U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

IGREJAS MODERNAS COM PROBLEMAS ACÚSTICOS. O CASO DA IGREJA DO SANTUÁRIO DA N.ª SR.ª DA ASSUNÇÃO (SANTO TIRSO)

GLÓRIA CRISTINA GOMES PEREIRA

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 2011

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 - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

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.

Aos meus Pais

O estudo em geral, a busca da verdade e da beleza são domínios em que nos é consentido ficar crianças toda a vida.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Quero expressar os meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Sr. Professor Doutor António Oliveira de Carvalho, pela sua disponibilidade, eficiência e dedicação admiráveis e indispensáveis para a concretização deste trabalho, como também pela sua boa disposição.

Agradeço ao Sr. Eng. Eduardo Costa, não só pela sua ajuda inquantificável, mas também pela sua simpatia e dedicação que tanto contribuíram para este trabalho.

À professora Arq.ª Bárbara Rangel, pelas suas orientações no que respeita a fontes de carácter arquitectónico úteis a este trabalho.

Ao Sr. Professor Doutor Rui Calejo, a quem devo os agradecimentos pelas suas sugestões na realização deste trabalho.

Ao Sr. Dr. Manuel Carneiro que disponibilizou toda a documentação bibliográfica que possuía da região de Santo Tirso e referente ao Santuário.

Ao Sr. Francisco Matias pela sua hospitalidade em todas as visitas ao Santuário.

Ao Sr. Pe. Dino pela documentação fornecida acerca da festividade de N.ª Sr.ª Assunção.

Um forte agradecimento aos meus pais e irmãos que tanto me apoiaram em tudo e estiveram sempre presentes.

Aos meus amigos que fizeram parte deste meu trajecto, em especial um grande agradecimento à Alexandra, pela sua ajuda sempre admirável e incansável nas horas mais difíceis.

RESUMO

O presente trabalho, inserido no programa de Investigação em Acústica de Igrejas em curso na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto desde 1991, pretende analisar o impacto das características da arquitectura do séc. XX na acústica de igrejas tomando como caso particular a Igreja do Santuário de Nossa Senhora da Assunção, em Santo Tirso, que se caracteriza por ser uma igreja moderna com problemas acústicos.

Construída essencialmente para substituir uma velha capela, a Igreja do Santuário de Nossa Senhora da Assunção, situada no Monte Córdova, tem como principal proficiência a contemplação de Nossa Senhora da Assunção, cuja festividade se realiza a 15 de Agosto. É uma obra religiosa do séc. XX cujo projecto inicial é da autoria de Ernesto Korrodi (1870-1944).

Sendo uma igreja um espaço dedicado à oração, transmitindo mensagens essencialmente por meios sonoros, palavra e música, tem requisitos acústicos essenciais à boa percepção destas fontes sonoras.

Assim, tendo como apoio os conceitos da ciência *Acústica*, conhecendo o paradigma das igrejas a nível acústico e incidindo no caso particular desta igreja faz-se uma avaliação que revele a capacidade acústica do local. Inicia-se por caracterizar esta igreja, fazendo uma avaliação de critérios que descrevam quer o seu isolamento sonoro quer a sua correcção acústica.

Para o primeiro, o ruído de fundo no interior da igreja é o factor mais indicativo, tendo-se obtido para esta igreja um valor de 26 dB(A).

Relativamente à correcção acústica, a sua caracterização é sustentada por medições de parâmetros acústicos. Obtiveram-se um valor de Tempo de Reverberação [500-1000 Hz] médio de 11 s e um valor médio de RASTI de 0,29, ambos indicadores de um desadequado ambiente acústico interior.

Para uma melhor percepção da qualidade acústica desta igreja é importante comparar o seu espaço interior com outros a nível acústico. Para essa comparabilidade ser viável selccionaram-se igrejas de semelhante volumetria. Assim, concluiu-se que o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção apresenta um valor de Tempo de Reverberação superior e um valor RASTI inferior, aos esperados para igrejas com idêntica volumetria.

Apresentam-se algumas propostas e respectiva análise de custo de correcção acústica desta igreja, nomeadamente a colocação de material absorvente em todo o tecto da nave através de celulose projectada. Foram feitas análises de previsão dos tempos de reverberação após estas correcções.

PALAVRAS CHAVE: ACÚSTICA, IGREJA, REVERBERAÇÃO, CURVAS DE INCOMODIDADE, RASTI

ABSTRACT

This work (integrated in the Research Program in Church Acoustics of the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP)) intends to analyse the impact of 20th century architecture in the acoustics of churches taking as example the Church of the Sanctuary of Our Lady of Assumption, in Santo Tirso, which is characterized as being a modern church with acoustics problems.

Built to replace an old chapel, the Church of the Sanctuary of Our Lady of Assumption, in Monte Córdova, has as main proficiency the contemplation of Our Lady of Assumption, whose festivity happens the 15th of August. The initial project was made by Ernesto Korrodi (1870-1944).

As it is a space dedicated to prayer whose messages are mainly transmitted through words and music, it needs certain conditions for the correct perception of those sounds.

Measurements were done *in situ* regarding the following parameters: Reverberation Time, background noise and RASTI.

The background noise was to found to 26 dB(A), a very lower value.

The average of the reverberation time values found is 11 secounds, and the average RASTI 0.29, both suggest a very bad acoustic environment.

For a better perception of the acoustic quality of this church is important to compare its inner space with others. For that comparison, churches with similar volume where selected and it was concluded that this Sanctuary has reverberation time values superior and lower RASTI value, to what was expected for a church with similar dimensions.

Proposed solutions for this church include the use of absorbing material on the ceiling of the nave (cellulose fibers). Analyses were done to predict the reverberation time values after these corretions.

KEY WORDS: ACOUSTICS, CHURCH, REVERBERATION TIME, RASTI

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V

1. OBJECTIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO 19

1.1. APRESENTAÇÃO 19
1.2. OBJECTIVOS 20
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO 20

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES 21

2.1. INTRODUÇÃO 21
2.2. ANÁLISE EM PRESSÃO 21
2.2.1. ONDAS SONORAS 21
2.2.2. CELERIDADE DO SOM NO AR 22
2.2.3. NÍVEIS 22
2.2.4. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA 23
2.3. ANÁLISE DE SOM EM FREQUÊNCIA 24
2.3.1. DEFINIÇÕES E UNIDADES 24
2.3.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA 25
2.3.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO 26
2.4. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS 27
2.4.1. ABSORÇÃO SONORA 27
2.4.2. CASO PARTICULAR DOS ESPAÇOS ACOPLADOS 28
2.4.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO 29
2.4.4. RUÍDO DE FUNDO E CURVAS DE INCOMODIDADE 30
2.5. INTEGIBILIDADE DA PALAVRA 31
2.5.1. IMPORTÂNCIA 31
2.5.2. AVALIAÇÃO 31
2.6. OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS 31
2.6.1. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT) 31
2.6.2. TEMPO CENTRAL 31
2.6.3. CLARIDADE (C_{80}) 32
2.6.4. DEFINIÇÃO (D_{50}) 32
2.6.5. RASTI 32

2.6.6. OUTROS 32

2.7. CORRECÇÃO ACÚSTICA 33

3. ESTUDO ACÚSTICO DE IGREJAS 37

3.1. ACÚSTICA DE IGREJAS - INTRODUÇÃO 37
3.2. AS IGREJAS AO LONGO DOS ESTILOS ARQUITECTÓNICOS 38
3.3. REQUISITOS ACÚSTICOS DE IGREJAS 43

3.3.1. INTRODUÇÃO 43

3.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO IDEAL 43

3.4. ARQUITECTURA *VS* ACÚSTICA 46

3.4.1. INTRODUÇÃO 46

3.4.2. ACÚSTICA DE DIFERENTES TIPOS DE IGREJAS 48

3.4.2.1. Igrejas cristãs e medievais 48
3.4.2.2. Igrejas Renascentistas 50
3.4.2.3. Igrejas Barrocas e Barroco tardio 50

3.5. ASPECTOS QUE INFLUENCIAM A ACÚSTICA DE IGREJAS 52

3.5.1. INTRODUÇÃO 52

3.5.2. SUPERFÍCIES CURVAS 53

3.5.3. GRANDES ESPAÇOS COM VIGAS 53

3.5.4. ÓRGÃO DE TUBOS 53

3.5.5. MÚSICA "POPULAR" EM IGREJAS 53

4. SANTUÁRIO DE NOSSA SENHORA DA ASSUNÇÃO 55

4.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA E DOCUMENTAL 55
4.2. NOSSA SENHORA DA ASSUNÇÃO 62
4.3. O ARQUITECTO 63
4.4. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO 66

5. ENSAIOS E RESULTADOS 69

5.1. INTRODUÇÃO 69
5.2. INSTRUMENTAÇÃO 69

5.2.1. SONÓMETRO 69

5.2.2. CALIBRADOR 70

5.2.3. MICROFONE 70

5.2.4. FONTES SONORAS 70

5.2.5. ANALISADOR DO RASTI 71
5.2.6. INSTRUMENTOS AUXILIARES 71
5.3. RUÍDO DE FUNDO 72
5.3.1. CONSIDERAÇÕES E DESCRIÇÃO DO ENSAIO 72
5.3.2. PONTOS DE ENSAIO 72
5.3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 73
5.3.4. CURVAS DE INCOMODIDADE 74
5.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO 76
5.4.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO 76
5.4.2. PONTOS DE ENSAIO 77
5.4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 78
5.5. RASTI 79
5.5.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO 79
5.5.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ENSAIO 80
5.5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 81
5.6. BREVE ANÁLISE SUBJECTIVA 85
5.7. COMENTÁRIO FINAL – OBJECTIVA VS SUBJECTIVA 86

6. COMPARAÇÃO COM IGREJAS DE SEMELHANTE VOLUMETRIA 87
6.1. INTRODUÇÃO 87
6.2. COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ACÚSTICOS 88
6.2.1. RASTI 88
6.2.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO 89
6.2.3. RASTI *VS* TEMPO DE REVERBERAÇÃO 91

7. ANÁLISE MULTI-CRITÉRIO 93
7.1. INTRODUÇÃO 93
7.2. MÉTODO MULTICRITÉRIO – *SINGLE NUMBER GLOBAL INDEX* (W_G) 93
7.2.1. FORMULAÇÃO GERAL 93
7.2.2. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REVERBERAÇÃO (W_R) 93
7.2.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE INTEGIBILIDADE DA PALAVRA (W_S) 95
7.2.4. CLASSIFICAÇÃO FINAL 95
7.3. MÉTODO MULTICRITÉRIO – QUALIDADE ACÚSTICA EM IGREJAS (QAI) 95

7.3.1. INTRODUÇÃO 95
7.3.2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS OBJECTIVOS E SUBJECTIVOS 96
7.3.3. CLASSIFICAÇÃO FINAL - QAI 98
7.3.4. COMENTÁRIO FINAL 98

8 SUGESTÕES DE MELHORIA ACÚSTICA 101
8.1. INTERVENÇÕES ACÚSTICAS 101
8.1.1. INTRODUÇÃO 101
8.1.2. CORRECÇÃO ACÚSTICA 101
8.2. PROPOSTA DE CORRECÇÃO ACÚSTICA DO SANTUÁRIO DE N.ª SR.ª ASSUNÇÃO 101
8.2.1. IDENTIFICAÇÃO DAS PATOLOGIAS ACÚSTICAS 101
8.2.2. PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO 102
8.2.3. PREVISÃO DOS TEMPOS DE REVERBERAÇÃO E BREVE ANÁLISE ECONÓMICA 105
8.2.4. OUTRAS PROPOSTAS DE CORRECÇÃO – SISTEMA DE AMPLIFICAÇÃO SONORA 109

9 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 111
9.1. CONCLUSÕES 111
9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 112

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de propagação de ondas sonoras (pormenor de ondas longitudinais provocadas por zonas de compressão e rarefacção) [9]. 21

Figura 2.2 - Intensidade sonora de uma fonte pontual em função da distância [4]. 24

Figura 2.3 - Verificação de um som próximo de um som puro através do funcionamento de um diapasão [4]. 25

Figura 2.4 - Posição de alguns sons do quotidiano relativamente à intensidade sonora e frequência [7]. 25

Figura 2.5 - Curvas de igual nível de intensidade audível pelo ouvido humano (expressos em *fone*) [5]. 27

Figura 2.6 - Descrição das curvas de ponderação A, B, C e D [4]. 27

Figura 2.7 – Esquema de corredor lateral em igreja [6]. 29

Figura 2.8 - Esquema de reflexão de ondas sonoras num espaço fechado de um edifício [8]. 29

Figura 2.9 - Curvas de NC [10]. 30

Figura 2.10 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais absorventes [6]. 33

Figura 2.11 – Exemplo de ressoadores agrupados – painéis perfurados em madeira [12]. 34

Figura 3.1 – Estrutura da abordagem do tema Acústica vs Arquitectura. 37

Figura 3.2 - Igreja de São Gião na Nazaré [13]. 38

Figura 3.3 – Sé Velha de Coimbra [Foto da autora]. 39

Figura 3.4 – Igreja de Cête (Paredes) [Foto da autora]. 40

Figura 3.5 – Interior da Igreja Matriz de Vila do Conde [14]. 40

Figura 3.6 – Igreja Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia). 41

Figura 3.7 – Sé de Braga [15]. 41

Figura 3.8 – Igreja da Lapa (Porto) [Foto da autora]. 42

Figura 3.9 – Igreja nova de Cedofeita (Porto) [Foto da autora]. 42

Figura 3.10 – Tempos de reverberação “óptimos” em igrejas. A área superior aplica-se a igrejas mais direccionadas para a música e catedrais, a área inferior aplica-se a serviços mais suportados na palavra. Um compromisso entre a música e o discurso é requerido na maioria das igrejas [17]. 43

Figura 3.11 – Tempos de Reverberação óptimos [s] correspondentes a frequências médias em função do Volume [m^3] e do tipo de local (1- música religiosa, 2-salas de concerto para música orquestral, salas de concerto para música ligeira, 4-estúdios de concerto, 5-salas de baile, 6-teatros de ópera, 7-auditórios para palavra, 8-cinemas e salas de conferência, 9-estudios de televisão, 10-estúdios de rádio) [20]. 45

Figura 3.12 – Tempos de Reverberação ideais correspondentes a frequências médias segundo os autores Cavanaugh, Tocci e Wilkes em função do tipo de espaço [21]. 46

Figura 3.13 – Média de dados referente a Tempo de Reverberação e EDT em igrejas portuguesas vs estilos arquitectónicos ordenados da esquerda para a direita (1-Visigótico, 2- Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentismo, 6-Barroco, 7-Neoclassicismo, 8-Contemporâneo) [22]. 47

Figura 3.14 – Interior da Basílica de Santa Maria Maggiore [23]. 48

Figura 3.15 – Interior da Igreja de São Vicente de Cardona [24]. 49

Figura 3.16 – Propriedade bifocal da elipse [34]. 52

Figura 3.17 – Interior da Igreja de Santo'Ivo em Roma [37]. 52

Figura 4.1 – Localização do Monte Córdova no mapa concelhino de Santo Tirso [38]. 55

Figura 4.2 – Localização do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção (Santo Tirso) [39]. 56

Figura 4.3 - Vista aérea da localização do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção (Santo Tirso) [39]. 56

Figura 4.4 – Vista frontal noroeste do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora]. 57

Figura 4.5 - Vista lateral sudoeste do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora]. 57

Figura 4.6 – Vista este do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora]. 57

Figura 4.7 - Vista lateral nordeste do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora]. 58

Figura 4.8 – Interior do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora]. 58

Figura 4.9 - Projecto definitivo de Ernesto Korrodi para o Santuário de N.ª Srª da Assunção [40, 41]. 59

Figura 4.10 – Projecto do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, 1928, Monte Córdova, Santo Tirso, de Ernesto Korrodi. Corte longitudinal. [41]. 59

Figura 4.11 - Projecto do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, 1928, Monte Córdova, Santo Tirso, de Ernesto Korrodi. Planta da igreja [41]. 60

Figura 4.12 – Imagem de Nossa Senhora da Assunção no Santuário N.ª Sr.ª Assunção [foto da autora]. 62

Figura 4.13 - Ernesto Korrodi (1870-1944) [41]. 63

Figura 4.14 – Corte transversal do Palácio J. Ferreira Rego, Palmeira. Projecto de Ernesto Korrodi [41]. 64

Figura 4.15 – Palácio J. Ferreira Rego, Palmeira, Braga (1915 – 1918) [46]. 64

Figura 4.16 – Estudos de reconstrução do Castelo de Leiria completado em 1895 de Ernesto Korrodi (alçado do lado sul do Paço) [41]. 64

Figura 4.17 – Castelo de Leiria. Obras de restauro da Direcção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais, 1936 – 1956. Fachada nordeste do Paço [41]. 65

Figura 4.18 – Projecto de Ernesto Korrodi para a igreja paroquial de Santa Eulália em Fafe, 1937, (Alçado da fachada principal) [41]. 65

Figura 4.19 – Igreja paroquial de Santa Eulália, Fafe, 1937 (Fachada principal) [41]. 65

Figura 4.20 – Esquema em planta do Santuário de Nossa Senhora da Assunção [desenho da autora] 67

Figura 5.1- Sonómetro *B&K* modelo 2260 [Fotos da autora]. 70

Figura 5.2 - Calibrador *B&K* modelo 4231(associado ao sonómetro) [Foto da autora]. 70

Figura 5.3 - Fonte sonora da marca *Brüel & Kjaer* modelo 4224 [Foto da autora]. 71

Figura 5.4 – Medidor do RASTI *B&K* modelo 3361, emissor (modelo 4225) [Foto da autora]. 71

Figura 5.5 - Medidor do RASTI *B&K* modelo 3361, receptor (modelo 4419) [Foto da autora]. 71

Figura 5.6 – Planta esboço do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com a localização dos dois pontos de medição

do nível de pressão sonora do Ruído de Fundo. 72

Figura 5.7 –Níveis de pressão sonora do ruído de fundo do Santuário de N.ª Sr.ª Assunção..... 73

Figura 5.8 - Níveis sonoros médios do ruído de fundo com aplicação do filtro A do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção. 74

Figura 5.9 – Determinação do valor de NR no interior do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com os níveis de pressão sonora do ruído de tráfego [50]. 75

Figura 5.10 – Determinação do valor de NC no interior do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com os níveis de pressão sonora do ruído de tráfego [51]. 76

Figura 5.11 - Medição do tempo de Reverberação - fonte emissora *B&K* 4225 [Foto da autora]. 77

Figura 5.12 - Medição do tempo de Reverberação - sonómetro B&K tipo 2260 [Foto da autora]. 77

Figura 5.13 – Localização dos quatro pontos de ensaios do Tempo de Reverberação [Planta da autora] 77

Figura 5.14 – Valores do Tempo de Reverberação [s] nos quatro pontos de ensaio no Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção 78

Figura 5.15 – Medição do RASTI - fonte emissora no altar na posição do orador [Foto da autora]. 79

Figura 5.16 - Medição do RASTI - analisador do RASTI na posição do receptor [Foto da autora]. 79

Figura 5.17 – Sistema de amplificação sonora do Santuário da N.ª Sr.ª da Assunção [foto da autora] 80

Figura 5.18 – Localização dos sete pontos de medição do ensaio do RASTI. 81

Figura 5.19 – Valores de RASTI sem amplificação sonora..... 82

Figura 5.20 - Representação gráfica dos valores de RASTI com amplificação sonora 83

Figura 5.21 – Linhas de igual RASTI no Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção..... 84

Figura 5.22 – Diferenças dos valores médios de RASTI ao longo da igreja de N.ª Sr.ª da Assunção sem e com amplificação sonora. 85

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valores das constantes a e b [6] 28

Quadro 3.1 – Parâmetros que entram no cálculo dos Tempos de Reverberação “óptimos” segundo Sendra [18]. 44

Quadro 3.2 - Cálculo dos Tempos de Reverberação “óptimos” segundo Sendra para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção. 44

Quadro 3.3 – Resumo dos Tempos de Reverberação ideais aplicados ao Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção de diferentes autores. 46

Quadro 5.1 - Valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção 73

Quadro 5.2 - Níveis sonoros médios do ruído de feundo com aplicação do filtro A do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção. 74

Quadro 5.3 – Valores do Tempo de Reverberação [s] 78

Quadro 5.4 – Escala subjectiva de integibilidade da palavra a partir do parâmetro RASTI [22] 79

Quadro 5.5 – Medição dos valores do RASTI - Sem Amplificação sonora 82

Quadro 5.6 - Valores de RASTI - Com Amplificação sonora 82

Quadro 5.7 – Variação do valor médio do RASTI em cada ponto de ensaio com a introdução da amplificação sonora. 83

Quadro 6.1 – Valores arquitectónicos de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção e seu respectivo estilo arquitectónico prodoninate [57, 58] 87

Quadro 6.2 – Valores médios de RASTI de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção [57] 88

Quadro 6.3 – Valores médios do Tempo de Reverberação (500 e 1.000 Hz) de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção 90

Quadro 7.1 – Classificação do QAI [62] 96

Quadro 7.2 - Escalas de conversão para a normalização (_N) dos atributos originais. 97

Quadro 7.3 – Modelos de previsão de relação entre os parâmetros acústicos subjectivos e objectivos, valores da conversão e valores normalizados [62, 63]. 97

Quadro 8.1 – Valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *K-13* para cada banda de frequência em função da espessura e tipo de textura [adaptado de [65]] 103

Quadro 8.2 – Valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *BASWAphon* para cada banda de frequência em função da espessura e tipo de acabamento [adaptado de [66]] 104

Quadro 8.3 – Valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *Sonacoustics* de 25 mm espessura para cada banda de frequência [67]. 104

Quadro 8.4 - Valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *SonaKrete* para cada banda de frequência em função da espessura [adaptado de [68]]. 105

Quadro 8.5 - Valores do Tempos de Reverberação para cada banda de frequência em função do tipo de produto utilizado supondo a aplicação do material absorvente em todo o tecto da nave (≈540 m^2). 107

Quadro 8.6 - Estimativa orçamental das correcções supondo a aplicação do material absorvente em todo o tecto

da nave (≈540 m^2). 108

Quadro 9.1 – Resumo dos principais parâmetros acústicos do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção..... 112

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α	Coeficiente de absorção sonora
α_{ig}	Coeficiente de absorção sonora especialmente formulado para espaços acoplados
a	Constante formulada para espaços acoplados
A	Absorção sonora equivalente [m^2]
AI	*Articulation Index*
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
b	Constante formulada para espaços acoplados
B	Largura da banda de frequências [Hz]
B&K	*Brüel & Kjaer*
c	Celeridade do som [m/s]
C_{80}	Claridade [dB, base 80 ms]
CLA	Clareza do discurso musical
D_{50}	Definição
DIR	Direccionalidade
EDT	Tempo de Decaimento Curto [s]
EQT	Equilíbrio Tímbrico
f_0	Frequência central de banda [Hz]
f_1	Frequência de limite inferior de banda [Hz]
f_2	Frequência de limite superior de banda [Hz]
G	Factor intensidade sonora
$H_{média}$	Altura média (m)
I	Intensidade sonora [W]
I_0	Intensidade sonora de referência [W/m^2]
I_a	Intensidade sonora absorvida
INTM	Intimidade
L_A	Nível de pressão sonoro [dB]
L_I	Nível de Intensidade sonora [dB]
L_{nave}	Largura da nave (m)
L_P	Nível de pressão sonora [dB]
L_W	Nível de potência sonora [dB]
m	Absorção sonora do ar (m^{-1})
NRC	*Noise Reduction Coefficient*

p	Pressão sonora [Pa]
p_0	Pressão sonora de referência [Pa]
P80	Número de palavras entendidas duma lista de oitenta palavras
QAI	Qualidade Acústica em Igrejas
RASTI	*Rapid Speech Transmission Index*
S	Superfície [m^2]
SIL	*Speech Interference Level*
STI	*Speech Transmission Index*
T	Temperatura [K]
T_p	Tempo de reverberação [s] especialmente conferido para igrejas Católicas Romanas
TR	Tempo de reverberação [s]
TS	Tempo Central [ms]
V	Volume [m^3]
REV	Reverberância
W	Potência sonora [W]
W_0	Potência sonora de referência [W]
W_G	*Single number global index*
W_M	*Music sound quality index*
W_R	*Reverberation index*
W_S	*Intelligibility of speech index*

1

OBJECTIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO

1.1. APRESENTAÇÃO

A palavra *Igreja* (do grego *εκκλησία [ekklesia]* e latim *ecclesia*) pode possuir diferentes sentidos. Os três conceitos mais usados para esta palavra são:

- Igreja como Instituição, conjunto de várias entidades religiosas que comungam do objectivo de transmitir a Palavra de Deus como Doutrina;
- Igreja como Assembleia do Povo, agrupamento e/ou união dos Cristãos que se reúnem para ouvirem a Palavra de Deus;
- Igreja no sentido de edifício, local ou templo onde são realizadas as cerimónias religiosas.

Há até autores que optam por usar a palavra "*Igreja*" (com "I" maiúsculo) quando se pretendem referir à palavra *Igreja* nos primeiros dois sentidos (Instituição e Assembleia do Povo), e "*igreja*" (com "i" minúsculo) quando se pretenderem referir ao sentido de Edifício.

Se por um lado a palavra *Igreja* possui este triplo sentido, por outro lado é legítimo dizer que os três conceitos estão relacionados num círculo de coexistência mútua. Se os cristãos necessitam fazer "*Igreja*" no sentido de Comunidade (os primeiros dois sentidos), necessitam de um espaço para o fazer.

Assim como as salas de audiências ou de conferências, as igrejas tem como objectivo transmitirem uma mensagem cujo principal meio de transmissão é o meio sonoro. É esse terceiro conceito de igreja que a Engenharia Civil tem aptidão para responder, podendo proporcionar requisitos que respondam às exigências pretendidas.

Estes requisitos podem ser tanto a nível de isolamento sonoro, como a nível de correcção acústica do interior do espaço. O primeiro tem a ver com o facto de se pretender que o ruído do exterior não seja intensivo para o interior. O parâmetro mais indicativo deste aspecto é o ruído de fundo do espaço interior da igreja. O segundo traduz a capacidade acústica interior do próprio espaço. Este pode ser traduzido por parâmetros acústicos que serão apresentados posteriormente.

O presente trabalho, inserido no âmbito da Dissertação do ramo de Construções do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pretende analisar o impacto da arquitectura moderna na acústica de igrejas tomando como caso específico de igrejas desta corrente construtiva, o Santuário de Nossa Senhora da Assunção.

1.2. OBJECTIVOS

Este trabalho vem em consequência da verificação de problemas acústicos em igrejas modernas (não necessariamente do estilo arquitectónico Modernista, mas construídas no séc. XX). O Santuário de Nossa Senhora da Assunção, no Monte Córdova, em Santo Tirso é exemplo desta problemática.

Assim, é objectivo primordial deste trabalho analisar o impacto da arquitectura moderna na acústica de igrejas tomando um caso de estudo específico que se caracteriza por ser uma igreja moderna com muitos problemas acústicos.

Para tal, efectua-se uma caracterização acústica do espaço interior do Santuário de N.ª Sr.ª Assunção, sustentando-se numa considerável componente prática realizada *in situ*. Avaliam-se parâmetros objectivos e subjectivos que serão apresentados posteriormente.

São também objectivos deste trabalho, através da análise de resultados dos ensaios e testes, fazer a verificação dos requisitos acústicos de referência, comparar com outras igrejas de semelhante volumetria, analisá-la segundo dois métodos multi-critérios e fornecer algumas propostas de melhoria da qualidade acústica do local.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Numa primeira parte deste trabalho, capítulo dois, apresentam-se os conceitos base da Acústica para uma melhor compreensão do trabalho que se segue. Neste capítulo não se pretende abordar todos os conceitos e parâmetros existentes, mas apenas fornecer uma noção dos que serão utilizados.

No terceiro capítulo analisa-se a Acústica aplicada a igrejas.

No capítulo quatro faz-se uma caracterização do espaço em estudo: O Santuário de Nossa Senhora da Assunção.

No quinto capítulo apresentam-se os ensaios e medições dos parâmetros aos quais se recorreram para analisar acusticamente esse espaço.

No capítulo seis faz-se uma análise comparativa dos resultados dos parâmetros acústicos do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com outras igrejas de semelhante volumetria.

No capítulo sete efectua-se a aplicação de dois métodos multi-critério a fim de caracterizar acusticamente a igreja em estudo por dois índices globais.

No capítulo oito apresentam-se algumas propostas de melhoria acústica do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

Por fim, no último capítulo, apresenta-se um sumário das principais conclusões desenvolvidas ao longo de todo o trabalho, indicando também possíveis desenvolvimentos futuros.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

O factor mais importante deste estudo é o som. Para exercer uma correcta associação entre as características do som e o objectivo deste trabalho torna-se necessário recorrer aos conceitos e leis da *Acústica*, ramo da Física que estuda as ondas sonoras, mais concretamente na área de *Acústica de Edifícios*.

Assim, este capítulo apresenta alguns conceitos, parâmetros e definições de Acústica que serão a base da descrição de fenómenos acústicos no tema em estudo.

2.2. ANÁLISE EM PRESSÃO

2.2.1. ONDAS SONORAS

As ondas sonoras propagam-se em líquidos, gases e em sólidos [1]. De notar que não se propagam no vácuo [2].

Para este trabalho limita-se a análise da propagação do som no ar, e sendo o ar um gás, essa propagação está associada a variações de pressão. O ouvido humano é sensível a essas variações de pressão, assim como alguns microfones [1].

De forma elementar, o som tem início num ponto onde se altera a densidade do ar, que por sua vez altera a pressão localmente, e uma vez estimulado, transmite esse estímulo às partículas adjacentes. Há pois deslocamento de partículas sob a forma de ondas longitudinais, a três dimensões, sendo também esféricas concêntricas resultantes de zonas de compressão e rarefacção (Figura 2.1).

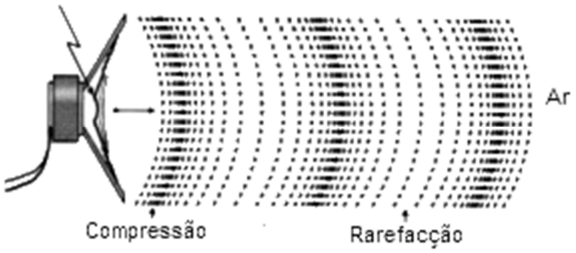


Figura 2.1 - Esquema de propagação de ondas sonoras (pormenor de ondas longitudinais provocadas por zonas de compressão e rarefacção) [9].

Mas o que foi dito não faz sentido se não houver a existência de três elementos relacionados entre si.

São eles:

- Emissor;
- Meio;
- Receptor.

Para haver som é necessária a existência de uma fonte sonora que lhe dê origem: Emissor. Igualmente importante é um conteúdo espacial onde o som se propaga: Meio. Este tem influência na qualidade de propagação do som, sobretudo na velocidade. Neste contexto limita-se a análise de ondas sonoras no ar. Equitativamente necessária é a existência de um Receptor, isto é, um ponto de chegada, um ser vivo com sistema auditivo (ou um sistema electrotécnico de captação), sem o qual não teria fundamento toda esta análise.

Neste caso de estudo os receptores são todas as pessoas presentes no Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, quando aí são proclamadas mensagens ou música por meios sonoros.

2.2.2. CELERIDADE DO SOM NO AR

A velocidade de propagação do som ou celeridade depende das características do meio onde este se propaga. Como esta análise é limitada ao ar, a celeridade do som dependerá unicamente da temperatura e pode ser dada pela expressão:

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

Onde T é a temperatura em kelvin, que pode ser adquirida a partir da temperatura em graus centrígrados (ºC) somando-lhe 273,15 como indica a expressão:

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

Para uma temperatura do ar de 20º C a velocidade do som é de 343,2 m/s e para uma temperatura de 0 ºC é 331,3 m/s [1].

2.2.3. NÍVEIS

As grandezas pressão, intensidade e potência sonoras, no domínio da acústica, são expressas em termos dos seus níveis correspondentes. Trata-se de uma passagem de progressão aritmética de números para uma progressão geométrica que permite reduzir a escala de valores absolutos correspondente e à qual ouvido humano reage com uma relação semelhante. Esta passagem considera valores de referência que têm a ver com a sensação auditiva do estímulo sonoro.

Assim, a nova escala terá como unidades o decibel (dB) que é um décimo do *bel* [unidade que surgiu em honra do cientista americano Alexander Graham Bell, ao qual se atribuiu, até 2002, a invenção do telefone].

O valor mínimo aproximado da variação de pressão sonora perceptível por um ser humano jovem é 10^{-5} Pa designado *limiar da audição*. Foi então que se estabeleceu uma pressão sonora de referência de $2x10^{-5}$ Pa que corresponde ao valor de 0 dB [3].

O valor máximo de referência, a partir do qual a sensação auditiva passa de ruído a dor, designadamente *limiar da dor*, é cerca de 100 Pa que corresponderá a 134 dB.

Para cada nível existe um valor de referência como se mostra a seguir:

- Nível de pressão sonora:

$$L_P = 20\log\frac{p}{p_0} \text{ ou } L_P = 10\log\frac{p^2}{p_0^2}\,(\text{dB}) \quad (2.3)$$

Em que *p* significa a pressão sonora, em pascal [Pa], p_0 a pressão sonora de referência, $2x10^{-5}$ Pa.

- Nível de Intensidade sonora:

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

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

- Nível de potência sonora:

$$L_w = 10\log\frac{W}{W_0}\,(\text{dB}) \qquad (2.5)$$

Sendo W_0 a potência sonora de referência igual a 10^{-12} W.

Estes níveis podem ser somados desde que se tome em atenção o facto a conversão para *decibel*, ou seja, aplicando as regras matemáticas respeitantes a logaritmos que resultam na expressão:

$$L_{soma} = 10\log\sum_{i=1}^{N} 10^{\frac{Li}{10}}\,(\text{dB}) \qquad (2.6)$$

2.2.4. Intensidade e Potência Sonora

A intensidade e potência sonora são grandezas importantes para a análise da propagação sonora.

A primeira, intensidade sonora, refere-se à percepção da amplitude da onda sonora. Permite dar uma noção, por parte do receptor, se o som é "fraco" ou "forte". Deste modo, varia consoante a distância a que o receptor está da fonte.

A potência sonora é a energia acústica total emitida por uma fonte por unidade de tempo, medida em watt (1 W = 1 J/s) [4].

Estas duas grandezas encontram-se relacionadas pela seguinte expressão (2.3).

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \qquad (2.7)$$

Onde:

- I - Intensidade sonora [dB]
- W - Potência sonora [W]
- r - Distância à fonte [m]

Na Figura 2.2 é possível observar a inter-relação entre potência (*W*) e intensidade (*I*) ao longo da distância *r*.

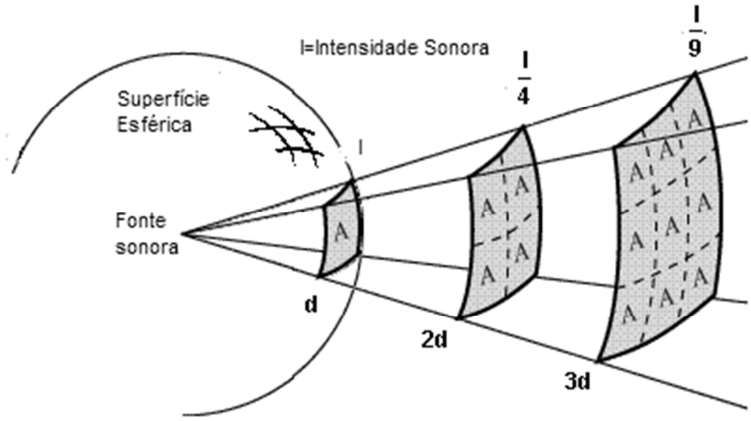


Figura 2.2 - Intensidade sonora de uma fonte pontual em função da distância [5].

Pela observação da fórmula (2.3) e da Figura 2.2 verifica-se que mesma quantidade de energia é dispersada por uma área 4 vezes maior cada vez que se duplica a distância da fonte. Esta divergência geométrica é a principal causa da atenuação do som ao longo da distância.

Como a intensidade é proporcional ao quadrado da pressão sonora, pode-se dizer que a pressão sonora perde 6 dB cada vez que é duplicada a distância da fonte [6]. A unidade "dB" é apresentada no ponto seguinte.

2.3. ANÁLISE DE SOM EM FREQUÊNCIA

2.3.1. DEFINIÇÕES E UNIDADES

A frequência é a segunda característica mais importante de um som. A unidade da frequência é o *hertz* (Hz) e representa número de oscilações por segundo que as ondas sonoras executam, isto é, número de flutuações de pressão por segundo.

Todos os sons, excepto os sons puros/simples, contêm mais do que uma frequência. Um exemplo prático muito próximo de um som puro, possuindo uma só frequência, é o som de um diapasão (transmitindo geralmente a nota Lá, a 440 Hz) (Figura 2.3).

Exemplo de sons complexos são quase todos os sons constatados diariamente, mas pode-se mencionar o exemplo do som de um piano. O som de uma música tocada pelo piano trata-se de um som bastante complexo uma vez que é uma sobreposição de sons compostos por várias frequências em muitas gamas distintas.

Há também sons que possuem uma predominância de uma determinada gama de frequências. É o exemplo do som de um barco em que o seu soar grave é explicado pela predominância de baixas frequências. Relativamente aos instrumentos musicais, alguns emitem preferencialmente nas baixas frequências como a tuba, ou nas altas como o flautim.

Em suma, com a intensidade sonora e frequência é possível caracterizar muitos sons do quotidiano. A Figura 2.4 ilustra a posição de alguns sons do quotidiano no que respeita ao seu enquadramento nestas

propriedades mais importantes.

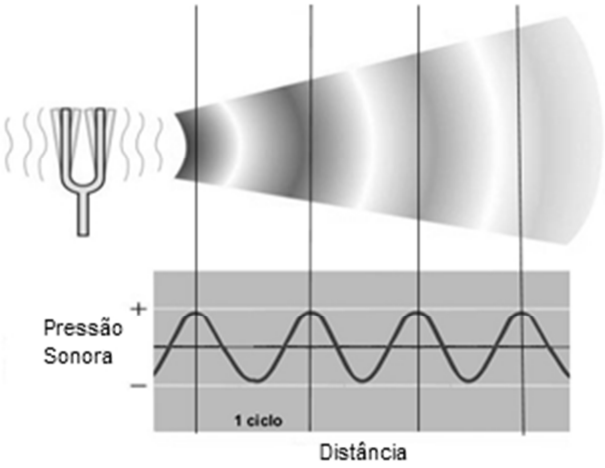


Figura 2.3 - Verificação de um som próximo de um som puro através do funcionamento de um diapasão [4].

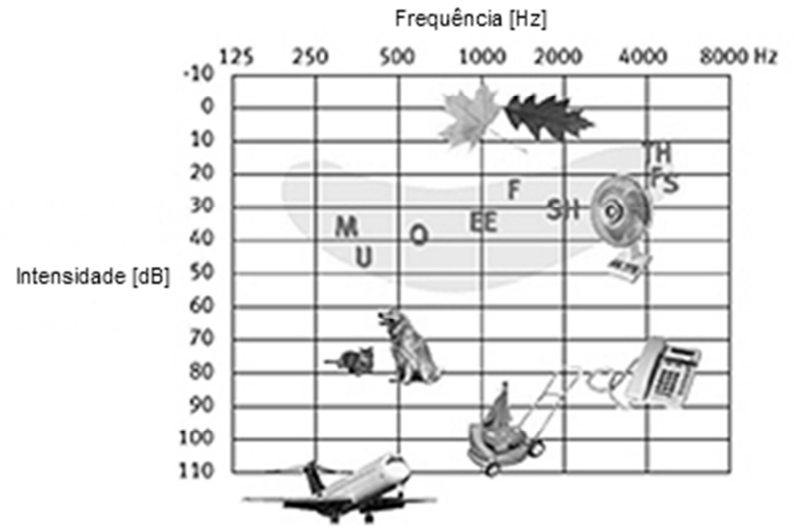


Figura 2.4 - Posição de alguns sons do quotidiano relativamente à intensidade sonora e frequência [7].

O ser humano ouve (quando saudável e jovem, no auge da sua capacidade auditiva) entre os 20 e 20 000 Hz aproximadamente.

É apropriável no domínio da Acústica de Edifícios a utilização de três zonas de frequências:

- Frequências graves: 20 a 355 Hz;
- Frequências médias: 355 a 1410 Hz;
- Frequências agudas: 1410 a 20 000 Hz.

2.3.2. Bandas de Frequência

Designa-se por banda de frequência o domínio de frequências compreendido entre dois limites [6]. Este agrupamento surgiu para uma melhor trabalhabilidade de dados em frequência. Assim as bandas

de frequência possuem um limite inferior (f_1) e um limite superior (f_2). No centro tem-se f_0, denominada, frequência central.

À diferença entre o valor superior (f_2) e valor inferior (f_1), dá-se o nome de largura da banda (B).

$$B = f_2 - f_1 \qquad (2.8)$$

O valor de f_0 (frequência central) pode ser determinado pela expressão (2.9).

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \qquad (2.9)$$

Dependendo da largura da banda surgem as definições de bandas de 1/1 oitava, 1/3 de oitava, 1/12 de oitava, etc. Os intervalos de uma oitava normalizados no domínio audível são os centrados em 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz. Por sua vez os intervalos de 1/3 oitava centram-se em 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 [3].

A forma mais conveniente de aplicar estes intervalos depende de cada caso. Por exemplo, no caso da avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído em locais de trabalho usa-se geralmente as bandas de 1/1 oitava com uma gama estendida dos 63 Hz aos 8 kHz. Na acústica de edifícios, só se usam habitualmente as dezasseis bandas de terço de oitava dos 100 aos 3150 Hz. Em casos excepcionais (ou em Laboratório) alarga-se esta banda dos 50 Hz aos 5 kHz.

2.3.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO

O ouvido humano não percebe com total fidelidade toda e qualquer frequência do som, isto é, dá maior ou menor importância ao som conforme a frequência em que é emitido. De forma geral, é muito mais sensível para frequências na zona dos 2300 aos 2800 Hz e é muito pouco sensível para baixas ou muito altas frequências. Mas esta sensibilidade depende da intensidade sonora do próprio som [3].

É deste modo que surgem as curvas de igual percepção auditiva subjectiva que são numericamente escalonadas com a unidade designada *fone* e que são ilustradas na Figura 2.5. A curva a tracejado representa o limiar da audição.

De forma a exprimir esta particularidade humana faz-se uma correcção que permita equivaler a sensibilidade de equipamentos (como por exemplo o microfone) à sensibilidade humana. Para essa correcção recorre-se ao uso de filtros electrónicos nos aparelhos de medida que corrigem os valores rastreados. Surgem assim as curvas de ponderação representadas na Figura 2.6.

Tendo em conta a "imperfeição" do ouvido humano para a captação de frequências, geralmente aplica-se o filtro A, à gama de frequências obtida por um dispositivo electrónico, para se obter a percepção humana a determinado conjunto de sons. A curva de ponderação B foi pensada para medir sons de nível intermédio (55-85 dB), e é baseada na curva dos 70 *fones*. A ponderação C foi idealizada para medir sons muitos intensos (85-150 dB), para medir o nível de saída de altifalantes, ou, por vezes, quando se usa o sonómetro para calibração de outros aparelhos [6].

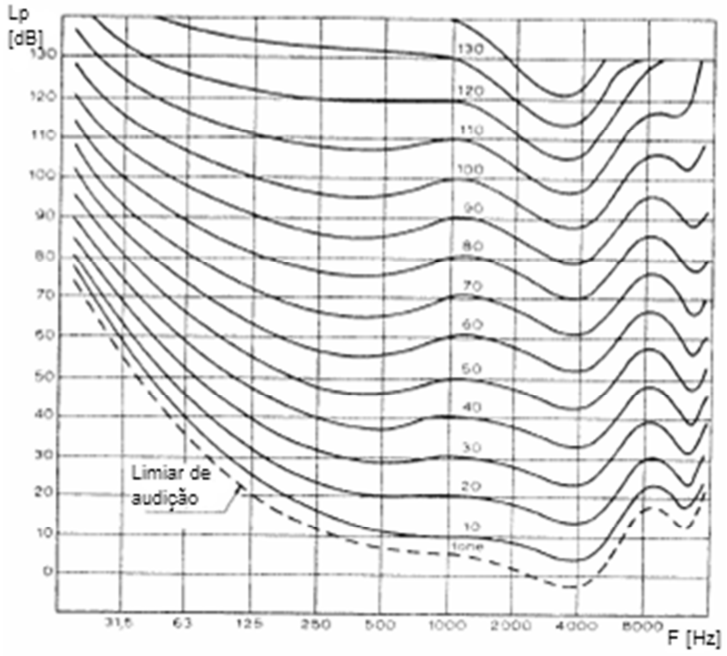


Figura 2.5 - Curvas de igual nível de intensidade audível pelo ouvido humano (expressos em *fone*) [6].

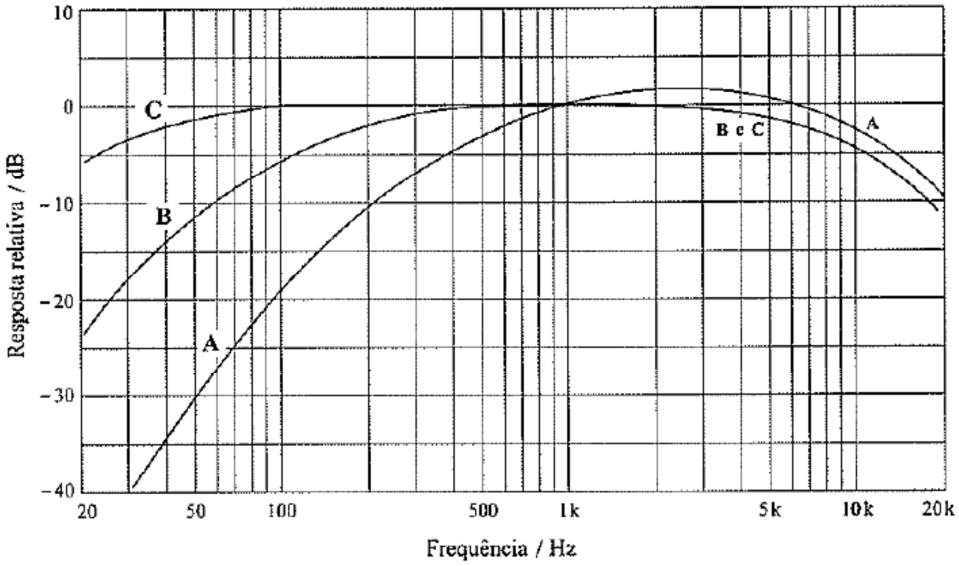


Figura 2.6 - Descrição das curvas de ponderação A, B, C e D [4].

2.4. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

2.4.1. ABSORÇÃO SONORA

Quando as ondas sonoras se propagam sofrem uma atenuação devido ao próprio meio que atravessam [6].

Essa atenuação depende das condições que encontra: temperatura, humidade etc. De notar que esta atenuação não é a atenuação devida à divergência geométrica (apresentada no ponto 2.2.4).

A absorção sonora pode ocorrer no ar onde as ondas sonoras se propagam ou nos materiais onde aquelas incidem. O seu parâmetro de medida é o coeficiente de absorção sonora (α) e pode ser dado pela expressão (2.10).

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} \qquad (2.10)$$

Onde I_a é a intensidade absorvida e I_i a intensidade incidente.

O coeficiente de absorção sonora varia entre 0 e 1. Teoricamente é 0 se toda a energia for reflectida e é 1 se toda a energia foi absorvida.

Verificou-se que a absorção sonora dos materiais varia em função da frequência, mas dada a complexidade de trabalhar com valores da absorção sonora por frequência, surgiram indicadores que permitem caracterizar por um só número a absorção sonora global de um dado material:

- NRC – Média aritmética dos coeficientes de absorção nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz [3];
- α_w – Ajuste ponderado, através de uma curva de referência, usando as bandas de oitava dos 250 Hz aos 4000 Hz, procedimento normalizado [3].

2.4.2. CASO PARTICULAR DOS ESPAÇOS ACOPLADOS

Em espaços acoplados verificou-se que o coeficiente de absorção sonora apresenta particularidades. Entende-se por espaços acoplados dois espaços adjacentes com uma grande área aberta entre eles, como uma boca de palco e que possuem características acústicas distintas [3].

Uma fórmula mais específica para determinar o coeficiente de absorção sonora nestes espaços é a fórmula de Carvalho (1994) usada nas igrejas e é dada pela expressão (2.11).

$$\alpha_{ig} = \tanh\left(a \cdot \left(I \diagup w - b\right)\right) \qquad (2.11)$$

Em que *l* e *w* são as medidas indicadas na Figura 2.7 e *a* e *b* são os parâmetros referidos no

Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Valores das constantes a e b [3]

Situação	*a*	*b*
Capelas (1)	0,007	0
Altar principal (apse) (1)	0,985	0,6
Corredores laterais (2)	0,0118	-14

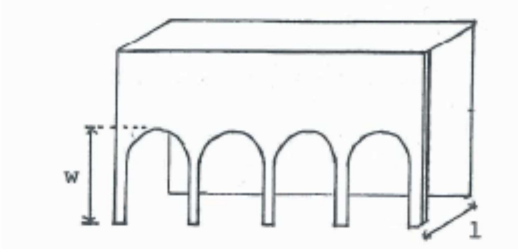


Figura 2.7 – Esquema de corredor lateral em igreja [3].

2.4.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação está associado às reflexões. Uma reflexão acontece quando as ondas sonoras encontram um obstáculo de grandes dimensões em relação ao comprimento de onda da fonte. É o caso de uma parede. A onda sonora reflecte-se como se fosse originada uma "imagem", situada a uma distância da superfície reflectora igual à distância da fonte real [6]. Após encontrarem uma superfície, as ondas reflectidas mudam de sentido, como se pode visualizar na Figura 2.8.

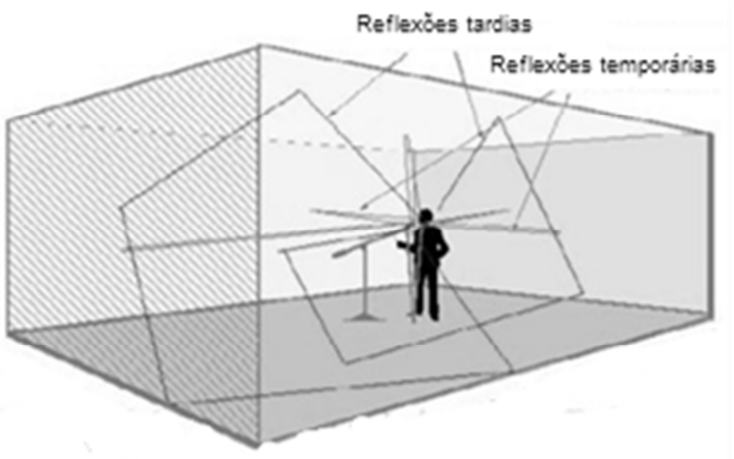


Figura 2.8 - Esquema de reflexão de ondas sonoras num espaço fechado de um edifício [8].

Assim, de forma a quantificar o efeito das reflexões num espaço fechado em termos acústicos, tem-se o Tempo de Reverberação (TR). Este parâmetro acústico é definido como sendo o tempo necessário para que o nível de pressão sonora seja atenuado em 60 dB, após a interrupção da emissão do som pela fonte [9]. Este parâmetro pode ser previsto segundo a expressão (2.12).

$$TR = \frac{0{,}16 \cdot V}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^{m} A_j + mV} \qquad (2.12)$$

em que:

- V - volume da sala [m^3];
- α_i – coeficiente de absorção sonora;

- S_i – superfície [m^2];
- A_j – absorções sonoras localizadas [m^2];
- m – absorção sonora do ar [m^{-1}].

2.4.4. RUÍDO DE FUNDO E CURVAS DE INCOMODIDADE

Os conceitos Som e Ruído dependem da percepção do ouvinte e por isso possuem um carácter subjectivo. O som é agradável e/ou contém informação útil para o auditor. Se o caso for de um estímulo sonoro desagradável e/ou sem informação para o ouvinte então trata-se de ruído.

Em Acústica de Edifícios o ruído de fundo é entendido como a resultante de todas as actividades exteriores que ajuda a mascarar os sons que o auditor pretende ouvir no local. Pode ser resultante de actividades exteriores como obras, tráfego, circulação de pessoas ou de equipamentos como AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), etc.

Deste modo tornaram-se necessários métodos para avaliar a incomodidade de um local interior. Para este fim surgiram as curvas de incomodidade que pretendem fazer esta avaliação face a ruído de fundo provocado por equipamentos. São exemplos as curvas *NC, NR, RC* e *NCB.*

As curvas *NC* (*Noise Criterion*) apresentam-se na Figura 2.9. Para atribuir uma classificação NC (por exemplo *NC-30*) recorre-se ao valor da menor curva *NC* que não é excedida por nenhum nível de pressão sonora por bandas de 1/1 oitava, ou seja, à tangente inferiormente ao espectro dos valores dos níveis de pressão sonora *L*.

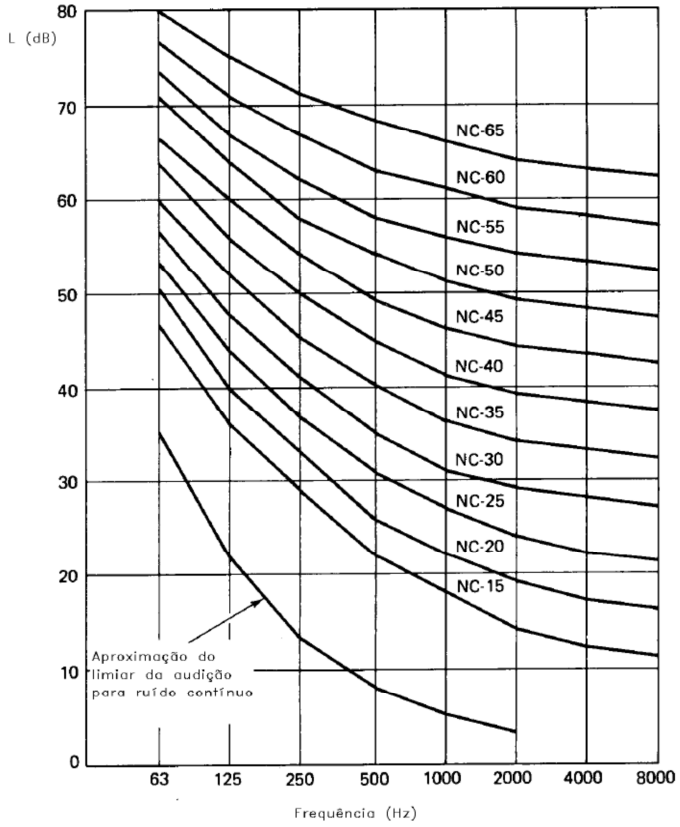


Figura 2.9 - Curvas de NC [10].

2.5. INTEGIBILIDADE DA PALAVRA

2.5.1. IMPORTÂNCIA

A integibilidade da palavra é um factor fundamental quando se trata da qualidade acústica de uma sala destinada à palavra. Traduz a maior ou menor facilidade em entender a palavra proferida no espaço.

A palavra, além do timbre característico de cada pessoa, varia em função da frequência, intensidade, duração e direccionalidade.

Relativamente à frequência, as consoantes são emitidas em frequências mais altas que as vogais. É o exemplo do som "u" nas palavras "tu" e "Sul" que possuem frequências entre 150-300 Hz. Enquanto o som "s" de "sábado" pode possuir cerca de 5 oitavas acima entre os 3500-7000 Hz [3].

No que diz respeito à intensidade, as vogais são emitidas com um nível de pressão sonora mais elevado que as consoantes. Esse acréscimo pode rondar os 21 a 28 dB.

Em termos de duração, as vogais são também mais "longas" que as consoantes em média uns 70 ms. Ora, se a acústica do espaço for deficiente (por exemplo por excessiva reverberação ou elevado ruído de fundo) a palavra pode tornar-se mesmo imperceptível tendo em conta estes factores.

2.5.2. AVALIAÇÃO

A integibilidade da palavra pode ser avaliada quer por métodos subjectivos quer por métodos objectivos.

Os métodos subjectivos podem ser realizados através de um inquérito que consiste num orador a ler uma lista de palavras e um grupo de auditores a registarem o que ouvem, conforme explicado nas teses "*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas por Parâmetros Subjectivos*" de António Morgado de 1996 [7] e "*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de carácter Subjectivo e Objectivo*" de Margarida Lencastre de 1998 [4].

Os métodos objectivos podem ser o *Articulation Index* (AI), o *SIL (Speech Interference Level),* o STI (*Speech Transmission Index*) e o RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

2.6. OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS

2.6.1. TEMPO DE DECAIMENTO CURTO (EDT)

O Tempo de Decaimento Curto (EDT-*Early Decay Time*) é semelhante ao TR, sendo feito no limite do decaimento entre 0 e -10 dB na curva integrada de Schroeder, em segundos, multiplicado por um factor 6, uma vez que 10 dB ocorre em um período de tempo brusco equivalente a um sexto do tempo requerido para 60 dB de decaimento, definido como tempo de reverberação [11].

2.6.2. TEMPO CENTRAL

O Tempo Central (TS) traduz o ponto no tempo onde a energia recebida antes é igual à que é recebida depois desse ponto [9]. Trata-se de um parâmetro acústico objectivo exprimido em milissegundos (ms). Em salas de concerto, para frequências médias (250 – 2000 Hz) é frequente ele ter uma posição entre 140 e 180 ms. É obtido pela relação matemática apresentada na expressão (2.13).

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \qquad (2.13)$$

2.6.3. CLARIDADE (C_{80})

O parâmetro Claridade (C_{80}), que pode particularmente ser aplicado à música, relaciona-se com o equilíbrio entre a clareza percebida e a reverberação. Deste modo, pode definir-se como o tempo de integração para a energia útil que chega ao ouvido 80 ms do som directo, dividido pela energia tardia total que chega após os 80 ms do som directo. É uma relação entre *Early/Late*.

No caso de ser aplicado à percepção musical, o intervalo de tempo é limitado em 80 ms, quando estiver relacionado com a palavra, o intervalo de tempo é limitado em 50 ms [3].

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t)dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t)dt} \qquad (2.14)$$

2.6.4. DEFINIÇÃO (D_{50})

Trata-se de um parâmetro acústico que se baseia na característica auditiva em que as reflexões atinjam o receptor até 50 ms, após a chegada som directo. Estas reflexões geralmente são consideradas benéficas pois fortalecem o som directo o que contribui para a audibilidade sem prejudicar a qualidade sonora [9].

Matematicamente é a razão entre a energia da resposta impulsiva que chega entre 0 e 50 ms e a energia total recebida. Trata-se de uma relação entre *Early* e *Total*, isto é, correlaciona com a inteligibilidade da palavra, comparando a energia do som direto somada à energia das reflexões úteis, com a energia total da resposta do impulso [3].

$$D = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t)\,dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)\,dt} \qquad (2.15)$$

2.6.5. RASTI

RASTI *(Rapid Speech Transmission Index)* é um método simplificado de calcular o STI *(Speech Transmission Index)* e varia entre 0 (nula integibilidade) e 1 (máxima integibilidade). O seu método de determinação consiste na utilização de um equipamento constituído por um emissor e receptor, conforme será apresentado no capítulo 5.

2.6.6. OUTROS

Naturalmente existem mais parâmetros acústicos que se podem usar para caracterizar um local. No entanto, nem todos são utilizados frequentemente. Uns foram excluídos desta breve análise porque o seu uso não é indispensável para a caracterização dos espaços em estudo, outros, pela dificuldade de

acesso a equipamento próprio para a sua medição.

2.7. CORRECÇÃO ACÚSTICA

Estando a correcção acústica intimamente relacionada com a absorção sonora torna-se indispensável abordar os materiais e sistemas absorventes sonoros usualmente adoptados para edifícios. Estes podem ser associados em três categorias em função das suas características básicas:

- Porosos e fibrosos;
- Ressoadores;
- Membranas.

Estas três categorias actuam em gamas distintas de frequências, ou seja, os materiais porosos e fibrosos actuam mais eficazmente nas altas frequências, os ressoadores nas médias e as membranas nas baixas (Figura 2.10).

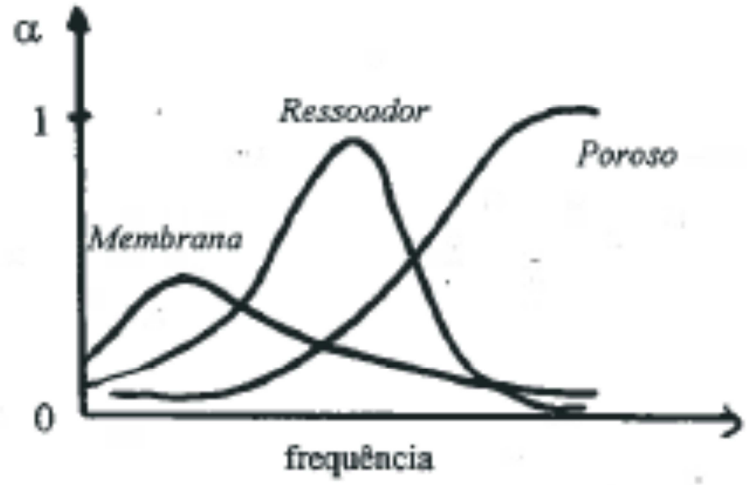


Figura 2.10 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais absorventes [3].

A eficácia dos materiais porosos e fibrosos nas altas frequências tem a ver com o facto do seu mecanismo de absorção ser à base da existência de poros e interstícios. A espessura e densidade destes determinam o grau de eficácia de um material poroso e fibroso. Se as fibras foram muito afastadas e soltas pouca energia é perdida sob a forma de calor. Por outro lado se estas estiverem muito concentradas o som não penetra no material e não há fricção suficiente para ser eficaz. Os bons materiais sonoros absorventes possuem as fibras entre estes dois extremos.

Estes materiais podem ser agrupados tendo em conta as suas características físicas:

- Tecidos e alcatifas;
- Massas porosas (para projecção);
- Aglomerados de fibras de madeira;
- Fibras minerais (mantas e painéis);
- Materiais plásticos
    - Poliuretano expandido;
    - Poliestireno expandido;

  - Espumas flexíveis de poliuretano;
- Aglomerados de cortiça
  - Aglomerado negro;
  - Aglomerado composto.

Passando agora aos ressoadores, existem dois tipos fundamentais: isolados e agrupados. Os primeiros, também designados ressoadores de cavidade ou ressoadores de Helmholtz, são formados por uma cavidade de paredes rígidas tendo uma única abertura estreita, tipo garrafa. A frequência onde a sua eficácia é máxima pode determinada pela expressão (2.16) onde *c* é a celeridade [m/s], *S* a secção [m^2], *r* o raio [m], *l* o comprimento do gargalo [m] e *V* o volume da cavidade do ressoador [m^3].

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{V(l+1{,}6r)}} \qquad (2.16)$$

Os ressoadores agrupados são os mais utilizados dentro deste sistema. Tem-se como exemplos destes sistemas os painéis perfurados metálicos ou de madeira que costumam ser utilizados em tectos falsos ou paredes Figura 2.11.

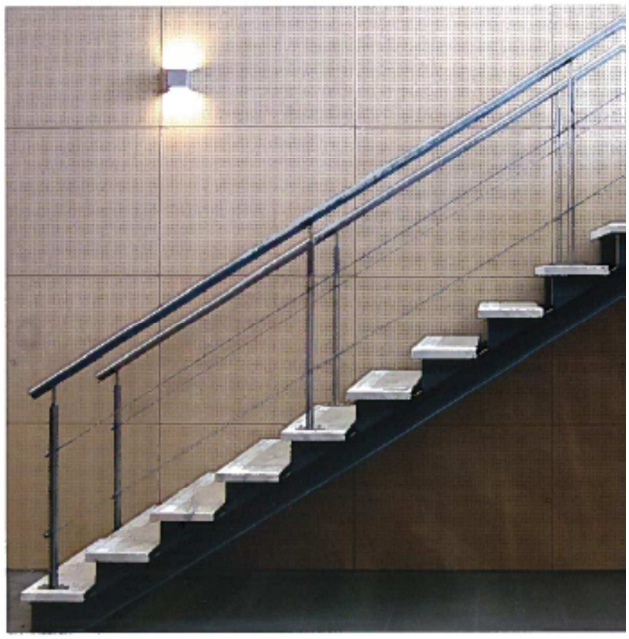


Figura 2.11 – Exemplo de ressoadores agrupados – painéis perfurados em madeira [12].

A frequência máxima, f (Hz), de um determinado tipo de ressoadores agrupados é dada pela expressão (2.17), onde *c* [m/s] é a celeridade, *P* (%) a percentagem de área furada, *e* [cm] a espessura da placa perfurada, *r* [cm] o raio de cada perfuração e *d* [cm] a largura da caixa-de-ar. A eficácia deste sistema aumenta com a taxa de perfuração, mas atinge um limite de 25%, pois a partir deste valor é o efeito da porosidade do material absorvente que controla o comportamento do painel.

$$f\,(Hz) = \frac{10c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{P}{(e+1{,}6r)\cdot d}} \qquad (\text{validade: } f \cdot d < 3400\,\text{Hz.cm}) \qquad (2.17)$$

Finalmente, os sistemas predilectos para actuar sob as baixas frequências são as membranas, também denominadas membranas ressonantes ou painéis vibrantes. O principal mecanismo de funcionamento é a perda de calor por fricção nas suas fibras quando o material entra em flexão. A sua frequência natural de vibração pode ser dada pela expressão (2.18), onde *m* é a massa superficial (kg/m^2) e *d* a espessura caixa-de-ar [m].

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho}{m\cdot d}} \cong \frac{60}{\sqrt{m\cdot d}} \qquad (2.18)$$

3

ESTUDO ACÚSTICO DE IGREJAS

3.1. ACÚSTICA DE IGREJAS - INTRODUÇÃO

As igrejas são um espaço muito particular de edifícios no que diz respeito à acústica. São edifícios concebidos para rituais e tradições de culto religioso, onde a transmissão de mensagens por meios sonoros é essencial.

Contudo, infelizmente, em muitas situações, estas necessidades acústicas funcionais não são consideradas nos projectos arquitectónicos. Idealmente, dada a função primordial de uma igreja, o projecto de acústica deveria "comandar" (ou pelo menos ser um assistente) do projecto de arquitectura, no sentido do resultado final responder a ambas. No entanto, ao longo da história da arquitectura em igrejas, na maioria dos casos, isto não aconteceu.

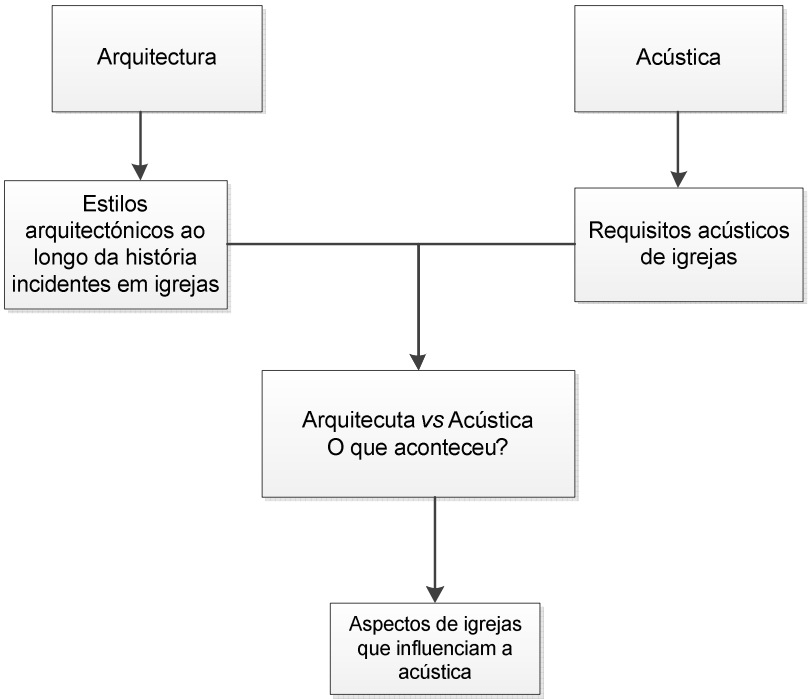


Figura 3.1 – Estrutura da abordagem do tema Acústica vs Arquitectura.

Assim, este capítulo pretende essencialmente descrever a influência da arquitectura na acústica de igrejas. Por outras palavras pretende-se relacionar os diversos estilos arquitectónicos com a acústica de igrejas tendo em conta os seus requisitos acústicos (Figura 3.1). Para tal, apresenta-se inicialmente um breve sumário dos estilos arquitectónicos ao longo da história (atribuindo especial atenção às igrejas). Seguidamente expõe-se alguns requisitos acústicos das igrejas, onde se atribui uma maior ênfase ao Tempo de Reverberação (por ser um parâmetro acústico predominante neste estudo). Finalmente analisa-se a influência dos estilos arquitectónicos na acústica de igrejas ao longo da história, tendo em conta a evolução cultural e religiosa no papel do espaço igreja. A completar o raciocínio apresentam-se alguns aspectos que devem ser tidos em conta em igrejas uma vez que se comprometem com a acústica.

3.2. AS IGREJAS AO LONGO DOS ESTILOS ARQUITECTÓNICOS

Desde o ínico dos tempos que a Arquitectura esteve presente nas construções dos edifícios. Sendo uma forma de manifestação de Arte, os autores constituíram-na como condição essencial a ter em conta na concretização de qualquer edificação.

Em seguida faz-se um breve sumário de oito estilos arquitectónicos predominantes ao longo da história. São eles, cronologicamente: Visigótico, Românico, Gótico, Manuelino, Renascimento, Barroco, Neoclassicismo e Contemporâneo.

O estilo **Visigótico** apareceu a meados do séc VI, propagando-se para os dois séculos seguintes. O arco em ferradura; a planta cruciforme de basílicas e igrejas, abside rectangular exterior; uso de colunas e pilares com capitéis coríntios de desenho particular; abóbodas com cúpulas nos cruzamentos; paredes em blocos alternando com tijolos; decoração com motivos vegetais e animais das igrejas são algumas características deste estilo arquitectónico. Dos poucos exemplares sobreviventes da arquitectura visigótica em igrejas do século VI em Portugal podem-se referir: a Capela de São Frutuoso (Braga), Igreja de São Pedro da Lourosa (Oliveira do Hospital e a Igreja de São Gião na Nazaré (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Igreja de São Gião na Nazaré [13].

Posteriormente surge o estilo **Românico**, na Europa, no séc. X que evoluiu para o estilo gótico no fim do século XII. Caracteriza-se por construções austeras e robustas, com paredes grossas e minúsculas janelas, cuja principal função era resistir a ataques de inimigos. Sob o ponto de vista interior,

destacam-se os arcos de volta perfeita, tectos em abóbada de pedra ou de madeira, gigantes contrafortes para sustentar o peso dos tectos, planta em cruz latina e a pedra como material de construção. São exemplos desta influência estilística a Igreja de Bravães (Ponte da Barca), Igreja de São Martinho de Cedofeita (Porto), Igreja de São Pedro de Rates (Póvoa de Varzim), Igreja de são Pedro de Roriz (Santo Tirso) e a Sé Velha de Coimbra (Figura 3.3), cuja construção data do século XI.



Figura 3.3 – Sé Velha de Coimbra [Foto da autora].

Após o românico surge o período **Gótico**, séc. XII – séc. XV, que se manifestou sobretudo nas estruturas de igrejas, catedrais e abadias através da grandiosidade dimensional presente na arquitectura gótica. As principais características do estilo arquitectónico são os arcos em ogiva e a abóbada de cruzaria, o arcobante (elemento que suporta a impulsão da abóbada). A arquitectura gótica manisfesta-se com paredes mais leves e finas, menos contrafortes, muita luminosidade, telhados das torres em forma de pirâmides, complexidade decorativa e com a planta em cruz latina. Geralmente, a fachada das estruturas góticas busca seguir a verticalidade e a leveza e no interior e um ambiente iluminado onde se visualiza o emprego da rosácea. O estilo gótico ficou marcado em muitas catedrais europeias. Entre igrejas portuguesas correntes deste estilo evidenciam-se a Igreja Leça do Bailio (Matosinhos), a Igreja de Cête (Paredes) (Figura 3.4), a Igreja Matriz de Caminha, e a Igreja do Salvador (Paço de Sousa).

O Estilo **Manuelino,** por vezes também chamado de gótico português tardio, desenvolveu-se no reinado de D. Manuel I e prosseguiu após a sua morte. Esta corrente opunha-se à arquitectura ao modo antigo ou ao romano, constituindo uma variação portuguesa do Gótico final. É influenciada pela Era dos Descobrimentos de onde resultam alguns elementos marítimos. Entre características construtivas têm-se uma complexidade decorativa (presença de elementos florais e vegetais), paredes exteriores e interiores praticamente sem ornamentação, concentrando-se esta em elementos estruturais como portais, pilares, arcos etc, abóbada de nervura e exuberância das formas. São exemplos de igrejas portugueses correntes deste estilo a Igreja Matriz da Golegã (Porto), o Mosteiro de Grijó (Porto), a Igreja Matriz de Mértola, Igreja Matriz de Vila do Conde (Figura 3.5) e a Igreja de São Francisco (Évora).



Figura 3.4 – Igreja de Cête (Paredes) [Foto da autora].



Figura 3.5 – Interior da Igreja Matriz de Vila do Conde [14].

A arquitectura **Renascentista (ou Renascença)**, durante os séculos XIV, XV e XVI caracteriza-se por ser um momento de ruptura na História da Arquitectura em diversas esferas: nos meios de produção da arquitectura; na linguagem arquitectónica adoptada e na sua teorização. O Classicismos e o Humanismo (principais temas de inspiração), a procura do ideal de perfeição, o retorno aos conceitos da Antiguidade Clássica (Beleza), o Homem como centro do Universo são aspectos pelos quais esta arquitectura se rege. Em Portugal, as formas clássicas difundir-se-ão apenas durante um breve período, sendo substituídas pela arquitectura manuelina, uma espécie de releitura dos estilos medievais e considerada por alguns como o efectivo representante do Renascimento neste país, ainda que prossiga uma estética distante do classicismo (insere-se, de facto, no Estilo gótico tardio). No entanto subsiste a Igreja da Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia) como exemplo desta arquitectura (Figura 3.6).

A arquitectura **Barroca** evidencia-se no séc. XVII e XVIII e é caracterizada pela complexidade na construção do espaço e pela busca de efeitos impactantes e teatrais, uma preferência por plantas axiais ou centralizadas, pelo uso de contrastes entre cheios e vazios, entre formas convexas e côncavas, pela

exploração de efeitos dramáticos de luz e sombra, e pela integração entre a arquitectura e a pintura, a escultura e as artes decorativas em geral. O revestimento a talha dourada, unicidade da nave, e profundidade da capela-mor são aspectos usufruídos nesta arquitectura. Como exemplos portugueses de igrejas deste estilo arquitectónico têm-se a, o Mosteiro de Bustêlo (Penafiel) (Figura 3.7), a Igreja dos Clérigos (Porto), a Igreja de São Lourenço de Almancil (Loulé), Mosteiro de Tibães (Braga).

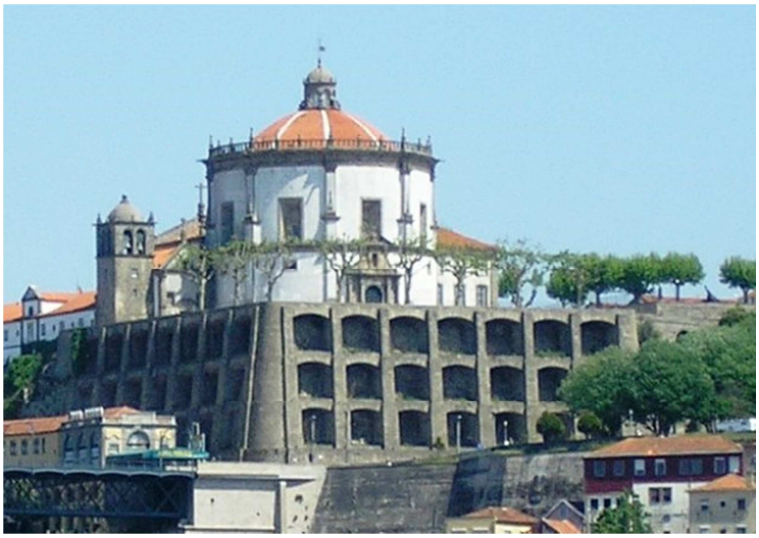


Figura 3.6 – Igreja Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia) [71].



Figura 3.7 – Mosteiro de Bustêlo (Penafiel) [15].

Enquanto a Europa assiste ao surgimento do gosto neoclássico, durante a segunda metade do século XVIII, Portugal tenta recuperar do catastrófico terramoto de 1755, durante o reinado de D. José, inventando a arquitectura pombalina, o que condiciona, logo à partida, o normal desenvolvimento do **Neoclassicismo** em Portugal. Esta recorre a princípios Clássicos adptando-os à realidade moderna. A pedra (mármore e granito) e a madeira como materiais construtivos, a abóbada de berço ou de aresta,

as cúpulas, frontões triangulares e formas regulares e simétricas são as principais características manifestadas pela arquitectura neoclássica. A Basílica da Estrela (Lapa, Lisboa) e a Igreja da Lapa (Porto) (Figura 3.8) são exemplos deste estilo arquitectónico.



Figura 3.8 – Igreja da Lapa (Porto) [Foto da autora].



Figura 3.9 – Igreja nova de Cedofeita (Porto) [Foto da autora].

O **Contemporâneo** em Portugal desenvolveu-se no séc XX. Esta arquitectura caracteriza-se por ser bastante variada e estruturas diversificadas possuindo algumas características como o betão ser o

principal elemento construtivo, decoração simples, sem grandes ornamentações e revestimentos, formas irregulares e assimétricas etc. São exemplos desta arquitectura a Igreja nova de Cedofeita (Porto) (Figura 3.9), a Igreja do Santíssimo Sacramento (Porto), Igreja de Santa Maria (Marco de Canaveses), Igreja da Seroa (Seroa) e a Igreja de N.ª Sr.ª da Boavista.

3.3. REQUISITOS ACÚSTICOS DE IGREJAS

3.3.1. INTRODUÇÃO

Uma boa acústica de igrejas caracteriza-se por conseguir que a mensagem pretendida chegue à audiência e ao mesmo tempo excluir o ruído supérfluo [16].

Numa igreja pretende-se que a palavra e a música (órgão e vozes) tenham boas condições acústicas, e em todos os espaços haja o silêncio suficiente para a reflexão e a oração. No entanto, estas duas actividades sonoras principais: palavra e música possuem características acústicas distintas, o que torna as igrejas como espaços complexos no respeitante à acústica. Por exemplo, os Tempos de Reverberação idealmente pretendidos para a palavra e para música são distintos. A maioria dos autores entende que a música "soa" melhor com um tempo de reverberação mais elevado que a palavra. Por outro lado a palavra requer um tempo de reverberação menor pois entende-se que um menor número de reflexões é favorável à integilidade da palavra, embora dentro de certos limites.

O subcapítulo seguinte pretende estabelecer o Tempo de Reverberação ideal para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, reunindo a informação de diferentes autores.

3.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO IDEAL

Everest, em *The Master Handbook of Acoustics* [17], apresenta alguns valores recomendados para o Tempo de Reverberação para diferentes espaços. A Figura 3.10 apresenta os valores ideais de tempo de reverberação em igrejas indicados por este autor.

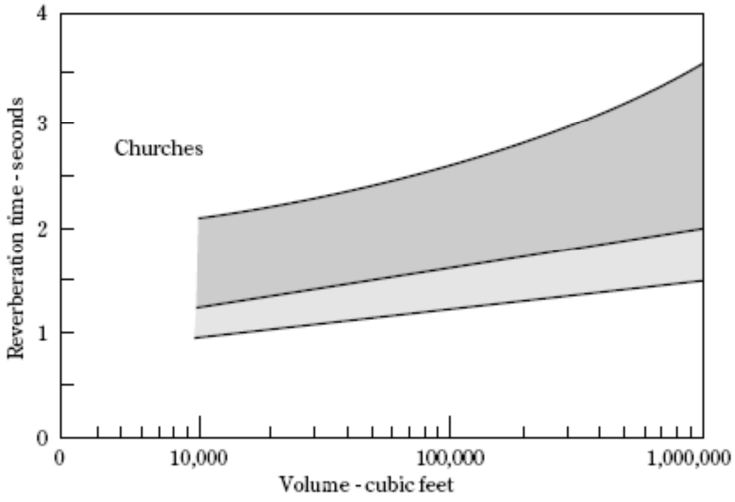


Figura 3.10 – Tempos de reverberação "óptimos" em igrejas. A área superior aplica-se a igrejas mais direccionadas para a música e catedrais, a área inferior aplica-se a serviços mais suportados na palavra. Um compromisso entre a música e o discurso é requerido na maioria das igrejas [17].

Uma vez que o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção tem um volume de cerca de 9855 m^3, isto é, 348026 ft^3, entende-se que o valor "óptimo", segundo este autor, se situa entre os 1,3 e 1,8 s, considerando apenas a área inferior para uma melhor integibilidade da palavra, ou atingir mesmo os 3,1 se o Santuário for considerado como igreja "litúrgica".

J. J. Sendra, em *Computational Acoustics in Architecture* [18], obtém um valor de Tempo de Reverberação que considera óptimo através da expressão (3.1).

$$T_{OP} = k \cdot u \cdot i \cdot V^{(1/3)} \qquad (3.1)$$

Na expressão (3.1), o coeficiente k varia em função da frequência, conforme apresentado no Quadro 3.1, o coeficiente *u* depende da função a que se destina a sala (palavra ou música), o coeficiente *i* depende da existência ou não de sistema de amplificação sonora e *V* refere-se ao Volume da igreja [m^3].

Os valores indicados para cada frequência segundo Sendra encontram-se no Quadro 3.1, e o cálculo do Tempo de Reverberação para o caso da igreja em estudo encontram-se no Quadro 3.2.

Segundo este autor, tempo de Reverberação ideal para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção seria 1,3 - 1,5 s para a palavra e entre 1,4 – 2,0 s para a música variando, em ambas as actividades, a amplificação do sistema de som.

Quadro 3.1 – Parâmetros que entram no cálculo dos Tempos de Reverberação "óptimos" segundo Sendra [18].

***f* [Hz]**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
k	1,30	1,15	1,00	0,90	0,90	0,90
u (palavra)	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
u (música) mín.	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
u (música) max.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
i (c/ sist som)	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
i (s/ sist som)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Quadro 3.2 - Cálculo dos Tempos de Reverberação "óptimos" segundo Sendra para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

Cálculo do Tempo de Reverberação óptimo = $k \cdot u \cdot i \cdot V^{(1/3)}$							**TR [500-1k Hz]**
***f* [Hz]**	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	
TR (palavra) s/sist de som	2,1	1,8	1,6	1,4	1,4	1,4	**1,5**
TR (música) s/ sist de som min	2,2	2,0	1,7	1,5	1,5	1,5	**1,6**
TR (música) s/ sist de som max	2,8	2,5	2,1	1,9	1,9	1,9	**2,0**
TR (palavra) c/sist de som	1,8	1,6	1,4	1,2	1,2	1,2	**1,3**
TR (música) c/ sist de som min	1,9	1,7	1,5	1,3	1,3	1,3	**1,4**
TR (música) c/ sist de som max	2,4	2,1	1,8	1,6	1,6	1,6	**1,7**

Arthur Noxon, no artigo *Big Church Acoustics* [19], diz que o tempo de Reverberação óptimo para uma igreja tradicional católica pode ser calculado a partir do Volume [ft^3], a partir da expressão (3.2).

$$TR_{óptimo} = 0{,}45 \cdot (\log V - 1{,}0) \qquad (3.2)$$

Aplicando um Volume de 348026 ft^3, obtém-se um Tempo de Reverberação óptimo, segundo este autor, de 2,0 s para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

Manuel López, em *Acústica Arquitectónica Aplicada* [20], define também um Tempo de Reverberação óptimo que depende do uso, das suas dimensões, da natureza da fonte sonora, do tipo de obra musical e das frequências sonoras. A Figura 3.11 apresenta os Tempos de Reverberação correspondentes a recintos com boa acústica, na gama de frequências médias, sugeridos por este autor.

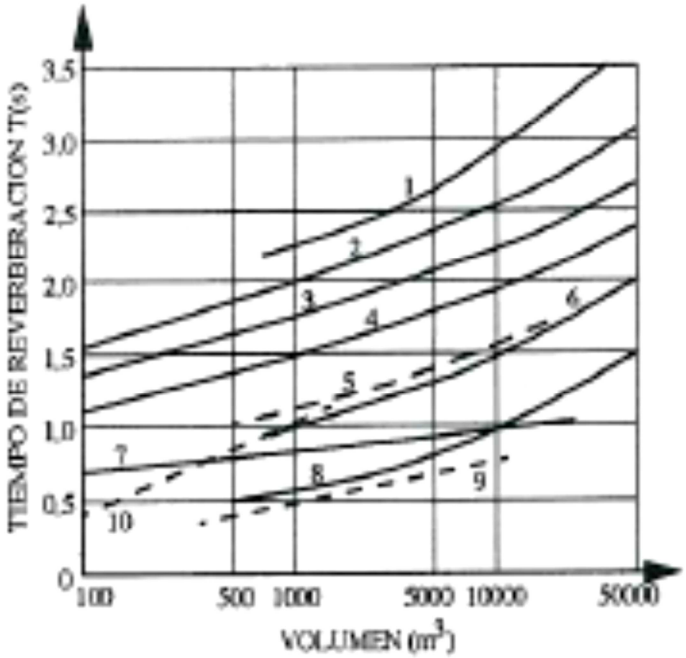


Figura 3.11 – Tempos de Reverberação óptimos [s] correspondentes a frequências médias em função do Volume [m^3] e do tipo de local (1- música religiosa, 2-salas de concerto para música orquestral, salas de concerto para música ligeira, 4-estúdios de concerto, 5-salas de baile, 6-teatros de ópera, 7-auditórios para palavra, 8-cinemas e salas de conferência, 9-estudios de televisão, 10-estúdios de rádio) [20].

Com a observação da Figura 3.11, integrando o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção no tipo 1 (música religiosa) e dado o seu Volume 9855 m^3, obtém-se um Tempo de Reverberação ideal de 2,9 s.

Como se pôde verificar até agora, alguns autores fornecem valores óptimos de tempo de reverberação em função do Volume da igreja. Mas esta análise não é consensual na literatura, veja-se que os autores Cavanaugh e Wilkes, em *Architectural Acoustics: Principles and Practice* [21], consideram simplesmente que o Tempo de Reverberção varia entre 1,4 s (mínimo para igrejas) podendo atingir valores mais altos como 3,4 s para Catedrais (Figura 3.12).

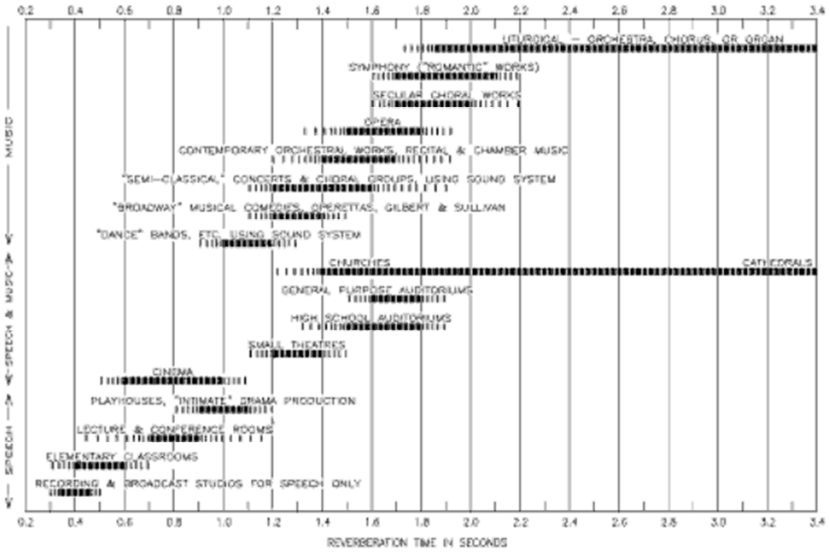


Figura 3.12 – Tempos de Reverberação ideais correspondentes a frequências médias segundo os autores Cavanaugh, Tocci e Wilkes em função do tipo de espaço [21].

A avaliação do tempo de reverberação ideal em função do Volume é susceptível de crítica uma vez que, se o tempo de reverberação é um indicador da qualidade acústica pretendida para um determinado local, este deve ser o mesmo independentemente do tamanho do espaço. No entanto, dado que os valores encontrados não são muitos díspares, entraram como valores de referência para este estudo.

O Quadro 3.3 apresenta o sumário dos Tempos de Reverberação ideais dos diferentes autores apresentados aplicados ao Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

Quadro 3.3 – Resumo dos Tempos de Reverberação ideais aplicados ao Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção de diferentes autores.

Autor	TR óptimo - palavra [s]	TR óptimo - música [s]
Everest [17]	1,3 e 1,8	3,1
Sendra [18]	1,3 – 1,5	1,4 – 2,0
Noxon [19]	2,0	2,0
López [20]	-----	2,9
Cavanaugh [21]	1,4 - 3,4	

Reunindo os valores de referência dos autores apresentados, e tendo em conta as circunstâncias da aplicação de cada um anteriormente mencionadas, considera-se que o Tempo de Reverberação adequado para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção situa-se entre os 1,5 e 3,0 s.

3.4. ARQUITECTURA *VS* ACÚSTICA

3.4.1. INTRODUÇÃO

Uma vez apresentado um sumário de oito estilos arquitectónicos ao longo na história da arquitectura e referidos alguns requisitos acústicos em igrejas, com maior enfâse no Tempo de Reverberação,

pretende-se agora dar a conhecer o resultado da associação destas duas vertentes: Acústica vs Arquitectura.

A tese "*Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*" de António Carvalho, de 1994 [22] apresenta um estudo que permite tirar algumas conclusões no que respeita ao desempenho acústico das igrejas com base no seu estilo arquitectónico.

Este estudo foi elaborado a 41 igrejas portuguesas, agrupadas consoante o seu estilo arquitectónico predominante, num leque de oito estilos diferentes. Os oito estilos arquitectónicos, colocados por ordem cronológica: Visigótico, Românico, Gótico, Manuelino, Renascimento, Barroco, Neoclassicismo e Contemporâneo.

Resultante do estudo supramencionado é o exemplo da evolução do Tempo de Reverberação e EDT ao longo dos estilos (Figura 3.13).

Pela visualização gráfica da Figura 3.13 verifica-se dois pontos de pior qualidade acústica dos estilos: Renascimento e o Neoclassicismo. Verifica-se por outro lado que as igrejas barrocas apresentam uma significativa qualidade acústica, constituída por Tempo de Reverberação e valores de EDT baixos. Esta característica acústica foi piorando à medida que se segue cronologicamente na história, pois posteriormente as igrejas neoclássicas e modernas apresentam características acústicas bastante graves em relação às igrejas barrocas.

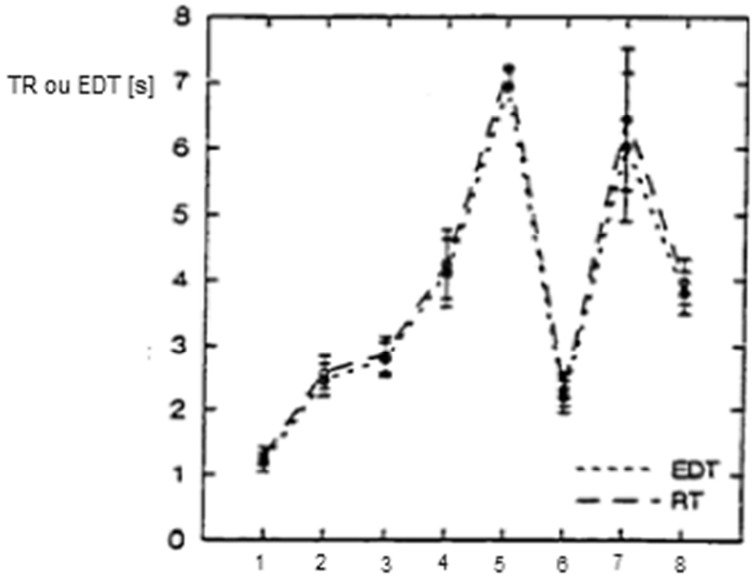


Figura 3.13 – Média de dados referente a Tempo de Reverberação e EDT em igrejas portuguesas vs estilos arquitectónicos ordenados da esquerda para a direita (1-Visigótico, 2- Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascimento, 6-Barroco, 7-Neoclassicismo, 8-Contemporâneo) [22].

Os alinhamentos rectos, as superfícies lisas, a arquitectura cúbica, o uso de materiais de acabamento à base de betão liso podem ser motivos que levaram ao mau desempenho acústico de igrejas modernas. O caso do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, será avaliado acusticamente no capítulo 5, de forma a integrá-lo nesta análise.

3.4.2. ACÚSTICA DE DIFERENTES TIPOS DE IGREJAS

3.4.2.1. Igrejas cristãs e medievais

Os primeiros cristãos reuniam-se em casas particulares (*domus ecclesiae*) ou em outros locais existentes, que, apesar de terem outras funções que não esta, possuíam tamanho adequado para esse fim. Só após o Édito de Milão, no ano 313, quando o Cristianismo foi favorecido pelo Imperador Constantino, e assim começou a ser proclamado abertamente, o número de devotos começou a crescer e aí começaram a ser construídas igrejas [18].

O modelo inicial para estas igrejas era baseado na basílica romana civil que tinha um plano longitudinal em forma de cruz. Esta forma em planta, além de altamente simbólica, mostrou-se ideal às aspirações da evangelização: o ensino religioso, a propagação da fé através da pregação, e a conversão de um elevado número de pessoas. Podem ser vistas duas partes fundamentais da planta basical: uma parte respeitante à "igreja de Deus", associada ao clero concebida pelo presbitério e outra respeitante à "igreja do povo", associada ao leigo, concebida pela nave [18].

As basílicas romanas e posteriormente cristãs continham o seu sistema estrutural à base de pórticos com telhados de madeira que transmitiam pequenas cargas e pressões. A única parte abobadada era a abside. A proporção harmoniosa e adequada favorecia a acústica interior assim como os telhados de madeira relativamente baixos e ausência de grandes secções de paredes reflectoras que fizeram da acústica nestas igrejas muito melhor do que se iria ver posteriormente nas igrejas românicas medievais e góticas.

Por vezes, o tecto da nave era de madeira horizontal, o que ajudava a difundir o som no seu interior, como é exemplo da Basílica de Santa Maria Maggiore (Figura 3.14) que é um exemplo sobrevivente destas primeiras igrejas.



Figura 3.14 – Interior da Basílica de Santa Maria Maggiore [23].

A passagem da igreja primitiva para a arquitectura românica surgiu lentamente. Aconteceram conflitos civis e perturbações no contexto medieval turbulento que levaram ao incêndio das vigas de suporte da cobertura em madeira de muitas igrejas. Assim, muitos construtores românicos optaram por tectos mais duráveis e resistentes ao fogo, baseados em estruturas feitas essencialmente de pedra, com tecto abobadado (Figura 3.15) [18].

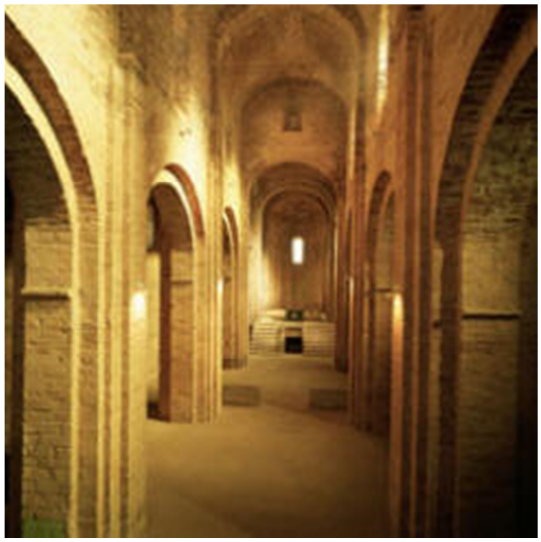


Figura 3.15 – Interior da Igreja de São Vicente de Cardona [24].

Esta nova concepção estrutural alterou fortemente as condições acústicas das igrejas cristãs para pior. As duras abóbadas de pedra da igreja medieval reflectiam muito mais o som piorando a acústica, contrariamente aos anteriores telhados em madeira.

Por outro lado, nas igrejas medievais, em contraste com as primeiras igrejas cristãs, a integibilidade da palavra não era um aspecto importante. Isto porque a língua litúrgica era o latim, que era incompreendido pelos fiéis na sua maioria. A antiga pregação era substituída por uma religiosidade mais natural baseada em mistério e as igrejas foram-se tornando lugares de templos sagrados para celebração de rituais solenes ao invés de espaços para reunião e participação dos crentes [18].

No entanto, apesar desta mudança acústica, a sonoridade das igrejas era muito apropriada para canto gregoriano. Os elevados tempos de reverberação faziam com que as notas se prolongassem mais, produzindo uma plenitude de som e uma sensação auditiva que não estavam presentes na melodia mas que surgiram devido à acústica reverberante do amplo espaço da igreja.

Mesmo assim, piores do que as igrejas românicas a nível acústico, foram as etéreas catedrais góticas que se seguiram depois. Caracterizadas por grandes volumes, grande altura da nave principal, grandes paredes interiores reflectoras e altas abóbadas, originavam não só o excesso de reverberação como por vezes ecos.

Foram introduzidas no período gótico as capelas laterais, posteriormente desenvolvidas na Renascença, que actuaram por vezes como ressoadores, contribuindo para a absorção e difusão. Aspectos que ainda eram mais acentuadas pela ornamentação geralmente utilizada nestas capelas.

Tirando estas excepções quase não havia absorção do som na catedral gótica, além da originada pela congregação, que nesse período ainda ficava de pé. Os bancos foram introduzidos pelos protestantes devido à morosidade dos seus serviços religiosos e a Igreja Católica começou a usá-los mais tarde.

Entretanto, no séc XII (final da idade Média) surgiu um número de ordens mendicantes que vieram acentuar uma maior espiritualidade da igreja através dos ideais de reforma e purificação. As duas ordens mais expressivas nesse período foram as dos Franciscanos e Dominicanos.

As ordens mendicantes não revelaram um tipo específico de construção, e as bases de construção dos seus templos eram resultado das tradições de cada lugar. No entanto, o seu espírito levou-os à

concepção das suas igrejas com dois objectivos principais: a liturgia e a pregação. Os Dominicanos estabeleceram limites dimensionais para as suas igrejas, nomeadamente para a altura da nave. Para os Franciscano a abside era a única parte abobadada. Muitas vezes os tectos das naves da igreja eram em madeira assentes em arcos transversais, no entanto, em muitos casos foram substituídos por abóbadas. Além disso, os franciscanos elegeram o modelo de nave única em substituição do modelo nave tripla anterior. Isto facilitava à congregação poder ver e ouvir o pregador.

3.4.2.2. Igrejas Renascentistas

Alberti e Brunelleschi foram os grandes autores da arquitectura do Quattrocento[1] (com principal centro na Toscana). Eles desenvolveram dois tipos principais de igrejas: um baseado num plano central e outro com planta longitudinal. O renascimento da arquitectura religiosa foi baseado nestes modelos [18].

Estas igrejas caracterizavam-se pelos tectos das naves em madeira, capelas laterais abobadadas e pela cúpula no cruzamento.

A horizontalidade sobre a crescente verticalidade do gótico, as proporções mais harmoniosas, o tecto em madeira na nave principal e ausência de grandes superfícies de parede reflectoras só triunfaram do ponto de vista da acústica.

Na segunda metade do século XVI, devido às decisões do Concílio de Trento (1545-1563) e à ideia da pregação como instrumento da Contra-Reforma, verificou-se a mudança forte no consenso sobre a acústica de igrejas.

As ordens mendicantes já tinham influenciado esta atitude, iniciada no século XIII e na arquitectura de certos movimentos de reforma dentro da Igreja durante a primeira metade do século XVI. A arquitectura destes movimentos baseava-se na simplicidade, senso comum e razão em vez da arquitectura tribunal (imperial) desenvolvida pelos tratados de renascentistas.

A Contra-Reforma católica e o Concílio de Trento fizeram com que fosse dada importância à integibilidade da palavra e até mesmo da música. Existem provas documentais que revelam a preocupação com a acústica na construção de igrejas por parte de algumas ordens religiosas, essencialmente os Jesuítas e Franciscanos, durante esse período, Fórmula Institui [26], Constituições da Companhia de Jesus [27], *Regulae Concionaorum* [28], *Canones Congregationum generalium Societatis Iesu* [29], *Compendium privilegiorum et gartiarum Societatis Iesu* [30] e *Tratado Breve del modo e predicar el Santo Evangelio in Tratado Espirituales - San Francisco de Borja* [31].
Esta preocupação é manifestada na igreja pela preferência de nave única com telhado em madeira (já adoptada com sucesso por algumas ordens mendicantes).

3.4.2.3. Igrejas Barrocas e Barroco tardio

A igreja barroca surge a partir da segunda metade do século XVI, quando os ideais reformistas de algumas ordens religiosas prevaleceram, fruto da personificação triunfante da Contra-Reforma católica.

Estas igrejas revelaram uma melhoria acústica em relação aos seus antecessores clássicos devido à sua

[1] Eventos culturais e artísticos do século XV em Itália, analisados em conjunto. Engloba tanto o final da Idade Média (arte gótica e gótico internacional), quanto o começo do Renascimento. Os artistas regressaram mais às formas clássicas da Grécia e Roma [25].

ornamentação. Esta, caracterizada por molduras, pilastras, entablamentos, cornijas, colunas e capitéis adornados com óvulos, grinaldas e contas, ajudava à difusão do som, sendo o efeito mais acentuado nos sons agudos. O mesmo sucede com estuques esculpidos, apliques de madeira, talha dourada, altares, órgãos, as portas interiores e outros móveis. Por outro lado, a opulência de capelas laterais, neste tipo de plano, difunde os sons mais graves [18].

Para muitos o barroco é exemplificado acima de tudo pela planta oval. É uma forma, com precedentes na segunda metade do século XVI e início do século XVII, é resultado de uma tentativa de conjugação entre as aspirações clássicas das igrejas com uma planta central com as necessidades estabelecidas no Concílio de Trento, que exigiu uma planta longitudinal [18].

Esta forma oval, mostrou-se útil a nível acústico por conseguir focalizar o som, tendo sido já proposta pelos Jesuítas e tornou-se no formato preferido para teatros de ópera.

Entretanto, no inicio do século XVII, em 1605, Kepler define a elipse como é conhecida hoje. Autor de *Phonurgia Nova* em 1609 [33] onde são apresentadas as três leis de Kepler que regem o movimento dos planetas, propiciou uma série de documentos e estudos sobre a reflexão de luz e som. Salienta-se, como exemplo desses estudos, *Phonurgia Nova* [34], publicado em 1673, da autoria do jesuíta Kircher, onde dá uma única representação gráfica que mostra que qualquer raio de som, com a sua origem no foco da elipse (neste caso, uma abóbada elipsoidal), depois de reflectido numa superfície, passa para outro foco (Figura 3.16).

A arquitectura destes arquitectos revelou-se muito apta quer do ponto de vista óptico, quer do ponto de vista acústico para música barroca, pelo que ainda hoje, estas igrejas são bem concebidas para a sua função.

Apesar da forma oval ter sido usada em muitas construções, não se mostrou adequada para grandes igrejas, nem possibilitava grande variação.

Os novos modos de expressão foram encontrados quando os arquitectos Borromini[2] e Guarini[3] apareceram com um novo dinamismo de espaços arquitectónicos à base de formas cõncavas e convexas. Estas formas só poderiam ter efeitos benéficos para a acústica das igrejas.

A ornamentação barroca especialmente para celebrações civis ou religiosas, festivas ou outras, foi algo que teve um impacto significativo na acústica das igrejas. Estas, caracterizadas por tapeçarias, veludos e damascos, juntamente com a profusa decoração da sala (como é por exemplo a talha dourada), o grande número de pessoas vestidas com roupas pesadas e fluidas só contribuía para o aumento a absorção do som nas igrejas, amortecer os ecos e as reverberações nas altas frequências [18].

[2] Francesco Borromini (1599 - 1667) foi um arquitecto barroco, que disputava, em seu tempo, as glórias de Grande Mestre com Gian Lorenzo Bernini. Ainda jovem mudou-se para Milão com o intuito de estudar arquitetura. Ao chegar a Roma (1619), mudou seu nome para Borromini e iniciou seu ofício trabalhando para Carlo Maderno, parente distante, na Basílica de São Pedro. Falecendo Maderno, em 1629, juntou-se ao grupo de Gian Lorenzo Bernini na conclusão das obras do Palazzo Barberini [36].

[3] Camilo-Guarino Guarini (1624 - 1683) foi um arquiteto do Barroco italiano, ativo não só em Turim como também em outros locais como a Sicília, França e Portugal. Foi também escritor e matemático, além de monge. Nascido em Módena, entrou para a ordem dos Teatinos em 1639, mudando para Roma. Em 1660 foi para Messina ser professor de matemática e filosofia. Escreveu vários livros sobre matemática, tanto em latim como em italiano, como Euclides adauctus, um trabalho sobre geometria descritiva, e Placita Philosophica defendendo o geocentrismo contra Copérnico e Galileu. Desenhou um grande número de edifícios públicos e privados em Turim, incluindo o palácio do Duque de Savóia, o Palazzo Carignano, a igreja real de São Lourenço, a maior parte da capela do Santissima Sindone (que abriga o Sudário de Turim) e muitas outras obras em Módena, Messina, Verona, Viena, Praga, Lisboa e Paris [37].

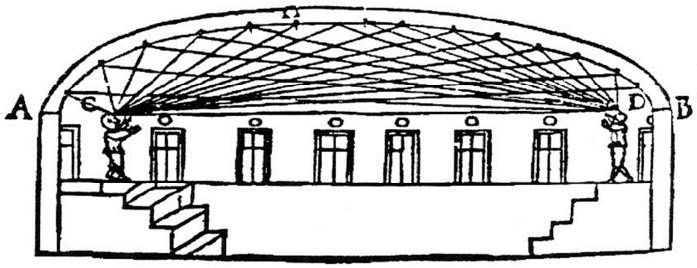


Figura 3.16 – Propriedade bifocal da elipse [32].

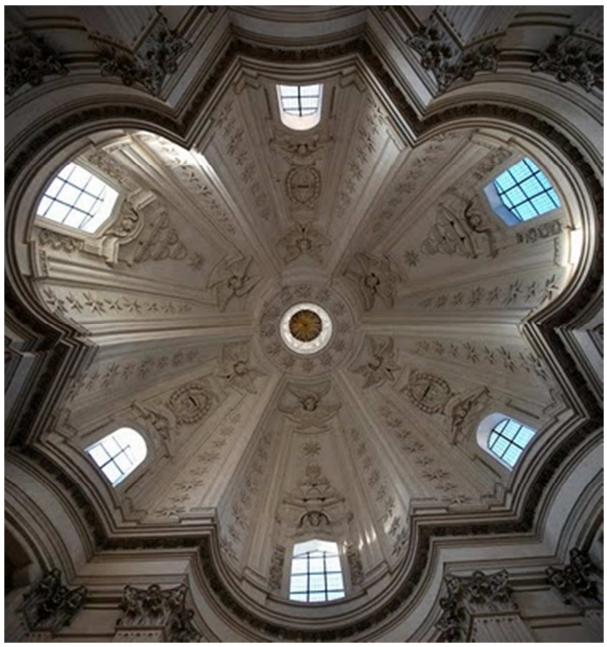


Figura 3.17 – Interior da Igreja de Santo'Ivo em Roma [35].

.

Aliás, as efémeras modificações das propriedades de absorção dos cortinados de forma a adequá-los às interpretações musicais e corais mantiveram-se nos anos seguintes e são algo que caracteriza a história do período barroco manifestado em igrejas (Figura 3.17).

3.5. ASPECTOS QUE INFLUENCIAM A ACÚSTICA DE IGREJAS

3.5.1. INTRODUÇÃO

Até ao momento foram apresentados alguns aspectos acústicos, arquitectónicos e a história/evolução da acústica das igrejas perante a sua arquitectura. Pretende-se rematar este capítulo abordando algumas características que podem ser encontradas em igrejas e que devem ser tidas em conta na acústica interior destes espaços.

3.5.2. SUPERFÍCIES CURVAS

Encontram-se algumas igrejas construídas com superfícies curvas ou secções planas criadas ao longo de um arco circular. As superfícies circulares criam um conjunto único e bastante problemático e a sua correcção requer um grande esforço de acústica e de materiais.

Descrevem-se dois problemas com a reflexão do som em superfícies circulares. É necessário ter em conta que o som propaga-se muito bem em superfícies curvas. Por outro lado, neste tipo de superfície o som segue a seguinte trajectória: após começar a partir de um ponto, dirige-se para outro à sua frente na curva, sendo depois reflectido de volta para o ponto inicial. Contrariamente, uma parede plana e tradicional não concentra o som, isto é, deixa-o continuar a expandir-se. Uma curva faz o oposto, concentra o som aumentando o número de reflexões e prejudicando a sua expansão[16].

3.5.3. GRANDES ESPAÇOS COM VIGAS

Uma grande sala proporciona muitos lugares sentados para pessoas, e são óptimos para uma grande congregação. No entanto salas de grandes dimensões estão normalmente associadas a tectos de grandes dimensões e estes necessitam de serem suportados, o que implica o uso de grandes vigas. As vigas de grandes dimensões podem ser um grande problema para as igrejas. Estas têm especial aptidão para capturar o som emitido e redireccioná-lo, na maioria dos casos, na direcção errada.

Quando o som se "prende" num par de vigas e percorre a sua extensão, o som entre as vigas torna-se muito "intenso". Deste modo, não é permitida a propagação do som em todo a sala.

Isto faz com que o som se acumule ao longo de um par de vigas, sendo "descarregado" no final das vigas quase tão "intenso" como quando começou. Este corredor com efeito de eco degrada a qualidade de som que chega à audiência, sobretudo situada perto das vigas [16].

3.5.4. ÓRGÃO DE TUBOS

Um instrumento quase sempre encontrado em igrejas é o órgão, eléctrico ou tradicionalmente de tubos. Musicalmente, o órgão de tubos é um instrumento que muda as notas muito lentamente, comparativamente a outros instrumentos. Assim, um órgão de tubos requer uma sala "lenta", com um longo tempo de reverberação. Pretende-se que o prolongamento do som da última nota seja misturado com os sons das notas seguintes. A música escrita para órgão geralmente inclui este prolongamento.

3.5.5. MÚSICA "POPULAR" EM IGREJAS

Um outro estilo de música frequente em igrejas é o estilo popular. Alguns exemplos possíveis são o acompanhamento por um guitarrista, ou a presença de um solista.

No entanto, as diferentes *performances* musicais necessitam de uma estratégia adequada. No caso dos instrumentos acústicos, a *performance* acústica não passa por impor maior potência sonora. O som deve ser projectado para fora dirigindo-se à assembleia. O som dos instrumentos acústicos necessita de uma reverberação elevada, de modo a permitir a propagação do som ("*live stage*") para a audiência. A superfície da "concha acústica" neste tipo de instrumentos, é essencial à projecção adequada. O uso de materiais inadequados, como o metal, confere uma característica artificial ao som. Os materiais à base de plásticos e fibras de vidro "abafam o som". Um material mais adequado é madeira o que justifica a sua utilização da construção de instrumentos acústicos.

Já os instrumentos eléctricos ("*rock*") funcionam de forma diferente, pois como dependem de um sistema de amplificação sonora, necessitam que o local de emissão contenha uma absorção maior ("*dead stage*").

4

SANTUÁRIO DE NOSSA SENHORA DA ASSUNÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA E DOCUMENTAL

A igreja do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, ou simplesmente, Santuário de N.ª Sr.ª Senhora da Assunção, (Figura 4.4 até Figura 4.8), situa-se no cume do Monte Córdova, em Santo Tirso (Figura 4.1 até Figura 4.3), e tem como principal proficiência a contemplação a Nossa Senhora de Assunção, a 15 de Agosto.

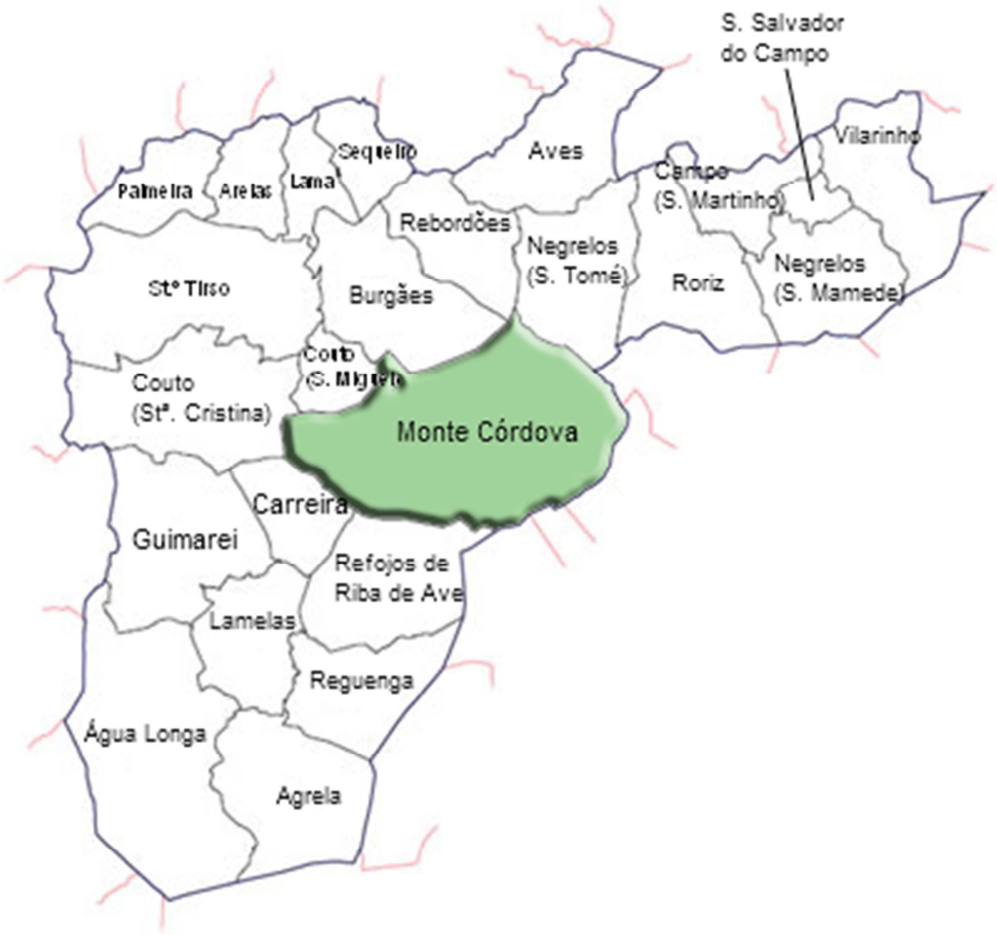


Figura 4.1 – Localização do Monte Córdova no mapa concelhino de Santo Tirso [38].

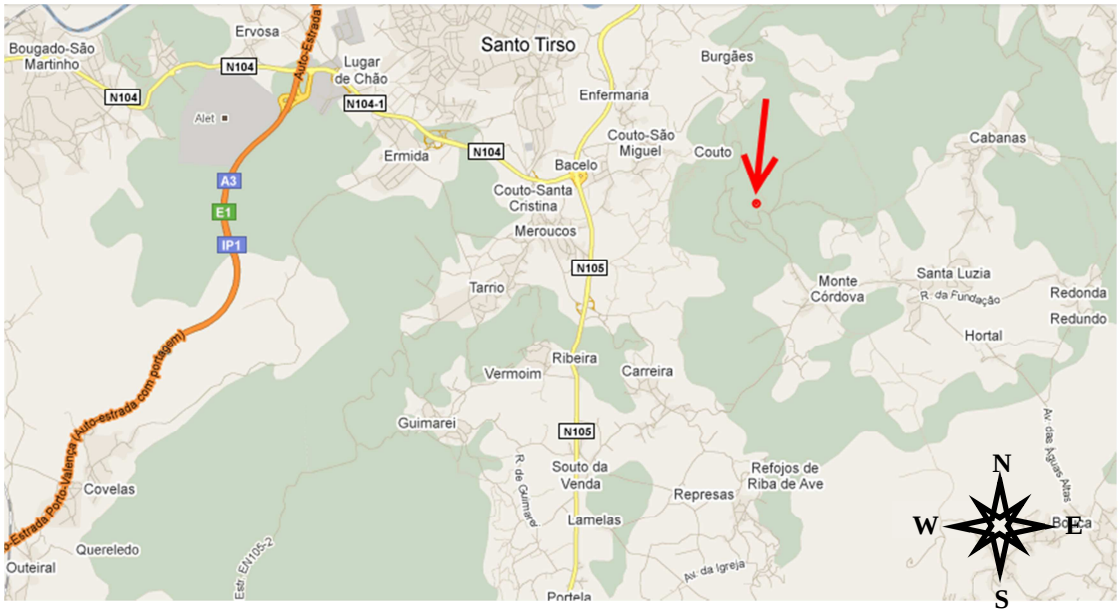


Figura 4.2 – Localização do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção (Santo Tirso) [39].



Figura 4.3 - Vista aérea da localização do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção (Santo Tirso) [39].

O Jornal de Santo Tirso, de 23 de Agosto de 1928 [40], apresenta um alçado correspondente ao projecto preliminar assim como um alçado do projecto definitivo do arquitecto Ernesto Korrodi para o referido Santuário (Figura 4.9). Lucília Costa, na obra *"Ernesto Korrodi 1889-1944 arquitectura, ensino e restauro do património"* [41], além de uma pequena ilustração do alçado frontal coerente com o apresentado no Jornal de Santo Tirso, fornece mais duas pequenas ilustrações dos projectos iniciais de Korrodi para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção: uma referente ao corte longitudinal (Figura 4.10) e outra respeitante à planta arquitectónica do projecto (Figura 4.11).



Figura 4.4 – Vista frontal noroeste do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora].



Figura 4.5 - Vista lateral sudoeste do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora].



Figura 4.6 – Vista este do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora].



Figura 4.7 - Vista lateral nordeste do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora].



Figura 4.8 – Interior do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, Monte Córdova, Santo Tirso [Foto da autora].

A construção do Santuário não seguiu na totalidade o projecto elaborado por Ernesto Korrodi. É um facto que é já mencionado com frequência nas obras deste arquitecto, constituindo talvez o maior defeito infeliz da sua carreira [41]. É possível constatar que as duas torres frontais do primeiro projecto não foram construídas, o que concedia ao templo outra grandiosidade e beleza (Figura 4.4 e Figura 4.9). A planta da igreja (Figura 4.11) parece ser semelhante à existente (Figura 4.20), no entanto, na gravura da obra de Lucília Costa não é possível discernir as dimensões da planta de modo a confrontá-la com o edifício actual.

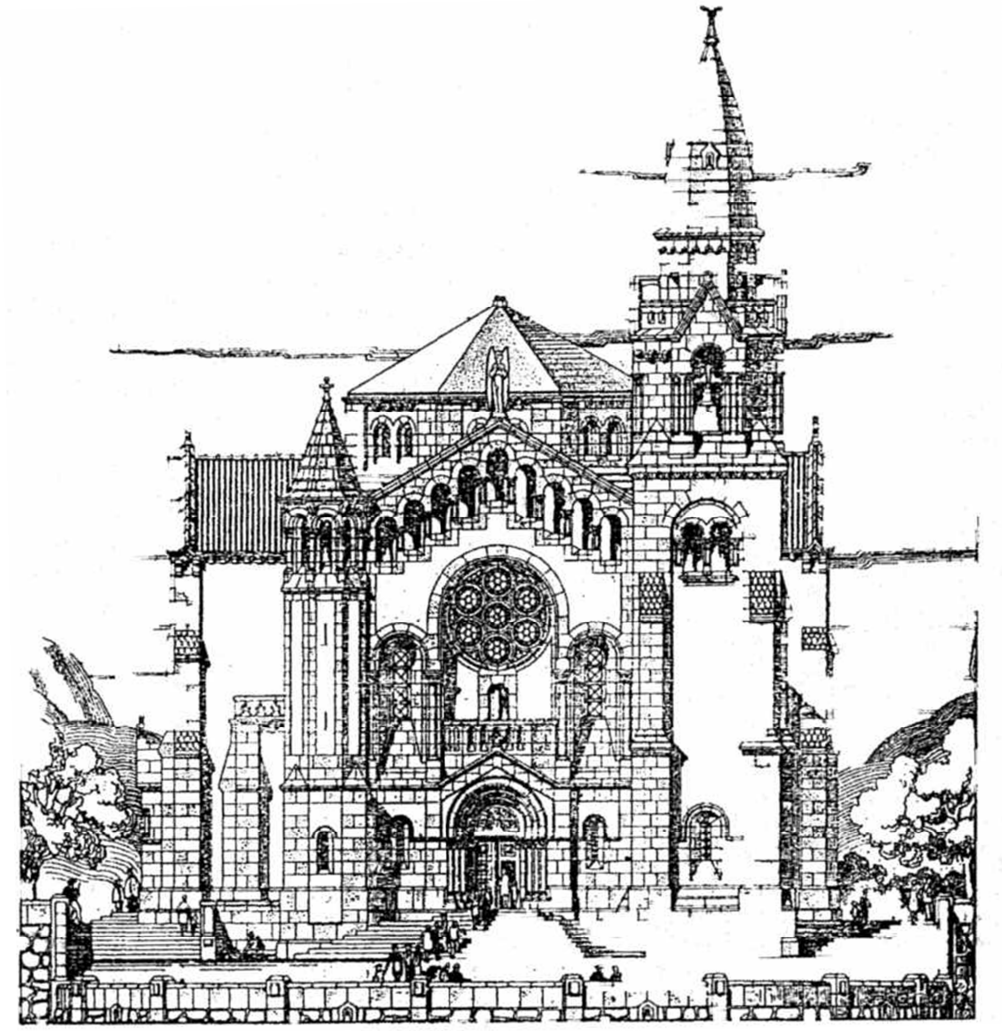


Figura 4.9 - Projecto definitivo de Ernesto Korrodi para o Santuário de N.ª Srª da Assunção [40, 41].

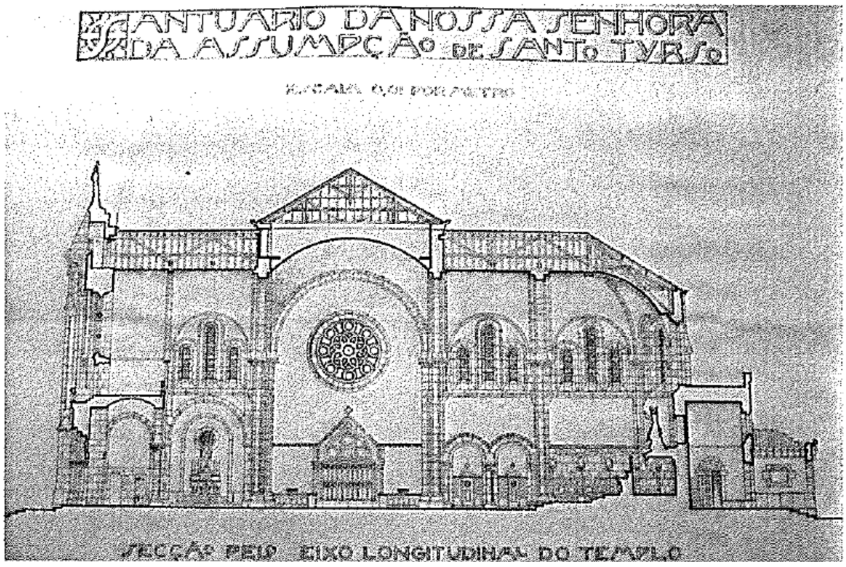


Figura 4.10 – Projecto do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, 1928, Monte Córdova, Santo Tirso, de Ernesto Korrodi. Corte longitudinal. [41].

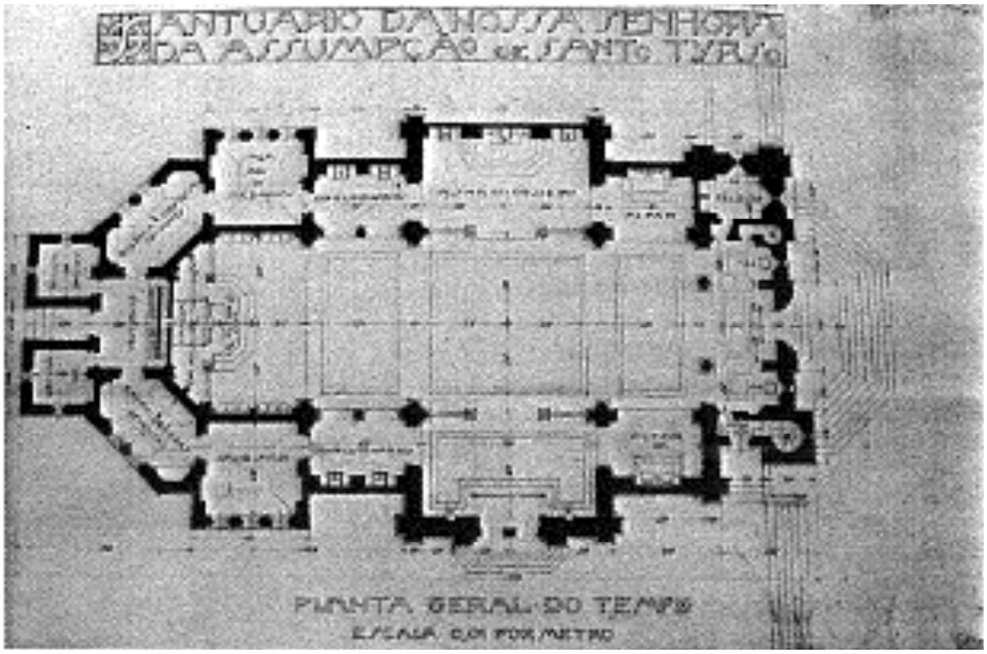


Figura 4.11 - Projecto do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, 1928, Monte Córdova, Santo Tirso, de Ernesto Korrodi. Planta da igreja [41].

O Dr. Manuel Carneiro, secretário-geral da Irmandade de Santo Tirso, conta que a obra cumpriu o projecto de Korrodi até capela-mor, sendo inaugurada a 1934. Depois, houve continuação das obras do Santuário a um ritmo bastante lento, devido às disponibilidades financeira. A sua data exacta de conclusão não é conhecida, mas aponta-se para a década de 1970.

Se houve um novo projecto, ou linhas gerais que guiaram a reconstrução/aumento do Santuário desde a capela-mor concluída a 1934, até à obra hoje conhecida (com término total apontado para década de 1970), não deixou presenças, pelo menos, atingíveis. O mesmo sucedeu com o projecto inicial de Korrodi, isto é, o original ou cópia que, além das ilustrações de Lucília Costa, não possui acessibilidade. Os locais chave, isto é, que à partida conteriam o referido projecto, como a Câmara Municipal, o Museu e Irmandade de Santo Tirso, apesar de atenciosamente auxiliarem na pesquisa, confirmaram, infelizmente, a inexistência do mesmo. Foi feita ainda uma pesquisa fora do concelho de Santo Tirso da qual se salienta o Arquivo Diocesano que comungou da mesma resposta.

Naturalmente, dada a ausência de projecto, procurou-se fontes contendo informação da construção do mesmo (além de outras informações relacionadas com o tema). Verificou-se que subsiste alguma informação registada por alguns autores que se debruçaram na história de Santo Tirso. É o exemplo do livro "*Nossa Senhora da Assunção – Centenário da capela velha (1901-2001)* [42]", do Pe F. Carvalho Correira, entre outros.

Salienta-se um discurso escrito por Dr. Manuel Correia, Secretário-geral da Irmandade, para a comemoração do Centenário de Nossa Senhora da Assunção que resume toda a história da construção do património de Santo Tirso explicando assim a interessante origem do actual Santuário. Apresenta-se em seguida um excerto de tal discurso [43]:

"Muita gente conhece a Assunção mas poucos, penso, conhecem como tudo isto começou, quem foram os pioneiros, quais as principais etapas e dificuldades do percurso…Satisfazendo, creio, a curiosidade de alguns, vou procurar contar-vos, muito resumidamente, a história da construção desse

património:

O primeiro fundador desta obra foi o tirsense ilustre e muito bairrista José Bento Correia. Foi ele quem, no 'Jornal de Santo Tirso' que fundou e que era director, em 23 de Julho de 1896, lançou a ideia de aqui se construir, por subscrição pública, uma capela em honra de Nossa Senhora da Assunção. (…) A ideia foi ganhando adeptos e passados alguns dias, na actual Escola Primária Conde de S. Bento, reuniram-se as pessoas mais gradas da vila, entre elas o Abade Joaquim Pedrosa e o P.e Ribeiro de Miranda, grandes entusiastas do empreendimento, tendo-se, então, nomeado comissões que tratassem dos assuntos relativos à construção da capela, designadamente a modelação da imagem, o aforamento do terreno, a arborização do mesmo, a elaboração e aprovação dos Estatutos da respectiva Irmandade.

O aforamento do terreno foi solicitado à Câmara, procedendo-se depois à respectiva escritura. (…)

Os fins da Irmandade constavam do artigo 2º dos Estatutos: 'propunha-se construir em lugar apropriado, no Monte Córdova, fronteiro a esta vila, um templo sob invocação de Nossa Senhora da Assunção, a quem será consagrado, e em honra da qual se fará solene festividade no dia 15 de Agosto de cada ano'.

Tinham os primeiros fundadores da Irmandade nobres ambições e larga visão do futuro… É que acrescentavam os Estatutos: 'Para o fim consignado em l (construção do templo) a Irmandade, seguindo as prescrições legais, deverá adquirir o terreno necessário, torná-lo formoso, arbonizando-o, explorando águas e fazendo obras de arte à semelhança do que se vê no Bom Jesus, em Braga, de modo a converter o respectivo local numa estância aprazível de agrado recreio, que convide, pelos seus atractivos, a visita e atenção dos forasteiros'.

Os estatutos foram aprovados por alvará do governo Civil do Porto de 4 de Maio de 1897.(…)

Porém, o velho sonho dos pioneiros não estava ainda totalmente realizado. A capelinha era modesta, o espaço circundante pequeno, os horizontes suficientemente amplos… E começou a pensar-se na construção, no cimo do monte, de um grandioso Santuário, já que aí havia um espaço apropriado, plano, onde, noutros tempos se colocara um cruzeiro. Era um espaço amplo, de horizontes vastíssimos, sendo os acessos facilitados pela existência de estrada ligando Santo Tirso a Paços de Ferreira, entretanto construída (…).

Os sucessivos responsáveis da Irmandade procuraram concretizar este objectivo: foram sendo adquiridos terrenos, aumentando a área da mata, prosseguiu a sua arborização; construíram-se fontes, lagos, cascatas, miradouros e outras obras sob a direcção do engenheiro portuense Barreiros. Foi entretanto constituída uma comissão (1923) denominada comissão 'Pró-Monte', com a missão de promover as obras na mata e iniciar a construção do novo templo. Era constituída por pessoas de grande relevo na vila, entre as quais por exemplo, António Maria Lopes, P.e João Gonçalves da Costa, directores do 'Jornal de Santo Tirso' e da 'Semana Tirsense'(…) Eram pessoas empenhadas, dinâmicas e bairristas, tendo decidido elaborar o projecto de construção do novo Santuário, entregando essa tarefa ao arquitecto Ernesto Korrodi, de Leiria. Este decidiu dar ao templo uma feição original (copiava-se, muito o Bom Jesus do Monte…) optando por uma solução feliz do gótico e século XIV, sem uma simetria clássica rígida, procurando atender às características do terreno e beleza do local (…)

Moveram-se os esforços e vontades, solicitaram-se donativos, apelou-se à generosidade dos devotos, e no dia 2 de Setembro de 1929 era lançada, solenemente, a primeira pedra do actual Santuário.

As obras foram prosseguindo, uniram-se esforços e, finalmente, em 15 de Agosto de 1934, o Senhor Patriarca de Lisboa Gonçalves Cerejeira benzia, solenemente, e abria ao culto a capela-mor do novo

templo."

Tal como referido, em continuação do texto, as obras continuaram a um ritmo bastante lento, pelas disponibilidades económicas, tendo sido concluído o Santuário finalmente a meados da década de 1970.

4.2. NOSSA SENHORA DA ASSUNÇÃO

A Solenidade de Nossa Senhora da Assunção é uma festividade que a Igreja Católica celebra a 15 de Agosto. Trata-se da terceira e última solenidade a Maria durante o ano na Igreja universal.

A primeira Solenidade a Maria é celebrada a 8 de Dezembro (feriado) invocam a Imaculada Conceição. A segunda realiza-se a 1 de Janeiro, Nossa Senhora, Mãe de Deus. A terceira solenidade é então comemorada a 15 de Agosto designadamente Assunção da Virgem Maria.

Os católicos acreditam que a Virgem Imaculada, terminando o curso da vida terrena, foi elevada ao céu em corpo e alma e exaltada pelo Senhor como rainha, para assim se conformar mais plenamente com o seu Filho [44]. O *Catecismo da Igreja Católica* refere: "A Assunção da santíssima Virgem é uma singular participação na ressurreição de Cristo e uma antecipação da ressurreição dos outros cristãos" [45]. O *II Concílio do Vaticano* refere ainda que depois de elevada ao céu, Maria não abandonou a sua missão salvadora, mas com a sua multiforme intercessão, continua a alcançar os dons da salvação eterna. Por isso, a Virgem é invocada na Igreja com os títulos de advogada, auxiliadora, socorro e medianeira.

À medida que celebram esta solenidade, os católicos relembram em Maria a sua vitória, por ter assumido e vencido o seu papel de Mãe da Igreja, e desta forma foi coroada com doze estrelas como demonstra a imagem de N.ª Sr.ª da Assunção no Santuário em Santo Tirso (Figura 4.12). Esta imagem, foi elaborada pelo escultor João Fonseca da Lapa, de Vila Nova de Gaia, pintada por Diogo Sampaio e restaurada posteriormente por Manuel Eduardo de Sousa.



Figura 4.12 – Imagem de Nossa Senhora da Assunção no Santuário N.ª Sr.ª Assunção [foto da autora].

4.3. O ARQUITECTO

Ernesto Korrodi (Figura 4.13) nasceu em Zurique (Suíça), a 30 de Janeiro de 1870; o seu apelido é de origem italiana. O pai, João Henrique Korrodi era professor do Liceu Cantonal de Zurique, cidade onde Korrodi conclui o 1.º e 2.º ciclos de ensino. Aos quinze anos entrou para a Escola de Arte Industrial onde terminou, ao fim de nove semestres, os cursos de escultor-decorado e professor de desenho [41].

Tendo terminado os estudos, ainda não havia completado dezanove anos de idade, Ernesto Korrodi empreende uma digressão artística por Itália. Fascinado pela "vida dos países meridionais", concorre para um lugar de professor de desenho, que o governo português abrira na legação de Berna. A partir de 1889, lecciona a disciplina de desenho ornamental na Escola Industrial de Braga [41].

Em 1894, transfere-se para a Escola de Domingos Sequeira, em Leiria. Um ano depois, em Julho de 1895, na exposição de trabalhos escolares, Ernesto Korrodi apresenta um "Projecto para um Museu Arqueológico, restaurando a capela do Castelo" e "fragmento da galeria do castelo restaurada", paralelamente expõe um cofre em cedro, "com embutimentos e ferragens em estilo gótico". Aqui se começa a perceber as inclinações estilísticas e artísticas de Korrodi, através de monumentos da arquitectura religiosa e civil da Idade Média e dos seus projectos de "reconstituição" como refere Lucília Costa. Testemunho do seu filho indica que Ernesto Korrodi teria estudado, fora do âmbito escolar como professor arqueológico – arquitectónico [41].



Figura 4.13 - Ernesto Korrodi (1870-1944) [41]

Em 29 de Abril de 1901, casa com Quitéria da Conceição Maia, professora do Ensino Primário na freguesia dos Marrazes, desde 1892 a 1901. Tiveram três filhos, um que morreu logo após o nascimento em 1902, Maria Teresa (1903-2002) e Ernesto Camilo Korrodi (1905-1985).

Entre os seus projectos arquitectónicos, destacam-se: Restauro do Castelo de Leiria (Figuras 4.16 e 4.17); Igreja Matriz de Santa Catarina da Serra, Leiria (1902); Edifício na Av. Fontes Pereira de Melo, n.º 30 Lisboa - Prémio Valmor (1910); Palácio J. Ferreira Rego (hoje mais conhecido por Castelo D. Chica), Palmeira (Figuras 4.14 e 4.15), Braga (1915-1918); Edifício na Rua Viriato, nº 5 Lisboa - Prémio Valmor (1917); Casa Museu Egas Moniz (Avanca) (1915); Igreja de Eulália, Fafe (Figuras 4.18 e 4.19), Igreja do Santíssimo Sacramento (Porto) e finalmente, Santuário de Nossa Senhora da Assunção, no Monte Córdova, Santo Tirso (1934).

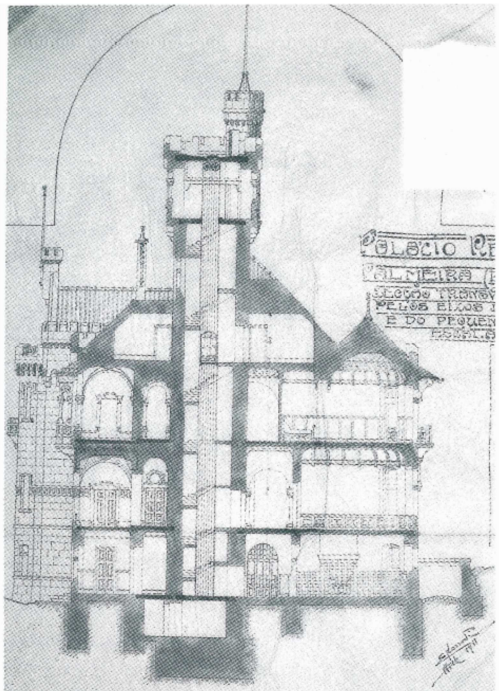


Figura 4.14 – Corte transversal do Palácio J. Ferreira Rego, Palmeira. Projecto de Ernesto Korrodi [41].



Figura 4.15 – Palácio J. Ferreira Rego, Palmeira, Braga (1915 – 1918) [46].

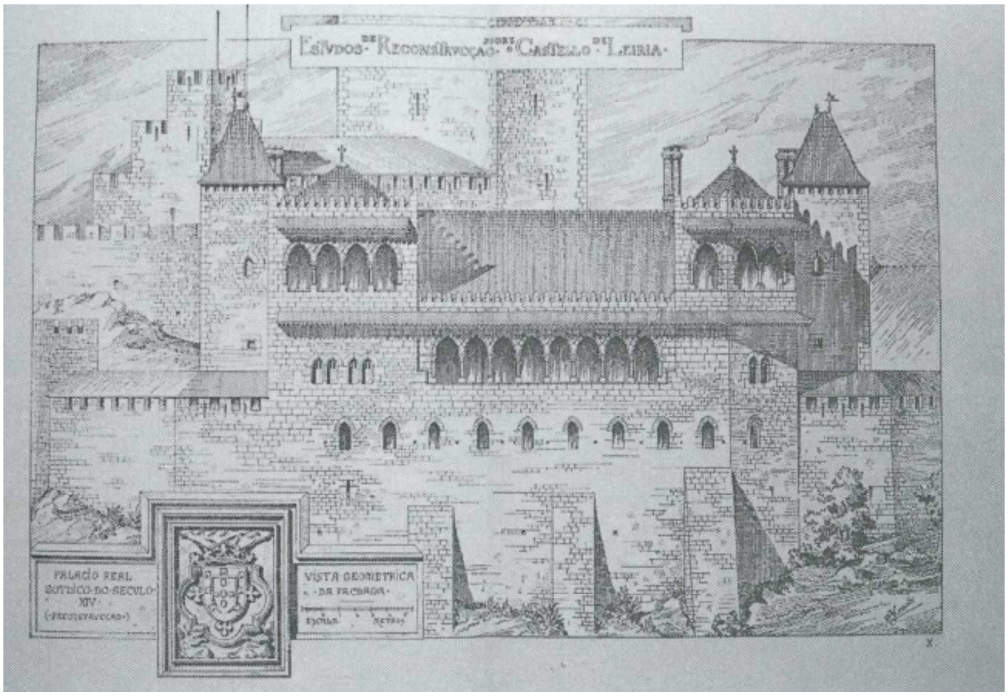


Figura 4.16 – Estudos de reconstrução do Castelo de Leiria completado em 1895 de Ernesto Korrodi (alçado do lado sul do Paço) [41].



Figura 4.17 – Castelo de Leiria. Obras de restauro da Direcção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais, 1936 – 1956. Fachada nordeste do Paço [41].



Figura 4.18 – Projecto de Ernesto Korrodi para a igreja paroquial de Santa Eulália em Fafe, 1937, (Alçado da fachada principal) [41].

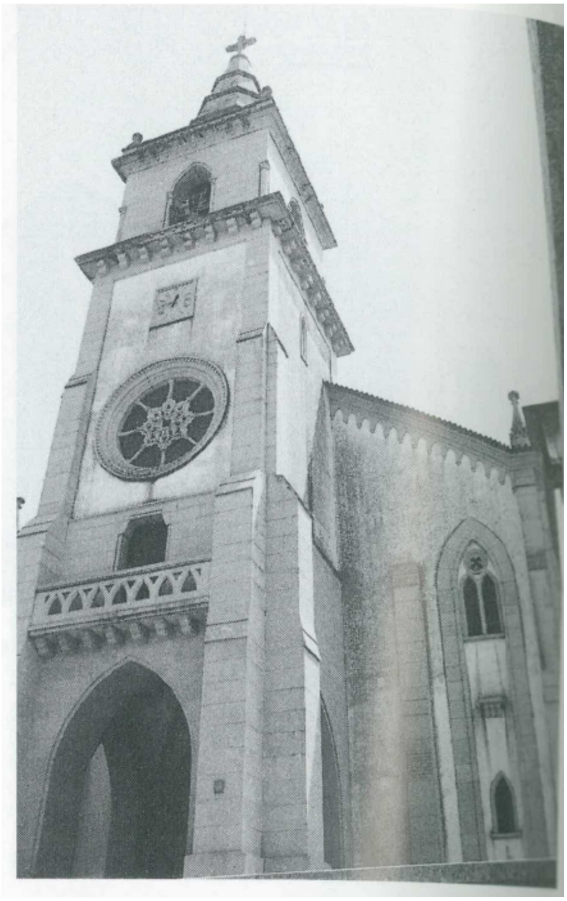


Figura 4.19 – Igreja paroquial de Santa Eulália, Fafe, 1937 (Fachada principal) [41].

O estilo arquitectónico que Korrodi adoptava para os seus trabalhos é algo especialmente complexa de caracterização. Primeiro, a desconformidade frequente da aparência dos edifícios resultantes das suas obras com os projectos faz com que as referências sejam múltiplas e difíceis de descodificar.

Depois, ele não enveredava um modelo determinado de arquitectura, pelo que a complexidade do problema reside na combinação das várias escolhas possíveis, por vezes no interior do próprio sistema. Adoptando vários estilos histórios, o seu estilo pessoal, ou o segredo do seu eclecticismo[4] resulta na importação de modelos de uma arquitectura religiosa do Sul da Alemanha simultaneamente influenciada, nas soluções construtivas, por uma observação directa das edificações religiosas do nosso país. Apesar do neogótico se considerar na altura um estilo mais inovador que fornecia à arquitectura do ferro, nas obras de Korrodi não se encontra na sua obra o enunciado de uma catedral ideal, de estilo neogótico, cujo programa parecia anunciado em algumas realizações de arquitectura civil ou mesmo nos seus desenhos.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

Segundo Lucíla Costa, o Santuário de N.ª da Assunção, trata-se do projecto mais elaborado de Korrodi no domínio da arquitectura religiosa. A sua caracterização arquitectónica é fruto da influência de algumas correntes e foi sofrendo alterações à medida que o projecto evoluía e se adaptava ao gosto das encomendas e disponibilidades económicas [41].

O resultado começa num neogótico de influências do norte da Europa, passa pela arquitectura gótica do Sul do país e pela românica alemã, acabando mais tarde por ser adaptada a um neo-românico [48].

Do ponto de vista construtivo é essencialmente construído à base de pedra e cal, exibindo paredes de elevada espessura. É constituído por quatro espaços acoplados, como se pode observar na Figura 4.12, tendo os dois mais próximos ao altar um pé-direito com 7 metros, e os outros dois um pé-direito com 8 metros. Em geral, as superfícies interiores são revestidas por reboco liso, exepto na parte inferior das paredes onde se pode encontrar pedra, até cerca de 1,5 metros de altura.

Surge então uma certa ambiguidade na definição do estilo predominante deste Santuário. Do ponto de vista estilístico é, fundamentalmente, neo-românico; do ponto de vista dos materias, da construção, é um projecto que utiliza as potencialidades da arquitectura do século XX; como betão, cimento, aço etc [49]. Tomando como prioritária a definição do estilo segundo a óptica da acústica, dado o objectivo deste trabalho, o ponto de vista construtivo prevalece pois é o mais condicionante neste ramo. Tendo isto em conta e sabendo que a sua data de construção aponta para a década de 1970, considera-se, para este trabalho, que estilo predominante para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção é o Contemporâneo.

Elaborou-se uma representação esquemática da planta correspondente à construção actual do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção a partir da medição e observação *in sit*u (Figura 4.20). Neste levantamento, teve-se um cuidado redobrado na ilustração da nave central da igreja, uma vez que constitui o espaço da concepção acústica em estudo. Assim, omitiram-se nesta representação alguns pormenores compartimentais nos espaços alheios à nave (sacristia, salas de apoio, armazém de ornamentos, etc).

As principais características do espaço interior principal do Santuário de Nossa Senhora da Assunção

[4] **Ecletismo** ou **Ecleticismo** é um método científico ou filosófico que busca a conciliação de teorias distintas. Na política e nas artes, *ecletismo* pode ser simplesmente a liberdade de escolha sobre aquilo que se julga melhor, sem se apegar a uma determinada marca, estilo ou preconceito [47].

são:

- Volume - 9855 m³;
- Área - 715 m²;
- Altura máxima –16,0 m;
- Altura média ponderada - 14,5 m;
- Altura mínima – 6,0 m;
- Comprimento máximo – 38,1 m;
- Largura máxima – 27,2 m.

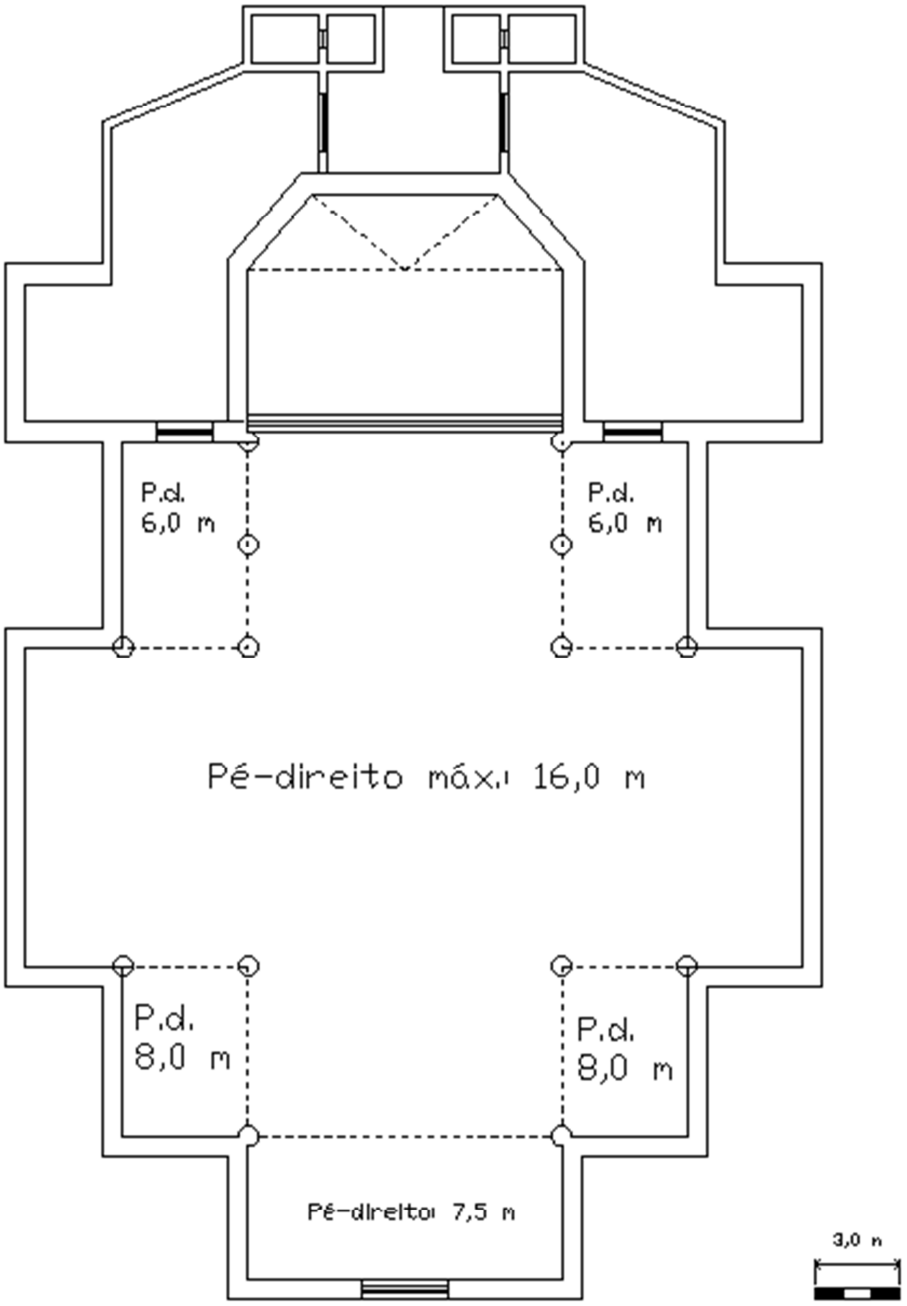


Figura 4.20 – Esquema em planta do Santuário de Nossa Senhora da Assunção [desenho da autora]

5

ENSAIOS E RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a caracterização acústica do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção. Esta caracterização é suportada por uma análise objectiva à base de ensaios acústicos realizados no interior da igreja e por uma breve análise subjectiva constituída pelo depoimento de alguns conhecedores do local como o Sr. Francisco Matias, o Sr. Dr. Manuel Carneiro e Sr. P. Celestino Ramos.

Relativamente à análise objectiva, esta foi suportada essencialmente pela medição de três parâmetros: Tempo de Reverberação, RASTI e nível de pressão sonora do ruído de fundo que proporcionam uma boa caracterização acústica da igreja pois fornecem parâmetros caracterizadores da audibilidade sonora. Sendo esse o principal objectivo, fizeram-se os ensaios em diferentes pontos da igreja em diferentes direcções de forma a caracterizar este espaço interior.

A fim de analisar a influência do sistema de amplificação sonora mediu-se o RASTI com e sem esta o uso daquela.

Relativamente à medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo este poderia ser medido com e sem AVAC (equipamentos centrais de climatização). No entanto, dada a inexistência destes no Santuário, foi medido apenas com base no ruído de tráfego.

Todas as medições foram realizadas com as portas totalmente fechadas e a igreja vazia (à excepção dos ensaiadores).

Os ensaios foram efectuados na parte da tarde do dia 24 de Março de 2011 e o Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto foi a entidade responsável pela sua realização através do Eng. António Eduardo Costa.

5.2. INSTRUMENTAÇÃO

5.2.1. SONÓMETRO

O sonómetro permite medir os níveis de pressão sonora. É essencialmente constituído por um microfone, um circuito integrador, filtros de ponderação e um mostrador (analógico ou digital). No mercado estão disponíveis sonómetros de várias classes (ou tipos) em função da sua precisão. O utilizado para estes ensaios foi o Sonómetro *Brüel & Kjaer* - modelo 2260 nº 2553974 (Figura 5.1).



Figura 5.1- Sonómetro *B&K* modelo 2260 [Fotos da autora].

5.2.2. CALIBRADOR

Os equipamentos denominados calibradores têm como principal função permitir a verificação e calibração de outros equipamentos (em especial o sonómetro) de forma a avaliar a sua precisão. Existem de vários tipos: pistãofones, calibradores, etc. Para estes ensaios utilizou-se o Calibrador *Brüel & Kjaer* modelo 4231 (Figura 5.2).

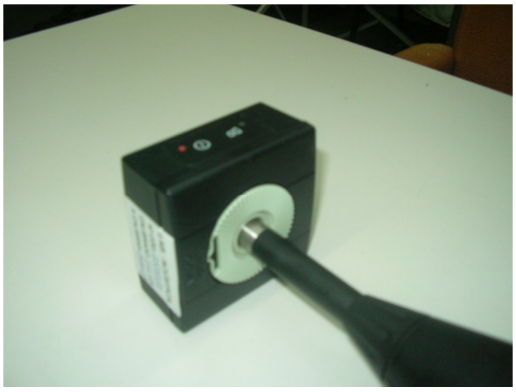


Figura 5.2 - Calibrador *B&K* modelo 4231(associado ao sonómetro) [Foto da autora].

5.2.3. MICROFONE

Os microfones convertem variações de pressão no ar (ou na água: hidrofones) em impulsos eléctricos. Existem no mercado microfones de diferentes diâmetros sendo os de 1/2'' (13 mm) os mais usados. O laboratório de ensaios disponibiliza o microfone de 13 mm, marca *Brüel & Kjaer*, modelo 4189, que foi o utilizado para estes ensaios.

5.2.4. FONTES SONORAS

As fontes sonoras amplificam e emitem os sons gerados. Há vários métodos de excitação e diversas

formas e modelos de fontes sonoras (omnidirecionais, direccionais etc). Utilizou-se para este trabalho uma fonte sonora da marca *Brüel & Kjaer* modelo 4224 (Figura 5.3).



Figura 5.3 - Fonte sonora da marca *Brüel & Kjaer* modelo 4224 [Foto da autora].

5.2.5. ANALISADOR DO RASTI

São analisadores de RASTI dois instrumentos (emissor e um receptor) de modo a avaliar indirectamente a integibilidade da palavra. Para estes ensaios recorreu-se ao analisador do RASTI, marca *Brüel & Kjaer*, modelo 3361, o qual consiste num emissor (modelo 4225) e um receptor (modelo 4419) (Figuras 5.4 e 5.5).

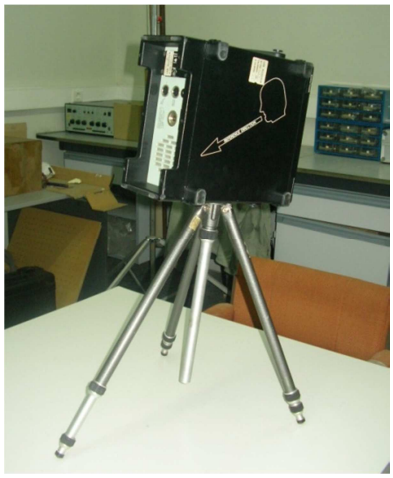


Figura 5.4 – Medidor do RASTI *B&K* modelo 3361, emissor (modelo 4225) [Foto da autora].



Figura 5.5 - Medidor do RASTI *B&K* modelo 3361, receptor (modelo 4419) [Foto da autora].

5.2.6. INSTRUMENTOS AUXILIARES

Além dos instrumentos mencionados acima utilizaram-se ainda:

- Módulo estatístico, marca *Brüel & Kjaer*, modelo BZ7210;
- Módulo estatístico, marca *Brüel & Kjaer*, modelo BZ7204;
- Tripé de fixação portátil, marca *Brüel & Kjaer*, modelo UA0049.

5.3. RUÍDO DE FUNDO

5.3.1. CONSIDERAÇÕES E DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Para a medição do nível de pressão sonora do ruído de fundo recorre-se ao sonómetro (Figura 5.1). Houve a preocupação de realizar esta medição sem picos de ruído quer do interior, quer do exterior. Assim procurou-se a realização dos ensaios perante boas condições atmosféricas (ausência de chuva etc.) e períodos em que o ruído de tráfego não fosse intenso. Os valores medidos correspondem ao nível de pressão sonora contínuo equivalente, ponderado para o filtro A (L_{Aeq}), em bandas de oitava dos 16 Hz aos 16000 Hz. No entanto, na utilização posterior apenas se consideraram as bandas de oitava centradas nas frequências dos 32 Hz aos 8000 Hz. Cada medição, a fim de obter estacionaridade de valores, teve a duração de 10 minutos.

5.3.2. PONTOS DE ENSAIO

De forma a caracterizar toda a sala elegeram-se dois pontos estratégicos para este ensaio. Posicionaram-se estes dois pontos no eixo de simetria do Santuário, um junto ao altar (n.º 1), outro perto da porta traseira (n.º 2) (ambos a um nível médio da altura das pessoas) tal como demostra a

Figura 5.6.

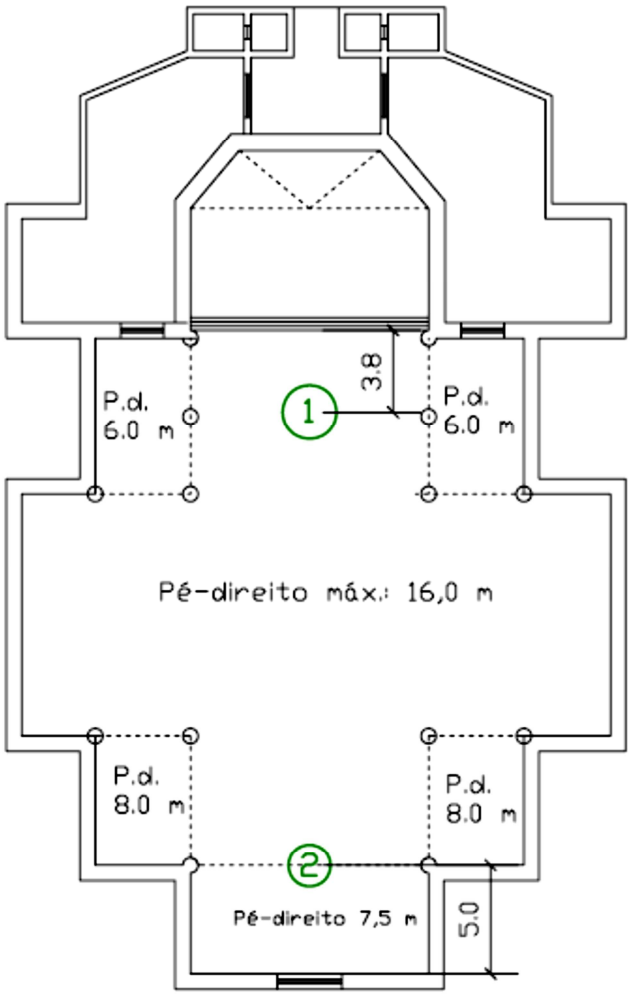


Figura 5.6 – Planta esboço do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com a localização dos dois pontos de medição do nível de pressão sonora do Ruído de Fundo.

5.3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 5.1 e a Figura 5.7 apresentam os valores obtidos para o nível de pressão sonora do Ruído de Fundo com gamas de frequência centradas em oitava e o nível sonoro equivalente (L_{Aeq}).

Quadro 5.1 - Valores do nível de pressão sonora do ruído de fundo do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção

	L (dB)										Leq
Freq.(Hz)	**31**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**	**8k**	**16k**	
Ponto 1 [dB]	25,3	37,9	29,3	23,3	21,6	18	15,8	15,1	16,1	18,3	44,5
Ponto 2 [dB]	27,2	40,7	35,4	29,5	24	19,1	15,4	14,2	15,5	18,1	46,2
Média arit. [dB]	26,2	39,3	32,4	26,4	22,8	18,6	15,6	14,7	15,8	18,2	45,4

Uma análise dos resultados obtidos permite verificar que o nível de pressão sonora médio total é de cerca de 45 dB. Observa-se também que os níveis de pressão sonora de ruído de fundo obtidos no ponto 2 foram maiores que os obtidos para o ponto 1. Esta evidência deve-se a uma maior proximidade do ponto 2 da porta exterior ficando mais próximo do ruído de tráfego exterior. Deste modo ocasiona-se um aumento do nível de pressão sonora. No entanto, apesar deste aspecto, os valores entre os dois pontos não diferenciam muito.

Com a observação da Figura 5.7 verifica-se que os valores maiores do nível de pressão sonora situam-se nas baixas frequências. Este aspecto deve-se fundamentalmente à predominância das baixas frequências do ruído de tráfego, sendo este o único ruído de fundo audível.

De forma geral, o interior do Santuário apresenta baixos valores de ruído de fundo (inferiores a 28 dB(A)). Tendo em conta não só o som gerado pelo ruído de tráfego, mas considerando também a elevada espessura das paredes do santuário, torna-se legítmo supor que os baixos valores de ruído de fundo devem-se não só ao baixo ruído como a um bom isolamento sonoro do Santuário. Assim, pode-se afirmar que este parâmetro não é um factor preocupante a nível de eficiência acústica da igreja.

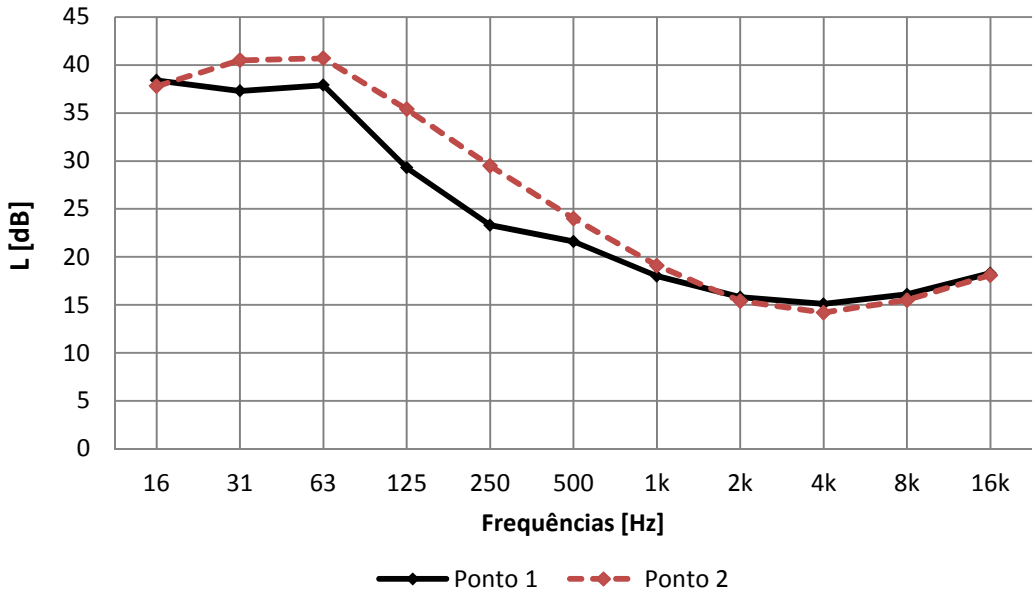


Figura 5.7 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo do Santuário de N.ª Sr.ª Assunção

Aplicando o Filtro A aos níveis de pressão sonora de ruído de fundo obtidos obtém-se os valores observados no

Quadro 5.2 e Figura 5.8. Verifica-se que após aplicação deste filtro, o nível sonoro global da sala é de aproximadamente de 26 dB (A).

Quadro 5.2 - Níveis sonoros médios do ruído de feundo com aplicação do filtro A do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

	L_A (dB)										L_{Aeq}
Freq. [Hz]	**31**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**	**8k**	**16k**	
Ponto 1	0*	12,9	13,8	14,8	18,6	18,0	16,8	16,1	15,1	11,3	**25,2**
Ponto 2	0*	15,7	19,9	21,0	21,0	19,1	16,4	15,2	14,5	11,1	**27,2**
Média arit. [dB]	0*	14,3	16,9	17,9	19,8	18,6	16,6	15,7	14,8	11,2	**26,2**

*Considerando não aceitável a existência de valores negativos.

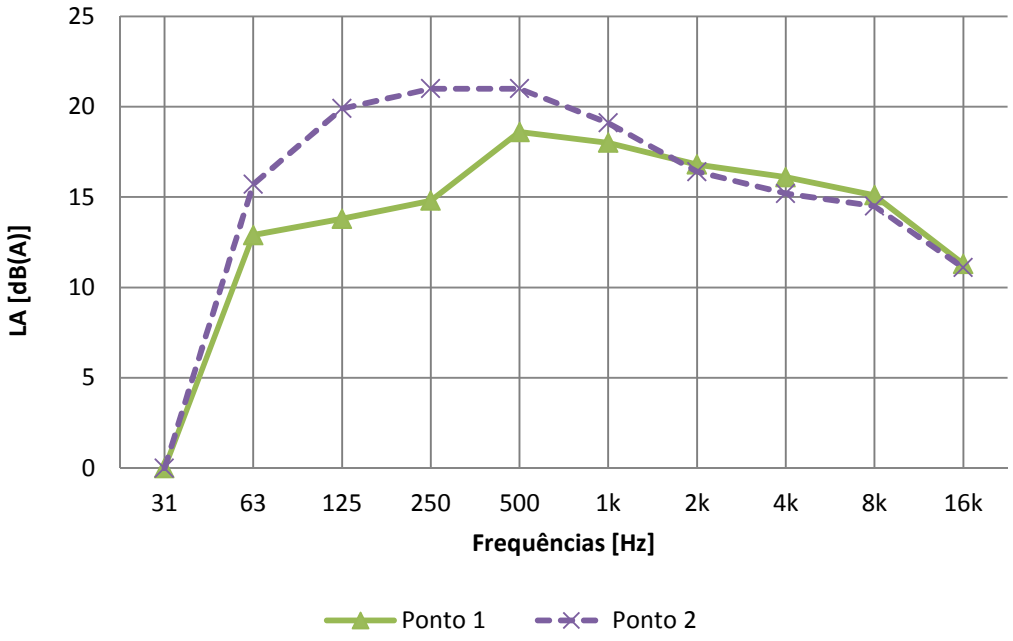


Figura 5.8 - Níveis sonoros médios do ruído de fundo com aplicação do filtro A do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

5.3.4. CURVAS DE INCOMODIDADE

É possível determinar o grau de conforto acústico existente no Santuário, por comparação do espectro do nível de pressão sonora do ruído, obtido no subcapítulo anterior, com um conjunto de curvas de referência, designadas de curvas de incomodidade.

Assim, é possível exprimir o nível de conforto existente e compará-lo com valores ideais recorrendo a curvas de referência designadas: "*noise rating*" (NR), "*noise criteria*" (NC), "*room criteria*" (RC) ou "*balanced noise criteria*" (NBC), entre outras, descritas no Capítulo 2.

As curvas "*noise criteria"* (NC), determinam os níveis máximos de pressão sonora para as bandas de frequência de oitava dos 63 Hz e os 8000 Hz. As "R*oom Criteria*" (RC), funcionando de forma semelhante que as NC, mas com frequência centradas dos 31 Hz aos 8000 Hz.

Dada a inexistência de sistemas de AVAC dentro do santuário, procedeu-se à determinação dos valores de NC e NR (apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9) com o ruído de tráfego.

Desta forma, obtêm-se os valores de NC-20 e NR-23. A norma ANSI S12.2 – 1995 [50] fornece valores máximos destes parâmetros para diferentes espaços em função da sua utilização (por exemplo, escritórios, salas de reuniões, salas de aulas, bibliotecas, salas de concerto, estúdios de gravação, etc.).

Apesar, destes valores indicados pela norma serem para sistemas de AVAC, proporcionam uma ideia do valor recomendado. O valor máximo de NC recomendado pela norma para igrejas situa-se nos 20, assim como em *Acústica Ambiental de Edifícios* [3], que sugere valores de NC inferiores a 20, coerente com a norma. Desta forma, o valor obtido de NC para o Santuário respeita os valores recomendados.

Relativamente ao Noise Rating, tal como para o NC, não são aconselhados avalores superiores a 30 [51], assim, o valor de NR situa-se também num valor não preocupante.

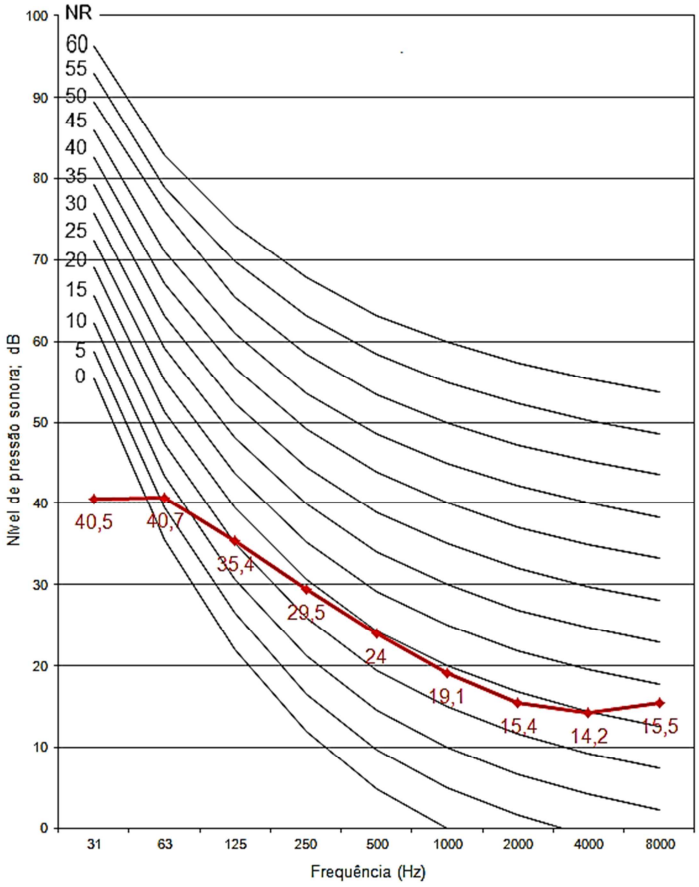


Figura 5.9 – Determinação do valor de NR no interior do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com os níveis de pressão sonora do ruído de tráfego [52].

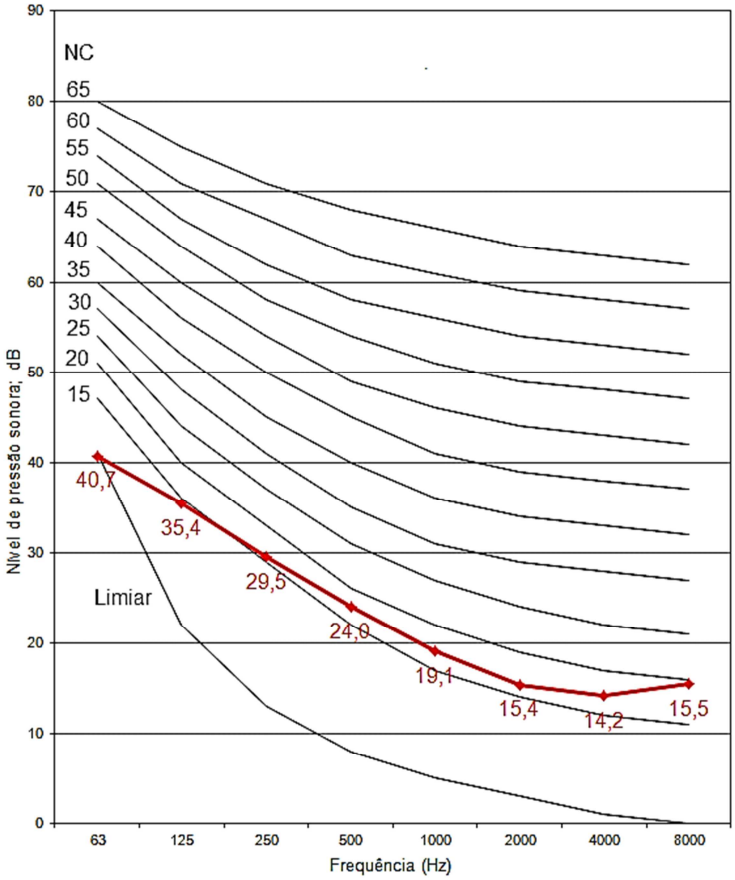


Figura 5.10 – Determinação do valor de NC no interior do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com os níveis de pressão sonora do ruído de tráfego [53].

5.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.4.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

A avaliação do Tempo de Reverberação passa por emitir, através de uma fonte sonora, um ruído forte o suficiente para registar um decaimento acima do nível de fundo e que cubra todo o espectro de frequências de interesse. Por outro lado, um receptor (sonómetro) regista o nível de pressão sonora e o tempo de decaimento a 20 e 30 dB (T_{20} e T_{30}). O valor do Tempo de Reverberação é o valor extrapolado correspondente a 60 dB, que também é fornecido pelo sonómetro, assim como o tempo de decaimento de 60 dB.

Para cada ponto realizam-se duas medições, uma à esquerda e outra à direita divergindo de 30 a 40º. O sonómetro efectua a média destas duas medições fornecendo um valor único do Tempo de Reverberação.



Figura 5.11 - Medição do tempo de Reverberação - fonte emissora *B&K* 4225 [Foto da autora].

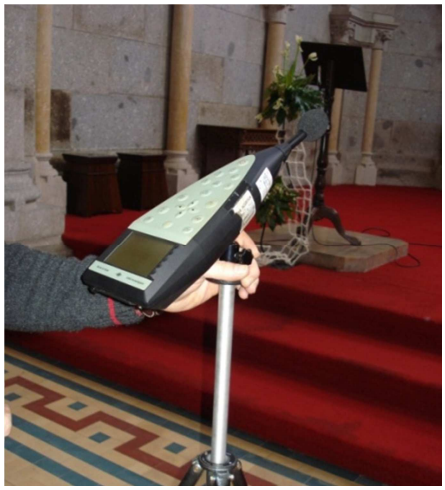


Figura 5.12 - Medição do tempo de Reverberação - sonómetro B&K tipo 2260 [Foto da autora].

5.4.2. PONTOS DE ENSAIO

Relativamente à localização dos pontos de ensaio para a determinação dos Tempos de Reverberação seguiu-se a mesma lógica até agora, isto é, procurou-se abranger todo o santuário, partindo do princípio de simetria de valores. Desta forma elegeu-se um ponto próximo do altar, um segundo ponto a meio dos lugares sentados e finalmente dois pontos na parte de trás da sala (um ao pé da parede e um último no espaço inferior junto à entrada traseira).

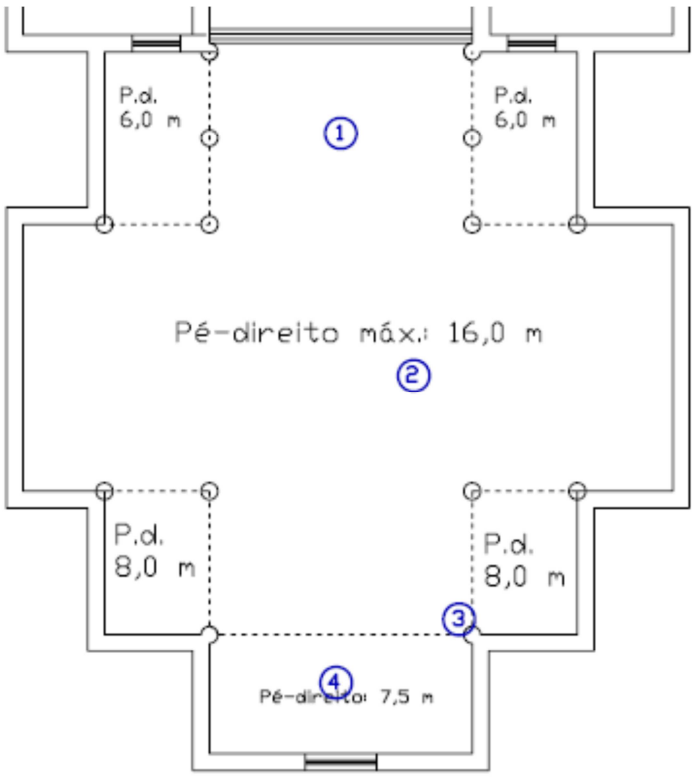


Figura 5.13 – Localização dos quatro pontos de ensaios do Tempo de Reverberação [Planta da autora]

5.4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 5.3 e Figura 5.14 apresentam os resultados obtidos deste ensaio, isto é, os valores obtidos do Tempo de Reverberação (s) por bandas de frequência e assim como a média para as frequências 500-2000 Hz.

Os tempos de reverberação médios excedem largamente os valores ideais para este tipo de espaços. Os valores recomendados para assegurar uma boa integibilidade da palavra, tendo em conta uma mancha de valores de diversos autores, situam-se entre os 1,5 e 3,0 s (ver subcapítulo 3.3), pelo que neste espaço verificou-se um valor total médio do Tempo de Reverberação na gama de frequências centrais em 500 e 1000 Hz de 11,0 s sendo um valor excessivamente elevado para o qual o espaço está vocacionado.

Consta-se uma enorme diferença entre os valores obtidos para baixas frequências (16 e 13 s) e os obtidos para altas frequências (atingindo 5 s). Esta ocorrência pode advir do enorme volume do santuário, fazendo entrar com o aspecto da absorção sonora devida ao ar que é condicionante nas altas frequências. No entanto, mesmo nas altas frequências o valor continua excessivo quando comparado com os valores ideais. Estes valores excessivamente elevados estão directamente relacionados com a baixa absorção sonora dos materiais de revestimento do interior da igreja.

Quadro 5.3 – Valores do Tempo de Reverberação [s]

	TR30						
Freq (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	TR [500,1000]
Ponto 1	15,7	12,7	12,0	10,2	6,9	4,9	11,1
Ponto 2	17,3	12,8	11,9	10,1	7,0	5,0	11,0
Ponto 3	15,9	12,7	11,9	10,1	7,0	5,0	11,0
Ponto 4	16,5	12,5	11,8	10,2	7,2	5,0	11,0
Média	**16,3**	**12,7**	**11,9**	**10,1**	**7,0**	**4,9**	**11,0**

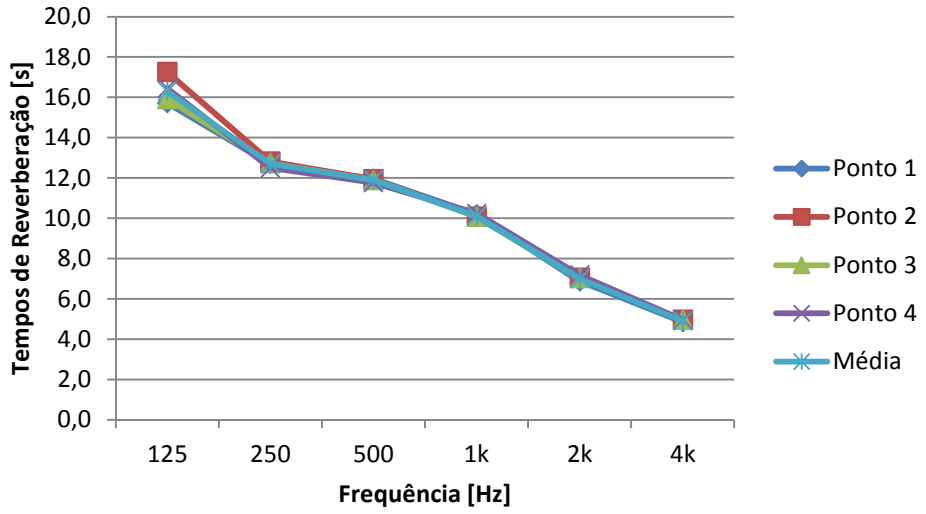


Figura 5.14 – Valores do Tempo de Reverberação [s] nos quatro pontos de ensaio no Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção

Com a análise da Figura 5.14 pode-se evidenciar que, exceptuando a gama de frequências central dos

125 Hz, há uma forte homogeneidade entre os valores obtidos para os diversos pontos. Assim, se fosse realizada uma análise em termos de desvios padrão dos resultados em função da frequência verifica-se a amostra apresenta desvios padrão muito pequenos, o que é um aspecto a favor da fiabilidade destes resultados.

5.5. RASTI

5.5.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio para a medição dos valores de RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) consiste na transmissão de um sinal sonoro por parte da fonte sonora emissora e na sua recepção por um analisador de RASTI. A fonte sonora emissora é colocada no altar na posição do orador (Figura 5.15) a fim de simular, dentro das mesmas gamas de frequências e flutuações a voz humana. Ao mesmo tempo um microfone associado ao analisador de RASTI analisa a "integibilidade do sinal sonoro recebido" (Figura 5.16).

Os valores do RASTI podem ser comparados com uma escala subjectiva da integibilidade da palavra segundo a norma CEI 268-16 (CEI1988) [54] que é apresentada no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Escala subjectiva de integibilidade da palavra a partir do parâmetro RASTI [22]

RASTI	Integibilidade da Palavra
<0,30	Má
[0,30 – 0,45[	Pobre
[0,45 – 0,60[	Aceitável
[0,60 – 0,75[	Boa
[0,75 – 1,00]	Excelente

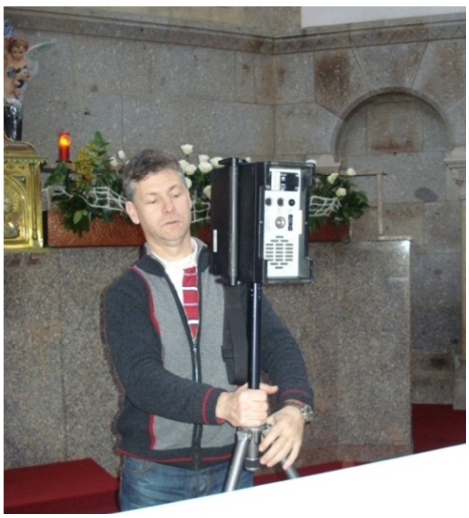


Figura 5.15 – Medição do RASTI - fonte emissora no altar na posição do orador [Foto da autora].



Figura 5.16 - Medição do RASTI - analisador do RASTI na posição do receptor [Foto da autora].

O RASTI é um método simplificado do STI (*Speech Transmission Index*), uma metodologia morosa uma vez que analisava um vasto espectro de frequências [55]. O analisador de RASTI analisa só em duas bandas de frequência (500 e 2000 Hz), pelo que se torna mais rápido em relação ao método STI.

O analisador calcula automaticamente os valores de RASTI em cada posição pela forma como o sinal é modificado desde a fonte sonora até ao microfone receptor.

Em cada ponto registaram-se quatro leituras, sendo que o mínimo admissível para este teste é de três leituras. Para cada ponto calculou-se a média aritmética das leituras obtendo assim o valor final.

O ensaio dividiu-se em duas partes, uma sem o uso da amplificação sonora do Santuário, outra com o sistema de amplificação sonora ligado (Figura 5.17). Para a primeira, o nível de emissão sonora de referência do emissor de RASTI foi com um acréscimo de 10 dB. Na segunda utilizou-se o nível de emissão de referência.



Figura 5.17 – Sistema de amplificação sonora do Santuário da N.ª Sr.ª da Assunção [foto da autora]

5.5.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ENSAIO

A distribuição dos pontos de ensaio foi efectuada tendo em conta o facto da integibilidade da palavra variar em função da distância e da direcção do emissor. Assim, procurou-se distribuir os pontos em profundidades diferentes, com direcções distintas relativamente à fonte, e que englobassem o espaço interior da igreja, nomeadamente os lugares sentados.

Elegeram-se sete pontos de ensaio para esta medição (Figura 5.18). Três pertencentes ao corredor central, eixo de simetria, ao longo da sua profundidade. Outros três pontos encontram-se no alinhamento do orador, e finalmente um ponto no extremo esquerdo na linha de bancos a meio de profundidade do santuário.

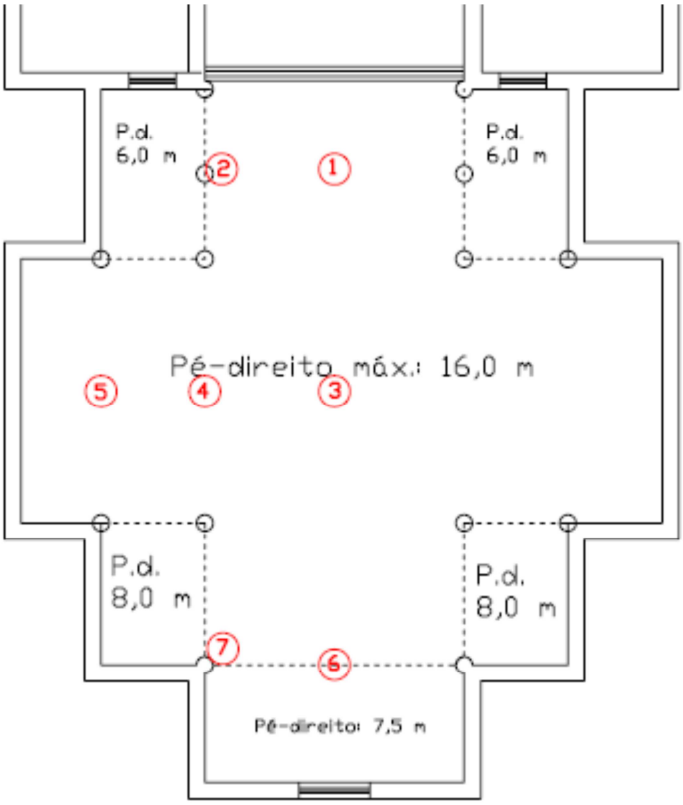


Figura 5.18 – Localização dos sete pontos de medição do ensaio do RASTI.

5.5.3. Resultados e Discussão

Apresenta-se em seguida o registo dos valores do RASTI obtidos para os sete pontos de ensaio seleccionados. Na medição de cada ponto, desprezaram-se os valores iniciais, no sentido de uma estabilização dos resultados, e registaram-se cerca de quatro medições para cada ponto. Foram consideradas três zonas tendo em conta a profundidade da sala:a zona 1 (aproximadamente a 1/4 da sala) constituída pelos pontos 1 e 2; a Zona 2 (a cerca 1/2 da sala) constituída pelos pontos 3, 4 e 5 e a zona 3 (3/4 da sala) constituída pelos pontos 6 e 7.

Para cada ponto e consequentemente cada zona calculou-se a média aritmética das leituras do RASTI no aparelho receptor com e sem amplificação sonora. Os resultados obtidos apresentam-se nos Quadros 5.5 e 5.6 e Figuras 5.19 e 5.20).

Obtendo os valores médios do RASTI em cada ponto, é ainda possível traçar a sentimento as curvas de igual RASTI ao longo do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, tal como demonstra a Figura 5.21. Igualmente possível é apresentar a média dos valores por zona, com e sem aplificação sonora (Figura 5.22).

Comparando-os os valores obtidos com a classificação normalizada (Quadro 5.4), verifica-se que nos pontos 1 e 2 a integibilidade da palavra é *pobre* e nos restantes cinco pontos é *má*. Verifica-se ainda que diminui ao longo da distância à fonte, embora não de forma significativa. Também se confirma que a introdução da amplificação sonora não traz grande melhoria e nos lugares da frente, junto ao altar, isto é, perto da fonte sonora, só piora. Esta constatação também é verificada por zona (Figura 5.22).

Tendo em conta que média sem amplificação é 0,28 e com amplificação é 0,30, pode ainda conluir-se

que em ambas as situações (com e sem amplificação) nos pontos 1 e 2 os valores são superiores à média, enquanto que os restantes os valores são inferiores.

Quadro 5.5 – Medição dos valores do RASTI - Sem Amplificação sonora

	Pontos	1ª	2ª	3ª	4ª	Média	Média Zona	Média Total
Zona 1 1/4 Sala	1	0,40	0,40	0,37	0,38	0,39	0,38	
	2	0,35	0,36	0,35	0,37	0,36		
Zona 2 1/2 Sala	3	0,28	0,28	0,28	0,27	0,28	0,26	**0,28**
	4	0,25	0,25	0,27	0,27	0,26		
	5	0,25	0,25	0,24	0,24	0,25		
Zona 3 3/4 Sala	6	0,23	0,21	0,20	0,21	0,21	0,22	
	7	0,23	0,23	0,23	0,21	0,23		

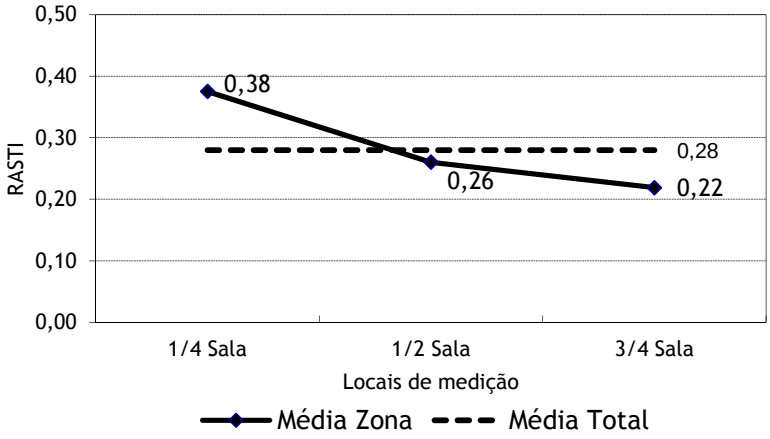


Figura 5.19 – Valores de RASTI sem amplificação sonora

Quadro 5.6 - Valores de RASTI - Com Amplificação sonora

	Posições	1	2	3	4	Média	Média Zona	Média Total
Zona 1 1/4 Sala	1	0,32	0,33	0,33	0,34	0,33	0,33	
	2	0,34	0,32	0,33	0,34	0,33		
Zona 2 1/2 Sala	3	0,30	0,32	0,31	0,30	0,31	0,28	**0,30**
	4	0,28	0,29	0,30	0,28	0,29		
	5	0,27	0,29	0,28	0,27	0,28		
Zona 3 3/4 Sala	6	0,30	0,29	0,31	0,30	0,30	0,29	
	7	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27		

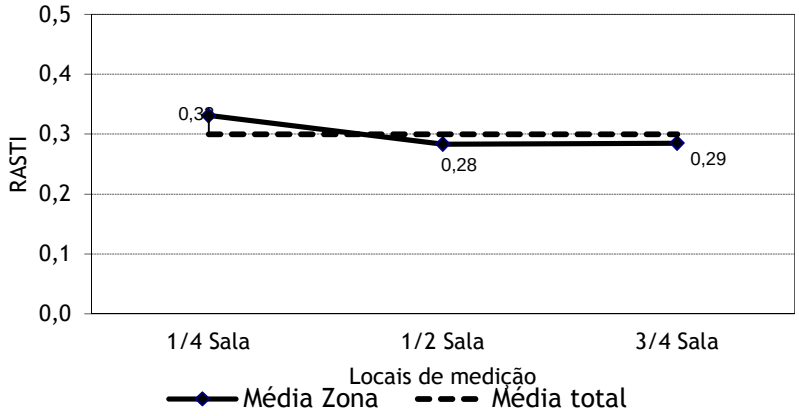
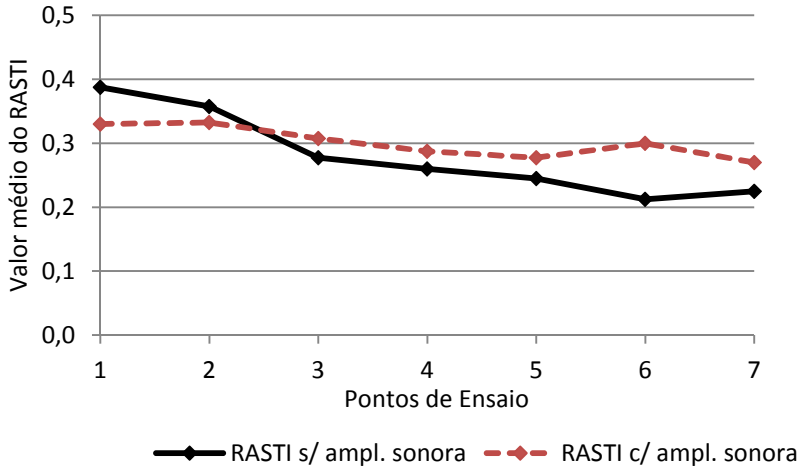


Figura 5.20 - Representação gráfica dos valores de RASTI com amplificação sonora

Quadro 5.7 – Variação do valor médio do RASTI em cada ponto de ensaio com a introdução da amplificação sonora.

Ponto	RASTI s/ ampl. sonora	RASTI c/ ampl. sonora	ΔRASTI = RASTI c/ ampl. - RASTI s/ ampl.
1	0,39	0,33	-0,06
2	0,36	0,33	-0,03
3	0,28	0,31	0,03
4	0,26	0,29	0,03
5	0,25	0,28	0,03
6	0,21	0,30	0,09
7	0,23	0,27	0,05



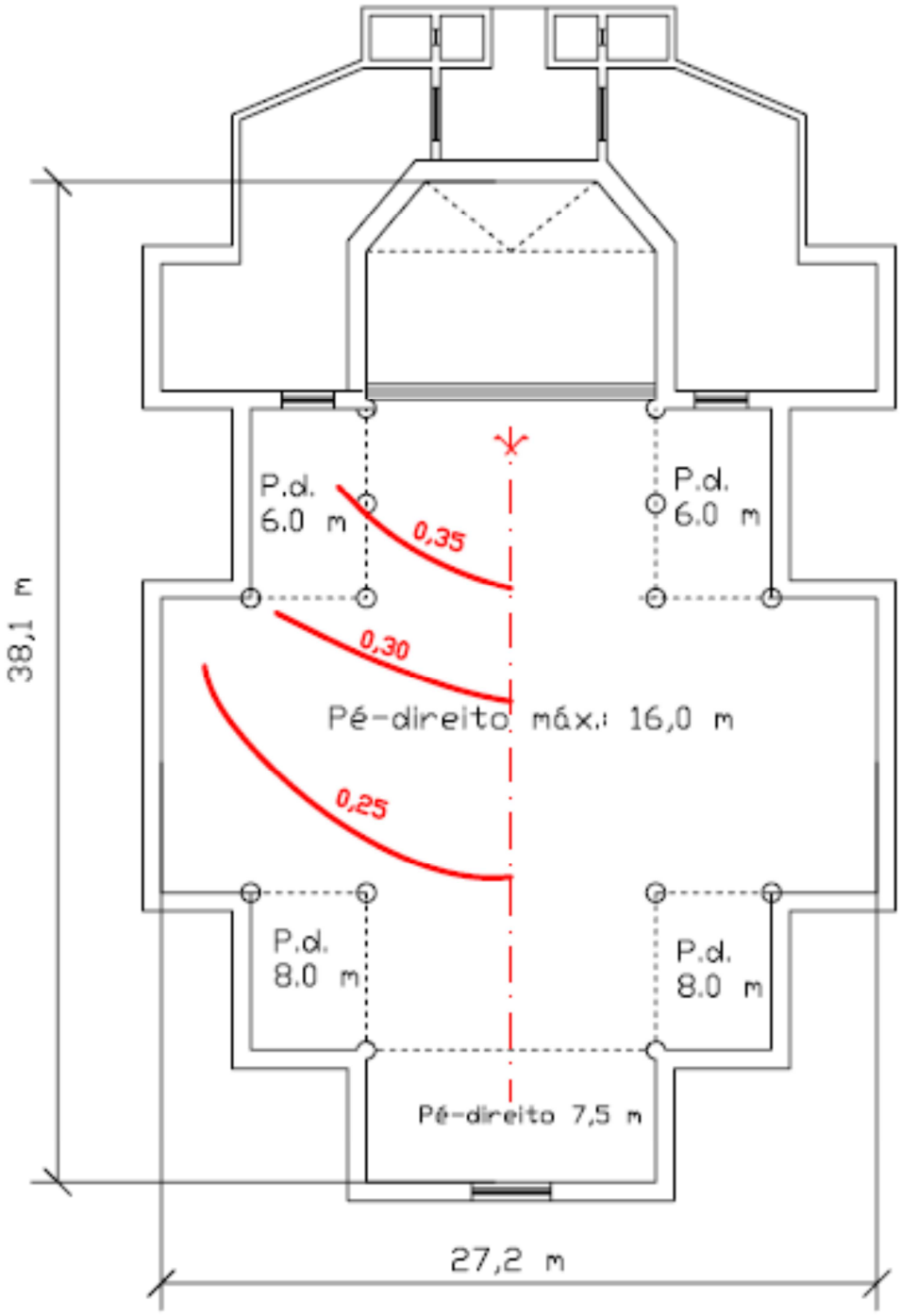


Figura 5.21 – Linhas de igual RASTI no Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

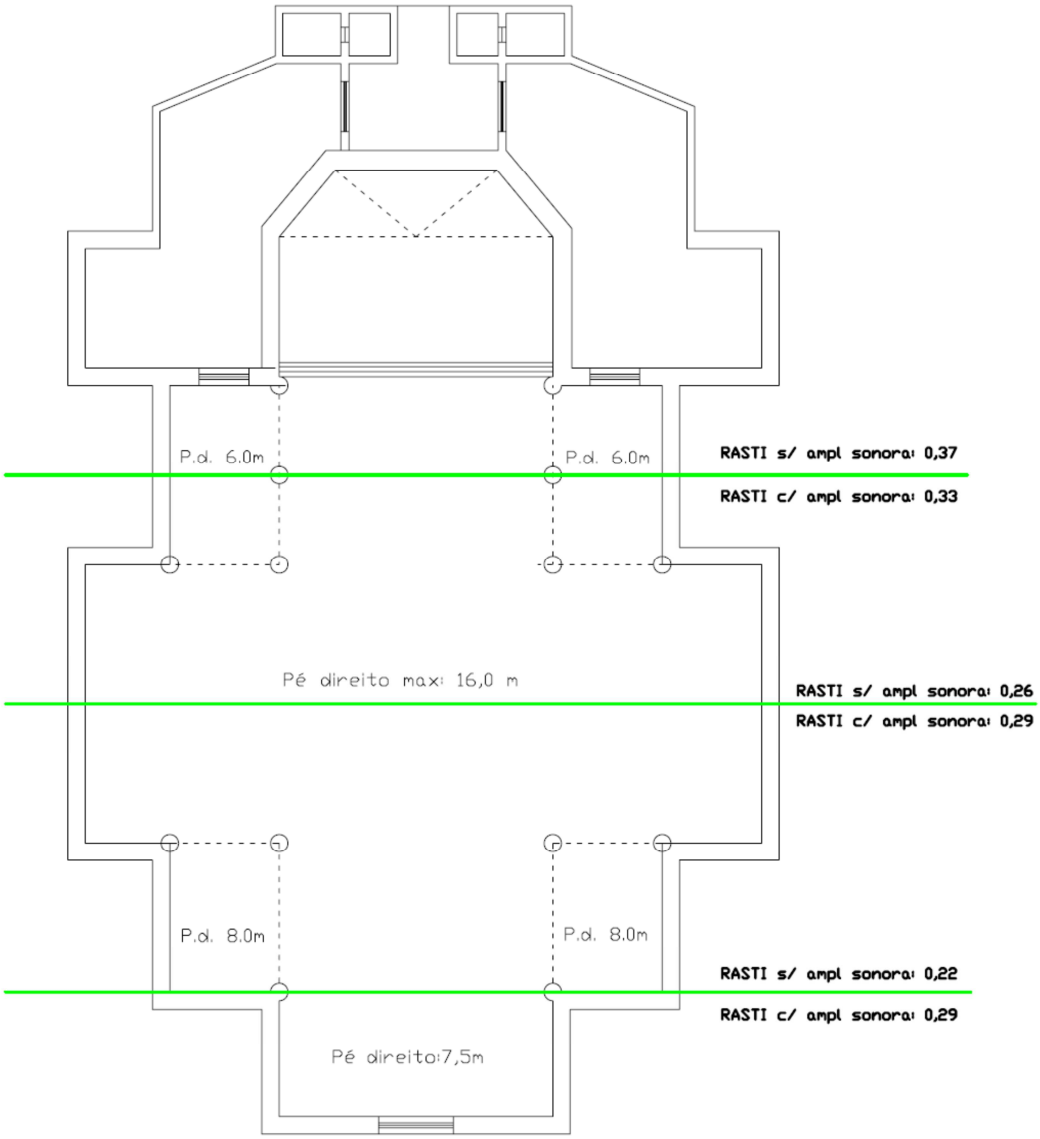


Figura 5.22 – Diferenças dos valores médios de RASTI ao longo da igreja de N.ª Sr.ª da Assunção sem e com amplificação sonora.

5.6. BREVE ANÁLISE SUBJECTIVA

Uma breve e sucinta análise subjectiva foi elaborada a partir da recolha da opinião de três utentes elegidos pela sua assíduidade e participação nas celebrações realizadas no Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção. São eles: o Sr. Dr. Manuel Carneiro, residente em Santo Tirso, que acompanhou toda a construção e conta já com inúmeras participações em festividades do Santuário quer como ouvinte quer como orador; o Sr. Pe Celestino Ramos, que tem sido o principal pregador nas celebrações realizadas no Santuário, e o Sr. Francisco Matias, morador muito próximo do Santuário, que tem acompanhado questões funcionais e técnicas do Santuário e participado activamente nas celebrações quer como ouvinte, fazendo parte simplesmente da assembleia ou integrado nalgum grupo pastoral (como por exemplo leitor etc).

Por parte do Sr. Pe Celestino e do Sr. Dr. Manuel foi mencionado o seguinte:

- A igreja torna-se um lugar muito inóspito a nível acústico pois é muito difícil de se fazer perceber;
- O dia em que funciona melhor é geralmente o dia de Nossa Senhora da Assunção, pois a igreja está muito ocupada e as portas abertas, pelo que é agradável ouvir missa dentro do local.

Acrescentaram também que o problema do som no Santuário é já um problema de raiz e que têm verificado que é facilimente detectado por qualquer participante com comentários do tipo "Ouve-se mal, as palavras não se percebem". Por outro lado acresenta que as entidades, se conformaram com a stuação e que tentam arranjar estratégias de a contornar, como tem feito que é deixar as portas abertas ao Domingo, quando há missa [56, 57].

O Sr. Francisco Matias partilhou da mesma opinião e acrescentou "*É necessário ler muito devagar as leituras para se perceber alguma coisa dentro deste espaço, um grande erro é quando o leitor não tem este cuidado, lê a uma velocidade normal e aí quem está atrás não percebe rigorosamente nada pois ainda está a chegar*." [58].

5.7. COMENTÁRIO FINAL – OBJECTIVA VS SUBJECTIVA

Neste subcapítulo pretende-se confrontar a análise objectiva com a análise subjectiva.

Em suma, verificou-se que o Santuário de N.ª Sr.ª Assunção possui valores de Tempo de Reverberação extremamente elevados e valores de RASTI muito baixos. Ambos os parâmetros medidos são completamente desajustados com os valores recomendados para este tipo de espaços. Esta disparidade dos valores obtidos para o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com os valores ideais só traduz uma problemática a nível acústico desta igreja, facto confirmado pela análise subjectiva.

Por um lado, é mencionado que o dia mais acolhedor é o dia 15 de Agosto. Ora, de facto é um dia festivo em que se tem verificado uma forte adesão, enchendo a igreja de pessoas. Um maior número de pessoas contribui para uma maior absorção sonora e consequente diminuição do Tempo de Reverberação. No caso actual do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção toda a absorção acrescida é favorável. Por outro lado, os participantes descobriram empiricamente que deixar as portas abertas é uma boa estratégia para melhorar a qualidade do som. De facto, as aberturas para o exterior não só fazem diminir as áreas de possíveis reflexões como aumentam substancialmente a absorção sonora (visto que o coeficiente de absorção sonora dos espaços abertos próximo da unidade) permitindo que as ondas sonoras se propaguem para o exterior. Assim, evitam-se mais concentrações e reflexões, diminuindo o Tempo de Reverberação e consequente melhoria da integibilidade da palavra.

O comentário do Sr. Matias também é coerente com os resultados obtidos. A estratégia de "ler devagar resulta melhor" tem sentido e deve-se ao número elevado de reflexões porpocionadas associadas ao elevado Tempo de Reverberação. Deste modo, é provável que à medida que as palavras são lidas, a reverberação de última palavra coicinda com a leitura da palavra seguinte, ou seja, o som demora tanto tempo a extinguir-se, que o atraso das reflexões se mistura com a palavra seguinte. Essa mistura é de tal forma, que só empobrece a integilibidade da palavra, aspecto verificado pelos baixos valores de RASTI. Também é dito que esta verificação é mais notória nos lugares de trás. Este aspecto é comprovado pela variação dos valores dos RASTI sem amplificação sonora ao longo da nave, que empobrece à medida que a distância à fonte aumenta. De facto, uma maior proximidade do altar porpociona uma audibilidade mais clara, pois há uma maior proximidade do som directo, maior amplitude das ondas sonoras.

6

COMPARAÇÃO COM IGREJAS DE SEMELHANTE VOLUMETRIA

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo efectua-se uma comparação do Santuário da N.ª Sr.ª da Assunção com outras de igrejas de semelhante volumetria.

Para tal foram seleccionadas oito igrejas portuguesas de acordo com o seu volume, isto é, que contém um volume próximo (não excedente a uma margem de 20%) do volume da igreja em estudo. São elas: Igreja (nova) de Cedofeita (Porto); Igreja da Lapa (Porto); Mosteiro de Leça do Bailio (Matosinhos); Sé de Silves; Igreja do Mosteiro de Tibães (Concelho de Braga); Igreja da Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia); Igreja de Santa Maria (Marco de Canaveses) e Igreja Matriz de Vila do Conde.

O Quadro 6.1 apresenta alguns parâmetros arquitectónicos destas igrejas incluindo a igreja em estudo e os seus estilos arquitectónicos predominantes. Os valores relativos a estas igrejas foram extraídos da tese de mestrado "Guião da Acústica de Igrejas em Portugal" de Telma Silva [59] e verificada a sua coerência com a tese de Margarida Lencastre "*A inteligibilidade da palavra em igrejas católicas, através de análises de carácter objectivo e subjectivo*" [60].

Quadro 6.1 – Valores arquitectónicos de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção e seu respectivo estilo arquitectónico prodoninate [59, 60]

Igreja	Volume [m^3]	Área [m^2]	Altura máxima [m]	Estilo arquitectónico principal
Santuário da N.ª Sr.ª da Assunção (S.to Tirso)	**9855**	**715**	**16,0**	**Contemporâneo**
Igreja (nova) de Cedofeita (Porto)	8470	966	13,4	Contemporâneo
Igreja da Lapa (Porto)	11423	753	17,0	Neoclássico
Mosteiro de Leça do Bailio (Matosinhos)	9795	611	19,1	Gótico
Sé de Silves (Silves)	10057	746	16,7	Gótico
Mosteiro de Tibães (Braga)	8608	595	19,3	Barroco
Igreja da Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia)	11566	591	35,1	Renascença
Igreja de Santa Maria (Marco de Canaveses)	8994	549	16,5	Contemporâneo
Igreja Matriz de Vila do Conde	8408	802	12,5	Manuelino

6.2. COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS ACÚSTICOS

6.2.1.RASTI

O Quadro 6.2 e Figura 6.1 apresentam os valores médios do RASTI obtidos para as referidas igrejas. A informação destes valores também foi retirada do "Guião da Acústica de Igrejas em Portugal" de Telma Silva [59]. Todos os valores apresentados foram obtidos por avaliação *in situ*.

Quadro 6.2 – Valores médios de RASTI de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção [59]

Igreja	RASTI médio
Santuário da N.ª Sr.ª da Assunção (S.to Tirso)	**0,29**
Igreja de Cedofeita (Porto)	0,41
Igreja da Lapa (Porto)	0,40
Mosteiro de Leça do Bailio (Matosinhos)	0,39
Sé de Silves (Silves)	0,34
Mosteiro de Tibães (Braga)	0,45
Igreja da Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia)	0,34
Igreja de Santa Maria (Marco de Canaveses)	0,22
Igreja Matriz de Vila do Conde	0,49

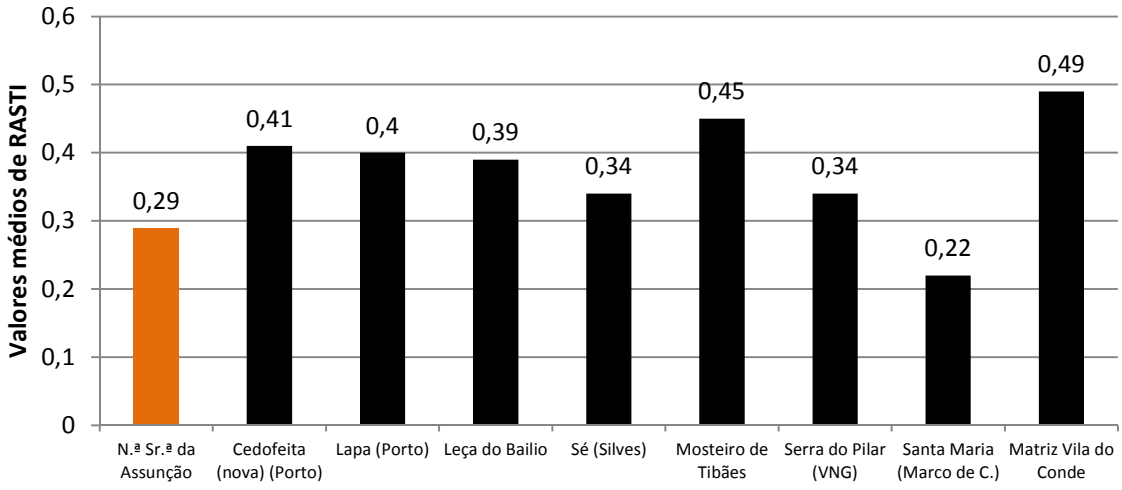


Figura 6.1 – Valores médios de RASTI de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

Uma observação do Quadro 6.2 e da Figura 6.1 permite concluir que, na generalidade, o Santuário da N.ª Sr.ª da Assunção apresenta um valor médio de RASTI extramente baixo quando comparado com outras igrejas de idêntico volume. Há apenas uma excepção, a igreja de Santa Maria (Marco de Canaveses), pois esta possui valor médio de RASTI ainda inferior e pior. A igreja de Santa Maria caracteriza-se como uma igreja do estilo contemporâneo (finais do séc. XX), maioritariamente constituída por superfícies lisas e reflectoras, algo semelhante à constituição construtiva interior do

Santuário de N.ª Sr.ª Assunção.

Conclui-se assim que as duas piores igrejas a nível de valor médio de RASTI são duas igrejas contemporâneas construídas nos últimos 70 anos. Este aspecto vem a demonstrar uma crescente problemática a nível acústico de igrejas.

Pode ainda ser feita uma análise comparativa dos valores médios de RASTI em função do volume (Figura 6.2).

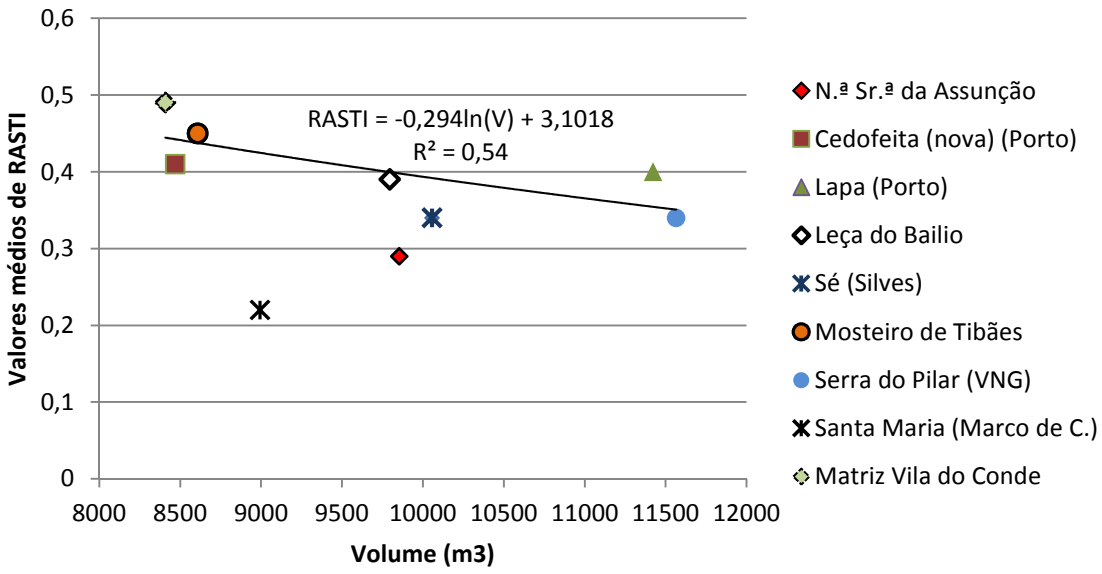


Figura 6.2 – Valores médios do RASTI em função do Volume de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

Naturalmente, o Volume condiciona a qualidade acústica de um espaço (embora não seja o único factor determinante). Um maior volume suscita normalmente maior área de superfícies, por consequente maior número de reflexões, que se traduzem em geral numa menor integibilidade da palavra. No entanto, na Figura 6.2 pode-se constar que as duas piores igrejas a nível de integibilidade da palavra não são as mais volumosas. Aliás, excluindo as duas piores igrejas referidas, verifica-se, uma curva de aproximação dos pontos tendencialmente decrescente do valor médio de RASTI à medida que o Volume aumenta. Mais uma vez, o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção e a Igreja de Santa Maria identificam-se como igrejas contemporâneas que apesar de não possuírem um grande volume, apresentam baixos valores médios de RASTI, isto é, caracterizam-se com um deficiente comportamento acústico para a palavra. Desta forma, dado que o problema acústico não está no volume, a hipótese da causa é então dirigida para a arquitectura do próprio espaço e materiais de constituição construtiva associada ao estilo arquitectónico em que estas igrejas se inserem.

6.2.2. Tempo de Reverberação

Neste subcapítulo faz-se a comparação entre o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com outras igrejas de semelhante volumetria relativamente aos valores médios dos Tempos de Reverberação, para o grupo de frequências médias (500 e 1.000 Hz). Para esta análise apenas foram seleccionadas seis das igrejas mencionadas no subcapítulo anterior, uma vez que apenas se consideraram válidas para esta análise as

igrejas com valores medidos *in situ*.

Sugere-se a observação do Quadro 6.3 e da Figura 6.3 que apresentam os valores de Tempo de Reverberação [s] (médio 500 e 1.000 Hz) para as seis igrejas mencionadas.

Quadro 6.3 – Valores médios do Tempo de Reverberação (500 e 1.000 Hz) de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção

Igreja	**Tempo de Reverberação médio (500 e 1000 Hz) [s]**
Santuário da N.ª Sr.ª da Assunção (S.to Tirso)	**11,0**
Igreja nova de Cedofeita (Porto)	3,1
Igreja da Lapa (Porto)	5,7
Mosteiro Leça do Bailio (Matosinhos)	4,4
Sé de Silves (Silves – Faro)	3,9
Mosteiro de Tibães (Braga)	2,7
Igreja Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia)	7,8

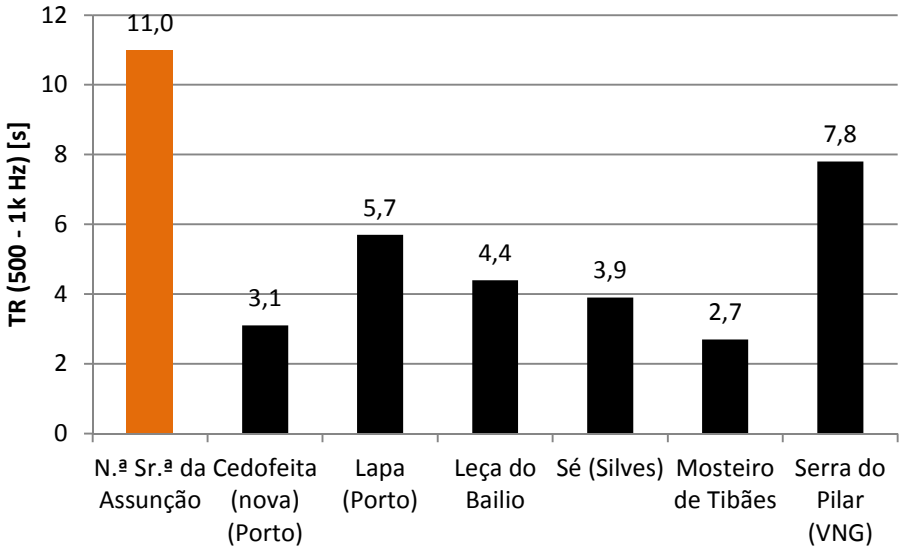


Figura 6.3 – Valores médios do Tempo de Reverberação dos (500-1000 Hz) [s]

É possível observar que o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção apresenta um Tempo de Reverberação (500-1000 Hz) extremamente elevado em relação a outras igrejas de volume semelhante. A Igreja de Serra do Pilar e a Igreja da Lapa apresentam valores elevados de tempos de reverberação, no entanto o valor do Tempo de Reverberação do Santuário em estudo é quase o dobro do valor destes, aspecto propulsor para uma deficiente qualidade acústica do Santuário.

À semelhança do que se fez no subcapítulo anterior, pode ainda ser feita uma análise dos valores do Tempo de Reverberação [500-1k Hz] das diferentes igrejas em função do Volume (Figura 6.4).

Neste caso, observa-se que os valores seguem tendencialmente uma curva crescente a nível de aumento de Tempo de Reverberação em função do volume. No entanto, o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção é uma notória excepção a esta tendência, pois com volume próximo das igrejas comparadas, apresenta um valor de Tempo de Reverberação muito elevado (quase o triplo do expectável para o seu Volume). É de referir também que este se trata de um valor ainda não atingido por nenhuma igreja registada em [59].

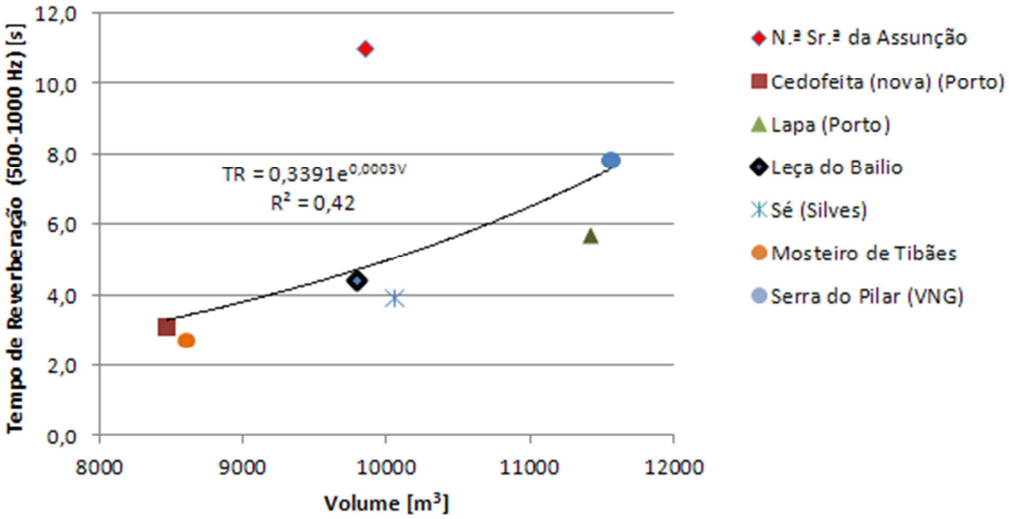


Figura 6.4 – Valores médios do Tempo de Reverberação [s] (500-1k Hz) em função do Volume de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

6.2.3. RASTI *VS* TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Finalmente faz-se uma análise dos valores médios de RASTI com os Tempo de Reverberação (500-1000 Hz) das igrejas mencionadas correlacionando estes dois parâmetros graficamente.

Na Figura 6.5 é possível observar a posição de cada uma das igrejas mencionadas relativamente ao RASTI e ao Tempo de Reverberação.

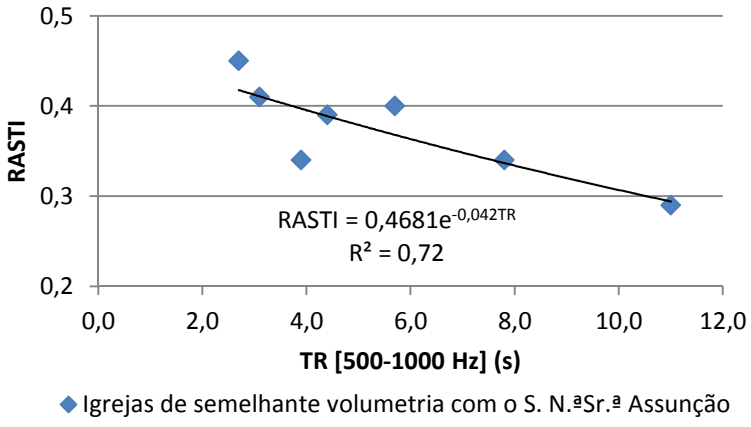


Figura 6.5 – Valores médios do Tempo de Reverberação [s] (500-1k Hz) em função dos valores médios do RASTI de igrejas de semelhante volumetria com o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

De forma geral observa-se que, uma diminuição do Tempo de Reverberação coincide com um aumento do RASTI. Esta elevada correlação dos pontos (R^2 = 0,72) faz sentido que exista. Um

aumento do Tempo de Reverberação acrescenta reflexões ao som, o que contribui para "mascarar os sons". É um aspecto que geralmente se torna favorável à música ou canto vocal, mas só dentro de determinados limites de TR. Uma análise subjectiva diz que com um tempo de reverberação mais elevado faz com que a música "soe" melhor. No entanto, o facto de "mascarar os sons" traduz-se numa menor integibilidade da palavra, daí que um aumento do Tempo de Reverberação coincide com um menor RASTI. Pode-se dizer que de forma geral, estes dois parâmetros acústicos relacionam-se em sentidos contrários.

7

ANÁLISE MULTI-CRITÉRIO

7.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se a aplicação de dois métodos multi-critério ao Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção. Estes métodos permitem obter uma classificação final quantitativa e qualitativa do Santuário traduzindo a sua qualidade acústica por um único índice. Desta forma é possível completar a análise acústica partindo dos parâmetros isolados avaliados *in situ*.

7.2. MÉTODO MULTICRITÉRIO – *SINGLE NUMBER GLOBAL INDEX* (W_G)

7.2.1. FORMULAÇÃO GERAL

Este primeiro método consiste em traduzir pelo parâmetro W_G (*Single number global index)* o valor da qualidade acústica do Santuário de N.ª Sr.ª Assunção. Foi desenvolvido pelos autores polacos Zbigniew Engel e Krzysztof Kosala e foi publicado na revista "Archives of Achoustics" n.º 29 em 2004 [61]. Nas primeiras versões do método, utilizava-se a ponderação de vários parâmetros atribuindo uma gama de pesos de modo mais complexo. Posteriormente Kosala desenvolveu uma versão simplificada do método em "*A single number index to assess selected acoustic parameters of churches with redundant information*" [62], que será a metodologia adoptada neste trabalho. Segue-se a fórmula geral do método descrita pela equação (7.1).

$$W_{Gi} = \sum_{j=1}^{3} x_j W_{ji} = 0{,}39 \cdot W_R + 0{,}44 \cdot W_M + 0{,}33 \cdot W_S \quad (7.1)$$

As incógnitas apresentadas equação (7.1) correspondem aos índices parciais que compõem esta avaliação e são:

W_R *(Reverberation index)* – Índice de reverberação;
W_M *(Music sound quality index)* – Índice de qualidade musical;
W_S *(intelligibility of speech index*) – Índice de integibilidade da palavra.

A classificação do índice global W_G pode ser: *má* ($0 \leq W_G < 0{,}5$); *pobre* ($0{,}5 \leq W_G < 0{,}65$); *boa* ($0{,}65 \leq W_G < 0{,}80$); *muito boa* ($0{,}80 \leq W_G \leq 1{,}0$).

7.2.2. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REVERBERAÇÃO (W_R)

Em [62] recomenda-se que o índice de reverberação seja simplificado da forma apresentada pela

equação (7.2).

$$W_R = 1 - \frac{|TR - T_p|}{4{,}5} \qquad (7.2)$$

onde, *TR* - Tempo de Reverberação real medido com a igreja vazia [s] e T_p - tempo de reverberação [s] especialmente conferido para as igrejas Católicas Romanas, que pode ser obtido pela equação (7.3).

$$T_P = 0{,}24 \ln(V_s) - 0{,}24 \qquad (7.3)$$

onde V_s – Volume interior da igreja [m^3].

O índice de reverberação é um valor compreendido no intervalo de 0 a 1 no pressuposto que TR é menor ou igual T_p + 4,5. Se TR for igual a T_p então o índice de reverberação será 1, o que significa que a igreja tem boas propriedades acústicas correspondentes ao valor de referência. Se TR for igual a T_P+4,5 então W_R será 0, ou seja, a igreja tem propriedades acústicas más. Se TR > T_P+4,5, a equação dará um valor negativo, pelo que se assume W_R = 0, pois significa que o Tempo de reverberação excedo em mais 4,5 s o tempo de reverberação pretendido.

Dado que o autor não define em que frequências o valor TR se refere, assume-se que este corresponde à média dos Tempos de Reverberação nas frequências 500 e 1000 Hz. No caso da igreja de N.ª Sr.ª Assunção, tem-se então um valor de *TR* de 11,0 s. Tendo em conta um Volume de 9855 m^3 o T_p tem um valor de 1,97 s. Se se adicionar 4,5 s a T_P, constata-se que este é inferior a *TR*, isto é, TR > Tp+4,5 s, logo considera-se um índice de reverberação, W_R = 0.

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE MUSICAL (W_M)

Este índice pretende avaliar a qualidade acústica numa igreja através do som da música. De modo a simplificar o procedimento de cálculo deste índice foi proposto em [62] que este apenas dependa de um índice de parâmetro acústico, a claridade C_{80} (ver item 2.6.3) como apresentado em (7.4).

$$W_M = \begin{cases} 0 & \text{para } -15 < C_{80} < -15\,\text{dB} \\ 0{,}04C_{80} + 0{,}6 & -15 \le C_{80} \le -10\,dB \\ 0{,}06C_{80} + 0{,}8 & -10 \le C_{80} \le -5\,\text{dB} \\ 0{,}1C_{80} + 1 & -5 \le C_{80} < 0 \\ 1 & 0 \le C_{80} < 5\,\text{dB} \\ -0{,}12C_{80} + 1{,}625 & 5 \le C_{80} < 10\,\text{dB} \\ -0{,}083C_{80} + 1{,}25 & 10 \le C_{80} < 15\,\text{dB} \end{cases} \qquad (7.4)$$

A Claridade, C_{80}, para o Santuário de N.ª Sr.ª Assunção, pode ser estimada recorrendo à equação linear apresentada em [22], formulada a partir de parâmetros arquitectónicos tal como descreve a equação (7.5).

$$C_{80} = 0{,}864 - 0{,}217 \cdot L_{nave} - 0{,}404 \cdot H_{média} + 35{,}121 \cdot \alpha_{médio} \qquad (7.5)$$

Sendo:

- L_{nave} a Largura da nave (m);

- $H_{média}$ a Altura média (m);
- α o coeficiente de absorção sonora médio.

Tomando como valores da largura da nave, altura média e coeficiente de absorção sonora de 27,2 m, 13,8 m e 0,05 respectivamente, obtém-se um valor para claridade, C_{80} igual a -8,9 dB. Assim, seguindo a expressão (7.4), obtém-se um valor de W_M de 0,27.

7.2.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE INTEGIBILIDADE DA PALAVRA (W_S)

A versão inicial deste método multi-critério, o índice da integibilidade da palavra, W_G, era determinado recorrendo a três parâmetros auxiliares (ALCONS, C_{50} e RASTI). Actualmente, Kosala propõe que este índice dependa apenas de um único parâmetro acústico, o índice mais característico da integibilidade da palavra, ou seja, RASTI [63]. Assim, o valor de W_S irá variar numa escala de 0 (integibilidade da palavra *péssima*) a 1 (integibilidade da palavra *óptima*) tal como o RASTI.

Como o valor médio de RASTI para a igreja em estudo foi de 0,29, então o valor de W_S será também igual a 0,29.

7.2.4. CLASSIFICAÇÃO FINAL

O valor do índice W_G pode então ser obtida de (7.1) pela seguinte expressão:

$$W_G = 0{,}39 \cdot W_R + 0{,}44 \cdot W_M + 0{,}33 \cdot Ws = 0{,}39 \cdot 0 + 0{,}44 \cdot 0{,}27 + 0{,}33 \cdot 0{,}29 = 0{,}21$$

Assim, conclui-se que a classificação do Santuário de N.ª Sr.ª Assunção possui uma classificação de *Má Qualidade Acústica Interior*.

7.3. MÉTODO MULTICRITÉRIO – QUALIDADE ACÚSTICA EM IGREJAS (QAI)

7.3.1. INTRODUÇÃO

Este segundo método visa também a obtenção de um valor único que classifica a qualidade acústica da igreja. Deste modo foi estabelecido o parâmetro QAI (Qualidade Acústica em Igrejas) integrado num método multi-critério que foi desenvolvido por José Loureiro em "*Metodologia multi-critério para análise da qualidade acústica em igrejas*" [64].

Este método consiste na divisão de dois critérios em igrejas: *palavra* e *música*, sendo respectivamente os critérios c1 e c2. A ponderação dos pesos a estes critérios considera que c1 (*palavra*) tem um peso de 65%, e os restantes 35% destinam-se à *música*. Esta distribuição de pesos baseia-se na filosofia que uma igreja é um espaço fundamentalmente dedicado à palavra. Assim o valor de QAI é obtido pela expressão (7.6).

$$QAI = 0{,}65 \cdot c1 + 0{,}35 \cdot c2 \qquad (7.6)$$

A classificação do critério c1 é feita somente através do parâmetro *P80*. Este parâmetro foi desenvolvido no trabalho de Margarida Lencastre "*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de análise de carácter Subjectivo e Objectivo"* [60]. Se for lida uma lista de 80 palavras, o parâmetro P80 significa a percentagem de acertos, isto é a quantidade percentual de palavras que foram correctamente compreendidas por cada auditor dessa mesma lista. É um valor compreendido ente 0 e 1.

No que respeita ao critério c2, há um conjunto de cinco parâmetros acústicos subjectivos que traduzem

a qualidade musical, com os seguintes pesos:

- (CLA) – Clareza do discurso musical – 12,95%;
- (REV) – Reverberância – 8,05%;
- (INTM) – Intimidade – 5,60 %;
- (DIR) – Direccionalidade – 7,35%;
- (EQT) – Equilíbrio Tímbrico – 1,05%.

Deste modo o parâmetro QAI encontra-se formalizado tal como indica a expressão (7.7).

$$QAI = 0{,}65P80 + 0{,}1295CLA + 0{,}0805REV + 0{,}0560INTM + 0{,}0735DIR + 0{,}0105EQT \quad (7.7)$$

O QAI encontra-se num intervalo entre 0 e 1 e de acordo com o resultado obtido poder-se-á expressá-lo de forma qualitativa de acordo com o Quadro 7.1 [64].

Quadro 7.1 – Classificação do QAI [64]

QAI	Qualidade acústica subjectiva
≤ 0,50	Péssima
]0,50:0,70]	Má
]0,70:0,80]	Suficiente
]0,80:0,90]	Boa
> 0,90	Excelente

7.3.2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS OBJECTIVOS E SUBJECTIVOS

Existem diversas formas de prever, se não for possível medir, os parâmetros subjectivos através de outros parâmetros característicos da igreja. Salientam-se duas formas fundamentais de previsão: a partir de parâmetros acústicos objectivos ou a partir de parâmetros arquitectónicos do espaço em estudo. Nesta avaliação dá-se preferência à primeira forma de previsão, isto é, correlação dos parâmetros subjectivos com os parâmetros acústicos objectivos. Isto porque procurou-se utilizar modelos de previsão que estivessem o mais directamente relacionados com os parâmetros ensaiados.

Seja qual o método a utilizar, os parâmetros acústicos subjectivos estimados devem de estar num intervalo de 0 a 7 para ser verificada a sua validade. Após obter o resultado de 0 a 7 relativo a cada parâmetro, este valor é convertido para uma escala normalizada que varia entre 0 e 1 de acordo com o Quadro 7.2.

A tese "*Estudo acústico de igrejas portuguesas através de parâmetros subjectivos*" de António Morgado [65] sugere diversos modelos de correlação entre os parâmetros acústicos subjectivos com os parâmetros acústicos objectivos. O Quadro 7.3 apresenta os modelos de previsão seleccionados para cada parâmetro nesta aplicação do método multi-critério, o seu valor obtido e o seu valor normalizado. Como já referido os modelos foram seleccionados na ideologia de usar os métodos mais directamente relacionados com os parâmetros acústicos objectivos quanto possível. Os parâmetros objectivos a utilizar são:

- Tempo de Reverberação (TR) – usou-se o valor de TR (500-1000 Hz) = 11,0 s;

- Factor Intensidade Sonora (G) – fez uma estimativa de acordo com o método de previsão apresentado em [22] e que se segue na expressão:

$$G = 22{,}918 - 0{,}306 L_{nave} - 24{,}520 \cdot \alpha_{médio} = 13{,}4 \ dB$$

Onde L_{nave} é a Largura da Nave (m) e α médio o coeficiente de absorção sonora médio. Tomando L_{nave} o valor de 27,2 m e $\alpha_{médio}$=0,05, obtém-se o valor de G de 13,4 dB.

Quadro 7.2 - Escalas de conversão para a normalização (_N) dos atributos originais.

Valor	Valor Normalizado	Valor	Valor Normalizado	Valor	Valor Normalizado	Valor	Valor Normalizado	Valor	Valor Normalizado
CLA	**CLA_N**	**REV**	**REV_N**	**INTM**	**INTM_N**	**DIR**	**DIR_N**	**EQT**	**EQT_N**
1	0,0	1	0,0	1	0,0	1	0,0	1	0,00
2	0,1	2	0,1	2	0,1	2	0,1	2	0,17
3	0,3	3	0,4	3	0,3	3	0,4	3	0,33
4	0,5	4	0,7	4	0,6	4	0,5	4	0,50
5	0,7	5	1,0	5	0,8	5	0,7	5	0,67
6	0,9	6	0,7	6	0,9	6	0,9	6	0,83
7	1,0	7	0,2	7	1,0	7	1,0	7	1,00

Quadro 7.3 – Modelos de previsão de relação entre os parâmetros acústicos subjectivos e objectivos, valores da conversão e valores normalizados [64, 65].

Parâmetro	Modelo de Previsão	Valor obtido	Valor normalizado_N#
Clareza do discurso musical (CLA)	$CLA = 8{,}108 - 1{,}162 \cdot TR + 0{,}055 \cdot TR^2$	1,98	0,098
Reverberância (REV)	$REV = 1{,}709 + 2{,}417 \log(TR)$	4,23	0,769
Intimidade (INTM)	$INTM = 3{,}735 - 0{,}380\ TR + 0{,}150 \cdot G$	1,57	0,057
Dirccionalidade (DIR)	$DIR = 6{,}714 - 0{,}693 \cdot TR + 0{,}028 \cdot TR^2$	2,48	0,244
Equilíbrio Tímbrico (EQT)	$EQT = 5{,}971 - 0{,}329 \cdot TR + 0{,}050 \cdot G$	3,02	0,333

Conforme Quadro 7.3

De modo a prever o parâmetro P80, usou-se a fórmula que o relacionada com parâmetros acústicos objectivos [65]:

$$P80 = -62{,}224(RASTI)^2 + 88{,}652(RASTI) + 48{,}089$$

Tendo em conta o valor de RASTI obtido *in situ* de 0,29 obteve-se um valor do parâmetro P80 de 68,6. Para obter o valor normalizado, P80_N, sugere-se seguinte conversão adaptada de David Egan em "*Architectural Acoustics*"[66] que se apresentada na Figura 7.1.

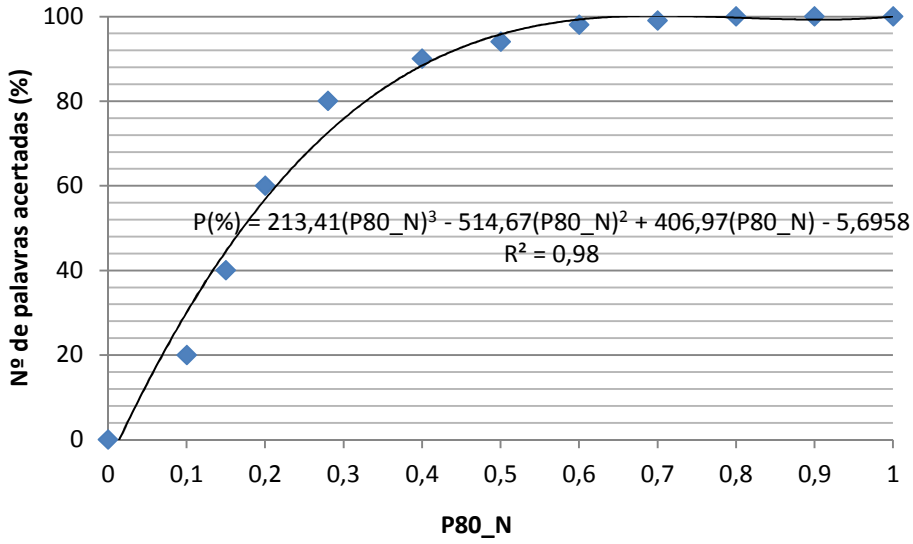


Figura 7.1 – Conversão de P_80 para P80_N [adaptado de [66]].

Aplicando a expressão polinomial que mais se ajusta à curva de pontos apresentada obtém-se um valor de P_80N igual a 0,20.

7.3.3. Classificação Final - QAI

Recorrendo à anteriormente apresentada e aplicando os valores normalizados obtidos nos parâmetros subjectivos correspondentes obtém-se o seguinte:

$$QAI = 0{,}65 \cdot 0{,}20 + 0{,}1295 \cdot 0{,}098 + 0{,}085 \cdot 0{,}769 + 0{,}0560 \cdot 0{,}057 + 0{,}0735 \cdot 0{,}244 + 0{,}0105 \cdot 0{,}333 = 0{,}23$$

Deste modo obtém um valor de QAI de 0,23 e de acordo com o Quadro 7.1 conclui-se que o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção contém "*Péssima Qualidade Acústica de Igreja*".

7.3.4. Comentário Final

No capítulo 5 constatou-se quer por análise objectiva, quer por análise subjectiva, a problemática que o Santário de N.ª Sr.ª da Assunção possue a nível acústico. O elevado Tempo de Reverberação, os baixos valores de RASTI e as queixas por parte dos participantes frequentes em actividades realizadas no Santuário são as principais evidências desta constatação.

Neste capítulo, recorrendo a dois métodos multi-critério, obtiveram-se os índices W_G e QAI que se traduzem em *Má Qualidade Acústica Interior* e *Péssima Qualidade Acústica Interior*, respectivamente. De facto, não só estes dois índices estão coerentes com o que seria de esperar no Capítulo 5, como é possível quantificar o quão grave é o problema da acústica no Santuário de N.ª da Assunção, algo que ainda no Capítulo 5 não era permitido.

No entanto, é importante referir a distribuição dos pesos, que tanto na primeira como na segunda metodolia pode condicionar em muito resultado final valor dos índices. Por exemplo o facto de se atribuir maior ou menor importância à música ou à palavra pode ser um tanto subjectivo. No entanto ambas induzem a valores semelhantes, não só entre si, mas com o que seria de esperar com os resultados obtidos no quinto capítulo. Isto permite concluir que distribuição de pesos entre ambos e

que ambas as metodologias se encontram bem empregues.

Mais uma vez, agora de forma mensurável, conclui-se que o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, exemplar de uma igreja do séc XX, possui uma qualidade acústica desaquada ao tipo de função que possui.

8

SUGESTÕES DE MELHORIA ACÚSTICA

8.1. INTERVENÇÕES ACÚSTICAS

8.1.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta algumas sugestões que visam melhorar a acústica do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção.

Existem fundamentalmente dois campos de intervenção na melhoria do comportamento acústico de um local, designadamente a correcção acústica e o isolamento sonoro.

Entende-se por correcção acústica o conjunto de intervenções acústicas num dado espaço no que respeita ao som aí emitido [3].

Isolamento sonoro refere-se ao tratamento da envolvente de um compartimento no que respeita a ruídos de/para locais contíguos a esse compartimento [3].

Como já foi observado e será melhor explicitado posteriormente, o Santuário de N.ª Sr.ª Assunção possui um baixo ruído de fundo, e portanto, admite-se um bom isolamento sonoro da envolvente. Assim, neste capítulo foca-se a atenção para uma intervenção a nível de correcção acústica que se apresenta de seguida.

8.1.2. CORRECÇÃO ACÚSTICA

Na correcção acústica trata-se sobretudo de actuar nos diversos elementos e revestimentos interiores de uma determinada sala alterando a absorção sonora ou intervindo na difusão acústica. Uma boa correcção acústica passa por "*colocar os materiais certos nos sítios certos*" tendo em mente se o objectivo é aumentar ou diminuir o tempo de reverberação, os níveis sonoros e outros parâmetros que podem estar directa ou indirectamente relacionados com estes (e serem consequentemente melhorados à custa dos primeiros).

8.2. PROPOSTA DE CORRECÇÃO ACÚSTICA DO SANTUÁRIO DE N.ª SR.ª ASSUNÇÃO

8.2.1. IDENTIFICAÇÃO DAS PATOLOGIAS ACÚSTICAS

O Santuário de N.ª Sr.ª Assunção tem como problema mais grave, o enorme Tempo de Reverberação que apresenta (11,0 s nos 500 a 1000 Hz e 9,7 s nos 500 a 2000 Hz). Um grande volume do espaço

interior da igreja, um elevado pé-direito, alguns espaços acoplados, os materiais utilizados como revestimentos proporcionando superfícies muito lisas e reflectoras com um coeficiente de absorção sonora muito baixo e ausência de elementos absorventes, são as causas de tão elevado tempo de reverberação.

Naturalmente, as mencionadas características acústicas do próprio local também afectam fortemente a integibilidade da palavra como se pode observar nos valores obtidos do RASTI (ver item 5.5).

Relativamente ao ruído de fundo da igreja, como já mencionado, este manifestou valores baixos. É um aspecto que advém não só do facto do ruído exterior não ser excessivo, pois o tráfego na envolvente não é muito intenso, mas também, da elevada espessura das paredes, do seu material de constituição (pedra), da presença de relativamente poucos vãos envidraçados. Torna-se legítimo assumir que o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção apresenta um bom isolamento sonoro, que é um ponto a favor de uma boa qualidade acústica global da igreja, e como tal não constitui anomalia acústica.

Em suma, os principais problemas acústicos do Santuário são o elevado Tempo de Reverberação e baixo valor de RASTI. Estes dois problemas estão directamente relacionados com a correcção acústica.

8.2.2. PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO

Dado que o elevado tempo de reverberação é o principal problema, este será o ponto focal da proposta de intervenção acústica. Seguindo esta linha de pensamento, os elementos a actuar serão as superfícies reflectoras da igreja, tomando em atenção manter, tanto quanto possível, a estética do local. Assim, a parte inferior das paredes, constituída por azulejos, exclui-se desta possível actuação.

Um factor problemático é a existência de alguns espaços acoplados. A sua presença não pode ser modificada, uma vez que constitui a arquitectura do local, mas a sua absorção interior pode ser afectada. Outro aspecto é a forma em cúpula estendida do altar do santuário. Esta podia tornar-se um factor positivo se a igreja tivesse um tempo de reverberação baixo pois poderia ajudar a "difundir" o som para a assembleia. No entanto, com um tempo de reverberação tão alto, só contribui para o agravamento das reflexões e, por sua vez, para o agravamento do Tempo de Reverberação.

Estudanto então solução de aumento da absorção sonora, recorre-se a materiais absorventes existentes do mercado. Ao aplicar determinado material há que ter em atenção as frequências em que este actua. Existem diversas soluções no mercado que podem ser organizadas pela sua aptidão de absorção sonora nas gamas de frequências (baixas, médias ou altas) (ver item 2.7).

Como se verá em seguida, as soluções apresentadas, como se verá de seguida, têm especial aptidão para absorver nas médias e altas frequências. Estas encaixam-se na gama de frequências mais importantes da fala humana, o que significaria que estas soluções vão actuar melhor nos principais causadores da perda de integibilidade.

Devido à dificuldade da sua execução, coloca-se de parte a utilização de fixSugere-se então como primeira solução o recurso a celulose projectada do tipo *K-13* [67]. Cada tipo de solução apresenta coeficientes de absorção sonora próprios dependendo da espessura e das variantes do produto. O Quadro 8.1 apresenta os valores médios dos coeficientes de absorção sonora deste tipo de material em função da variante e da espessura.

A aplicação deste produto faz-se projectando flocos de celulose acompanhados de injecção de cola. Os tipos *Standard, Special* e *fc* variam em função da granulometria dos grãos aplicados repercutindo-se no acabamento final. A solução *K-13 fc* é a que apresenta maior fineza dos grãos, sendo aquela que

concede um resultado final "com menos flocos" ou mais liso. Por outro lado a *K-13 Standard* possui maior granulometria dos grãos sendo a solução *K-13 Special* uma solução intermédia. Um outro aspecto variável é a absorção sonora em cada banda de frequência. Repara-se que a solução *K-13 fc* absorve melhor do que as outras opções na gama de frequência centrada em 125 Hz, no entanto, nas restantes frequências o valor não varia muito. Mas este aspecto da absorção sonora não é muito significativo, como se pode observar no Quadro 8.1.

A distinção entre estas três diferentes modalidades de *K-13* é mais visível a "olho nu". Na Figura 8.1 pretende-se demonstrar as diferenças entre os três tipos com registo fotográfico de amostras.

Quadro 8.1 – Valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *K-13* para cada banda de frequência em função da espessura e tipo de textura [adaptado de [67]]

Tipo	**Espessura [mm]**	**Banda de Frequência [Hz]**						***NRC***
		125	250	500	1.000	2.000	4.000	
K-13 standard	19	0,06	0,19	0,55	0,89	0,91	0,93	0,64
	25	0,08	0,29	0,75	0,98	0,93	0,96	0,74
	38	0,18	0,50	0,95	1,00	1,00	0,97	0,86
	50	0,29	0,67	1,00	1,00	1,00	0,97	0,92
	76	0,70	0,95	1,00	0,85	0,85	0,90	0,91
K-13 special	13	0,09	0,22	0,58	0,79	0,98	1,00	0,64
	16	0,10	0,35	0,83	0,88	0,99	1,00	0,76
	19	0,09	0,35	0,87	0,87	1,00	1,00	0,77
	25	0,14	0,54	0,93	1,00	1,00	1,00	0,87
	32	0,18	0,60	0,98	1,00	1,00	1,00	0,90
K-13 fc	12	0,15	0,16	0,46	0,87	1,00	1,00	0,62
	19	0,18	0,27	0,67	1,00	1,00	1,00	0,74
	25	0,22	0,38	0,88	1,00	1,00	1,00	0,82



Figura 8.1 - Amostras dos materiais absorventes *K-13 Standard* (esquerda), *K-13 Special* (meio) e *K-13 fc* (direita) [Fotos da autora]

Um outro material susceptível de utilização é o *BASWAphon* [68]. Este consiste em painéis de lã mineral que são colados sobre uma base (betão, gesso cartonado, etc.). Neste painel é barrada uma massa mineral até se obter uma superfície contínua. A espessura total do sistema é dada apenas em função do painel de base. No Quadro 8.2 apresentam-se os valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *BASWAphon* para cada banda de frequência em função da espessura e tipo de acabamento.

A diferença entre os três tipos de *BASWAphon* reside no acabamento final. O *BASE* é com granulometria de 0,7 mm, o *FINE* com 0,5 mm e o *Classic* com 0,3 mm. Este sistema de *BASWAphon* pode ser aplicado em paredes, pilares, ou até mesmo em superfícies curvas (côncavas ou convexas).

Quadro 8.2 – Valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *BASWAphon* para cada banda de frequência em função da espessura e tipo de acabamento [adaptado de [68]]

Tipo	Espessura [mm]	Banda de Frequência [Hz]						NRC
		125	250	500	1.000	2.000	4.000	
BASWAphon BASE	30	0,10	0,32	0,83	0,89	0,73	0,65	**0,70**
	50	0,19	0,82	0,97	0,87	0,76	0,66	**0,85**
	70	0,28	0,95	0,98	0,83	0,72	0,61	**0,85**
BASWAphon FINE	30	0,11	0,34	0,81	0,81	0,68	0,59	**0,65**
	50	0,19	0,77	0,95	0,87	0,79	0,70	**0,85**
	70	0,35	0,92	0,83	0,72	0,63	0,59	**0,80**
BASWAphon CLASSIC	30	0,12	0,37	0,82	0,86	0,75	0,66	**0,70**
	50	0,17	0,79	0,83	0,74	0,63	0,56	**0,75**
	70	0,23	0,83	0,77	0,64	0,56	0,48	**0,70**

Outro material susceptível de utlização é *Sonacoustic* [69]. Este é constituído por placas de lã de rocha mineral que são coladas e/ou mecanicamente fixadas, seguidas de uma camada de acabamento por projecção que é trabalhada imediatamente a fim de obter o acabamento desejado, muito semelhante ao reboco liso tradicional. Os valores do coeficiente de absorção sonora deste material encontram-se no Quadro 8.3.

Quadro 8.3 – Valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *Sonacoustics* de 25 mm espessura para cada banda de frequência [69].

	Banda de Frequência [Hz]						NRC
	125	**250**	**500**	**1.000**	**2.000**	**4.000**	
Sonacoustics	0,08	0,40	0,83	0,86	0,82	0,81	**0,73**

Finalmente, sugere-se ainda a possibilidade de utilização do material *Sonakrete* [70]. Este, à semelhança do *SonaSpray*, consiste também em fibras de celulose projectadas, mas a diferença é que já vem em forma de pasta dos flocos de celulose com a cola (enquanto no *SonaSpray* a cola só é injectada no momento da aplicação). Pode posteriormente ser "talochado" e lixado.

No

Quadro 8.4 apresentam-se os valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *SonaKrete* para cada banda de frequência em função da espessura.

Quadro 8.4 - Valores do coeficiente de absorção sonora da solução tipo *SonaKrete* para cada banda de frequência em função da espessura [adaptado de [70]].

	Espessura [mm]	Banda de Frequência [Hz]						NRC
		125	250	500	1.000	2.000	4.000	
Sonakrete	6	0,01	0,07	0,39	0,69	0,83	0,87	**0,50**
	10	0,06	0,11	0,46	0,77	0,84	0,89	**0,55**
	13	0,01	0,16	0,49	0,89	1,03	0,97	**0,65**
	19	0,25	0,48	0,81	0,85	0,85	0,94	**0,75**

8.2.3. Previsão dos Tempos de Reverberação e breve Análise Económica

Considerando os materiais apresentados no subcapítulo anterior, faz-se agora uma previsão dos valores do tempo de reverberação após a aplicação das diferentes soluções. É possível também comparar as diferenças entre cada solução.

A previsão do tempo de reverberação é baseada na fórmula de Sabine (expressão 2.12), onde se introduz o acréscimo de nova absorção sonora devido à presença do material, substituindo a absorção antiga da superfície a tratar. Desta forma, contabilizando a absorção sonora existente, a absorção sonora do ar fica já integrada nesta previsão.

Supõe-se então a aplicação do material absorvente em todo o tecto referente à nave do santuário (onde o pé-direito é igual a 16,0 m) totalizando uma área de cerca de 540 m^2 (ver Figura 8.2).

Tendo as diversas soluções apresentadas, é necessário efectuar uma análise económica, pois a solução adoptada irá depender do pretendido e da disponibilidade financeira para a intervenção. É necessário revelar que todos os valores mencionados a nível de custo são indicativos.

Assim, no

Quadro 8.5 apresentam-se os valores do Tempo de Reverberação previstos para cada solução, os Tempos de Reverberação médios das frequências dos 500-1000 Hz, o custo aplicado por m^2 aproximado de cada solução e finalmente o custo total expectável para cada solução final.

Note-se que das soluções anteriormente apresentadas foram eliminadas algumas hipóteses. É o caso das soluções *K-13* em que apenas se considerou espessuras dos 19 e 25 mm. A exclusão das outras espessuras tem a ver com recomendações dos fabricantes, que não aconselham a exequibilidade prática de espessuras superiores ou inferiores deste produto. De forma semelhante sucedeu com a solução *SonaKrete* em que apenas se consideraram as espessuras de 13 e 19 mm.

A Figura 8.3 apresenta as variações dos valores do Tempo de Reverberação em função de algumas hipóteses de solução referidas no Quadro anterior. Nesta apreciação, filtraram-se ainda mais algumas soluções. A base dessa filtragem foi o facto da solução *BASWAphon* se apresentar muito onerosa comparada com as outras, além de produzir um efeito semelhante a nível de absorção e o mesmo

efeito estético que *Sonacoustics* (por exemplo). Optou-se então por manter a *BASWAphon BASE* (30 mm) excluindo as restantes soluções *BASWAphon*.

A selecção da proposta a utilizar é algo que pode depender de muitos factores, isto é, as propostas podem ser analisadas em função da absorção, em função do custo, em função do impacto estético, etc.

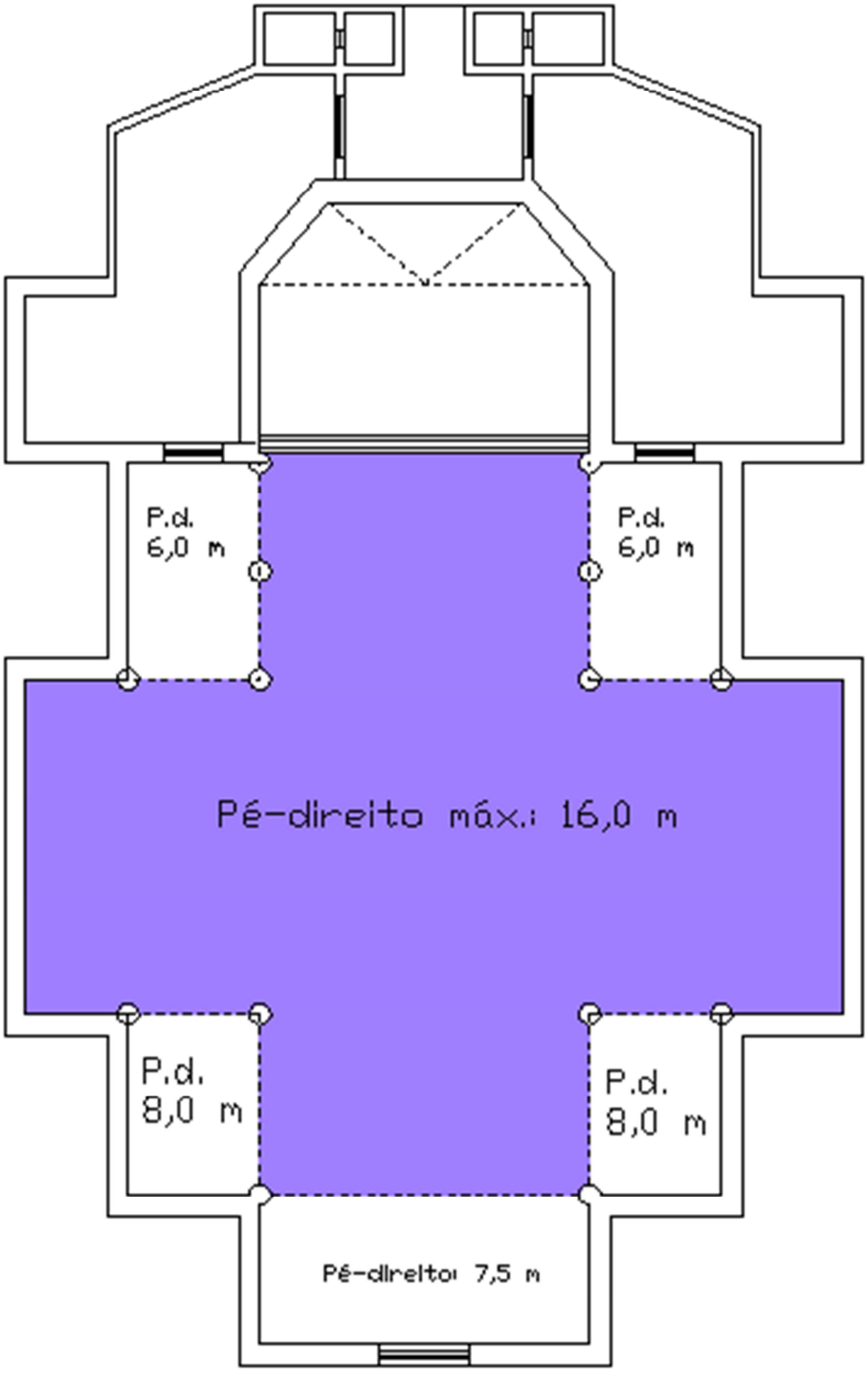


Figura 8.2 – Área correspondente à colocação do material absorvente no tecto de pé-direito máximo igual a 16,0 m (≈540 m^2).

Quadro 8.5 - Valores do Tempos de Reverberação para cada banda de frequência em função do tipo de produto utilizado supondo a aplicação do material absorvente em todo o tecto da nave (≈540 m^2).

Produto	Espessura [mm]	Banda de Frequência [Hz]						TR [500-1000 Hz] previsto [s]
		125	250	500	1.000	2.000	4.000	
K-13 standard	19	14,0	7,5	3,8	2,5	2,3	2,0	**3,2**
	25	12,7	6,0	3,0	2,4	2,2	1,9	**2,7**
K-13 special	19	12,2	5,3	2,7	2,6	2,1	1,9	**2,6**
	25	10,1	3,9	2,5	2,3	2,1	1,9	**2,4**
K-13 fc	19	8,9	6,2	3,3	2,3	2,1	1,9	**2,8**
	25	7,9	5,0	2,7	2,3	2,1	1,9	**2,5**
BASWAphon BASE	30	11,7	5,6	2,8	2,5	2,6	2,4	**2,7**
	50	8,6	2,9	2,5	2,6	2,6	2,4	**2,5**
	70	6,8	2,5	2,4	2,7	2,7	2,5	**2,6**
BASWAphon FINE	30	11,3	5,4	2,8	2,7	2,8	2,6	**2,8**
	50	8,6	3,0	2,5	2,6	2,5	2,3	**2,5**
	70	5,9	2,6	2,8	3,0	2,9	2,6	**2,9**
BASWAphon CLASSIC	30	10,8	5,1	2,8	2,6	2,6	2,4	**2,7**
	50	9,1	2,9	2,8	2,9	2,9	2,6	**2,9**
	70	7,7	2,8	3,0	3,2	3,1	2,8	**3,1**
Sonacoustics	25	12,7	4,9	2,8	2,6	2,4	2,2	**2,7**
SonaKrete	12,5	11,7	8,1	4,1	2,5	2,1	1,9	**3,3**
	19,0	7,3	4,3	2,8	2,6	2,4	2,0	**2,7**
Actual (sem correcções)		**16,3**	**12,7**	**11,9**	**10,1**	**7,0**	**4,9**	**11,0**

Assim, pode-se afirmar que em todas as soluções propostas rondam os valores de 3,0 s deste Tempo de Reverberação (500-1000 Hz). Neste aspecto, se fosse este o único critério de solução a solução que apresentaria melhor resultado seriam as soluções *k-13 Special* (25 mm) ou a *K-13 fc* (25 mm), pois apresentam os menores Tempo de Reverberação [500 – 1000 Hz] previstos que são de 2,4 s.

Apesar deste valor de Tempo de Reverberação médio estar ainda um pouco longe do valor mínimo recomendável que é 1,5 s, dada a gravidade do problema inicial acústico, traduz-se numa melhoria muitíssimo considerável deste parâmetro acústico.

Se o critério de selecção for apenas manter a estética do local, as soluções *BASWAphon* e *Sonacoustics* são sem dúvida as melhores soluções neste campo, pois a sua alteração final é quase impercepível.

Considerando apenas o critério custo, este depende naturalmente da capacidade financeira do Dono-de-Obra, assim como das perspectivas que tiver em mente. A solução mais acessível economicamente, já produz um efeito de melhoria muito elevado, isto é, a solução *k-13 Standard* (19 mm de espessura) que apresenta um valor previsto de 3,0 s para o Tempo de Reverberação.

Primeiro, há que referir que o impacto a nível da absorção em todas é muito semelhante. Através da análise do

Quadro 8.5 pode-se verificar que os Tempos de Reverberação (500 – 1000 Hz) previstos para cada solução variam em função do material e da espessura, mas não de forma muito diferente. Nas

frequências mais baixas (125 e 250 Hz) os valores previstos de Tempo de Reverberação ainda são elevados, decrescendo para as frequências mais altas, onde os valores são muito próximos, quer para as médias quer para as altas frequências.

O Quadro 8.6 apresenta um sumário das estimativas orçamentais para cada material aplicando na área correspondente à nave. Apresenta também uma breve análise do custo e do Tempo de Reverberação.

Quadro 8.6 - Estimativa orçamental das correcções supondo a aplicação do material absorvente em todo o tecto da nave (≈540 m^2).

Produto	Espessura [mm]	TR (500-1k Hz) previsto [s]	Preço [1/m^2] (aprox.)	ΔTR*	Preço por ΔTR* [€/s]	Preço Total (aprox) [€]
K-13 standard	19	**3,2**	23 €	-7,8	1588	12.420 €
	25	**2,7**	26 €	-8,3	1690	14.040 €
K-13 special	19	**2,6**	25 €	-8,4	1614	13.500 €
	25	**2,4**	28 €	-8,6	1765	15.120 €
K-13 fc	19	**2,8**	35 €	-8,2	2307	18.900 €
	25	**2,5**	38 €	-8,5	2412	20.520 €
BASWAphon BASE	30	**2,7**	105 €	-8,3	6804	56.700 €
	50	**2,5**	115 €	-8,5	7327	62.100 €
	70	**2,6**	135 €	-8,4	8639	72.900 €
BASWAphon FINE	30	**2,8**	105 €	-8,2	6906	56.700 €
	50	**2,5**	115 €	-8,5	7346	62.100 €
	70	**2,9**	135 €	-8,1	8986	72.900 €
BASWAphon CLASSIC	30	**2,7**	105 €	-8,3	6843	56.700 €
	50	**2,9**	115 €	-8,1	7627	62.100 €
	70	**3,1**	135 €	-7,9	9234	72.900 €
Sonaacoustics	25	**2,7**	120 €	-8,3	7808	64.800 €
SonaKrete	13	**3,3**	65 €	-7,7	4582	35.100 €
	19	**2,7**	70 €	-8,3	4576	37.800 €
Actual (Sem correcções)		**11,0**	-	-	-	-

*Diferença entre o Tempo de Reverberação (500-1k Hz) [s] com correcção e o Tempo de Reverberação (500-1k Hz) [s] actual (sem correcções).

Efectuando uma breve análise custo-benefício conclui-se que a solução mais apropriada é a solução *K-13 Special* 19 mm, pois a nível de custo situa-se como a segunda menos onerosa e a nível de benefício como a segunda melhor. Assim, considerando os critérios custo e absorção como os mais importantes, a solução *K-13 Special* (19 mm de espessura) é solução que melhor responde ambos e é por isso a solução proposta.

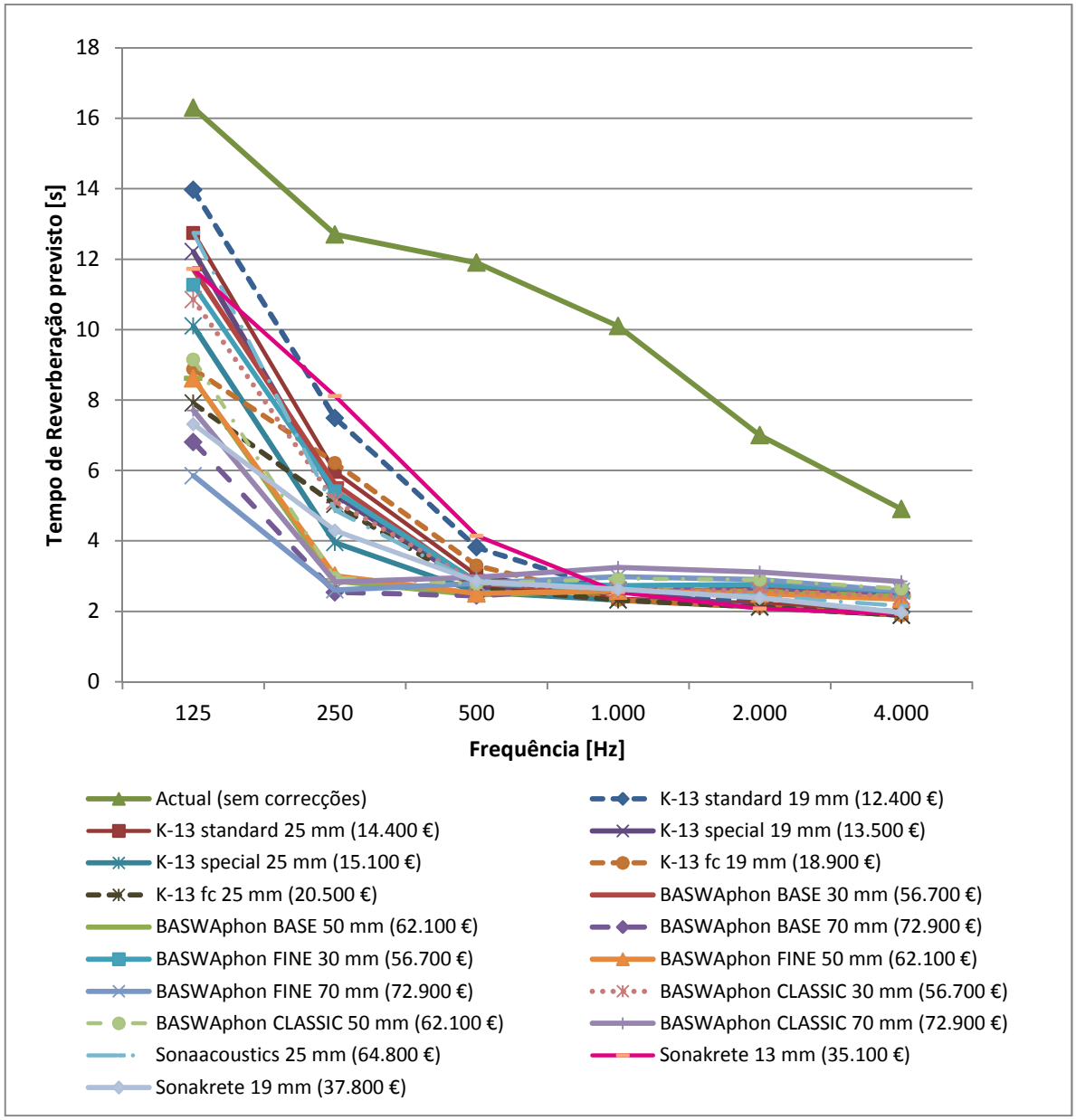


Figura 8.3 – Variação dos valores do Tempo de Reverberação em função de cada hipótese de solução para o Santuário de N.ª Srª da Assunção (Santo Tirso)

8.2.4. Outras propostas de correcção – sistema de Amplificação sonora

Há outras soluções que se podem adoptar em complemento secundário à aplicação de material absorvente. É o caso do sistema de amplificação de som presente na igreja, que pode sofrer ajustamentos. Na Figura 5.22 (item 5.5.3) observam-se os valores médios do RASTI nos três patamares de medição no Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção. É assim possível verificar que na parte traseira assim como na linha do meio a amplificação sonora presente no santuário produz uma ligeira melhoria na integibilidade da palavra quando esta está ligada nesses locais, pois o valor de RASTI com amplificação sonora é superior ao mesmo valor mas sem amplificação. O mesmo já não acontece na linha de medição mais próxima do altar. Nestes locais o valor do RASTI sem amplificação sonora é melhor do que com a amplificação sonora presente.

Assim, neste caso, dado o efeito negativo que altifalantes aí presentes produzem, é possível que a sua retirada na zona mais próxima do altar traga um efeito benéfico. No entanto, sugere-se que se tome esta decisão só após a aplicação da celulose projectada no tecto da nave e depois de uma nova avaliação *in situ* dos valores de RASTI. Isto, porque, com a aplicação do material absorvente, os resultados dos valores de RASTI (com e sem a amplificação sonora) poderão induzir a conclusões um pouco diferentes.

Um segundo aspecto é direcção dos altifalantes. Esta pode ser ajustada, fazendo inclinar as colunas do som o tanto quanto possível na direcção da assembleia.

Assim, a conlusão geral conduz à necessidade de outros sistemas de reforço electroacústico, com incorporação de "atrasos electrónicos" ("*delays*") nos altifalantes do altar.

9

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

9.1. CONCLUSÕES

O objectivo principal deste trabalho era caracterizar acusticamente uma igreja do séc. XX com problemas acústicos. Para tal usou-se o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, em Santo Tirso.

Foram realizadas medições *in situ*, que resultaram na avaliação de três parâmetros: o nível de pressão sonora do ruído de fundo, o RASTI e o tempo de reverberação. Também foi analisada a incomodidade do ruído de fundo através dos métodos *Noise Criteria e Noise Rating*, que apesar da aplicação destes métodos ser mais apropriada para ruídos contínuos como por exemplo equipamentos com AVAC (que o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção não tem), fornecem uma ideia da incomodidade gerada pelo ruído de fundo do tráfego rodoviário. Fez-se uma comparação dos resultados do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção com outras igrejas de semelhante volumetria de onde se conclui que esta apresenta valores de Tempo de Reverberações muito superiores ao esperado para igrejas de semelhante volume e baixos valores de RASTI.

Aplicaram-se também dois métodos multi-critério para caraterizar o Santuário em estudo: *Single Number Global Index* (W_G) e Qualidade Acústica em Igrejas (QAI).

No Quadro 9.1 apresenta-se o resumo dos valores acústicos mais importantes resultantes deste estudo.

Verifica-se que o ruído de fundo não constituiu anomalia acústica do Santuário. O seu nível de pressão sonora situa-se dentro dos valores recomendáveis, e as curvas de NC e NR indicam um grau de incomodidade dentro de limites desejáveis.

Observa-se que o valor médio do tempo de reverberação, nas frequências 500 e 1000 Hz obtido (11,0 s) é extremamente elevado quando comparado com os valores ideais (1,5 – 3,0 s). A ocorrência de valores tão elevados de tempo de reverberação deve-se fundamentalmente ao grande volume do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção conjuntamente com a abundância de superfícies interiores lisas e reflectoras associadas à sua constituição construtiva. As frequências muito altas apresentam menores valores de tempo de reverberação devido à absorção do ar, no entanto o excesso de tempo de reverberação é verificado em todas as gamas de frequências.

Relativamente à inteligibilidade da palavra, o valor de RASTI obtido apresenta um valor mau (RASTI=0,29). Verificou-se também que a introdução de amplificação sonora não induzia grande melhoria na integibilidade da palavra (0,28 sem amplificação sonora e 0,30 com amplificação sonora). Aliás, nos lugares mais perto do altar, a amplificação sonora piorava a integibilidade, e nos restantes

pontos de ensaios a melhoria era mínima.

Quadro 9.1 – Resumo dos principais parâmetros acústicos do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção

Parâmetro/Indicador		Valor obtido	Valor recomendável/Obs.
Nível de pressão sonora do ruído de fundo	L [dB]	26,2 dB(A)	≤50 dB (A)
Noise Criteria	NC	NC-20	Desejável: ≤30
Noise Rating	NR	NR-30	Desejável: ≤30
Rapid Speech Transmission Index	RASTI	0,29	Resultado: *Mau* Desejável: ≥ 0,60
Tempo de Reverberação	$TR_{[500\text{-}1000\ Hz]}$ [s]	11,0 s	Desejável: 1,5 – 3,0 s
Single Number Global Index	W_G	0,21	Resultado: *Má qualidade acústica interior*
Qualidade Acústica em Igrejas	QAI	0,23	Resultado: *Péssima qualidade acústica interior*

Fez-se também um confronto dos resultados obtidos com a opinião pessoal transmitida por alguns utentes. As queixas indicam que o Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção é um lugar inóspito, que apenas é atenuado o problema da acústica quando a igreja está cheia (o que ocorre nos dias festivos como a 15 de Agosto – dia da Festa da Solenidade de Nossa Senhora da Assunção), as leituras não são percebidas, com necessidade de adoptar uma estratégia de leitura mais lenta. Confima-se então a coerência entre as queixas e os resultados obtidos, isto é, comprova-se o impacto da problemática associada a um elevado tempo de reverberação e fraca integibilidade da palavra.

Por último, tendo em conta com o objectivo primordial deste trabalho, conclui-se que corrente das igrejas modernas, exemplificada no Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção tem-se mostrado como uma influência negativa na acústica interior da deste tipo de construção. Todas as causas advindas desta corrente como a falta de ornamentação, o recurso a betão liso, revestimentos lisos quer em paredes e tectos, mostraram-se aspectos infelizes quando se analisa o seu impacto na acústica, ou seja, característica que não pode ser ignorada na concepção deste tipo de espaços, dada a sua função primordial.

9.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A realização de inquéritos a mais utentes do Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, de modo a obter uma amostra representativa, onde se recolhessem mais caracterizações opinitativas em relação à igreja é algo que poderia complementar este estudo.

Outros complementos, que poderam ser desenvolvidos no futuro seriam os ensaios de outros parâmetros como a Claridade (C_{80}), a Definição (D_{50}), o Tempo Central (TS), a percentagem de perda de consoantes (ALCONS) e o TR com auditores dentro do Santuário de modo a optimizar a sua classificação através dos métodos multi-critério.

També se poderiam obter parâmetros acústicos subjectivos, no que respeita ao ruído de fundo, quer ao índice de inteligibilidade da palavra. A medição do ruído de fundo poderia ser realizada em diferentes dias de modo a avaliar se a intensidade de tráfego é ou não variável ao ponto de condicionar o isolamento acústico do Santuário.

Como comentário final confirma-se que um estudo acústico adequado realizado previamente à construção de um espaço deste tipo evitaria problemas acústicos posteriores, e ao mesmo tempo, faria com que fosse cumprida a principal função de uma igreja, que é passar uma mensagem essencialmente por meios sonoros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Urbano, D.; *Notas de Ondas*, ed. Departamento de Engenharia Civil, Porto, 2009.

[2] Serway R. A.; *Física para cientistas e engenheiros com física moderna*, 3ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 1996.

[3] *Potência Sonora*, *http://www.eca.usp.br/prof/iazzetta/tutor/acustica/intensidade/potencia.htm*, acedido em Fevereiro 2011.

[4] *Intensidade vs Potência Sonora*, *http://audiolist.org/forum/index.php*, acedido em Fevereiro 2011.

[5] Henrique, L.; *Acústica musical*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002.

[6] Carvalho, A. P. O.; *Acústica Ambiental e de Edifícios*, 7.0 ed, ed. FEUP, 2008.

[7]*Frequência vs Intensidade sons quotidiano*, *http://www.unitronbrasil.com.br/people/hearingloss/causes/levels.htm*, acedido a 13 de Fevereiro 2011.

[8] *Reflexão do som num espaço*, *http://palcoprincipal.sapo.pt/fotos_noticias/Image/1a.jpg*, acedido em Março 2011.

[9] Bottazzini, M. C., Bertoli, Stelamaris Rolla; *Acústica de igrejas barrocas, arquitectura que faz a diferença*, 11/2008, VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008, Buenos Aires, Argentina, 2008.

[10] *Curvas NC*, *http://personal.cityu.edu.hk/~bsapplec/single.htm*, acedido em Março 2011.

[11] Beranek, L. L.; *Acoustics*, McGraw - Hill Book Company, Nova Iorque, 1954.

[12] *Catálogo comercial de ressoadores agrupados empresa Castelhano & Ferreira S.A.*, 2011.

[13] *Radio Nazaré*, www.nazarefm.com, acedido a 23 de Maio 2011.

[14] *Olhares.com - Fotografia Online*, *http://br.olhares.com/igreja_matriz_de_vila_do_conde_foto2535347.html*, acedido em Junho 2011.

[15] *Regional Editora, Lda*, *http://www.regional-editora.com/distritos/porto/penafiel/historia/06_mosteiro_bustelo.htm*, acedido em Junho 2011.

[16] Noxon, A. M.; *Understanding church Acoustics*, ed. A.S. Corporation, 2001.

[17] F. A. Everest, *The Master Handbook of Acoustics*, Vol. 3ª ed, TAB BOOKS, Nova Iorque, 1994.

[18] J. J. Sendra, Cap 6 - *Acoustics in churches*, *Computational Acoustics in Architecture*, ed. W. Press. 1999.

[19] Noxon A., *Big Church Acoustics*, Church & Workship Tecnology, 2001.

[20] Recuero Lopez, M.; *Acústica arquitectónica aplicada*, Madrid, 1999.

[21] Cavanaugh, William J.; Wilkes, Joseph A., *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. 2ª ed, ed. J.W. PROFESSIO.

[22] Carvalho, A. P. O.; *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*, Dissertação de Doutoramento, Universidade da Florida, 1994.

[23] *Best Tourism*, *http://www.bestourism.com/items/di/833?title=Santa-Maria-Maggiore-Basilica&b=141*, acedido em Maio 2011.

[24] *Parador Cardona*, *http://www.spainparador.com/Parador-Cardona.htm*, acedido em Junho 2011.

[25] *Wikipédia - Quattrocento*, *http://pt.wikipedia.org/wiki/Quatrocento*, acedido em Maio 2011.

[26] *Formula Instituti – Centrum Ignatianum Spiritualitas, Roma*, 1981.

[27] *Constituições da Companhia de Jesus,* Lisboa, 1975.

[28] *Regulae Concionatorum – Institutum Societatis Iesu, Vol. Tertium, Florentiae,* 1893.

[29] *Canones Congregationum generalium Societatis Iesu, Romae,* 1606.

[30] *Compendium privilegiorum et gartiarum Societatis Iesu, Romae,* 1615.

[31] *Tratado Breve del modo de predicar el Santo Evangelio in Tratado Espirituales de San Francisco de Borja, Roma, 1964*.

[32] *Kepler; Johannes. Astronomia nova,* 1609.

[33] Kircher A.; *Phonurgia nova, sive conjugium mechanico-physicum artis & natvrae paranympha phonosophia concinnatum*, 1673.

[34] *Quadriques Architecturales (III), http://home.nordnet.fr/~ajuhel/Surfaces/quad_archi_cyl.html*, acedido em Maio de 2011.

[35] *Biografia de Francesco Borromini, http://pt.wikipedia.org/wiki/Francesco_Borromini*, acedido em Maio 2011.

[36] *Biografia de Guarino Guarini, http://pt.wikipedia.org/wiki/Guarino_Guarini*, acedido em Maio 2011.

[37] *Adrienne and Eric Jenkins, http://adriennejenkins.blogspot.com/2011_01_01_archive.html*, acedido em Junho 2011.

[38] *Câmara Municipal de Santo Tirso, http://www.cm-stirso.pt/*, acedido em Abril 2011.

[39] *Santuário de N.ª Sr.ª da Assunção, http://maps.google.pt/*, acedido em Abril 2011.

[40] Jornal de Santo Tirso, *Santuário da Assunção*, Filiado no Sindicato Nacional da Imprensa, 23 de Agosto de 1928.

[41] Costa, L. V.; *Ernesto Korrodi 1889-1944 arquitectura, ensino e restauro do património*. Editorial Estampa, Lisboa, 1985.

[42] F. C. Correia, *Senhora da Assunção, Centenário da Capela Velha 1901-2001*, Santo Tirso, 2001.

[43] Carneiro M., *15 de Agosto de 2001 - Centenário de N.ª Sr.ª Assunção*.

[44] C. d. II Concílio do Vaticano, *Lumen Gentium,* , ed. C.a.M.D. 59:AAA 57 (1965) 62; cf Pio XII.

[45] *Catecismo da Igreja Católica*, 2ª Revista e Actualização, ed. L.-L.E.V. Gráfica de Coimbra, para a edição Portuguesa. Coimbra, 1999.

[46] *Castelo D. Chica - wikipédia,* , acedido em 29/06/2011

[47] *Ecleticismo, http://pt.wikipedia.org/wiki/Ecletismo*, acedido em 30/06/2011

[48] *Contacto pessoal com Arq.ª Bárbara Rangel a 13 de Junho de 2011*.

[49] *Contacto via internet com Lucília Verdelho Costa (Historiadora de Arte) a 30 de Junho de 2011*.

[50] Standard, A. N.; *ANSI S12.2*, 1995.

[51] *Sítio Universidade Simon Fraser – Noise Raintg, http://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Noise_*
Rating.html, acedido em 20/05/2011

[52] *Online Noise Rating - NR - Calculator, http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_518.html*, acedido em Junho 2011.

[53] *Online Noise Criterion - NC - Calculator, http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_517.html*, acedido em Junho 2011.

[54] Rapport de la Commission Electrotechnique Internationale, *CEI IEC 268-16*,1988.

[55] Isbert, A. C.; *Diseño acústico de espácios arquitectónicos*, Barcelona, 1998.

[56] *Contacto pessoal com Sr. Dr. Manuel Carneiro a 22 de Fevereiro de 2011*.

[57] *Contacto pessoal com Sr. P. Celestino Ramos a 22 de Fevereiro de 2011*.

[58] *Contacto pessoal com Sr. Francisco Matia a 24 de Março de 2011*.

[59] Silva, T.; *Guião da acústica de igrejas em Portugal*, Dissertação de Mestrado, Porto, 2008.

[60] Lencastre, M.; *A inteligibilidade da palavra em igrejas católicas, através de análises de carácter objectivo e subjectivo*, Porto, 1988.

[61] Mega church, *http://en.wikipedia.org/wiki/Megachurch*, acedido em Maio 2011.

[62] Kosała K.; *A single number index to assess selected acoustic parameters of churches with redundant information*, University of Science and Technology, Poland, (data desconhecida).

[63] Carvalho, A. P. O.; *Aplicação de método multi-critério para avaliação acústica de Bibliotecas Públicas*, Encuentro Ibérico de Acústica y el Simposio Iberoamericano y Europeo sobre Acústica Ambiental y Edificación Acústicamente Sostenible (Cadiz, Espanha), 2009.

[64] Loureiro J. P. G.; *Metodologia multi-critério para análise da qualidade acústica em igrejas*, Dissertação de Mestrado, Porto , 2008.

[65] Morgado A. E. J.; *Estudo acústico de igrejas portuguesas através de parâmetros subjectivos*, Dissertação de Mestrado, Porto, 1996.

[66] Egan, M. D.; *Architectural Acoustics*, ed. M. Hill, New York, 1988.

[67] *Catálogo comercial do produto SonaSpray empresa S.T.I.E.R.*, 2011.

[68] *Catálogo comercial do produto BASWAphon empresa S.T.I.E.R.*, 2011.

[69] *Catálogo comercial do produto Sonacoustic empresa S.T.I.E.R.*, 2011.

[70] *Catálogo comercial do produto Sonakrete empresa S.T.I.E.R.*, 2011.

[71] Wikipédia – Serra do Pilar, *http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Serra_do_Pilar_2_(Vila_Nova_de_Gaia).JPG* acedido em Julho de 2010.