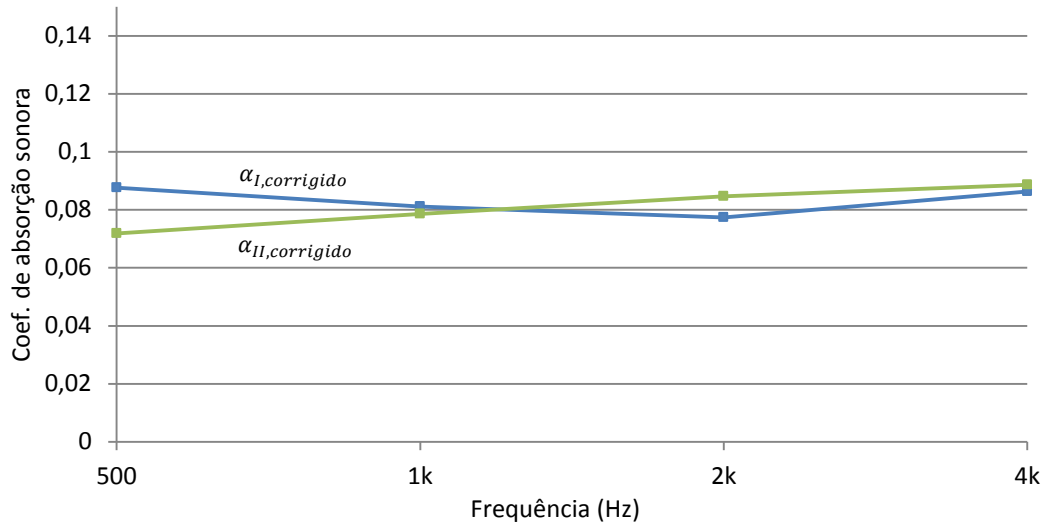


Figura 6.6 – Valores de $\alpha_{I,corrigido}$ e $\alpha_{II,corrigido}$ obtidos para cada banda de frequência de 500 a 4k Hz.

6.2. “FATOR DE FORMA” DAS GRUTAS

6.2.1. METODOLOGIA DE CÁLCULO

Os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de absorção sonora dos materiais que constituem as paredes das grutas permitem fazer uma estimativa da área da superfície da envolvente dos espaços estudados e assim retirar conclusões importantes acerca da sua morfologia e relevo. Estabelecendo uma relação entre essa estimativa, considerada a área real da superfície envolvente e absorvente, e a área de superfície caso as superfícies fossem regulares, pode-se avaliar a influência das formações resultantes da deposição da calcite no aumento da área superficial.

A fórmula de Sabine permite relacionar o coeficiente de absorção sonora com o tempo de reverberação de um espaço, tendo em conta o seu volume, área de absorção e absorções localizadas. Como indicado no ponto 2.3.2, sabe-se que a absorção sonora num espaço é também influenciada pela absorção do ar, pelo que poderá ser utilizada neste caso a formulação genérica da mesma fórmula:

$$T = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (6.5) [2]$$

Considerando apenas as absorções localizadas referentes à presença de três pessoas em pé no espaço, ou seja, três vezes A_p , já que não é possível determinar as restantes absorções localizadas, obtém-se:

$$\begin{aligned} T &= \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + 3 \times A_p + mV} \\ \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + 3 \times A_p + mV &= \frac{0,16V}{T} \\ \Leftrightarrow \alpha_{TOE} S_{env} &= \frac{0,16V}{T} - mV - 3 \times A_p \\ \Leftrightarrow S_{env} &= \frac{\frac{0,16V}{T} - mV - 3 \times A_p}{\alpha_{TOE}} \quad (6.6) \end{aligned}$$

Deste modo, sabendo o valor de T para cada banda de frequência, o volume aproximado do espaço, as características de temperatura e humidade e o coeficiente de absorção sonora do material que constitui a envolvente, considerando um valor médio das duas amostras estudadas no tubo de ondas estacionárias já que não se conhece a distribuição do material que compõe as superfícies do espaço (o qual será denominado por α_{TOE}), pode-se obter uma aproximação da área da superfície da envolvente, S_{env} .

Definindo um fator de forma F_f que traduz a razão entre o valor estimado da área da superfície envolvente, S_{env} , e a área da envolvente caso as superfícies fossem regulares, S_{reg} , tem-se:

$$F_f = \frac{S_{env}}{S_{reg}} \quad (6.7)$$

O que permite definir o fator de forma de acordo com a expressão 6.8:

$$F_f \times S_{reg} = \frac{\frac{0,16V}{T} - mV - 3 \times A_p}{\alpha_{TOE}}$$

$$\Leftrightarrow F_f = \frac{\frac{0,16V}{T} - mV - 3 \times A_p}{\alpha_{TOE} \times S_{reg}} \quad (6.8)$$

Impõem-se no entanto algumas reservas ao valor obtido. Os valores a utilizar neste estudo para o volume e também para a área de superfície da envolvente caso esta fosse regular são valores estimados grosseiramente. Também os valores de α_{TOE} estão sujeitos às limitações referidas em 6.1.3. Este estudo pretende portanto ser uma estimativa do valor real da área superficial da envolvente e não uma determinação exata do mesmo.

O valor de m por banda de frequência depende da temperatura e da humidade relativa. Estas propriedades foram definidas para cada uma das grutas no quadro 5.1. Os valores tabelados por Carvalho [2] indicam o valor de m apenas até um máximo de HR de 80%, pelo que serão utilizados esses valores. Os valores de m serão então, por banda de frequência de 1/1 oitava, os expostos no quadro 6.2:

Quadro 6.2 – Valores do coeficiente m a adotar no cálculo do coeficiente de absorção sonora, por banda de oitava [2].

	<1 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
$m \text{ (m}^{-1}\text{)}$	0	0,002	0,004	0,008

Os valores da absorção sonora localizada provocada por uma pessoa de pé são os indicados no quadro 6.3, de acordo com os valores propostos por Carvalho [2].

Quadro 6.3 – Valores da absorção sonora localizada A_p provocada por uma pessoa de pé a adotar no cálculo do coeficiente de absorção sonora, por banda de oitava [2].

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
$A_p \text{ (m}^2\text{)}$	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

6.2.2. GRUTAS DA MOEDA

A determinação da área de superfície da envolvente caso esta fosse regular (S_{reg}) do espaço estudado nas grutas da Moeda foi feita dividindo a sala em espaços distintos correspondendo a paralelepípedos

com base de área igual à de cada uma das zonas e altura igual à altura média respetiva assumida, retirando os valores de áreas livres ou sobrepostas entre zonas, devido à complexidade da morfologia deste espaço. Para a zona 10 (ver figura 4.11) foi calculada a área lateral de meio cone, juntamente com a área da base.

Assim sendo, e de acordo com a observação visual da sobreposição de zonas, obtém-se os valores aproximados conforme exposto no quadro 6.4:

Quadro 6.4 – Dados geométricos para a definição da área da superfície envolvente do espaço nas grutas da Moeda. Os valores obtidos da área resultam da soma das áreas das faces das formas assumidas, subtraídos do valor da área de zonas sobrepostas.

Zona	Área em planta (m ²)	Altura média estimada (m)	Lado 1 (m)	Lado 2 (m)	Área da envolvente (m ²)
1	26,6	4,2	7,4	3,6	83,4
2	23,4	5,6	6,8	3,4	104,8
3	13,7	7,2	4,0	3,4	85,2
4	16,9	4,8	6,0	2,8	91,1
5	24,2	4,0	7,0	3,5	118,3
6	25,7	6,3	4,3	6,0	167,5
7	18,3	6,8	3,7	4,9	36,6
8	104,9	8,3	19,0	5,5	389,9
9	73,3	10,0	11,5	6,4	295,9
10	148,5	-	-	-	271,2
$\sum S$					1644

De acordo com este valor de S_{reg} , e aproximando-o para 1650 m², e sabendo que o valor aproximado do volume da sala é de 2930 m³, têm-se então as características geométricas do espaço definidas, sendo então o fator de forma dado, para cada banda de frequência oitava, por:

$$F_f = \frac{\frac{0,16 \times 2930}{T} - m \times 2930 - 3 \times A_p}{\alpha_{TOE} \times 1650} \quad (6.9)$$

De acordo com a expressão 6.9 obtém-se os resultados do quadro 6.5. Tendo em conta as limitações destes resultados, com um fator de forma médio calculado de 2,8 pode-se então estimar, de acordo com a expressão 6.7, que $S_{env} = 2,8 \times S_{reg} = 2,8 \times 1650 = 4620 \text{ m}^2$. As formações geológicas resultantes da deposição da calcite e da erosão provocada pela água levam a um aumento para cerca de 2,8 vezes a área superficial da envolvente em relação ao seu valor caso a envolvente fosse regular, o que representa um aumento muito significativo e que ilustra a complexidade das superfícies deste espaço.

Quadro 6.5 – Cálculo do fator de forma da área da envolvente do espaço estudado nas grutas da Moeda, de acordo com os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de absorção sonora do material que constitui a envolvente.

Banda de freq. (Hz)	α_{TOE}	S (m ³)	T (s)	F_f
500	0,08	1650	1,30	2,7
1k	0,08		1,21	2,9
2k	0,08		1,08	3,2
4k	0,09		1,17	2,6
			$f_{m\acute{e}dio}$	2,8

6.2.3. GRUTAS DE SANTO ANTÓNIO

Quadro 6.6 – Dados geométricos para a definição da área da superfície envolvente do espaço nas grutas de Santo António. Os valores obtidos da área resultam da soma das áreas das faces dos paralelepípedos, subtraídos do valor da área de zonas livres ou sobrepostas.

Zona	Área em planta (m ²)	Altura média estimada (m)	Lado 1 (m)	Lado 2 (m)	Área da envolvente (m ²)
1	40,1	8,9	8,2	-	153,3
2	102,8	4,8	7,3	9,1	238,4
3	100,9	10,2	6,1	21,0	477,0
4	54,9	15,2	-	-	109,9
5	208,7	4,0	25,0	-	517,5
6	243,5	6,0	-	-	486,9
7	125,3	7,0	24,0	-	418,6
8	142,2	8,0	-	-	284,4
9	121,3	4,5	14,5	-	307,8
10	185,1	4,0	12,5	26,0	523,2
11	56,9	6,0	11,6	-	183,4
$\sum S$					3700

O método de cálculo da área aproximada da superfície da envolvente caso esta fosse regular, S_{reg} , do espaço estudado nas grutas de Santo António foi semelhante ao utilizado nas grutas da Moeda (quadro 6.6). As zonas utilizadas para o cálculo do volume serão utilizadas como referência para a obtenção da área da superfície de paralelepípedos de volume equivalente (figura 4.16), com a subtração de áreas livres ou sobrepostas entre eles.

Com um valor de S_{reg} , de aproximadamente 3700 m² e com um volume aproximado de 8640 m³, o fator de forma é dado, para cada banda de frequência oitava, pela expressão 6.10, obtendo-se os resultados apresentados no quadro 6.7.

$$F_f = \frac{\frac{0,16 \times 8640}{T} - m \times 8640 - 3 \times A_p}{\alpha_{TOE} \times 3700} \quad (6.10)$$

De acordo com a expressão 6.10 e tendo em conta as limitações impostas ao valor de F_f , tem-se então $S_{env} = F_f \times S_{reg} = 2,8 \times 3700 = 10360 \text{ m}^2$. A área superficial real é mais de 1,8 vezes superior à estimada para a situação de as superfícies serem regulares, o que, à semelhança do que acontece nas grutas da Moeda, demonstra a complexidade do relevo das superfícies da *Grande Sala* das grutas de Santo António.

Quadro 6.7 – Cálculo do fator de forma da área da envolvente do espaço estudado nas grutas de Santo António, de acordo com os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de absorção sonora do material que constitui a envolvente.

Banda de freq. (Hz)	α_{TOE}	$S \text{ (m}^3\text{)}$	$T \text{ (s)}$	F_f
500	0,08	3700	1,72	2,7
1k	0,08		1,65	2,8
2k	0,08		1,57	2,8
4k	0,09		1,44	2,8
			$f_{m\acute{e}dio}$	2,8

6.2.4. GRUTAS DE ALVADOS

O cálculo da área superficial, pela maior regularidade da forma deste espaço, foi feito através da medição da dimensão em planta de cada face da gruta, multiplicando-o pela altura média da zona correspondente, juntamente com as áreas do piso e do teto. Obtêm-se assim os valores do quadro 6.8, do qual resulta a área estimada da superfície da envolvente.

Quadro 6.8 – Dados geométricos de definição da área da superfície envolvente do espaço nas grutas de Alvados. Os valores obtidos da área resultam da soma das áreas das faces do espaço em estudo.

Zona	Área em planta (m ²)	Altura média estimada (m)	Extensão de parede em planta (m)	Área da envolvente (m ²)
1	12,3	5,0	8,9	69,0
2	38,5	7,6	10,5	157,0
3	67,4	8,8	18,5	297,3
4	18,3	5,0	8,9	81,2
5	21,4	6,5	4,1	69,5
6	19,1	4,7	9,6	83,4
7	20,6	4,0	12,7	92,0
$\sum S$				<u>850</u>

Deste modo, com uma área superficial caso as superfícies fossem regulares de 850 m^2 e um volume de 1350 m^3 obtêm-se os valores indicados no quadro 6.9, dados pela expressão 6.11.

$$F_f = \frac{\frac{0,16 \times 1350}{T} - m \times 1350 - 3 \times A_p}{\alpha_{TOE} \times 850} \quad (6.11)$$

De acordo com as limitações aos resultados já referidas, verifica-se neste caso que as formações resultantes da deposição da calcite e da corrosão provocada pela água provocam mais do que uma duplicação da área em relação à hipótese de as superfícies serem regulares, representando então uma área da superfície envolvente de $S_{env} = 2,2 \times S_{reg} = 2,2 \times 850 = 1870 \text{ m}^2$. Fica comprovada a maior regularidade das superfícies deste espaço em relação às restantes grutas estudadas, sem deixar de salientar a influência das formações calcárias no aumento da área superficial.

Quadro 6.9 – Cálculo do fator de forma da área da envolvente do espaço estudado nas grutas de Alvados, de acordo com os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de absorção sonora do material que constitui a envolvente.

Banda de freq. (Hz)	α_{TOE}	$S \text{ (m}^3\text{)}$	$T \text{ (s)}$	F_f
500	0,08	1350	1,57	2,0
1k	0,08		1,44	2,2
2k	0,08		1,33	2,3
4k	0,09		1,16	2,3
			$f_{m\acute{e}dio}$	2,2

7

ANÁLISE ACÚSTICA SUBJETIVA

7.1. INTRODUÇÃO

Face ao carácter único de espaços como as grutas da Moeda, de Santo António ou de Alvados e os poucos conhecimentos e especificações a nível acústico existentes para espaços como estes, importa conhecer quais são as exigências de conforto acústico desejadas pelos seus visitantes e qual a ambiência preferida por eles e esperada para um espaço deste tipo para se poder posteriormente definir parâmetros de conforto e adequabilidade para as visitas a grutas turísticas. Foi com este intuito que foram realizados inquéritos durante um período de cerca de dois meses, entre 8 de abril e 15 de Junho de 2014, com funcionamento *online* para todas as grutas estudadas e também com a entrega e recolha dos inquéritos presencialmente nas grutas da Moeda. Foi também avaliado o interesse dos visitantes em participar ou assistir a diferentes atividades no interior das grutas, numa perspetiva de tecer planos futuros acerca de possíveis utilizações para estes espaços.

7.2. METODOLOGIA

A realização dos inquéritos foi feita tendo em conta as recomendações da norma NP 4476 [44], referente à avaliação da incomodidade devida ao ruído por meio de inquéritos sociais e sócio-acústicos. Uma vez que o propósito deste inquérito não se enquadrava totalmente na norma referida foram feitas as adaptações necessárias e alterada uma grande parte das especificações por ela definidas, de modo a simplificar ao máximo as questões e opções de resposta definidas, por um lado para ser um estudo acessível e de fácil compreensão para todos os visitantes das grutas em estudo, e por outro para garantir que a resposta ao mesmo não se tornasse um processo fastidioso. Tendo em conta que o público que visita estas grutas se trata de um público muito abrangente a nível etário e no que toca às suas habilitações, optou-se por realizar perguntas diretas com o mínimo de opções de resposta possível, com escala unicamente verbal, e de resposta direta e única, excetuando uma única pergunta opcional.

A análise dos resultados obtidos teve sempre em conta a sua subjetividade e partiu do princípio que os conhecimentos a nível acústico dos visitantes seriam reduzidos e que o inquérito foi respondido algum tempo após a visita, pelo que as impressões recolhidas não são *in loco*. Ainda assim, foi feita uma análise o mais detalhada e conclusiva possível, dentro das limitações impostas.

7.3. INQUÉRITOS

As perguntas realizadas nos inquéritos foram divididas em três assuntos principais: caracterização demográfica, percepção sonora no interior das grutas e interesse em alterações ou outras atividades nestes espaços.

No panfleto de resumo (Anexos I, II e III), entregue juntamente com os bilhetes para as visitas, constaram as perguntas referentes à percepção sonora no interior das grutas e interesse em alterações ou outras atividades, como forma de sensibilizar os visitantes para o assunto que seria abordado. Nesse panfleto constava ainda a referência à ligação para resposta dessas mesmas questões. No caso das grutas da Moeda, o inquérito foi também realizado presencialmente (Anexo IV), para além de existir a plataforma *online*.

A categoria de caracterização demográfica incluiu as seguintes questões:

- i. *Idade* (Menos de 18 anos/ 18-30/ 31-45/ 46-65/ Mais de 65 anos);
- ii. *Género* (Masculino/ Feminino)

A categoria de percepção sonora no interior das grutas incluiu as seguintes questões:

1. *Qual o motivo que o/a levou a visitar as grutas da Moeda/de Santo António/de Alvados? (Lazer/ Trabalho/ Visita de Estudo/ Outra)* – esta questão visou entender qual o motivo de interesse para a visita ao local e, consequentemente, qual o nível de conhecimento acerca de espaços semelhantes estimado;
2. *Ouve ruído vindo do exterior? (Não ouço/ Sim, um pouco/ Sim, muito)* – esta questão procurou avaliar a percepção dos visitantes quanto à fonte do ruído, sendo que à partida seria muito pouco provável que se ouvisse ruído vindo do exterior no interior das grutas;
3. *Ouve ruído de lâmpadas, repuxos de água ou outros aparelhos? (Não ouço/ Sim, um pouco/ Sim, muito)* – esta questão visou de novo avaliar a sensibilidade dos visitantes a possíveis ruídos causados pelos equipamentos de apoio às visitas. De salientar que em nenhuma das grutas eram utilizadas lâmpadas que produzissem um ruído audível. No caso de a resposta ser *Sim*, colocava-se a questão 3a: *... esse ruído incomoda-o/a? (Não incomoda/ Incomoda um pouco/ Incomoda muito)*;
4. *Ouve “Ecos” em alguma parte da gruta?(Não ouço/ Sim, alguns/ Sim, muitos)* – esta pergunta procurou avaliar a sensibilidade dos visitantes para os conceitos de eco e, sem o referir diretamente por simplificação da linguagem, de tempo de reverberação. Caso a resposta fosse *Sim* era pedido que: *... se possível indique o(s) nome(s) da(s) sala(s) onde ouviu “Ecos”* na questão 4a;
5. *O ruído de conversações de outros visitantes incomoda-o/a? (Não incomoda/ Incomoda um pouco/ Incomoda muito)* – o objetivo desta pergunta era avaliar qual o nível de incomodidade causado pelos visitantes entre si, o que permite perceber se os visitantes desejariam um ambiente mais silencioso, se o ruído normal das visitas não incomoda, ou possivelmente se será indiferente;
6. *Caso tenha um guia, consegue ouvi-lo bem? (Não o ouço/ Ouço-o mal/ Ouço razoavelmente bem/ Ouço muito bem)* – esta questão procurava avaliar a sensibilidade dos visitantes ao mesmo parâmetro que caracteriza o RASTI, a percepção da palavra e o seu entendimento da mesma em condições de visita;

Na categoria de interesse em alterações ou outras atividades foram incluídas duas questões:

7. *Durante a sua visita preferia ter: (Música de fundo/ Silêncio/ Ruído de água a correr/ É-me indiferente)* – esta questão visou avaliar qual o ambiente mais comumente desejado pelos

visitantes, já que na amostra em causa temos o caso das grutas da Moeda que colocam música de fundo durante as visitas e as grutas de Santo António e de Alvados que não o fazem;

8. *Gostaria de assistir a um evento neste espaço (eventos musicais, teatro, palestras, etc.)? (Não/ É-me indiferente/ Sim)* – a última questão procura avaliar o interesse em desenvolver novas atividades nestes espaços.

7.4. RESULTADOS

7.4.1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

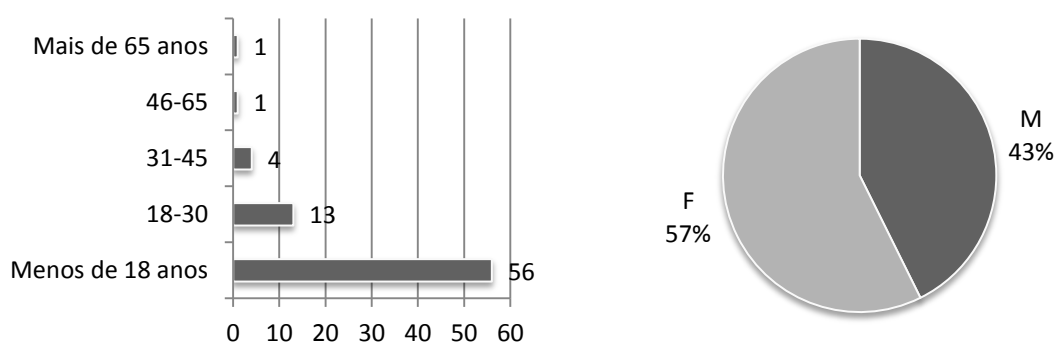
No total foram obtidas 76 respostas aos inquéritos, tendo sido consideradas válidas 75 destas: 16 referentes às grutas de Santo António e Alvados e 59 referentes às grutas da Moeda (quadro 7.1). A junção das respostas às grutas de Santo António e Alvados ocorreu porque à partida os visitantes das grutas de Alvados passariam também pelas grutas de Santo António, e poderia ser um fator dissuasor à participação se se realizassem dois inquéritos separados. Deste modo, obteve-se uma impressão geral dos dois espaços em conjunto.

Quadro 7.1 – Distribuição dos inquéritos recolhidos por gruta em estudo.

	Gruta		Total
	Sto. António e Alvados	Moeda	
Inquéritos Recolhidos	16	60	76
Inquéritos Válidos	16	59	75

As respostas recolhidas junto dos visitantes das grutas de Santo António e Alvados contaram com a participação de visitantes de todas as faixas etárias definidas. Já nas grutas da Moeda os inquéritos foram respondidos por alunos em visita de estudo, maioritariamente alunos do ensino secundário.

A análise dos resultados dos inquéritos será feita aglomerando todas as respostas por pergunta, já que os conhecimentos acústicos da generalidade da amostra são reduzidos e as perguntas colocadas eram de caráter bastante geral e pouco detalhadas para facilitar a sua interpretação.



Figuras 7.1 e 7.2 – À esquerda: caracterização etária da amostra (Menos de 18 anos: 75%; 18-30: 17%; 31-45: 5%; 46-65: 2%; Mais de 65 anos: 1%); À direita: Caracterização da amostra por género (Masculino: 43%; Feminino: 57%).

Os inquiridos têm a distribuição de idades e género apresentada nas figuras 7.1 e 7.2, respetivamente. É portanto uma amostra jovem e com maior participação do sexo feminino. Tendo em conta a caracterização etária da amostra e o fraco conhecimento acerca dos conceitos de acústica, e também

considerando como uma condicionante o facto de as visitas de estudo serem por norma realizadas em grandes grupos, o que dificulta a perceção acústica dos espaços, importa reforçar que os resultados obtidos neste estudo são indicativos e não possuem validade estatística.

7.4.2. RESPOSTAS

Nem todos os inquiridos responderam à totalidade das perguntas, pelo que importa definir qual o total de respostas obtidas no conjunto dos 75 inquéritos válidos (quadro 7.2).

Quadro 7.2 – Totalidade de respostas válidas a cada uma das perguntas descritas no ponto 7.3.

Nº da pergunta	1	2	3	3a	4	4a	5	6	7	8
Respostas válidas	74	75	75	46	75	8	73	74	72	75

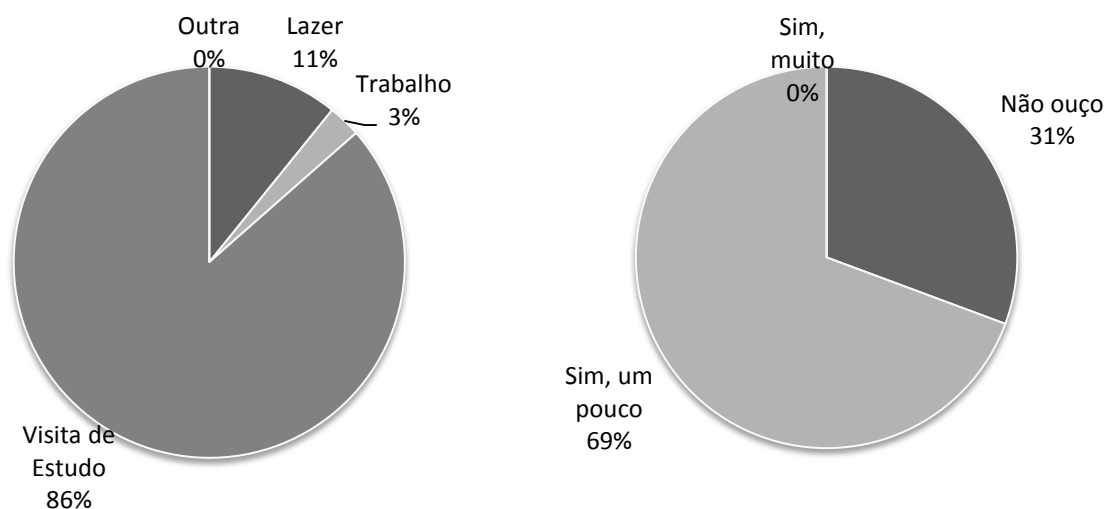
Na questão 1 “Qual o motivo que o/a levou a visitar as grutas da Moeda/de Santo António/de Alvados?” (Lazer/ Trabalho/ Visita de Estudo/ Outra) verifica-se que a grande maioria dos 74 inquiridos que responderam se encontrava em visita de estudo, o que vai de encontro ao exposto na caracterização da amostra (quadro 7.3 e figura 7.3). Importa no entanto referir que a maior afluência de respostas *online* ocorreu durante o mês de abril de 2014, que corresponde a um período de menor afluência de visitantes de público geral a estes espaços, e todas as respostas recolhidas presencialmente após esse período corresponderam à participação de grupos em visita de estudo, pelo que se pode considerar que estes resultados são afetados pela fraca adesão do público geral à resposta *online* e pela maior facilidade em cativar os grupos de jovens em visita de estudo para participar.

Este resultado permite afirmar que os conhecimentos expectáveis acerca de conceitos acústicos da amostra em estudo são reduzidos, pelo que se reforça o carácter indicativo deste estudo estatístico.

Quadro 7.3 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 1, “Qual o motivo que o/a levou a visitar as grutas da Moeda/de Santo António/de Alvados?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Lazer	8	0	8
Trabalho	2	0	2
Visita de estudo	6	58	64
Outra	0	0	0

Na questão 2 procurou-se avaliar a sensibilidade dos visitantes ao ruído no interior das grutas e à sua origem. Exceto em casos de ruídos excepcionais, as condições acústicas e morfológicas dos espaços não permitem que se ouça ruído exterior. À questão “Ouve ruído vindo do exterior?” (Não ouço/ Sim, um pouco/ Sim, muito) obtiveram-se as respostas apresentadas no quadro 7.4 e na figura 7.4.



Figuras 7.3 e 7.4 – À esquerda: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 1, “Qual o motivo que o/a levou a visitar as grutas da Moeda/de Santo António/de Alvados?”; à direita: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 2, “Ouve ruído vindo do exterior?”.

Quadro 7.4 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 2, “Ouve ruído vindo do exterior?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

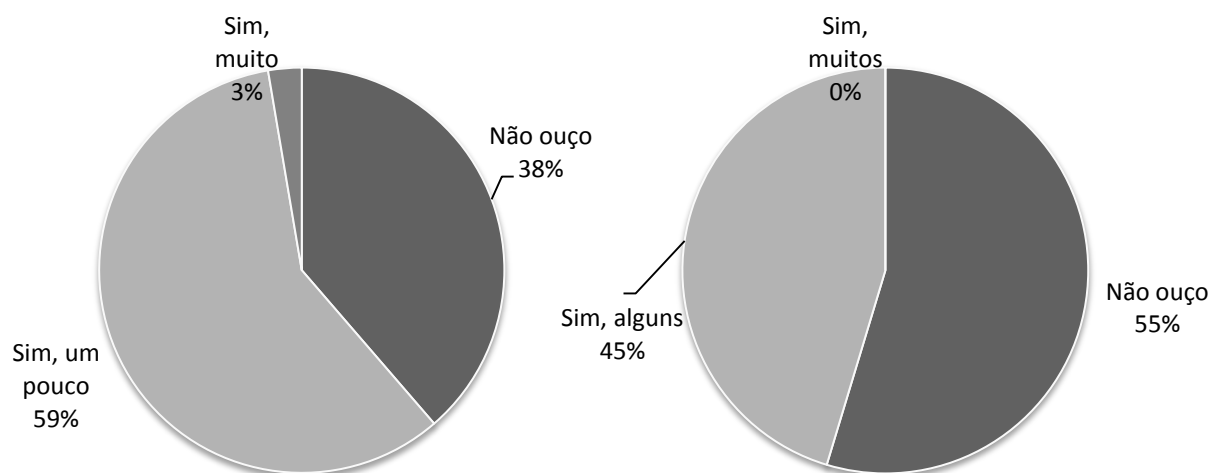
Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Não ouço	15	8	23
Sim, um pouco	1	51	52
Sim, muito	0	0	0

Os resultados obtidos indicam que os visitantes conseguiram ouvir ruído do exterior, principalmente nas grutas da Moeda. De facto, nas salas mais próximas à entrada e no corredor de saída é possível ouvir ruído vindo do exterior devido ao movimento dos visitantes. Na zona interior da gruta o ruído exterior não é habitualmente audível. Por outro lado, as visitas de estudo são por norma mais ruidosas, e tendo em conta que os inquéritos foram preenchidos apenas no final das visitas, é possível que a percepção sonora da origem do ruído tenha sido afetada tanto pelo ruído do grupo como pelo facto de o inquérito ter sido preenchido apenas após a visita.

Em relação à terceira questão, “Ouve ruído de lâmpadas, repuxos de água ou outros aparelhos?” (Não ouço/ Sim, um pouco/ Sim, muito), os resultados obtidos estão representados no quadro 7.5 e na figura 7.5.

Quadro 7.5 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 3, “Ouve ruído de lâmpadas, repuxos de água ou outros aparelhos?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Não ouço	16	13	29
Sim, um pouco	0	44	44
Sim, muito	0	2	2



Figuras 7.5 e 7.6 – À esquerda: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 3, "Ouve ruído de lâmpadas, repuxos de água ou outros aparelhos?"; à direita: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 4, "Ouve "Ecos" em alguma parte da gruta?".

É notório que a maioria dos inquiridos afirmou ouvir ruídos e que todos estes casos se deram nas grutas da Moeda, já que esta é a única que dispõe de um sistema de circulação de água no interior. Foi até assinalado por alguns dos visitantes que preencheram os inquéritos que o ruído que escutavam seria exclusivamente de repuxos de água. Já nas restantes grutas todos os inquiridos afirmaram não ouvir qualquer ruído deste tipo. Inquiriu-se ainda acerca do incómodo causado por esse ruído aos visitantes que afirmaram escutá-lo, obtendo-se assim as respostas indicadas no quadro 7.6 para a pergunta "Se respondeu SIM à questão 3, esse ruído incomoda-o/a?" (Não incomoda/ Incomoda um pouco/ Incomoda muito), que demonstram no geral não estar incomodados.

Quadro 7.6 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 3a, "Se respondeu SIM à questão 3, esse ruído incomoda-o/a", referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Não incomoda	0	43	43
Incomoda um pouco	0	3	3
Incomoda muito	0	0	0

Quadro 7.7 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 4, "Ouve "Ecos" em alguma parte da gruta?", referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Não ouço	14	27	41
Sim, alguns	2	32	34
Sim, muitos	0	0	0

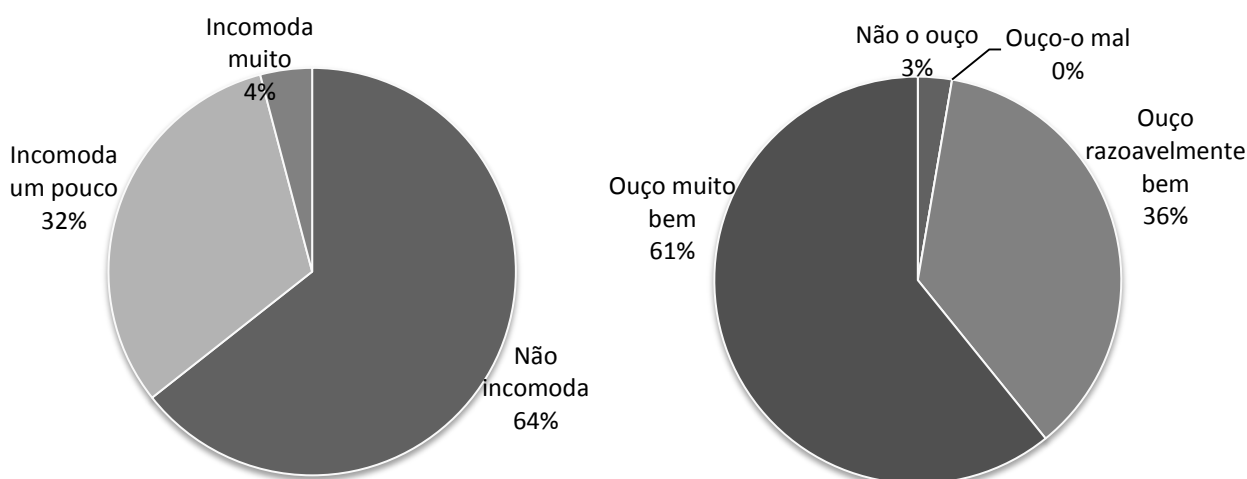
Relativamente à questão 4, onde era perguntado "Ouve "Ecos" em alguma parte da gruta?" (Não ouço/ Sim, alguns/ Sim, muitos), os resultados obtidos revelam que a maioria dos inquiridos não ouviu quaisquer fenómenos que considerasse um eco (figura 7.6), sendo a diferença mais notória nas grutas de Santo António e de Alvados, onde, apesar de os espaços serem mais abertos, os visitantes não

detetaram ecos, confirmando os dados recolhidos neste trabalho (quadro 7.7). Nas grutas da Moeda a distribuição de respostas foi mais uniforme entre as duas primeiras opções, sendo que das 8 respostas à questão “Se respondeu SIM à questão 4, se possível indique o(s) nome(s) da(s) sala(s) onde ouviu “Ecos”” quase todas indicaram um “corredor comprido” no final, correspondente à zona da *Cúpula Vermelha*, onde os guias das grutas da Moeda chamam a atenção para esse eco. Importa ainda referir que o conceito de eco pode ser interpretado pelo público geral de forma errada. Um local com um tempo de reverberação que permita escutar o decaimento do som pode conduzir a uma perceção errada desse efeito reverberante como sendo ecos.

As respostas à questão 5 “O ruído de conversações de outros visitantes incomoda-o/a?” (Não incomoda/ Incomoda um pouco/ Incomoda muito) são apresentadas no quadro 7.8 e na figura 7.7.

Quadro 7.8 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 5, “O ruído de conversações de outros visitantes incomoda-o/a?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Não incomoda	9	38	47
Incomoda um pouco	7	16	23
Incomoda muito	0	3	3



Figuras 7.7 e 7.8 – À esquerda: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 5, “O ruído de conversações de outros visitantes incomoda-o/a?”; à direita: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 6, “Caso tenha um guia, consegue ouvi-lo bem?”.

De um modo geral verifica-se que os inquiridos não se sentem incomodados pelo ruído provocado pelos restantes visitantes, embora uma percentagem significativa afirme que este os incomoda um pouco, o que pode ser um dado importante na gestão das visitas e dimensão dos grupos e ainda de outras atividades a desenvolver nestes espaços.

Relativamente à questão 6, “Caso tenha um guia, consegue ouvi-lo bem?” (Não o ouço/ Ouço-o mal/ Ouço razoavelmente bem/ Ouço muito bem), os resultados são apresentados no quadro 7.9 e na figura 7.8.

Quadro 7.9 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 6, “Caso tenha um guia, consegue ouvi-lo bem?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Não o ouço	0	2	2
Ouç-o mal	0	0	0
Ouç razoavelmente bem	8	19	27
Ouç muito bem	8	37	45

Verifica-se que a grande maioria dos inquiridos afirmou ouvir razoavelmente ou muito bem o seu guia, apenas com duas exceções que podem ter-se devido ao facto de se tratar de visitas de estudo, onde tendencialmente há mais ruído por parte dos visitantes. Este resultado confirma que a perceção e inteligibilidade da palavra nestes espaços são boas, já que os resultados subjetivos coincidem com os resultados objetivos relativos ao RASTI.

Seguem-se as questões relativas às preferências dos visitantes e ao interesse nas atividades futuras a desenvolver. A questão 7, “Durante a sua visita preferia ter:” (Música de fundo/ Silêncio/ Ruído de água a correr/ É-me indiferente), verifica-se uma considerável dispersão dos resultados, com uma maioria clara na opinião de ter apenas o ruído de água a correr (quadro 7.10 e figura 7.9), equivalente à situação de medição sem equipamentos ligados estabelecida no capítulo 5. Verifica-se ainda que para muitos dos inquiridos esta era uma questão que lhes era indiferente. Importa referir que todos os inquiridos que selecionaram a opção “Silêncio” foram visitantes das grutas de Santo António e de Alvados, possivelmente porque apenas nesses espaços era possível ter contacto com um ambiente próximo do silêncio. Estes resultados poderão ser tidos em conta na gestão das escolhas a tomar no que toca ao melhoramento das visitas e da experiência dos visitantes.

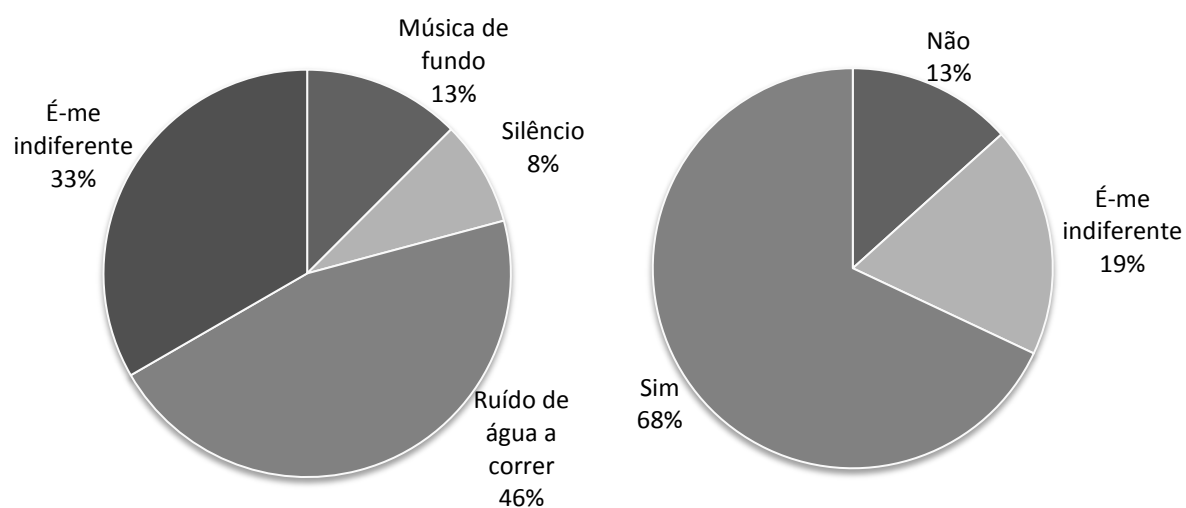
Quadro 7.10 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 7, “Durante a sua visita preferia ter:”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Música de fundo	3	6	9
Silêncio	6	0	6
Ruído de água a correr	5	28	33
É-me indiferente	2	22	24

Relativamente à questão 8, “Gostaria de assistir a um evento neste espaço (eventos musicais, teatro, palestras, etc.)?” (Não/ É-me indiferente/ Sim), os resultados são apresentados no quadro 7.11 e na figura 7.10. Verifica-se que a maioria dos inquiridos teria interesse em assistir a eventos nas grutas em estudo, o que demonstra o interesse na dinamização deste tipo de espaços.

Quadro 7.11 – Resumo das respostas dos inquiridos à questão 8, “Gostaria de assistir a um evento neste espaço (eventos musicais, teatro, palestras, etc.)?”, referentes a cada uma das grutas e respetivos totais.

Resposta	Sto. António e Alvados	Moeda	Total
Não	1	9	10
É-me indiferente	3	11	14
Sim	12	39	51



Figuras 7.9 e 7.10 – À esquerda: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 7, "Durante a sua visita preferia ter."; à direita: Distribuição das respostas dos inquiridos à questão 8, "Gostaria de assistir a um evento neste espaço (eventos musicais, teatro, palestras, etc.)?".

8

CONCLUSÕES E
DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

8.1. CONCLUSÕES

As grutas turísticas têm vindo a ser cada vez mais espaços dinâmicos e onde se procura trazer os visitantes não só para contemplar a sua riqueza e interesse geológico mas também para fruir de outras experiências de carácter não científico, como é o caso dos concertos do *Stalacpipe Organ*, em Luray, dos espetáculos realizados no auditório das grutas de St. Michael ou das celebrações religiosas realizadas nas grutas de Batu. A caracterização acústica deste tipo de espaços é importante, já que a sua adequabilidade aos usos que para eles são definidos depende fortemente da sua performance acústica. A comparação dos resultados obtidos nas três grutas estudadas neste trabalho permite evidenciar quais as diferenças entre os três espaços e quais os fatores que poderão contribuir mais para as mesmas, e poderá também ajudar a definir quais os usos que cada um dos espaços tem potencial para propiciar e quais as potencialidades de melhoria.

Os casos estudados neste trabalho são exemplos de três espaços de características distintas, formados a partir de um mesmo processo: os fenómenos cársticos. As grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados são então representativas de muitas outras a nível mundial, de formação cársica, pelo que os resultados aqui obtidos podem ser tidos como referência para espaços de características semelhantes.

A comparação dos valores obtidos em cada uma das grutas para o tempo de reverberação, L_{Aeq} , RASTI e F_f permite comparar os diferentes espaços em termos de volume, morfologia, capacidade de absorção da energia sonora e de adequabilidade a determinados usos. O quadro 8.1 apresenta os valores médios obtidos para cada um dos parâmetros em cada uma das grutas.

Quadro 8.1 – Valores de $T_{médio}[500,1k]$, L_{Aeq} , RASTI e F_f obtidos para cada uma das grutas em estudo.

Gruta	$T_{médio}[500,1k]$ (s)	L_{Aeq} (dB)			RASTI	F_f
		Período chuvoso, só com ruído de água	Período chuvoso, com equip. e/ou visitas	Período seco, só com ruído de água residual		
Moeda	1,3	40	63	23	0,55	2,8
Sto. António	1,7	32	54	22	0,50	2,8
Alvados	1,5	33	-	-	0,57	2,2

Os resultados obtidos nas medições *in situ*, com valores médios de 1,3 a 1,7 s para o tempo de reverberação (500/1k) e 0,50 a 0,57 para o RASTI, indicam características acústicas surpreendentemente pouco reverberantes tendo em conta a dimensão e o material que constitui a envolvente destes espaços. Com elevados volumes e uma envolvente constituída por um material refletor, seria de esperar que estes se tratassem de espaços muito reverberantes, à semelhança das grutas onde se encontra a arte rupestre referida neste trabalho. No entanto, acontece o oposto: estas grutas são espaços com baixo tempo de reverberação e uma boa inteligibilidade da palavra devido à complexa estrutura e morfologia das suas superfícies. Essa complexidade, para além de provocar a difusão e rápida dissipação da energia sonora, representa uma grande área de absorção sonora que, por ser tão extensa, torna o espaço pouco reverberante mesmo sendo o material que constitui a envolvente pouco absorvente. O método utilizado neste trabalho para determinar a área superficial da envolvente nestas grutas, isto é, a determinação do fator de forma F_p , poderá ser útil na determinação analítica dos tempos de reverberação em espaços semelhantes, já que fornece uma estimativa do aumento da área de absorção em relação à área superficial medida de modo simplificado.

Este mesmo efeito verifica-se nas grutas de Parpalló e nas grutas de Castelcivita, onde se verifica também um tempo de reverberação muito baixo tendo em conta a volumetria e onde o RASTI é também elevado. Já nas grutas de Pertosa e de Castellana verifica-se uma maior variação do tempo de reverberação de acordo com o volume. No entanto, de um modo geral obtém-se também valores do tempo de reverberação relativamente baixos em relação ao expectável e um RASTI razoável, confirmando assim a conclusão de para grutas com a mesma génese, de origem cársica, pode-se assumir que têm à partida uma boa probabilidade de possuir características acústicas semelhantes às aqui determinadas.

A comparação dos valores do quadro 8.1 permite afirmar que, entre as três grutas, as que têm o tempo de reverberação um pouco maior são as grutas de Santo António, o que condiciona o menor valor de RASTI obtido. No entanto, a relação entre o tempo de reverberação e o RASTI não é direta, já que a morfologia do espaço tem grande influência nas perdas de energia sonora e consequentemente, na variação do RASTI. Este é o motivo pelo qual, apesar de o tempo de reverberação ser mais baixo nas grutas da Moeda do que nas de Alvados, o seu RASTI é menor, já que têm uma morfologia muito complexa que leva à dissipação mais rápida da energia sonora à medida que o recetor se afasta da fonte sonora.

Os valores do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo obtidos para o período chuvoso, de 32 a 40 dB(A), indicam um ruído de fundo em época de chuva pouco incomodativo mas audível. Este facto pode tornar-se um problema particularmente nas grutas da Moeda, onde a existência de cursos de água, ainda que alimentados artificialmente e, por isso, controláveis, pode ser um fator de perturbação para possíveis atuações ou eventos no seu interior. Como indicado no ponto 3.6 do presente trabalho, considera-se que o valor ideal para concertos será inferior a 30 dB(A) e para a palavra deverá ser inferior a 40 dB(A), logo as grutas da Moeda apresentam um valor demasiado elevado para o primeiro caso. Ainda assim, e tendo em conta que estes valores foram obtidos na situação mais crítica (após um período de chuva intensa), pode-se considerar que estes são espaços quase silenciosos onde o ruído natural não interfere de forma significativa no uso a atribuir. Os resultados obtidos para o período seco, de 22 a 23 dB(A), atingindo-se mesmo valores de L_{90} menores a 20 dB(A), confirmam a hipótese de estes se tratarem de espaços silenciosos, já que correspondem a valores notavelmente baixos para um espaços naturais, com as interferências que as infiltrações de água e ar acarretam.

Os fatores mais importantes na definição dos usos possíveis para cada espaço são o tempo de reverberação e o RASTI. A comparação dos valores obtidos para o tempo de reverberação com valores

considerados ideais para determinadas utilizações permite estabelecer quais os usos adequados a cada espaço (quadro 8.2).

Comparando os valores do quadro 8.2 com os valores de $T_{\text{médio}}[500,1k]$ indicados no quadro 8.1 pode-se fazer a análise da adequabilidade de cada espaço para cada utilização referida. Foi admitida uma tolerância em relação ao tempo de reverberação considerado ideal, considerando o espaço excelente para o uso quando o T se encontrava dentro dos limites definidos. Também o valor médio do RASTI foi tido em conta para as utilizações como auditório e para teatro. Qualquer um dos espaços estaria apto, em menor ou maior grau e admitindo alguma tolerância tendo em conta a subjetividade da perceção auditiva dos ouvintes, a receber qualquer uma das utilizações, excluindo o canto gregoriano, coros ou órgãos. No entanto, e porque estes valores considerados ideais são apenas indicativos, importa referir que mesmo este tipo de utilização poderá ser válido. A título de exemplo, segundo as informações obtidas junto das administrações, já foram realizadas atuações de grupos corais em todas as grutas, e todos eles se mostraram satisfeitos com as condições acústicas dos espaços.

Quadro 8.2 – Valores ideais para os tempos de reverberação (500/1k Hz) dos espaços de acordo com a sua utilização, e indicação da adequabilidade dos espaços ao uso referido.

Tipo de utilização	$T_{\text{ideal}}[500/1k]$ (s)	RASTI	Grutas		
			Moeda	Sto. António	Alvados
Auditório (palavra)	0,7 – 1,0	$\geq 0,50$	Adequado	Não Recomendado	Adequado
Teatro	0,7 – 1,1	$\geq 0,50$	Adequado	Não Recomendado	Adequado
Música de câmara	1,4 – 1,7	-	Adequado	Excelente	Excelente
Ópera	1,3 – 1,9	-	Adequado	Excelente	Excelente
Canto gregoriano	3,0 – 4,0	-	Não Recomendado	Não Recomendado	Não Recomendado
Música sinfónica	Barroca	1,4 – 1,6	-	Adequado	Excelente
	Clássica	1,6 – 1,8	-	Adequado	Adequado
	Romântica	1,8 – 2,2	-	Não Recomendado	Adequado
Coro ou órgão	2,5 – 3,5	-	Não Recomendado	Não Recomendado	Não Recomendado

Também os visitantes inquiridos demonstraram estar, de um modo geral, satisfeitos com as condições acústicas dos espaços em estudo. Embora o estudo subjetivo realizado neste trabalho seja indicativo, permite assumir que há interesse por parte dos visitantes em fruir destes espaços noutras ocasiões que não apenas as visitas guiadas.

Tendo isto em conta, estes são espaços que podem facilmente ser adaptados e utilizados para outros fins para além das já realizadas visitas guiadas. Ocasionalmente são já realizados alguns concertos nestas grutas, logo este estudo vem confirmar o que a experiência já havia ditado: as grutas da Moeda, de Santo António e de Alvados dispõem de boas condições para a realização de visitas guiadas, de

teatro ou outras atividades relacionadas com a palavra, já que a sua inteligibilidade é muito boa, e possuem excelentes condições para a realização de concertos de certos tipos de música que, para uma boa fruição, exigem tempos de reverberação baixos, como a música de câmara ou alguns tipos de música sinfónica.

8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No futuro, será relevante aprofundar estes estudos de diversas formas para obter um melhor conhecimento dos fenómenos acústicos que ocorrem em grutas turísticas.

Um estudo com um nível de detalhe semelhante ao realizado neste trabalho mas agora em período “seco” poderá revelar-se proveitoso na determinação precisa do impacto da presença da água de infiltração nas superfícies no comportamento acústico dos espaços e na sua interferência no ruído de fundo.

Um estudo de outros espaços dentro das mesmas grutas poderá fornecer dados importantes acerca do impacto da morfologia das salas em estudo nos resultados obtidos.

Também uma análise das características acústicas de outras grutas formadas a partir de outros processos e com a envolvente constituída por outros materiais e com outra morfologia poderá ser útil para diferenciar estas grutas de formação cársica e morfologia muito complexa, com baixos tempos de reverberação, de espaços com superfícies mais regulares e onde os tempos de reverberação são muito elevados e onde existem ecos. A mesma análise poderá ser feita para outras grutas com vários processos de formação a nível internacional.

Existe ainda a possibilidade de estudar a morfologia destes espaços para tirar conclusões que permitam criar novas aplicações para a acústica arquitetónica utilizando materiais como o calcário ou outras rochas. Será então também interessante fazer a medição do coeficiente de absorção sonora destes calcários com amostras de maior dimensão em câmara reverberante.

Também será relevante realizar estudos acústicos subjetivos mais aprofundados para avaliar as potencialidades destes locais, por exemplo após concertos ou outras atuações semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Reznikoff, I., *Prehistoric paintings, sounds and rocks*, in *Studien zur Musikarchäologie III: 2nd Symposium of the International Study Group on Music Archaeology*, Monastery Michaelstein (Germany), 2000.
2. Carvalho, A.P.O., *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Ed. 8.5, FEUP, Porto, 2013.
3. Everest, F.A., *The master handbook of acoustics*, 4ª ed., Nova Iorque, 2001, New York: McGraw Hill.
4. Rafavich, F., et al., *The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks*, 1984.
5. Norma EN ISO 11654: 1997, *Acoustics - Sound Absorbers for Use in Buildings, Rating of Sound Absorption*, 1997.
6. Recuero Lopez, M., C. Gil Gonzalez, *Acustica arquitectonica*. 2ª ed., Benzal, Madrid, 1993.
7. Carvalho, A.P.O., *Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches*, *Applied Acoustics* 58, 1999.
8. Llopis Lladó, N., *Fundamentos de hidrogeologia carstica introducción a la geoespeleología*, Blume, Madrid, 1970.
9. Carvalho, A.P.O., *Effect of architectural styles on objective acoustical measures in Portuguese Catholic churches*, WESTPRAC 1994 - 5th Western Pacific Regional Acoustics Conference, 1994.
10. Carvalho, A.P.O., *Subjective acoustic measures and speech intelligibility in churches*, NOISE-CON 96, 1996.
11. Sítio das Grutas da Moeda e Fátima, <http://www.grutasmoeda.com/portal/>. Acedido em fevereiro de 2014.
12. Sítio das Grutas de Santo António, <http://grutassantoantonio.com/>. Acedido em fevereiro de 2014.
13. Sítio das Grutas de Alvados, <http://www.grutasalvados.com/pt/>. Acedido em fevereiro de 2014.
14. Díaz-Andreu, M., C. García Benito, *Acoustics and Levantine rock art: auditory perceptions in La Valltorta Gorge (Spain)*, *Journal of Archaeological Science*, 39(12): p. 3591-3599, 2012.
15. Scarre, C., Lawson, G., *Archaeoacoustics*, Universidade de Cambridge, 2006.
16. Reznikoff, I., *Sound resonance in prehistoric times: A study of Paleolithic painted caves and rocks*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5): p. 3603, 2008.
17. Waller, S.J., *Psychoacoustic Influences of the Echoing Environments of Prehistoric Art*. First Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics, Cancun, 2002.
18. Sítio das Luray Caverns, <http://luraycaverns.com/>. Acedido em fevereiro de 2014.

19. *This Organ Rocks!* Current Science, December 2, 91(7): p. 13, 2005.
20. Sítio da St. Michael's Cave - Gibraltar Travel and Holiday Information Guide, <http://www.gibraltar.com/sightseeing/st-michaels-cave-gibraltar.html>. Acedido em fevereiro de 2014.
21. Sítio de Visit Gibraltar - Upper Rock - St. Michaels Cave, <http://www.visitgibraltar.gi/upper-rock-st-michaels-cave>. Acedido em fevereiro de 2014.
22. Sítio das Cuevas del Drach, <http://www.cuevasdeldrach.com/la-cueva/?lang=pt#visita>. Acedido em março de 2014.
23. Kasim, A., *Balancing tourism and religious experience: Understanding devotees' perspectives on Thaipusam in Batu Caves, Selangor, Malaysia*, Journal of Hospitality Marketing and Management, 2011. 20(3-4): p. 441-456.
24. Aminuddin, N.J. and N.I.M. Pauzi, *Scatter-plot analysis of microcracks pattern behaviour of weathered limestone at Batu Caves, Malaysia*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 16 N: p. 1639-1650, 2011.
25. McClure, H.E., et al., *Fauna of the Dark cave, Batu caves, Kuala Lumpur, Malaysia*, Organ, 1967.
26. Belle, C.V., *Thaipusam in Malaysia: a Hindu festival misunderstood?*, Deakin University, 2004.
27. Carvalho, A.P.O., correspondência privada com o autor, 2014.
28. Sítio da Fundação Côa Parque, <http://www.arte-coa.pt/>. Acedido em abril de 2014.
29. González, N.J., et al., *The Parpalló Cave: A singular archaeological acoustic site*. The Journal of the Acoustical Society of America, 123(5): p. 3608-3613, 2008.
30. González, N.J., et al., *Estudio de las Características Acústicas de la Cueva del Parpalló*, Escuela Politécnica Superior de Gandía, 2007.
31. Sítio da Grotte Di Pertosa, <http://grottedipertosa-auletta.it/>. Acedido em junho de 2014.
32. Sítio da Grotte Di Castelvita, <http://www.grottedicastelvita.com/>. Acedido em junho de 2014.
33. Sítio da Grotte Di Castellana, <http://www.grottedicastellana.it/>. Acedido em junho de 2014.
34. Iannace, G. and A. Trematerra, *The acoustics of the caves*. Applied Acoustics, 86(0): p. 42-46, 2014.
35. Iannace, G., C. Ianniello, and E. Ianniello. *Acoustic measurements in underground rooms of Castelvita Caves (Italy)*. in *Proc Euronoise*, 2012.
36. Egan, M.D., *Architectural Acoustics*, 1988.
37. Martins, A.F., *Maciço calcário estremenho contribuição para um estudo de geografia física*, Tese de Doutoramento da Universidade de Coimbra, 1949.
38. Carvalho, J.M.F., *Maciço Calcário Estremenho - Caracterização da Situação de Referência*, 2011.
39. Ferreira, A.d.B., *Problemas na Evolução Geomorfológica do Maciço Calcário Estremenho*. Finisterra, p. 5-28, 1988.
40. Moura, A. and J.L. Velho, *Recursos Geológicos de Portugal*, Palimage, Coimbra, 2012.
41. Cunha, L., *Estudos de Geomorfologia Cársica em Portugal - Um ponto de situação relativo aos maciços do sector setentrional da orla mesoceno-zóica ocidental portuguesa (Outil, Boa Viagem e Sicó)*, 2003.
42. Instituto Português da Qualidade, *Acústica medição de parâmetros de acústica de salas Parte 2 tempo de reverberação em salas correntes (ISO 3382-2:2008) NP EN ISO 3382-2*, Caparica, 2011.

43. International Organization for, S., *Acoustics - determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes Part 1 method using standing wave ratio ISO 10534-1*, 1996.
44. Instituto Português da Qualidade, *Acústica avaliação da incomodidade devida ao ruído por meio de inquéritos sociais e sócio-acústicos NP 4476*, 2008.

ANEXOS

ANEXO I

PANFLETO DE RESUMO DO INQUÉRITO REFERENTE ÀS GRUTAS DA MOEDA

INQUÉRITO: AVALIAÇÃO ACÚSTICA DAS GRUTAS DA MOEDA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO <i>Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil: Caracterização Acústica de Grutas Turísticas – Estudo de Casos (As grutas das serras de Aire e Candeeiros)</i> POR FAVOR RESPONDA EM: http://goo.gl/ThPxZR	 LABORATÓRIO DE ACÚSTICA Com o apoio de: Grutas da Moeda
---	--

1. QUAL O MOTIVO QUE O/A LEVOU A VISITAR AS GRUTAS DA MOEDA?
2. OUVES RUÍDO VINDO DO EXTERIOR?
3. OUVES RUÍDO DE LÂMPADAS, REPUXOS DE ÁGUA OU OUTROS APARELHOS?
4. OUVES “ECOS” EM ALGUMA PARTE DA GRUTA?
5. O RUÍDO DE CONVERSÇÕES DE OUTROS VISITANTES INCOMODA-O/A?
6. CASO TENHA UM GUIA, CONSEGUE OUVI-LO BEM?
7. DURANTE A SUA VISITA GOSTARIA DE TER MÚSICA OU ALGUM RUÍDO DE FUNDO?
8. GOSTARIA DE ASSISTIR A UM EVENTO NESTE ESPAÇO (EVENTOS MUSICAIS, TEATRO, PALESTRAS, ETC.)?

Caso tenha alguma questão ou deseje ter acesso ao documento final por favor envie um e-mail para ec09151@fe.up.pt. Por favor responda em: **<http://goo.gl/ThPxZR>**

Obrigado pela sua colaboração!

ANEXO II

PANFLETO DE RESUMO DO INQUÉRITO REFERENTE ÀS GRUTAS DE SANTO ANTÓNIO

INQUÉRITO: AVALIAÇÃO ACÚSTICA DAS GRUTAS DE SANTO ANTÓNIO
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil: Caracterização Acústica de Grutas Turísticas – Estudo de Casos (As grutas das serras de Aire e Candeeiros)

POR FAVOR RESPONDA EM: <http://goo.gl/4nt6f4>



1. **QUAL O MOTIVO QUE O/A LEVOU A VISITAR AS GRUTAS DE SANTO ANTÓNIO?**
2. **OUVE RUÍDO VINDO DO EXTERIOR?**
3. **OUVE RUÍDO DE LÂMPADAS, REPUXOS DE ÁGUA OU OUTROS APARELHOS?**
4. **OUVE “ECOS” EM ALGUMA PARTE DA GRUTA?**
5. **O RUÍDO DE CONVERSÇÕES DE OUTROS VISITANTES INCOMODA-O/A?**
6. **CASO TENHA UM GUIA, CONSEGUE OUVI-LO BEM?**
7. **DURANTE A SUA VISITA GOSTARIA DE TER MÚSICA OU ALGUM RUÍDO DE FUNDO?**
8. **GOSTARIA DE ASSISTIR A UM EVENTO NESTE ESPAÇO (EVENTOS MUSICAIS, TEATRO, PALESTRAS, ETC.)?**

Caso tenha alguma questão ou deseje ter acesso ao documento final por favor envie um e-mail para ec09151@fe.up.pt. Por favor responda em: **<http://goo.gl/4nt6f4>**

Obrigado pela sua colaboração!

ANEXO III

PANFLETO DE RESUMO DO INQUÉRITO REFERENTE ÀS GRUTAS DE ALVADOS

INQUÉRITO: AVALIAÇÃO ACÚSTICA DAS GRUTAS DE ALVADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil: Caracterização Acústica de Grutas Turísticas – Estudo de Casos (As grutas das serras de Aire e Candeeiros)

POR FAVOR RESPONDA EM: <http://goo.gl/4nt6f4>



1. **QUAL O MOTIVO QUE O/A LEVOU A VISITAR AS GRUTAS DE ALVADOS?**
2. **OUVE RUÍDO VINDO DO EXTERIOR?**
3. **OUVE RUÍDO DE LÂMPADAS, REPUXOS DE ÁGUA OU OUTROS APARELHOS?**
4. **OUVE “ECOS” EM ALGUMA PARTE DA GRUTA?**
5. **O RUÍDO DE CONVERSÇÕES DE OUTROS VISITANTES INCOMODA-O/A?**
6. **CASO TENHA UM GUIA, CONSEGUE OUVI-LO BEM?**
7. **DURANTE A SUA VISITA GOSTARIA DE TER MÚSICA OU ALGUM RUÍDO DE FUNDO?**
8. **GOSTARIA DE ASSISTIR A UM EVENTO NESTE ESPAÇO (EVENTOS MUSICAIS, TEATRO, PALESTRAS, ETC.)?**

Caso tenha alguma questão ou deseje ter acesso ao documento final por favor envie um e-mail para ec09151@fe.up.pt. Por favor responda em: **<http://goo.gl/4nt6f4>**

Obrigado pela sua colaboração!

ANEXO IV

INQUÉRITO PRESENCIAL REFERENTE ÀS GRUTAS DA MOEDA

INQUÉRITO: AVALIAÇÃO ACÚSTICA DAS GRUTAS DA MOEDA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO <i>Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil: Caracterização Acústica de Grutas Turísticas – Estudo de Casos (As grutas das serras de Aire e Candeeiros)</i> PODE RESPONDER ONLINE EM: http://goo.gl/ThPxZR	 Com o apoio de: 
---	--

IDADE: (ASSINALE COM UM X)

☐ Menos de 18 anos ☐ 18 – 30 ☐ 31 – 45 ☐ 46 – 65 ☐ Mais de 65 anos

GÉNERO: (ASSINALE COM UM X)

☐ Masculino ☐ Feminino

1. QUAL O MOTIVO QUE O/A LEVOU A VISITAR AS GRUTAS DA MOEDA? (ASSINALE COM UM X)

☐ Lazer

☐ Trabalho

☐ Visita de Estudo

☐ Outra: _____

2. OUVES RUÍDO VINDO DO EXTERIOR? (ASSINALE COM UM X)

☐ Não ouço ☐ Sim, um pouco ☐ Sim, muito

3. OUVES RUÍDO DE LÂMPADAS, REPUXOS DE ÁGUA OU OUTROS APARELHOS? (ASSINALE COM UM X)

☐ Não ouço ☐ Sim, um pouco ☐ Sim, muito

Se respondeu SIM à questão 3, esse ruído incomoda-o/a? (ASSINALE COM UM X)

☐

Não incomoda

☐

Incomoda um pouco

☐

Incomoda muito

4. OUVI “ECOS” EM ALGUMA PARTE DA GRUTA? (ASSINALE COM UM X)

☐

Não ouvi

☐

Sim, alguns

☐

Sim, muitos

Se respondeu SIM à questão 4, se possível indique o(s) nome(s) da(s) sala(s) onde ouviu “Ecos”:

5. O RUÍDO DE CONVERSÇÕES DE OUTROS VISITANTES INCOMODA-O/A? (ASSINALE COM UM X)

☐

Não incomoda

☐

Incomoda um pouco

☐

Incomoda muito

6. CASO TENHA UM GUIA, CONSEGUE OUVI-LO BEM? (ASSINALE COM UM X)

☐

Não o ouvi

☐

Ouço-o mal

☐

Ouço razoavelmente bem

☐

Ouço muito bem

7. DURANTE A SUA VISITA PREFERIA TER: (ASSINALE COM UM X)

☐

Música de fundo

☐

Silêncio

☐

Ruído de água a correr

☐

É-me indiferente

8. GOSTARIA DE ASSISTIR A UM EVENTO NESTE ESPAÇO (EVENTOS MÚSICAIS, TEATRO, PALESTRAS, ETC.)?
(ASSINALE COM UM X)

☐

Não

☐

É-me indiferente

☐

Sim

Caso tenha alguma questão ou deseje ter acesso ao documento final por favor envie um e-mail para ec09151@fe.up.pt.

Obrigado pela sua colaboração!