U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA INTERIOR DAS CAPELAS SUBTERRÂNEAS DA NOVA IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE, FÁTIMA

BRUNO FILIPE OLIVEIRA DO NASCIMENTO

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 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 http://www.fe.up.pt

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

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

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

A meus Pais, Irmãos e Namorada

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar um profundo agradecimento ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela exemplar orientação, pelas sugestões e ensinamentos prestados e pelo apoio, boa disposição e simpatia que fizeram com que este projecto corresse sobre "rodas".

Ao Engenheiro António Eduardo Costa pela contribuição na realização dos ensaios nas capelas da Reconciliação e pelas dicas e apoio prestados durante a realização do trabalho.

Agradeço também à Reitoria do Santuário de Fátima pela disponibilidade demonstrada em facultar o acesso às capelas da Reconciliação para a realização dos trabalhos e apoio prestado pelos funcionários da mesma.

Ao Professor Doutor Diamantino Rui da Silva Freitas o meu reconhecimento pela sua disponibilidade e pela disponibilização de elementos bibliográficos.

Por fim, um agradecimento muito especial aos meus pais, irmãos e namorada, a quem dedico esta tese, por todo o carinho, apoio, dedicação e por me terem possibilitado este percurso académico.

RESUMO

O presente trabalho pretende caracterizar acusticamente o interior das três Capelas da Reconciliação localizadas no edifício da Igreja da Santíssima Trindade em Fátima. Este trabalho insere-se no programa de investigação em acústica de igrejas da FEUP e vem na continuidade da tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil intitulado "Caracterização acústica do interior da nova Igreja da Santíssima Trindade em Fátima" onde se efectuou a caracterização acústica do interior da Igreja principal.

As Igrejas Católicas são locais de culto dedicados tanto à palavra como à música o que, por si só, requer diferentes exigências a nível acústico. Sendo assim, a inteligibilidade da palavra nesse dado espaço fechado deve ser ideal para que a percepção do discurso, por parte do receptor, seja clara e com a noção da localização da origem, sem a necessidade de esforço suplementar por parte do emissor. Já no que diz respeito à música, esta necessita de tempos de reverberação um pouco mais elevados do que a palavra pelo que deve existir um compromisso aceitável entre as duas partes neste ponto.

A caracterização acústica efectuada do interior das Capelas da Reconciliação apoia-se em parâmetros acústicos objectivos (TR, RASTI, níveis de pressão sonora e isolamento sonoro) tendo sido estes obtidos a partir de ensaios *in situ* em condições controladas.

Os parâmetros ensaiados foram o TR (Tempo de Reverberação) obtido por bandas de oitava dos 125 a 4k Hz, o RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) com e sem o funcionamento do sistema de reforço electroacústico, o L (níveis de pressão sonora) do Ruído de Fundo com e sem o funcionamento dos equipamentos de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) e o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de algumas divisórias fixas e amovíveis. Também se calculou os parâmetros NC, NR e SII, para além de se atribuir a cada capela o respectivo grau de inteligibilidade da palavra.

Após a obtenção de todos os parâmetros acústicos objectivos em causa procedeu-se a uma comparação acústica Intra-Capelas e Inter-Capelas de modo a analisar um possível paralelismo entre valores. Comparou-se posteriormente com a igreja da Santíssima Trindade e com as igrejas de volume idêntico para se poder enquadrar o ambiente sonoro das capelas em análise.

Por último, efectuou-se uma comparação entre os parâmetros objectivos medidos e a opinião dos utilizadores habituais para verificar qual das capelas se adapta melhor ao gosto dos utilizadores a nível acústico.

PALAVRAS-CHAVE: Igrejas, Tempo de Reverberação, RASTI, Ruído de Fundo, Fátima.

ABSTRACT

This present work intends to acoustically characterize the interior of the three Reconciliation Chapels located in the Holy Trinity Church building in Fatima. This work is part of the FEUP (Faculty of Engineering of the University of Porto) church acoustics investigation program and follows up the Civil Engineering Masters' thesis on "*Caracterização acústica do interior da nova Igreja da Santíssima Trindade em Fátima*" which characterized the acoustics in the interior of the main church.

Catholic churches are places of worship both dedicated to word and music, which per se imply different acoustic demands. This being so, the intelligibility of the word in that closed space must be ideal, so that the receptor understands the speech clearly and identifies its source, without any supplementary effort on the issuing. As for music, it needs higher reverberation time than word, which demands a compromise between both on this point.

The acoustic characterization made in the interior of the Reconciliation Chapels relies on objective acoustic parameters (RT, RASTI, sound pressure levels and sound insulation) which were obtained through *in situ* tests in controlled environment.

The tested parameters were RT (Reverberation Time) obtained through octave bands from 125 to 4k Hz; RASTI (Rapid Speech Transmission Index) with and without the electro acoustic reinforcement system on; the L (sound pressure levels) of the background noise with and without the heating, ventilation and air condition devices on; and the sound insulation from air traffic on some fixed and removable partitions. It was also calculated the NC, NR, and SII parameters and attributed to each chapel its word intelligibility degree.

After obtaining all the acoustic objective parameters just mentioned, an intra-chapels and inter-chapels acoustic comparison was made in order to analyse a possible similarity between the values obtained. Afterwards these values were compared with the ones of the Holy Trinity church and with the other churches of similar volume so as to frame the soundscape of the analysed chapels.

At last, a comparison was made between the objective measured parameters and the opinion of the regular users to ascertain which chapel is more acoustically suited to the users' taste.

KEYWORDS: Churches, Reverberation Time, RASTI, Background Noise, Fatima

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS xxi

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS 1
1.2. ESTRUTURA DA TESE 2

2. CONCEITOS ACÚSTICOS 3
2.1. INTRODUÇÃO 3
2.2. CELERIDADE 4
2.3. POTÊNCIA SONORA 5
2.4. INTENSIDADE SONORA 5
2.5. RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE SONORA, POTÊNCIA SONORA E PRESSÃO SONORA 5
2.6. NÍVEIS 6
2.7. FREQUÊNCIA 7
2.8. CURVAS DE PONDERAÇÃO 9
2.9. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA CONTÍNUO EQUIVALENTE (LEQ) E NÍVEL SONORO CONTÍNUO EQUIVALENTE (LAEQ) 11
2.10. RUÍDO DE FUNDO 11
2.11. CURVAS DE INCOMODIDADE 12
2.12. ABSORÇÃO SONORA 14
2.13. REVERBERAÇÃO 15
2.14. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA 16
2.15. CORRECÇÃO ACÚSTICA E ISOLAMENTO SONORO 19

3. ACÚSTICA DE IGREJAS 23
3.1. INTRODUÇÃO 23
3.2. A ACÚSTICA DE DIFERENTES TIPOS DE IGREJAS 24
3.2.1. IGREJAS CRISTÃS PRIMITIVAS E MEDIEVAIS 24
3.2.2. IGREJAS RENASCENTISTAS E TRIDENTISNAS 27
3.2.3. IGREJAS BARROCAS E BARROCO TARDIO 29
3.3. O ÓRGÃO E O CORO NA IGREJA 31
3.4. ANTERIORMENTE A 1940 32

3.5. O Início do Reforço Electroacústico nas Igrejas – 1940 32
3.6. Os Anos da Confusão 33

4. CAPELAS DA RECONCILIAÇÃO 35
4.1. Introdução Histórica 35
4.1.1. Culto Mariano 35
4.1.2. Nossa Senhora de Fátima 39
4.1.3. Monumentos e Locais no Santuário de Fátima 44
4.2. Caracterização das Capelas da Reconciliação 48
4.2.1. Introdução 48
4.2.2. Capela do Santíssimo Sacramento 50
4.2.3. Capela da Ressurreição de Jesus 55
4.2.4. Capela da Morte de Jesus 57
4.2.5. Átrio de acesso às capelas da Santíssima Trindade e da Ressurreição de Jesus 63
4.3. Valores Ideais Aconselháveis para os Parâmetros Acústicos 65

5. ENSAIOS E RESULTADOS 67
5.1. Introdução 67
5.2. Tempo de Reverberação 69
5.2.1. Descrição do Ensaio 69
5.2.2. Apresentação e Discussão dos Resultados 71
5.3. RASTI 77
5.3.1. Descrição do Ensaio 77
5.3.2. Apresentação e Discussão dos Resultados 80
5.4. Ruído de fundo 86
5.4.1. Descrição do Ensaio 86
5.4.2. Apresentação e Discussão dos Resultados 87
5.5. Isolamento sonoro 95
5.5.1. Descrição do Ensaio 95
5.5.2. Apresentação e Discussão dos Resultados 97
5.6. Comparação das Capelas da Reconciliação com a igreja da Santíssima Trindade 105
5.7. Comparação das Capelas da Reconciliação com igrejas de volumetria semelhante 107
5.7.1. Comparação dos valores médios de Tempo de Reverberação 107
5.7.1.1. Capela do Santíssimo Sacramento (capela 1) e Capela da Ressurreição de Jesus (capela 2) 107
5.7.1.2. Capela da Morte de Jesus (capela 3+4) 108
5.7.2. Comparação dos valores de RASTI 109

5.7.2.1. Capela do Santíssimo Sacramento (capela1) e Capela da Ressurreição de Jesus (capela 2) 109
5.7.2.2. Capela da Morte de Jesus (capela 3+4) 111
5.7.3. RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE RASTI E OS TEMPOS DE REVERBERAÇÃO 112
5.8. COMPARAÇÃO COM OS REQUISITOS IDEAIS PARA AS CAPELAS DA RECONCILIAÇÃO 114
5.9. CÁLCULO DO PARÂMETRO OBJECTIVO SII (SPEECH INTELLIGIBILITY INDEX) 116

6. ANÁLISE SUBJECTIVA 121

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 123
7.1. CONCLUSÕES 123
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 126

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. – Pitágoras filósofo, astrónomo e matemático grego, séc. VI a.C. [12]. 3
Figura 2.2. – W. C. Sabine, físico americano (1869-1919) [13]. 3
Figura 2.3. – Propagação do som sob a forma de esferas concêntricas numa fonte pontual [11]. 4
Figura 2.4. – Ouvido humano [14]. 4
Figura 2.5. – Relação de proporcionalidade entre a intensidade sonora e a distância a uma fontesonora pontual [15] 6
Figura 2.6. – Espectro sonoro [16]. 8
Figura 2.7. – a) e b) sons puros; c) som composto equivalente à sobreposição dos sons puros a) e b) [11]. 8
Figura 2.8. – Curvas de ponderação A, B, C e D para o ouvido humano [17] 10
Figura 2.9. – Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone) [18] 10
Figura 2.10. – Descrição das Curvas NC [19]. 12
Figura 2.11. – Descrição das Curvas NR [20]. 12
Figura 2.12. – Ondas sonoras directas e reflectidas [22]. 15
Figura 2.13. – Decaimento de 60 dB para definição do TR por valor teórico (à esquerda) e por extrapolação (à direita) [22]. 16
Figura 2.14. – Transmissão directa (D) e marginal (M) [23]. 19
Figura 2.15. – Comportamento típico dos valores de R com a frequência de qualquer elemento construtivo [29]. 21
Figura 3.1. – Odeón de Herodes, localizado na vertente sul da Acrópole de Atenas, dedicado a competições de canto, séc. II [31]. 24
Figura 3.2. – Tecto abobadado em pedra igreja de S. Vicente de Cardona, Espanha [34]. 25
Figura 3.3. – Interior amplo da igreja de Santo Domingo de Tui, Espanha [35]. 27
Figura 3.4. – Interior da igreja de S. Lourenço em Florença [38]. 28
Figura 3.5. – Pontos focais da elipse, *Phonurgia Nova* [42]. 30
Figura 3.6. – Cúpula da igreja de Santo Ivo em Roma, Borromini [46]. 31
Figura 4.1. – Gruta da Anunciação, Nazaré, Galileia [49]. 35
Figura 4.2. – “Maria amamentando o Menino Jesus”, pintura do séc. II, Catacumba de Priscila, Roma [50]. 35
Figura 4.3. – Ruínas da cidade de Éfeso [53]. 36
Figura 4.4. – Convento do Espigueiro, Évora, século XV [56]. 37
Figura 4.5. – Selo comemorativo dos 300 anos da proclamação de N. Sr.ª da Conceição como padroeira de Portugal [57]. 37
Figura 4.6. – Localização geográfica de algumas aparições de Santa Maria aos seus fiéis [60]. 38
Figura 4.7. – O regicídio de 1 de Fevereiro de 1908, por Rocha Martins. Nesta visão do acontecimento, o «landau» dá entrada na Rua do Arsenal, já com D. Carlos e D. Luiz Felipe tombados, enquanto Alfredo Costa (à direita, em primeiro plano) e Manuel Buiça (à esquerda, ao fundo, sofrendo uma espadeirada) são abatidos pela polícia e pela escolta que acompanhava o cortejo das carruagens (Fundação Mário Soares) [63]. 39
Figura 4.8. – Lúcia, Francisco e Jacinta, os três videntes de Fátima [67]. 40
Figura 4.9. – Capelinha das aparições após ter sido destruída por atentado bombista [70]. 40

Figura 4.10. – Atentado à vida de João Paulo II na praça de S. Pedro levado a cabo por Ali Agca em 13 de Maio de 1981 [71]. 42
Figura 4.11. – Coroa de Nossa Senhora de Fátima onde se encontra a bala extraída do corpo de João Paulo II [74]. 42
Figura 4.12. – Celebrações de beatificação dos pastorinhos de Fátima [76]. 43
Figura 4.13. – Papa Bento XVI celebra a Santa Missa no Santuário de Fátima em 2010 [78]. 43
Figura 4.14. – Localização dos principais monumentos e lugares do santuário de Fátima [79]. 44
Figura 4.15. – Coluna com Nossa Senhora de Fátima, à frente da Capelinha das Aparições [80]..... 45
Figura 4.16. – Basílica e colunata do santuário de Fátima [81]. 45
Figura 4.17. – Imagem do Imaculado Coração de Maria, Torre da Basílica de Fátima [82]. 46
Figura 4.18. – Antiga capela do sagrado Lausperene em Fátima [81]. 46
Figura 4.19. – Monumento ao Sagrado Coração de Jesus, em Fátima [83]. 47
Figura 4.20. – Centro Pastoral Paulo VI em Fátima [84]. 47
Figura 4.21. – Igreja da Santíssima Trindade em Fátima [85]. 48
Figura 4.22. – Localização da capela do Santíssimo Sacramento (capela 1), da capela da Ressurreição de Jesus (capela 2), da capela da Morte de Jesus (capela 3+4) e do átrio de acesso às capelas do Santíssimo Sacramento e da Ressurreição de Jesus [86]. 48
Figura 4.23. – Escadaria de acesso às Capelas da Reconciliação [87]. 49
Figura 4.24. – Galilé dos Apóstolos São Pedro e São Paulo, vista de sul para norte [86]. 49
Figura 4.25. – Espelho de água alusivo à criação da vida [86]. 50
Figura 4.26. – Espelho de água alusivo ao Baptismo [86]. 50
Figura 4.27. – Pormenor construtivo das paredes e tecto da capela 1 [95]. 52
Figura 4.28. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), inclinação da parede para evitar as reflexões múltiplas [foto do autor]. 52
Figura 4.29. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), bancos em faia almofadados utilizados na capela [foto do autor]. 53
Figura 4.30. – Porta de acesso à capela 1 [foto do autor]. 53
Figura 4.31. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), altar em pedra branco do mar e ostensório de prata [foto do autor]. 54
Figura 4.32. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), abertura de grandes dimensões por de trás do altar para iluminação natural [foto do autor]. 54
Figura 4.33. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), altifalante da marca "*Bose*" responsável pela difusão da palavra [foto do autor]. 55
Figura 4.34. – Pormenor construtivo das paredes e tecto da capela 2 [95]. 56
Figura 4.35. – Capela 2 (da Ressurreição de Jesus), interior [foto do autor]. 57
Figura 4.36. – Capela 3+4 (da Morte de Jesus), abertura maior na parede do lado direito com a abertura mais pequena ao fundo [foto do autor]. 59
Figura 4.37. – Capela 3+4 (da Morte de Jesus), altifalantes da marca "*Bose*" responsável pela difusão da palavra [foto do autor]. 60
Figura 4.38. – Montagem da divisória amovível na capela 3+4 [foto do autor]. 60
Figura 4.39. – Pormenor construtivo da divisória amovível da capela 3+4 [95]. 61
Figura 4.40. – Capela 3 formada pela divisão da capela 3+4 por parede amovível [foto do autor]. 61
Figura 4.41. – Capela 4 formada pela divisão da capela 3+4 por parede amovível [foto do autor]. 62

Figura 4.42. – Zona técnica de armazenamento dos painéis da divisória da capela 3+4 [Foto do autor]. 62
Figura 4.43. – Átrio de acesso às capelas 1, do lado direito, e 2, do lado esquerdo [Foto do autor]. 63
Figura 4.44. – Corredor técnico que passa por de trás das capelas e é paralelo ao corredor principal denominado Galilé dos Apóstolos São Pedro e São Paulo [Foto do autor]. 64
Figura 4.45. – Porta de acesso ao átrio [Foto do autor] 64
Figura 5.1. – Sonómetro 2260 da Brüel & Kjær [Foto do autor]. 68
Figura 5.2. – Fonte emissora B&K 4224 [Foto do autor]. 68
Figura 5.3. – Transmissor de RASTI tipo *BK4225* da Brüel & Kjær [Foto do autor]. 68
Figura 5.4. – Receptor de RASTI tipo *BK4419* da Brüel & Kjær [Foto do autor]. 68
Figura 5.5. – Localização dos três pontos ensaiados (R), para a avaliação do tempo de reverberação, e da fonte sonora (F) na capela 2 (à esquerda) e na capela 1 (à direita). 69
Figura 5.6. – Localização dos três pontos ensaiados (R), para a avaliação do tempo de reverberação, e da fonte sonora (F) na capela 3+4. 70
Figura 5.7. – Localização dos três pontos ensaiados (R), para a avaliação do tempo de reverberação, e da fonte sonora (F) na capela 3 (em baixo) e na capela 4 (em cima). 70
Figura 5.8. – Registo do tempo de reverberação por parte do sonómetro [Foto do autor]. 71
Figura 5.9. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 1. 72
Figura 5.10. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 2. 73
Figura 5.11. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 3+4. 73
Figura 5.12. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 3. 74
Figura 5.13. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 4. 74
Figura 5.14. – Valores médios do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava em todas as capelas. 75
Figura 5.15. – Valores do tempo de reverberação médio nas bandas de 500, 1k e 2k Hz de cada capela, valores ideais do tempo de reverberação para a palavra e para a música. 76
Figura 5.16. – Localização dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do índice de inteligibilidade da palavra (RASTI), e da fonte emissora (F) na capela 2 (à esquerda) e na capela 1 (à direita). 78
Figura 5.17. – Localização dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do índice de inteligibilidade da palavra (RASTI), e da fonte emissora (F) na capela 3+4. 78
Figura 5.18. – Emissor do sinal sonoro (RASTI) localizado no altar na posição do orador a cerca de 30 cm de distância do microfone [Foto do autor]. 79
Figura 5.19. – Sistema de reforço electroacústico das capelas do 1 e 2 (à esquerda) e da capela 3+4 (à direita) [Fotos do autor]. 79
Figura 5.20. – Valores médios de RASTI de cada ponto ensaiado na capela 1 com e sem sistema de reforço electroacústico em funcionamento. 82
Figura 5.21. – Valores médios de RASTI de cada ponto ensaiado na capela 2 com e sem sistema de reforço electroacústico em funcionamento. 82
Figura 5.22. – Valores médios de RASTI de cada ponto ensaiado na capela 3+4 com e sem sistema de reforço electroacústico em funcionamento. 83

Figura 5.23. – Variação média dos valores do RASTI por ponto de medição com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 1. ... 84

Figura 5.24. – Variação média dos valores do RASTI por ponto de medição com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 2. ... 85

Figura 5.25. – Variação média dos valores do RASTI por ponto de medição com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 3+4. ... 85

Figura 5.26. – Localização dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do ruído de fundo, na capela 2 (à esquerda) e na capela 1 (à direita). ... 86

Figura 5.27. – Localização dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do ruído de fundo, na capela 3+4. ... 87

Figura 5.28. – Valores dos níveis de pressão sonora (L) e dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz para a capela 1 com e sem o funcionamento do AVAC. ... 89

Figura 5.29. – Valores dos níveis de pressão sonora (L) e dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz para a capela 2 com e sem o funcionamento do AVAC. ... 90

Figura 5.30. – Valores dos níveis de pressão sonora (L) e dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz para a capela 3+4 com e sem o funcionamento do AVAC. ... 90

Figura 5.31. – Comparação dos valores dos níveis de pressão sonora (L) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz sem o funcionamento do AVAC das três capelas. ... 91

Figura 5.32. – Comparação dos valores dos níveis de pressão sonora (L) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz com o funcionamento do AVAC das três capelas. ... 91

Figura 5.33. – Comparação dos valores dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz sem o funcionamento do AVAC das três capelas. ... 92

Figura 5.34. – Comparação dos valores dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz com o funcionamento do AVAC das três capelas. ... 92

Figura 5.35. – Comparação entre os valores dos níveis de pressão sonora nas capelas 1, 2 e 3+4 com o sistema de AVAC em funcionamento e as curvas de incomodidade NC. ... 94

Figura 5.36. – Comparação entre os valores dos níveis de pressão sonora nas capelas 1, 2 e 3+4 com o sistema de AVAC em funcionamento e as curvas de incomodidade NR. ... 94

Figura 5.37. – Localização da fonte emissora na capela 2 (à esquerda) e dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do isolamento sonoro entre a capela 2 (à esquerda) e a capela 1 (à direita) e para a avaliação do isolamento sonoro entre a capela 2 e o átrio de acesso. ... 96

Figura 5.38. – Localização da fonte sonora (F2) e dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do isolamento sonoro da divisória amovível da capela 3+4, tanto no espaço emissor (capela 4) como no espaço receptor (capela 3). ... 97

Figura 5.39. – Valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (DnT) em dB entre as capelas 2 e 1 (C2 – C1), da divisória amovível da capela 3+4 (C4 – C3) e entre a capela 2 e o átrio (C2 – A). ... 102

Figura 5.40. – Pormenor da ligação do último painel da divisória amovível da capela 3+4 com a abertura de passagem da zona técnica para esta. ... 103

Figura 5.41. – Pormenor da frincha existente numa das portas de acesso à capela 2. ... 104

Figura 5.42. – Valores médios do $TR_{(500,\ 1k\ Hz)}$ das capelas 1, 2 e 3+4 e da igreja da Santíssima Trindade. ... 105

Figura 5.43. – Valores de RASTI das capelas 1, 2 e 3+4 e da igreja da Santíssima Trindade com e sem sistema de reforço electroacústico em funcionamento. 106

Figura 5.44. – Relação entre o volume e o TR médio (500, 1k Hz) das capelas 1 e 2 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria. 107

Figura 5.45. – Relação entre o volume e o TR médio (500, 1k Hz) da capela 3+4 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria. 109

Figura 5.46. – Relação entre o volume e os valores de RASTI das capelas 1 e 2 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria. 110

Figura 5.47. – Relação entre o volume e os valores de RASTI da capela 3+4 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria. 112

Figura 5.48. – Relação entre o TR (500, 1k Hz) e os valores médios de RASTI das capelas 1, 2 e 3+4 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria. 113

Figura 5.49. – Relação entre os valores médios de RASTI e os valores calculados de SII nas capelas 1, 2 e 3+4. 118

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. – Valores limites máximos de NC para algumas situações [19]. 13
Quadro 2.2. – Valores limites máximos de NR para algumas situações [20]. 13
Quadro 2.3. – Valores do nível de conversação (nc) e seus correspondentes pesos de ponderação consoante a frequência para a obtenção do parâmetro *AI* [11]. 17
Quadro 2.4. – Percepção subjectiva para a inteligibilidade da palavra em função dos valores numéricos do *AI* [11] 17
Quadro 2.5. – *PSIL* (dB) para o qual a comunicação da palavra é, no limite, possível (M: Masculino; F: Feminino) [11]. 18
Quadro 2.6. – Escala de *RASTI* [27]. 19
Quadro 2.7. – Valores da curva de referência em bandas de terço de oitava [28]. 21
Quadro 4.1. – Local e data de algumas das mais significativas aparições de Santa Maria aos seus fiéis [58, 59]. 38
Quadro 4.2. – Parâmetros arquitectónicos da capela 1. 51
Quadro 4.3. – Coeficientes de absorção sonora (α) por banda de frequência de uma oitava e médio (α_w) do material de revestimento *Akustaplan* para as espessuras de 50, 200 e 400 mm [92]. 51
Quadro 4.4. – Parâmetros arquitectónicos da capela 2. 55
Quadro 4.5. – Coeficientes de absorção sonora (α) por banda de frequência de uma oitava e médio (α_w) do gesso cartonado [96]. 56
Quadro 4.6. – Parâmetros arquitectónicos da capela 3+4. 57
Quadro 4.7. – Parâmetros arquitectónicos da capela 3. 58
Quadro 4.8. – Parâmetros arquitectónicos da capela 4. 59
Quadro 4.9. – Parâmetros arquitectónicos do átrio. 63
Quadro 5.1. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 1. 71
Quadro 5.2. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 2. 71
Quadro 5.3. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 3+4. 72
Quadro 5.4. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 3. 72
Quadro 5.5. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 4. 72
Quadro 5.6. – Valores de RASTI da capela 1 com o sistema de reforço electroacústico desligado. ...80
Quadro 5.7. – Valores de RASTI da capela 2 com o sistema de reforço electroacústico desligado. ...80
Quadro 5.8. – Valores de RASTI da capela 3+4 com o sistema de reforço electroacústico desligado. 81
Quadro 5.9. – Valores de RASTI da capela 1 com o sistema de reforço electroacústico ligado. 81
Quadro 5.10. – Valores de RASTI da capela 2 com o sistema de reforço electroacústico ligado. 81
Quadro 5.11. – Valores de RASTI da capela 3+4 com o sistema de reforço electroacústico ligado. ...81
Quadro 5.12. – Valores médios do RASTI e inteligibilidade da palavra nas capelas 1, 2 e 3+4. 83
Quadro 5.13. – Variação média do valor de RASTI em cada ponto com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 1. 84

Quadro 5.14. – Variação média do valor de RASTI de cada ponto com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 2. 84

Quadro 5.15. – Variação média do valor de RASTI de cada ponto com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 3+4. 84

Quadro 5.16. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 1 sem o funcionamento do AVAC. 88

Quadro 5.17. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 2 sem o funcionamento do AVAC. 88

Quadro 5.18. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 3+4 sem o funcionamento do AVAC. 88

Quadro 5.19. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 1 com o funcionamento do AVAC. 88

Quadro 5.20. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 2 com o funcionamento do AVAC. 89

Quadro 5.21. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 3+4 com o funcionamento do AVAC. 89

Quadro 5.22. – Valores dos níveis de pressão sonora equivalente e níveis sonoros equivalentes (L e L_A) para cada capela e variação entre os valores com e sem AVAC (ΔL e ΔL_A). 92

Quadro 5.23. – Valores obtidos e limite máximo desejável de NC e NR para as capelas 1, 2 e 3+4 com o sistema de AVAC em funcionamento. 95

Quadro 5.24. – Áreas dos diversos revestimentos existentes e volume de ar no átrio. 98

Quadro 5.25. – Coeficientes de absorção sonora (α) por banda de frequência de terço de oitava dos 100 aos 3.150 Hz dos diversos materiais existentes no átrio com as referências de 1 a 8. 98

Quadro 5.26. – Cálculo do tempo de reverberação por banda de frequência de terço de oitava dos 100 aos 3.150 Hz pela fórmula de Sabine. 99

Quadro 5.27. – Valores dos níveis médios de pressão sonora no emissor (capela 2), L1, dos níveis médios de pressão sonora no receptor (capela 1), L2, e os tempos de reverberação em terço de oitava do local receptor (capela 1), TR, para cálculo do isolamento sonoro padronizado entre as capelas 1 e 2. 100

Quadro 5.28. – Valores dos níveis médios de pressão sonora no emissor (capela 4), L1, dos níveis médios de pressão sonora no receptor (capela 3), L2, e os tempos de reverberação em terço de oitava do local receptor (capela 3), TR, para cálculo do isolamento sonoro padronizado da divisória existente na capela 3+4. 100

Quadro 5.29. – Valores dos níveis médios de pressão sonora no emissor (capela 2), L1, dos níveis médios de pressão sonora no receptor (átrio), L2, e os tempos de reverberação em terço de oitava previstos para o local receptor (átrio), TR, para cálculo do isolamento sonoro entre a capela 2 e o átrio de acesso. 101

Quadro 5.30. – Valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (*DnT*) em dB e do índice isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (*DnT,w*) em dB entre as capelas 2 e 1 (C2 – C1), da divisória amovível da capela 3+4 (C4 – C3) e entre a capela 2 e o átrio (C2 – A). 102

Quadro 5.31. – Valores médios do TR (500, 1k Hz) e de RASTI das capelas 1, 2 e 3+4 e da igrejas da Santíssima Trindade e os seus respectivos volumes. 105

Quadro 5.32. – Volumes e TR médio (500, 1k Hz) das capelas 1 e 2 (Fátima) e das igrejas escolhidas para posterior comparação dos valores médios de Tempo de Reverberação. 107

Quadro 5.33. – Volumes e TR médio (500, 1k Hz) da capela 3+4 e das igrejas escolhidas para posterior comparação dos valores de Tempo de Reverberação. 108

Quadro 5.34. – Volumes e valores médios de RASTI das capelas 1 e 2 e das igrejas escolhidas para posterior comparação. 110

Quadro 5.35. – Volumes e valores de RASTI da capela 3+4 e das igrejas escolhidas para posterior comparação. 111

Quadro 5.36. – Valores de RASTI e do TR médio (500, 1k Hz) das capelas 1, 2 e 3+4 e das igrejas em análise. 113

Quadro 5.37. – Valores ideais e valores medidos do TR médio (500, 1k Hz) das capelas 1 e 2. 114

Quadro 5.38. – Limite mínimo ideal de RASTI e valores médios medidos de RASTI sem reforço electroacústico para as capelas 1, 2 e 3+4. 115

Quadro 5.39. – Limites máximos ideais de L_{Aeq} e de NC e valores medidos de L_{Aeq} com AVAC em funcionamento e respectivos NC's para as capelas 1, 2 e 3+4. 116

Quadro 5.40. – Cálculo do parâmetro *SII* para a capela 1. 117

Quadro 5.41. – Cálculo do parâmetro *SII* para a capela 2. 117

Quadro 5.42. – Cálculo do parâmetro *SII* para a capela 3+4. 117

Quadro 5.43. – Valores médios de RASTI sem reforço electroacústico e de SII das capelas 1, 2 e 3+4. 118

Quadro 5.44. – Proposta de relação dos limites da inteligibilidade da palavra aplicados ao *RASTI* com os valores calculados de SII. 119

Quadro 6.1. – Quadro resumo da opinião subjectiva dos utilizadores das capelas 1 e 2. 121

Quadro 6.2. – Comparação das respostas subjectivas com os parâmetros objectivos medidos nas capelas 1 e 2. 122

Quadro 7.1. – Quadro resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios *in situ*. 123

Quadro 7.2. – Quadro resumo dos valores do índice do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea. 124

Quadro 7.3. – Melhorias face ao expectável pelas igrejas portuguesas de volumetria semelhante. 125

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – Absorção sonora equivalente (m^2)

AI – *Articulation Index*

ALCONS – Percentagem de perda de consoantes

ANSI – *American National Standards Institute*

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BR – *Bass Ratio*

c – Celeridade (m/s)

C_{80} – Claridade (dB, base 80 ms)

D – Isolamento sonoro bruto a ruídos de condução aérea (dB)

D_{50} – Definição

DnT – Isolamento sonoro padronizado a ruídos de condução aérea (dB)

DnT,w – Índice de isolamento sonoro padronizado a ruídos de condução aérea (dB)

I – Intensidade sonora (W/m^2)

I_0 – Intensidade sonora de referência (W/m^2)

ISO – *International Organization for Standardization*

L_A – Nível pressão sonora (dBA)

L_{Aeq} – Nível pressão sonora contínuo equivalente (dBA)

L_{eq} – Nível pressão sonora contínuo equivalente (dB)

L_I – Nível de intensidade sonora (dB)

L_p – Nível de pressão sonora (dB)

L_W – Nível de potência sonora (dB)

m – Absorção sonora do ar (m^{-1})

nc – Nível de conversação

NC – *Noise Criterion* (dB)

NR – *Noise Rating* (dB)

p – Pressão (Pa)

p_0 – Pressão de referência (Pa)

R – Redução sonora (dB)

r – Distância à fonte (m)

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RF – Ruído de fundo

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

S – Área (m^2)

SII – *Speech Intelligibility Index*

SIL – *Speech Interference Level* (dB)

STI – *Speech Transmition Index*

T – Temperatura do ar (K)

TR – Tempo de reverberação (s)

TR20 – Tempo de reverberação obtido por decaimento de 20 dB (s)

TR30 – Tempo de reverberação obtido por decaimento de 30 dB (s)

TR (500, 1k Hz) – Média entre TR (500 Hz) e TR (1k Hz) (s)

TR (500, 1k, 2k Hz) – Média entre TR (500 Hz), TR (1k Hz) e TR (2k Hz) (s)

TS – Tempo central (ms)

V – Volume (m^3)

W – Potência sonora (W)

W_0 – Potência sonora de referência (W)

α – Coeficiente de absorção

α_w – Coeficiente de absorção médio

ρ – Massa volúmica do ar

θ – Temperatura do ar (˚C)

τ – Coeficiente de transmissão

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

A Acústica é o ramo da Física que estuda a produção, propagação e recepção dos estímulos sonoros audíveis para o ser humano. Por sua vez subdivide-se em vários ramos especializados, ligados a diversas áreas, como por exemplo a Biologia, Fisiologia, Psicologia, Química, Geofísica e Acústica de Edifícios. Este último, pretende proporcionar, nos edifícios, condições de conforto acústico aos seus ocupantes para que estes exerçam as suas actividades em ambiente acústico propício [1].

Os aspectos acústicos sempre foram importantes ao ser humano, visto que o mesmo utiliza os sentidos para percepção, compreensão e memorização do espaço envolvente. Ao longo da história, no entanto, o homem tem vindo a alterar a sua forma de ouvir e existe, hoje em dia, um acréscimo da importância do conforto acústico por parte do utilizador que é apoiado pela legislação nacional através do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE). Isto leva a que os projectistas tenham, cada vez mais, a Acústica de Edifícios presente na fase de projecto [2].

Perante esta importância da acústica já se efectuaram inúmeros estudos sobre o comportamento e características acústicas de diversos espaços públicos como por exemplo grandes salas de espectáculos, salas de cinema, salas de aulas e salas de audiências de tribunais [3]. No caso das igrejas, ao contrário do que se possa pensar dado a sua grande importância para a nossa sociedade, não há um estudo muito aprofundado nesta matéria. Ainda assim destacam-se os importantes trabalhos iniciados em Portugal por A. P. O. Carvalho (1994) [4] seguidos, entre outros, dos trabalhos realizados por A. Morgado (1996) [5], M. Lencastre (1998) [6] e Anabela Carvalho (2005) [7].

O presente trabalho inclui-se no contexto do programa de investigação em Acústica de Igrejas do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [8] e no seguimento da tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil realizado por Pedro Silva (2009) intitulada "Caracterização Acústica Interior da Nova Igreja da Santíssima Trindade em Fátima" [9].

O objectivo deste estudo, é assim, a caracterização acústica, por meio de parâmetros objectivos, das Capelas da Reconciliação da Igreja da Santíssima Trindade em Fátima. Este estudo é suportado por uma componente prática, que consiste nos ensaios *in situ* dos parâmetros acústicos a avaliar para a caracterização acústica das Capelas da Reconciliação (Tempo de Reverberação, RASTI, Ruído de Fundo e Isolamento Sonoro) e do cálculo do valor de SII.

Apresentam-se os resultados dos ensaios do tempo de reverberação e efectua-se a comparação entre as capelas da Reconciliação cujos valores são previsivelmente diferentes devido ao tratamento acústico distinto nas diversas capelas.

Para o ensaio do RASTI apresentam-se os valores medidos e compara-se igualmente entre as capelas para se perceber as diferenças existentes, atribuindo posteriormente um grau de inteligibilidade da palavra a cada capela em estudo.

Efectuou-se o mesmo procedimento de apresentação de resultados e comparação entre capelas para o ruído de fundo onde se calculou o NC e o NR para verificar o efeito do sistema de AVAC.

Mediu-se o isolamento sonoro de diversas divisórias entre capelas para avaliar se estas cumpriam eficazmente o seu papel não deixando que a ocorrência de cerimónias em simultâneo, em capelas contíguas, saísse prejudicada.

A partir da análise dos resultados dos ensaios efectuados ao tempo de reverberação e ao RASTI, fez-se a comparação com os valores da Igreja da Santíssima Trindade que tem um volume muito superior ao das capelas e por isso seria previsível ter valores bastante diferentes.

Comparou-se também com os valores de igrejas portuguesas de volumetria semelhante à das capelas que puderam ter valores díspares devido à constituição dos revestimentos interiores serem notoriamente diferentes.

Utilizando os valores obtidos nos diversos ensaios pode-se verificar o comprimento ou não dos requisitos propostos pelo dono de obra assim como se atingem os valores ideais recomendados para este tipo de espaços.

Calculou-se, por fim, o parâmetro objectivo *SII* e efectuou-se uma comparação da opinião subjectiva dos utilizadores das capelas com os parâmetros objectivos medidos de forma a verificar se o "gosto" dos utilizadores iria ao encontro da qualidade do ambiente acústico das capelas em estudo.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho encontra-se dividido em sete capítulos:

No 1º capítulo faz-se uma breve descrição do trabalho e dos objectivos deste;

O 2º capítulo fornece as bases acústicas essenciais para a compreensão do estudo efectuado;

No 3º capítulo faz-se uma abordagem à Acústica de Igrejas, descrevendo a sua evolução ao longo da história;

No 4º capítulo faz-se uma abordagem histórica relacionada com o culto Mariano e o Santuário de Fátima e caracteriza-se as Capelas da Reconciliação ao nível arquitectónico e ao nível das soluções construtivas;

O 5º capítulo diz respeito aos ensaios realizados *in situ* para a elaboração deste trabalho, onde são descritos pormenorizadamente, apresentados e analisados os seus resultados, efectuando para isso diversas comparações de valores;

No 6º capítulo analisa-se a opinião subjectiva dos utilizadores das capelas e compara-se com os valores dos parâmetros objectivos obtidos através dos ensaios realizados *in situ*;

O 7º e último capítulo engloba a conclusão deste trabalho bem como algumas considerações sobre possíveis desenvolvimentos que poderão vir a ser realizados.

2
CONCEITOS ACÚSTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

As primeiras investigações sobre o som foram iniciadas na Antiguidade, com os trabalhos de filósofos gregos como Pitágoras (Figura 2.1.), no século VI a.C.. Aquele relacionava sons com números e descobriu as suas relações harmónicas. Ao longo dos tempos houve inúmeros avanços e retrocessos no ramo da acústica, explorados um pouco mais no capítulo três. Só mais recentemente, em 1900, W. C. Sabine (Figura 2.2.) inicia estudos na área da Acústica de Edifícios, tornando-a uma ciência tal como a conhecemos na actualidade [10, 11].

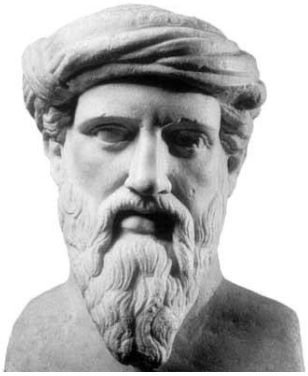

Figura 2.1. – Pitágoras filósofo, astrónomo e matemático grego, séc. VI a.C. [12].

Figura 2.2. – W. C. Sabine, físico americano (1869-1919) [13].

O som é uma alteração física num meio (gás, líquido ou sólido) que pode ser detectada pelo ouvido humano. Esse meio, pelo qual "viajam" as ondas sonoras, terá que ser possuidor de massa e elasticidade pois as ondas sonoras não se propagam através do vácuo.

No contexto do caso em estudo, o meio de propagação preferencial do som é o ar através do movimento das partículas que o constituem. Este movimento é originado pelas variações de pressão, provocadas por uma fonte sonora num dado ponto, em torno de um valor de referência, a pressão atmosférica ($\approx 10^5$ Pa). A vibração que se produz, vai actuar sob a forma de impulso nas partículas que constituem o ar que estão mais próximas obrigando-as a vibrarem também. Por sua vez, a vibração destas origina a vibração das partículas contíguas do ar e o processo vai-se repetindo, à medida que o som se propaga. Deste modo, as partículas aproximam-se, afastando-se em seguida sucedendo-se assim no ar uma série de compressões e rarefacções a que se chama ondas sonoras que se propagam em todas as direcções a partir da fonte pontual sob a forma de esferas concêntricas (Figura 2.3.).

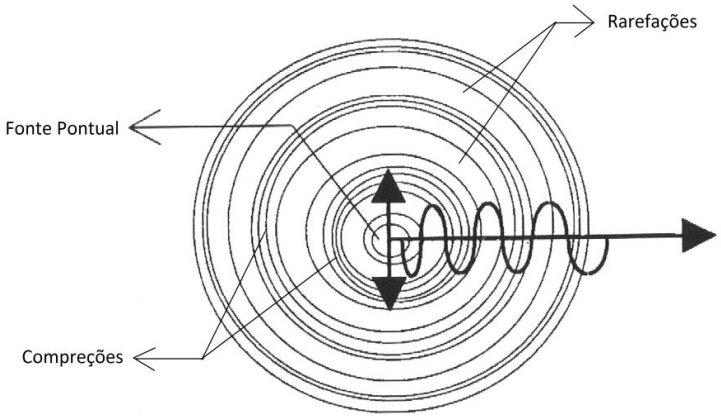

Figura 2.3. – Propagação do som sob a forma de esferas concêntricas numa fonte pontual [11].

Para finalizar as ondas sonoras, após terem percorrido o meio elástico, atingem o ouvido humano (Figura 2.4.) e comprimem sucessivamente o tímpano criando assim, através de fenómenos mecânicos e electro-químicos no ouvido interno, a sensação sonora.

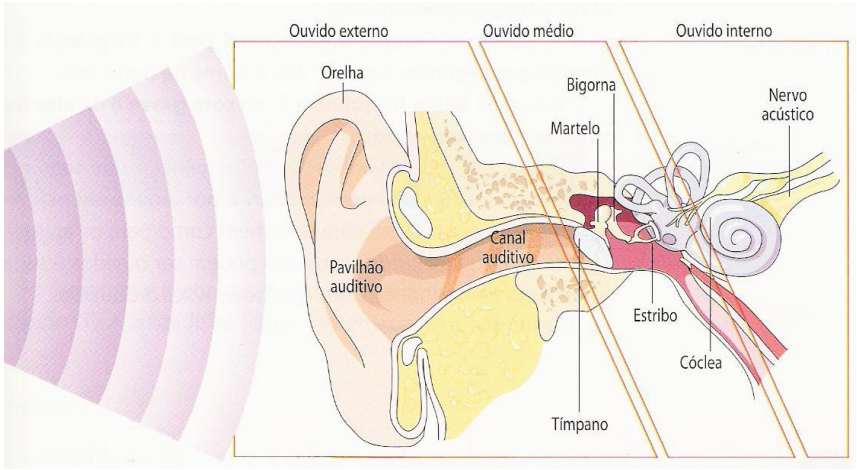

Figura 2.4. – Ouvido humano [14].

Nos subcapítulos que se seguem são apresentados alguns conceitos e definições de parâmetros acústicos que serão úteis na melhor compreensão deste trabalho.

2.2. CELERIDADE

A celeridade (c) é a velocidade de propagação das ondas sonoras num determinado meio. No caso de se estar na presença de ar, é geralmente independente da frequência da onda sonora e da humidade. Esta varia somente em função da temperatura do ar, como demonstrado na seguinte expressão:

$$c = 20{,}045\sqrt{T}$$

Onde c é a celeridade (m/s) e T é a temperatura absoluta do ar em graus kelvin (K).

Para se efectuar a conversão da temperatura da escala de graus celsius (ºC) geralmente utilizada para a escala de graus kelvin utiliza-se a seguinte expressão:

$$T(K) = 273{,}15 + \theta(°C)$$

2.3. POTÊNCIA SONORA

A potência sonora (W), quantificada em watt (W), traduz-se na energia sonora total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte sonora. Esta, por ser uma característica da fonte, não é dependente nem das condições da envolvente nem da distância à origem. Em suma, a potência sonora classifica quantitativamente a fonte sonora.

2.4. INTENSIDADE SONORA

A intensidade sonora (I), quantificada em W/m^2, numa determinada direcção e num determinado ponto do campo sonoro é igual à quantidade média de energia sonora que atravessa num segundo uma área unitária nesse mesmo ponto, sendo a área unitária normal à direcção especificada. Este parâmetro é representado como uma grandeza vectorial e tem como vantagem permitir localizar e qualificar as fontes sonoras.

2.5. RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE SONORA, POTÊNCIA SONORA E PRESSÃO SONORA

A intensidade sonora (I), a potência sonora (W) e a pressão sonora (p) estão relacionadas entre si através da seguinte expressão:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho . c}$$

Onde I é a intensidade sonora (W/m^2), W corresponde à potência sonora em watt (W), r é a distância à fonte sonora em metros (m), p a pressão sonora em Pascal (Pa), ρ é a massa volúmica do ar que equivale sensivelmente a 1,2 kg/m^3 e c a celeridade em m/s que em condições normais (θ≈15 ºC) corresponde a 340 m/s.

Perante esta expressão, facilmente se repara que a intensidade sonora (I) é proporcional à potência sonora (W) e é também proporcional ao quadrado da pressão sonora (p). Verifica-se também que a intensidade sonora (I) e a pressão sonora (p) são inversamente proporcionais ao quadrado da distância à fonte sonora (r).

Sendo assim, ao se aumentar a distância (r) à fonte para o dobro, a quantidade de energia que até aí atravessava uma área unitária, vai passar agora por uma área quatro vezes superior diminuindo a intensidade sonora inicial (I) para um quarto desse valor. Analogamente verifica-se que ao triplicar-se a distância à fonte sonora a intensidade sofre uma diminuição para um nono do seu valor inicial (Figura 2.5.).

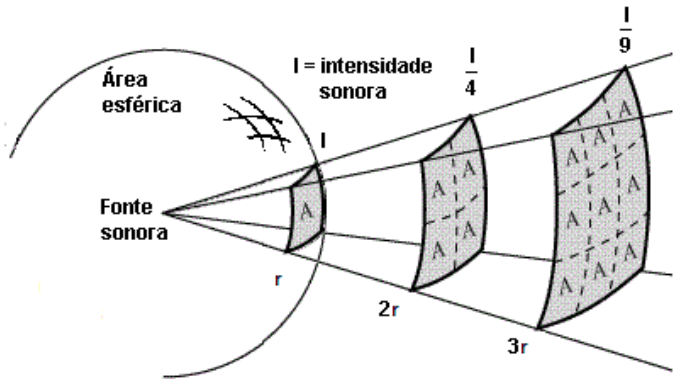

Figura 2.5. – Relação de proporcionalidade entre a intensidade sonora e a distância a uma fonte sonora pontual [15].

2.6. NÍVEIS

O ouvido humano consegue captar uma grande amplitude de variação de pressão, em torno da pressão atmosférica, na ordem de grandeza de 10^7 Pa. Este largo domínio tem como limite inferior audível uma variação de pressão de cerca de 10^{-5} Pa a que se atribui o nome de *limiar da audição*. O limite superior equivale a uma variação de pressão sensivelmente de 100 Pa que a partir da qual a sensação auditiva passa de ruído a dor sendo assim conhecido por *limiar da dor*.

Dado que o domínio, anteriormente referido, da variação de pressão audível é tão amplo e que o ouvido humano não responde de uma forma linear aos estímulos mas sim de um modo quase logarítmico, a aplicação da escala linear em *pascal* não é assim de uso prático. Por isso, quando se pretende comparar uma quantidade de uma grandeza face a um valor de referência dessa mesma grandeza utiliza-se o *nível* que se exprime em *bel* (em honra a Alexander Graham Bell (1847-1922), cientista americano), permitindo assim reduzir a grande amplitude dos valores absolutos.

Por definição, o *nível* é o logaritmo da razão entre um valor de uma grandeza em relação a uma quantidade de referência dessa mesma grandeza como se deduz da seguinte expressão:

$$L(G) = \log\left(\frac{G}{G_0}\right) \quad [B]$$

Em que L(G) representa o nível da grandeza G, G é o valor da grandeza e G_0 o valor de referência da grandeza.

Em acústica, os níveis das grandezas exprimem-se usualmente em *decibel* (dB) que é equivalente a uma décima parte de *bel* pelo que a expressão anterior sofre uma pequena modificação passando a escrever-se da seguinte maneira:

$$L(G) = 10\log\left(\frac{G}{G_0}\right) \quad [dB]$$

Assim sendo, os valores da pressão sonora, da intensidade sonora e da potência sonora são correntemente expressos em termos dos seus níveis, considerados relativamente a valores de referência, e não nas unidades apropriadas às suas fórmulas dimensionais.

Em suma, o nível de pressão sonora determina-se pela seguinte expressão:

$$L(p) = 10\log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) = 20\log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad [dB]$$

Com,

$$p_0 = 2 \times 10^{-5} \ Pa$$

Onde L(p) é o nível de pressão sonora em *decibel*, p é a pressão eficaz e p_0 é a pressão de referência.

O nível de intensidade sonora é dado por:

$$L(I) = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad [dB]$$

Com,

$$I_0 = 10^{-12} \ W/m^2$$

Onde L(I) é o nível de intensidade sonora em *decibel*, I é a intensidade sonora e I_0 é a intensidade sonora de referência.

Por último o nível de potência sonora que caracteriza a fonte sonora e não depende do local é dado por:

$$L(W) = 10\log\left(\frac{W}{W_0}\right) \quad [dB]$$

Com,

$$W_0 = 10^{-12} \ W$$

Onde L(W) é o nível de potência sonora em *decibel*, W é a potência sonora e W_0 é a potência sonora de referência.

2.7. FREQUÊNCIA

A frequência (f), a par da pressão sonora, é uma das mais importantes características quando se pretende descrever um som. Esta exprime-se em hertz (Hz) (em honra do físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894)) e indica o número de ocorrências de um evento (ciclos, voltas, oscilações, etc.) em um determinado intervalo de tempo. No caso da acústica esse evento corresponde às flutuações de pressão.

O ouvido humano tem um limite de audibilidade que vai de 20 Hz a 20.000 Hz. Ondas que não estejam entre esses dois limites simplesmente não serão ouvidas. Sons de frequências inferiores a esta gama correspondem aos *infra-sons* e os constituídos por frequências superiores são denominados *ultra-sons* (Figura 2.6.).

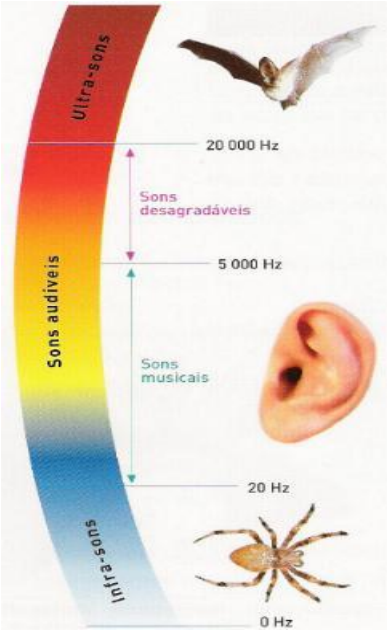

Figura 2.6. – Espectro sonoro [16].

Todas as fontes sonoras emitem a energia sonora numa ou em várias frequências em simultâneo, o que pode, em diversos casos, ajudar a diferenciá-las entre si.

No caso de o som estar associado a uma só componente em termos de frequência passa-se a denominar-se por som *puro* ou *simples*. Já no caso de este ser constituído por mais que uma frequência, ou seja, ser o resultado da sobreposição de dois ou mais sons puros, passará a designar-se por som *composto* ou *complexo* (Figura 2.7.).

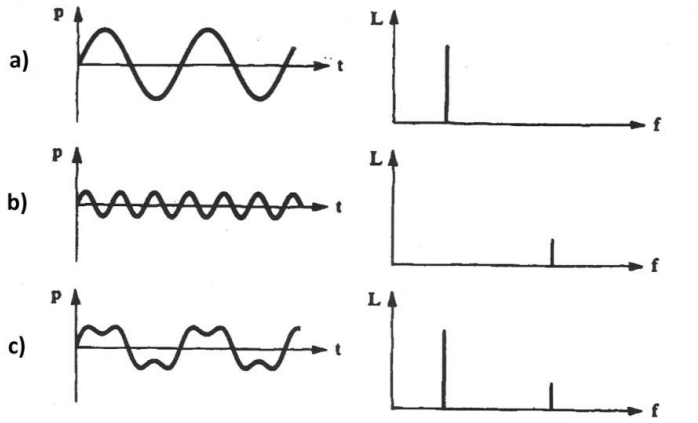

Figura 2.7. – a) e b) sons puros; c) som composto equivalente à sobreposição dos sons puros a) e b) [11].

A Acústica dos Edifícios distingue três grandes grupos dentro do espectro de frequências sendo eles:

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

Apesar de interessar só o intervalo de frequências entre os 20 Hz e os 20.000 Hz não deixa de ser um número muito elevado de frequências para se poder analisar ao pormenor. Para facilitar essa análise, dividem-se as frequências em agrupamentos designados por *bandas*. Essas bandas de frequências podem tomar várias larguras sendo as adoptadas neste contexto as de largura de uma oitava e de um terço de oitava.

Na Acústica de Edifícios não é habitual utilizar as onze bandas de oitava centradas nas frequências de 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz. Utiliza-se, mais frequentemente, as cinco bandas de oitava entre os 125 Hz e os 2 kHz. Quanto às bandas de terço de oitava, ao invés de se utilizar as trinta e uma bandas centradas nas frequências de 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1.250, 1.600, 2k, 2.500, 3.150, 4k, 5k, 6.300, 8k, 10k, 12.500, 16k e 20k Hz utiliza-se habitualmente as dezasseis bandas de terço de oitava entre os 100 Hz e os 3.150 Hz.

2.8. CURVAS DE PONDERAÇÃO

O ouvido humano não é igualmente sensível em todas as frequências. Por esta razão, na presença de dois sons distintos, mas com níveis de pressão sonora idênticos, o ser humano ao ouvi-los pode considerar que um dos sons é mais intenso que o outro. Isto acontece se o nível de pressão sonora do primeiro se encontrar mais concentrado numa região de frequências onde o ouvido humano é mais sensível. Na região de frequências entre os 2300 Hz e os 2800 Hz o ouvido é muito sensível o que já não acontece para frequências inferiores a 125 Hz onde este tem o seu pior desempenho.

Dado que os equipamentos são muito fiáveis na captação da variação da pressão sonora sem variações de sensibilidade ao longo do espectro de frequências, surge a necessidade de criar artifícios para aproximar estas leituras da resposta real do ouvido. Para isso surgiram filtros electrónicos que ao serem introduzidos nos equipamentos de medida corrigem os valores, adaptando-os assim ao que seria a resposta esperada do ouvido humano a esse dado estímulo sonoro. As curvas correctivas correspondentes a esses filtros denominam-se curvas de ponderação e existem quatro curvas diferentes (A, B, C e D) (Figura 2.8.).

A curva de ponderação A equivale ao inverso da curva dos 40 fone (curva de igual percepção subjectiva da intensidade sonora e que toma convencionalmente o valor numérico do respectivo nível de pressão sonora nos 1000 Hz (Figura 2.9.)). Esta é a mais utilizada aproximando os ruídos de fraca intensidade à resposta do ouvido humano. A curva B, já caída em desuso, era utilizada para ruídos mais intensos na ordem dos 55 dB assim como a curva C que é utilizada para ruídos na ordem dos 85 dB. A curva D é especialmente usada na presença de ruídos de aviões.

O *nível de pressão sonoro* expresso em dB passa a ser designado, no caso mais frequente, após a correcção com o filtro A, de *nível sonoro*, expresso em dB(A), que traduz a energia acústica de um ruído filtrado por uma curva de ponderação do tipo A.

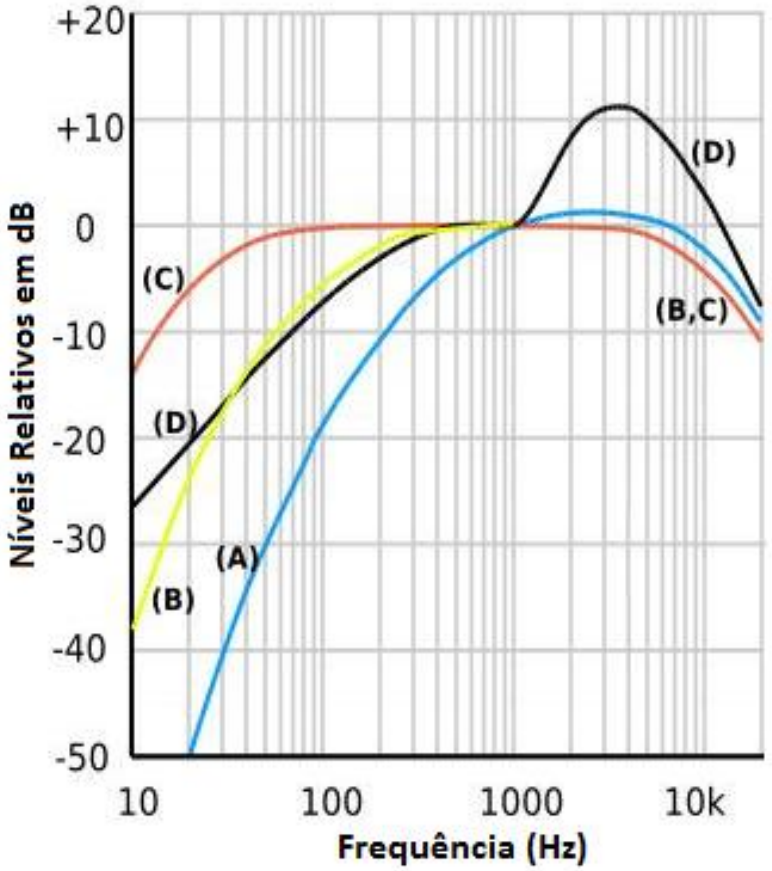

Figura 2.8. – Curvas de ponderação A, B, C e D para o ouvido humano [17]

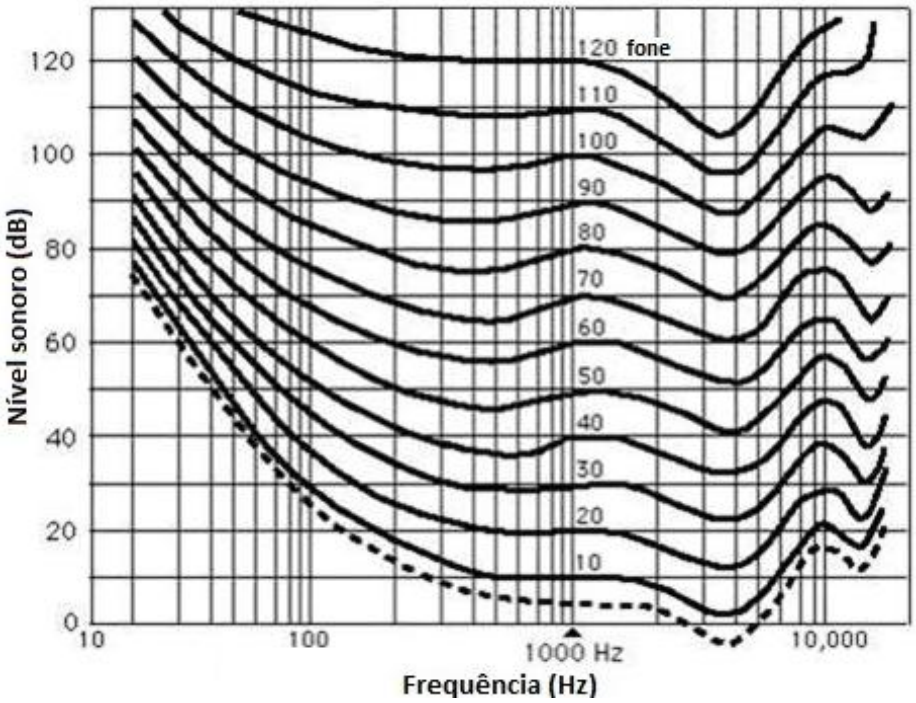

Figura 2.9. – Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone) [18]

2.9. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA CONTÍNUO EQUIVALENTE (L_{EQ}) E NÍVEL SONORO CONTÍNUO EQUIVALENTE (L_{AEQ})

Um terceiro domínio de análise dos sons ou dos ruídos, para além dos já referidos domínios da pressão sonora e da frequência, é o temporal. Este faz especial sentido tendo em conta a instabilidade temporal dos níveis de pressão sonora de grande parte dos ruídos.

Perante esta situação, o *nível de pressão sonora contínuo equivalente* (L_{eq}) é um parâmetro descritor energético que se caracteriza como sendo o nível que se actuasse constante num dado intervalo de tempo, conteria a mesma energia que o som ou ruído que se estivesse a avaliar. O L_{eq} pode ser obtido através da seguinte expressão.

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 \quad [dB]$$

Com,

$$p_0 = 2 \times 10^{-5} \ Pa$$

Onde L_{eq} é o nível de pressão sonora contínuo equivalente em *decibel*, T é o intervalo de tempo da medição, p(t) corresponde à pressão sonora instantânea registada e p_0 é a pressão sonora de referência.

O L_{eq} pode também ser apresentado de uma forma descontínua através da seguinte expressão:

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n} t_i . 10^{\frac{L_p}{10}} \right) \quad [dB]$$

Onde L_{eq} é o nível de pressão sonora contínuo equivalente em dB, L_p é o nível de pressão sonora uniforme durante o intervalo de tempo t_i e com T correspondente ao somatório dos diversos t_i.

Utilizando neste processo de análise a curva de ponderação do tipo A, ir-se-á obter, já não o L_{eq}, mas sim o L_{Aeq} (*nível sonoro contínuo equivalente*), expresso também em dB e que se pode obter pela expressão:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{n} t_i . 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \right) \quad [dB]$$

Onde L_{Aeq} é o nível sonoro contínuo equivalente em dB, L_{Ai} é o nível sonoro uniforme durante o intervalo de tempo t_i e com T correspondente ao somatório dos diversos t_i.

2.10. RUÍDO DE FUNDO

Definir o que é ruído não é simples, isso porque o que o permite distinguir do conceito de som é o agente perturbador, desagradável, que na maior parte das vezes pode variar de um indivíduo para outro, de acordo com factores psicológicos de tolerância que um possui.

Independentemente da origem do estímulo sonoro, se este for possuidor de informação útil e agradável para o receptor é definido por este como um som. Por outro lado, se o estímulo sonoro causar perturbação, for indesejável ou interferir na privacidade e comunicação do auditor, este considera-o um ruído.

O ruído de fundo corresponde ao ruído resultante, que é audível num dado local, provocado por fontes exteriores ao domínio da privacidade do receptor. Este pode ter como origens exteriores aos edifícios obras, tráfego rodoviário, ferroviário, naval e aéreo, linhas de muita alta tensão, laboração fabril, entre outros. O ruído de fundo pode também ter origem no interior dos edifícios, tendo como fontes mais comuns elevadores, canalizações e sistemas de elevação hidráulicos, portas de garagem, funcionamento de aparelhos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), circulação de pessoas em zonas comuns.

2.11. CURVAS DE INCOMODIDADE

As *curvas de incomodidade* servem para avaliar a incomodidade, de um local interior fechado, causada pelo ruído de fundo estável e contínuo provocado por equipamentos como por exemplo o funcionamento de aparelhos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC).

Em 1957, Leo L. Beranek (E.U.A.) propôs as curvas *NC* (*NOISE CRITERION*) (Figura 2.10.) onde cada uma delas é definida pelos seus níveis de pressão sonora para bandas de oitava entre os 63 Hz e os 8 kHz. Com o auxílio do método da tangente obtém-se a classificação NC para um dado ponto em estudo, ou seja, o valor NC da classificação corresponde ao valor da menor curva NC que não é excedida quando sobreposta com os valores dos níveis de pressão sonora registados no ponto em análise.

Posteriormente, em 1962, foi proposta a curva *NR* (*NOISE RATING*) (Figura 2.11.) por Kosten & Van Os. O modo de classificação com esta curva é muito semelhante à executada com a curva *NC* com a excepção de serem analisadas nove bandas de oitava entre os 32 Hz e os 8 kHz

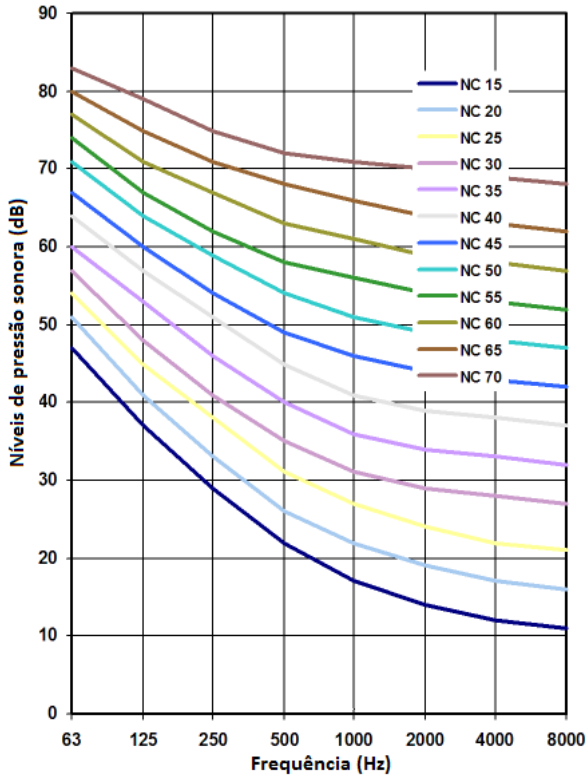

Figura 2.10. – Descrição das Curvas NC [19].

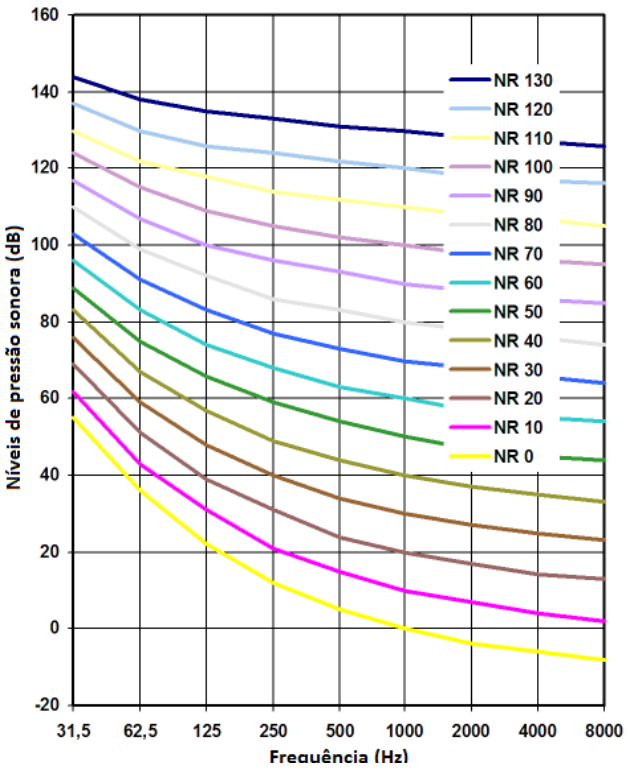

Figura 2.11. – Descrição das Curvas NR [20]

Estas duas curvas apresentadas, as mais utilizadas na actualidade, em conjunto com os seus valores limites (Quadros 2.1. e 2.2.) para diversas situações distintas, constituem, um óptimo meio de classificação da incomodidade de um espaço devido ao seu ruído de fundo.

Quadro 2.1. – Valores limites máximos de NC para algumas situações [19].

Tipo de espaço	Nível NC máximo	Tipo de espaço	Nível NC máximo
Apartamentos	25	Escolas	
Salas de reunião	25	Estúdio de gravação	15
Igrejas	30	Anfiteatros e salas de aula	25
Tribunais	30	Salas de audiovisual	30
Fábricas	45	Bibliotecas	35
Escritórios		Residências	25
Salas de conferência	25	Restaurantes, Cantinas	40
Privados	30	Ginásios	45
Open space	35	Hotéis	
Hospitais e Clínicas		Quartos ou suites individuais	25
Quartos privados, Blocos operatórios	25	Sala de reuniões ou banquetes	25
Enfermarias, Corredores	30	Corredores e entradas	35
Laboratórios, Áreas públicas	35	Áreas de serviço e apoio	40

Quadro 2.2. – Valores limites máximos de NR para algumas situações [20].

Classificação	Situações
NR 25	Salas de concerto, estúdios de rádio e de gravação, igrejas;
NR 30	Residências particulares, hospitais, teatros, cinemas, salas de conferências;
NR 35	Bibliotecas, museus, tribunais, escolas, enfermarias, hotéis;
NR 40	Corredores, restaurantes, escritórios, lojas;
NR 45	Supermercados, cantinas;
NR 50	Piscinas;
NR 60	Obras de engenharia leve;
NR 70	Fundições, obras de engenharia pesada.

2.12. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora consiste na conversão de parte da energia sonora que incide sobre um dado material em outra modalidade de energia, que geralmente é a térmica. Isto acontece, dado que a onda sonora ao penetrar num material poroso, a amplitude de vibração das moléculas de ar verificada inicialmente é amortecida progressivamente por fricção contra as superfícies das partículas que formam a estrutura porosa.

Esta propriedade quantifica-se através do coeficiente de absorção sonora (α):

$$\alpha = \frac{Energia\ absorvida}{Energia\ incidente}$$

O coeficiente de absorção sonora (α) é assim, igual à razão entre a energia absorvida pelo material e a energia total incidente e pode tomar valores entre 0 e 1.

Um material com um coeficiente de absorção sonora próximo de 0 equivale a um material muito reflector como é o exemplo do mármore polido. Por sua vez, um material com um coeficiente de absorção sonora elevado corresponde a um material absorvente como é exemplo da lã de rocha que pode tomar valores de α superiores a 0,60.

Este coeficiente trata-se de um parâmetro que apesar de ser uma propriedade transversal a quase todos os materiais existentes, num dado material, não é constante perante a variação da frequência da emissão sonora. Dada essa variação, para cada material em específico, é habitual apresentar o coeficiente de absorção sonora para seis bandas de frequência de uma oitava sendo elas: 125, 250, 500, 1.000, 2.000 e 4.000 Hz.

Perante a necessidade hipotética da obtenção da máxima absorção sonora em todo o espectro de frequências será necessário utilizar materiais ou sistemas absorventes sonoros de três categorias diferentes:

– *Porosos e fibrosos* que têm a sua máxima eficácia nas altas frequências (tecidos e alcatifas, massas porosas, fibras minerais, materiais plásticos, aglomerados de cortiça, etc.);

– *Ressoadores* que são mais eficazes nas médias frequências (Ressoador de cavidade ou de Helmoltz e ressoadores agrupados);

– *Membranas* cuja sua máxima eficácia é nas baixas frequências (membranas ressonantes e painéis vibrantes).

Por outro lado e para uma determinada frequência, o coeficiente de absorção de um qualquer material também varia consoante o ângulo de incidência das ondas sonoras. Por esta razão, o método mais eficaz e útil para determinar o coeficiente de absorção sonora é o da câmara reverberante que se rege pelas determinações da norma internacional ISO 354. A câmara reverberante é um grande compartimento para uso experimental que dispõe de todas as superfícies envolventes completamente lisas e desprovidas de qualquer adereço ou mobiliário para criar uma muito elevada reverberação e um campo difuso. Uma desvantagem deste método é a de que necessita de uma amostra de grandes dimensões (superior a 10 m^2) [21].

Existe também casos em que materiais muito absorventes apresentam resultados de α ligeiramente superiores a 1 o que é uma impossibilidade física. Isto acontece exclusivamente devido à metodologia da sua determinação experimental na câmara reverberante.

Assim, a absorção sonora de um compartimento minimiza a reflexão das ondas sonoras nas superfícies existentes diminuindo a reverberação do ambiente. Para além da desejável diminuição dos níveis de pressão sonora do compartimento, também pode conduzir a uma melhoria do nível de inteligibilidade da palavra.

2.13. REVERBERAÇÃO

Uma fonte sonora ao emitir um estímulo sonoro, num compartimento fechado, pode criar dois tipos de ondas sonoras: de origem directa ou reflectida. As de origem directa são as que percorrem o percurso mais curto a partir da fonte até atingirem o ouvinte. Já no caso das ondas reflectidas, estas só atingem o receptor após percorrerem caminhos diferentes com distâncias diferentes R_i como se verifica na Figura 2.12. O som, ao percorrer estes últimos caminhos mais longos que o caminho directo, sofre uma ou múltiplas reflexões nas superfícies do compartimento podendo perder energia se estas forem absorventes.

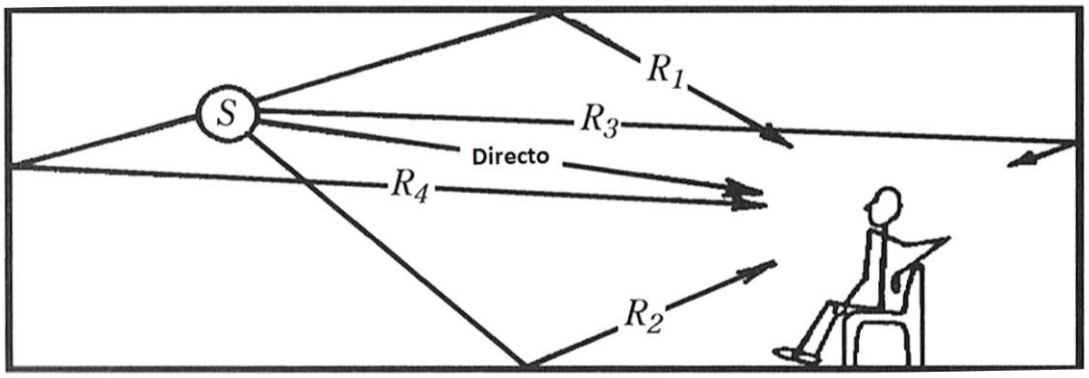

Figura 2.12. – Ondas sonoras directas e reflectidas [22].

Após uma fonte sonora deixar de emitir o sinal sonoro, devido a esta diferença de percursos, as ondas reflectidas demoram mais tempo a chegar ao receptor do que as ondas directas dando origem ao fenómeno de prolongamento do som a que se dá o nome de reverberação.

O atraso temporal das ondas reflectidas não pode ser maior que 50 ms para que o ouvido humano reconheça as ondas reflectidas como prolongamento do som inicial. Caso isto não aconteça e a diferença temporal seja superior a 50 ms o ouvido humano já consegue distinguir claramente a reflexão que se passa a denominar de eco.

A reverberação pode trazer consequências negativas na qualidade acústica de uma sala, porque as ondas reflectidas podem mascarar o som directo prejudicando assim a perceptibilidade da mensagem sonora em questão.

Para quantificar-se o efeito da reverberação com um único parâmetro utiliza-se o tempo de reverberação (TR) que corresponde ao intervalo de tempo que qualquer som demora a decair 60 dB no nível de pressão sonora. Na realidade é de difícil avaliação o decaimento de 60 dB por o ruído de fundo se sobrepor antes de este decaimento ser atingido pelo que se opta por um decaimento de 30 ou 20 dB extrapolando de seguida esse valor para os 60 dB. Por este método o tempo de reverberação passa a designar-se TR30 e TR20 respectivamente (Figura 2.13.).

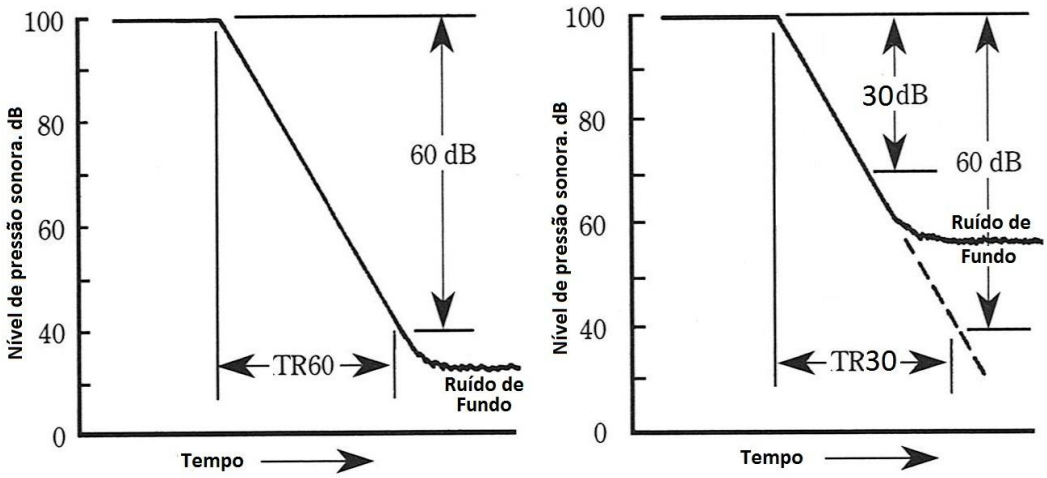

Figura 2.13. – Decaimento de 60 dB para definição do TR por valor teórico (à esquerda) e por extrapolação (à direita) [22].

O físico americano W. C. Sabine, em 1898, tornou-se a primeira pessoa a conseguir determinar o tempo de reverberação e a relaciona-lo com a absorção sonora e o volume ao propor a agora conhecida fórmula de Sabine:

$$TR = \frac{0{,}16 \times V}{\sum \alpha_i \times S_i + mV} \quad [s]$$

Onde TR é o tempo de reverberação em segundos, V é o volume do compartimento em estudo em m^3, α é o coeficiente de absorção sonora do material i, o S é a superfície real do material i em m^2 e m é a absorção sonora do ar em m^{-1}. Ao somatório de produtos em denominador atribui-se o nome de absorção sonora equivalente (*A*) em m^2.

2.14. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Uma das consequências mais importantes do ruído presente num compartimento é que impede a correcta compreensão das palavras proferidas no espaço. A inteligibilidade da palavra é assim definida por Levitt e Webster como sendo o entendimento das palavras faladas [23].

A inteligibilidade da palavra, no caso das igrejas em que a comunicação verbal é muito importante, é um factor que não se pode desprezar sendo afectado principalmente pelo nível da intensidade sonora, pela frequência, tempo de reverberação, ruído de fundo, distância entre o receptor e emissor, direccionalidade e duração da emissão.

As palavras são compostas por consoantes e vogais que por sua vez têm características acústicas distintas. As consoantes são emitidas geralmente em frequências mais elevadas, entre 3500 e 7000 Hz, enquanto as vogais são emitidas em frequências mais baixas, entre 150 e 500 Hz. Esta emissão em altas frequências das consoantes aliada a uma emissão mais curta e menos intensa (em média menos 70 ms e menos 12 dB) do que as vogais, condiciona ainda mais a inteligibilidade da palavra dado que os sons agudos são facilmente mascaráveis por absorção.

Para a existência de uma boa inteligibilidade da palavra, para além da necessidade de um baixo nível de ruído de fundo para não poder mascarar as consoantes das palavras, o tempo de reverberação também tem que ser reduzido para que as reflexões nas superfícies do compartimento não mascarem também as consoantes. Para além destas condicionantes a inteligibilidade da palavra também diminui com o aumento da distância ao orador.

Para caracterizar objectivamente a inteligibilidade da palavra foi proposto em 1947 por French e Steinberg o método *AI* (índice de articulação) e surgiu em 1969 a ANSI S.3.5 que o viria a normalizar. O valor de *AI* obtém-se através da divisão por 10.000 do somatório das diferenças, pesadas através da importância relativa de cada banda de frequências (p), entre o nível de conversação de referência (nc) e o ruído de fundo (rf) no local (Quadro 2.3.).

Em função do valor de *AI* obtido consegue-se caracterizar subjectivamente a inteligibilidade da palavra bastando para isso consultar o Quadro 2.4.

Quadro 2.3. – Valores do nível de conversação (nc) e seus correspondentes pesos de ponderação consoante a frequência para a obtenção do parâmetro *AI* [11].

Frequência (Hz)	250	500	1.000	2.000	4.000
Nível de conversação (nc)	72	73	78	63	58
Peso (p)	18	20	75	107	83

Quadro 2.4. – Percepção subjectiva para a inteligibilidade da palavra em função dos valores numéricos do *AI* [11]

AI (Índice de articulação)	Grau de inteligibilidade
<0,05	Nula
[0,05 – 0,20[	Fraca
[0,20 – 0,30[	Boa
≥ 0,30	Muito boa

Em 1997, através da revisão da norma ANSI S.3.5 [24], procedeu-se a um melhoramento do método *AI* pelo *SII (Speech Intelligibility Index)* onde passou a existir quatro métodos de cálculo diferenciáveis entre si pelo número e largura das bandas de frequências utilizadas. Por ordem decrescente de precisão, os métodos são:

- Bandas de frequência crítica (21 bandas de frequência);
- Bandas de frequência de um terço de oitava (18 bandas de frequência);
- Igual contributo de bandas de frequência crítica (17 bandas de frequência);
- Bandas de frequência de uma oitava (6 Bandas de frequência).

O valor máximo que o *SII* pode tomar é 1,0, significa que todas as palavras emitidas pelo orador atingem o ouvinte, enquanto o valor mínimo, 0,0, significa que não é audível pelo ouvinte nenhum sinal da fala do emissor. Assim sendo, o valor de 0,5 sugere que só metade dos sinais de fala, emitidos pelo orador, chega ao ouvinte.

O *SII* inclui, adequadamente, a reverberação, os ruídos e as distorções, que são contabilizadas na função de transferência de modulação. Operadores experientes, utilizando este método, podem diagnosticar a origem de uma perda de inteligibilidade [25].

O *SIL (Speech Interference Level)* ou nível de interferência na conversação é um outro método de caracterização objectiva da inteligibilidade da palavra. Este foi proposto em 1971 e normalizado através da ANSI S.3.14-1977 tendo sido revista já em 2006 pela norma ANSI S.12.65 [26]. Este método consiste na determinação do valor de *SIL* através da média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo em cada uma das bandas de oitava dos 500 Hz aos 4000 Hz.

No entanto, existe uma versão deste índice denominado *PSIL (preferred speech interference level)* que considera só as três bandas de oitava centradas em 500, 1000 e 2000 Hz, respectivamente, tornando-se mais apropriado para a análise da fala [26].

$$PSIL = \frac{RF_{500\,Hz} + RF_{1\,kHz} + RF_{2\,kHz}}{3} \quad [dB]$$

O Quadro 2.5. apresenta os valores de *PSIL* (em dB) para o qual a comunicação da palavra é, no limite, possível (M: Masculino; F: Feminino).

Em 1971 surge o *RASTI (Rapid Speech Transmission Index)* que corresponde ao método simplificado de calcular o *STI (Speech Transmission Index)*. É actualmente o método mais utilizado para avaliar a inteligibilidade da palavra de forma objectiva podendo ser relacionado com uma escala subjectiva de inteligibilidade da palavra (Quadro 2.6.).

O *RASTI* toma valores entre “0” e “1”, onde “0” corresponde a uma inteligibilidade nula enquanto “1” corresponde a uma inteligibilidade da palavra perfeita o que na realidade é impossível de obter.

O método tem por base a emissão de um sinal sonoro, que cobre a gama de frequências utilizadas na palavra e origina as mesmas flutuações de intensidade da fala, por parte de uma fonte sonora que é posteriormente recebido por um equipamento receptor que regista o grau de modificação do sinal sonoro num determinado ponto [27].

Quadro 2.5. – *PSIL* (dB) para o qual a comunicação da palavra é, no limite, possível (M: Masculino; F: Feminino) [11].

Distância (m)	PSIL (dB)							
	Esforço de Voz							
	Normal		Elevado		Muito Alto		Gritando	
	M	F	M	F	M	F	M	F
0,3	68	63	74	69	80	75	86	81
1,0	58	53	64	59	70	65	76	71
2,0	52	47	58	53	64	59	70	65
3,0	48	43	54	49	60	55	66	61
4,0	46	41	52	47	58	53	64	59

Quadro 2.6. – Escala de *RASTI* [27].

RASTI	Inteligibilidade da Palavra
[0,00 – 0,30[	Má
[0,30 – 0,45[	Medíocre
[0,45 – 0,60[	Suficiente
[0,60 – 0,75[	Boa
[0,75 – 1,00]	Excelente

2.15. CORRECÇÃO ACÚSTICA E ISOLAMENTO SONORO

Na acústica de edifícios, importa diferenciar o conceito de *correcção acústica* do conceito de *isolamento sonoro*. O primeiro conceito é referente à correcção de um compartimento para o som aí emitido enquanto o segundo conceito refere-se ao tratamento de um compartimento para ruídos de/para locais contíguos.

Como exemplos de locais onde a aplicação do conceito de correcção acústica é bastante importante, temos as salas de aula, salas de concerto, cinemas, auditórios, etc.. O conceito de isolamento sonoro já é mais importante no caso concreto das discotecas onde o ruído aí produzido pode prejudicar os vizinhos contíguos.

Para a execução da correcção acústica de um compartimento utilizam-se sistemas ou materiais porosos e fibrosos, ressoadores e membranas, já descritos anteriormente no subcapítulo 2.12., em quantidades e disposições adequadas.

Na teoria do isolamento sonoro é necessário distinguir dois casos, sendo eles o isolamento sonoro a:

– Ruídos de percussão, em que há solicitação mecânica directa da fonte de irradiação sobre os elementos de construção;

– Ruídos de condução aérea, em que a transmissão é feita unicamente por vibração do ar.

Estes dois ruídos ainda se podem subdividir consoante duas vias de transmissão. A via directa, quando o ruído atravessa unicamente o elemento separador (parede, pavimento, etc.) de dois espaços contíguos para atingir o receptor e a via marginal, quando o ruído para atingir o receptor, para além de atravessar o elemento separador, também atravessa um ou mais elementos construtivos adjacentes (Figura 2.14.).

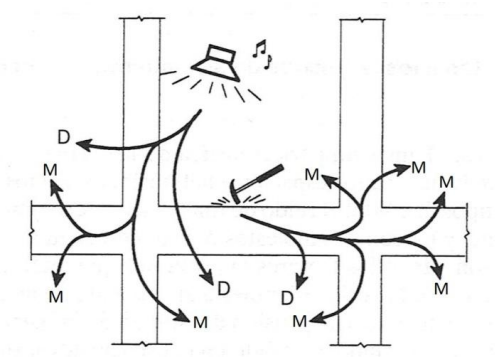

Figura 2.14. – Transmissão directa (D) e marginal (M) [23].

No caso do comportamento acústico a ruídos aéreos de um elemento construtivo, este depende essencialmente da sua massa e/ou da existência da duplicação física do material separador.

O parâmetro que caracteriza o isolamento sonoro a ruídos aéreos de um elemento é o *R* (redução sonora, em dB) que se define como:

$$R = 10\log\frac{1}{\tau} \quad [dB]$$

Onde τ é o coeficiente de transmissão que se define como sendo a razão da energia sonora transmitida face à incidente.

Também é possível obter-se a redução sonora *in situ* (R') ou aparente através da seguinte expressão:

$$D = L_1 - L'_2 = R' + 10\log\frac{A}{S} \quad [dB]$$

Onde *D* corresponde ao isolamento sonoro bruto em dB, L_1 é o nível médio de pressão sonora no local emissor em dB, L'_2 é o nível médio de pressão sonora no local receptor incluindo o contributo das transmissões marginais em dB, *A* corresponde à área de absorção sonora equivalente existente no compartimento receptor em m^2 e *S* à superfície do elemento de separação em m^2.

Devido à grande influência que a absorção sonora do compartimento receptor tem nesta questão, é necessário corrigir o isolamento sonoro bruto (*D*) para um tempo de reverberação no compartimento receptor padronizado para T_0 igual a 0,5 s, obtendo-se por fim um isolamento sonoro padronizado (*DnT*) como se demonstra na seguinte expressão:

$$DnT = L_1 - L'_2 + 10\log\frac{T}{T_0} = R' + 10\log\frac{0{,}16V}{S.T_0} \quad [dB]$$

Onde *DnT* é o isolamento sonoro padronizado em dB, *T* equivale ao tempo de reverberação do compartimento receptor em s, T_0 é o tempo de reverberação padronizado igual a 0,5 s e *V* corresponde ao volume do compartimento receptor em m^3.

Para uma comparação mais fácil de valores entre isolamentos sonoros ou com uma potencial legislação existente surge a necessidade de utilizar um só valor que caracterize de uma maneira mais simplista os vários valores que o *DnT* possui, um para cada banda de frequência.

Com o auxílio de uma curva de referência (Quadro 2.7.) que consta na norma NP EN ISO 717-1 [28] e após o seu ajuste aos valores de *DnT*, de acordo com a mesma norma, obtêm-se o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea (*DnT,w)* lendo o valor da ordenada da curva de referência na banda de frequência de 500 Hz [28].

Quadro 2.7. – Valores da curva de referência em bandas de terço de oitava [28].

Banda de frequências (Hz)	Valores de referência (dB) (exemplo)	Banda de frequências (Hz)	Valores de referência (dB) (exemplo)
100	33	630	53
125	36	800	54
160	39	1.000	55
200	42	1.250	56
250	45	1.600	56
315	48	2.000	56
400	51	2.500	56
500	52	3.150	56

No caso do isolamento sonoro, este varia também significativamente ao longo do espectro de frequências evidenciando-se cinco importantes zonas (Figura 2.15.):

- Zona A que é controlada pela rigidez do elemento;
- Zona B que é controlada pelo amortecimento e onde o elemento construtivo se encontra em ressonância;
- Zona C que é controlada pela massa do elemento;
- Zona D que corresponde à existência da frequência crítica;
- Zona E para frequências superiores à frequência crítica.

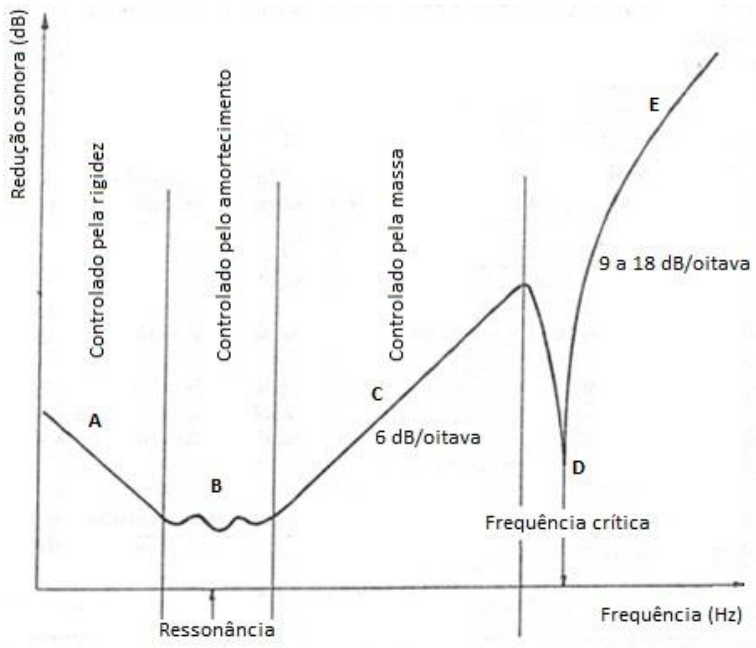

Figura 2.15. – Comportamento típico dos valores de R com a frequência de qualquer elemento construtivo [29].

Os ruídos de percussão são aqueles que têm origem de forma determinante, para o efeito de propagação, na solicitação mecânica directa da fonte sobre os elementos construtivos. Existem dois tipos de fontes de ruídos de percussão:

– As fontes estáticas, como é exemplo os sistemas de bombagem, ventoinhas, ar condicionados, máquinas de lavar, etc.;

– As fontes de impacto, como é exemplo o bater de portas, martelar, queda de objectos, passos, saltos, queda de lixo em condutas, etc..

Ao contrário do que acontece com os ruídos aéreos, ao se actuar na massa do elemento construtivo, no caso dos ruídos de percussão, não tem grande efeito na diminuição da propagação do ruído. Deve-se sim, actuar sobre os revestimentos das superfícies, tornando-as resilientes, ou sobre a continuidade dos elementos construtivos, cortando-os para obter um isolamento suficiente por redução da sua capacidade de propagação do estímulo.

Para controlar a transmissão de ruído de percussão pode-se actuar em três grandes áreas [11]:

- Na fonte:
  - – Colocar a fonte de vibração afastada da área onde baixos níveis sonoros são desejados;
  - – Reduzir a potência da fonte de vibração;
  - – Providenciar isolamento à vibração entre a fonte e a estrutura;
  - – Aplicar camadas resilientes em superfícies sujeitas a impacto;
  - – Reduzir a velocidade das massas de impacto;
  - – Dar rigidez à estrutura nos pontos de excitação.
- No caminho de transmissão:
  - – Isolar a fonte de vibração de áreas onde são desejados baixos níveis sonoros (por descontinuidades estruturais; completa separação estrutural; etc.);
  - – Separação dinâmica de componentes (por camada resiliente, ligação flexível, etc.);
  - – Aplicar tratamento para aumento de amortecimento na estrutura que transmite a vibração).
- Perto do receptor:
  - – Cobrir as superfícies radiantes (com tecto suspenso resilientemente, etc.);
  - – Reduzir as vibrações de superfícies que radiam som por aplicação de capas amortecedoras.

3
ACÚSTICA DE IGREJAS

3.1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que é por meio dos símbolos imortalizados pelas artes plásticas e arquitectónicas que um povo escreve a sua História, transmitindo às gerações futuras os seus conhecimentos. Deste modo, pode-se avaliar a importância histórica e arquitectónica das inúmeras igrejas existentes nas cidades da Europa Ocidental [30].

Estas são frequentemente reabilitadas para preservar o seu valor histórico, onde, por vezes, lhe são dados outros fins como por exemplo teatros, auditórios e salas de conferências. Neste processo de transformação de uso muitas vezes surgem problemas funcionais que podem ser explicados, em alguns casos, pela falta de consideração, por parte dos arquitectos, da acústica que deveria merecer um estudo detalhado para as novas utilizações do espaço em questão. Por outro lado, a má acústica de uma igreja reabilitada pode surgir com surpresa para os arquitectos que ao limitarem-se a reabilitarem o espaço interior da igreja, um local inicialmente concebido para pregar a "Palavra de Deus", não se apercebem que poderá ter agora como função a audição da música [30].

Na realidade, se se entender a igreja como uma reunião ou assembleia para os fiéis, a inclusão da palavra falada, principalmente da pregação, deve ter sido uma das prioridades nas primeiras comunidades cristãs (escreve S. Paulo: "*A fé depende de ouvir a mensagem, e a mensagem é ouvida mediante a palavra de Cristo*") [Romanos 10:17]. No entanto, por causa da falta de uma arquitectura específica e especializada no intervalo de tempo que separa o Odeón grego (Figura 3.1.) do auditório ou sala de música dos dias modernos, a igreja, destaca-se entre os diferentes tipos de edifícios como o lugar que, por um tempo, assistiu ao nascimento e ao desempenho de inúmeras composições musicais [30].

Muitos historiadores acreditam que as igrejas têm desempenhado um papel importante na evolução da música. Por isso, é interessante que, após a consulta de várias fontes documentais sobre a história da arquitectura e da história da música, tem-se encontrado poucas avaliações ou referências à acústica de igrejas. A acústica é um dos aspectos fundamentais que tem sido negligenciado [30].

Figura 3.1. – Odeón de Herodes, localizado na vertente sul da Acrópole de Atenas, dedicado a competições de canto, séc. II [31].

3.2. A ACÚSTICA DE DIFERENTES TIPOS DE IGREJAS

3.2.1. IGREJAS CRISTÃS PRIMITIVAS E MEDIEVAIS

Antes de Cristo não havia Igreja como a conhecemos. A igreja cristã primitiva realizava as suas reuniões em casas particulares (*domus ecclesiae*) ou em locais já existentes com capacidade adequada para se efectuar as reuniões. Após o *Édito de Milão*[1] no ano 313, o número de devotos começou a crescer devido ao apoio do Imperador Constantino que ajudou a proclamar abertamente esta religião. Devido a este aumento da população cristã a Igreja Católica projectou e construiu inúmeras casas de culto que muitas vezes eram o centro de uma cidade ou localidade. A maior parte destas igrejas primitivas eram concebidas e/ou supervisionados pelos monges. Os monges eram na realidade os Arquitectos do santuário [30, 32].

Como um modelo para as suas igrejas, entendidas como locais para a reunião de uma congregação de crentes, os cristãos escolheram a basílica romana civil, que tinha um formato em cruz. Este projecto mostrou-se ideal para as aspirações de evangelização da igreja: o ensino religioso, a propagação da fé através da pregação, e a conversão de um grande número de pessoas. A separação entre a "igreja de Deus", associada ao clero, e a "igreja do povo", associada aos leigos, pode ser vista em duas partes fundamentais da basílica: o presbitério e a nave respectivamente [30].

[1] O Édito de Milão, promulgado a 13 de Junho de 313 pelo imperador Constantino (306-337), assegurou a tolerância e liberdade de culto para com os cristãos, alargada a todo o território do Império Romano. Após um período de grande intolerância e de perseguições oficiais aos cristãos, a medida tomada por Constantino teve enormes consequências na História do Ocidente, marcando o início da aproximação e identificação do Império com o cristianismo, facto que conduzirá, em breve, à proclamação do cristianismo como religião oficial do Estado, por Teodósio, em 380. Dois anos antes em 311, já Galério havia reconhecido oficialmente o cristianismo no Oriente. Os costumes cristãos impõem-se rapidamente na vida social e política. O poder já não persegue os cristãos, favorece-os e ajuda-os. Passa a ser um elemento de coesão do Império, um factor de unidade do Ocidente. Os clérigos beneficiam de imunidade fiscal e é reconhecida a jurisdição episcopal. Constantino estipula ainda o descanso dominical e proíbe os sacrifícios sanguinários pagãos. Em 337, à hora da morte, o imperador Constantino foi baptizado pelo bispo Eusébio de Cesareia [33].

O sistema estrutural das basílicas do Império Romano e posteriormente cristãs era porticado com telhados de madeira que transmitiam pequenas cargas e pressões. A única parte abobadada era a abside. A proporção adequada e harmoniosa, com telhados de madeira relativamente baixos e a ausência de grandes secções reflectoras eram propícias à acústica interior, muito melhor do que o que se viria a verificar nas igrejas românicas medievais e góticas [30].

Os monges com o decorrer das suas construções haviam aprendido alguns artifícios como a construção de pilares de apoio à estrutura ocos, onde perto da parte superior e inferior de cada pilar faziam buracos. Os buracos na parte inferior eram fechados mas poderiam ser abertos a qualquer momento. Quando a igreja era concluída um selecto número de monges na posse de um grande número de diapasões, através do método de tentativa e erro, tinham a capacidade de ajustar a acústica do espaço [30].

Por vezes, a nave principal das igrejas tinha um tecto de caixotões de madeira horizontal, que era muito apropriado a difundir o som interior.

A transição dos primeiros cristãos para a arquitectura românica foi efectuada muito lentamente. Por causa dos conflitos civis e das perturbações existentes no contexto medieval turbulento, muitas das treliças dos telhados de madeira de muitas igrejas arderam, causando danos enormes. Perante esta situação, os construtores românicos começaram a projectar um tecto mais resistente e durável ao fogo. Foi então escolhida uma estrutura feita basicamente de pedra, com um tecto abobadado (Figura 3.2.) [30].

Figura 3.2. – Tecto abobadado em pedra igreja de S. Vicente de Cardona, Espanha [34].

Esta decisão alterou em muito as condições acústicas no início das igrejas cristãs. A substituição dos telhados de madeira das basílicas pelas reflectoras abóbadas em pedra da igreja medieval foi um grande passo para trás no contexto da acústica [30].

No entanto, em contraste com as primitivas igrejas cristãs, a inteligibilidade da palavra já não era de grande importância na igreja medieval. Os fiéis, na sua grande maioria, já não compreendiam o latim que era a língua litúrgica. A pregação tinha praticamente desaparecido, dando lugar a uma religiosidade mais natural baseada no mistério. As igrejas foram gradualmente perdendo o seu papel como lugar para reunião e participação dos crentes tornando-se em templos sagrados para celebrações de rituais solenes oficiados pelos seus ministros [30].

Por outro lado, a sonoridade dessas igrejas era muito apropriada para a interpretação do canto gregoriano. As notas prolongadas do canto devido aos elevados tempos de reverberação, produziam uma continuidade no som e uma sensação de audição de harmónicos que não estavam presentes na melodia mas que foram criados graças à acústica do grande espaço reverberante da igreja [30].

A evolução da igreja românica para a catedral gótica piorou ainda mais as condições acústicas. O grande volume da igreja, a altura da nave principal, as grandes paredes interiores reflectoras e as altas abóbadas produziam bastantes ecos para além do excesso de reverberação existente [30].

No entanto, os vitrais, quando em área suficiente, tinham um efeito benéfico. As capelas laterais, introduzidas no período gótico e depois desenvolvidas na Renascença, actuaram como ressoadores, contribuindo para a absorção e difusão, especialmente para o som de baixa frequência. Além disso, estas capelas são frequentemente ornamentadas, o que contribui ainda mais para a sua absorção e difusão [30].

Para além destas excepções, quase não havia mais absorção sonora na catedral gótica, do que a absorção proporcionada pela lotação da catedral durante os serviços religiosos. Ainda não havia lugares sentados para a congregação durante este período. Os bancos foram introduzidos pelos protestantes por causa dos seus longos serviços religiosos e a Igreja Católica começou a usá-los mais tarde [30].

Perto do fim da Idade Média, no século XIII, um número de ordens mendicantes surgiu em resposta às exigências de uma maior espiritualidade na igreja. Os franciscanos e os dominicanos foram duas das mais significativas dessas ordens [30].

Apesar das ordens mendicantes não terem um tipo específico de construção de igrejas e os princípios que regiam a construção dos seus templos dependerem muito das tradições de construção do lugar, o seu espírito de reforma levou-os a conceber as suas igrejas com dois objectivos principais em mente, a liturgia e pregação. Os dominicanos estabeleceram um limite para o tamanho das suas igrejas, principalmente a altura da sua nave. Para os franciscanos, a única parte da igreja que deveria ser abobadada era a abside. As naves das igrejas geralmente tinham um tecto de madeira assente em arcos transversais, embora, em muitos casos, estes telhados foram substituídos por abóbadas. Além disso, os franciscanos escolheram o modelo de nave única (Figura 3.3.) em vez do modelo nave tripla. Esta concessão em espaço aberto facilitou a audição e a visão do pregador por parte da congregação [30].

Estas ordens pregavam na linguagem comum, em vez do antigo latim, o que levou a um melhor entendimento por parte da congregação, provocando um renascimento da pregação.

Figura 3.3. – Interior amplo da igreja de Santo Domingo de Tui, Espanha [35].

3.2.2. IGREJAS RENASCENTISTAS E TRIDENTISNAS

Toscana, uma região italiana, foi o centro artístico do Quattrocento (época do Renascimento, século XV) e Alberti[1] e Brunelleschi[2] foram os seus dois grandes arquitectos. Eles desenvolveram um tipo de igreja com um plano central e outro tipo de igreja com uma planta longitudinal. Estes dois tipos serviram como modelos para o renascimento da arquitectura religiosa [30].

---

[1] Leon Battista Alberti (1404 - 1472) foi um arquitecto e teórico de arte: um humanista italiano, ao estilo do ideal renascentista e filósofo da arquitectura e do urbanismo, pintor, músico e escultor. Sua vida é descrita em *Vite*, de Giorgio Vasari. Filho ilegítimo de um florentino exilado em Génova, pertencente a uma família de mercadores. Estudou Direito na Universidade de Bolonha. Sua carreira jurídica foi abreviada em consequência de uma doença que lhe provocou a perda parcial da memória. Os interesses de Alberti viraram-se, então, para a ciência e para a arte. Leitor atento de Vitrúvio, escreveu seu célebre tratado "*De re aedificatoria"* (impresso depois de sua morte) tomando como base de referência a arte da Antiguidade. Baseava na música dos números a harmonia das proporções e concebia o edifício como um todo, solidário em cada um de seus elementos. Deve-se-lhe a frontaria de Santa Maria Novella e o Palácio Rucellai, em Florença; San Sebastiano e Sant'Andrea, em Mântua; e o Templo Malatesta, de Rimini: a Igreja de São Francisco, à qual deu por fachada um arco de triunfo. Uma célebre frase sua foi *Uma obra está completa quando nada pode ser acrescentado, retirado ou alterado, a não ser para pior*. Sabe-se que de 1432 a 1434 viveu em Roma, e mais tarde em Florença, Bolonha, Mântua e Ferrara onde trabalhou também como arquitecto. A partir de 1443 ficou mais tempo em Roma, onde se concentrou no estudo do legado clássico da cidade, cujo resultado surgiu em seu livro «*Descriptio urbis Roma*» (Descrição da cidade de Roma). Tornou-se assistente do papa Nicolau V, aconselhando-o em numerosos projectos, como o desenho da reforma da igreja de Santo Estêvão Redondo (Santo Stefano Rotondo) e nos novos planos do Vaticano. Em Roma, em 1452, completou seu principal trabalho teórico, «*De re aedificatoria libri decem*» ou Dez Livros sobre Arquitectura, o primeiro grande tratado moderno de arquitectura [36].

[2] Filippo Brunelleschi (1377 - 1446) foi um arquitecto renascentista. Começou a vida como ourives e foi, posteriormente, um arquitecto, o pioneiro desta arte na Renascença. A sua obra mais conhecida é a cúpula da catedral (Duomo em italiano) Santa Maria del Fiore, em Florença. Construída em 1434, foi a primeira cúpula de grandes dimensões, erguida na Itália, desde a Antiguidade sobre uma enorme base octogonal. Brunelleschi também projectou o Hospital dos Inocentes, que era caracterizado pela sua proporção e pela repetição de colunas, as quais constituíam o elemento de sustento e a sua planta de cruz latina. Esta foi considerada a primeira manifestação de uma nova arquitectura, clara e organizada de uma forma racional. Outra grande obra deste artista é o Palácio Pitti, sendo este o protótipo do estilo palaciano renascentista. As igrejas de São Lourenço e Santo Espírito também são obras de Brunelleschi, tal como a Capela Pazzi, que é caracterizada pela sua estrutura geométrica e, é de salientar ainda que só os elementos arquitectónicos participavam, ou seja, todos os elementos supérfluos foram dispensados: nem retábulos, nem imagens de santos (excepto uns medalhões de Donatello) [37].

Na igreja de S. Lourenço em Florença (Figura 3.4.), Brunelleschi recuperou o tipo de basílica utilizada pelos primeiros cristãos onde a principal inovação foi a introdução de capelas laterais. As naves das igrejas tinham tectos em caixão em madeira, as capelas laterais eram abobadadas e no cruzamento existia uma cúpula.

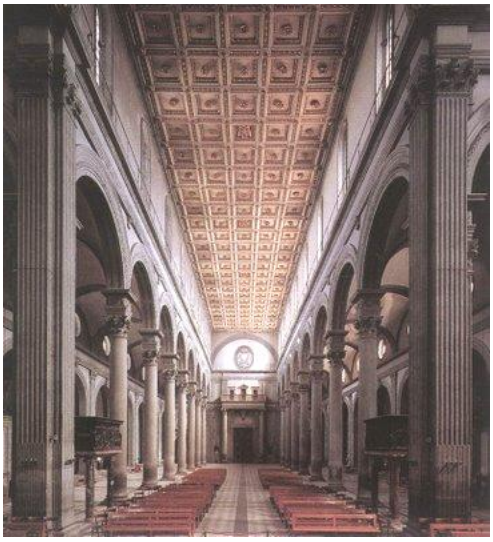

Figura 3.4. – Interior da igreja de S. Lourenço em Florença [38].

Do ponto de vista da acústica, o triunfo da horizontalidade sobre a sempre crescente verticalidade do gótico, as proporções mais harmoniosas, a nave principal com um tecto de madeira e a ausência de paredes com grande superfície reflectora só poderia ter um efeito benéfico [30].

Alberti defendia, no entanto, que as igrejas, em contraste com as basílicas, deveriam ter os tectos abobadados. Isto não significa que ele ignorasse os efeitos benéficos dos telhados de madeira e os efeitos negativos das abóbadas na acústica, porém, em sua opinião e na opinião da sua geração, a acústica da igreja não era uma prioridade [30].

A mudança substancial no consenso sobre a acústica de igrejas ocorreu na segunda metade do século XVI e foi influenciada por decisões do Concílio de Trento[3] e pela importância que o Conselho fixou na pregação como instrumento da Contra-Reforma[4] [30].

---

[3] O Concílio de Trento, realizado de 1545 a 1563, foi o 19º concílio ecuménico. É considerado um dos três concílios fundamentais na Igreja Católica. Foi convocado pelo Papa Paulo III para assegurar a unidade da fé (sagrada escritura histórica) e a disciplina eclesiástica, no contexto da Reforma da Igreja Católica e a reacção à divisão então vivida na Europa devido à Reforma Protestante, razão pela qual é denominado como Concílio da Contra-Reforma. Foi o mais longo concílio da história da Igreja. Emitiu numerosos decretos disciplinares e especificou claramente as doutrinas católicas quanto à salvação, os sacramentos e o cânone bíblico, em oposição ao protestantismo. Unificou o ritual da missa de rito romano, abolindo as variações locais, instituindo a chamada "Missa Tridentina" (referência à cidade de Trento, onde o concílio transcorreu). Regulou as obrigações dos bispos. Confirmou a presença de Cristo na Eucaristia. Foram criados seminários como centros de formação sacerdotal e reconheceu-se a superioridade do papa sobre a assembleia conciliar. Foi instituído o índice de livros proibidos (o "*Index Librorum Prohibitorum*") e reorganizada a Inquisição [39].

[4] A Contra-Reforma, também denominada Reforma Católica é o nome dado ao movimento criado no seio da Igreja Católica em resposta à Reforma Protestante iniciada com Lutero, a partir de 1517. Em 1543, a igreja Católica Romana convocou o Concílio de Trento estabelecendo entre outras medidas, a retomada do Tribunal do Santo Ofício (inquisição), a criação do "*Index Librorum Prohibitorum*", com uma relação de livros proibidos pela igreja e o incentivo à catequese dos povos do Novo Mundo, com a criação de novas ordens religiosas dedicadas a essa empreitada, incluindo aí a criação da Companhia de Jesus. Outras medidas incluíram a reafirmação da autoridade papal, a manutenção do celibato, a criação do catecismo e seminários e a proibição das indulgências [40].

Essa atitude já tinha precedentes na arquitectura promovida pelas ordens mendicantes a partir do século XIII e na arquitectura de certos movimentos de reforma dentro da Igreja durante a primeira metade do século XVI. Estes movimentos de reforma, defendiam uma arquitectura para toda a humanidade em que a simplicidade, o senso comum e a razão prevalecem em vez da arquitectura promovida pelos tratados de renascentistas [30].

A inteligibilidade da palavra e até mesmo da música foi fundamental para a reforma católica, e foi defendida pelo Conselho. Há provas documentais de que durante este período de tempo houve uma preocupação com a acústica na construção das igrejas em algumas ordens religiosas, especialmente os dos jesuítas e franciscanos, para promover o esforço homilíaco. Isso explica a preferência pela igreja de nave única, com um telhado de madeira, que havia já sido utilizada com sucesso por algumas ordens mendicantes [30].

3.2.3. Igrejas Barrocas e Barroco Tardio

A partir da segunda metade do século XVI, quando os ideais reformistas de algumas ordens religiosas, que defendiam uma arquitectura simples e modesta, prevaleceram, houve uma transformação clara em relação ao que poderia ser considerado a personificação triunfante da Contra-Reforma católica. A igreja barroca foi o símbolo desse espírito triunfante [30].

Do ponto de vista acústico, as igrejas barrocas geralmente tinham uma melhor acústica do que os seus antecessores clássicos, principalmente por causa da sua ornamentação. Este efeito pode ser observado principalmente com os sons médios e agudos. Molduras, pilastras, entablamentos, cornijas, colunas e capitéis adornados com óvulos, grinaldas e contas, ajudam à difusão do som. O mesmo ocorre com os estuques esculpidos, apliques de madeira, altares, órgãos, as portas interiores e outros móveis. Por outro lado, a abundância de capelas laterais, neste tipo de plano, difunde os sons mais graves [30].

Para muitas pessoas, a planta oval é o exemplo mais claro do barroco. Esta forma já tinha precedentes na segunda metade do século XVI e início do século XVII como uma tentativa de conjugar as aspirações clássicas das igrejas com uma planta central com as necessidades litúrgicas estabelecidas no Concílio de Trento, que exigiu uma planta longitudinal [30].

Mesmo os jesuítas tinham proposto plantas ovais para algumas igrejas, entre outras razões, devido às considerações acústicas. Embora não se saiba como, o oval tornou-se no formato preferido para os teatros de ópera, porque o seu efeito de focalização foi muito útil [30].

Foi no início do século XVII, mais especificamente em 1604, que Kepler[1] definiu a elipse como agora a compreendemos. Imediatamente, uma série de documentos e estudos sobre os problemas de reflexão de luz e som foram escritos. Um dos mais marcantes foi *Phonurgia Nova*, publicado em 1673 por um jesuíta chamado Kircher[2], que deu uma única representação gráfica mostrando que qualquer raio de som, com a sua origem no foco da elipse (neste caso, uma abóbada elipsoidal), depois de reflectido numa superfície, passa pelo outro foco (Figura 3.5.) [30].

---

[1] Johannes Kepler (1571 - 1630) foi um astrónomo, matemático e astrólogo alemão e figura chave da revolução científica do século XVII. É mais conhecido por formular as três leis fundamentais da mecânica celeste, conhecidas como Leis de Kepler. Durante a sua carreira, Kepler foi professor de matemática, assistente do astrónomo Tycho Brahe, o matemático imperial do imperador Rodolfo II e assessor do general Wallenstein. Fez um trabalho fundamental no campo da óptica, inventou uma versão melhorada do telescópio refractor (o telescópio de Kepler) e ajudou a legitimar as descobertas telescópicas de seu contemporâneo Galileo Galilei. Kepler conseguiu também determinar a órbita de Marte, tentando representa-la com uma oval, e rapidamente descobriu que uma elipse ajustava muito bem os dados. A posição do Sol coincidia com um dos focos da elipse. Ficou assim explicada também a trajetória quase circular da Terra, com o Sol afastado do centro [41].

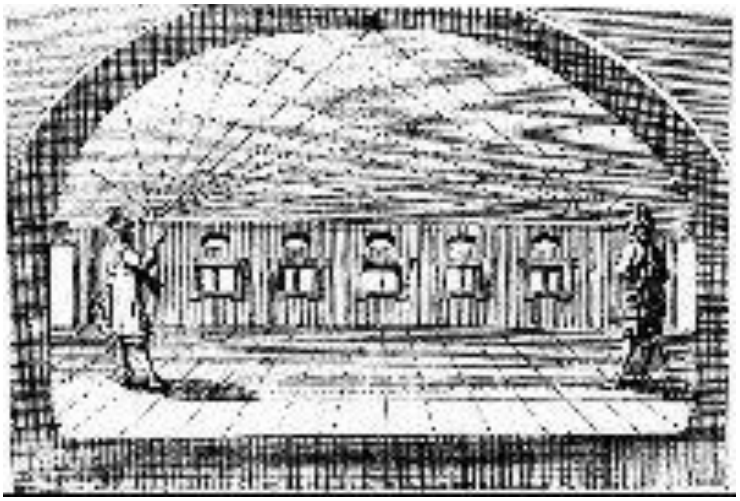

Figura 3.5. – Pontos focais da elipse, *Phonurgia Nova* [42].

No entanto, o oval não se mostrou ser uma forma apropriada para grandes igrejas, nem permitia muita variação. Não era até ao surgimento dos arquitectos Borromini[3] e Guarini[4], em que novos modos de expressão foram encontrados. O dinamismo dos espaços arquitectónicos que eles projectaram levou à utilização de formas côncavas e convexas, que só poderiam ter efeitos benéficos para as condições acústicas das igrejas (Figura 3.6.) [30].

---

[2] Athanasius Kircher (1601 – 1680) foi um jesuíta, matemático, físico, alquimista e inventor alemão nascido em Geisa, uma cidade pequena no banco do norte da Rônia Superior, Buchônia, famoso pela sua versatilidade de conhecimentos e particularmente sua habilidade para o conhecimento das ciências naturais. Estudou ciências humanas na Faculdade Jesuítica, em Fulda, e em 1618 entrou para a Sociedade de Jesus, em Paderborn. Ao término do noviciado mudou-se para Colónia para estudar Filosofia, em plena Guerra dos 30 Anos. O jovem e talentoso estudante dedicou-se especialmente às ciências naturais e aos idiomas clássicos, especialidade na qual ele logo passou a ensinar nas filiais das faculdades Jesuíticas, em Coblenz e Heiligenstadt. Em Mainz, onde ele começou os estudos teológicos em 1625, atraiu a atenção por sua habilidade como um experimentalista. Ordenado padre em 1628, antes mesmo de terminar seu último ano probatório, em Speyer, foi convidado para assumir a cadeira de Ética e Matemática na Universidade de Würzburg, enquanto ao mesmo tempo já ensinava sírio e hebreu. Porém, por causa da guerra, foi obrigado a ir primeiro para Lyon, na França (1631), e depois para Avignon. Viveu o resto de sua vida em Roma, cidade onde morreu, onde papas, imperadores, príncipes e prelados respeitavam suas investigações e, essencialmente, as suas opiniões [43].

[3] Francesco Borromini (1599 – 1667) foi um arquitecto e escultor italiano. Por volta de 1610 foi para Milão aprender o ofício de talhar a pedra e, em 1620, mudou-se para Roma onde se torna um dos artesãos de Carlo Maderna (1556-1629), o mais importante arquitecto italiano na época, colaborando nos trabalhos da Catedral de S. Pedro e no Palácio Barberini. Com a morte de Maderna, em 1929, passa a trabalhar com Giovanni Bernini (1598-1680) que fora nomeado arquitecto oficial de S. Pedro em sua substituição, e participa na execução do Baldaquino sobre o túmulo de S. Pedro. Em 1633, Borromini começa a trabalhar como arquitecto por conta própria, iniciando uma contenda com Bernini que duraria até ao fim dos seus dias. A sua primeira grande encomenda, e uma das suas obras primas, foi a igreja de S. Carlo alle Quattrofontane (1638-41) onde expressa o seu estilo pessoal e que foi criticada por Bernini que o acusa de subverter as regras da arquitectura clássica e as proporções arquitectónicas baseadas no corpo humano, que ele entende serem sagradas por este ser feito à imagem de Deus. De facto Borromini, que é um grande conhecedor da arquitectura clássica, reivindica o direito de interpretar livremente os motivos herdados da grande arquitectura romana recusando o que ele considera ser uma mera cópia desses monumentos. Esta atitude, que representa o pensamento barroco, foi largamente seguida pelas gerações vindouras e o seu exemplo espalhou-se por toda a Europa. Borromini era uma pessoa perturbada, morreu com um ferimento que infligiu a si próprio, deprimido por a sua obra não ser devidamente reconhecida pelos seus contemporâneos [44].

[4] Guarino Guarini (1624 – 1683) foi arquitecto italiano e foi também matemático e teólogo. É considerado um dos arquitectos mais originais do período barroco. Projectou a construção de várias igrejas, sendo uma delas a de Santa Maria da Divina Providência, em Lisboa, que foi destruída pelo terramoto de 1755. Escreveu várias obras, entre as quais um tratado sobre Arquitectura Civil e Eclesiástica, e foi o arquitecto de Carlos Emanuel II (1634 – 1675) [45].

Figura 3.6. – Cúpula da igreja de Santo Ivo em Roma, Borromini [46].

A influência destes dois arquitectos foi enorme e ainda hoje, essas igrejas são consideradas como o espaço ideal a partir do ponto de vista óptico e acústico para a execução de música [30].

Uma das operações barrocas com a maior repercussão sobre a acústica da igreja foi a ornamentação com tapeçarias e grandes cortinas, especialmente para as principais celebrações civis ou religiosas de ocasiões alegres ou tristes. Beatificações, canonizações, exéquias e funerais, proclamações de dogmas e procissões levaram a uma rica arquitectura efémera, dos quais muitos testemunhos escritos e iconográficos permanecem [30].

As efémeras modificações das propriedades de absorção dos cortinados para adaptá-los às interpretações musicais e corais serão uma constante nos anos seguintes. A abundância de tapetes e tapeçarias, veludos e damascos, juntamente com a profusa decoração em geral e do grande número de pessoas vestidas com roupas pesadas e fluidas só poderia aumentar a absorção do som nessas igrejas, originando um amortecimento dos ecos e reverberações nas altas frequências [30].

3.3. O Órgão e o Coro na Igreja

O primeiro órgão cromático foi desenvolvido no final do século XII e só por volta de 1500 é que o órgão de tubos foi usado nos cultos da igreja católica, atingindo o seu auge no século XVII como também aconteceria com os coros. A partir de 1940, com a introdução do órgão electrónico, o órgão de tubos começou a cair em desuso. Como antigamente, hoje em dia ainda é comum ser o coro e o organista a abrir as cerimónias religiosas na igreja cristã [32].

O papel influenciador do órgão na construção da Igreja ao longo da história é um mito. Pelo contrário, o posicionamento do órgão só teria prioridade após a colocação de todos os objectos e peças sagradas e simbólicas no devido local [32].

Já o coro teve uma pequena influência na construção das igrejas por volta do ano de 1700. Essa influência foi a redução do tempo da reverberação e do espaço aberto do local do coro. Muitas vezes o coro era situado em locais estratégicos após a conclusão da igreja [32].

3.4. ANTERIORMENTE A 1940

Historicamente, nem a palavra, nem a música tinha sido a principal preocupação para o projecto de uma igreja até ao final do século XIX. No caso de uma igreja construída correctamente para o discurso parecia ser, no entanto, o lugar certo para o canto e para a música. Se esta conclusão estiver correcta, pode-se dizer que, ironicamente, quando uma igreja foi construída em torno da palavra, esta seria excelente para o órgão e vice-versa [32].

Quando se ouve falar de uma igreja com um "excelente som", isso apenas significa que os projectistas tiveram sorte. Os arquitectos quando tinham de escolher as técnicas de construção e os materiais para as igrejas era ao acaso e por isso os resultados obtidos falam por si [32].

A acústica de uma igreja é tão previsível como as marés do oceano. No entanto, as pessoas durante muitos anos foram levadas a acreditar que a acústica é tão previsível como a previsão do tempo [32].

Felizmente, as mesmas leis da física que os arquitectos tentam ignorar e fingir que não existem, têm sido a única coisa que fez algumas pessoas ao longo da história terem sido reconhecidas como génios. Desde a civilização grega até aos dias de hoje que algumas pessoas têm descoberto, através da ciência, formas de corrigir os erros e as omissões dos arquitectos [32].

Foi descoberto, em algumas paredes de teatros gregos e romanos, potes de barro embutidos com a extremidade aberta do frasco para fora. Depois, consoante o evento a decorrer no espaço, os frascos seriam preenchidos com a quantidade correcta de cinzas. Este sistema funcionou muito bem e temos hoje em dia uma técnica semelhante que é feita electronicamente chamada de equalizador. Este é apenas um exemplo da capacidade de ajuste de um espaço que actualmente, sem nenhuma razão, não está a ser aplicado nas igrejas modernas [32].

3.5. O INÍCIO DO REFORÇO ELECTROACÚSTICO NAS IGREJAS – 1940

Antes de 1940, muitas das igrejas foram construídas em lugares remotos. Isso ajudou a manter o ruído devido ao mundo exterior muito diminuto. Algumas das igrejas mais antigas, ainda em pé hoje em dia, não precisam de reforço electroacústico porque foram, por acaso, projectadas correctamente [32].

No entanto, a voz humana não consegue competir com o aumento progressivo do ruído de fundo exterior provocado por automóveis, comboios e aviões visto que essas igrejas não tinham um bom isolamento sonoro. É por esta razão e também pelo envelhecimento da população que assiste às cerimónias que as igrejas mais antigas têm necessidade em investir em sistemas de reforço electroacústico [32].

Quando a era do reforço electroacústico chegou por volta de 1940, os construtores das novas igrejas pensaram que poderiam poupar bastante dinheiro na construção de grandes igrejas pelo meio de algumas mudanças. Os arquitectos sugeriram reduzir os custos relacionados com as principais práticas e materiais acústicos e complementar essa falta propositada de tratamento acústico com um bom sistema de reforço electroacústico [32].

O que os arquitectos desconheciam era que o sistema de reforço electroacústico reforça tudo, bom ou mau. Se a igreja era bem projectada acusticamente ao nível da forma e materiais utilizados nas

superfícies então um sistema de reforço electroacústico bem projectado funcionaria muito bem. Se pelo contrário, a forma da igreja é desadequada e os materiais não são os mais indicados no tratamento acústico, independentemente do sistema de reforço utilizado, nunca se conseguiria obter bons resultados [32].

Ainda hoje, a maioria dos arquitectos não tem a menor ideia sobre o que estão a fazer ao nível da acústica. No entanto, alguns deles já começam a admiti-lo e a dar mais importância a este aspecto [32].

3.6. Os Anos da Confusão

Em meados do ano 1950 foi introduzido o *rock and roll* e com ele a necessidade de ter um reforço electroacústico para as noites de espectáculo. Muitas vezes verificava-se a existência de altifalantes colocados à direita e à esquerda do palco como um mau hábito generalizado. Erradamente as igrejas começaram a seguir este *layout* para reforço electroacústico dos seus espaços [32].

Nos anos de 1970, tentou-se construir igrejas com o tipo de estilo da igreja antiga mas os resultados acústicos foram desanimadores. A comunidade de arquitectos não tinha construído igrejas com uma boa acústica desde a introdução dos sistemas de reforço electroacústico nos anos de 1940. Eles já se tinham esquecido dos conhecimentos ao nível acústico e da sua importância. Estavam cada vez mais ocupados e fixos, com algumas excepções, ao fluxo constante dos novos erros arquitectónicos ao nível acústico [32].

Na década de 1980, uma nova onda de igrejas surgiram nos Estados Unidos da América denominadas de *packaged church* (igrejas embaladas). Estas novas igrejas tornaram-se muito populares por causa do seu custo modesto, tornando possível a que qualquer congregação se pudesse dar ao luxo de ter uma igreja nova [32].

O grande problema destas igrejas é que são concebidas estritamente como salas de reunião e na maioria das vezes não reflectem nem satisfazem todas as necessidades do culto da congregação. A maioria destas novas igrejas não tem qualquer investimento em acústica e os seus proprietários acabam por reclamar constantemente com a pobreza acústica das suas igrejas. Em alguns casos estes edifícios são construídos tão mal a nível acústico que qualquer sistema de reforço electroacústico a qualquer preço nunca conseguirá colmatar a deficiência acústica existente. Só com mudanças estruturais é que se consegue resultados satisfatórios e isso está a acontecer constantemente. O que acontece frequentemente com estas igrejas é que são construídas muito apressadamente sem nenhuma preocupação ao nível acústico para terem um custo menor. Isto leva a que o custo de exploração seja muito mais elevado do que o dispendido com uma igreja bem projectada acusticamente de raiz por isso as *packaged church* acabam por ter um custo global geralmente superior [32].

4
CAPELAS DA RECONCILIAÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

4.1.1. CULTO MARIANO

Há cerca de dois mil anos, em Nazaré da Galileia, pequena aldeia da Terra Santa, Maria recebeu a visita do Anjo Gabriel, na Anunciação. Apesar deste acontecimento importantíssimo, só após a morte de Virgem Maria começou-se a reconhecer o seu grande valor e, assim, se iniciou o seu culto. Hoje em dia, em Nazaré, sobre a gruta (Figura 4.1.) onde a Virgem pronunciou o "sim" que lhe permitiu ser a Mãe de Cristo Jesus, existe a basílica da Anunciação que é assim considerada o primeiro santuário mariano [47].

Segundo a tradição, o evangelista S. Lucas terá feito a primeira representação de Nossa Senhora com o Menino nas catacumbas de Priscila, em Roma (Figura 4.2.), tornando-se numa das primeiras manifestações marianas em todo o mundo. [48]

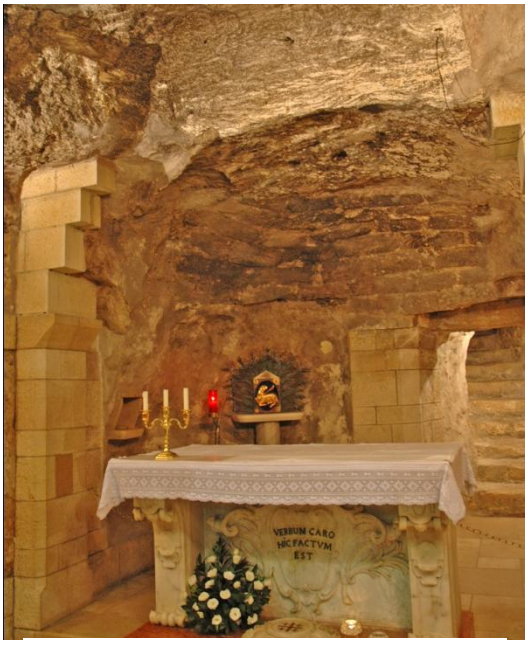

Figura 4.1. – Gruta da Anunciação, Nazaré, Galileia [49].

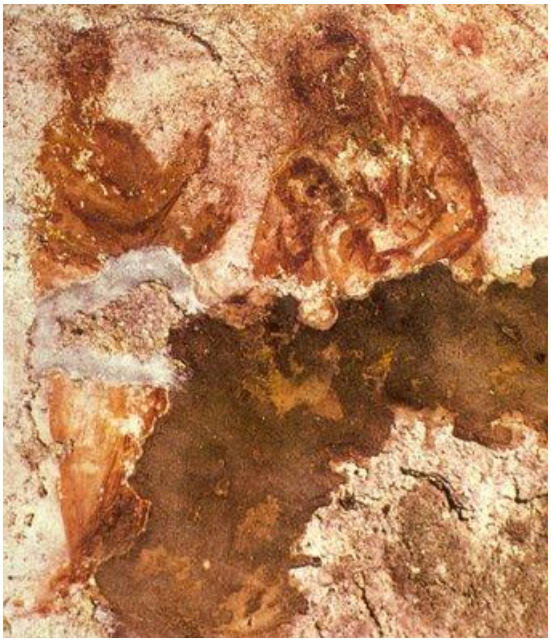

Figura 4.2. – "Maria amamentando o Menino Jesus", pintura do séc. II, Catacumba de Priscila, Roma [50].

Inicialmente o culto mariano expressou-se, por parte dos fiéis, na invocação de Maria como *Theotokos* (Mãe de Deus, em grego), que Lhe suplicavam a sua protecção em todos os perigos necessários. Este título havia penetrado de tal maneira no espírito e no coração dos fiéis, que se instalou um alvoroço enorme no dia em que Nestório, Bispo de Constantinopla (Capital do Império Bizantino) de 428 a 431, teve a ousadia de expressar que Maria não era Mãe senão de um homem, porque era impossível que um Deus nascesse de uma mulher [51].

Nestório ao não admitir qualquer rectificação das suas ideias fez com que o Imperador Teodósio II convocasse um concílio. As suas sessões inauguraram-se, em Junho de 431, em Éfeso (Figura 4.3.) e foram presididas por São Cirilo, como legado do Papa Celestino. Congregaram-se mais de 200 bispos que proclamaram que "a pessoa de Cristo é una e divina e que a Santíssima Virgem tem que ser reconhecida e venerada por todos como realmente Mãe de Deus".

Como juízo final, para além de terem excomungado e deposto Nestório, acrescentaram à Ave Maria a seguinte cláusula de forma a perpetuar a sua memória:

"Santa Maria, Mãe de Deus, rogai por nós, pecadores, agora e na hora da nossa morte" [52].

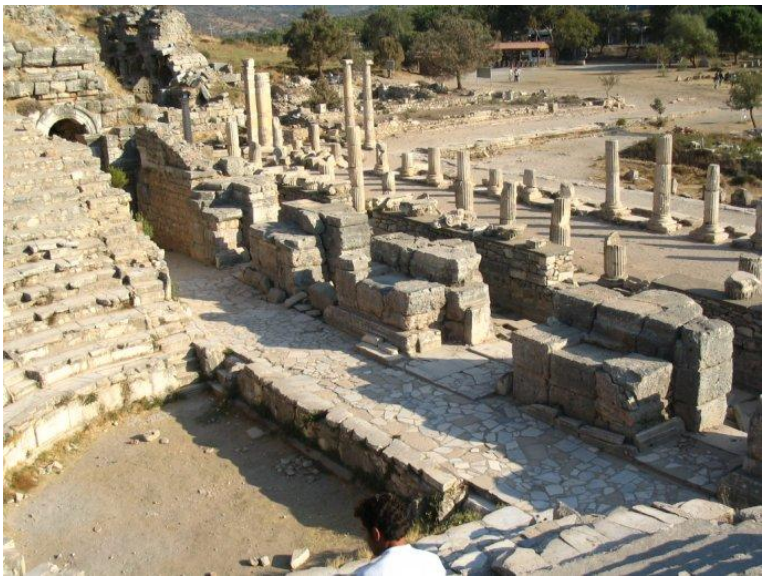

Figura 4.3. – Ruínas da cidade de Éfeso [53].

Desde estes acontecimentos em Éfeso, as representações de Maria com o Menino foram-se tornando cada vez mais comuns por toda a Europa assim como a Sua invocação, por parte do povo, como padroeira de muitos lugares, modelo de todas as virtudes e advogada de todas as necessidades. Daí a razão para os mais de 150 títulos tão distintos com que é invocada e que se fundamentam, directa e indirectamente, em temas bíblicos, ou em acontecimentos locais como o fenómeno das Aparições [54, 55].

A partir do século XVI, com o avançar do Protestantismo, fez-se sentir uma forte reacção católica com a criação das festas do Rosário, criação das primeiras confrarias do Rosário e com a instituição pelo Papa Clemente VIII da prática de coroar, como sinal de realeza, as imagens de Maria dando assim um folgo ainda maior ao culto mariano [54].

Em Portugal, como país predominantemente católico, o culto mariano assumiu igualmente uma preponderância desde os primórdios da nacionalidade, difundindo-se realmente a partir da implantação das ordens religiosas nos finais do século XII. Em 1400 dá-se a Aparição de Nossa Senhora a um pastor sobre um espinheiro a 3 km de Évora no que é hoje a Igreja e convento do Espinheiro (Figura 4.4.). Outras lendas e relatos foram surgindo em Portugal. No século XVII, com a Restauração, D. João IV declarou como padroeira do Reino de Portugal a Virgem N. Sr.ª da Conceição (Figura 4.5.), acentuando ainda mais este culto no seio da população [54].

Figura 4.4. – Convento do Espigueiro, Évora, século XV [56].

Figura 4.5. – Selo comemorativo dos 300 anos da proclamação de N. Sr.ª da Conceição como padroeira de Portugal [57].

Seja em Portugal ou em qualquer outro sítio no mundo, o auge da devoção mariana dá-se nos séculos XIX e XX, associado aos fenómenos das Aparições (Quadro 4.1. e Figura 4.6.), como por exemplo Lourdes em França e Fátima em Portugal, favorecendo também de certa forma, o incremento de novas festas, congregações e associações marianas [54].

Algumas das aparições hoje em dia têm a total e definitiva aprovação por parte da igreja Católica, como é o caso português de Nossa Senhora de Fátima ou da Nossa Senhora de Guadalupe no México.

Existem casos em que, apesar de a igreja ainda não ter dado reconhecimento ou aprovação às aparições, estas possuem uma aprovação eclesiástica ou permissão para a sua divulgação, isto significa somente que o Bispo local não encontrou elementos que não recomendem a devoção associada.

Por último existem as situações em que não existe aprovação eclesiástica até ao momento. Nestes casos é necessária cautela e discernimento por parte dos peregrinos, pois as mensagens ainda não foram analisadas na sua totalidade pela autoridade eclesiástica e podem conter erros teológicos ou afirmações contra a fé e o ensinamento da Igreja, podendo-se tratar no limite de uma fraude [58].

No subcapítulo que se segue, aprofundar-se-á o fenómeno da aparição em Fátima para melhor enquadramento do presente estudo.

Quadro 4.1. – Local e data de algumas das mais significativas aparições de Santa Maria aos seus fiéis [58, 59].

Ref.	Aparição	Local	País	Ano
1	Nossa Senhora de Fátima	Fátima	Portugal	1917
2	Nossa Senhora do Pilar	Saragoça	Espanha	40
3	Nossa Senhora de Lourdes	Lourdes	França	1854
4	Nossa Senhora da Salette	Salette	França	1846
5	Nossa Senhora do Carmo	Aylesford	Inglaterra	1251
6	Nossa Senhora das Graças	Rue du Bac	França	1830
7	Nossa Senhora de Caravaggio	Caravaggio	Itália	1432
8	Divina Misericórdia	Cracóvia	Polónia	1931
9	Nossa Senhora de Akita	Akita	Japão	1973
10	Nossa Senhora da China	Dong Lu	China	1900
11	Nossa Senhora da Luz	Zeitun	Egipto	1968
12	Mãe do Mundo	Kibeho	Ruanda	1981
13	Nossa Senhora de Coromoto	Coromoto	Venezuela	1651
14	Nossa Senhora de Cuapa	Cuapa	Nicarágua	1980
15	Nossa Senhora de Guadalupe	Guadalupe	México	1531

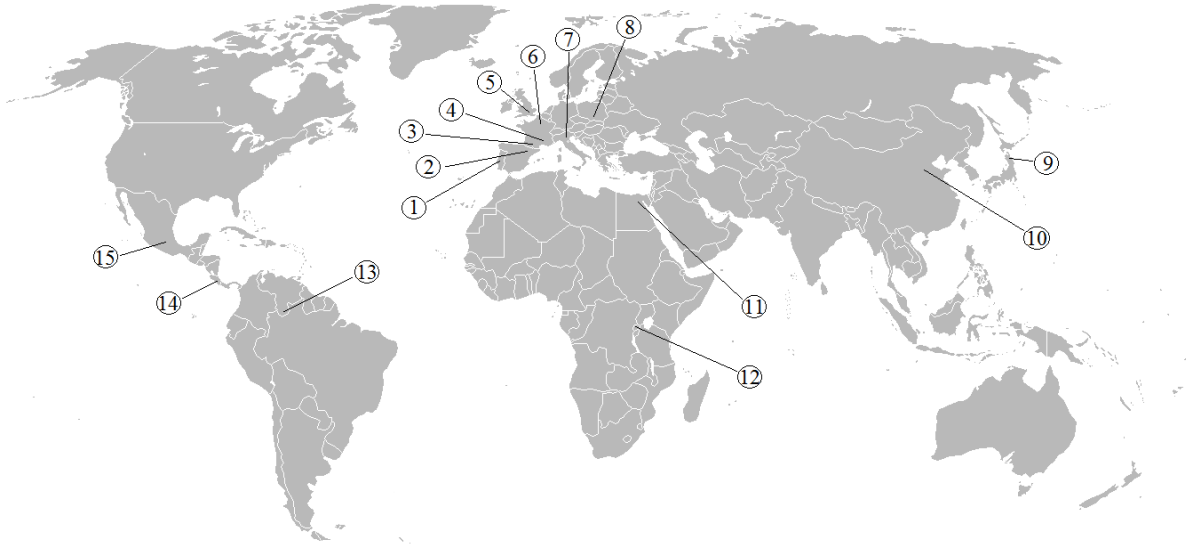

Figura 4.6. – Localização geográfica de algumas aparições de Santa Maria aos seus fiéis [60].

4.1.2. Nossa Senhora de Fátima

Fátima era um pequeno lugar localizado na serra de Aire. As formações conferem-lhe uma paisagem árida, um solo rochoso e calcário onde só a azinheira, o carvalho português, o medronheiro, o zanguinho, a figueira e a oliveira, conseguem resistir às condições adversas que o clima e território apresentam. Fátima foi designada como paróquia em 1568 [61, 62].

Em Portugal com o Regicídio de 1908 (Figura 4.7.) é implantada a república e na década seguinte a 1ª guerra mundial arrasta consigo muitas centenas de jovens portugueses para o campo de batalha. Apesar do contexto político este acontecimento mundial despertou nos portugueses um aumento de fervor religioso e em Fátima é restaurada a igreja paroquial.

Figura 4.7. – O regicídio de 1 de Fevereiro de 1908, por Rocha Martins. Nesta visão do acontecimento, o «landau» dá entrada na Rua do Arsenal, já com D. Carlos e D. Luiz Felipe tombados, enquanto Alfredo Costa (à direita, em primeiro plano) e Manuel Buiça (à esquerda, ao fundo, sofrendo uma espadeirada) são abatidos pela polícia e pela escolta que acompanhava o cortejo das carruagens (Fundação Mário Soares) [63].

Na Cova da Iria, sítio pedregoso e inóspito, três pastorinhos (Figura 4.8.) brincavam e guardavam o seu rebanho a 13 de Maio de 1917 quando surge pela 1ª vez, envolta numa luz brilhante, a figura de Nossa Senhora. Nos meses seguintes as três crianças seriam testemunhas de mais cinco aparições. A princípio a notícia não pareceu ter causado grande impressão, mas a 13 de Julho, data da 3ª aparição, os três pequenos videntes Francisco, Lúcia e Jacinta falam de um segredo que Nossa Senhora lhes confiou e na promessa de um milagre para o dia 13 de Outubro [64].

Por esta altura verifica-se uma afluência cada vez maior de fiéis à Cova da Iria. Estima-se que mais de dez mil pessoas se teriam dirigido ao local em 13 de Agosto mas a aparição apenas teve lugar no dia 19 nos Valinhos local onde as crianças apascentavam os seus rebanhos. Calcula-se que cerca de 70.000 pessoas tenham assistido ao milagre do Sol na última aparição a 13 de Outubro [65].

Os acontecimentos ocorridos em Fátima em 1917 ganham uma nova dimensão com as mortes dos videntes Francisco em 1919 e Jacinta em 1920. Mais tarde nas suas memórias Lúcia prestaria homenagem aos seus primos [66].

Figura 4.8. – Lúcia, Francisco e Jacinta, os três videntes de Fátima [67].

Em Abril de 1919 iniciou-se a construção da capelinha das aparições e em Maio de 1920 surgia a 1ª imagem de Nossa Senhora. Nascia assim um dos maiores locais de devoção no mundo [68].

Em Setembro de 1921, D. José Alves Correia da Silva, bispo de Leiria visita a Cova da Iria e a 13 de Outubro é celebrada a 1ª missa junto à capelinha das aparições.

Após ter sido dinamitada a capelinha a 6 de Março de 1922 (Figura 4.9.), o processo canónico sobre os acontecimentos de Fátima é reaberto pelo bispo de Leiria. Em 13 de Outubro seguinte inicia-se a publicação da *Voz da Fátima* [69].

Figura 4.9. – Capelinha das aparições após ter sido destruída por atentado bombista [70].

Ao mesmo tempo que o nome de Fátima se espalhava pelo mundo o local das aparições começa a transformar-se no local que hoje conhecemos, com o lançamento da primeira pedra da basílica em 13 de Maio de 1928.

Em carta pastoral de 13 de Outubro de 1930 intitulada *A providência divina*, o bispo de Leiria declara dignas de crédito as visões das crianças na Cova da Iria permitindo oficialmente o culto de Nossa Senhora de Fátima.

A investigação canónica dos factos e a transferência dos restos mortais da vidente Jacinta a 12 de Setembro de 1935 para o cemitério paroquial de Fátima contribuiu igualmente para a divulgação da mensagem [69].

Nas suas memórias redigidas entre 1935 e 1941, que se tornaria mais tarde uma das principais figuras no processo de beatificação, a irmã Lúcia de Jesus refere pela primeira vez as aparições do anjo em 1916 e revela parte do segredo de Julho de 1917 [64].

Em Maio de 1946 dois acontecimentos projectam de igual forma a importância do santuário na Europa e no mundo, o Papa Pio XII por intermédio do seu legado Cardeal Masella coroa solenemente em 13 de Maio a imagem de Nossa Senhora de Fátima da Capelinha das Aparições e a irmã Lúcia visita Fátima e o santuário onde revela a localização exacta da loca do cabeço, local das aparições do anjo.

Em 13 de Outubro de 1951 o Cardeal Tedeschini desloca-se a Fátima escolhida pelo papa Pio XII para o encerramento do ano santo universal. Este gesto e a sagração da basílica em 1953 testemunham a expansão do santuário a nível mundial.

Entre os milhões de peregrinos que visitaram o local sagrado destaca-se a figura do cardeal Roncalli patriarca de Veneza que visitou Fátima a 13 de Maio de 1956 e que seria eleito papa em 1958 com o nome João XXIII e beatificado pelo papa João Paulo II em 3 de Setembro de 2000 [69].

Com a década de 1960 inicia-se uma nova ordem mundial que dará lugar a um mundo novo mas igualmente conturbado. A guerra fria impõe as suas regras e os seus ideais em todos os países. A guerra no Ultramar arrasta consigo milhares de jovens portugueses provocando uma nova afluência de fiéis ao santuário fazendo promessas e pedindo protecção à Mãe de Cristo.

Em Novembro de 1964 o Papa Paulo VI declara Nossa Senhora Mãe da igreja e concede a rosa de ouro ao santuário de Nossa Senhora de Fátima tão querido não somente do povo da nação portuguesa mas também conhecido e venerado pelos fiéis de todo o mundo católico [69].

Esta honra seria ainda acompanhada por uma peregrinação do próprio papa Paulo VI a Fátima a 13 de Maio de 1967 quinquagésimo aniversário da 1ª aparição. Honrando o pedido feito da Virgem Santa aos pastorinhos Fátima tornava-se então local por excelência para rezar pela paz mundial [64].

A 19 de Setembro de 1977 a freguesia de Fátima é elevada à categoria de vila e seria elevada a categoria de cidade em 4 de Junho de 1997.

Em 13 de Maio de 1981 um inesperado acontecimento virá reescrever a história de Fátima, adensando ainda mais o mistério da fé. Na praça de S. Pedro, no Vaticano, João Paulo II sofre um atentado à sua vida (Figura 4.10.). No ano seguinte a 13 de Maio de 1982 o santo padre desloca-se a Fátima em peregrinação para agradecer a Nossa Senhora a protecção divina e consagrar os homens e os povos ao imaculado coração de Maria [69].

Figura 4.10. – Atentado à vida de João Paulo II na praça de S. Pedro levado a cabo por Ali Agca em 13 de Maio de 1981 [71].

A devoção Mariana de João Paulo II teria igualmente um novo impulso com o processo de beatificação de Francisco e Jacinta iniciado em 1952 e só entregue na sagrada congregação para a Causa dos Santos no Vaticano em 1979 [72].

Em 1984 por vontade expressa de João Paulo II a imagem da Nossa Senhora da Capelinha das Aparições desloca-se a Roma e ajoelhado diante dela o Santo Padre renova a consagração do mundo ao imaculado Coração de Maria. A bala extraída do corpo do Santo Padre, símbolo da perseguição à igreja, é oferecida pelo Papa João Paulo II ao bispo de Leiria, sendo, em 1989, colocada na coroa de Nossa Senhora (Figura 4.11.) [73].

Figura 4.11. – Coroa de Nossa Senhora de Fátima onde se encontra a bala extraída do corpo de João Paulo II [74].

Na data do décimo aniversário do seu atentado a 13 de Maio de 1991, o Papa João Paulo II visita Fátima pela segunda vez como peregrino, presidindo assim à peregrinação internacional de aniversário.

Em 1997 completa-se o processo para a beatificação de Jacinta e Francisco com a cura completa de Maria Emília Santos. Esta devota dos dois pastorinhos, paralítica então há 22 anos, recupera do seu estado clínico depois de ter recorrido nas suas orações à intersecção dos dois videntes [75].

A 12 de Maio de 2000, o Papa João Paulo II desloca-se a Fátima para a beatificação dos dois pastorinhos (Figura 4.12.), Jacinta e Francisco e a 13 de Maio de 2000, a sua santidade declara beatos os dois videntes, confirmando-se assim definitivamente a credibilidade das aparições.

Figura 4.12. – Celebrações de beatificação dos pastorinhos de Fátima [76].

Esta foi a última viagem a Fátima de João Paulo II que faleceu a 2 de Abril de 2005 sendo sucedido pelo Papa Bento XVI a 30 de Abril de 2005.

A 13 de Maio de 2010 dá-se a primeira visita de Joseph Ratzinger enquanto Sumo Pontífice a Fátima (Figura 4.13.), já que antes tinha presidido à Peregrinação do dia 13 de Outubro de 1996 como Cardeal [77].

Figura 4.13. – Papa Bento XVI celebra a Santa Missa no Santuário de Fátima em 2010 [78].

4.1.3. Monumentos e Locais no Santuário de Fátima

O santuário local de devoção mundial designado como altar do mundo situa-se no lugar da Cova da Iria. Na Figura 4.14. apresenta-se um mapa onde se pode encontrar os principais monumentos e lugares do santuário de Fátima.

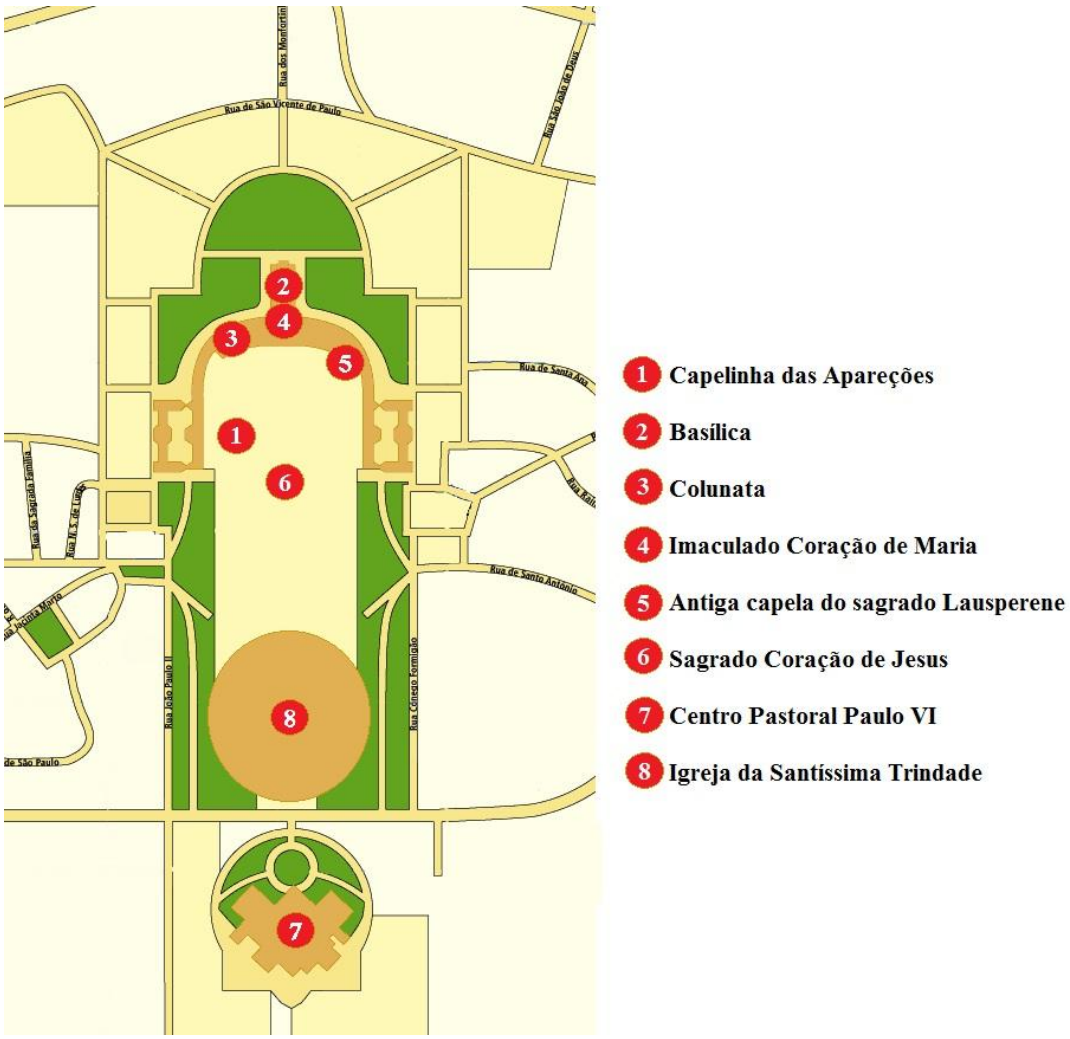

Figura 4.14. – Localização dos principais monumentos e lugares do santuário de Fátima [79].

A capelinha, coração do santuário e erguida pela primeira vez em 1919 e reconstruída em 1922 situa-se no local das aparições e corresponde ao pedido feito pela Senhora do Rosário aos três pastorinhos [64].

A coluna onde está hoje colocada a imagem de Nossa Senhora indica o local exacto onde em 1917 existia a azinheira sobre a qual Nossa Senhora apareceu (Figura 4.15.), aquela foi destruída pelos peregrinos na ânsia de ficarem com relíquias da árvore.

Figura 4.15. – Coluna com Nossa Senhora de Fátima, à frente da Capelinha das Aparições [80].

A basílica foi erguida no local onde a 13 de Maio de 1917 brincavam os três pastorinhos quando viram o relâmpago que os assustou.

A 13 de Maio de 1928 foi benzida a 1ª pedra pelo então arcebispo de Évora e sagrada a 13 de Outubro de 1953. Recebeu o título de basílica a 12 de Novembro de 1954 concedido por Pio XII [76].

Do cimo da colunata, conjunto arquitectónico composto por 200 colunas e 14 altares foram colocadas 17 imagens de santos devotos a Nossa Senhora (Figura 4.16.).

Figura 4.16. – Basílica e colunata do santuário de Fátima [81].

Sobressaem deste edifício Sagrado a torre sineira com 65 m de altura, o carrilhão composto por 62 sinos, o relógio, os anjos da fachada e no nicho da torre a estátua do imaculado coração de Maria (Figura 4.17.).

À entrada da basílica encontra-se um mosaico feito nas oficinas do Vaticano representando a Santíssima Trindade a coroar Nossa Senhora.

Figura 4.17. – Imagem do Imaculado Coração de Maria, Torre da Basílica de Fátima [82].

Em 1960 tem início o Sagrado Lausperene no Santuário de Fátima. Em 13 de Maio de 1982 foi benzida a 1ª pedra pelo Papa João Paulo II da antiga capela do sagrado Lausperene (Figura 4.18.) situada ao fundo da colunata, onde, até 2008, permanecia exposto o Santíssimo Sacramento para a adoração dos fiéis. Contíguos ao antigo Lausperene estão os edifícios da reitoria inaugurada em 1986 e da casa de retiros de Nossa Senhora do Carmo onde João Paulo II pernoitou e rezou a Nossa Senhora nas suas visitas a Fátima. Aqui também esteve o Papa Paulo VI em 1967.

Figura 4.18. – Antiga capela do sagrado Lausperene em Fátima [81].

A estátua de bronze dourado do monumento ao Sagrado Coração de Jesus e a sua localização no santuário marcam a centralidade da pessoa de Jesus na mensagem de Fátima (Figura 4.19.). Em homenagem ao Papa Paulo VI que se fez peregrino de Fátima a 13 de Maio de 1967 foi inaugurado a centro pastoral Paulo VI (Figura 4.20.) em 13 de Maio de 1982 pelo Papa João Paulo II.

Figura 4.19. – Monumento ao Sagrado Coração de Jesus, em Fátima [83].

Figura 4.20. – Centro Pastoral Paulo VI em Fátima [84].

Fátima é hoje uma cidade moderna que recebe milhões de peregrinos em todas as épocas, por isso surgiu a necessidade, devido à cada vez maior afluência, de criar melhores condições a quem se desloca em oração.

Em 2007 é inaugurado o então denominado Grande Espaço Coberto para Assembleias (G.E.C.A.), hoje Igreja da Santíssima Trindade, para dar resposta à visita dos milhões de peregrinos. Este novo espaço é composto por duas zonas principais, a Igreja da Santíssima Trindade com capacidade para nove mil lugares sentados (Figura 4.21.) e a zona da Reconciliação, a qual será objecto de estudo deste trabalho.

Figura 4.21. – Igreja da Santíssima Trindade em Fátima [85].

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS CAPELAS DA RECONCILIAÇÃO

4.2.1. INTRODUÇÃO

As três capelas da Reconciliação inserem-se numa das duas principais zonas do G.E.C.A (grande espaço coberto para assembleias), na zona da Reconciliação (Figura 4.22.). Esta é uma zona subterrânea situada debaixo da praça Pio XII em que o acesso se efectua através de duas escadas centrais paralelas e duas rampas situadas nas extremidades (Figura 4.23.).

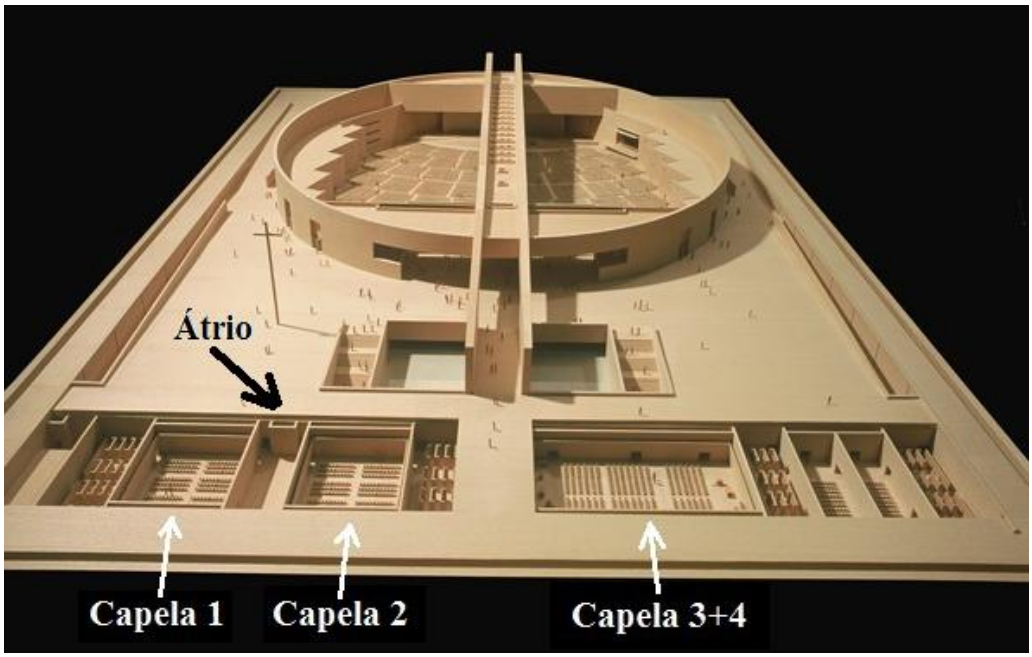

Figura 4.22. – Localização da capela do Santíssimo Sacramento (capela 1), da capela da Ressurreição de Jesus (capela 2), da capela da Morte de Jesus (capela 3+4) e do átrio de acesso às capelas do Santíssimo Sacramento e da Ressurreição de Jesus [86].

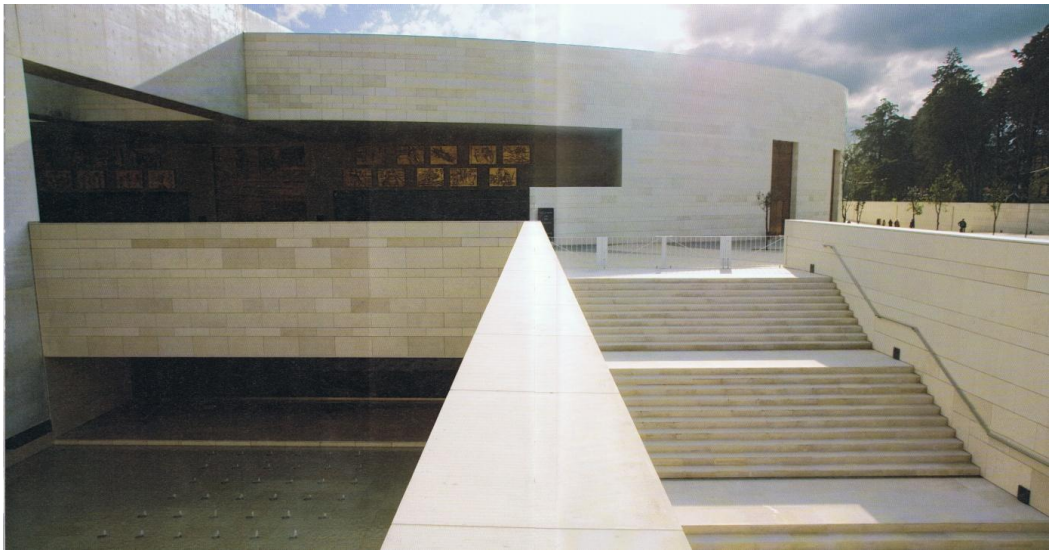

Figura 4.23. – Escadaria de acesso às Capelas da Reconciliação [87].

Do lado direito de quem desce a escadaria central (lado sul), pode-se encontrar uma área para peregrinos estrangeiros constituída por duas capelas, a capela do Santíssimo Sacramento (capela 1) e a capela da Ressurreição de Jesus (capela 2), e 32 confessionários. Já do lado esquerdo (lado norte) pode-se encontrar uma área para peregrinos portugueses onde se situa a capela da Morte de Jesus (capela 3+4) e mais 32 confessionários [88].

O longo corredor de 150 m, onde desembocam as duas escadas e as duas rampas de acesso e que por sua vez dá acesso às três capelas bem como aos vários confessionários, é adornado por um painel de azulejos da autoria de Álvaro Siza Vieira. Aquele contém representações de episódios da vida de S. Pedro (a sul) e de S. Paulo (a norte), constituindo a "Galilé dos Apóstolos S. Pedro e S. Paulo" (Figura 4.24.) [89].

Figura 4.24. – Galilé dos Apóstolos São Pedro e São Paulo, vista de sul para norte [86].

O corredor conta ainda com dois espelhos de água. O primeiro a sul, do lado de S. Pedro, alude à primeira criação, a criação da vida (água a jorrar) (Figura 4.25.). O segundo espelho de água a norte, do lado de S. Paulo, alude à segunda criação, o Baptismo (água a cair) (Figura 4.26.). Entre estes dois espelhos há uma ligação de acesso ao espaço de convívio com o nome de Santo Agostinho, onde ocorrem encontros de evangelização ou outros eventos congéneres [90, 91].

Devido às três capelas da Reconciliação assim como o átrio de acesso a duas dessas capelas (Figura 4.22.) serem o objecto de estudo do presente trabalho passa-se a caracterizá-los mais aprofundadamente nos próximos subcapítulos.

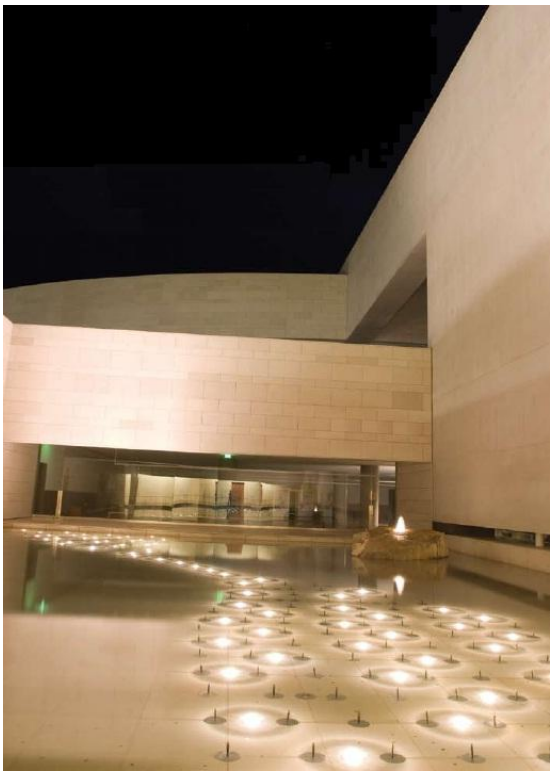

Figura 4.25. – Espelho de água alusivo à criação da vida [86].

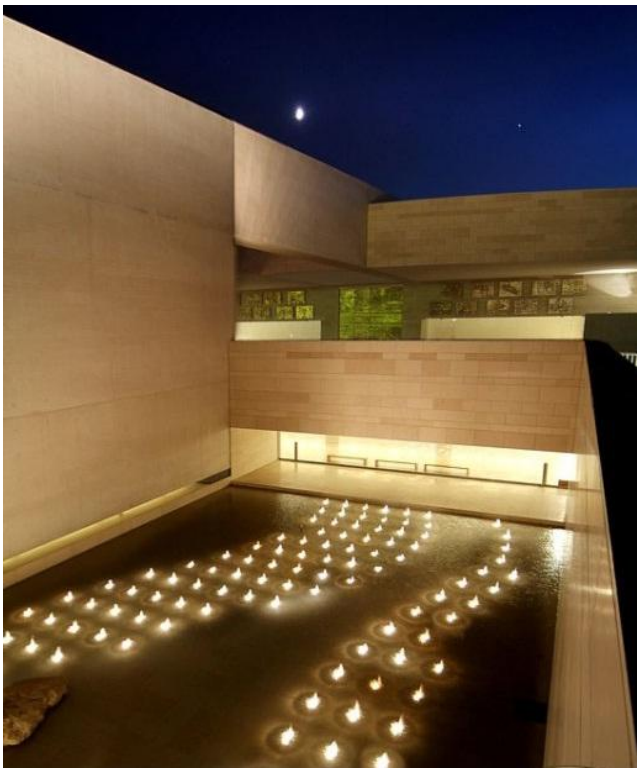

Figura 4.26. – Espelho de água alusivo ao Baptismo [86].

4.2.2. Capela do Santíssimo Sacramento

A capela do Santíssimo Sacramento, que por facilidade de tratamento irá passar a ser designada por capela 1, situa-se na zona de acolhimento de peregrinos estrangeiros na parte sul do complexo (Figura 4.22.) como já referido anteriormente.

Através de medições *in situ*, com o auxílio de um distanciómetro, apresentam-se no Quadro 4.2. diversos parâmetros arquitectónicos da capela como a altura, a largura, o comprimento, a área, o volume e o número de lugares sentados.

Quadro 4.2. – Parâmetros arquitectónicos da capela 1.

Parâmetro	Capela 1
Altura (m)	4,8
Largura (m)	17
Comprimento (m)	19
Área (m^2)	323
Volume (m^3)	1550
Lugares sentados	216

Os revestimentos utilizados nos acabamentos da capela são muito simplistas. No pavimento da capela é utilizado um mármore de cor clara bastante reflector e existe um lambrim de 1,5 metros de altura em toda a extensão das paredes interiores da capela concretizado em contraplacado de madeira.

O restante revestimento das paredes assim como o revestimento de tecto é efectuado com painéis fonoabsorventes de fibras de madeira aglomeradas com uma espessura de 17 mm, do tipo "*Akustaplan*", materializando uma caixa-de-ar com espessura não inferior a 20 mm (Figura 4.27.). Este é um material com coeficientes de absorção elevados o que permite uma boa absorção de ruído por parte das paredes e tecto (Quadro 4.3.).

Quadro 4.3. – Coeficientes de absorção sonora (α) por banda de frequência de uma oitava e médio (α_w) do material de revestimento *Akustaplan* para as espessuras de 50, 200 e 400 mm [92].

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	α_w
50 mm	0,14	0,36	0,93	0,96	0,67	0,76	0,70
200 mm	0,38	0,76	0,85	0,68	0,72	0,73	0,75
400 mm	0,63	0,73	0,60	0,70	0,73	0,81	0,70

Para evitar o paralelismo entre paredes da capela, com vista a minimizar os efeitos desfavoráveis das reflexões múltiplas entre paredes, os painéis de revestimento de parede foram aplicados com inclinação na vertical aproximadamente de 5° (Figura 4.28.), fazendo variar a espessura da caixa-de-ar (com a espessura mínima da caixa de ar junto ao pavimento e a máxima junto ao tecto).

A capacidade para 216 lugares sentados está distribuída por 18 bancos, cada um com 6 metros de comprimento, que têm a particularidade de serem construídos em faia e estarem almofadados, o que contribui para a absorção sonora nas altas frequências (Figura 4.29.) [93].

O acesso à capela é efectuado através de duas portas de cerejeira, cada uma com as dimensões de 1,95 m de largura por 2,12 m de altura (Figura 4.30.). Existem também duas portas do lado oposto da capela, com as mesmas dimensões e materiais, que dão acesso à zona de confessionários.

O altar é construído em pedra branco do mar e sobre este existe um ostensório, de prata, da autoria do escultor Zulmiro de Carvalho e data de 1986 que se encontrava na antiga capela do Sagrado Lausperene (Figura 4.31.) [94].

Por de trás do altar existe ainda uma abertura na parede com 10,50 m de largura, 1,25 m de altura e com uma profundidade de 1,65 m que serve para a iluminação da zona do altar através da luz natural (Figura 4.32.).

No que diz respeito ao sistema de reforço electroacústico é constituído por dois altifalantes da marca "*Bose*" posicionados lateralmente (Figura 4.33.), que são responsáveis pela difusão da palavra captada no altar. Conta ainda com amplificação "*Crown*", processamento "*BSS*" e sistemas de microfones "*AKG*".

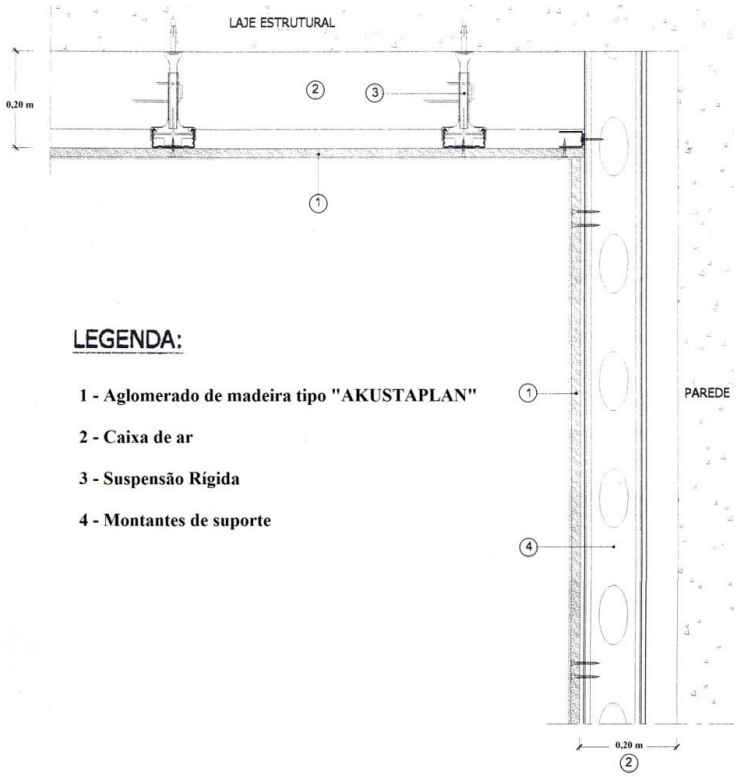

Figura 4.27. – Pormenor construtivo das paredes e tecto da capela 1 [95].

Figura 4.28. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), inclinação da parede para evitar as reflexões múltiplas [foto do autor].

Figura 4.29. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), bancos em faia almofadados utilizados na capela [foto do autor].

Figura 4.30. – Porta de acesso à capela 1 [foto do autor].

Figura 4.31. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), altar em pedra branco do mar e ostensório de prata [foto do autor].

Figura 4.32. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), abertura de grandes dimensões por de trás do altar para iluminação natural [foto do autor].

Figura 4.33. – Capela 1 (do Santíssimo Sacramento), altifalante da marca "*Bose*" responsável pela difusão da palavra [foto do autor].

4.2.3. Capela da Ressurreição de Jesus

A capela da Ressurreição de Jesus, que neste trabalho adoptará o nome de capela 2, está situada também na zona de acolhimento de peregrinos estrangeiros como a capela 1 (Figura 4.22.).

Os parâmetros arquitectónicos são iguais aos apresentados para a capela 1 (Quadro 4.4.) assim como todo o mobiliário existente, desde os bancos até ao altar exceptuando o ostensório que é exclusivo da capela 1.

Quadro 4.4. – Parâmetros arquitectónicos da capela 2.

Parâmetro	Capela 2
Altura (m)	4,8
Largura (m)	17
Comprimento (m)	19
Área (m^2)	323
Volume (m^3)	1550
Lugares sentados	216

O revestimento do pavimento e do lambrim é mármore e contraplacado de madeira respectivamente, à semelhança da capela 1. No revestimento da restante parede e do tecto é onde reside a grande diferença entre elas. A capela 2 não tem o material "*Akustaplan*" como revestimento de tecto e paredes mas tem sim, um revestimento de painéis de gesso cartonado lisos bastante reflectores (Quadro 4.5. e Figura 4.34.).

Quadro 4.5. – Coeficientes de absorção sonora (α) por banda de frequência de uma oitava e médio (α_w) do gesso cartonado [96].

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	α_w
Gesso cartonado	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05

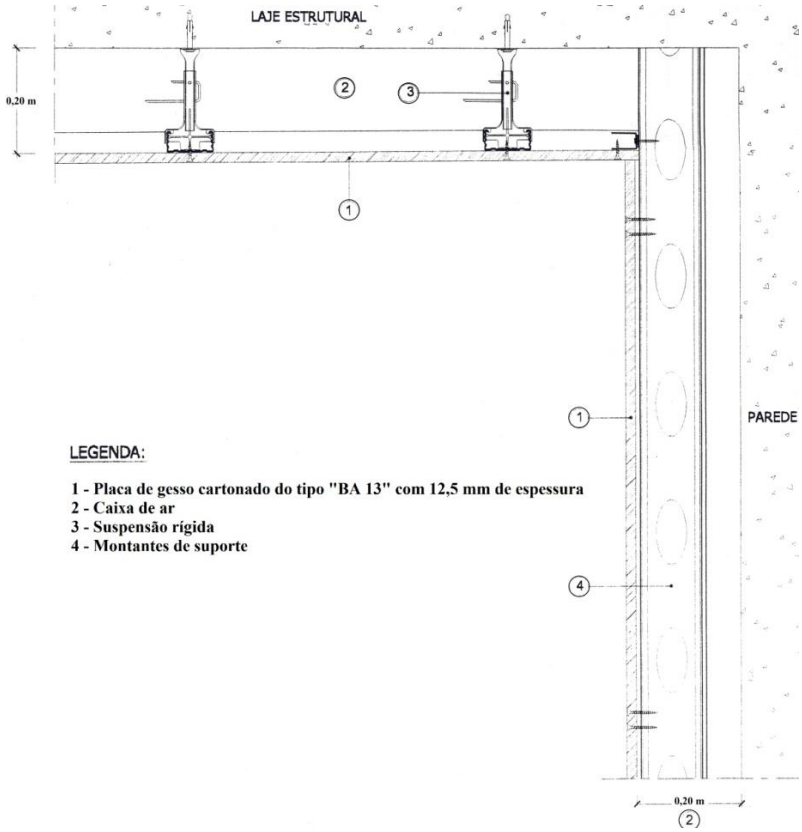

Figura 4.34. – Pormenor construtivo das paredes e tecto da capela 2 [95].

Principalmente importante nesta capela, devido às suas superfícies muito reflectoras, é a aplicação dos painéis de revestimento das paredes também com uma inclinação vertical de cerca de 5°, minimizando desde logo o grande potencial da geração de reflexões múltiplas entre as paredes, como já foi referido anteriormente.

Por detrás do altar encontra-se uma abertura em tudo idêntica e com a mesma funcionalidade que a da capela 1 assim como o sistema de reforço electroacústico que também é semelhante.

Em suma, esta capela apresenta uma geometria e aspecto de acabamentos muito semelhante à capela 1 (Figura 4.35.), apesar das características de absorção dos revestimentos de tectos e de paredes serem completamente diferentes.

Figura 4.35. – Capela 2 (da Ressurreição de Jesus), interior [foto do autor].

De salientar que foi objectivo do dono de obra ter duas capelas geometrica e visualmente idênticas mas com componentes acústicos bem distintos. Uma capela que potenciaria a transmissão da palavra (capela 1) com menor tempo de reverberação e outra favorável à música (capela 2) com maior tempo de reverberação.

4.2.4. Capela da Morte de Jesus

A capela da Morte de Jesus, que assume neste trabalho o nome de capela 3+4, é a única capela situada na zona de acolhimento de peregrinos portugueses na parte norte do complexo (Figura 4.22.).

Os parâmetros arquitectónicos, obtidos através de medições *in situ* como nas restantes capelas, apresentam-se no Quadro 4.6.

Quadro 4.6. – Parâmetros arquitectónicos da capela 3+4.

Parâmetro	Capela 3+4
Altura (m)	4,8
Largura (m)	19
Comprimento (m)	35
Área (m^2)	665
Volume (m^3)	3190
Lugares sentados	588

Os revestimentos utilizados na capela 3+4 são em tudo idênticos aos utilizados na capela 1. Passam pelo pavimento em mármore de cor clara bastante reflector, lambrim em contraplacado de madeira com 1,5 m de altura e o revestimento das restantes superfícies das paredes e tecto em painéis de fibras de madeira aglomeradas do tipo "*Akustaplan*" sendo o pormenor construtivo igual ao utilizado para a capela 1 (Figura 4.27.).

O revestimento das paredes, em conformidade com as anteriores capelas, também foi aplicado com uma inclinação vertical de cerca de 5° devido à possível geração de reflexões múltiplas.

A capacidade de 588 lugares sentados está distribuída por 42 bancos, cada um com 7 metros de comprimento, ao contrário dos 6 metros dos bancos das outras duas capelas. Estes são igualmente construídos em madeira de faia e almofadados.

O acesso à capela pode ser efectuado através de seis portas ao longo das suas duas paredes laterais, cada uma construída com o mesmo material (cerejeira) e com exactamente as mesmas dimensões, 1,95 m de largura e 2,12 m de altura, que as das outras capelas.

Nesta capela existem duas grandes aberturas na parede do lado direito para a entrada de luz natural, a mais pequena com 3,50 m de largura, 1,15 m de altura e 1,55 m de profundidade e a maior com 8,45 m de largura, 1,15 m de altura e 1,55 m de profundidade (Figura 4.36.).

O sistema de reforço eletroacústico é constituído por quatro altifalantes da marca "*Bose*", dois de cada um dos lados da capela (Figura 4.37.) e com diferentes orientações estando um altifalante de cada lado orientado para abranger uma zona mais próxima do altar e os outros dois orientados para abranger uma zona mais afastada do altar. Para além dos altifalantes o sistema de reforço electroacústico é constituído por amplificação "*Crown*", processamento "*BSS*" e sistemas de microfones "*AKG*".

Inicialmente em projecto previa-se a execução de dois altares, um em cada topo desta capela, que possibilitava com o simples fecho de uma divisória amovível (Figuras 4.38. e 4.39.) a criação de duas novas capelas, mais pequenas, mas que tornaria possível a execução simultânea de duas celebrações distintas, bastante útil em dias de maior afluência ao Santuário.

Na realidade só existe um altar no topo norte da capela, pelo que este potencial benefício fica um pouco desfavorecido, mas mesmo assim a divisória amovível foi construída e está em pleno funcionamento podendo-se criar, com a sua utilização, dois espaços distintos.

No lado do topo sul surge assim um espaço sem altar mas que se poderá utilizar, por exemplo, como uma zona de exposições. Este espaço por facilidade de tratamento passará a ser designado por capela 3, apesar de não o poder ser na realidade sem alterações (Figura 4.40.). Os parâmetros arquitectónicos deste novo espaço apresentam-se no Quadro 4.7.

Quadro 4.7. – Parâmetros arquitectónicos da capela 3.

Parâmetro	Capela 3
Altura (m)	4,8
Largura (m)	19
Comprimento (m)	22
Área (m^2)	418
Volume (m^3)	2005
Lugares sentados	448

No lado do topo norte onde se encontra o altar surge uma nova capela, apelidada de capela 4 (Figura 4.41.). Nesta nova capela pode-se efectuar celebrações ao mesmo tempo que outra actividade se desenrola na capela 3. A capela 4 conta com os seguintes parâmetros arquitectónicos descritos no Quadro 4.8.

Quadro 4.8. – Parâmetros arquitectónicos da capela 4.

Parâmetro	Capela 3
Altura (m)	4,8
Largura (m)	19
Comprimento (m)	13
Área (m^2)	247
Volume (m^3)	1185
Lugares sentados	140

A divisória amovível é composta por vinte e dois painéis individuais com 0,90 m de largura e 4,80 m de altura que deslizam, um a um através de uma abertura localizada na parede lateral da capela 3+4 e por meio de calhas instaladas no pavimento e no tecto da capela, para o seu local final (Figuras 4.38. e 4.39.). Através de uma inspecção visual das divisões dos painéis da divisória por parte do autor, a constituição destes poderá ser possivelmente painéis sanduíche de contraplacado de madeira e de poliestireno extrudido.

Quando a divisória não está a ser utilizada fica armazenada numa área técnica própria, com acesso pelo exterior, não roubando assim espaço útil à capela 3+4 (Figura 4.42.).

Figura 4.36. – Capela 3+4 (da Morte de Jesus), abertura maior na parede do lado direito com a abertura mais pequena ao fundo [foto do autor].

Figura 4.37. – Capela 3+4 (da Morte de Jesus), altifalantes da marca "*Bose"* responsável pela difusão da palavra [foto do autor].

Figura 4.38. – Montagem da divisória amovível na capela 3+4 [foto do autor].

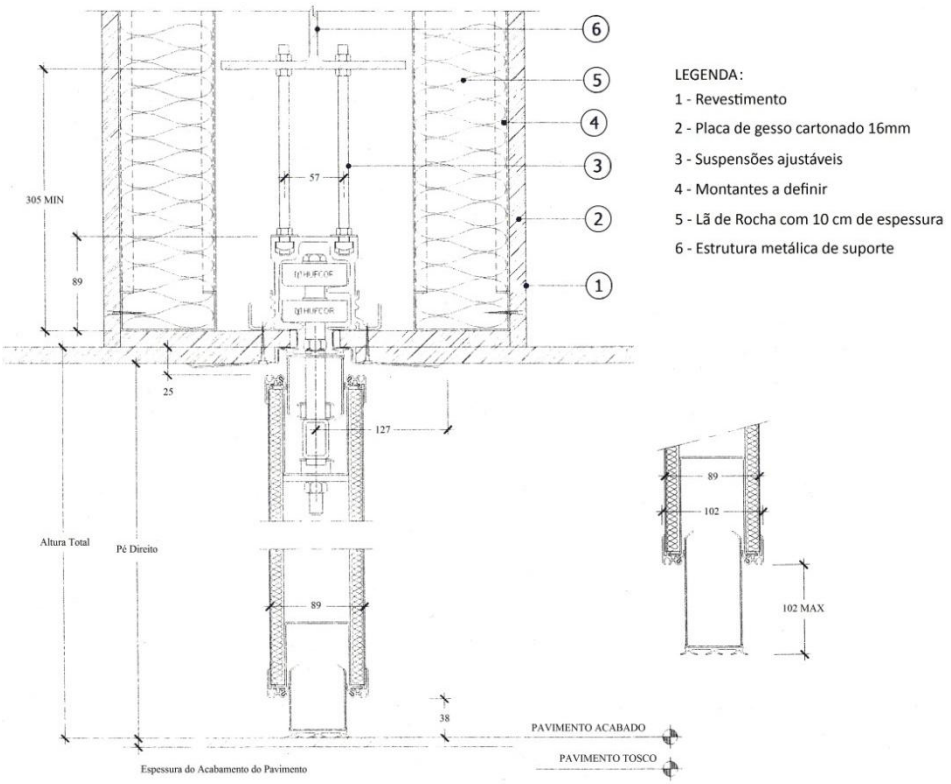

Figura 4.39. – Pormenor construtivo da divisória amovível da capela 3+4 [95].

Figura 4.40. – Capela 3 formada pela divisão da capela 3+4 por parede amovível [foto do autor].

Figura 4.41. – Capela 4 formada pela divisão da capela 3+4 por parede amovível [foto do autor].

Figura 4.42. – Zona técnica de armazenamento dos painéis da divisória da capela 3+4 [Foto do autor].

4.2.5. Átrio de acesso às capelas da Santíssima Trindade e da Ressurreição de Jesus

O átrio de acesso às capelas da Santíssima Trindade e da Ressurreição de Jesus localiza-se no local de acolhimento de peregrinos estrangeiros e faz a ligação entre o corredor principal, denominado Galilé dos Apóstolos São Pedro e São Paulo, e as capelas 1 e 2 (Figura 4.22.).

É um espaço de ligação bastante amplo, com ausência de mobiliário, cujas superfícies interiores são todas bastante reflectoras e caracteriza-se pelos parâmetros arquitectónicos constantes no Quadro 4.9. O pavimento é em mármore de cor clara, que por sua vez também é utilizado na execução de um lambrim de 1,65 metros de altura em toda a extensão das paredes. Tanto a parte superior de todas as paredes como o tecto são rebocados e pintados (Figura 4.43.).

Quadro 4.9. – Parâmetros arquitectónicos do átrio.

Parâmetro	Átrio
Altura (m)	4,8
Largura (m)	8,6
Comprimento máx. (m)	22,9
Comprimento min. (m)	21,0
Área (m2)	188,2
Volume (m3)	903

Este átrio possui um grande pano em vidro, com 8,57 m de largura e 2,13 m de altura, que dá acesso a um corredor técnico (Figura 4.44.) paralelo ao corredor principal. Conta ainda com quatro portas de acesso às capelas (duas de cada lado), duas portas de maiores dimensões (1,98 m de largura e 2,97 m de altura) de acesso ao corredor principal (Figura 4.45.) e três portas (1,00 m de largura e 2,12 m de altura cada uma) de acesso a áreas técnicas.

Existe ainda dois tapetes de entrada localizados nas duas portas de maior dimensão que dá passagem para o corredor principal, cada um com 2,0 m de largura e 1,9 m de comprimento.

Figura 4.43. – Átrio de acesso às capelas 1, do lado direito, e 2, do lado esquerdo [Foto do autor].

Figura 4.44. – Corredor técnico que passa por de trás das capelas e é paralelo ao corredor principal denominado Galilé dos Apóstolos São Pedro e São Paulo [Foto do autor].

Figura 4.45. – Porta de acesso ao átrio [Foto do autor]

4.3. VALORES IDEAIS ACONSELHÁVEIS PARA OS PARÂMETROS ACÚSTICOS

O principal objectivo da acústica numa igreja é conseguir, independentemente da localização do ouvinte, a boa percepção da palavra por este, obtendo ainda assim, um ambiente musical tão bom quanto a inteligibilidade da palavra o permita.

Os valores para o ruído de fundo devem revelar a grande preocupação com o silêncio pois a igreja é também um espaço de oração e recolhimento pessoal.

Para o parâmetro de RASTI este deve ser elevado para haver boa percepção da palavra por toda a capela dado que a palavra é um veículo fundamental nas celebrações eucarísticas.

Para isso os valores aconselháveis para os parâmetros são [97]:

- LAeq $\leq$ 30 dB;
- NC $\leq$ 25 dB;
- RASTI $\geq$ 0,50;
- TRmédio (500, 1k Hz) $\approx$ 1 s para a palavra;
- TRmédio (500, 1k Hz) $\approx$ 2 a 4 s para a música/cânticos.

Quanto ao Tempo de Reverberação adoptaram-se valores ideais distintos para as capelas 1 e 2 deliberadamente na sequência da proposta do dono-de-obra para criar duas capelas, embora geométrica e visualmente idênticas, com um comportamento acústico bem distinto, como referido no subcapítulo 4.2.3.

5
ENSAIOS E RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

São abordados, neste capítulo, os ensaios acústicos realizados *in situ* assim como os resultados obtidos nas três capelas da Reconciliação da Igreja da Santíssima Trindade em Fátima no âmbito da realização deste trabalho.

Os ensaios foram realizados no dia 19 de Março de 2010 entre as 14h30 e as 22h30 e apesar das condições atmosféricas exteriores serem adversas, estas não prejudicaram a realização dos ensaios dada a localização subterrânea das capelas.

Devido às medições terem sido realizadas em horário de visitas não foi de todo possível proporcionar as melhores condições. Principalmente na capela 1 onde esteve sempre presente algumas pessoas em oração e, em determinadas alturas, em circulação. Perante estas condições, houve uma tentativa para manter todas as portas sempre fechadas durante os ensaios e o cuidado de evitar ao máximo a perturbação dos resultados, parando ou mesmo repetindo os ensaios em curso sempre que o ruído provocado pela presença das pessoas no local era evidentemente prejudicial para os testes.

De realçar que o acesso às diversas capelas nunca foi vedado ao público que pretendesse visitá-las, pelo que a execução dos ensaios se prolongou por várias horas.

Na capela 3+4 para além de se efectuar os ensaios na sua modalidade de 588 lugares sentados, também se ensaiou as capelas 3 e 4, com 448 e 140 lugares sentados respectivamente, que surgem da colocação da divisória amovível existente no local.

Para a realização deste trabalho foram realizadas as seguintes medições:

- Medição do tempo de reverberação por bandas de uma oitava em todas as capelas em estudo, capelas 1, 2, 3+4, 3 e 4;
- Medição do tempo de reverberação por banda de um terço de oitava nas capelas 1 e 3;
- Medição do índice de inteligibilidade da palavra (RASTI) nas capelas 1, 2 e 3+4 sem e com recurso ao sistema de reforço electroacústico existente;
- Medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo sem e com AVAC em funcionamento nas capelas 1, 2 e 3+4;
- Medição do isolamento sonoro entre a capela 1 e a capela 2, e entre a capela 2 e o átrio de acesso;
- Medição do isolamento sonoro da divisória amovível da capela 3+4.

Na avaliação dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo foi utilizado um sonómetro *2260* da Brüel & Kjær (Figura 5.1.). Ele foi ainda utilizado para avaliação dos tempos de reverberação e do isolamento sonoro, juntamente com uma fonte sonora modelo *4224* (Figura 5.2.), também da Brüel & Kjær. Para a avaliação do RASTI recorreu-se a um medidor da transmissão da palavra da Brüel & Kjær *3361*, constituído por um transmissor tipo *BK4225* (Figura 5.3.) e um receptor *BK4419* (Figura 5.4.).

Todos os equipamentos utilizados, propriedade do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foram manuseados pelo Eng. António Eduardo Costa.

Figura 5.1. – Sonómetro 2260 da Brüel & Kjær [Foto do autor].

Figura 5.2. – Fonte emissora B&K 4224 [Foto do autor].

Figura 5.3. – Transmissor de RASTI tipo *BK4225* da Brüel & Kjær [Foto do autor].

Figura 5.4. – Receptor de RASTI tipo *BK4419* da Brüel & Kjær [Foto do autor].

Neste capítulo, para além da apresentação e discussão dos resultados dos ensaios efectuados, terá lugar a comparação destes valores com os valores registados na igreja da Santíssima Trindade retirados da tese de mestrado de Pedro Silva "Caracterização Acústica Interior da Nova Igreja da Santíssima Trindade em Fátima" [9].

Apresenta-se também a comparação das capelas com igrejas de volumetria semelhante seleccionadas das teses de mestrado de Telma Silva "Guião da Acústica de Igrejas em Portugal" [98] e de Cátia Martins "Caracterização Acústica das duas igrejas de Santo Ovídio, Mafamude" [99].

Por último efectua-se o cálculo do parâmetro *SII* (*Speech Intelligibility Index*) de cada capela em estudo e compara-se com os valores medidos de RASTI.

5.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.2.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Devido às propriedades de simetria das capelas, optou-se por se fazer o ensaio deste parâmetro em metade de cada espaço, considerando os valores obtidos para essa metade válidos para a outra metade.

Para se conseguir caracterizar cada capela na sua totalidade escolheram-se três pontos para a avaliação do tempo de reverberação situados nos lugares sentados ao nível médio dos ouvidos de uma pessoa (cerca de 1,20 m de altura). A fonte sonora foi posicionada no eixo de simetria de cada capela e a uma distância de 3,40 m da parede onde se situa o altar (Figuras 5.5. e 5.6.).

No caso da capela 3+4 procedeu-se, para além do ensaio na modalidade de 588 lugares sentados (Figura 5.6.), ao ensaio do tempo de reverberação nos dois espaços criados pela utilização da divisória amovível existente, escolhendo-se, também aqui, três pontos para caracterizar cada espaço criado. Neste caso localizou-se a fonte sonora novamente no eixo de simetria de cada espaço e a uma distância de 3,40 m e 2,55 m da parede onde se encontra o altar e da divisória amovível respectivamente (Figura 5.7.).

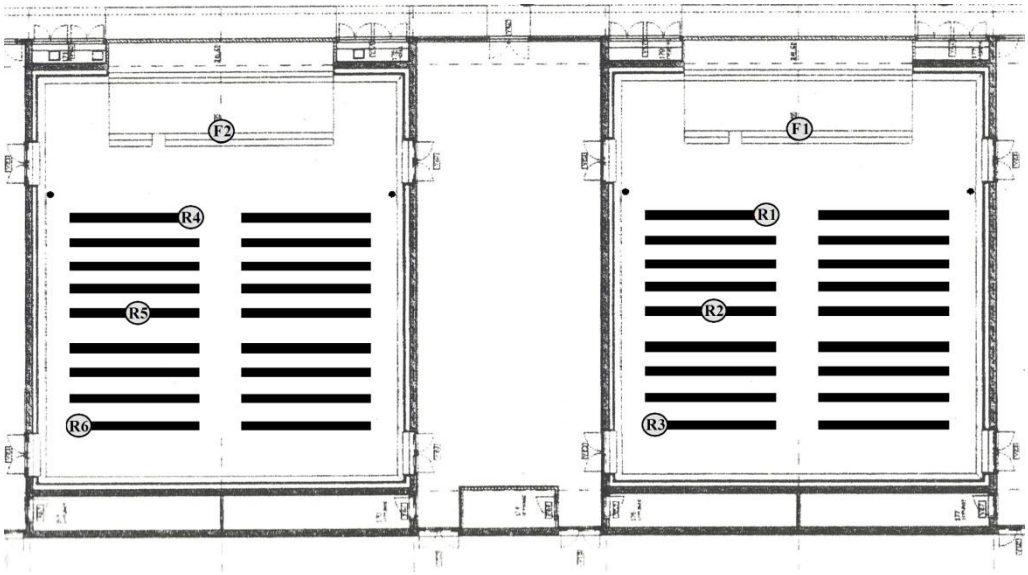

Figura 5.5. – Localização dos três pontos ensaiados (R), para a avaliação do tempo de reverberação, e da fonte sonora (F) na capela 2 (à esquerda) e na capela 1 (à direita).

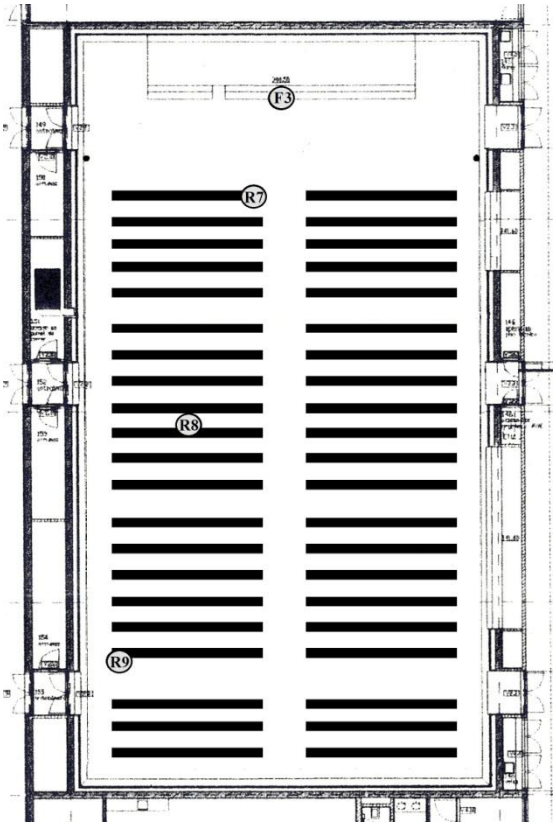

Figura 5.6. – Localização dos três pontos ensaiados (R), para a avaliação do tempo de reverberação, e da fonte sonora (F) na capela 3+4.

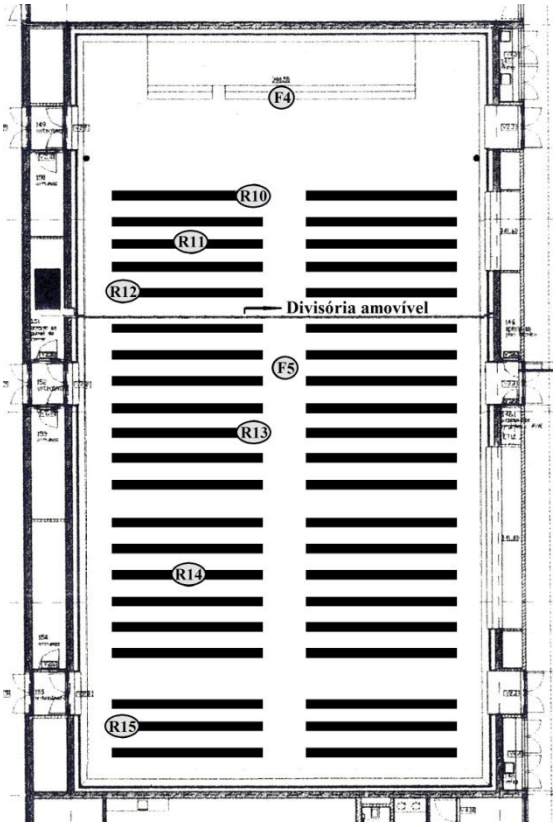

Figura 5.7. – Localização dos três pontos ensaiados (R), para a avaliação do tempo de reverberação, e da fonte sonora (F) na capela 3 (em baixo) e na capela 4 (em cima).

Todas as capelas encontravam-se mobiladas e no caso da capela 1 estava presente uma pessoa em oração, para além do técnico responsável pelo ensaio. Utilizou-se uma fonte sonora (Figura 5.2.) que emitiu um intenso ruído de teste com características aproximadas de ruído rosa, durante 8 segundos, de forma a assegurar que o decaimento se sobrepusesse sempre ao ruído de fundo sem que este o pudesse interferir.

Após essa emissão, o sonómetro registou o nível de pressão sonora (Figura 5.8.), no ponto a medir, e calculou o seu decaimento correspondente a 30 dB, nas bandas de frequência entre os 125 Hz e os 4k Hz, por bandas de uma oitava.

Para cada ponto ensaiado posicionou-se o sonómetro em duas orientações diferentes, paralelas às duas diagonais da sala em questão, para que o ruído de teste produzido pela fonte incidisse com um determinado ângulo no microfone, conseguindo assim uma maior homogeneização dos registos do decaimento. O valor que o sonómetro fornece para cada ponto ensaiado será assim equivalente à média aritmética dos valores dados pelas duas orientações diferentes. Se não se tivesse em conta esta situação, os valores obtidos poderiam estar sobreavaliados incorrendo assim numa má avaliação do tempo de reverberação.

O sonómetro, automaticamente, extrapola os valores registados dos decaimentos de 30 dB para os 60 dB fornecendo, assim, os valores finais de tempo de reverberação.

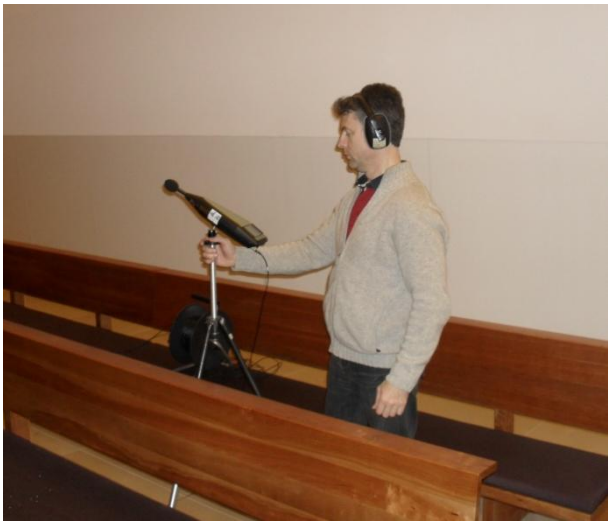

Figura 5.8. – Registo do tempo de reverberação por parte do sonómetro [Foto do autor].

5.2.2. Apresentação e Discussão dos Resultados

Para cada um dos pontos ensaiados registou-se automaticamente no sonómetro os valores de TR30 por bandas de frequência de uma oitava dos 125 aos 4k Hz como já mencionado anteriormente.

Nos quadros e figuras que se seguem (Quadros 5.1. a 5.5. e Figuras 5.9. a 5.14.) apresentam-se os valores obtidos de TR30 para as três capelas (capelas 1, 2 e 3+4) em estudo e para os dois espaços criados (capela 3 e capela 4) com a colocação da divisória amovível da capela 3+4 assim como uma média aritmética por banda de frequência de cada espaço em análise.

Quadro 5.1. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 1.

Fonte/Receptor	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	TR (500, 1k Hz)	TR (500, 1k, 2k Hz)
TR $_{(F1-R1)}$ (s)	0,93	0,86	0,74	0,88	0,95	0,95	0,81	0,86
TR $_{(F1-R2)}$ (s)	1,03	0,94	0,70	0,85	0,94	0,90	0,78	0,83
TR $_{(F1-R3)}$ (s)	0,79	0,86	0,76	0,85	0,88	0,88	0,81	0,83
TR $_{(médio)}$ (s)	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8

Quadro 5.2. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 2.

Fonte/Receptor	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	TR (500, 1k Hz)	TR (500, 1k, 2k Hz)
TR $_{(F2-R4)}$ (s)	2,25	2,47	2,45	3,15	3,68	2,77	2,80	3,09
TR $_{(F2-R5)}$ (s)	2,26	2,51	2,39	3,29	3,62	2,83	2,84	3,10
TR $_{(F2-R6)}$ (s)	2,09	2,55	2,44	3,25	3,60	2,80	2,85	3,10
TR $_{(médio)}$ (s)	2,2	2,5	2,4	3,2	3,6	2,8	2,8	3,1

Quadro 5.3. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 3+4.

Fonte/Receptor	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	TR (500, 1k Hz)	TR (500, 1k, 2k Hz)
TR (F3-R7) (s)	1,46	1,16	1,00	1,24	1,28	1,26	1,12	1,17
TR (F3-R8) (s)	1,32	1,18	1,14	1,23	1,37	1,29	1,19	1,25
TR (F3-R9) (s)	1,40	1,17	1,12	1,24	1,34	1,36	1,18	1,23
TR (médio) (s)	1,4	1,2	1,1	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2

Quadro 5.4. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 3.

Fonte/Receptor	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	TR (500, 1k Hz)	TR (500, 1k, 2k Hz)
TR (F4-R10) (s)	1,33	1,16	0,95	1,15	1,31	1,26	1,05	1,14
TR (F4-R11) (s)	1,23	1,18	0,96	1,17	1,31	1,26	1,07	1,15
TR (F4-R12) (s)	1,37	1,24	0,98	1,21	1,29	1,27	1,10	1,16
TR (médio) (s)	1,3	1,2	1,0	1,2	1,3	1,3	1,1	1,2

Quadro 5.5. – Valores medidos e valores médios do tempo de reverberação (TR30) por bandas de frequência de uma oitava na capela 4.

Fonte/Receptor	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	TR (500, 1k Hz)	TR (500, 1k, 2k Hz)
TR (F5-R13) (s)	1,28	1,10	1,07	1,19	1,24	1,20	1,13	1,17
TR (F5-R14) (s)	1,26	1,17	1,09	1,18	1,26	1,21	1,14	1,18
TR (F5-R15) (s)	1,15	1,15	1,02	1,19	1,26	1,20	1,11	1,16
TR (médio) (s)	1,2	1,1	1,1	1,2	1,3	1,2	1,1	1,2

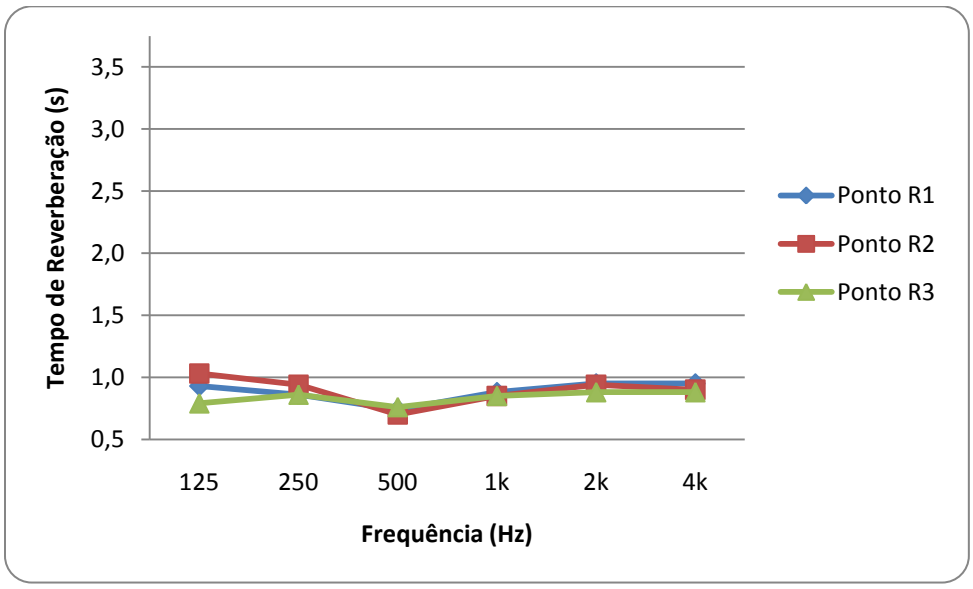

Figura 5.9. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 1.

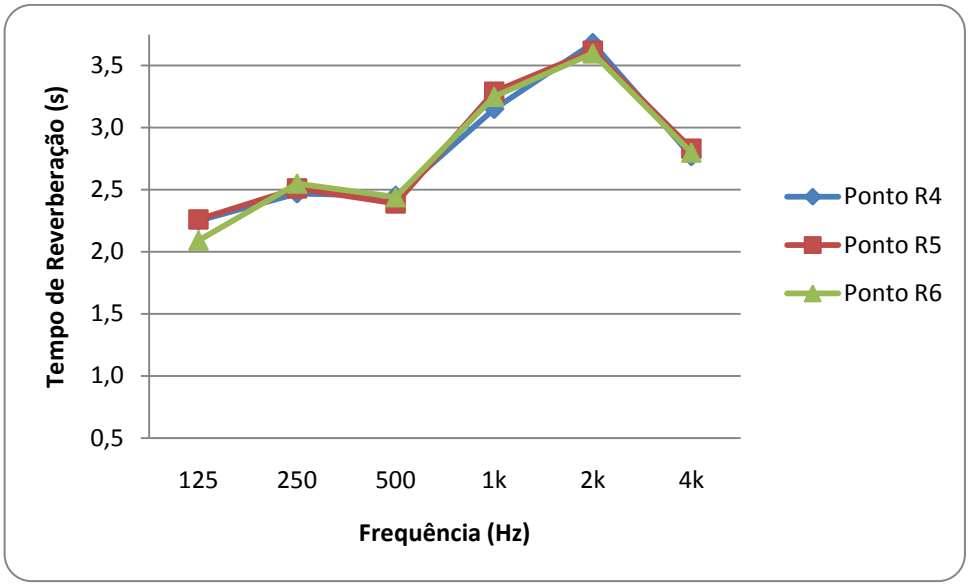

Figura 5.10. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 2.

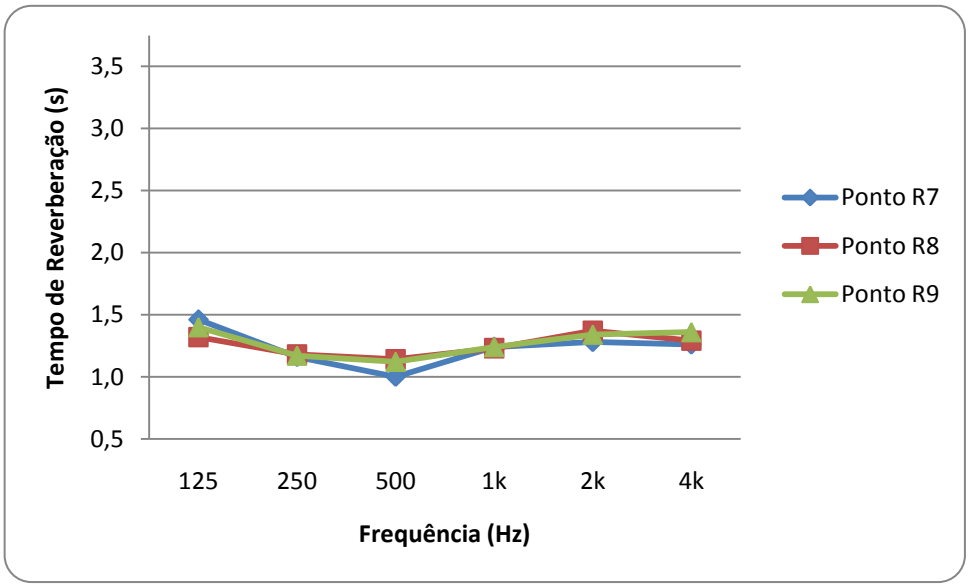

Figura 5.11. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 3+4.

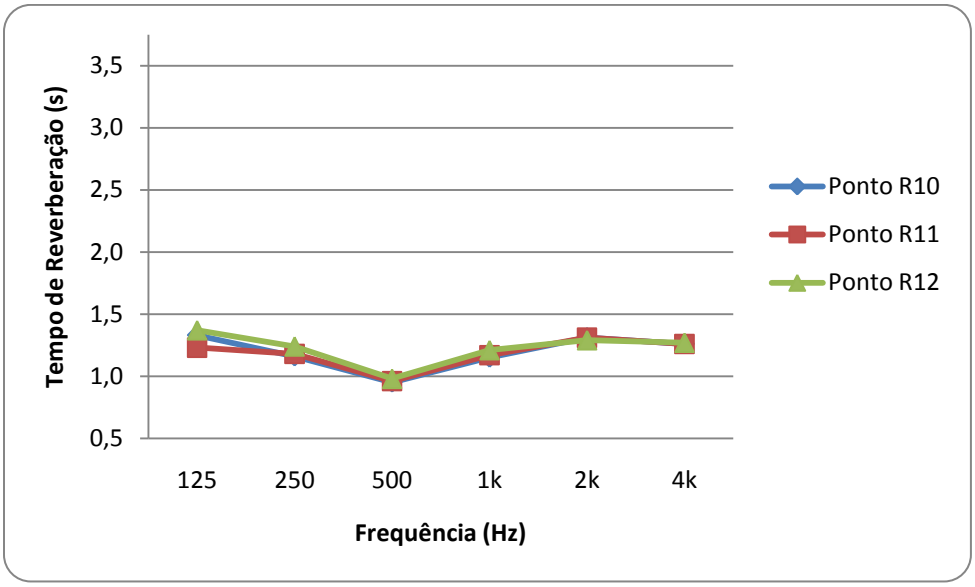

Figura 5.12. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 3.

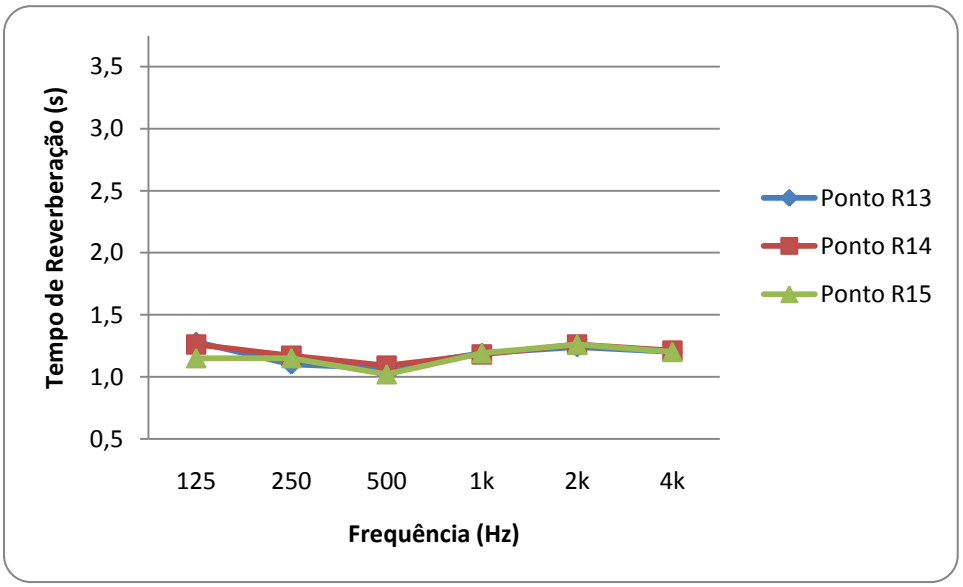

Figura 5.13. – Valores medidos do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava na capela 4.

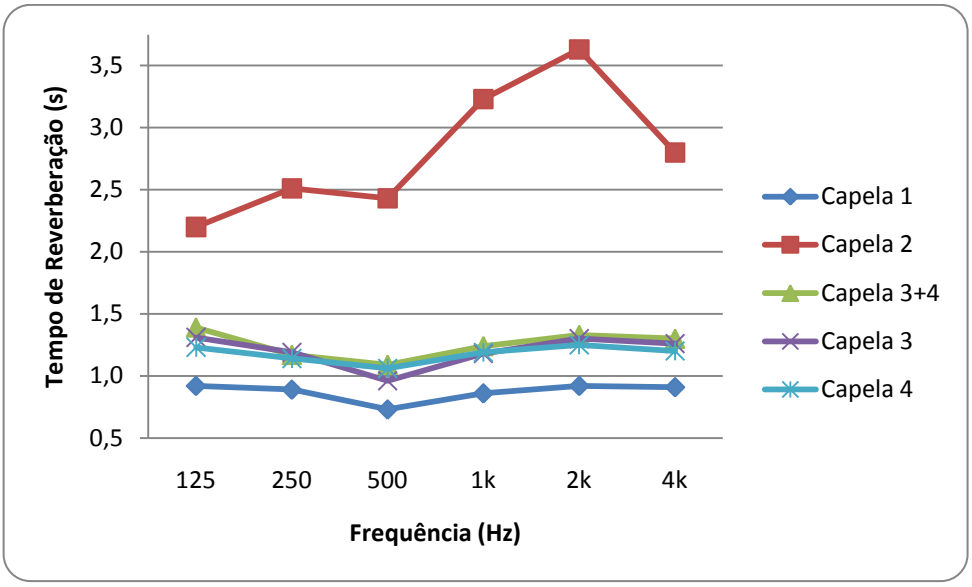

Figura 5.14. – Valores médios do tempo de reverberação por bandas de frequência de uma oitava em todas as capelas.

Uma das principais funções de uma igreja é a transmissão da palavra o que só é viável acontecer se existir uma boa inteligibilidade da palavra. Para isso é necessário que o tempo de reverberação do local seja baixo. Os valores ideais de tempo de reverberação para que possa haver uma boa inteligibilidade da palavra, não considerando o possível reforço electroacústico, situam-se entre os 0,8 e os 1,0 s [11]. Ao contrário do expresso na actual legislação portuguesa (RRAE) [100], estes valores deveriam ser independentes da volumetria do espaço a ser avaliado, porque as necessidades de uma certa reverberação para se obter uma boa inteligibilidade é constante e não se perde essa necessidade na presença de espaços de grande volume.

No que diz respeito aos valores ideais para a música, estes já são mais elevados, rondando os 2,0-2,5 s e até mais elevados em função do tipo de música [11]. Estes valores são necessários para que haja um entrelace das sucessivas notas musicais para que estas não sejam entendidas distintamente umas das outras.

Pela análise dos valores médios do tempo de reverberação (Figura 5.14.) pode-se verificar que a capela 1 apresenta um tempo de reverberação de cerca de 0,9 s ao longo do espectro de frequências em análise, com a excepção da banda de frequência de 500 Hz em que o valor desce para os 0,73 s. Isto pode-se dever ao elevado coeficiente de absorção que o material de revestimento *Akustaplan* tem na banda de frequência de 500 Hz (Quadro 4.3.).

A capela 3+4, assim como as capelas 3 e 4 originadas pela colocação da divisória amovível existente, têm valores de tempo de reverberação muito idênticos mas ligeiramente mais elevados que a capela 1. Dado que os materiais de revestimento destas três capelas são os mesmos, pois as capelas 3 e 4 surgem da divisão da capela 3+4, é de notar que o factor condicionante do tempo de reverberação entre as três será o seu volume. Pela análise dos valores de $TR_{(500,\ 1k\ Hz)}$ (Quadros 5.3. a 5.5.) verifica-se que a capela 3+4, que é a de maior volume, é a que tem um tempo de reverberação médio ligeiramente mais elevado, cerca de 1,2 s, quando comparado com as capelas 3 e 4 com 1,1 s que, por surgirem de uma divisão, têm menor volume.

Na lógica deste raciocínio, seria de esperar também que a capela 3 fosse menos reverberante que a capela 1, visto que tem menos 30% de volume. Isto na realidade não se verifica porque ao colocar-se a

divisória para a criação da capela 3, esta vai ficar com um pano de parede de grandes dimensões (91,2 m^2), correspondente à própria divisória, bastante reflector, muito mais do que se fosse revestido com o material *Akustaplan*. Por isso, apesar da capela 1 ter um volume superior, é a capela 3 a mais reverberante.

Para a capela 3+4 assim como para as capelas 3 e 4 que surgem da sua divisão verifica-se tal como na capela 1 uma especial diminuição do tempo de reverberação na banda de 500 Hz visto que estes espaços também têm um tratamento acústico à base do material de revestimento *Akustaplan*.

A capela 2 é a que apresenta os tempos de reverberação mais elevados do conjunto de todas as capelas com um TR $_{(500,\ 1k\ Hz)}$ de 2,8 s (Quadro 5.2.). Pode-se constatar, pela Figura 5.14., que o valor do TR é inferior à média para as bandas de frequência entre os 125 e os 500 Hz rondando os 2,4 s, subindo até a um máximo de cerca de 3,6 s para a banda de frequência de 2 kHz e voltando a diminuir para a banda de frequência dos 4 kHz para valores de 2,8 s. Estes valores do tempo de reverberação bastante elevados quando comparados com os registados na capela 1 de geometria idêntica, já não se deve ao efeito do volume mas sim à opção tomada pelo dono-de-obra em tratar acusticamente as superfícies da capela 2 fazendo com que estas sejam muito mais reflectoras, especialmente nas bandas de frequência afectas à palavra. A descida do tempo de reverberação verificada para a banda de frequência dos 4 kHz deve-se prender muito provavelmente pelos bancos existentes na capela serem almofadados, material poroso e fibroso que como já foi referido no subcapítulo 2.12., tem um bom desempenho como absorsor acústico nas altas frequências.

Na Figura 5.15. faz-se a comparação entre os valores do TR $_{(500,\ 1k,\ 2k\ Hz)}$ de cada capela com os valores ideais, para a palavra e para a música.

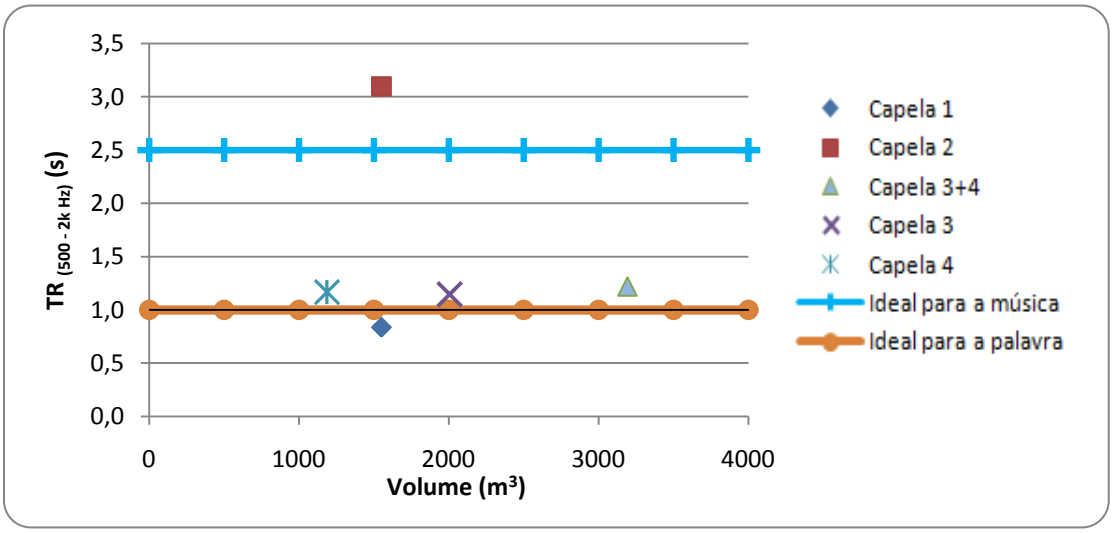

Figura 5.15. – Valores do tempo de reverberação médio nas bandas de 500, 1k e 2k Hz de cada capela, valores ideais do tempo de reverberação para a palavra e para a música.

Analisando a Figura 5.15. conclui-se que as capelas 1, 3+4, 3 e 4 têm condições óptimas, ao nível do tempo de reverberação, para que haja uma boa inteligibilidade da palavra, pois apresentam tempos de reverberação médios (TR $_{(500,\ 1k,\ 2k\ Hz)}$) na gama dos valores indicados como ideais para a palavra, a rondar o 1 s.

Só a capela 2, dado o seu tempo de reverberação bastante elevado, é que fica na zona considerada ideal para a música, tornando-a assim um excelente local para este fim.

5.3. RASTI

5.3.1. Descrição do Ensaio

Apelando novamente às propriedades de simetria das capelas, optou-se por ensaiar este parâmetro só em metade do espaço, como já se fez para o tempo de reverberação, considerando posteriormente que os valores obtidos para esta metade serão válidos também para a outra metade.

Para caracterizar cada capela na sua totalidade escolheram-se seis pontos situados nos lugares sentados ao nível médio dos ouvidos de uma pessoa (cerca de 1,20 m de altura). Dois desses pontos localizam-se nos dois extremos da primeira fila de bancos de cada capela, os pontos três e quatro situam-se nos extremos da fila central de bancos e os dois últimos pontos situam-se nos extremos da última fila de bancos de cada capela (Figuras 5.16. e 5.17.).

Contudo, na capela 1 o altifalante do lado esquerdo não estava a funcionar, pelo que se optou por localizar os seis pontos na metade direita da capela de maneira a estes estarem abrangidos pelo altifalante direito em funcionamento.

A fonte emissora foi colocada, em todas as capelas, a uma distância de 1,50 m da parede onde se situa o altar e nos ensaios em que se utilizou o sistema de reforço electroacústico, o microfone ficou perfeitamente alinhado e a uma distância de 30 cm da fonte emissora, o que equivale à distância média do orador (Figuras 5.16. e 5.17.).

Este método, uma simplificação do método STI, consiste na emissão de um sinal sonoro por parte de uma fonte sonora localizada no altar, na posição habitual do orador (Figura 5.18.). A simplificação do RASTI está na análise de só duas bandas de oitava, 500 e 2k Hz, ao contrário do método STI que analisa sete bandas de oitava dos 125 aos 8k Hz e na utilização de um máximo de cinco frequências de modelação ao contrário das catorze utilizadas pelo STI.

O sinal sonoro é emitido em frequências suficientes para simular a gama de frequências utilizadas na palavra e é capaz de originar as mesmas flutuações de intensidade sonora da fala.

O equipamento receptor, situado nos diversos pontos de análise já mencionados, regista por sua vez as modificações causadas ao sinal sonoro ao longo de todo o percurso, desde a fonte até chegar ao microfone do receptor, calculando assim o valor de RASTI com base nas frequências de modelação.

Para cada ponto em análise registaram-se três leituras, sendo estas um mínimo admissível devido à fácil variação deste parâmetro, efectuando-se posteriormente uma média aritmética para cada ponto para se obter o valor final de RASTI.

Inicialmente efectuou-se o ensaio nos diversos pontos com um nível de emissão sonora 10 dB acima do valor de referência, 69 dB na banda dos 500 Hz e 60 dB na banda dos 2kHz, e numa segunda fase do ensaio ligou-se o sistema de reforço electroacústico (Figura 5.19.) e voltou-se a registar os novos valores obtidos.

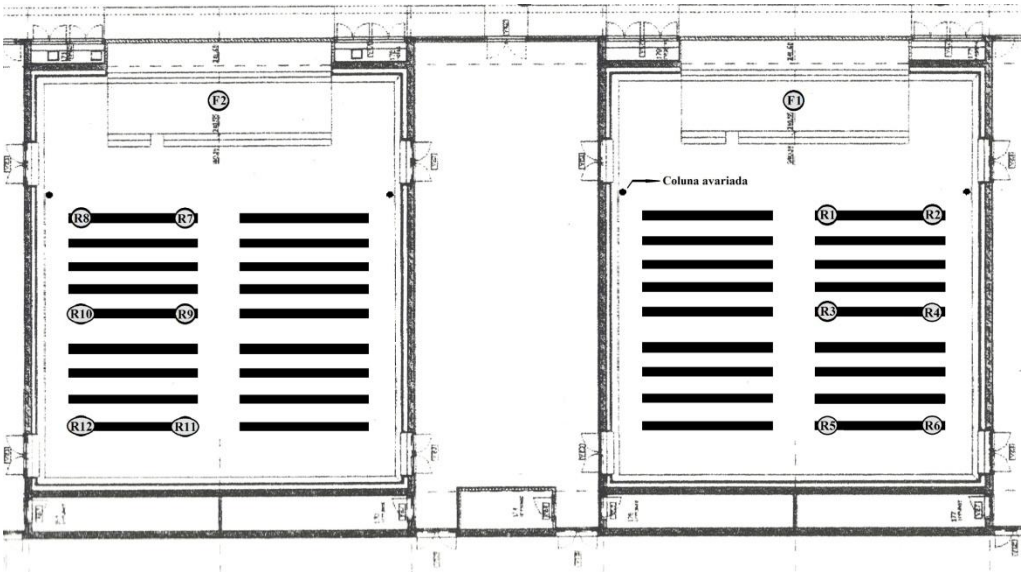

Figura 5.16. – Localização dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do índice de inteligibilidade da palavra (RASTI), e da fonte emissora (F) na capela 2 (à esquerda) e na capela 1 (à direita).

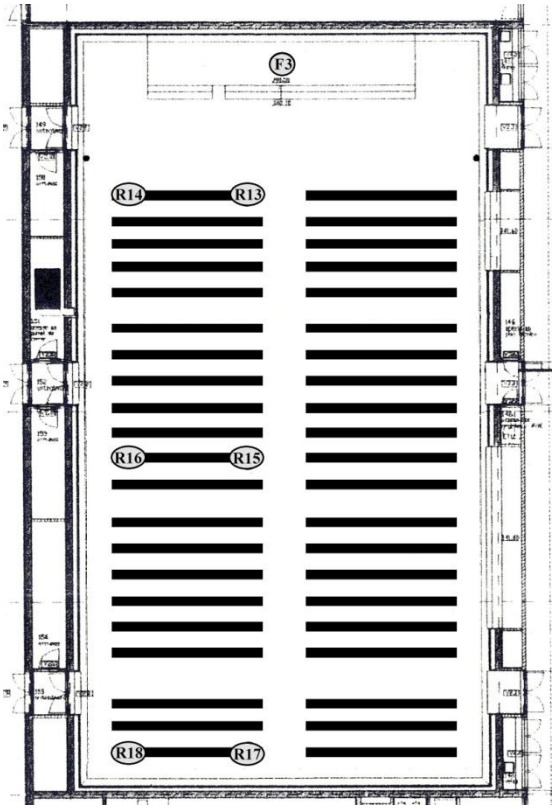

Figura 5.17. – Localização dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do índice de inteligibilidade da palavra (RASTI), e da fonte emissora (F) na capela 3+4.

Figura 5.18. – Emissor do sinal sonoro (RASTI) localizado no altar na posição do orador a cerca de 30 cm de distância do microfone [Foto do autor].

Figura 5.19. – Sistema de reforço electroacústico das capelas do 1 e 2 (à esquerda) e da capela 3+4 (à direita) [Fotos do autor].

5.3.2. Apresentação e Discussão dos Resultados

Como já mencionado no subcapítulo anterior, registaram-se os valores de RASTI para seis pontos em cada capela, inicialmente sem o sistema de reforço electroacústico ligado e depois com este em funcionamento.

Sem o sistema de reforço electroacústico em funcionamento e para cada ponto, onde se registou três valores de RASTI, procedeu-se ao cálculo de uma média aritmética para se encontrar um valor único médio de RASTI. A partir destes valores médios de cada ponto, passou-se a calcular um valor de RASTI característico de cada capela, obtendo-se assim três valores de RASTI, um por cada capela em estudo (Quadros 5.6. a 5.8.).

O mesmo método de tratamento de dados foi efectuado para os valores de RASTI obtidos com o sistema de reforço electroacústico ligado (Quadros 5.9. a 5.11.) obtendo-se no final outros três valores de RASTI característicos de cada capela.

Nas Figuras 5.20. a 5.22. são apresentados os valores médios de cada ponto com e sem o sistema de reforço electroacústico ligado para cada capela em análise.

Quadro 5.6. – Valores de RASTI da capela 1 com o sistema de reforço electroacústico desligado.

Emissor/Receptor	RASTI			RASTI médio ponto	RASTI médio capela 1
	1.ª	2.ª	3.ª		
F1-R1	0,76	0,76	0,77	0,76	0,68
F1-R2	0,70	0,68	0,69	0,69	
F1-R3	0,67	0,67	0,69	0,68	
F1-R4	0,66	0,65	0,66	0,66	
F1-R5	0,66	0,65	0,64	0,65	
F1-R6	0,65	0,65	0,64	0,65	

Quadro 5.7. – Valores de RASTI da capela 2 com o sistema de reforço electroacústico desligado.

Emissor/Receptor	RASTI			RASTI médio ponto	RASTI médio capela 2
	1.ª	2.ª	3.ª		
F2-R7	0,50	0,48	0,49	0,49	0,42
F2-R8	0,46	0,46	0,45	0,46	
F2-R9	0,40	0,39	0,41	0,40	
F2-R10	0,39	0,38	0,37	0,38	
F2-R11	0,38	0,38	0,38	0,38	
F2-R12	0,40	0,38	0,39	0,39	

Quadro 5.8. – Valores de RASTI da capela 3+4 com o sistema de reforço electroacústico desligado.

Emissor/Receptor	RASTI			RASTI médio ponto	RASTI médio capela 3+4
	1.ª	2.ª	3.ª		
F3-R13	0,72	0,73	0,74	0,73	0,63
F3-R14	0,66	0,68	0,68	0,67	
F3-R15	0,61	0,61	0,62	0,61	
F3-R16	0,60	0,60	0,59	0,60	
F3-R17	0,58	0,59	0,57	0,58	
F3-R18	0,58	0,57	0,56	0,57	

Quadro 5.9. – Valores de RASTI da capela 1 com o sistema de reforço electroacústico ligado.

Emissor/Receptor	RASTI			RASTI médio ponto	RASTI médio capela 1
	1.ª	2.ª	3.ª		
F1-R1	0,75	0,76	0,76	0,76	0,69
F1-R2	0,73	0,74	0,74	0,74	
F1-R3	0,70	0,70	0,69	0,70	
F1-R4	0,65	0,64	0,65	0,65	
F1-R5	0,67	0,67	0,66	0,67	
F1-R6	0,67	0,66	0,66	0,66	

Quadro 5.10. – Valores de RASTI da capela 2 com o sistema de reforço electroacústico ligado.

Emissor/Receptor	RASTI			RASTI médio ponto	RASTI médio capela 2
	1.ª	2.ª	3.ª		
F2-R7	0,48	0,48	0,48	0,48	0,42
F2-R8	0,42	0,41	0,42	0,42	
F2-R9	0,43	0,42	0,43	0,43	
F2-R10	0,38	0,39	0,39	0,39	
F2-R11	0,40	0,39	0,39	0,39	
F2-R12	0,40	0,41	0,42	0,41	

Quadro 5.11. – Valores de RASTI da capela 3+4 com o sistema de reforço electroacústico ligado.

Emissor/Receptor	RASTI			RASTI médio ponto	RASTI médio capela
	1.ª	2.ª	3.ª		
F3-R13	0,68	0,68	0,69	0,68	0,67
F3-R14	0,78	0,77	0,78	0,78	
F3-R15	0,66	0,65	0,67	0,66	
F3-R16	0,64	0,66	0,64	0,65	
F3-R17	0,64	0,63	0,64	0,64	
F3-R18	0,63	0,62	0,61	0,62	

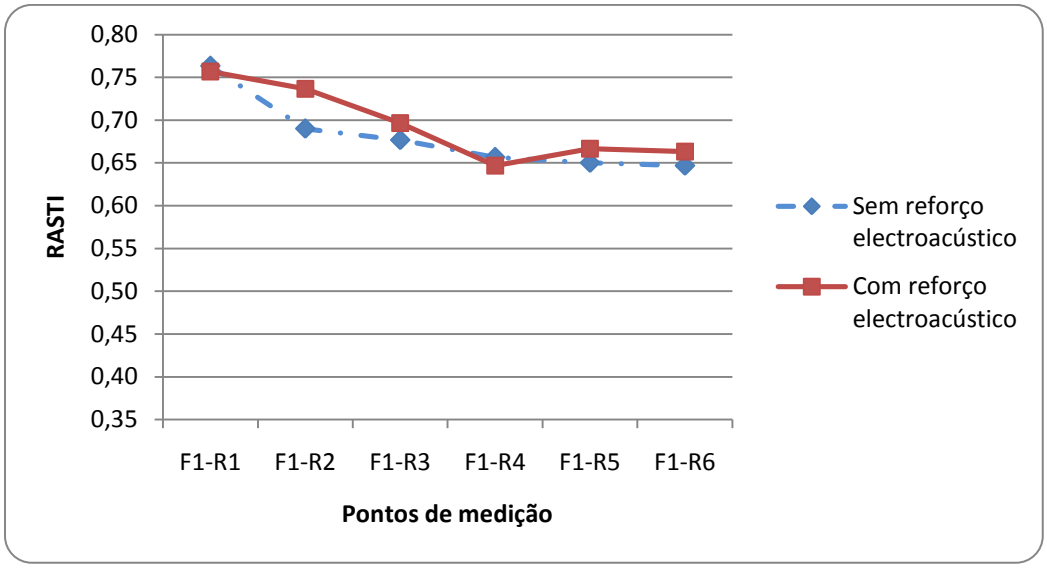

Figura 5.20. – Valores médios de RASTI de cada ponto ensaiado na capela 1 com e sem sistema de reforço electroacústico em funcionamento.

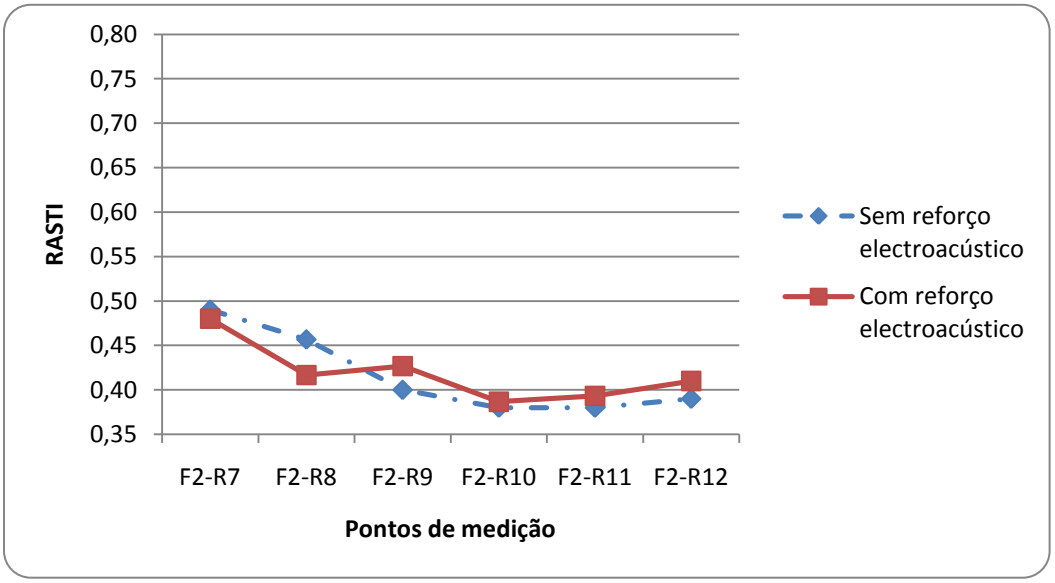

Figura 5.21. – Valores médios de RASTI de cada ponto ensaiado na capela 2 com e sem sistema de reforço electroacústico em funcionamento.

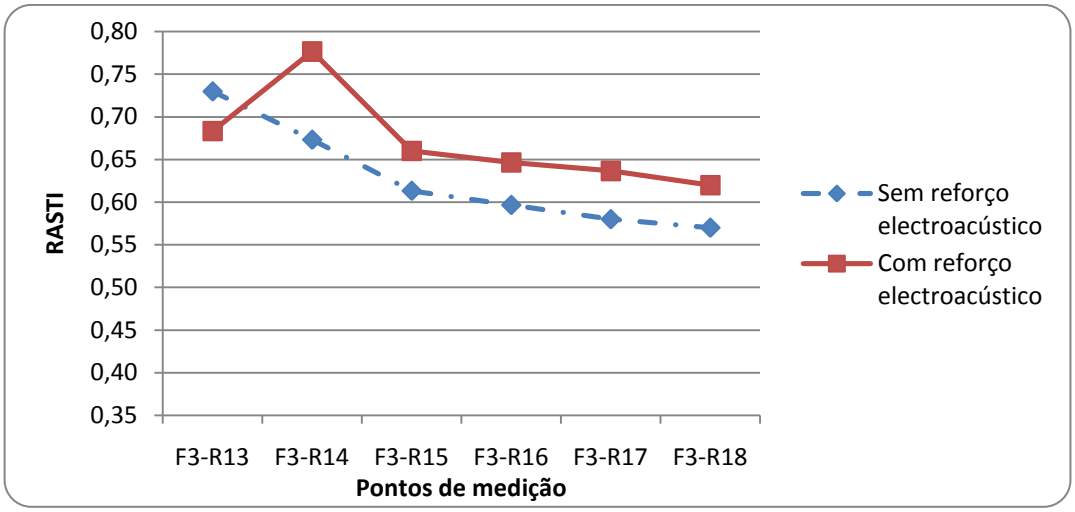

Figura 5.22. – Valores médios de RASTI de cada ponto ensaiado na capela 3+4 com e sem sistema de reforço electroacústico em funcionamento.

Pela análise global dos valores de RASTI obtidos (Quadros 5.6. a 5.11.) e em comparação com a inteligibilidade da palavra (Quadro 2.6.) verifica-se que, como seria de esperar já pela análise feita no subcapítulo 5.2.2. ao tempo de reverberação, a capela 1 e a capela 3+4 têm índices de RASTI elevados sem o uso do sistema de reforço electroacústico o que lhes configura uma boa inteligibilidade da palavra. Com o reforço electroacústico em funcionamento denota-se uma melhoria dos valores de RASTI para estas duas capelas, principalmente para a capela 3+4. Já a capela 2 tem valores de RASTI para as duas situações, com ou sem reforço electroacústico, bastante mais baixos, o que lhe confere uma inteligibilidade da palavra medíocre (Quadro 5.12.).

Quadro 5.12. – Valores médios do RASTI e inteligibilidade da palavra nas capelas 1, 2 e 3+4.

Situação	Valor RASTI médio	Inteligibilidade da palavra
Capela 1 sem reforço electroacústico	0,68	Boa
Capela 1 com reforço electroacústico	0,69	Boa
Capela 2 sem reforço electroacústico	0,42	Medíocre
Capela 2 com reforço electroacústico	0,42	Medíocre
Capela 3+4 sem reforço electroacústico	0,63	Boa
Capela 3+4 com reforço electroacústico	0,67	Boa

Pela pequena variação registada dos valores de RASTI, que não levam a uma melhoria significativa da inteligibilidade da palavra, prova-se que é desnecessário o uso do sistema de reforço electroacústico.

Analisando mais em detalhe os valores obtidos sem o funcionamento do sistema de reforço electroacústico percebe-se claramente, como referido no subcapítulo 2.14., que a inteligibilidade da palavra se deteriora com o aumento da distância do ouvinte ao orador, verificando-se um grande decréscimo dos valores do RASTI principalmente da primeira fila para as restantes avaliadas (Figuras 5.20. a 5.22.).

Nos Quadros 5.13. a 5.15. e nas Figuras 5.23. a 5.25. apresentam-se os valores das variações registadas em cada ponto em análise das diversas capelas, assim como a variação média por capela do valor de RASTI a quando da colocação em funcionamento do sistema de reforço electroacústico.

Quadro 5.13. – Variação média do valor de RASTI em cada ponto com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 1.

Emissor/Receptor	F1-R1	F1-R2	F1-R3	F1-R4	F1-R5	F1-R6
Variação média por ponto	0,00	0,05	0,02	-0,01	0,02	0,01
Variação média na capela	0,01					

Quadro 5.14. – Variação média do valor de RASTI de cada ponto com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 2.

Emissor/Receptor	F2-R7	F2-R8	F2-R9	F2-R10	F2-R11	F2-R12
Variação média por ponto	-0,01	-0,04	0,03	0,01	0,01	0,02
Variação média na capela	0,00					

Quadro 5.15. – Variação média do valor de RASTI de cada ponto com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 3+4.

Emissor/Receptor	F3-R13	F3-R14	F3-R15	F3-R16	F3-R17	F3-R18
Variação média por ponto	-0,05	0,11	0,05	0,05	0,06	0,05
Variação média na capela	0,04					

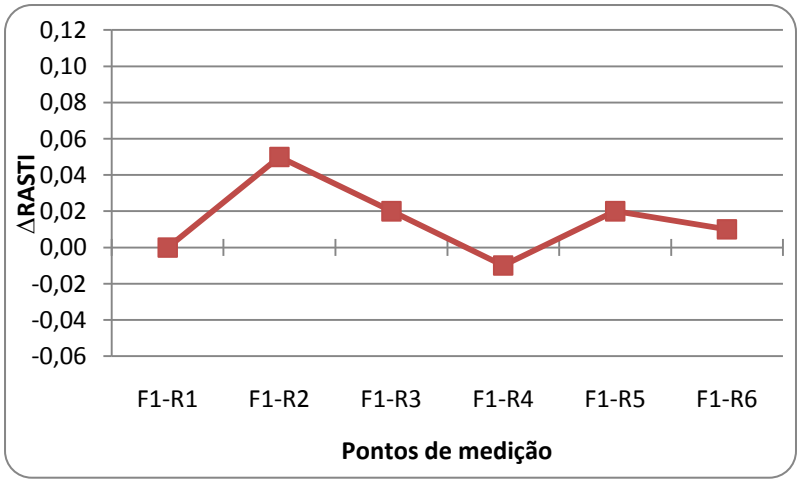

Figura 5.23. – Variação média dos valores do RASTI por ponto de medição com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 1.

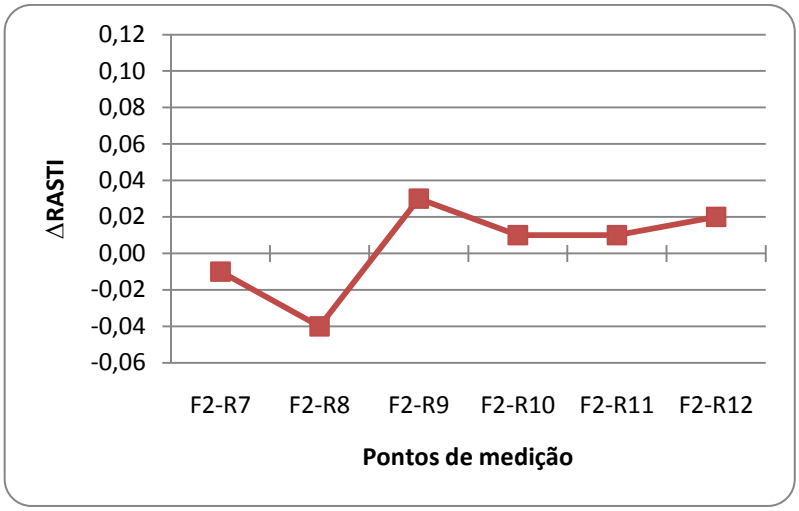

Figura 5.24. – Variação média dos valores do RASTI por ponto de medição com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 2.

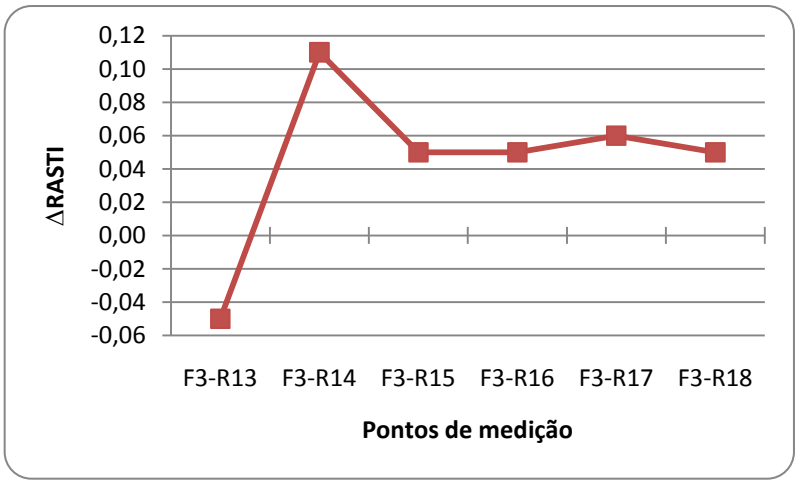

Figura 5.25. – Variação média dos valores do RASTI por ponto de medição com a introdução do sistema de reforço electroacústico na capela 3+4.

Na capela 1, ao colocar-se em funcionamento o sistema de som denota-se uma ligeira melhoria dos valores de RASTI, que pode estar limitada pelo facto de durante as medições o altifalante do lado esquerdo não estar a funcionar (Figura 5.16.). Por outro lado, o não funcionamento do altifalante do lado esquerdo pode ser favorável para a inteligibilidade da metade direita da capela porque, a sua potencial orientação seria para a outra metade da capela, a esquerda, causando assim alguma perturbação na metade em análise.

Verifica-se que os lugares mais próximos do altifalante (ponto R2), obtêm um ganho no valor do RASTI na ordem dos 0,05, ao passo que, os lugares mais afastados do orador (pontos R5 e R6) obtêm um ganho da inteligibilidade da palavra não muito acentuado (Quadro 5.13. e Figura 5.23.).

Tanto com o sistema de reforço electroacústico em funcionamento como tendo este desligado, o ponto mais próximo do orador (ponto R1) é um local excelente ao nível da inteligibilidade da palavra. Comprova-se também que o altifalante direito não tem nenhuma relevância para este local dado que o valor de 0,76 de RASTI não se alterou.

Na capela 2 que, devido ao elevado tempo de reverberação verificado (Quadro 5.2. e Figura 5.10.), já não possui boas condições para a inteligibilidade da palavra, constata-se que, ao se colocar em funcionamento o sistema electroacústico a situação da capela não melhora (Quadro 5.14 e Figura 5.24.). Os lugares da frente, que eram até ai os mais favorecidos (tendo um RASTI superior a 0,45) saem principalmente prejudicados, e o ganho que se verifica para as zonas do meio e da parte de trás da capela, passando em média dos 0,38 para os 0,40, é bastante diminuto, quase não justificando a implementação do sistema de reforço electroacústico.

A capela 3+4, como já se referiu anteriormente, sofre um ganho considerável com a ligação do sistema de reforço electroacústico. Todos os pontos, com a excepção do que se situa mais próximo do orador (ponto R13), sofreram um ganho de RASTI acima dos 0,05. Os lugares junto ao altifalante passam de uma boa para uma excelente inteligibilidade da palavra com o uso do sistema de som, enquanto os lugares mais afastados do orador que possuíam uma inteligibilidade suficiente passam a ter uma boa inteligibilidade com a subida do valor de RASTI dos 0,57 para os 0,62 (ponto R18)

A principal vantagem que o sistema de reforço electroacústico traz à capela 3+4 é a capacidade de homogeneizar o índice de RASTI, não havendo assim uma grande variação na inteligibilidade da palavra qualquer que seja o local do ouvinte (Quadro 5.11. e Figura 5.22.).

5.4. RUÍDO DE FUNDO

5.4.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Para caracterizar totalmente o ruído de fundo nas diversas capelas escolheram-se dois pontos. Estes situam-se no corredor central que divide cada capela em duas partes simétricas e ao nível médio dos ouvidos de uma pessoa sentada (Figuras 5.26. e 5.27.). Esta localização central é devida à possibilidade de os resultados poderem ser significativamente influenciados por reflexões se os pontos de medição estiverem a menos de um metro de distância de uma superfície reflectora, como por exemplo as paredes.

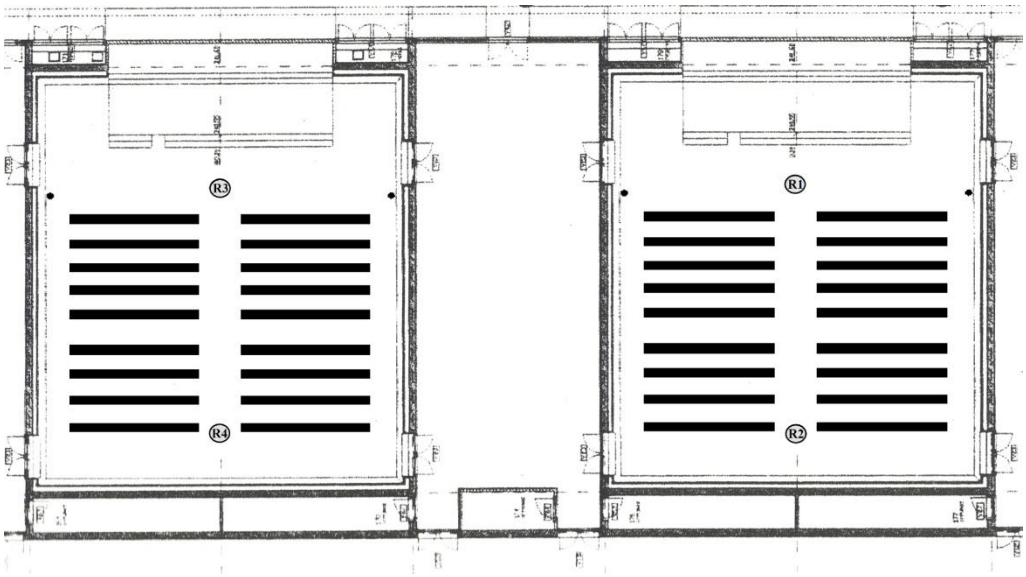

Figura 5.26. – Localização dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do ruído de fundo, na capela 2 (à esquerda) e na capela 1 (à direita).

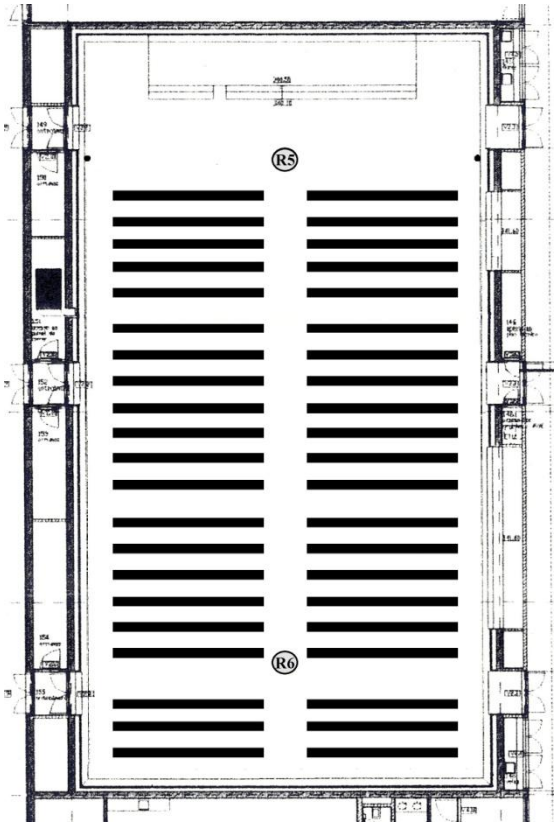

Figura 5.27. – Localização dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do ruído de fundo, na capela 3+4.

Com o auxílio de um sonómetro e numa primeira fase procedeu-se à medição do ruído de fundo nos dois pontos de cada capela sem o funcionamento do sistema de AVAC durante 3 minutos para que este pudesse estabilizar. Numa segunda fase e já com o sistema de AVAC ligado mediu-se novamente o ruído de fundo nos diversos pontos mas agora durante 1 minuto pois este tipo de ruído tem maior facilidade em estabilizar, não sendo necessário tanto tempo de análise.

O sonómetro registou os valores dos níveis de pressão sonora obtidos para as bandas de frequência de uma oitava entre os 32 e os 8k Hz em cada uma das capelas, para se efectuar a comparação com as curvas de incomodidade NC (*Noise Criterion*) e NR (*Noise Rating*).

5.4.2. Apresentação e Discussão dos Resultados

Para este parâmetro, registaram-se os valores, que são apresentados nos Quadros 5.16. a 5.21., nos dois pontos escolhidos para cada capela em duas situações diferentes, com e sem o funcionamento do AVAC (Figuras 5.26. e 5.27.), efectuando-se uma média energética para determinar-se o nível médio de pressão sonora ($L_{médio}$) por banda de frequência. Nos mesmos quadros também se apresentam os valores médios do nível sonoro L_A ponderado com a curva A (Figura 2.8.) por banda de oitava dos 32 aos 8k Hz.

Quadro 5.16. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 1 sem o funcionamento do AVAC.

Ponto	Frequência (Hz)								
	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
L (R1) (dB)	37,7	31,1	23,9	20,6	17,9	17,8	17,1	14,4	13,6
L (R2) (dB)	37,7	31,1	23,9	21,0	18,3	17,9	17,2	14,5	13,5
$L_{Médio}$ (dB)	37,7	31,1	23,9	20,8	18,1	17,9	17,2	14,5	13,6
L_A (dB)	-2,3	5,1	8,4	12,3	15,1	17,9	18,2	15,5	12,6

Quadro 5.17. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 2 sem o funcionamento do AVAC.

Ponto	Frequência (Hz)								
	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
L (R3) (dB)	38,2	31,7	23,9	19,2	17,3	17,9	16,7	13,4	13,3
L (R4) (dB)	37,9	31,4	23,7	19,1	17,1	17,7	16,7	13,4	13,2
$L_{Média}$ (dB)	38,1	31,6	23,8	19,2	17,2	17,8	16,7	13,4	13,3
L_A (dB)	-1,9	5,6	8,3	10,7	14,2	17,8	17,7	14,4	12,3

Quadro 5.18. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 3+4 sem o funcionamento do AVAC.

Ponto	Frequência (Hz)								
	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
L (R5) (dB)	36,7	27,2	24,4	20,9	19,1	18,5	14,3	13,0	13,5
L (R6) (dB)	36,5	27,1	24,1	20,6	18,7	18,1	14,1	12,9	13,4
$L_{Média}$ (dB)	36,6	27,2	24,3	20,8	18,9	18,3	14,2	13,0	13,5
L_A (dB)	-3,4	1,2	8,8	12,3	15,9	18,3	15,2	14,0	12,5

Quadro 5.19. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 1 com o funcionamento do AVAC.

Ponto	Frequência (Hz)								
	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
L (R1) (dB)	34,8	31,3	26,6	24,1	19,9	18,1	16,4	14,6	12,1
L (R2) (dB)	34,6	31,4	26,7	24,0	20,1	18,3	16,5	14,8	12,2
$L_{Média}$ (dB)	34,7	31,4	26,7	24,1	20,0	18,2	16,5	14,7	12,2
L_A (dB)	-5,3	5,4	11,2	15,6	17,0	18,2	17,5	15,7	11,2

Quadro 5.20. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 2 com o funcionamento do AVAC.

Ponto	Frequência (Hz)								
	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
L (R3) (dB)	41,1	40,3	42,7	40,2	33,7	30,4	28,1	23,8	18,5
L (R4) (dB)	40,7	40,1	42,9	40,5	34,9	30,2	26,9	21,3	16,3
$L_{Média}$ (dB)	40,9	40,2	42,8	40,4	34,3	30,3	27,5	22,7	17,5
L_A (dB)	0,9	14,2	27,3	31,9	31,3	30,3	28,5	23,7	16,5

Quadro 5.21. – Valores médios e medidos dos níveis de pressão sonora (L) e do nível sonoro (L_A) do ruído de fundo na capela 3+4 com o funcionamento do AVAC.

Ponto	Frequência (Hz)								
	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
L (R5) (dB)	40,2	33,4	29,5	26,8	22,4	21,4	19,4	17,0	13,2
L (R6) (dB)	39,4	33,2	30,4	27,8	21,8	20,6	18,5	15,5	13,0
$L_{Média}$ (dB)	39,8	33,3	30,0	27,3	22,1	21,0	19,0	16,3	13,1
L_A (dB)	-0,2	7,3	14,5	18,8	19,1	21,0	20,0	17,3	12,1

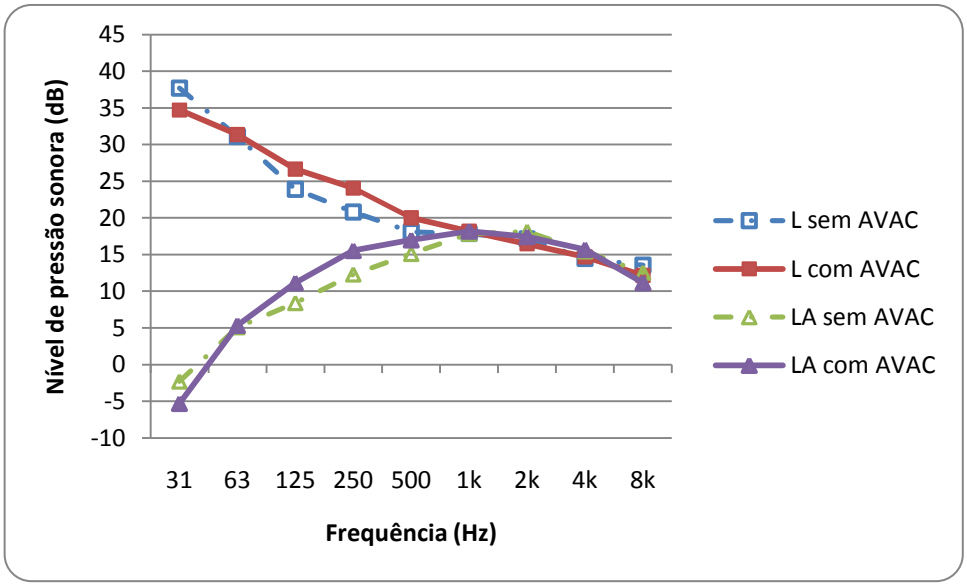

Figura 5.28. – Valores dos níveis de pressão sonora (L) e dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz para a capela 1 com e sem o funcionamento do AVAC.

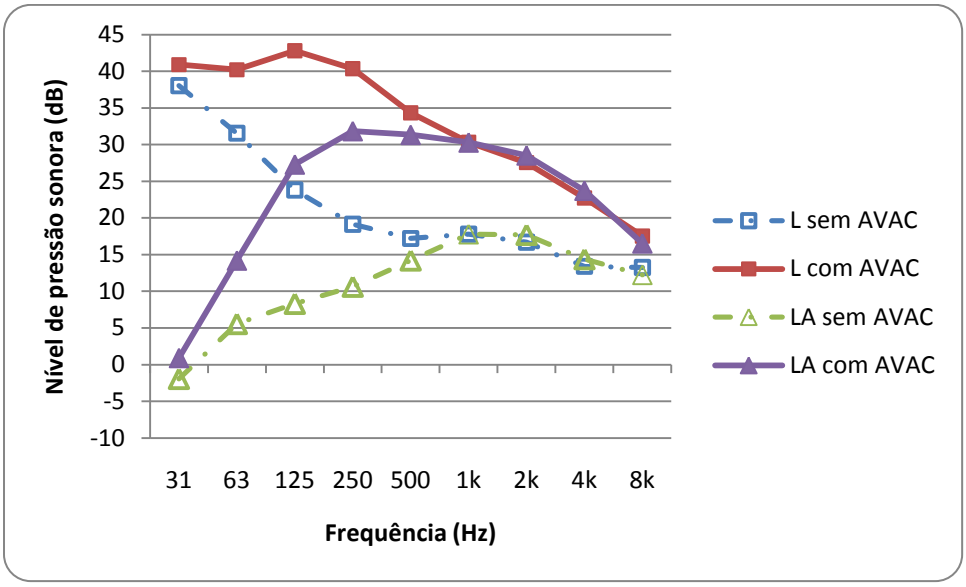

Figura 5.29. – Valores dos níveis de pressão sonora (L) e dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz para a capela 2 com e sem o funcionamento do AVAC.

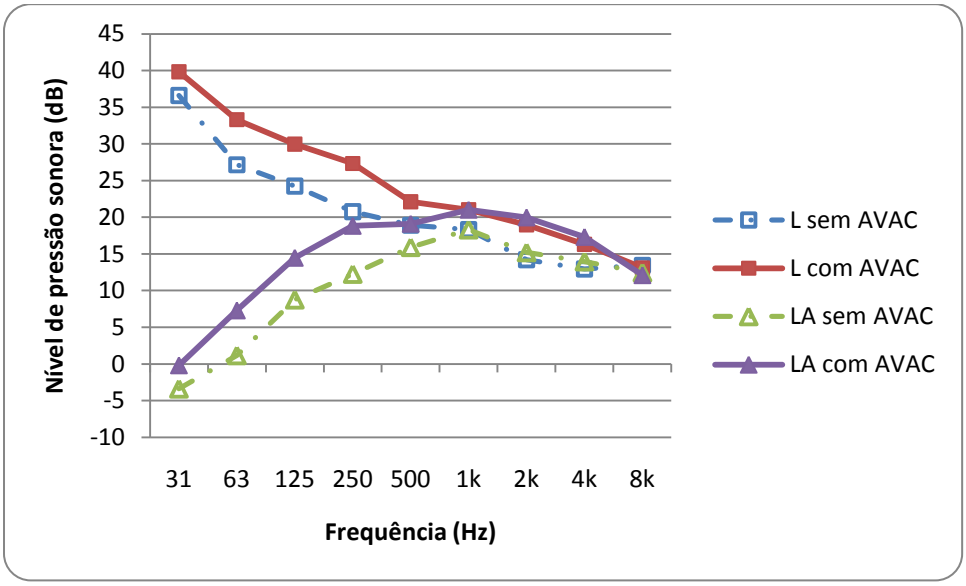

Figura 5.30. – Valores dos níveis de pressão sonora (L) e dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz para a capela 3+4 com e sem o funcionamento do AVAC.

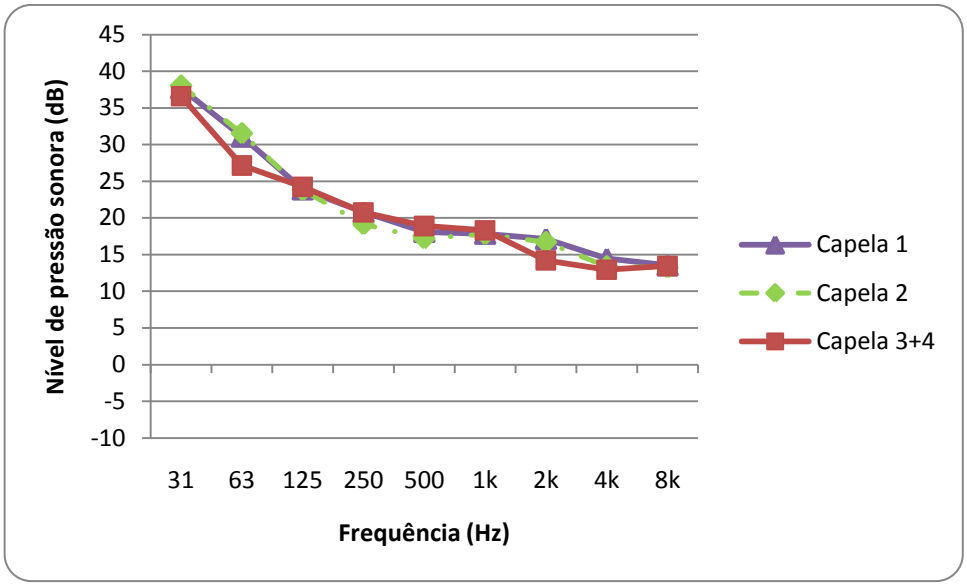

Figura 5.31. – Comparação dos valores dos níveis de pressão sonora (L) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz sem o funcionamento do AVAC das três capelas.

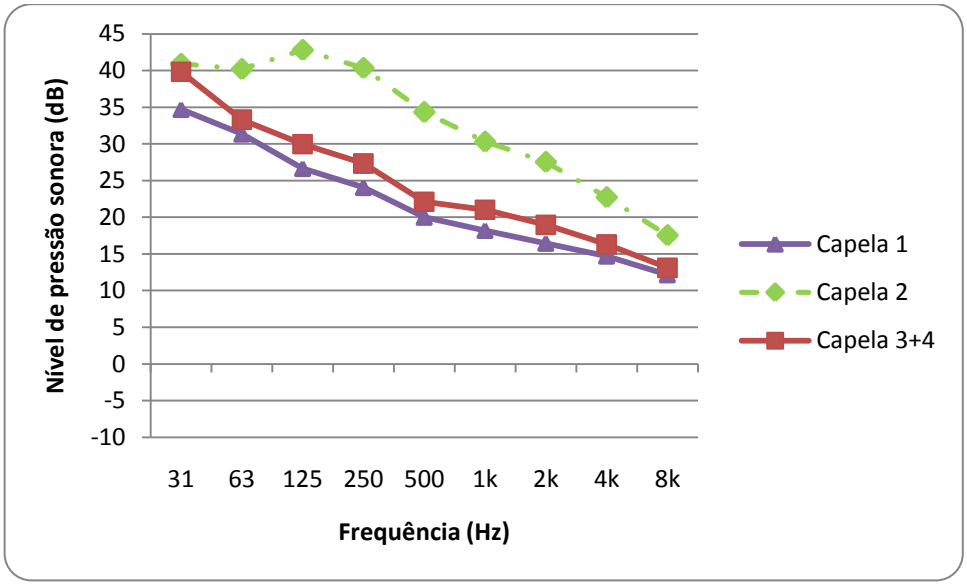

Figura 5.32. – Comparação dos valores dos níveis de pressão sonora (L) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz com o funcionamento do AVAC das três capelas.

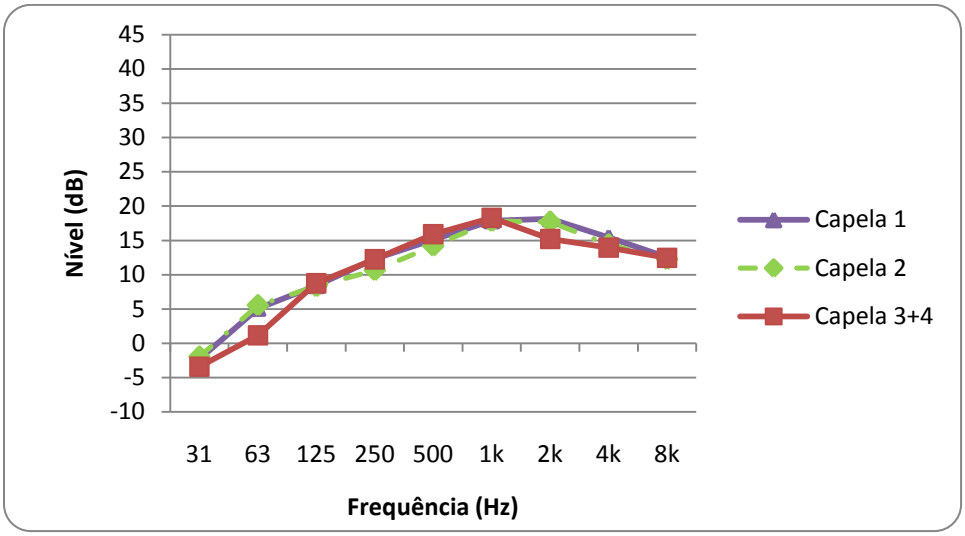

Figura 5.33. – Comparação dos valores dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz sem o funcionamento do AVAC das três capelas.

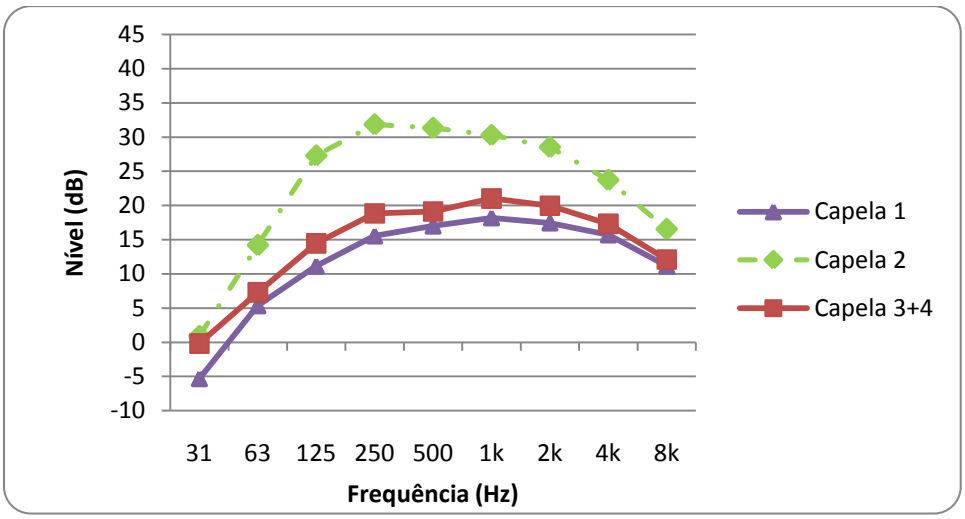

Figura 5.34. – Comparação dos valores dos níveis sonoros (L_A) do ruído de fundo para as bandas de uma oitava entre os 31 e os 8k Hz com o funcionamento do AVAC das três capelas.

Quadro 5.22. – Valores dos níveis de pressão sonora equivalente e níveis sonoros equivalentes (L e L_A) para cada capela e variação entre os valores com e sem AVAC (ΔL e ΔL_A).

Capela	L (dB)		L_A (dB)		ΔL (dB)	ΔL_A (dB)
	Sem AVAC	Com AVAC	Sem AVAC	Com AVAC		
1	38,9*	37,3	23,8	24,4	-*	1
2	39,3*	47,6	23,3	37,4	8	14
3+4	37,6*	41,4	23,2	26,9	4	4

* Os níveis de pressão sonora equivalentes sem AVAC não são estáveis devido ao "funcionamento" do restante edifício principalmente na capela 1.

Pela análise dos valores registados em cada ponto (Quadros 5.16. a 5.21.) verifica-se que o ruído de fundo, seja com ou sem AVAC em funcionamento, é bastante homogéneo, não se verificando valores muito díspares entre os dois diferentes pontos analisados em cada capela.

Na análise das Figuras 5.31. e 5.33., que representam a comparação entre capelas dos valores registados dos níveis de pressão sonora e dos níveis sonoros respectivamente sem o funcionamento de AVAC, verifica-se que todas as capelas têm níveis semelhantes não havendo nenhuma que sobressaia. No entanto, durante o ensaio do nível de pressão sonora não foi possível registar em momento algum, valores totalmente estáveis devido ao "funcionamento" do restante edifício.

Na capela 1, dada a instabilidade referida anteriormente não foi possível obter um valor de variação do nível de pressão sonora com a colocação em funcionamento do AVAC. Já no que diz respeito ao nível sonoro equivalente, este sofre um ligeiro aumento, não significativo, de 1 dB (Quadro 5.22.). De entre todas as capelas, é esta a que verifica um nível sonoro mais reduzido com o funcionamento do AVAC, sendo assim, a capela menos ruidosa (Figuras 5.32. e 5.34.).

Na capela 2, o funcionamento do sistema de AVAC já é bastante notório. O nível de pressão sonora equivalente sofre um acréscimo de cerca de 8 dB, passando dos 39,3 dB para os 47,6 dB. As bandas que mais contribuem para este elevado aumento são as de média e baixa frequência. Esta situação deve-se, muito provavelmente, ao facto da capela 2 não possuir um revestimento absorvente eficaz nestas bandas de frequência. Pelo contrário, a menor contribuição das altas frequências pode ficar a dever-se à existência de bancos almofadados na capela. O nível sonoro equivalente nesta capela sofre um aumento de 14 dB(A) passando para os 37 dB(A). Este é um valor muito superior aos verificados nas outras duas capelas pelo que a torna, de longe, a capela mais ruidosa quando o sistema de AVAC está em funcionamento.

Com o funcionamento do sistema de AVAC, os níveis de pressão sonora do ruído de fundo da capela 3+4 obtêm um aumento uniforme a rondar os 5 dB em grande parte do espectro de frequências analisado (Figura 5.30.) fazendo com que o seu nível de pressão equivalente suba ligeiramente dos 37,6 dB para os 41,4 dB. A mesma situação acontece com o nível sonoro equivalente que sofre uma variação de quase 4 dB subindo para os 26,9 dB.

Para se proceder à avaliação da incomodidade provocada pelo ruído de fundo causado pelo funcionamento do sistema de AVAC compara-se os níveis de pressão sonora por banda de frequência de uma oitava existentes em cada capela com as *curvas de incomodidade NC* e *NR*, já referidas em 2.11. (Figuras 5.35. e 5.36.).

Para auxiliar o cálculo do NC e NR a partir dos níveis de pressão sonora das diversas capelas recorreu-se, para além das Figuras 5.35. e 5.36. elaboradas, a um *software online* que forneceu os valores com o máximo de exactidão [101, 102].

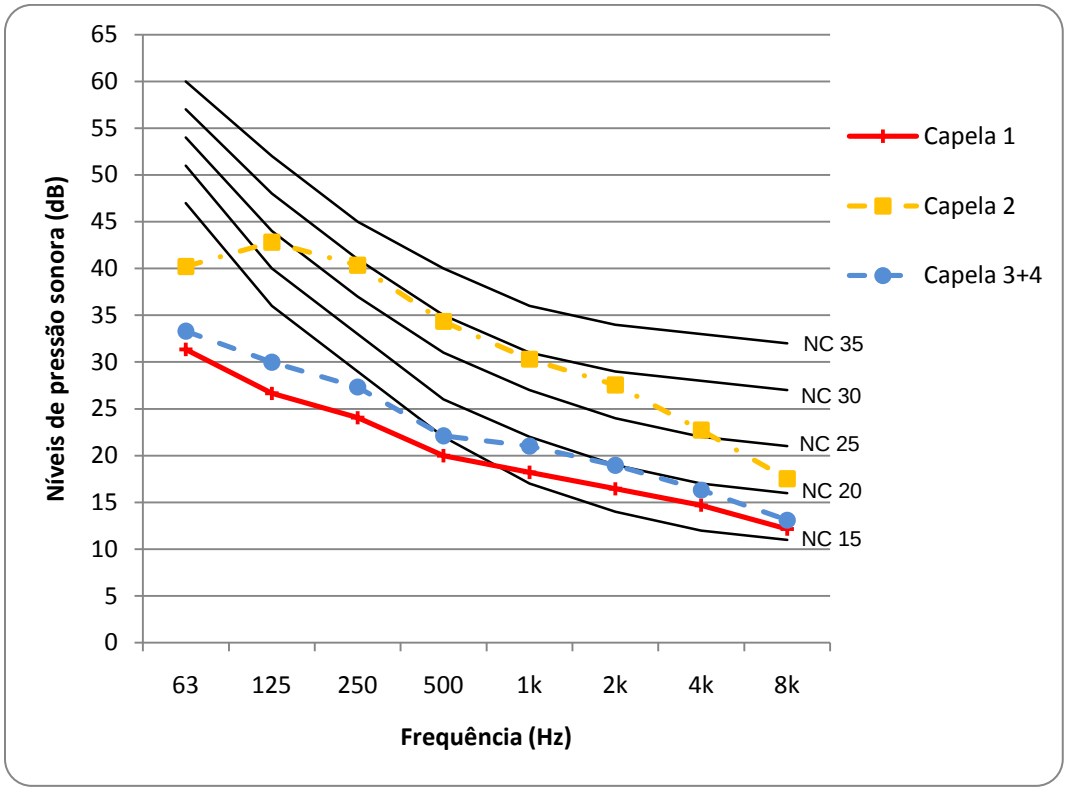

Figura 5.35. – Comparação entre os valores dos níveis de pressão sonora nas capelas 1, 2 e 3+4 com o sistema de AVAC em funcionamento e as curvas de incomodidade NC.

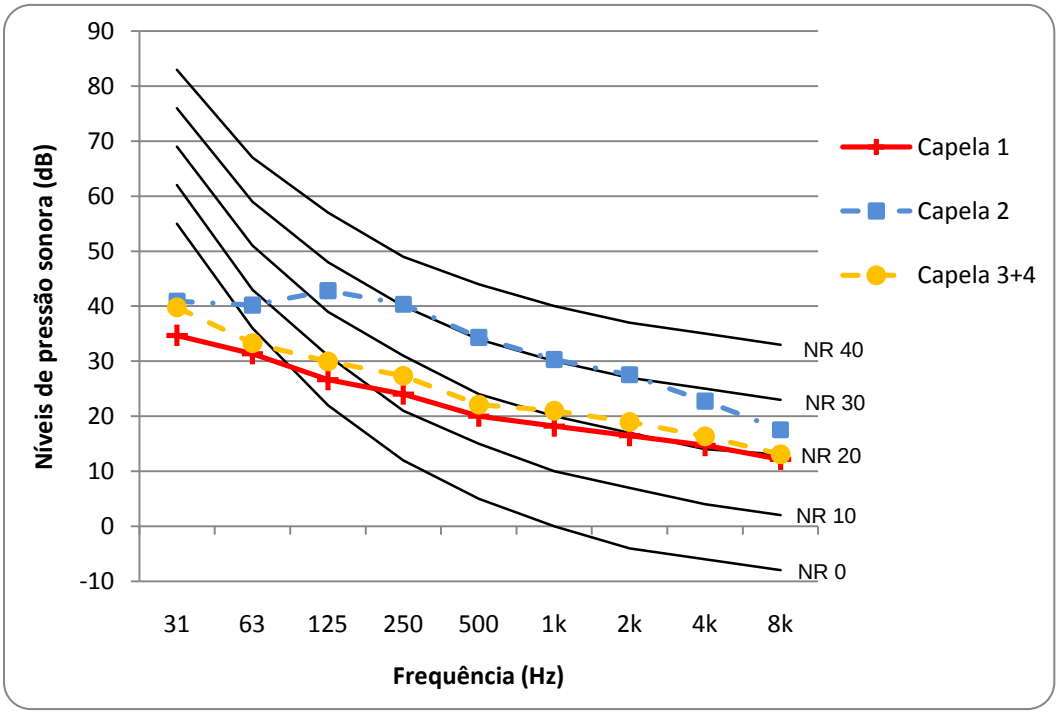

Figura 5.36. – Comparação entre os valores dos níveis de pressão sonora nas capelas 1, 2 e 3+4 com o sistema de AVAC em funcionamento e as curvas de incomodidade NR.

Quadro 5.23. – Valores obtidos e limite máximo desejável de NC e NR para as capelas 1, 2 e 3+4 com o sistema de AVAC em funcionamento.

Capela	Valores obtidos		Limite máximo desejável	
	NC	NR	NC	NR
1	18	21	30	25
2	29	31		
3+4	20	22		

Efectuando a comparação dos valores de NC e NR, obtidos para cada capela, com os valores máximos admissíveis para igrejas, retirados dos Quadros 2.1 e 2.2, verifica-se que tanto a capela 1 como a capela 3+4 respeitam os dois limites máximos recomendados de NC30 e NR25 enquanto a capela 2 só respeita o limite imposto ao NC, ultrapassando assim, ligeiramente, o limite da curva NR, que no entanto não é gravoso.

As capelas 1 e 3+4 têm resultados tanto de NC como de NR muito próximos e bastante inferiores aos valores da capela 2. Dado que a transmissão da palavra, para ser de boa qualidade, necessita de um grau baixo de incomodidade, conclui-se facilmente que tanto a capela 1 como a capela 3+4 possuem melhores condições para esse fim do que a capela 2.

5.5. ISOLAMENTO SONORO

5.5.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Para se poder calcular o isolamento sonoro de um elemento é necessário efectuar medições do nível de pressão sonora tanto no compartimento emissor, onde se encontra a fonte sonora, como no compartimento receptor.

No caso do isolamento entre a capela 1 e a capela 2 considerou-se como local emissor a capela 2 onde se instalou a fonte sonora (F1) e se mediu o nível de pressão sonora em dez pontos diferentes (R1 a R10). Como local receptor considerou-se a capela 1 onde se mediu o nível pressão sonora noutros dez pontos (R21 a R30). Aproveitando o posicionamento da fonte sonora na capela 2, registou-se também os níveis de pressão sonora no átrio (R11 a R20) para se poder avaliar o isolamento sonoro entre a capela 2 e o átrio de acesso (Figura 5.37.).

Quanto ao isolamento sonoro da divisória amovível da capela 3+4 colocou-se a fonte sonora (F2) no eixo de simetria da capela a 5,95 m da parede onde se encontra o altar e escolheram-se também dez pontos tanto na capela 4, que corresponde ao emissor (R1 a R10), como na capela 3, que corresponde ao receptor (R11 a R20), de modo a se conseguir ter um conjunto de valores que caracterizem de uma forma adequada os espaços analisados (Figura 5.38.).

A fonte sonora deve ter, como se pode verificar, uma certa distância do elemento separador e dos elementos marginais que influenciam a transmissão sonora, para que a sua radiação seja a mais difusa possível.

Em ambas as situações, quer na medição do isolamento sonoro entre capelas e átrio de acesso quer na medição do isolamento sonoro da divisória amovível, o procedimento de ensaio foi idêntico regendo-se pela norma NP EN ISO 140-4 [103].

Para a realização do ensaio colocou-se uma fonte sonora no compartimente considerado como emissor, em ambos os casos, a produzir um ruído de grande intensidade com características de ruído rosa de tal maneira que o nível de pressão sonora no compartimento receptor fosse, no mínimo, 10 dB mais elevado que o nível do ruído de fundo em qualquer banda de frequências. Em seguida, com o auxílio do sonómetro, percorreu-se os vários pontos assinalados anteriormente, tanto no compartimento emissor como no compartimento contíguo considerado receptor, para se registar os níveis de pressão sonora existentes devido ao ruído produzido pela fonte sonora.

A área de separação entre os dois compartimentos corresponde à área de parede ou divisória comum, incluindo portas caso existam. Nestes ensaios o sistema de AVAC estava desligado para não provocar nenhum tipo de aumento do nível de pressão sonoro do ruído de fundo de maneira a não haver possibilidade de perturbar as medições em curso.

Estes valores foram todos obtidos em bandas de um terço de oitava que posteriormente vão ser utilizados para se realizar uma média energética para se encontrar os níveis médios de pressão sonora, tanto do locar de emissão como do local de recepção. Com estas duas médias e com o valor do tempo de reverberação do compartimento receptor, já medido anteriormente exceptuando o caso do átrio que será previsto através da fórmula de Sabine devido à não possibilidade de medição *in situ*, é possível calcular o isolamento sonoro padronizado (*DnT*) para cada uma das situações.

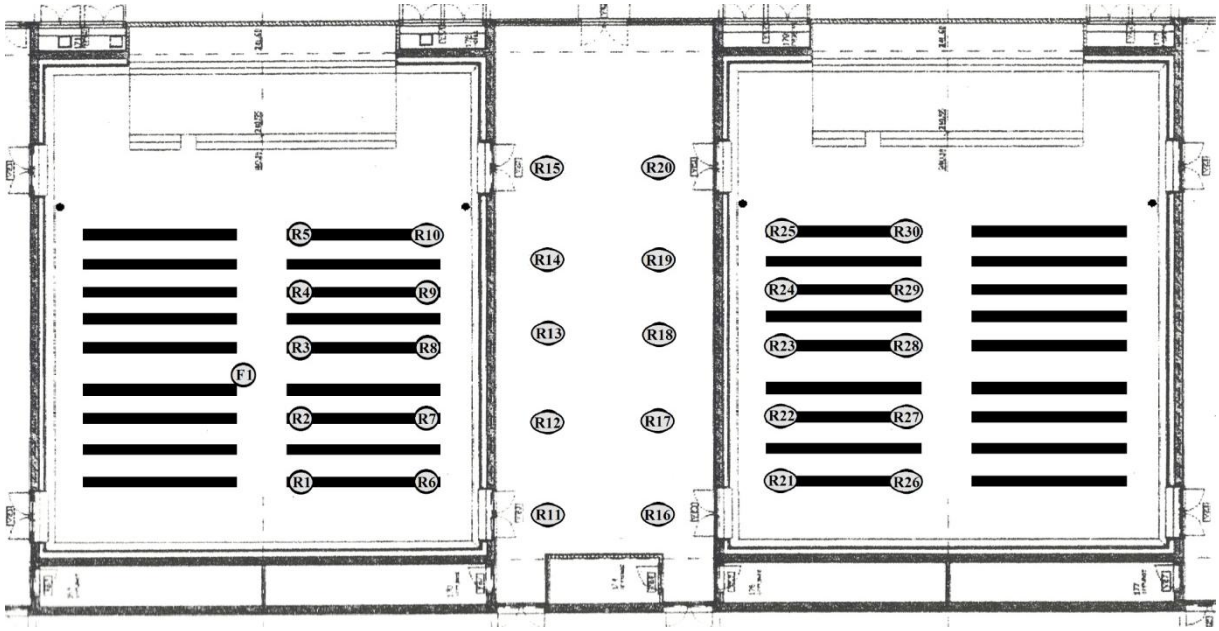

Figura 5.37. – Localização da fonte emissora na capela 2 (à esquerda) e dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do isolamento sonoro entre a capela 2 (à esquerda) e a capela 1 (à direita) e para a avaliação do isolamento sonoro entre a capela 2 e o átrio de acesso.

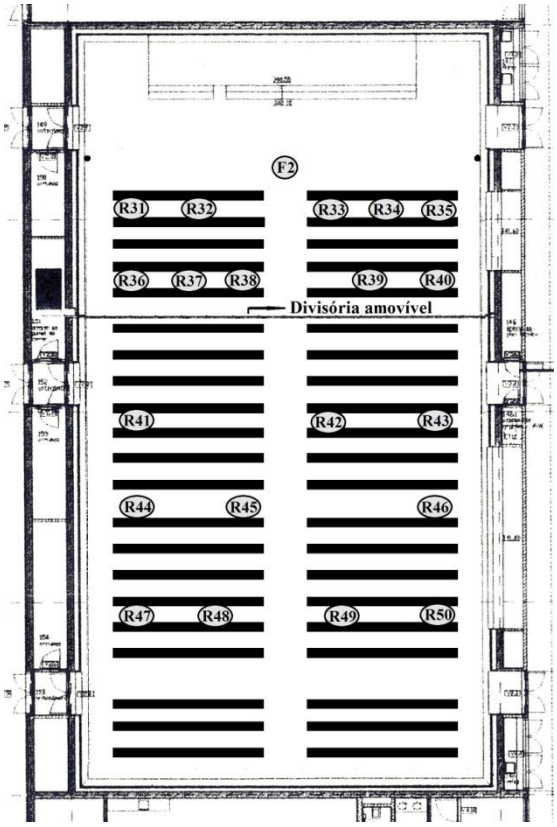

Figura 5.38. – Localização da fonte sonora (F2) e dos pontos ensaiados (R), para a avaliação do isolamento sonoro da divisória amovível da capela 3+4, tanto no espaço emissor (capela 4) como no espaço receptor (capela 3).

5.5.2. Apresentação e Discussão dos Resultados

Dos ensaios efectuados *in situ*, referentes ao isolamento sonoro a ruídos de condução aérea descritos no subcapítulo 5.5.1., obtiveram-se os seguintes parâmetros.

- L1 - Nível de pressão sonora em bandas de frequência de terço de oitava dos dez pontos medidos no compartimento emissor (dB), capela 2 e capela 4;
- L2 - Nível de pressão sonora em bandas de frequência de terço de oitava dos dez pontos medidos no compartimento receptor (dB), capela 1, capela 3 e átrio;
- TR - Tempo de reverberação em bandas de frequência de terço de oitava nos diversos pontos medidos no compartimento receptor (s), capela 1 e capela 3.

Durante todo o tempo em que se esteve no local em estudo, nunca foi possível proceder ao fecho das portas de acesso ao átrio. Por essa razão não se efectuou a medição do tempo de reverberação em bandas de frequência de terço de oitava para este compartimento. Dado que este parâmetro é indispensável ao cálculo do isolamento sonoro da divisória entre a capela e o átrio, procede-se de seguida à sua previsão através da fórmula de Sabine apresentada no subcapítulo 2.13.

Todas as áreas necessárias ao cálculo da absorção sonora equivalente dos diversos revestimentos e o volume total de ar do átrio foram medidos *in situ* (Quadro 5.24.).

Quadro 5.24. – Áreas dos diversos revestimentos existentes e volume de ar no átrio.

Ref.	Elemento	Área (m^2)
1	Lambrim em mármore	71,6
2	Paredes rebocadas	185,9
3	Tecto estucado	188,2
4	Pavimento em mármore	180,6
5	Portas em madeira	34,7
6	Vidro espesso	18,25
7	Alcatifa agulhada	7,6
8	Volume de Ar	903 m^3

Os coeficientes de absorção sonora de cada elemento são apresentados geralmente por banda de frequência de uma oitava entre os 125 e os 4k Hz [11, 96, 104]. Devido à necessidade de se efectuar o cálculo do isolamento sonoro padronizado em bandas de um terço de oitava dos 100 aos 3.150 Hz, adoptou-se os mesmos valores do coeficiente de absorção sonora de cada banda de uma oitava para as suas três respectivas bandas de um terço de oitava para se obter os coeficientes de absorção sonora dos diversos elementos (Quadro 5.25.).

Após a obtenção destes parâmetros (Quadros 5.24. e 5.25.) e através da fórmula de Sabine pode-se elaborar um quadro de cálculo para se obter os tempos de reverberação por banda de frequência de terço de oitava (Quadro 5.26.).

Quadro 5.25. – Coeficientes de absorção sonora (α) por banda de frequência de terço de oitava dos 100 aos 3.150 Hz dos diversos materiais existentes no átrio com as referências de 1 a 8.

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500
Ref. 1 e 4	0,01*	0,01	0,01*	0,01*	0,01	0,01*	0,01*	0,01
Ref. 2 e 3	0,03*	0,03	0,03*	0,03*	0,03	0,03*	0,03*	0,03
Ref. 5	0,14*	0,14	0,14*	0,10*	0,10	0,10*	0,06*	0,06
Ref. 6	0,18*	0,18	0,18*	0,06*	0,06	0,06*	0,04*	0,04
Ref. 7	0,10*	0,10	0,10*	0,05*	0,05	0,05*	0,10*	0,10
Ref. 8 (m^{-1})	0,00*	0,00	0,00*	0,00*	0,00	0,00*	0,00*	0,00
Freq. (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Ref. 1 e 4	0,01*	0,02*	0,02	0,02*	0,02*	0,02	0,02*	0,02*
Ref. 2 e 3	0,03*	0,03*	0,03	0,03*	0,04*	0,04	0,04*	0,05*
Ref. 5	0,06*	0,08*	0,08	0,08*	0,10*	0,10	0,10*	0,10*
Ref. 6	0,04*	0,03*	0,03	0,03*	0,02*	0,02	0,02*	0,02*
Ref. 7	0,10*	0,18*	0,18	0,18*	0,22*	0,22	0,22*	0,30*
Ref. 8 (m^{-1})	0,00*	0,00*	0,00	0,00*	0,01*	0,01	0,01*	0,01*

* Valores adoptados para o cálculo

Quadro 5.26. – Cálculo do tempo de reverberação por banda de frequência de terço de oitava dos 100 aos 3.150 Hz pela fórmula de Sabine.

Ref.		1	2	3	4	5	6	7	8	$\sum A_i$ (m^2)	TR (s)
S (m^2) / V (m^3)		71,6	185,9	188,2	180,6	34,7	18,3	7,6	903,4		
A_i	100 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	4,86	3,29	0,76	0,00	22,66	6,4
	125 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	4,86	3,29	0,76	0,00	22,66	6,4
	160 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	4,86	3,29	0,76	0,00	22,66	6,4
	200 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	3,47	1,10	0,38	0,00	18,69	7,7
	250 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	3,47	1,10	0,38	0,00	18,69	7,7
	315 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	3,47	1,10	0,38	0,00	18,69	7,7
	400 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	2,08	0,73	0,76	0,00	17,32	8,4
	500 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	2,08	0,73	0,76	0,00	17,32	8,4
	630 Hz	0,72	5,58	5,65	1,81	2,08	0,73	0,76	0,00	17,32	8,4
	800 Hz	1,43	5,58	5,65	3,61	2,78	0,55	1,37	0,00	20,96	6,9
	1000 Hz	1,43	5,58	5,65	3,61	2,78	0,55	1,37	0,00	20,96	6,9
	1250 Hz	1,43	5,58	5,65	3,61	2,78	0,55	1,37	0,00	20,96	6,9
	1600 Hz	1,43	7,44	7,53	3,61	3,47	0,37	1,67	9,04	34,56	4,2
	2000 Hz	1,43	7,44	7,53	3,61	3,47	0,37	1,67	9,04	34,56	4,2
	2500 Hz	1,43	7,44	7,53	3,61	3,47	0,37	1,67	9,04	34,56	4,2
	3150 Hz	1,43	9,30	9,41	3,61	3,47	3,66	2,28	9,04	42,20	3,4

Verifica-se pelo Quadro 5.26. que o átrio possui tempos de reverberação bastante elevados, isto por todos os seus revestimentos serem muito reflectores. As paredes muito reflectoras ao serem paralelas entre si podem provocar múltiplas reflexões o que também ajuda a associar os elevados valores estimados ao espaço em concreto.

Os Quadros 5.27. a 5.29. apresentam os parâmetros necessários para o cálculo do isolamento sonoro padronizado. L1 e L2 correspondem, respectivamente, aos níveis médios de pressão sonora no local emissor e receptor. Estes foram calculados por meio de uma média energética a partir dos valores das dez medições efectuadas em cada um dos locais (Figuras 5.37. e 5.38.). TR corresponde, no caso dos Quadros 5.27. e 5.28., aos valores dos tempos de reverberação em bandas de frequência de um terço de oitava medidos no local do receptor. No caso do Quadro 5.29. este parâmetro não foi medido mas sim previsto anteriormente (Quadro 5.26.).

De notar que o ruído de fundo de qualquer compartimento em análise, nas condições em que se realizaram as medições para o cálculo do isolamento sonoro padronizado mas sem a fonte sonora em funcionamento, é sempre inferior em mais de 10 dB do que os níveis médios de pressão sonora em cada compartimento (L1 e L2) provocados pela fonte sonora durante o ensaio, não tendo assim, influência nos valores medidos.

Quadro 5.27. – Valores dos níveis médios de pressão sonora no emissor (capela 2), L1, dos níveis médios de pressão sonora no receptor (capela 1), L2, e os tempos de reverberação em terço de oitava do local receptor (capela 1), TR, para cálculo do isolamento sonoro padronizado entre as capelas 1 e 2.

Frequência (Hz)	L1 (dB)	L2 (dB)	TR (s)
100	83,7	32,1	0,99
125	87,0	38,2	1,00
160	87,4	36,5	0,90
200	84,5	33,8	0,93
250	85,3	29,2	0,90
315	86,8	28,6	0,89
400	88,9	29,3	0,74
500	90,3	29,2	0,82
630	91,0	30,1	0,76
800	86,7	24,6	0,82
1000	84,4	24,2	0,88
1250	85,5	29,1	0,94
1600	86,9	36,5	0,95
2000	88,0	35,8	0,94
2500	87,6	33,7	0,92
3150	81,3	23,2	0,95

Quadro 5.28. – Valores dos níveis médios de pressão sonora no emissor (capela 4), L1, dos níveis médios de pressão sonora no receptor (capela 3), L2, e os tempos de reverberação em terço de oitava do local receptor (capela 3), TR, para cálculo do isolamento sonoro padronizado da divisória existente na capela 3+4.

Frequência (Hz)	L1 (dB)	L2 (dB)	TR (s)
100	82,6	61,5	1,50
125	85,9	65,4	1,50
160	85,6	63,1	1,47
200	82,7	59,2	1,18
250	82,9	59,3	1,14
315	84,0	59,0	1,10
400	86,1	60,7	1,10
500	87,0	64,1	1,02
630	87,9	62,6	0,99
800	83,7	58,2	1,09
1000	80,8	55,7	1,23
1250	81,3	58,1	1,33
1600	81,9	59,2	1,36
2000	83,3	57,2	1,33
2500	83,3	55,4	1,28
3150	77,5	49,0	1,26

Quadro 5.29. – Valores dos níveis médios de pressão sonora no emissor (capela 2), L1, dos níveis médios de pressão sonora no receptor (átrio), L2, e os tempos de reverberação em terço de oitava previstos para o local receptor (átrio), TR, para cálculo do isolamento sonoro entre a capela 2 e o átrio de acesso.

Frequência (Hz)	L1 (dB)	L2 (dB)	TR (s)
100	83,7	57,1	6,4
125	87,0	64,5	6,4
160	87,4	65,0	6,4
200	84,5	62,7	7,7
250	85,3	60,8	7,7
315	86,8	60,3	7,7
400	88,9	61,6	8,4
500	90,3	62,1	8,4
630	91,0	63,2	8,4
800	86,7	57,6	6,9
1000	84,4	55,9	6,9
1250	85,5	58,5	6,9
1600	86,9	62,6	4,2
2000	88,0	63,7	4,2
2500	87,6	61,9	4,2
3150	81,3	53,4	3,4

Através da fórmula de cálculo do *DnT*, já mencionada no subcapítulo 2.15., e com os dados apresentados nos Quadros 5.27. a 5.29., apresenta-se no Quadro 5.30. os valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (*DnT*). Apresenta-se também os valores do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (*DnT,w*) obtidos através do ajuste dos valores de *DnT* a uma curva de referência como explicitado anteriormente no subcapítulo 2.15. Para a confirmação dos resultados de *DnT,w* obtidos utilizou-se o *software PORTHOS* [105].

Quadro 5.30. – Valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (*DnT*) em dB e do índice isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (*DnT,w*) em dB entre as capelas 2 e 1 (C2 – C1), da divisória amovível da capela 3+4 (C4 – C3) e entre a capela 2 e o átrio (C2 – A).

Frequência (Hz)	C2 - C1		C4 - C3		C2 - A	
	DnT (dB)	DnT,w (dB)	DnT (dB)	DnT,w (dB)	DnT (dB)	DnT,w (dB)
100	54,6	59	25,9	29	37,7	37
125	51,8		25,3		33,6	
160	53,5		27,2		33,5	
200	53,4		27,2		33,7	
250	58,7		27,2		36,4	
315	60,7		28,4		38,4	
400	61,3		28,8		39,5	
500	63,2		26,0		40,4	
630	62,7		28,3		40,0	
800	64,2		28,9		40,5	
1000	62,7		29,0		39,9	
1250	59,1		27,4		38,4	
1600	53,2		27,0		33,5	
2000	54,9		30,3		33,5	
2500	56,5		32,0		34,9	
3150	60,9		32,5		36,3	

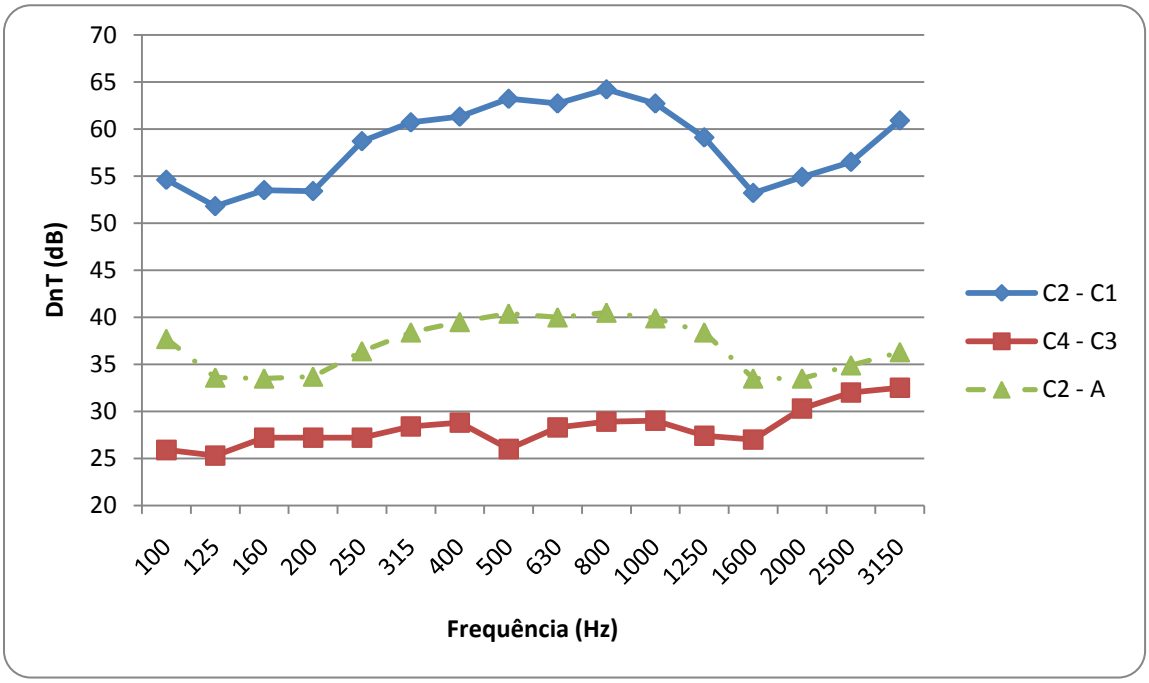

Figura 5.39. – Valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (DnT) em dB entre as capelas 2 e 1 (C2 – C1), da divisória amovível da capela 3+4 (C4 – C3) e entre a capela 2 e o átrio (C2 – A).

Como seria de esperar, a divisória amovível da capela 3+4 (C4 – C3) é a que obteve o pior índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (*DnT,w*) (Quadro 5.30.). O seu isolamento sonoro padronizado é bastante homogéneo ao longo do espectro de terço de oitava em análise, obtendo apenas uma ligeira melhoria nas altas frequências, a partir da banda de frequência de 2.000 Hz, passando de uma média de 28 dB por banda de frequência de terço de oitava para os 32 dB (Figura 5.39.).

Estes valores não são mais elevados devido ao próprio sistema de montagem da divisória. Este requerer uma divisória leve que seja facilmente manuseada pelo utilizador sem o auxílio de sistemas electromecânicos. Quanto maior for a massa da divisória maior será o isolamento a ruídos aéreos, visto que esta divisória tem uma massa bastante baixa inerente ao sistema utilizado, justifica-se assim os seus actuais valores de *DnT*.

O isolamento provocado por esta divisória também é muito prejudicado devido aos remates que esta faz, quando está colocada, com as paredes. Na parede que faz de batente à divisória, o seu rodapé sobressai, não deixando a divisória encostar totalmente. Mesmo que esta situação fosse possível, a não existência de uma junta própria, nem na parede nem na divisória para efectuar devidamente o fecho, tornaria sempre esta situação um ponto frágil. No outro extremo, no local de passagem dos painéis da divisória da zona técnica para a capela 3+4, também não existe nenhum cuidado adicional para selar devidamente a passagem física da capela 3 para a capela 4 (Figura 5.40.), tornando-se assim, outro ponto que não permite a esta divisória ter um melhor desempenho.

Com estas condições de isolamento sonoro a voz normal pode ser compreendida com alguma facilidade, não havendo aqui origem a muita privacidade para os eventos que puderem acontecer em separado nas capelas 3 e 4 [11].

Figura 5.40. – Pormenor da ligação do último painel da divisória amovível da capela 3+4 com a abertura de passagem da zona técnica para esta.

O índice de isolamento sonoro padronizado (*DnT,w*) do elemento de separação da capela 2 com o átrio de acesso (C2 – A) é um pouco melhor do que o verificado anteriormente para a divisória amovível, tendo como valor 37 dB (Quadro 5.30.). Ao longo do espectro de bandas de frequência verifica-se que o isolamento sonoro padronizado (*DnT*) tem os seus valores mais elevados, cerca de 40 dB, na zona das médias frequências, havendo um decréscimo, em relação a estes, de cerca de 5 dB tanto nas altas como nas baixas frequências (Figura 5.39.).

Este elemento separador já permite ter um nível de privacidade um pouco mais elevado, em que a conversação normal dificilmente será audível e a voz será ouvida fracamente [11].

Para melhorar o isolamento sonoro existente, ter-se-ia que proceder à selagem das frinchas do contorno das duas portas contidas no elemento de separação em análise. Em algumas situações, estas chegam a ter meio centímetro de espessura (Figura 5.41.), tornando-se altamente prejudiciais ao bom desempenho de todo o elemento separador.

Figura 5.41. – Pormenor da frincha existente numa das portas de acesso à capela 2.

O maior índice de isolamento sonoro padronizado (*DnT,w*) verifica-se entre a capela 2 e a capela 1 que têm um corredor com cerca 8,6 m de largura a separá-las. Este atinge os 59 dB o que proporciona um excelente isolamento sonoro, só sendo perceptíveis ruídos muito intensos, não havendo qualquer interferência entre espaços quando estes estão a ser utilizados em simultâneo.

A configuração de valores deste isolamento sonoro (C2 – C1), apesar de serem acentuadamente mais elevados, é muito semelhante aos determinados para o isolamento sonoro entre a capela 2 e o átrio (C2–A). Isto acontece porque, se pode considerar este elemento separador como uma parede dupla constituída por dois panos iguais, correspondentes a cada elemento de separação entre cada capela e o átrio, e com uma "caixa-de-ar" de muito grande espessura (8,6 m). Como os dois panos são iguais, este elemento separador entre capelas terá os mesmo pontos fracos que o elemento simples de separação entre a capela e o átrio. Verifica-se que possui os valores de isolamento sonoro padronizado

mais elevados nas bandas de média frequência, decaindo abruptamente, cerca de 13 dB, na banda de frequência dos 1600 Hz, sendo esta muito possivelmente a frequência crítica do elemento separador visto que após esta frequência o isolamento sonoro tende a aumentar rapidamente.

Não sendo um aspecto muito relevante devido ao seu alto desempenho já demonstrado, mas o tratamento das frinchas, já comentadas anteriormente, poderia melhorar ainda mais o isolamento sonoro entre as capelas 1 e 2.

5.6. COMPARAÇÃO DAS CAPELAS DA RECONCILIAÇÃO COM A IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE

Neste subcapítulo pretende-se efectuar a comparação dos valores do tempo de reverberação e de RASTI registados nas diversas capelas da Reconciliação com os valores da igreja da Santíssima Trindade.

Os valores da igreja da Santíssima Trindade utilizados para comparação foram retirados da tese de mestrado de Pedro Silva "Caracterização Acústica Interior da Nova Igreja da Santíssima Trindade em Fátima" [9] e são apresentados em conjunto com os valores das capelas 1, 2 e 3+4 no Quadro 5.31.

Quadro 5.31. – Valores médios do TR (500, 1k Hz) e de RASTI das capelas 1, 2 e 3+4 e da igrejas da Santíssima Trindade e os seus respectivos volumes.

Parâmetro	Volume (m^3)	TR médio (500, 1k Hz) (s)	RASTI s/ reforço electroacústico	RASTI c/ reforço electroacústico
Santíssima Trindade	130.000	2,1	0,57	0,67
Capela 1	1.550	0,8	0,68	0,69
Capela 2	1.550	2,8	0,42	0,42
Capela 3+4	3.190	1,2	0,63	0,67

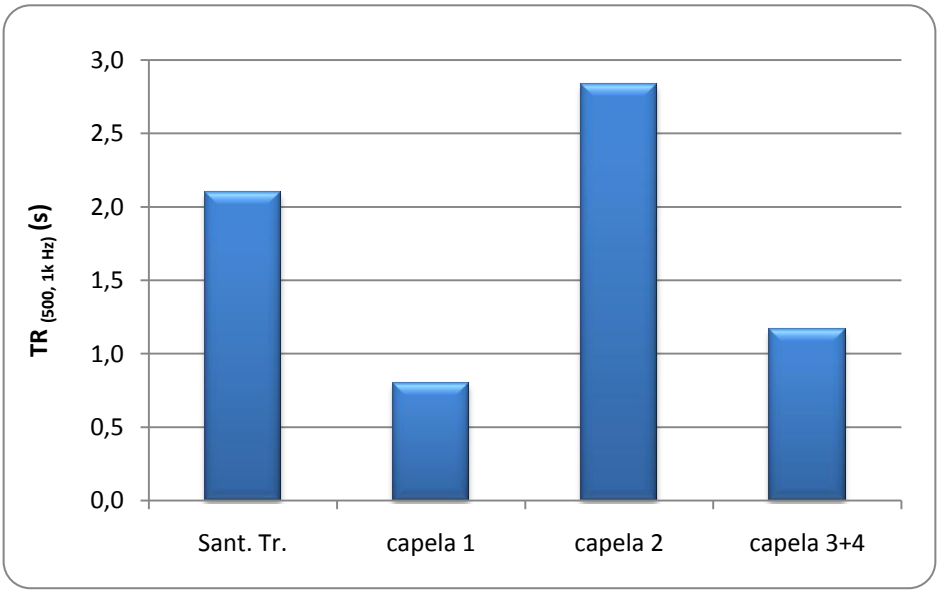

Figura 5.42. – Valores médios do TR $_{(500,\ 1k\ Hz)}$ das capelas 1, 2 e 3+4 e da igreja da Santíssima Trindade.

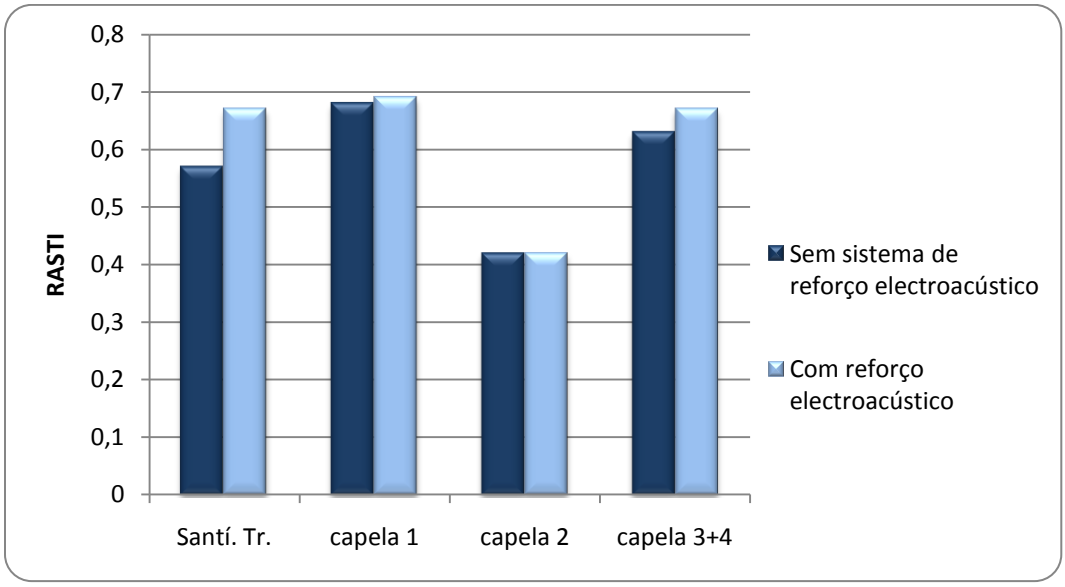

Figura 5.43. – Valores de RASTI das capelas 1, 2 e 3+4 e da igreja da Santíssima Trindade com e sem sistema de reforço electroacústico em funcionamento.

Analisando o Quadro 5.31. e as Figuras 5.42. e 5.43. verifica-se que a Igreja da Santíssima Trindade, dada a sua grande volumetria, teve que ter uma atenção muito especial ao nível da acústica para obter estes resultados de tempo de reverberação e de RASTI.

O seu tempo de reverberação é 2,6 e 1,8 vezes maior em comparação com o medido nas capelas 1 e 3+4 respectivamente. Mas nesta análise tem-se que ter em conta que o seu volume é 80 vezes maior do que o da capela 1 e 40 vezes o da capela 3+4, tornando assim, o tempo de reverberação de 2,1 s num resultado tão "bom", dadas as circunstâncias arquitectónicas, como o medido nas capelas 1 e 3+4.

Comparando o tempo de reverberação da igreja da Santíssima Trindade com o medido na capela 2, conclui-se que o tratamento das superfícies interiores é bastante importante. Apesar do volume da Igreja da Santíssima Trindade ser muito superior ao da capela 2, apresenta um tempo de reverberação significativamente inferior.

O valor 0,57 de RASTI sem o sistema de reforço electroacústico em funcionamento da igreja, equivale a uma inteligibilidade da palavra suficiente, ficando abaixo do medido nas capelas 1 e 3+4. Só a capela 2 é que obteve um valor de RASTI bastante inferior, como já acontecia com os valores do tempo de reverberação. Quando o sistema de reforço está ligado, o valor de RASTI da igreja sobe bastante, 0,10 valores, ficando ao nível do verificado nas capelas 1 e 3+4.

Mais uma vez chama-se à atenção da Igreja da Santíssima Trindade possuir um elevado volume que não é favorável à sua acústica interior. Se esta não tivesse um profundo tratamento das suas superfícies, muito dificilmente obteria estes valores equiparáveis aos das capelas da Reconciliação.

5.7. Comparação das Capelas da Reconciliação com igrejas de volumetria semelhante

5.7.1. Comparação dos valores médios de Tempo de Reverberação

5.7.1.1. Capela do Santíssimo Sacramento (capela 1) e Capela da Ressurreição de Jesus (capela 2)

Para se efectuar a comparação do Tempo de Reverberação com igrejas de volume semelhante escolheram-se sete igrejas portuguesas, retiradas das teses de mestrado de Telma Silva "Guião da Acústica de Igrejas em Portugal" [98] e de Cátia Martins "Caracterização Acústica das duas igrejas de Santo Ovídio, Mafamude" [99].

O critério de selecção utilizado, para esta escolha, foi a semelhança de volumetria com as capelas 1 e 2, sendo as igrejas seleccionadas as seguintes:

- Igreja de São Bento de Cástris (Évora);
- Igreja de São Lourenço (V. N. Azeitão);
- Igreja de São Pedro de Cête;
- Igreja de São Pedro de Lourosa;
- Igreja Matriz de Vila do Bispo;
- Igreja Matriz de Vouzela;
- Igreja antiga de Santo Ovídio (V. N. Gaia).

O Quadro 5.32. apresenta os valores dos volumes das capela 1 e 2 e das igrejas portuguesas escolhidas para a comparação dos seus Tempos de Reverberação.

Quadro 5.32. – Volumes e TR médio (500, 1k Hz) das capelas 1 e 2 (Fátima) e das igrejas escolhidas para posterior comparação dos valores médios de Tempo de Reverberação.

Parâmetro	Capela 1	Capela 2	S. B. Cástris	S. Lourenço (V. N. Azeitão)	Cête	Lourosa	Vila do Bispo	Vouzela	S.to Ovídio (V. N. G.)
Volume (m^3)	1550	1550	1314	1239	1515	1163	1290	1148	1543
TR médio (500, 1k Hz) (s)	0,8	2,8	3,1	2,3	2,3	1,6	1,8	1,5	3,0

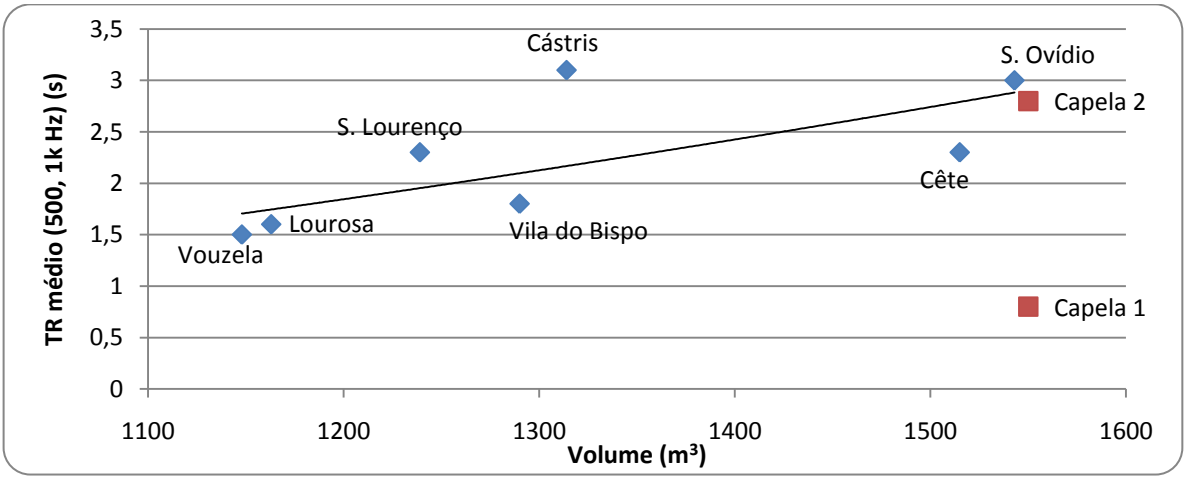

Figura 5.44. – Relação entre o volume e o TR médio (500, 1k Hz) das capelas 1 e 2 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria.

A função com melhor ajuste encontrada para correlacionar estes dois parâmetros das igrejas seleccionadas é a potencial, com um coeficiente R^2 de 0,52 e pode exprimir-se da seguinte forma:

$$TR\ médio\ (500, 1k\ Hz) = 6{,}29 \times 10^{-6} \times Volume^{1{,}7755}$$

De acordo com a Figura 5.44. e Quadro 5.32. pode-se verificar que a capela 1 apesar de ser uma das que possui maior volumetria é a que apresenta o tempo de reverberação mais baixo, o que, como já se viu anteriormente, favorece a compreensão da palavra. O tempo de reverberação bastante inferior ao esperado para uma igreja tradicional de igual volume deve-se exclusivamente ao tratamento acústico existente nas superfícies interiores da capela.

A capela 2 apresenta um tempo de reverberação elevado mas que vai de encontro aos valores verificados nas outras igrejas, situando-se sobre a curva que melhor se ajusta a estes dois parâmetros. Isto acontece devido ao tratamento acústico para as superfícies serem bastante reflectoras, por decisão do dono-de-obra. Sendo assim, a capela 2, tem um ambiente interior acusticamente semelhante às tradicionais igrejas portuguesas de volume idêntico.

Para além da capela 1, que se destaca pela positiva ao ter um tempo de reverberação bastante inferior à média, a igreja de São Bento de Cástris (Évora) também se destaca, mas pela negativa, devido ao seu tempo de reverberação elevado tendo em conta a sua menor volumetria em relação às capelas.

5.7.1.2. Capela da Morte de Jesus (capela 3+4)

Nesta comparação escolheram-se seis igrejas portuguesas, retiradas também da tese de mestrado de Telma Silva "Guião da Acústica de Igrejas em Portugal" [98].

O critério de selecção utilizado foi idêntico ao utilizado no ponto anterior, semelhança de volumetria, mas agora com a capela 3+4, sendo as igrejas seleccionadas as seguintes:

- Igreja Matriz de Armamar;
- Igreja da Misericórdia (Évora);
- Igreja de Nossa Senhora da Boavista (Porto);
- Igreja de Santa Clara (Porto);
- Igreja de São Pedro de Rates;
- Igreja Matriz de Viana do Alentejo.

O Quadro 5.33. apresenta os valores dos volumes da capela 3+4 e das igrejas portuguesas escolhidas para a comparação dos seus Tempos de Reverberação.

Quadro 5.33. – Volumes e TR médio (500, 1k Hz) da capela 3+4 e das igrejas escolhidas para posterior comparação dos valores de Tempo de Reverberação.

Parâmetro	Capela 3+4	Armamar	Misericórdia (Évora)	N. S. Boavista (Porto)	Santa Clara	S. P. Rates	Viana do Alentejo
Volume (m^3)	3190	2487	3338	3740	2491	3918	3358
TR médio (500, 1k Hz) (s)	1,2	2,6	2,3	4,0	1,3	3,0	3,1

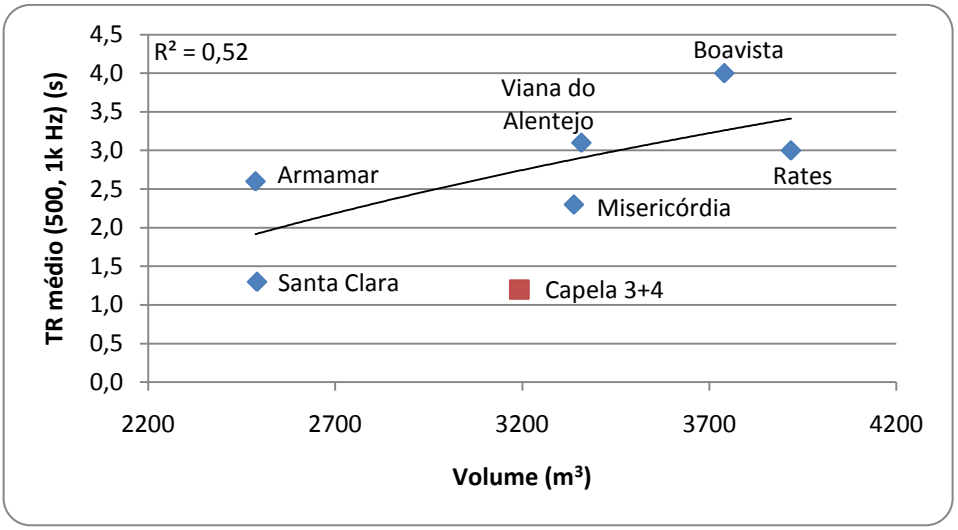

Figura 5.45. – Relação entre o volume e o TR médio (500, 1k Hz) da capela 3+4 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria.

A função com melhor ajuste encontrada para correlacionar estes dois parâmetros das igrejas seleccionadas é a logarítmica, com um coeficiente R^2 de 0,52 e pode exprimir-se da seguinte forma:

$$TR\ médio\ (500, 1k\ Hz) = 3{,}2921 \ln(Volume) - 23{,}824$$

De acordo com a Figura 5.45. e Quadro 5.33. pode-se verificar que a capela 3+4 apresenta um tempo de reverberação bastante inferior à maioria das igrejas em análise, só equiparável ao da igreja de Santa Clara (Porto) que ronda os 1,3 s. Estes são bons valores para a inteligibilidade da palavra que é essencial numa igreja. O valor de tempo de reverberação cerca de 1,5 s mais baixo do que o esperado para uma igreja tradicional portuguesa é fruto do tratamento acústico existente nas superfícies interiores da capela.

De todas as igrejas, a de Nossa Senhora da Boavista (Porto) apresenta um tempo de reverberação bastante elevado, mesmo em relação ao valor obtido nas outras igrejas. Este tempo de 4 s fica acima da curva de ajuste e prejudica bastante a compreensão da palavra.

5.7.2. Comparação dos valores de RASTI

5.7.2.1. Capela do Santíssimo Sacramento (capela1) e Capela da Ressurreição de Jesus (capela 2)

Para se efectuar a comparação dos valores de RASTI escolheram-se nove igrejas portuguesas, retiradas das teses de mestrado de Telma Silva "Guião da Acústica de Igrejas em Portugal" [98] e de Cátia Martins "Caracterização Acústica das duas igrejas de Santo Ovídio, Mafamude" [99].

Utilizou-se novamente o critério de selecção da semelhança de volumetria em relação às capelas 1 e 2, sendo as igrejas seleccionadas as seguintes:

- Igreja de São Bento de Cástris (Évora);
- Igreja de São Lourenço (V. N. Azeitão);
- Igreja de São Martinho de Cedofeita (Porto);
- Igreja de São Miguel de Nevogilde (Porto);
- Igreja de São Pedro de Cête;
- Igreja de São Pedro de Lourosa;
- Igreja Matriz de Vila do Bispo;
- Igreja Matriz de Vouzela;
- Igreja antiga de Santo Ovídio (V. N. Gaia).

Esta lista, para além das igrejas utilizadas na comparação do parâmetro TR no subcapítulo 5.7.1.1. incluí mais duas igrejas, sendo elas a de São Martinho de Cedofeita e a de São Miguel de Nevogilde no Porto, que só possuem o parâmetro de RASTI definido.

O Quadro 5.34. apresenta os valores dos volumes das capela 1 e 2 e das igrejas portuguesas escolhidas para a comparação dos seus valores de RASTI.

Quadro 5.34. – Volumes e valores médios de RASTI das capelas 1 e 2 e das igrejas escolhidas para posterior comparação.

Local	Volume (m^3)	RASTI médio	Local	Volume (m^3)	RASTI médio
Capela 1 (Fátima)	1550	0,68	Cête	1515	0,44
Capela 2 (Fátima)	1550	0,42	Lourosa	1163	0,48
Cástris (Évora)	1314	0,45	Vila do Bispo	1290	0,51
S. Lourenço (V. N. Azeitão)	1239	0,45	Vouzela	1148	0,58
Cedofeita (Porto)	1117	0,37	Stº Ovídio (V. N. Gaia)	1543	0,38
Nevogilde (Porto)	1137	0,53			

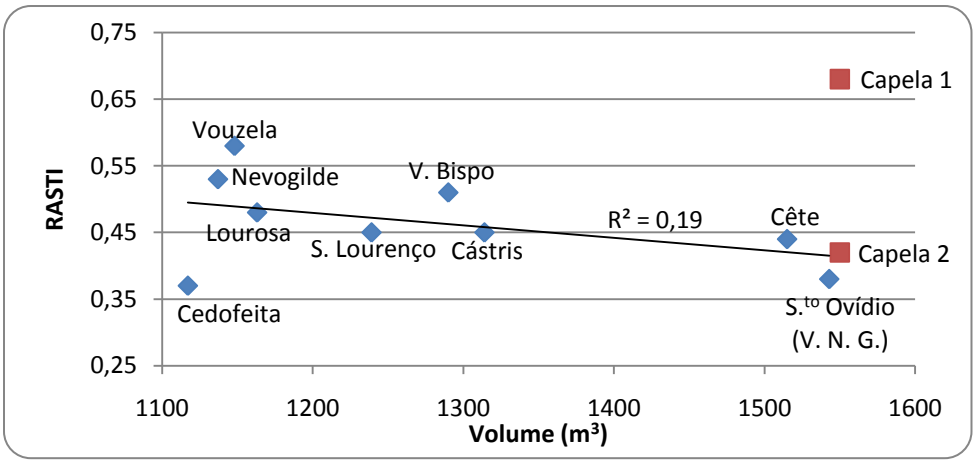

Figura 5.46. – Relação entre o volume e os valores de RASTI das capelas 1 e 2 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria.

A melhor função de ajuste encontrada para correlacionar estes dois parâmetros das igrejas seleccionadas é a linear, com um coeficiente R^2 de 0,19 e pode exprimir-se da seguinte forma:

$$\text{RASTI} = -1{,}87 \times 10^{-4} \times \text{volume} + 0{,}704$$

Analisando a Figura 5.46. e o Quadro 5.34. conclui-se facilmente que a capela 1 é a que tem o valor de RASTI mais elevado, bastante acima da curva de ajuste dos valores de RASTI das igrejas de volume idêntico, tendo uma boa inteligibilidade da palavra. A maioria das igrejas possui uma inteligibilidade da palavra suficiente, com valores de RASTI entre os 0,45 e os 0,58, destacando-se entre estas a Igreja Matriz de Vouzela já com um valor de RASTI aceitável. É por causa do tratamento acústico adequado que a capela 1 possui um valor médio de RASTI mais elevado cerca de 0,25 valores que o espectável de uma igreja tradicional portuguesa de igual volume.

A capela 2 integra-se num outro grupo onde a inteligibilidade da palavra é medíocre de onde se destaca a Igreja de São Martinho de Cedofeita (Porto) com um valor de RASTI de 0,37.

5.7.2.2. Capela da Morte de Jesus (capela 3+4)

Escolheram-se sete igrejas portuguesas, todas retiradas da tese de mestrado de Telma Silva "Guião da Acústica de Igrejas em Portugal" [98].

O critério de selecção utilizado foi, mais uma vez, o da semelhança de volumetria, sendo as igrejas seleccionadas as seguintes:

- Igreja Matriz de Armamar;
- Igreja da Misericórdia (Évora);
- Igreja de Nossa Senhora da Boavista (Porto);
- Igreja de Santa Clara (Porto);
- Igreja de Santo Ildefonso (Porto);
- Igreja de São Pedro de Rates;
- Igreja Matriz de Viana do Alentejo.

Esta lista, para além das igrejas utilizadas na comparação do parâmetro TR no subcapítulo 5.7.1.2. incluiu mais uma igreja, a de Santo Ildefonso no Porto, que só possui o parâmetro de RASTI definido.

O Quadro 5.35. apresenta os valores dos volumes da capela 3+4 e das igrejas portuguesas escolhidas para a comparação dos seus valores de RASTI.

Quadro 5.35. – Volumes e valores de RASTI da capela 3+4 e das igrejas escolhidas para posterior comparação.

Local	Volume (m^3)	RASTI médio
Capela 3+4 (Fátima)	3190	0,63
M. Armamar	2487	0,43
Misericórdia (Évora)	3338	0,49
N. S. Boavista (Porto)	3740	0,41
Santa Clara (Porto)	2491	0,62
S.^{to} Ildefonso (Porto)	3813	0,48
S. P. Rates	3918	0,39
Viana do Alentejo	3358	0,32

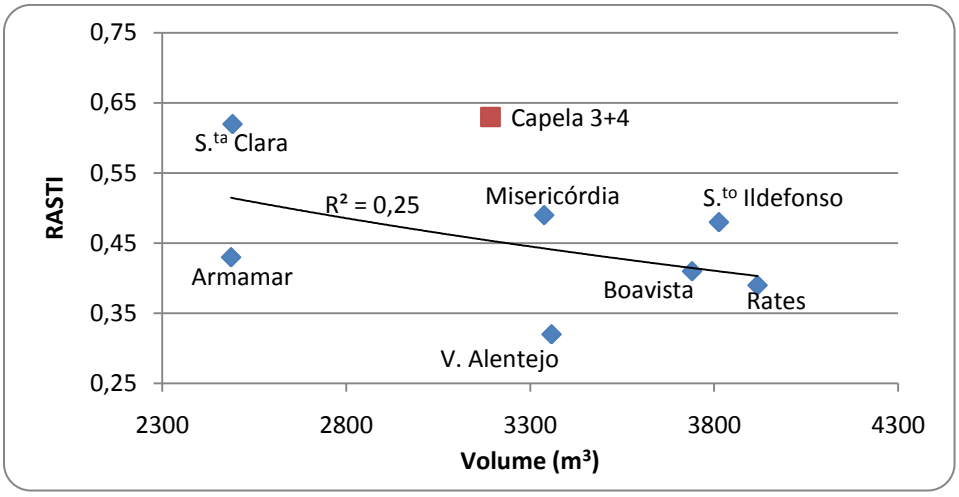

Figura 5.47. – Relação entre o volume e os valores de RASTI da capela 3+4 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria.

A função com melhor ajuste encontrada para correlacionar estes dois parâmetros das igrejas seleccionadas é a logarítmica, com um coeficiente R^2 de 0,25 e pode exprimir-se da seguinte forma:

$$RASTI = -0{,}246 \ln(Volume) + 2{,}4344$$

A capela 3+4 e a igreja de Santa Clara (Porto), de menor volume, são as que apresentam os valores mais elevados de RASTI do conjunto de igrejas em análise, bem acima da curva de ajuste mencionada anteriormente. Estes valores conferem-lhes uma boa inteligibilidade da palavra, tratando-se assim de espaços ideais para as celebrações. Tal como acontece na capela 1, é devido ao tratamento acústico das superfícies que, a capela 3+4 possui um valor médio de RASTI mais elevado em cerca de 0,15 valores do que o esperado para uma igreja tradicional portuguesa de igual volume.

A grande maioria das igrejas, a Igreja Matriz de Armamar, a Igreja de Nossa Senhora da Boavista (Porto), a Igreja de São Pedro de Rates e a Igreja Matriz de Viana do Alentejo possuem valores de RASTI inferiores a 0,45, independentemente do seu volume, pelo que a inteligibilidade da palavra pode ser considerada medíocre.

5.7.3. Relação entre os Valores de RASTI e os Tempos de Reverberação

Neste subcapítulo apresenta-se a relação existente entre os valores de RASTI e os tempos de reverberação, TR médio (500, 1k Hz), das capelas 1, 2 e 3+4 e de todas as igrejas anteriormente utilizadas que tenham estes dois parâmetros definidos. Essas igrejas são a Igreja Matriz de Armamar, a Igreja da Misericórdia (Évora), a Igreja de Nossa Senhora da Boavista (Porto), a Igreja de Santa Clara (Porto), a Igreja de São Pedro de Rates, a Igreja Matriz de Viana do Alentejo, a Igreja de São Bento de Cástris (Évora), a Igreja de São Lourenço (V. N. Azeitão), a Igreja de São Martinho de Cedofeita (Porto), a Igreja de São Pedro de Cête, a Igreja de São Pedro de Lourosa, a Igreja Matriz de Vila do Bispo, a Igreja Matriz de Vouzela e, por fim, a Igreja de S.to Ovídio (V. N. G.).

No Quadro 5.36. apresenta-se um resumo dos valores de RASTI e de tempo de reverberação constantes nos Quadros 5.32. a 5.35. para facilitar a sua visualização global.

Quadro 5.36. – Valores de RASTI e do TR médio (500, 1k Hz) das capelas 1, 2 e 3+4 e das igrejas em análise.

Ref.	Igrejas	RASTI médio	TR médio (500, 1k Hz) (s)
1	Capela 1 (Fátima)	0,68	0,8
2	Capela 2 (Fátima)	0,42	2,8
3	Capela 3+4 (Fátima)	0,63	1,2
4	M. Armamar	0,43	2,6
5	Misericórdia (Évora)	0,49	2,3
6	N. S. Boavista (Porto)	0,41	4,0
7	Santa Clara (Porto)	0,62	1,3
8	S. Pedro de Rates	0,39	3,0
9	Viana do Alentejo	0,32	3,1
10	S. B. Cástris (Évora)	0,45	3,1
11	São Lourenço (V. N. Azeitão)	0,45	2,3
12	Cedofeita (Porto)	0,37	3,6
13	Cête	0,44	2,3
14	Lourosa	0,48	1,6
15	Vila do Bispo	0,51	1,8
16	Vouzela	0,58	1,5
17	S.^{to} Ovídio (V. N. Gaia)	0,38	3,0

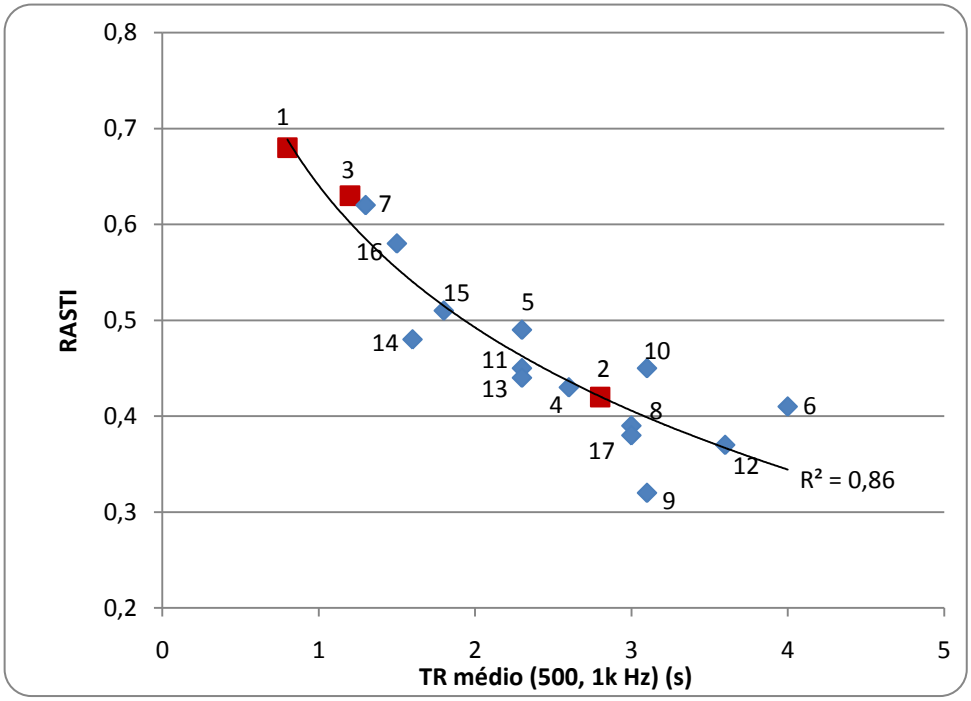

Figura 5.48. – Relação entre o TR (500, 1k Hz) e os valores médios de RASTI das capelas 1, 2 e 3+4 em análise e igrejas portuguesas de idêntica volumetria.

A função com melhor ajuste encontrada para correlacionar os valores médios de RASTI e o TR (500, 1k Hz) das igrejas em estudo é a logarítmica, com um coeficiente R^2 de 0,86 e pode exprimir-se da seguinte forma:

$$RASTI = -0{,}214 \ln(TR_{(500,1k\ Hz)}) + 0{,}6408$$

Pela análise da Figura 5.48. verifica-se que quanto maior for o tempo de reverberação do local em estudo menor será o seu valor de RASTI.

Com esta análise, torna-se evidente que, no caso concreto das igrejas, é bastante importante, independentemente do seu volume, ter um controlo acrescido sobre o tempo de reverberação. Caso as superfícies tenham algum tipo de tratamento, como é o caso das capelas 1 e 3+4, facilmente se consegue um tempo de reverberação mais baixo o que aumenta a probabilidade de se ter uma boa inteligibilidade da palavra, já que esta não depende unicamente do tempo de reverberação.

Caso não haja um tratamento eficaz das superfícies, como é o caso deliberado da capela 2 e a situação mais corrente nas igrejas portuguesas, os tempos de reverberação serão, por norma, bastante elevados o que fará com que os valores de RASTI diminuam muito. A isto corresponde uma inteligibilidade da palavra medíocre que não é nada favorável ao exercício das cerimónias cristãs por causa do constante uso da palavra ao longo de toda a sua duração. É contudo criado um ambiente sonoro semelhante às igrejas tradicionais portuguesas de volume idêntico e favorável à música.

De notar que a função acima encontrada serve apenas para ter uma ideia do valor de RASTI médio da igreja pelo que será mais apropriado a medição do RASTI pois permite avaliar as diferenças existentes com a colocação do sistema de reforço electroacústico em funcionamento assim como verificar a maior ou menor homogeneidade deste parâmetro ao longo de todo o espaço da igreja.

5.8. Comparação com os Requisitos Ideais para as Capelas da Reconciliação

O objectivo deste subcapítulo é verificar o cumprimento dos requisitos ideais relativos ao tempo de reverberação, RASTI e ruído de fundo, que já foram anteriormente referidos no subcapítulo 4.3.

a) Tempo de Reverberação

Os valores ideais e os medidos na sequência da realização deste trabalho, do tempo de reverberação apresentam-se resumidos no Quadro 5.37.

Quadro 5.37. – Valores ideais e valores medidos do TR médio (500, 1k Hz) das capelas 1 e 2.

Localização	TR médio (500, 1k Hz) (s)	
	Valor Ideal	Medido
Capela 1	1,0	0,8
Capela 2	2,0 a 4,0	2,8

Pela análise do Quadro 5.37. verifica-se que o valor ideal para as capelas 1 e 2 foi alcançado. O valor medido do TR médio (500, 1k Hz) para a capela 1 é de 0,8 s, um pouco inferior ao valor ideal de 1,0 s, o que não se torna prejudicial para o objectivo do dono de obra em ter nesta capela as melhores condições para a transmissão da palavra.

Na capela 2, o valor obtido, de TR médio (500, 1k Hz), nos ensaios foi de 2,8 s, precisamente no intervalo de valores considerados ideais para cumprir o objectivo do dono de obra de fazer desta capela um local propício para a música.

b) RASTI

No Quadro 5.38. apresenta-se o limite mínimo ideal de RASTI assim como os valores obtidos de RASTI sem reforço electroacústico para as capelas 1 e 2.

Quadro 5.38. – Limite mínimo ideal de RASTI e valores médios medidos de RASTI sem reforço electroacústico para as capelas 1, 2 e 3+4.

Localização	RASTI médio		
	Valor Ideal	SRS ligado	SRS desligado
Capela 1	> 0,50	0,69	0,68
Capela 2		0,42	0,42
Capela 3+4		0,67	0,63

SRS – Sistema de reforço electroacústico.

Pela análise do Quadro 5.38. e partindo dos valores mais desfavoráveis, correspondentes à situação em que o sistema de reforço electroacústico está desligado, medidos nas capelas 1, 2 e 3+4 no âmbito deste trabalho só a capela 2 é que não atinge o valor mínimo ideal de RASTI que era de 0,50, não ultrapassando os 0,42, mesmo com o sistema de reforço electroacústico em funcionamento.

No caso das capelas 1 e 3+4 com valores médios mínimos de RASTI de 0,68 e 0,63 respectivamente, ultrapassam largamente o mínimo considerado ideal, obtendo, como já se verificou, uma boa inteligibilidade da palavra. Com o funcionamento do sistema de reforço electroacústico verifica-se que estes valores melhoram, no caso da capela 3+4 consideravelmente.

c) RUÍDO DE FUNDO

Os valores medidos dos níveis sonoros equivalentes, na situação mais desfavorável com o sistema de AVAC em funcionamento, nas capelas 1, 2 e 3+4 assim como o respectivo valor de NC encontram-se resumidos no Quadro 5.39. Neste quadro apresentam-se também os valores ideais destes dois parâmetros já referidos anteriormente.

Quadro 5.39. – Limites máximos ideais de L_{Aeq} e de NC e valores medidos de L_{Aeq} com AVAC em funcionamento e respectivos NC's para as capelas 1, 2 e 3+4.

Localização	L_{Aeq} (dB)		NC (dB)	
	Valor ideal	Medido	Valor ideal	Medido
Capela 1	≤ 30	24	≤ 25	18
Capela 2		37		29
Capela 3+4		27		20

Tanto a capela 1 como a capela 3+4, pela observação do Quadro 5.39. cumprem o limite ideal do nível sonoro equivalente assim como os seus respectivos valores de NC.

No que se refere à capela 2, por causa do elevado nível de ruído provocado pelo sistema de AVAC, esta ultrapassa o valor ideal recomendado do L_{Aeq} em mais de 7 dB assim como excede também o limite máximo ideal de 25 NC estipulado para se poder ter um local propício para a oração. Contudo os valores obtidos não se podem considerar incomodativos.

5.9. CÁLCULO DO PARÂMETRO OBJECTIVO *SII* (*SPEECH INTELLIGIBILITY INDEX*)

O *SII (Speech Intelligibility Index)*, como já referido no subcapítulo 2.14, surgiu do melhoramento do parâmetro *AI (Articulation Index)* e o seu cálculo encontra-se definido na norma ANSI S.3.5 de 1997 [24].

Dados os quatro métodos diferentes de cálculo aí existentes, vai-se optar pelo método de bandas de frequência de uma oitava, o qual se adapta melhor aos dados disponíveis.

Inicialmente, para cada banda de frequência de uma oitava (dos 250 aos 8k Hz), atribui-se os valores do nível do espectro equivalente da palavra com um tom elevado (E'), do nível do espectro equivalente do ruído (N') e do nível do espectro equivalente do limiar auditivo (T'), que neste caso adopta-se como nulo.

O espectro equivalente de mascaramento (Z) equivale ao nível do espectro equivalente do ruído (N'). O passo seguinte será calcular o nível do espectro equivalente do ruído interno (X'). Este é equivalente à soma do nível do espectro equivalente do limiar auditivo (T') com o nível do espectro do ruído interno (X). O nível do espectro equivalente de perturbação (D) corresponde ao maior valor entre dois parâmetros, Z e X'.

Este último parâmetro, D, em conjunto com E' adoptado nesta análise, origina uma nova variável temporária (K') que multiplicando pelo nível de distorção da palavra (L) origina por sua vez o parâmetro A, função da audibilidade.

Realizando o somatório do resultado do produto do parâmetro A com um peso relativo (I), fornecido pela norma [24], de todas as bandas, obtêm-se o valor de *SII*.

Quadro 5.40. – Cálculo do parâmetro *SII* para a capela 1.

Freq. (Hz)	E'	N'	T'	Z	X	X'	D	U	L	K	A	I	IA
250	40,6	24,1	0,0	24,1	-3,9	-3,9	24,1	34,75	1,00	1,00	1,00	0,06	0,06
500	43,1	20,0	0,0	20,0	-9,7	-9,7	20,0	34,27	1,00	1,00	1,00	0,17	0,17
1000	39,6	18,2	0,0	18,2	-12,5	-12,5	18,2	25,01	0,97	1,00	0,97	0,24	0,23
2000	22,4	16,5	0,0	16,5	-17,7	-17,7	16,5	17,32	1,00	0,70	0,70	0,26	0,18
4000	11,1	14,7	0,0	14,7	-25,9	-25,9	14,7	9,33	1,00	0,38	0,38	0,21	0,08
8000	9,6	12,2	0,0	12,2	-7,1	-7,1	12,2	1,13	1,00	0,41	0,41	0,05	0,02
												SII=	0,75

Quadro 5.41. – Cálculo do parâmetro *SII* para a capela 2.

Freq. (Hz)	E	N	T	Z	X	X'	D	U	L	K	A	I	IA
250	40,6	40,4	0,0	40,4	-3,9	-3,9	40,4	34,75	1,00	0,51	0,51	0,06	0,03
500	43,1	34,3	0,0	34,3	-9,7	-9,7	34,3	34,27	1,00	0,79	0,79	0,17	0,13
1000	39,6	30,3	0,0	30,3	-12,5	-12,5	30,3	25,01	0,97	0,81	0,79	0,24	0,19
2000	22,4	27,5	0,0	27,5	-17,7	-17,7	27,5	17,32	1,00	0,33	0,33	0,26	0,09
4000	11,1	22,7	0,0	22,7	-25,9	-25,9	22,7	9,33	1,00	0,11	0,11	0,21	0,02
8000	9,6	17,5	0,0	17,5	-7,1	-7,1	17,5	1,13	1,00	0,24	0,24	0,05	0,01
												SII=	0,47

Quadro 5.42. – Cálculo do parâmetro *SII* para a capela 3+4.

Freq. (Hz)	E	N	T	Z	X	X'	D	U	L	K	A	I	IA
250	40,6	27,3	0,0	27,3	-3,9	-3,9	27,3	34,75	1,00	0,94	0,94	0,06	0,06
500	43,1	22,1	0,0	22,1	-9,7	-9,7	22,1	34,27	1,00	1,00	1,00	0,17	0,17
1000	39,6	21,0	0,0	21,0	-12,5	-12,5	21,0	25,01	0,97	1,00	0,97	0,24	0,23
2000	22,4	19,0	0,0	19,0	-17,7	-17,7	19,0	17,32	1,00	0,61	0,61	0,26	0,16
4000	11,1	16,3	0,0	16,3	-25,9	-25,9	16,3	9,33	1,00	0,33	0,33	0,21	0,07
8000	9,6	13,1	0,0	13,1	-7,1	-7,1	13,1	1,13	1,00	0,38	0,38	0,05	0,02
												SII=	0,71

Nos Quadros 5.40. a 5.42. apresenta-se o cálculo do parâmetro *SII* para as capelas 1, 2 e 3+4.

Para a capela 1 obteve-se um valor de SII de 0,75. Sendo o valor máximo de 1,0, este valor da capela 1 corresponde a uma inteligibilidade da palavra boa em que ao ouvinte chegam três quartos de todos os sinais de fala emitidos pelo orador.

A capela 2, com 0,47, foi a que obteve o valor mais baixo, como esperado, não chegando ao ouvinte metade dos sinais da palavra emitidos pelo orador. Este valor equivale a uma inteligibilidade da palavra medíocre.

A capela 3+4 obteve o valor, com 0,71 o que lhe confere, tal como na capela 1, uma inteligibilidade da palavra boa.

Quadro 5.43. – Valores médios de RASTI sem reforço electroacústico e de SII das capelas 1, 2 e 3+4.

Parâmetro	Capela 1	Capela 2	Capela 3+4
RASTI	0,68	0,42	0,63
SII	0,75	0,47	0,71

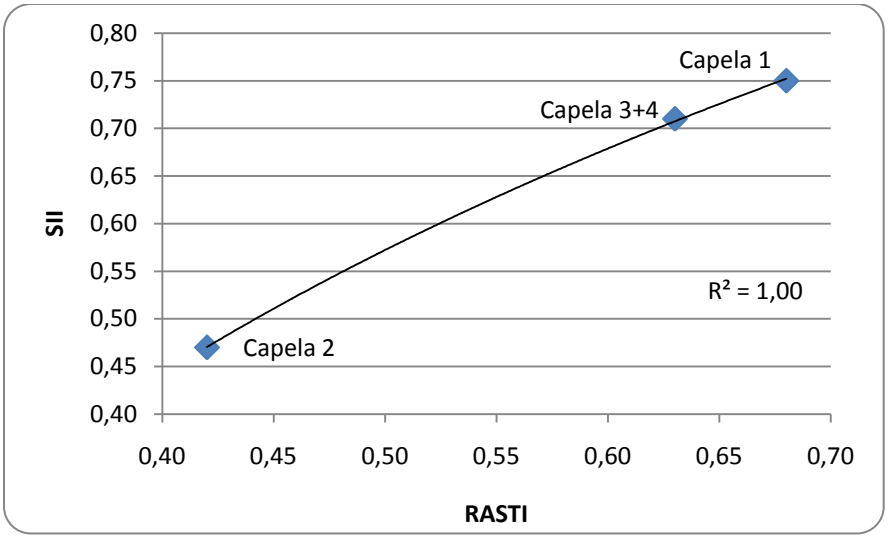

Figura 5.49. – Relação entre os valores médios de RASTI e os valores calculados de SII nas capelas 1, 2 e 3+4.

A função com melhor ajuste encontrada para correlacionar os valores médios de RASTI e os valores calculados de SII das três capelas em estudo é a logarítmica, com um coeficiente R^2 de 1,00 e pode exprimir-se da seguinte forma:

$$SII = 0{,}5847 \ln(RASTI) + 0{,}9776$$

Ao analisar o Quadro 5.43. e a Figura 5.49., verifica-se que todos os valores calculados de *SII*, para as três capelas, são da mesma ordem de grandeza que os valores de RASTI registados, havendo assim, uma proporcionalidade entre resultados destes dois métodos de avaliação da inteligibilidade da palavra.

A partir da curva de tendência encontrada na Figura 5.49. pode-se relacionar a escala de inteligibilidade da palavra aplicada aos valores de RASTI (Quadro 2.6.) com os valores de SII. Assim cria-se uma escala de inteligibilidade da palavra associada aos valores de SII (Quadro 5.44.) facilitando esta avaliação dado que, em vez de ser necessário utilizar aparelhos de medição de RASTI (Figuras 5.3. e 5.4.), será necessário só possuir um sonómetro (Figura 5.1.) para medição do ruído de fundo.

Quadro 5.44. – Proposta de relação dos limites da inteligibilidade da palavra aplicados ao *RASTI* com os valores calculados de SII.

Inteligibilidade da Palavra	RASTI	SII
Má	[0,00 – 0,30[	[0,00 – 0,27[
Medíocre	[0,30 – 0,45[	[0,27 – 0,51[
Suficiente	[0,45 – 0,60[	[0,51 – 0,68[
Boa	[0,60 – 0,75[	[0,68 – 0,81[
Excelente	[0,75 – 1,00]	[0,81 – 1,00]

6
ANÁLISE SUBJECTIVA

A pedido do dono de obra as capelas 1 e 2 apesar de serem geométrica e visualmente idênticas têm condições acústicas interiores bastante diferentes. A capela 1, com um tempo de reverberação baixo ($TR_{\text{médio (500, 1k Hz)}}$ = 0,8 s), está mais preparada para a transmissão da palavra enquanto a capela 2, com um tempo de reverberação bastante mais elevado ($TR_{\text{médio (500, 1k Hz)}}$ = 2,8 s), é dedicada mais à música.

Perante esta situação divergente entre dois espaços visualmente semelhantes será interessante verificar a opinião subjectiva dos utilizadores das capelas 1 e 2 e comparar o resultado dessa mesma opinião com o conjunto de resultados obtidos da análise objectiva efectuada para as capelas no capítulo 5.

A maioria da população presente nas celebrações realizadas nas capelas 1 e 2, exceptuando dias de maior afluência como é o caso do dia 13 de Maio onde existe uma maior variedade de escalões etários, são pessoas com idades acima dos cinquenta anos e do sexo feminino. Para representar esta população receptora da mensagem auditiva foi seleccionada uma senhora, com mais de sessenta anos, habitual frequentadora dos dois espaços em análise (opinião receptor).

Visto que o local do orador dentro de cada capela é distinto do local do receptor pode existir opiniões contrárias. Para representar este grupo nesta avaliação subjectiva das capelas 1 e 2 seleccionou-se o Sr. Pe. Cristiano Saraiva, também um frequente utilizador das duas capelas, para fornecer a sua opinião (opinião emissor).

Estatisticamente, só uma opinião de cada grupo, não é considerado fiável mas a criteriosa escolha da amostra permite ter confiança nos resultados obtidos.

A estas duas pessoas representantes das duas diferentes populações existentes, população emissora e população receptora, foi colocada directamente a seguinte pergunta:

- Na sua opinião, qual das duas capelas, a capela do Santíssimo Sacramento (capela 1) ou a capela da Ressurreição de Jesus (capela 2), é a mais apropriada para a transmissão da palavra?

No Quadro 6.1. apresenta-se as respostas obtidas através deste inquérito efectuado directamente ao público alvo.

Quadro 6.1. – Quadro resumo da opinião subjectiva dos utilizadores das capelas 1 e 2.

Utilizadores	Opinião receptor	Opinião emissor
Qual a melhor capela para a transmissão da palavra?	Capela 2	Capela 2

Ao analisar-se as respostas dadas à pergunta, qual das capelas seria mais apropriada à transmissão da palavra (Quadro 6.1.), verifica-se que tanto as pessoas que estão numa celebração como receptores da mensagem sonora como as pessoas que transmitem essa mesma mensagem sonora preferem as condições sonoras existentes na capela 2 às condições da capela 1.

No Quadro 6.2. apresenta-se uma comparação das respostas obtidas (Quadro 6.1.) com os parâmetros objectivos, do nível sonoro equivalente (Quadro 5.22.), do tempo de reverberação (Quadros 5.1. e 5.2.) e do RASTI com sistema de reforço electroacústico (Quadros 5.9. e 5.10.), medidos anteriormente assim como o grau de inteligibilidade da palavra (Quadro 5.12.) das capelas 1 e 2.

Quadro 6.2. – Comparação das respostas subjectivas com os parâmetros objectivos medidos nas capelas 1 e 2.

Parâmetros	Capela 1	Capela 2
Opinião subjectiva dos utilizadores quanto à transmissão da palavra	Não apropriada	Apropriada
Ruído de Fundo L_{Aeq} (dB) com AVAC	24	34
TR $_{\text{médio (500, 1k Hz)}}$ (s)	0,8	2,8
RASTI médio com sistema de reforço electroacústico	0,69	0,42
Inteligibilidade da palavra objectiva	Boa	Medíocre

Pela comparação efectuada no Quadro 6.2. verifica-se que a opinião dos utilizadores vai contra a conclusão retirada das medições dos vários parâmetros medidos no decorrer deste trabalho.

Os utilizadores das capelas consideram mais apropriada a capela 2 para a transmissão da palavra do que a capela 1, isto apesar da capela 2 possuir piores resultados nos parâmetros objectivos do que a capela 1.

A capela 2 tem um ruído de fundo superior em 10 dB(A), um TR $_{\text{médio (500, 1k Hz)}}$ de 2,8 s, mais 2 s do que o registado na capela 1, o seu RASTI médio com sistema de reforço electroacústico é de 0,42, bem inferior aos 0,69 medidos na capela 1, e a sua inteligibilidade da palavra correspondente é "medíocre" bem diferente do "bom" atribuído à capela 1.

Não existe nenhum parâmetro objectivo na capela 2 que seja melhor do que os registados na capela 1 por isso seria de esperar uma opinião subjectiva diferente dos utilizadores.

Recorrendo à Figura 5.44. verifica-se que a capela 2 se enquadra nos valores do conjunto de igrejas tradicionais portuguesas, como se pode concluir geralmente bastante reverberantes. Pelo contrário, devido ao seu tratamento acústico, tem um ambiente bastante menos reverberante, mais propício à transmissão da palavra, mas afastando-se do ambiente "tradicional" das igrejas portuguesas.

A reacção por parte dos utilizadores de escolher como mais apropriada para a transmissão da palavra a capela 2 pode dever-se a esta semelhança de ambiente bastante reverberante entre a capela 2 e a generalidade das igrejas tradicionais portuguesas. Os utilizadores podem estar bastante habituados a assistir ou a celebrar cerimónias, durante muito tempo, nas igrejas tradicionais e por consequência não receberem bem a mudança de ambiente sonoro a que estão sujeitos ao assistir celebrações na capela 1, preferindo assim, apesar de não ser a melhor, a capela 2.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

Este estudo tinha como principal objectivo, caracterizar acusticamente, através de parâmetros objectivos, o interior das capelas subterrâneas da nova Igreja da Santíssima Trindade em Fátima, formalmente denominadas de capelas da Reconciliação. Pretendeu-se avaliar *in situ* esses espaços quatro parâmetros acústicos, a reverberação, avaliada pelo tempo de reverberação (TR), a inteligibilidade da palavra, analisada pelo RASTI, o ruído de fundo, analisado com os níveis de pressão sonora (L) e com os níveis sonoros (L_A), e o isolamento sonoro, avaliado através do DnT,w. Esses parâmetros foram escolhidos por serem muito importantes para caracterizar objectivamente o interior das capelas da Reconciliação.

Além da caracterização do interior de cada capela, o estudo teve também como objectivos, comparar os valores do tempo de reverberação e de RASTI obtidos com a Igreja da Santíssima Trindade e com igrejas tradicionais portuguesas de volumetria semelhante. Comparou-se também os valores das capelas com os valores considerados ideais para este tipo de espaços.

No Quadro 7.1. apresenta-se resumidamente os resultados obtidos através dos ensaios realizados nas diversas capelas da Reconciliação (Figura 4.22.) e no Quadro 7.2. apresenta-se os DnT,w das três divisórias analisadas.

Quadro 7.1. – Quadro resumo dos resultados médios obtidos nos ensaios *in situ*.

Parâmetros	Capela 1	Capela 2	Capela 3+4
Tempo de Reverberação TR (500, 1k Hz) (s)	0,8	2,8	1,2
RASTI			
Sem reforço electroacústico	0,68	0,42	0,63
Com reforço electroacústico	0,69	0,42	0,67
Inteligibilidade da palavra objectiva	Boa	Medíocre	Boa
Ruído de Fundo (L_{Aeq}) (dB)			
Sem AVAC	23,8	23,3	23,2
Com AVAC	24,4	37,4	26,9
NC	18	29	20
NR	21	31	22
SII	0,75	0,47	0,71

Quadro 7.2. – Quadro resumo dos valores do índice do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.

Parâmetros	C2 – C1	C4 – C3	C2 – A
Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea (DnT,w) (dB)	59	29	37

C – Capela; A – Átrio (corredor)

Relativamente ao Tempo de Reverberação (TR), conclui-se que o diferente tratamento acústico aplicado nas superfícies interiores das capelas tem bastante influência nos valores medidos. As capelas 1 e 3+4, que foram parcialmente revestidas pelo material absorvente sonoro *Akustaplan*, têm valores de TR (500, 1k Hz) bastante inferiores, 0,8 e 1,2 s respectivamente, ao valor registado na capela 2, de 2,8 s, onde não se aplicou este material muito absorvente. Assim as capelas 1 e 3+4 tornam-se mais apropriadas para a transmissão da palavra enquanto a capela 2 é mais adequada para a música.

Da avaliação do RASTI verifica-se que as capelas que obtiveram um melhor resultado neste parâmetro foram novamente as capelas 1 e 3+4 com os valores de 0,68 e 0,63 respectivamente, isto quando o sistema de reforço electroacústico se encontra desligado. A capela 2, por sua vez, obteve um valor de RASTI de 0,42, bastante inferior às outras capelas 1 e 3+4 devido principalmente ao seu tempo de reverberação bastante mais elevado.

Ao colocar em funcionamento o sistema de reforço electroacústico, este aumenta ligeiramente os valores de RASTI nas capelas 1 e 3+4, subindo-os respectivamente para 0,69 e 0,67, sem no entanto ter relevância na capela 2, mantendo-se assim o valor de RASTI igual a 0,42. Esta pequena ou nula variação tanto na capela 1 como na capela 2 prova que é desnecessário o uso do reforço electroacústico dado que não aporta melhorias significativas na inteligibilidade da palavra que o justifiquem.

Quer o sistema de reforço electroacústico esteja em funcionamento ou não, visto que tem pouca influência nos valores de RASTI, pode-se classificar, segundo a escala subjectiva de inteligibilidade da palavra normalizada, com "boa inteligibilidade da palavra" as capelas 1 e 3+4, enquanto à capela 2 é lhe atribuído uma classificação de "inteligibilidade da palavra medíocre".

Quanto ao Ruído de Fundo conclui-se que o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}) das três capelas é bastante reduzido, entre os 23 e 24 dB(A), muito adequado à finalidade a que as capelas são destinadas que é a prática de oração e transmissão da palavra. Com o funcionamento do AVAC o L_{Aeq} das três capelas aumenta, sendo a capela 2 especialmente afectada por este equipamento sofrendo uma subida do valor para os 37 dB(A), não tendo, no entanto, grande relevância nas capelas 1 e 3+4.

Pela análise dos parâmetros NC e NR confirma-se o baixo ruído de fundo existente nas capelas com e sem funcionamento do sistema de AVAC, tendo só o valor de NR, na capela 2, excedido ligeiramente o limite máximo recomendado pela bibliografia da especialidade, pelo que não se considera mesmo assim a existência de um ambiente excessivamente ruidoso para o uso destinado à capela.

No que diz respeito à privacidade durante as celebrações, esta está garantida entre as capelas 1 e 2 (C2–C1), que ao ter celebrações em simultâneo não serão prejudicadas mutuamente, devido ao DnT,w de 59 dB proporcionado pelo corredor existente entre as capelas.

No caso da capela 2 como da capela 1 também existe um bom isolamento sonoro em relação ao corredor de acesso (C2 – A) com um DnT,w de 37 dB, não dando origem a desconforto se, durante

uma celebração numa das duas capelas, existir movimentações normais de pessoas no corredor de acesso.

A divisória leve e amovível da capela 3+4 (C4 – C3), como seria de esperar, é a que obtém o DnT,w mais baixo no valor de 29 dB. No entanto este valor para uma divisória leve e amovível já é significativo e permite que uma conversa não seja nitidamente compreendida não permitindo, no entanto, celebrações em simultâneo nas capelas 3 e 4.

Em comparação das três capelas da Reconciliação com a igreja da Santíssima Trindade (9000 lugares), esta última apresenta tanto um TR (500, 1k Hz) como um RASTI, com utilização do sistema de reforço electroacústico, bastante semelhantes aos valores registados nas capelas 1 e 3+4 e melhores do que os verificados na capela 2. Conclui-se assim a extrema importância de um tratamento acústico correcto, que consegue proporcionar, por exemplo, um ambiente sonoro na Igreja da Santíssima Trindade muito mais favorável do que o existente na capela 2, apesar do seu volume ser muitas vezes superior ao da capela 2.

Da comparação efectuada das capelas da Reconciliação com igrejas de volumetria idêntica conclui-se que as capelas 1 e 3+4, que levaram um tratamento acústico adequado para que o seu tempo de reverberação e valor de RASTI fossem bons para a transmissão da palavra, têm resultados visivelmente melhores do que as igrejas tradicionais portuguesas com volume semelhante (Quadro 7.3.).

Quadro 7.3. – Melhorias face ao expectável pelas igrejas portuguesas de volumetria semelhante.

Local	ΔTR	ΔRASTI
Capela 1	-2,0	+0,3
Capela 3+4	-1,5	+0,2

Já os valores que se referem à capela 2, ficam em linha com a maior parte das igrejas portuguesas de idêntico volume, isto devido ao seu tratamento acústico ter sido projectado, por iniciativa do dono de obra, para que esta tivesse um ambiente mais reverberante, semelhante à maioria das igrejas portuguesas.

Pela confrontação dos valores ideais apresentados, ao nível do tempo de reverberação, do RASTI e do ruído de fundo, com os valores medidos *in situ* no âmbito deste trabalho conclui-se que tanto para a capela 1 como para a capela 3+4 todos os valores foram atingidos. Na capela 2 só o tempo de reverberação é que foi alcançado, ficando o valor de RASTI e do ruído de fundo abaixo dos valores considerados ideais.

Do cálculo do parâmetro *SII* verifica-se que este é proporcional ao valor de RASTI, corroborando assim, a classificação quanto à inteligibilidade da palavra atribuída a cada capela anteriormente através do valor de RASTI.

Por último, através das opiniões subjectivas dos utilizadores e comparando estas com os resultados objectivos, obtidos pelos ensaios *in situ*, conclui-se que os utilizadores das capelas 1 e 2, visualmente idênticas, preferem a capela 2, com um ambiente bastante reverberante, para a transmissão da palavra, apesar de terem à sua disposição a capela 1, com um ambiente sonoro muito pouco reverberante, ideal para a palavra.

Esta reacção por parte dos utilizadores de preferirem a capela que é objectivamente "pior", pode-se dever ao hábito, por parte destes, de já terem assistido ou realizado inúmeras celebrações em igrejas tradicionais portuguesas, que são, geralmente, muito mais reverberantes e por isso mais semelhantes à capela 2 do que à capela 1. A expectativa, por parte dos utilizadores, supera a qualidade objectiva do local.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De forma a completar este estudo, poderiam ser analisados no futuro, outros parâmetros como a Claridade (C80), a Definição (D50), o Tempo Central (TS), Rácios de Baixos (BR_RT e BR_L), a percentagem de perda de consoantes (ALCONS) e o TR com auditores dentro das capelas de modo a optimizar a sua classificação através de métodos multi-critério.

Futuramente também se poderia obter parâmetros acústicos subjectivos, com grupos de auditores previamente seleccionados e obter uma recolha mais alargada de informação sobre a opinião dos utilizadores das capelas. Esta recolha poderia confirmar ou não a preferência do público em geral pela capela mais reverberante ao contrário do esperado.

Após o término deste estudo verifica-se a grande influência do tratamento acústico das superfícies interiores de um dado espaço para o seu bom ambiente sonoro final. De registar a importância da realização de um adequado projecto de acústica para a obtenção dos fins pretendidos para um determinado espaço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Silva, P. Martins. *Acústica de Edifícios* (Informação técnica edifícios 8). LNEC, Lisboa, Março de 1978.

[2]. http://www.sea-acustica.es/Coimbra08/id036.pdf, acedido em Março de 2010.

[3]. Monteiro, Carlos A. *Caracterização Acústica de Salas de Audiência de Tribunais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

[4]. Carvalho, A. P. Oliveira de. *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*. Dissertação de Doutoramento, Universidade da Florida, 1994.

[5]. Morgado, António E. J. *Estudo acústico de igrejas portuguesas através de parâmetros subjectivos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.

[6]. Lencastre, M. *Inteligibilidade da palavra em igrejas católicas, através de análises de carácter objectivo e subjectivo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.

[7]. Carvalho, Anabela P. B. *Caracterização Acústica de Claustros Religiosos Históricos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.

[8]. http://paginas.fe.up.pt/~carvalho/igrejas.htm, acedido em Março de 2010.

[9]. Silva, Pedro Miguel Aguiar da. *Caracterização Acústica Interior da Nova Igreja da Santíssima Trindade em Fátima*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

[10]. http://www.netprof.pt/matematica/pdf/som.pdf, acedido em Março de 2010.

[11]. Carvalho, A. P. Oliveira de. *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Edição 7.2. FEUP. 2009.

[12]. http://2.bp.blogspot.com/QuhOjQfm3tc/SYbzAoRrGMI/AAAAAAAAABk/FitBCJp6r5c/s1600-h/060825_pitagoras.jpg, acedido em Março 2010.

[13]. http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_07_08/io6/publichtml/Imagenes/intro2.jpg, acedido em Março 2010.

[14]. http://www.prof2000.pt/users/mrsd/8ano/Audicao.htm, acedido em Março 2010.

[15]. http://audiolist.org/forum/lexicon.php?letter=lei%20do%20inverso%20do%20quadrado acedido em Março de 2010.

[16]. http://raquel806.spaces.live.com/, acedido em Março de 2010.

[17]. http://chracustica.zip.net/index.html, acedido em Março de 2010.

[18]. http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/MP3_(Artigo_Completo), acedido em Março de 2010.

[19]. http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_725.html, acedido em Março de 2010.

[20]. http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_60.html, acedido em Março de 2010.

[21]. http://paginas.fe.up.pt/~carvalho/ippar02.pdf, acedido em Março de 2010.

[22]. Everest, F. Alton. *The master handbook of acoustics*. McGraw-Hill, 2001.

[23]. Harris, Cyril M.. *Manual de medidas acústicas y control del ruído*. McGraw-Hill, 1995.

[24]. ANSI S.3.5 - American National Standard Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index, American National Standards Institute, Nova Iorque, 1997.

[25]. http://www.meyersound.com/support/papers/speech/section4.htm#sii, acedido em Abril de 2010

[26]. ANSI S.12.65 - American National Standard For Rating Noise with Respect to Speech Interference, American National Standards Institute, Nova Iorque, 2006.

[27]. INTERNATIONAL STANDARD. IEC 60268-16: sound system equipment, part 16: objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Suiça, 1998.

[28]. NP EN ISO 717-1, Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção, Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea.

[29]. http://www.acusticateoria.com/linha-residencial01.asp, acedido em Abril de 2010.

[30]. Sendra, J.J. *Computational acoustics in architecture* - Wit Press, Sevilha, 1999.

[31]. http://viajenaarte.wordpress.com/2009/11/, acedido em Maio de 2010.

[32]. Buglio, Joseph De. *Why Are Church Sound Systems & Acoustics So Confusing!*. JdB Sound, Acoustics, Canada 1992-98.

[33]. www.infopedia.pt/$edito-de-milao, acedido em Junho de 2010.

[34]. http://www.arteguias.com/catedral/colegiatacardona.htm, acedido em Maio de 2010.

[35]. http://www.flickr.com/photos/30555923@N08/galleries/72157622621097167/, acedido em Maio de 2010.

[36]. http://pt.wikipedia.org/wiki/Leon_Battista_Alberti, acedido em Junho de 2010.

[37]. http://pt.wikipedia.org/wiki/Filippo_Brunelleschi, acedido em Junho de 2010.

[38]. http://deedellaterra.blogspot.com/2008_11_01_archive.html, acedido em Maio de 2010.

[39]. http://pt.wikipedia.org/wiki/Conc%C3%ADlio_de_Trento, acedido em Junho de 2010.

[40]. http://pt.wikipedia.org/wiki/Contra-Reforma, acedido em Junho de 2010.

[41]. http://pt.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler, acedido em Junho de 2010.

[42]. http://www.matheplanet.com/matheplanet/nuke/html/viewtopic.php?topic=101036, acedido em Maio de 2010.

[43]. http://pt.wikipedia.org/wiki/Athanasius_Kircher, acedido em Junho de 2010.

[44]. http://www.infopedia.pt/$francesco-borromini, acedido em Junho de 2010.

[45]. http://www.infopedia.pt/$guarino%20guarini, acedido em Junho de 2010.

[46]. http://eternallycool.net/2007/09/the-church-of-2000/, acedido em Maio de 2010.

[47]. http://www.mariedenazareth.com/2982.0.html?L=6, acedido em Maio de 2010.

[48]. http://viagens-na-maionese.blogspot.com/2007/06/culto-mariano.html, acedido em Maio de 2010.

[49]. http://blog.cancaonova.com/peregrinacoes/files/2009/06/fotos-terra-santa-008.jpg, acedido em Maio de 2010.

[50]. http://umolharsobreomundodasartes.blogspot.com/2009/04/arte-medieval-arte-paleocrista-e.html, acedido em Abril de 2010.

[51]. http://www.vatican.va/holy_father/john_paul_ii/audiences/1997/documents/hf_jp-ii_aud_15101997_po.html, acedido em Maio de 2010.

[52]. http://paginasmarianas.blogspot.com/, acedido em Maio de 2010.

[53]. http://teologiaegraca.blogspot.com/2009_02_01_archive.html, acedido em Maio de 2010.

[54]. http://www.bcdp.org/dotnetnuke_2/Arquivo/CultoMariano/tabid/79/Default.aspx, acedido em Maio de 2010.

[55]. http://www.astrologosastrologia.com.pt/55/santos&nossas_senhoras=titulos_de_nossa senhora .htm, acedido em Maio de 2010.

[56]. http://www.jornalmomentos.net/construtor/page41.aspx.

[57]. http://diesdomini.blogspot.com/2007/09/nossa-padroeira.html, acedido em Maio de 2010.

[58]. http://aparicoes.leiame.net/mundo.html, acedido em Maio de 2010.

[59]. http://www.miraclehunter.com/marian_apparitions/approved_apparitions/index.html, acedido em Maio de 2010.

[60]. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mapa_Mundi_Detalle_Max_2008.png, acedido em Maio de 2010.

[61]. Suplemento integrante do Diário de Notícias e Jornal de Notícias de 27 de Março de 2010.

[62]. http://www.paroquiadefatima.org/portal/index.php?id=1253, acedido em Maio de 2010.

[63]. http://www.agencia.ecclesia.pt/cgi-bin/noticia.pl?id=12962, acedido em Maio de 2010.

[64]. António Augusto Borelli Machado, *As aparições e a mensagem de Fátima nos manuscritos da Irmã Lúcia*, Companhia Editora do Minho, Fevereiro de 1990.

[65]. http://www.oocities.com/heartland/bluffs/6737/Fatima/Fatima.htm, acedido em Maio de 2010.

[66]. http://www.fatima.org/port/essentials/facts/pseers.asp, acedido em Maio de 2010.

[67]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=1313, acedido em Maio de 2010.

[68]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=2814, acedido em Maio de 2010.

[69]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=1311, acedido em Maio de 2010.

[70]. http://cronologiadefatima-paulo.blogspot.com/2007/07/cronologia-de-ftima_09.html, acedido em Maio de 2010.

[71]. http://www.medjugorjebrasil.com/?cat=artigos&id=325, acedido em Maio de 2010.

[72]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=1314, acedido em Maio de 2010.

[73]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=41144, acedido em Maio de 2010.

[74]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=1260, acedido em Maio de 2010.

[75]. http://www.acidigital.com/Maria/fatima/beatificacao.htm, acedido em Maio de 2010.

[76]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=1346, acedido em Maio de 2010.

[77]. http://www.amicor.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=3613:joseph-ratzinger-o-guardiao-do-terceiro-segredo-de-fatima&catid=63:actualidade&Itemid=80, acedido em Maio de 2010.

[78]. http://fotos.sapo.pt/vUtzvFfMHRZUZfzmTjaf?a=350, acedido em Maio de 2010.

[79]. http://www.portugalvirtual.pt/_tourism/costadeprata/fatima/ptindex.html, acedido em Julho de 2010

[80]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=12844&page=1, acedido em Maio de 2010.

[81]. http://www.portugalvirtual.pt/_lodging/costadeprata/dom.goncalo/ptfatima.html, acedido em Maio de 2010.

[82]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=14954&page=1, acedido em Maio de 2010.

[83]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=12840&page=1, acedido em Maio de 2010.

[84]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=12846&page=3, acedido em Maio de 2010.

[85]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=12920&page=1, acedido em Maio de 2010.

[86]. http://www.pbase.com/diasdosreis/fatima_nova_igreja, acedido em Abril de 2010.

[87]. *Prémio Secil 2007-Engenharia Civil*. Ordem dos Engenheiros e Secil. Lisboa, Abril de 2008.

[88]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=1303, acedido em Abril de 2010.

[89]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=12638, acedido em Abril de 2010.

[90]. http://www.paroquiadevilarinho.com/content/view/67/56/, acedido em Abril de 2010.

[91]. http://www.santuario-fatima.pt/files/_Desdobravel_Igreja_da_Santissima_trindade_48e4a1417e0cc.pdf, acedido em Abril de 2010.

[92]. http://www.dacoustie.com/images/stories/documents/ftakustaplan.pdf, acedido em Abril de 2010.

[93]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=12640, acedido em Abril de 2010.

[94]. http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=12643, acedido em Abril de 2010.

[95]. Peças desenhadas do projecto de arquitectura da Igreja da Santíssima Trindade em Fátima, 2003

[96]. Domingues, Odete. *A Acústica nos Edifícios - Materiais e sistemas Absorventes Sonoros*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2005.

[97]. A. Carvalho e D. Freitas, *The new megachurch for the Sanctuary of Fátima*, 10th ICSV Int. Cong. on Sound and Vibration, Estocolmo, Suécia, 2003.

[98]. Silva, Telma Eduarda Lopes da. *Guião da Acústica de Igrejas em Portugal*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

[99]. Martins, Cátia Denise Ferreira. *Caracterização Acústica das duas Igrejas de Santo Ovídeo, Mafamude*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

[100]. PORTUGAL. Leis, Decretos. *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, aprovado pelo Dec. Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho.

[101]. http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_517.html, acedido em Abril de 2010.

[102]. http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_518.html, acedido em Abril de 2010.

[103]. NP EN ISO 140-4, Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção, Parte 4: Medição do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos.

[104]. Recuero Lopez, Manuel; Gil Gonzalez, Constantino. *Acustica arquitectónica*; Madrid; Benzal, 1993.

[105]. Software CivilSuite & Tools versão 1.0 módulo Porthos.