

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA IGREJA REABILITADA DE SÃO FRANCISCO, COIMBRA

MIGUEL GARCIA CARVALHO COELHO NEVES

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2022

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2021/2022

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

Aos meus gigantes,
Carlos e Maria Neves
Luís e Mariana Carvalho
José e Delfina Neves

Se vi mais longe do que outros, foi por estar sobre os ombros de gigantes
Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que me apoiaram na concretização deste trabalho e em todo o meu percurso académico:

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, por me introduzir à área da acústica de edifícios e pela sua constante perspetiva entusiasta sobre o tópico. Um muito obrigado pela orientação e total disponibilidade, aspetos determinantes para a boa direção deste trabalho.

Ao Engenheiro António Eduardo Costa, não só pela contribuição na realização das medições acústicas, mas também pela disponibilidade e esclarecimentos sobre o trabalho, sempre com um espírito de amizade e ajuda.

À InAcoustics, pelas informações fornecidas do projeto, bem como pela disponibilidade em esclarecer dúvidas.

Aos amigos que fizeram destes anos universitários os melhores da minha vida. A vida académica vai acabar em breve, mas a amizade fica para a vida.

Aos meus pais e avós, por todo o esforço que fizeram, com o mais nobre dos propósitos, o de conseguir dar uma vida melhor aos filhos.

RESUMO

O objetivo principal desta dissertação consiste no estudo e caracterização acústica de um tipo específico de espaços: igrejas reabilitadas para sala de concertos, tendo como caso de estudo a Igreja reabilitada de São Francisco, em Coimbra.

São expostos, neste trabalho, os avanços realizados ao longo de décadas no estudo da acústica de igreja e de salas de concertos, bem como a apresentação de alguns casos de estudo de reabilitação de igrejas para outros fins (auditório e sala de concertos). Valores ótimos do tempo de reverberação, em função do tipo de utilização são apresentadas por vários autores.

O Convento de São Francisco foi fundado no início do século XVII. Ao longo da sua história, serviu de casa dos frades franciscanos e mais tarde acolheu uma unidade fabril têxtil. Foi adquirido pela Câmara Municipal de Coimbra, que promoveu a sua requalificação, no âmbito da construção de um Centro Cultural de Congressos. A antiga Igreja do Convento foi reabilitada e transformada na sala D. Afonso Henriques do Centro de Convenções e Espaço Cultural do Convento de São Francisco.

É feita, primeiramente, uma descrição genérica de alguns conceitos teóricos abrangentes na área da acústica. São tidos em conta os conceitos de tempo de reverberação, absorção sonora, inteligibilidade da palavra, isolamento sonoro a ruídos aéreos e de percussão enquadrando-os à luz da legislação em vigor, descrita no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), primando sempre pelos valores ideais dos parâmetros acústicos para um conseqüente comportamento acústico mais favorável.

Os locais destinados à prática de atividades culturais como música, cinema, teatro ou conferências, devem ser alvos de estudos acústicos exigentes de forma a permitir o bom comportamento destes face ao tipo de função, bem como, o conseqüente conforto acústico dos utilizadores do espaço.

Torna-se, desta forma, necessário realizar análises variadas, pois, o tempo de reverberação ótimo para objetivar um melhor conforto acústico para os utilizadores é diferente para vários tipos de atividades. Para espetáculos musicais, pretende-se valores de tempo de reverberação mais altos do que espetáculos relacionados, por exemplo, com o teatro ou cinema, nos quais, se pretende uma melhor claridade e definição sonora, respetivamente.

A igreja reabilitada de São Francisco tem como principal função, a de sala de concertos, pelo que o tempo de reverberação será o parâmetro mais relevante a estudar e caracterizar.

São expostos, neste trabalho, os avanços realizados ao longo de décadas no estudo da acústica de igreja e de salas de concertos, bem como a apresentação de casos de estudo de reabilitação de igrejas para outros fins (auditório e sala de concertos). Valores ótimos do tempo de reverberação, em função do volume, do tipo de função do auditório e no caso particular de sala de concertos, da área de audiência, orquestra e coro são apresentados por vários autores, fruto de extensos estudos realizados.

Para a realização do estudo acústico da igreja reabilitada é feito uso de parâmetros que possibilitam a caracterização dos aspetos mais significativos da acústica deste local relativamente ao seu uso: o RASTI (de forma a avaliar a inteligibilidade da palavra), tempo de reverberação e nível de pressão sonora do ruído de fundo (LAeq). Estes parâmetros foram medidos com a sala vazia, uma vez que as cadeiras da audiência são apenas colocadas para os espetáculos e, desta forma, não estavam dispostas na sala.

O tempo de reverberação medido foi de 3,0 s (500–1k-2k Hz) e o TR previsível para a sala ocupada foi de 2,0 s (500-1k Hz), o que corresponde a um valor adequado para alguns tipos de música

sinfónica e um pouco mais reverberantes do que o desejável para música de câmara ou música sinfónica do período barroco. Em relação ao RASTI, a igreja apresenta um valor médio de 0,45, o que corresponde a um valor razoável e dentro do intervalo adequado. Por fim, o LAeq apresentou um valor de 28 dB, o que satisfaz o requerido pelo RRAE de valor máximo de 30 dB.

PALAVRAS-CHAVE: acústica, igrejas, tempo de reverberação, RASTI, sala de concertos

ABSTRACT

The main objective of this dissertation is to study and characterize the acoustics of a specific type of space: old churches rehabilitated for concert halls, having as case study the church of St. Francis in Coimbra.

In this paper, the main advances made over decades in the study of church and concert hall acoustics are exposed, as well as the presentation of some case studies on the rehabilitation of churches for other purposes, such as auditorium, and concert hall. Optimal values for reverberation time, as function of type of function, are presented by several authors.

The Convent of St. Francis was founded in the early seventeenth century. Throughout its history it has served as home to the Franciscan order and later hosted an important textile factory. It was acquired by Coimbra City Hall, which promoted its requalification as part of the construction of a Cultural Congress Center. The former church was rehabilitated and transformed into the D. Afonso Henriques Room of the Convention Center and Cultural Space of the Convent of St. Francis.

First, a generic description of some broad theoretical concepts of acoustics are given. The concepts of reverberation time, sound absorption, speech intelligibility, airborne sound insulation to and structure borne noises are considered in the light of current portuguese legislation, described in the Regulation of Acoustic Requirements for Buildings (RRAE), always striving for the ideal values of acoustic parameters for a consequent more favourable acoustical behaviour.

Venues intended for the practice of cultural activities such as music, cinema, theatre, or conferences, should be the target of demanding acoustic studies with the purpose of allowing good behaviour of the enclosure, regarding its function as well as the consequent acoustic comfort of the users of the space.

It becomes, therefore, necessary to conduct diverse studies, because the optimal reverberation time to aim a better acoustic comfort for users is different for various types of activities. For musical performances, higher reverberation time values are needed than performances related, for example, to theatre or cinema, in which a better clarity and sound definition is desirable.

The rehabilitated church of São Francisco has as its main function, to serve as a concert hall, so the reverberation time will be the most relevant parameter to study and characterize

In order to perform the acoustical study of the rehabilitated church, adequate parameters are used to characterize the most significant aspects of the acoustics of these places in relation to their use.: RASTI, to evaluate the speech intelligibility, the reverberation time and the background noise sound pressure level (LAeq).

The measured reverberation time was of 3,0 s (500–1k-2k Hz) and the predicted RT for the occupied room was of 2,0s (500-1k Hz), which corresponds to a desired value for some types of symphonic music (romantic) and more reverberant than desired for chamber music or symphonic music from the baroque. Regarding the RASTI, the church recorded a median value of 0,45, which translates to a reasonable value, and it is within the desired value for good speech intelligibility. Finally, the LAeq presented a value of 28 dB, which satisfies the portuguese requirement (RRAE) of a maximum value of 30 dB.

KEYWORDS: acoustics, churches, reverberation time, RASTI, concert halls

ÍNDICE GERAL

| | |
|----------------------|-----|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT | v |

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. ENQUADRAMENTO GERAL | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO..... | 1 |
| 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO | 2 |
| 2 CONCEITOS BÁSICOS | 3 |
| 2.1. ANÁLISE DA PRESSÃO | 3 |
| 2.1.1. PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR | 3 |
| 2.1.2. CELERIDADE | 4 |
| 2.1.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA | 4 |
| 2.1.4. NÍVEIS SONOROS | 5 |
| 2.2. ANÁLISE DA FREQUÊNCIA..... | 6 |
| 2.2.1. DEFINIÇÕES E UNIDADES | 6 |
| 2.2.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA..... | 7 |
| 2.2.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO | 7 |
| 2.2.4. RUÍDOS BRANCO E ROSA | 9 |
| 2.2.5. COMPRIMENTO DE ONDA | 9 |
| 2.3. ANÁLISE NO TEMPO..... | 10 |
| 2.3.1. DEFINIÇÕES..... | 10 |
| 2.3.2. PARÂMETROS ENERGÉTICOS | 10 |
| 2.3.3. PARÂMETROS ENERGÉTICOS | 10 |
| 2.4. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS..... | 11 |
| 2.4.1. ABSORÇÃO SONORA..... | 11 |
| 2.4.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO | 13 |
| 2.4.3. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO..... | 17 |
| 2.4.4. RUÍDO DE FUNDO E CURVAS DE INCOMODIDADE | 18 |
| 2.4.5. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA | 19 |
| 2.4.6. OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS | 21 |
| 2.5. CORREÇÃO ACÚSTICA | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.1. INTRODUÇÃO | 23 |
| 2.5.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS | 24 |
| 2.5.3. RESSOADORES | 24 |
| 2.5.4. MEMBRANAS | 25 |
| 2.6. ISOLAMENTO SONORO | 26 |
| 3 ESTADO DA ARTE..... | 29 |
| 3.1. ACÚSTICA DE IGREJAS..... | 29 |
| 3.1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO | 29 |
| 3.1.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS EM IGREJAS CATÓLICAS PORTUGUESAS | 31 |
| 3.1.3. RELAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS COM OS ESTILOS ARQUITETÓNICOS | 34 |
| 3.1.4. RELAÇÃO DE PARÂMETROS ACÚSTICOS COM CARACTERÍSTICAS ARQUITETÓNICAS | 36 |
| 3.1.5. INFLUÊNCIA DA OCUPAÇÃO NA ACÚSTICA DE IGREJAS | 37 |
| 3.1.6. ESPAÇOS ACOPLADOS EM IGREJAS | 37 |
| 3.2. ACÚSTICA DE SALAS DE CONCERTOS | 38 |
| 3.3. REABILITAÇÃO DE IGREJAS PARA OUTROS FINS – AUDITÓRIOS E SALAS DE CONCERTOS. 41 | |
| 3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA | 41 |
| 3.3.2. CASO DE ESTUDO – ANTIGO MOSTEIRO S.TOMASSO, PERUGIA..... | 41 |
| 3.3.3. CASO DE ESTUDO – IGREJA DE LA ANUNCIACIÓN, SEVILHA..... | 44 |
| 3.4. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA..... | 46 |
| 3.4.1. INTRODUÇÃO | 46 |
| 3.4.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO..... | 46 |
| 3.4.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS..... | 47 |
| 3.4.4. RUÍDO DE EQUIPAMENTOS | 47 |
| 4 IGREJA REABILITADA DE SÃO FRANCISCO, COIMBRA | |
| | 49 |
| 4.1. PASSADO HISTÓRICO..... | 49 |
| 4.2. CARACTERIZAÇÃO | 55 |
| 4.2.1. CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÓNICA | 55 |
| 4.2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA..... | 59 |
| 5 MEDIÇÕES ACÚSTICAS | 63 |
| 5.1. INTRODUÇÃO | 63 |
| 5.2. METODOLOGIA..... | 67 |
| 5.2.1. NÍVEL SONORO CONTÍNUO EQUIVALENTE DE RUÍDO DE FUNDO | 67 |
| 5.2.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO..... | 69 |
| 5.2.3. RASTI..... | 71 |

| | |
|--|-----------|
| 5.3. RESULTADOS..... | 73 |
| 5.3.1. NÍVEL SONORO CONTÍNUO EQUIVALENTE DE RUÍDO DE FUNDO | 73 |
| 5.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO | 74 |
| 5.3.3. RASTI | 80 |
| 6 CONCLUSÃO | 83 |
| 6.1. CONCLUSÕES | 83 |
| 6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 86 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 2.1 - Variações de pressão e correspondente onda sonora [4] | 3 |
| Fig. 2.2 - Interligação entre pressão (p) e intensidade (I) [17] | 4 |
| Fig. 2.3 - Pressão sonora (p) e níveis de pressão sonora (L_p), em que a pressão sonora de referência (p_0) corresponde a 20 μ Pa [adaptado 5] | 5 |
| Fig. 2.4 - Espectro sonoro do ouvido humano [6] | 6 |
| Fig. 2.5 - Espectro sonoro de igual sensibilidade do ouvido humano [17]..... | 7 |
| Fig. 2.6 - Tipos de filtros [7] | 8 |
| Fig. 2.7 - Descrição dos ruídos branco (esq.) e rosa (dir.) [1, adaptado]..... | 9 |
| Fig. 2.8 - Diagramas de ondas de baixa e alta frequência quando embatem num obstáculo [adaptado 8]..... | 9 |
| Fig. 2.9 - Diferenças entre L_{50} , L_{95} e o L_{eq} [1]..... | 10 |
| Fig. 2.10 - Relação do coeficiente de absorção sonora (α) com a frequência para três materiais [3].. | 11 |
| Fig. 2.11 - Curva de referência para avaliação do coeficiente de absorção sonora ponderada, α_w [9, adaptado]..... | 12 |
| Fig. 2.12 - Exemplo de tempo de Reverberação teórico, obtido por extrapolação de um decaimento de 30, medido entre -5 dB e -35 dB do valor inicial do nível de pressão sonora [8]..... | 13 |
| Fig. 2.13 – Valores do tempo de reverberação desejáveis para (500 - 1000 Hz) em função do uso [10] | 16 |
| Fig. 2.14 – Valores do tempo de reverberação adequado para (500 - 1000 Hz) em função do uso [3] | 16 |
| Fig. 2.15 - Efeito da adição de absorção sonora a uma sala [3]..... | 17 |
| Fig. 2.16 - Curvas NC (esq.) [12] e NR (dir) [13]..... | 18 |
| Fig. 2.17 - Contornos da emissão da palavra no plano horizontal (frequências de 500 e 4000 Hz) [3]20 | |
| Fig. 2.18 - Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes [1] | 23 |
| Fig. 2.19 - Influência da espessura no coeficiente de absorção sonora de um material poroso em função da frequência [3] | 24 |
| Fig. 2.20 - Variação do coeficiente de absorção sonora (α) para duas situações diferentes de aplicação de ressoadores [3]..... | 25 |
| Fig. 2.21 - Variação do coeficiente de absorção sonora (α) para duas situações diferentes de aplicação de membranas [3]..... | 25 |
| Fig. 2.22 - Esquema de situações de transmissão de ruídos aéreos (esq.) e de percussão (dir) [1]... 26 | |
| Fig. 3.1 - Concílio Vaticano II (1965) [48] | 29 |
| Fig. 3.2 - Concílio de Trento (1545-1563) [47] | 30 |
| Fig. 3.3 - Valores médios do RASTI e correspondente erro de desvio para cada igreja analisada por Carvalho [14] | 33 |

| | |
|---|----|
| Fig. 3.4 - Valor do RASTI vs. distância do recetor à fonte sonora, para todas as igrejas estudadas por Carvalho [14] | 33 |
| Fig. 3.5 - Valores do tempo de reverberação em relação com o estilo arquitetónico (1 - Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico e 8-Contemporâneo) com barra de erro de desvio [22] | 34 |
| Fig. 3.6 - Valores do RASTI para cada estilo arquitetónico (1 - Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico e 8-Contemporâneo) com barra de erro de desvio [22] | 35 |
| Fig. 3.7 - Valores do RASTI vs. distância à fonte sonora (1 - Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico e 8-Contemporâneo) com ajustes [22] | 36 |
| Fig. 3.8 - Corte transversal da igreja de S. Tomasso (Perugi) reabilitada [30] | 41 |
| Fig. 3.9 - Simulação do espaço da igreja de S. Tomasso, para o uso de sala de concertos [30] | 42 |
| Fig. 3.10 – Igreja de S.Tomasso, sala de concertos – situação final: T_{60} , C_{80} e LAeq [30] | 43 |
| Fig. 3.11 – Igreja de S.Tomasso, situação sala de conferências– situação final: T_{60} , C_{80} , LAeq e D_{50} [30] | 43 |
| Fig. 3.12 - Planta (esq.) e corte transversal da igreja La Anunciación, Sevilha [31] | 44 |
| Fig. 3.13 - Tempo de reverberação vs. frequência (condição atual da igreja de La Anunciacion | 45 |
| Fig. 3.14 - Valores medidos e simulados dos parâmetros (T_{30} , EDT, D_{50} e C_{80}) para duas fontes sonoras diferentes [31] | 45 |
| Fig. 4.1 - Convento de São Francisco, cerca de 1875 [35] | 49 |
| Fig. 4.2 - Implantação do Convento de São Francisco (Coimbra), com o edifício da igreja destacado [35] | 50 |
| Fig. 4.3 - Convento de São Francisco (Coimbra), enquanto fábrica de lanifícios de Santa Clara [35] | 51 |
| Fig. 4.4 - Planta do projeto inicial de reabilitação do Convento de São Francisco (Coimbra), da autoria do arquiteto Carrilho da Graça. | 52 |
| Fig. 4.5 - Convento de São Francisco (Coimbra), após a intervenção, 2018 [35] | 53 |
| Fig. 4.6 - Interior da igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra, agora Sala D. Afonso Henriques do Centro de Cultural e de Congressos de Coimbra [45] | 53 |
| Fig. 4.7 - Interior da igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra vazia [foto do autor] | 54 |
| Fig. 4.8 - Comparação do interior da igreja de São Francisco, capela-mor, antes (esq.) e depois (dir.) da reabilitação [35] | 54 |
| Fig. 4.9 - Comparação da fachada da igreja de São Francisco, antes (esq.) e depois (dir.) da reabilitação [35] | 55 |
| Fig. 4.10 - Planta da igreja do Espírito Santo, Évora, 1556 (esq.) e da igreja de São Roque, Lisboa, 1565 (dir.) - Modelo Nacional jesuíta [35] | 56 |
| Fig. 4.11 - Planta da igreja e Mosteiro de São Vicente de Fora, Lisboa, 1582 (esq.) e da Igreja Sé Nova, Coimbra 1598 (dir.) - Modelo internacional jesuíta [35] | 57 |
| Fig. 4.12 - Planta da igreja de São Francisco, Coimbra, antes da intervenção no espaço interior [35] | 58 |

| | |
|--|----|
| Fig. 4.13 - Plana da igreja de São Francisco, Coimbra, como Sala D. Afonso Henriques e respetiva disposição dos lugares da plateia [44] | 59 |
| Fig. 4.14 - Planta da igreja de São Francisco, Coimbra, antes (esq.) [35] e depois da reabilitação [44] com a localização da colocação dos painéis absorvedores e difusores na parede traseira da plateia (A), dos painéis difusores sonoros de madeira (B) e do painel refletor sonoro no coro (C)..... | 61 |
| Fig. 4.15 - Interior da Igreja rehabilitada de São Francisco, Coimbra. Painéis difusores sonoros de madeira colocados em cada uma das paredes laterais do transepto (B) e painel refletor sonoro em madeira no coro (C) [46]..... | 61 |
| Fig. 4.16 - Interior da Igreja rehabilitada de São Francisco, Coimbra. Painéis absorvedores e difusores de madeira colocados na parede de fundo da nave (B) [46] | 62 |
| Fig. 5.1 - Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 [43] (esq.) e fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 [39] (dir.)..... | 64 |
| Fig. 5.2 - Equipamento de RASTI Brüel & Kjær, modelo 3361, constituído por um emissor modelo 4225 (esq.) e um recetor modelo 4419 (dir.) [40] | 64 |
| Fig. 5.3 - Calibrador de microfones Brüel & Kjær, modelo 4231 [41] (esq.) e Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189 [42] (dir) | 64 |
| Fig. 5.4 - Planta da igreja rehabilitada de São Francisco, Coimbra [44]..... | 65 |
| Fig. 5.5 - Corte transversal da igreja de São Francisco [35]..... | 66 |
| Fig. 5.6 - corte longitudinal da igreja de São Francisco | 66 |
| Fig. 5.7 - Sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260 [fotos do autor] | 67 |
| Fig. 5.8 - Localização da fonte sonora (FS) e dos dois pontos de medição na igreja de São Francisco para avaliação do Leq do ruído de fundo (dir.) | 68 |
| Fig. 5.9 - Fonte sonora B&K, modelo 4224 (esq.) e sonómetro B&K, modelo 2260 (dir.) [fotos do autor] | 69 |
| Fig. 5.10 - Localização dos oito pontos de medição e da fonte sonora (FS) na igreja de São Francisco para avaliação do TR..... | 70 |
| Fig. 5.11 -Fonte sonora RASTI B&K 4225 (esq.), recetor B&K 4419 e medição do RASTI (dir.) [fotos do autor]..... | 71 |
| Fig. 5.12 -Localização dos quinze pontos de medição e da fonte sonora (FS) na igreja de São Francisco para avaliação do RASTI..... | 72 |
| Fig. 5.13 - Valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo e dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo filtrado A na Igreja rehabilitada de São Francisco, Coimbra..... | 74 |
| Fig. 5.14 - Valores obtidos de TR30 na Igreja rehabilitada de São Francisco, Coimbra | 76 |
| Fig. 5.15 - Valores de TR30 na igreja rehabilitada (sem cadeiras) e ajustado para sala mobilada sem ocupação e ocupada. Comparação com valores limite máximo do RRAE e valores previstos pela InAcoustics [49] antes da intervenção acústica | 79 |
| Fig. 5.17 - Medições acústicas do RASTI em 15 pontos (1 a 15) e curvas de igual RASTI da Igreja rehabilitada de São Francisco, Coimbra | 82 |

Fig. 6.1 - Valores de TR30 na Igreja reabilitada (vazia) e valores do TR ajustado para sala mobilada sem ocupação e ocupada. Comparação com limites máximos do RRAE e com os valores previstos pela InAcoustics [49] antes da intervenção acústica 85

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1 - Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [1] | 8 |
| Quadro 2.2 - Euroclasses de absorção sonora (A a E) [9]..... | 12 |
| Quadro 2.3 - Valores ideais do tempo de reverberação em função do tipo de utilização [1] | 15 |
| Quadro 2.4 - Valores limites máximos de NC para vários espaços [3, adaptado]..... | 19 |
| Quadro 2.5 - Valores limites máximos de NR para vários tipos de auditório [8, adaptado]..... | 19 |
| Quadro 2.6 - Variações da emissão da voz entre vogais e consoantes [1, adaptado]..... | 20 |
| Quadro 2.7 - Correspondência entre o parâmetro objetivo RASTI e a subjetiva inteligibilidade da palavra [14]..... | 21 |
| Quadro 3.1 - Principais características arquitetónicas das igrejas portuguesas estudadas por Carvalho, 1994 [20]..... | 31 |
| Quadro 3.2 - Estilos arquitetónicos por ordem cronológica das igrejas portuguesas analisadas por Carvalho [22] | 32 |
| Quadro 3.3 - Melhores relações entre parâmetros acústicos objetivos, em igrejas (Carvalho) [1] | 32 |
| Quadro 3.4 - Sumário dos melhores modelos matemáticos para previsão do RASTI médio em igrejas [14]..... | 36 |
| Quadro 3.5 - Valores das constantes a e b [1]..... | 37 |
| Quadro 3.6 . Valores de BR e TR para diversas salas de concertos, com ocupação [29]..... | 38 |
| Quadro 3.7 – Valores característicos de C_{80} [29]..... | 39 |
| Quadro 3.8 - Valores característicos de algumas salas de espetáculos analisadas por Beranek [adaptado, 2]..... | 40 |
| Quadro 4.1 - Valores dos diversos parâmetros arquitetónicos da igreja reabilitada de São Francisco | 60 |
| Quadro 5.1 - Valores obtidos dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo da Igreja de São Francisco reabilitada | 73 |
| Quadro 5.2 - Valores obtidos dos níveis de pressão sonora filtrado A do ruído de fundo da igreja de São Francisco reabilitada..... | 73 |
| Quadro 5.3 - Valores obtidos de TR30 na Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra para os pontos 1 a 8..... | 75 |
| Quadro 5.4 - Valores obtidos de TR30 na Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra para os pontos 1 a 8..... | 75 |
| Quadro 5.5 - Valores previstos da absorção inicial da Igreja de São Francisco vazia | 77 |
| Quadro 5.6 - Valores de coeficientes de absorção sonora (α) para um conjunto de cadeiras de estofado leve agrupadas [1] | 77 |
| Quadro 5.7 - Valores previsíveis do TR com a igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra com cadeiras e sem ocupação..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Quadro 5.8 - Valores de coeficientes de absorção sonora (α) para um sistema de audiência com cadeiras com estofa leve [1]..... | 78 |
| Quadro 5.9 - Valores do TR previstos para a igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra ocupada | 78 |
| Quadro 5.10 - Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500-1000 Hz) em função do tipo de utilização [1] com o valor obtido (2,0s) obtido na Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra | 78 |
| Quadro 5.11 - Valores obtidos de RASTI na Igreja reabilitada | 80 |
| Quadro 5.12 - Correspondência entre o parâmetro objetivo RASTI e a subjetiva inteligibilidade da palavra [14]..... | 81 |
| Quadro 6.1 - Valores obtidos nos ensaios realizados na igreja reabilitada (RASTI, TR, LAeq) e valores previstos do TR para comparação com valores ideais e valores regulamentares, | 83 |

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α – Coeficiente de absorção sonora

α_w – coeficiente de absorção sonora média padronizada de um material

τ – Coeficiente de transmissão sonora

λ – Comprimento de onda [m]

A – Absorção sonora equivalente [m²]

AVAC – Sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado

BR_L – Rácio de baixos baseado na intensidade sonora (*Bass ratio based on sound level*)

BR_RT - Rácio de baixos baseado na intensidade sonora (*Bass ratio based on sound level*)

c – celeridade [m/s]

C₈₀ – Claridade (*Early to late sound index*) [dB]

D₅₀ – Definição (*Early to total sound index*)

D_{nT,w} – Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado [dB]

D_{2m,n,T,w} – Índice de isolamento sonoro de fachadas a ruídos de condução aérea padronizada [dB]

EDT – Tempo de decaimento curto (*Early Decay Time*) [s]

f – frequência [Hz]

I – Intensidade sonora (W/m²)

I₀ – Intensidade sonora de referência [10⁻¹² W/m²]

LA_{eq} – Nível de pressão sonora equivalente (aplicado filtro A) [dB]

L_{eq} – Nível de pressão sonora equivalente [dB]

L_i – Nível de pressão sonora no espaço recetor [dB]

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

L_w – Nível de potência sonora [dB]

L'_{nT,w} – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão

NC – *Noise Criterion*

NR – *Noise Rating*

NRC – *Noise reduction coefficient*

p – Pressão Sonora [Pa]

p₀ – Pressão sonora de referência [2x10⁻⁵ Pa]

Q – Coeficiente de direccionalidade

r – Distância [m]

R – Redução sonora [dB]

R' - Redução sonora aparente [dB]

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RRAE – Regulamento dos requisitos acústicos de edifícios

S – Superfície real do material [m²]

S_T – Área do pavimento ocupado pela audiência, orquestra e coro [m²]

STI – *Speech Transmission Index*

T₀ – Tempo de reverberação de referência [0,5 s]

TR – Tempo de reverberação [s]

TS – Tempo central [ms]

V – Volume [m³]

W – Potência sonora [W]

W₀ – Potência sonora de referência [10⁻¹²]

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Um auditório é um espaço destinado à realização de múltiplas atividades culturais sejam estas, música, cinema, teatro ou conferências. Como tal, é de extrema relevância que estes espaços possuam um conforto acústico favorável, de forma que os ouvintes possam usufruir de uma plena experiência cultural. Neste tipo de espaços, em que o som é a substância mais importante, deve colocar-se sempre como prioridade o estudo acústico aquando da conceção do projeto de execução do espaço.

No entanto, projetos de grandes auditórios centram-se usualmente na forma e não na função e deste modo, o comportamento acústico do espaço é relegado para plano secundário muito por desconhecimento da área de acústica por parte do arquiteto.

Em Portugal, e até à década de 1990, a maior parte das salas de espetáculo não possuíam projeto de acústica de significativa importância, colocando esta área como a menor das prioridades na conceção destes espaços culturais. A situação desde então tem vindo a alterar-se, com certos investimentos em projetos de novos espaços acústicos, em grande escala, como o SuperBock Arena (Pavilhão Rosa Mota) ou a Casa da Música, ambos no Porto, entre muitos outros.

Atualmente, a maior parte deste tipo de salas denominam-se como espaços multiusos, com o objetivo de serem capazes de receber qualquer tipo de espetáculo das diferentes áreas das artes. Porém, a igreja de São Francisco, em Coimbra, atual sala D. Afonso Henriques do Centro de Convenções e Espaço Cultural do Convento de São Francisco, tem como função principal, a de sala de concertos.

O presente trabalho teve como motivação a extrema relevância cultural que antigos edifícios como igrejas tem, e o interesse público da reabilitação das mesmas para outros fins para além do serviço religioso, como por exemplo, o de auditório para a música.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Na presente dissertação pretende-se caracterizar acusticamente igrejas reabilitadas para salas de concerto, tendo como caso de estudo, a Igreja reabilitada de São Francisco. O estudo tem como objetivo avaliar a qualidade acústica da atual Sala D. Afonso Henriques, do Convento de São Francisco (antiga igreja do Convento), e para tal, é feito uso de medições *in situ* de três parâmetros acústicos objetivos:

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

Estes valores serão comparados tanto com valores ótimos recomendados, obtidos na revisão da literatura, e com valores regulamentares.

Embora a função principal da igreja reabilitada seja a de sala de concertos, este espaço também acolhe outros eventos culturais, como cinema e conferências. O tempo de reverberação será, deste modo, o parâmetro acústico principal, pois é este que permite projetar o espaço de forma a obter uma boa inteligibilidade da palavra e clareza sonora ou um ambiente propício à música (propósito primordial espaço reabilitado).

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação apresenta-se estruturada em seis capítulos, seguindo o seguinte formato:

O primeiro capítulo com o título “Introdução” explica o enquadramento do tema desta dissertação, a estrutura da mesma e os objetivos que se pretendem atingir.

O segundo capítulo com o título “Conceitos básicos” tem como objetivo explicar conceitos primários da área da acústica, relevantes para a compreensão deste trabalho.

O terceiro capítulo, “Estado da Arte”, contextualiza o tema da acústica de igrejas e de salas de concertos em termos históricos e o conhecimento existente na conceção de auditórios para a música, incluindo regras e parâmetros importantes na conceção de um projeto acústico tanto no ponto de vista de valores ideais como o de cumprimento do *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*. O processo de reabilitação de igrejas com vista a outros fins é abordado, com dois casos de estudo internacionais.

O quarto capítulo, com o título “Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra”, apresenta o passado histórico do Convento de São Francisco e da igreja, bem como a caracterização arquitetónica e geométrica do espaço interior da, agora denominada, Sala D. Afonso Henriques, do CCEC de Coimbra.

O quinto capítulo, “Medições Acústicas” expõe os ensaios realizados, as suas metodologias e a posterior análise dos resultados obtidos.

O sexto capítulo, “Conclusões”, procura especificar quais as ilações retiradas na concretização deste estudo, assim como quais são os potenciais desenvolvimentos futuros a realizar neste tema.

2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1. ANÁLISE DA PRESSÃO

2.1.1. PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR

O som pode ser definido como a geração, transmissão e receção de energia sob a forma de ondas vibracionais na matéria. Como os átomos ou moléculas de um fluido ou sólido são deslocados das suas configurações normais, surge uma força interna de restauração elástica. É esta força de restabelecimento elástico, associada à inércia do meio, que permite à matéria participar nas vibrações oscilatórias e assim gerar e transmitir ondas acústicas. [2]

Neste caso em estudo, o meio é o ar, e o som propaga-se neste meio sob a forma de ondas esféricas concêntricas, onde a fonte sonora corresponde ao centro e ponto inicial de alteração da pressão (vibração do meio elástico). A origem do som, pode, pois, ser vista como uma esfera pulsante que excita as partículas circundantes, criando zonas de compressão e de rarefação que se propagam no espaço (Fig.2.1) [1].

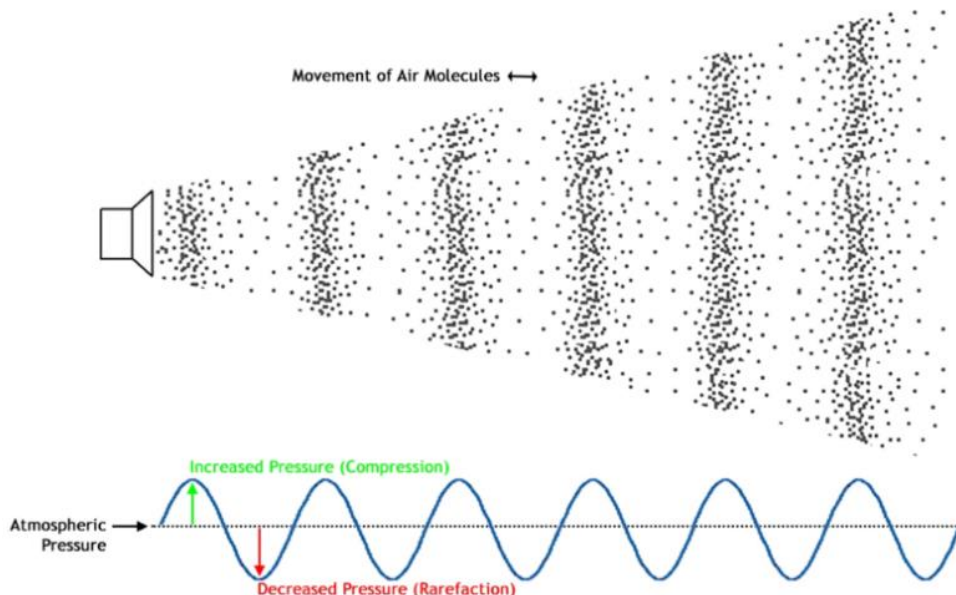


Fig. 2.1 - Variações de pressão e correspondente onda sonora [4]

2.1.2.CELERIDADE

A celeridade corresponde à velocidade de propagação das ondas sonoras num determinado meio. No caso do ar, a celeridade varia com a temperatura de acordo com a expressão 2.1

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

Sendo que c corresponde à celeridade, expressa em m/s, e T corresponde à temperatura, expressa em graus kelvin (K). A temperatura, normalmente é expressa em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$) e, nesse caso a fórmula de conversão corresponde à expressão 2.2

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

2.1.3.INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A intensidade sonora, é, numa dada direção, a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de 1 m^2 , normal a essa direção. Em síntese, permite avaliar a componente direcional do som, analisando o campo da intensidade sonora como um campo vetorial [1].

A potência sonora, ao contrário da intensidade e da pressão, é uma característica da fonte e não do estímulo criado por essa fonte. Caracteriza-se como sendo a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte [1].

Essas três grandezas, intensidade, potência e pressão sonora (Fig. 2.2) estão relacionadas entre si de acordo com a expressão 2.3:

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

Sendo que I corresponde à intensidade sonora, expressa em W/m^2 , W corresponde à potência sonora, expressa em W , r corresponde ao raio da esfera, expresso em m , p corresponde à pressão, expressa em Pa , ρ corresponde à massa volúmica do ar, expressa em Kg/m^3 e o c corresponde à celeridade, expressa em m/s .

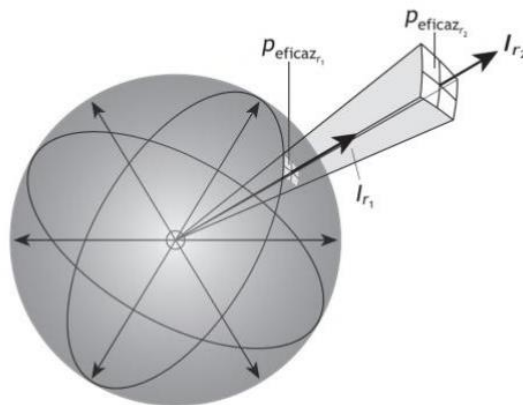


Fig. 2.2 - Interligação entre pressão (p) e intensidade (I) [17]

2.1.4. NÍVEIS SONOROS

Um ser humano, jovem e de audição normal, é capaz de captar variações de pressão entre os 10^{-5} Pa (limiar da audição) e os 10^2 Pa (limiar da dor), o que corresponde a uma gama de audibilidade de 10^7 Pa. Esta variação significativa de valores tornaria a aplicação da escala linear em pascal pouco prática. Desta forma, utiliza-se outra unidade para caracterizar variações de pressões, o decibel, dB (Fig. 2.3) convertendo pressões p , para níveis de pressão sonora L_p , através da fórmula 2.4.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2.4)$$

Onde L_p representa o nível de pressão sonora, em dB, p corresponde à pressão verificada, em Pa e p_0 diz respeito à pressão sonora de referência, que corresponde ao valor de 2×10^{-5} Pa.

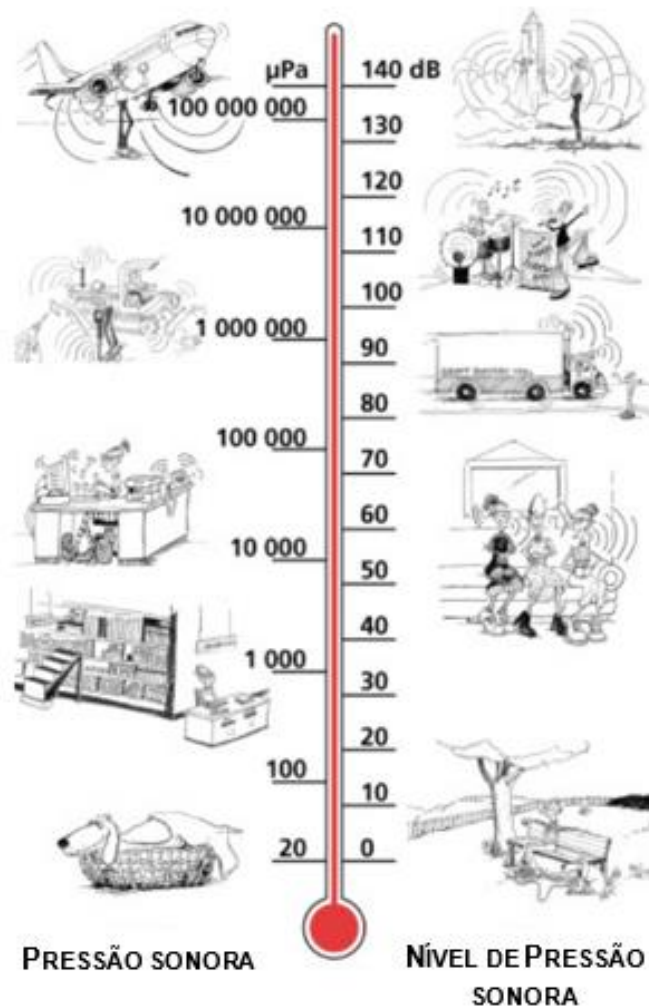


Fig. 2.3 - Pressão sonora (p) e níveis de pressão sonora (L_p), em que a pressão sonora de referência (p_0) corresponde a $20 \mu\text{Pa}$ [adaptado 5]

Da mesma forma que a pressão, a intensidade e a potência sonora também podem ser representados através de uma escala logarítmica, conforme a expressão 2.5 e 2.6, respetivamente.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.5)$$

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (2.6)$$

Sendo que L_I e L_W correspondem aos níveis de intensidade e de potência, respetivamente, ambos representados em dB, I significa a intensidade sonora verificada, expressa em W/m^2 , I_0 representa a intensidade sonora de referência com o valor de $10^{-12} W/m^2$, W corresponde à potência sonora e W_0 representa a potência sonora de referência com o valor de $10^{-12} W$ [1].

2.2. ANÁLISE DA FREQUÊNCIA

2.2.1. DEFINIÇÕES E UNIDADES

Depois da pressão sonora, a frequência é a mais importante característica de um sinal sonoro, na medida em que a caracterização de qualquer ruído só pode ser adequadamente feita através da análise dos dois domínios.

A frequência mede-se em hertz (Hz) e representa o número de ciclos de pressão completos por segundo. O ser humano, quando jovem e de audição normal, ouve aproximadamente entre os 20 Hz e os 20 kHz (Fig. 2.4). Esta gama de frequências, por si, pode ser dividida em três categorias: as frequências graves, compreendidas entre os 20 e os 355 Hz; as frequências médias que variam entre os 355 e os 1410 Hz; e por fim, as frequências agudas compreendidas entre os 1410 e os 20000 Hz. Sons de frequências inferiores a este espectro são denominados como infrassons e os de frequência superior como ultrassons [1].

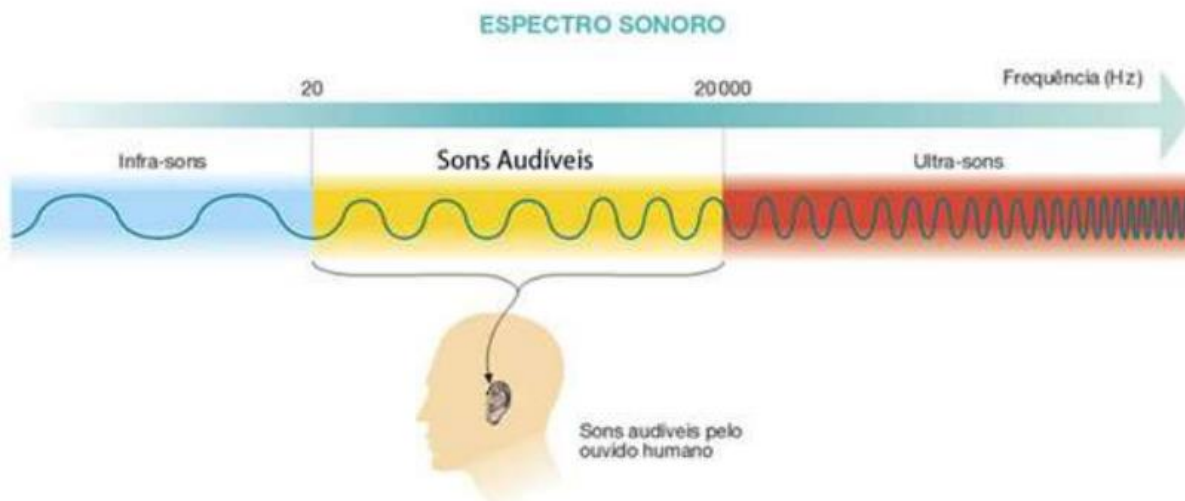


Fig. 2.4 - Espectro sonoro do ouvido humano [6]

2.2.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA

Uma vez que uma análise detalhada de cada uma de milhares de frequências não seria viável, os ruídos são separados e agrupados em bandas de frequência que correspondem a intervalos de frequência de dimensão normalizada.

A largura de banda (B) é a diferença entre o seu limite superior e inferior. Existem bandas de frequências de diversas larguras, sendo que as mais usadas em Acústica de Edifícios são as de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava [1].

Os intervalos de uma oitava normalizados no domínio do audível são aqueles centrados em: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz, sendo que os intervalos de terço de oitava normalizados no domínio do audível são aqueles centrados em: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1250, 1600, 2k, 2500, 3150, 4k, 5k, 6300, 8k, 10k, 12500, 16k e 20k Hz. [1]

2.2.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO

O ouvido humano tem uma sensibilidade auditiva variável mediante a frequência com que o estímulo sonoro é emitido. É muito sensível para frequências na gama dos 2300 aos 2800 Hz e pouco sensível para baixas frequências (inferiores a 125 Hz). No entanto, tal variação da sensibilidade, também depende da intensidade sonora do próprio som. Com o objetivo de uniformizar este parâmetro são criadas as curvas de igual sensibilidade auditiva, que são numericamente escalonadas com a unidade denominada *fone* que toma o valor numérico do respetivo nível de pressão sonora para os 1000 Hz (Fig. 2.5). [1]

De forma a exprimir essa particularidade do ouvido humano, é necessário corrigir a sensibilidade dos equipamentos de modo que esta seja semelhante à do sistema auditivo humano. São introduzidos, deste modo, filtros eletrónicos nos aparelhos medidores que efetuam correções aos valores rastreados, em função das frequências do som captado, e que são representadas por curvas de ponderação (Fig. 2.6), sendo que a mais usada é denominada como curva ou filtro A (Quadro 2.1). [1]

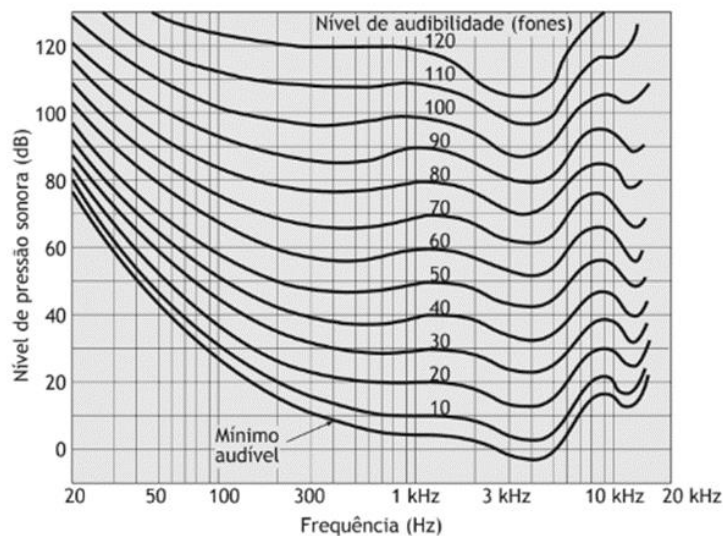


Fig. 2.5 - Espectro sonoro de igual sensibilidade do ouvido humano [17]

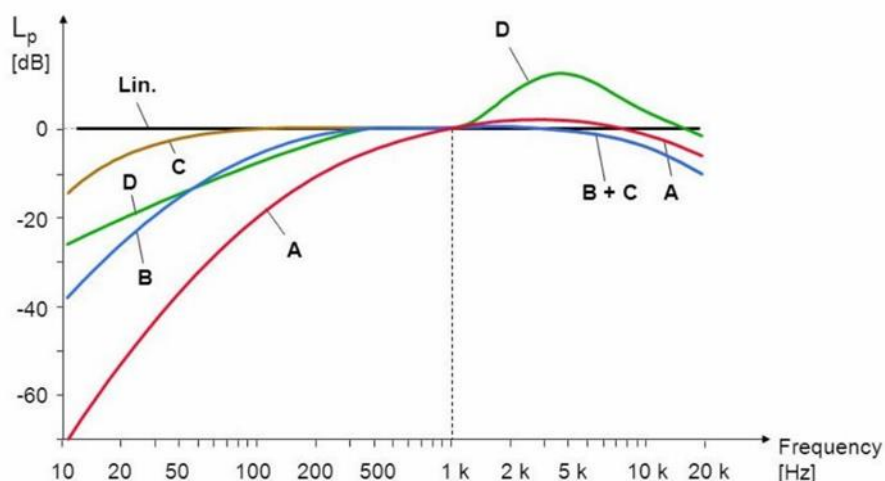


Fig. 2.6 - Tipos de filtros [7]

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

| Banda de Frequência (Hz) | Ponderação A para 1/3 oitava (dB) | Ponderação A para 1/1 oitava (dB) | Banda de Frequência (Hz) | Ponderação A para 1/3 oitava (dB) | Ponderação A para 1/1 oitava |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 25 | -44,7 | | 800 | -0,8 | |
| 31 | -39,4 | -40 | 1000 | 0 | 0 |
| 40 | -34,6 | | 1250 | 0,6 | |
| 50 | -30,2 | | 1600 | 1,0 | |
| 63 | -26,2 | -26 | 2000 | 1,2 | +1 |
| 80 | -22,5 | | 2500 | 1,3 | |
| 100 | -19,1 | | 3150 | 1,2 | |
| 125 | -16,1 | -15,5 | 4000 | 1,0 | +1 |
| 160 | -13,4 | | 5000 | 0,5 | |
| 200 | -10,9 | | 6300 | -0,1 | |
| 250 | -8,6 | -8,5 | 8000 | 1,1 | -1 |
| 315 | -6,6 | | 10 000 | -2,5 | |
| 400 | -4,8 | | 12 500 | -4,3 | |
| 500 | -3,2 | -3 | 16 000 | -6,6 | -7 |
| 630 | -1,9 | | 20 000 | -9,3 | |

2.2.4. RUIDOS BRANCO E ROSA

Existem dois tipos de ruído muito utilizados em experimentações acústicas, denominados de ruídos branco e rosa (fig. 2.7). Um ruído branco é composto por igual energia distribuída uniformemente em todas as frequências, representável numa escala logarítmica e com as frequências agrupadas em bandas, por um crescimento de + 3 dB/oitava. Um ruído rosa tem a mesma energia em todas as bandas de frequência, e é representável, desta forma, por um segmento de reta em escala de frequências logarítmica [1].

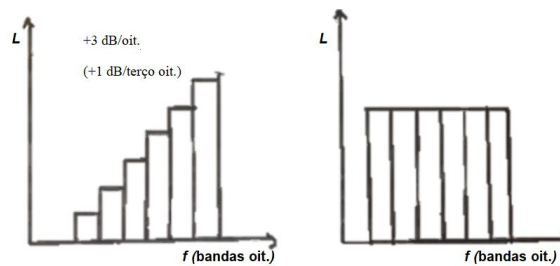


Fig. 2.7 - Descrição dos ruídos branco (esq.) e rosa (dir.) [1, adaptado]

2.2.5. COMPRIMENTO DE ONDA

O comprimento de onda, λ , corresponde à distância entre dois pontos idênticos consecutivos de uma onda periódica, e pode ser obtido através da expressão 2.7

$$\lambda = c / f \quad (2.7)$$

onde λ corresponde ao comprimento de onda, expresso em m, c corresponde à celeridade, expressa em m/s e, por fim, f que corresponde à frequência, expressa em Hz.

Um dos efeitos da influência do comprimento de onda, é no caso do comportamento das ondas sonoras face a obstáculos. Para baixas frequências, onde o λ é maior que o obstáculo, ocorre difração e as ondas sonoras comportam-se como se o obstáculo não existisse. Por outro lado, se a dimensão do obstáculo for superior à da onda sonora, o som de alta frequência é refletido da mesma forma que a luz, criando-se uma zona de sombra por detrás do obstáculo (Fig. 2.8) [8].

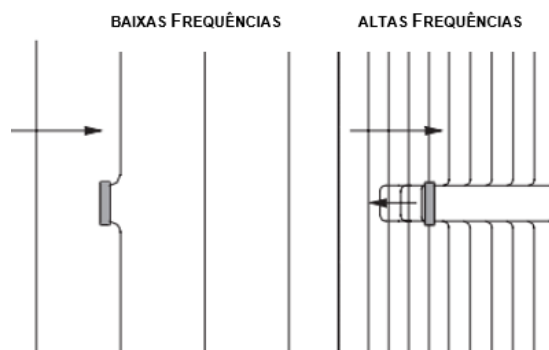


Fig. 2.8 - Diagramas de ondas de baixa e alta frequência quando embatem num obstáculo [adaptado 8]

2.3. ANÁLISE NO TEMPO

2.3.1. DEFINIÇÕES

A duração de qualquer ruído é outro fator importante na análise de ondas sonoras, na medida em que se constata a existência de ruídos com duração quase instantânea (disparo) e ruídos de duração quase infinita (queda de água). Esta instabilidade temporal obriga a que, para descrever um fenómeno sonoro se recorram a parâmetros com base no fator temporal. [1]

A pressão, em inúmeras situações, tem variações temporais entre máximos e mínimos atingidos bastante assinaláveis (por exemplo, os níveis de pressão sonora numa sala variam entre 25 dB – quase silêncio, e 95 dB). Deste modo, é necessário recorrer a descritores estatísticos e/ou energéticos para permitir avaliar segundo um único valor o acontecimento acústico referido (num dado intervalo de tempo). [1]

2.3.2. PARÂMETROS ENERGÉTICOS

O parâmetro descritor energético corresponde ao nível de pressão sonora contínuo equivalente, L_{eq} , e é definido como o nível que se atuasse constante num dado intervalo de tempo, energia gerada seria equivalente a aquela do som que se pretende avaliar [1]. Calcula-se através da expressão 2.8:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.8)$$

Onde T corresponde ao intervalo de tempo em análise.

2.3.3. PARÂMETROS ENERGÉTICOS

Os parâmetros estatísticos estão associados a quantis de densidade de probabilidade. Deste modo, define-se L_N como o nível que num dado intervalo de tempo é excedido em N% da duração temporal desse intervalo. [1]

Em resumo, L_{50} é a mediana num intervalo de tempo de medição de T enquanto o L_N é o valor do nível que é excedido em N% do intervalo de tempo de medição. Não confundir, portanto, o L_{eq} e o L_{50} (o primeiro é a média, e o segundo é a mediana) (Fig. 2.9) [1].

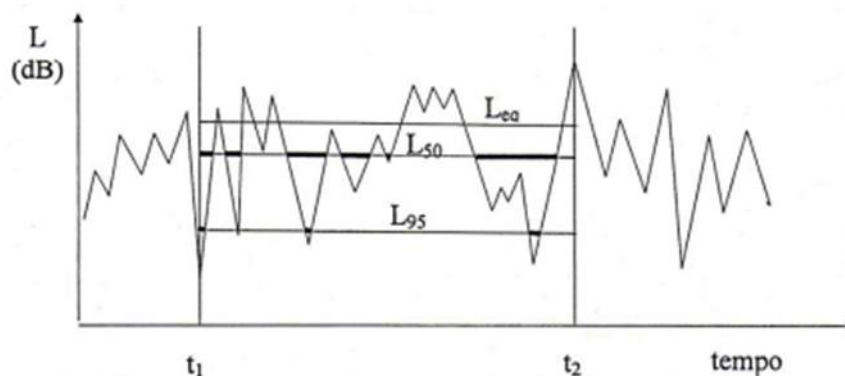


Fig. 2.9 - Diferenças entre L_{50} , L_{95} e o L_{eq} [1]

2.4.ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

2.4.1.ABSORÇÃO SONORA

Absorção sonora é a propriedade que possuem certos materiais de poderem transformar parte da energia sonora que sobre eles incide em outra qualquer forma de energia, geralmente a térmica [1]. A eficácia de um material absorvente de som pode ser expressa pelo seu coeficiente de absorção sonora α . Este coeficiente descreve a fração da energia sonora incidente que é absorvida pelo material e pode variar entre 0 (nenhuma energia sonora absorvida) e 1 (absorção de toda a energia sonora incidente) (equação 2.9). Materiais com coeficientes de absorção sonora superiores a 0,50 são definidos como *absorventes* e aqueles com coeficientes inferiores a 0,20 são definidos como *refletores* [3].

$$\alpha = \frac{E \text{ absorvida}}{E \text{ incidente}} \quad (2.9)$$

O valor de α para um dado material varia com o ângulo de incidência e com a frequência do som incidente [1]. Desta forma, o coeficiente de redução do ruído NRC (*noise reduction coefficient*) pretende ser uma classificação de um único número da eficácia de absorção sonora de um material e é definido pela média aritmética dos coeficientes de absorção sonora, α , para as bandas de oitava, 250, 500, 1000, e 2000 Hz [3].

$$\text{NRC} = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000})/4 \quad (2.10)$$

Como o NRC é um número médio numa gama de frequência limitada, dois materiais podem ter NRC idênticos, mas características de absorção muito diferentes, como pode ser demonstrado pelas duas curvas superiores no gráfico abaixo representado (Fig. 2.10), em que dois materiais, para a frequência de 125 Hz, apresentam coeficientes de absorção sonora (α) com uma diferença superior a 0,5 e o NRC difere apenas em 0,15 [3].

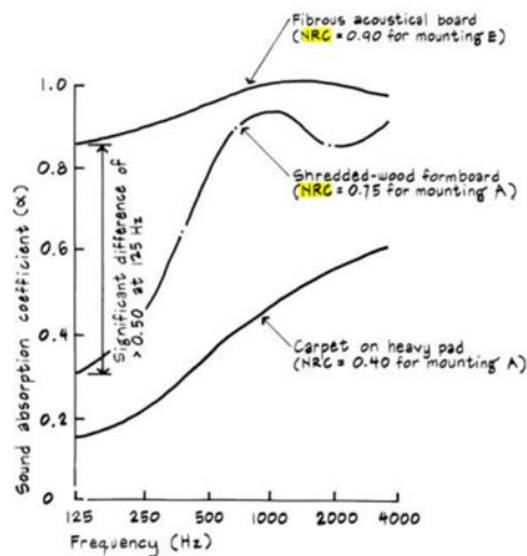


Fig. 2.10 - Relação do coeficiente de absorção sonora (α) com a frequência para três materiais [3]

Além disso, como o NRC não inclui os valores de α para as bandas dos 125 Hz e 4000 Hz, não deve ser utilizado para avaliar materiais para salas onde a música ou a inteligibilidade da palavra é importante. Quando a absorção a baixas frequências não se apresenta como um fator de grande relevância (por exemplo, em pequenos escritórios), o NRC pode ser uma classificação adequada para comparar materiais. [3]

Existe um outro parâmetro denominado α_w , que corresponde ao coeficiente de absorção média ponderada de um material e obtém-se por ajuste duma curva de referência (Fig. 2.11). Este método padronizado (norma EN ISO 11654) [9] consiste em traçar a curva dos valores de α por banda e consequentemente determinação da soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel e os valores reais. O valor de α_w é o valor corresponde ao valor na banda de oitava dos 500 Hz na curva ajustada de modo que a soma dos desvios positivos seja a mais elevada possível sem ultrapassar os 0,10. [1]

Junto ao valor de α_w , na descrição individual de um produto, pode ser adicionada as letras L, M, H que indicam que a absorção acústica do produto é superior a 0,25 numa determinada gama de frequências (L - 250 Hz, M – 500/1000 Hz, H – 2000/4000 Hz). [9]

O Quadro 2.2 expressa a classificação por classes A, B, C, D, e E de absorção sonora, referida na norma EN ISO 11654. Valores inferiores a 0,15 não são classificados [9].

Quadro 2.2 - Euroclasses de absorção sonora (A a E) [9]

| Classe | A | B | C | D | E | Não classificados |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| α_w | $\geq 0,90$ | 0,80 a 0,85 | 0,60 a 0,75 | 0,30 a 0,55 | 0,15 a 0,25 | $< 0,15$ |

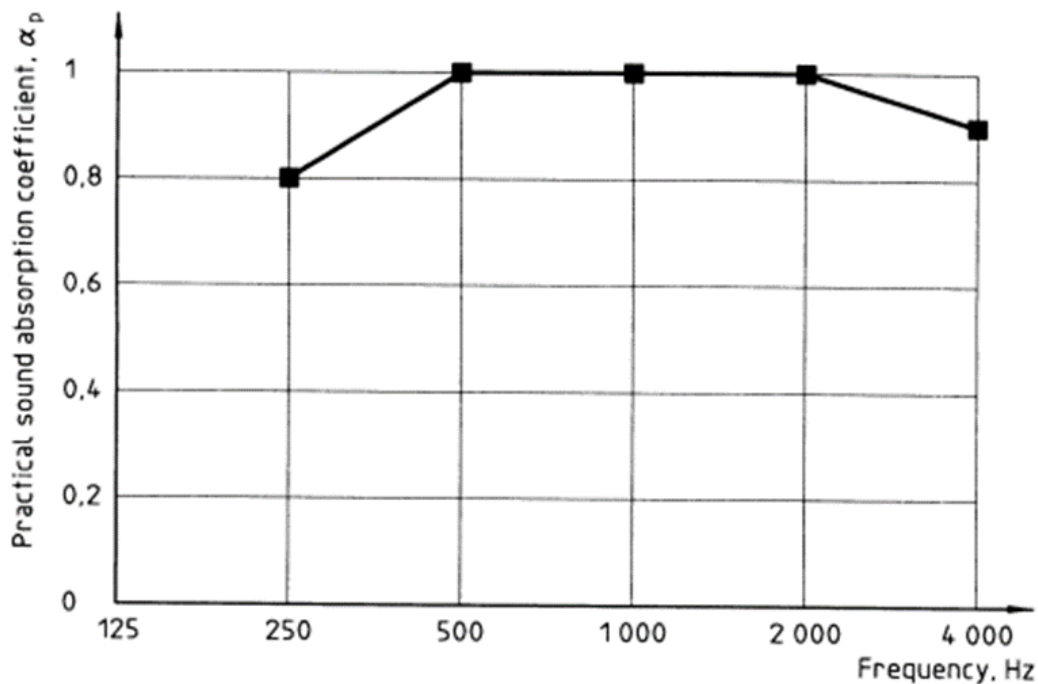


Fig. 2.11 - Curva de referência para avaliação do coeficiente de absorção sonora ponderada, α_w [9, adaptado]

2.4.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.4.2.1. Definição

Através de extensos estudos experimentais das propriedades acústicas de uma sala, o físico americano Wallace Sabine chegou a uma relação empírica entre as características de reverberação de um recinto, o seu tamanho, e a quantidade de material absorvente presente, definindo tempo de reverberação como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora, dentro de um compartimento, decresça 60 dB (Fig. 2.12) [2]. A relação entre as três propriedades referidas é expressa pela *Fórmula de Sabine* (equação 2.11):

$$T = \frac{0.16V}{A} \quad (2.11)$$

Em que T corresponde ao tempo de reverberação, expresso em s , V representa o volume do compartimento, expresso em m^3 . A que corresponde à absorção sonora equivalente, expressa em m^2 é calculada pela equação 2.12:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i + A_{\text{localizada}} + A_{\text{ar}} \quad (2.12)$$

Sendo que α corresponde ao coeficiente de absorção sonora de cada material e S_i representa a superfície real do material, expressa em m^2 .

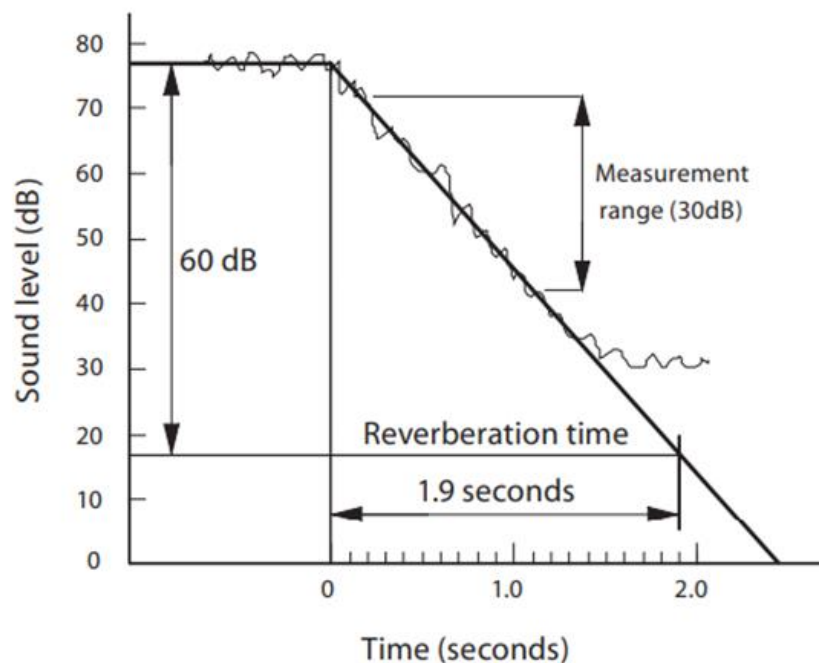


Fig. 2.12 - Exemplo de tempo de Reverberação teórico, obtido por extrapolação de um decaimento de 30, medido entre -5 dB e -35 dB do valor inicial do nível de pressão sonora [8]

Os resultados do trabalho de Sabine tornaram possível planejar o tempo de reverberação antes da construção. A fórmula Sabine é razoavelmente precisa quando as condições do campo sonoro são difusas (por exemplo, absorção sonora uniformemente distribuída) e as dimensões das salas não variam muito. Não deve ser utilizado para compartimentos que têm rácios de absorção extremamente elevados em relação ao volume da sala. Nestes casos, deve ser utilizada a *fórmula Eyring* (equação 2.13) [3]:

$$T = \frac{0,16V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.13)$$

Onde $\bar{\alpha}$ corresponde à média pesada pelas superfícies S_i dos coeficientes de absorção sonora α_i das superfícies envolventes e $S = \sum S_i$.

2.4.2.2. Efeitos do tempo de reverberação

O tempo de reverberação numa sala tem um duplo e antagónico efeito – aumenta o nível sonoro (por acréscimo do som refletido ao som direto) o que é um efeito favorável; torna ilegível os sons diretos (pois o som refletido vai-se sobrepor ao som direto) o que é um efeito negativo na maioria das situações [1].

Para qualquer compartimento, o aumento do nível sonoro é quase proporcional ao tempo de reverberação, logo, um longo tempo de reverberação é algo desejável para que uma fonte sonora fraca possa ser ouvida em todo o lado da sala [2].

Por outro lado, a presença de energia acústica reverberante tende a camuflar o reconhecimento imediato de qualquer novo som, a menos que tenha decorrido tempo suficiente para que a reverberação tenha caído cerca de 5 a 10 dB abaixo do seu nível inicial. Uma vez que o tempo de reverberação é uma medida direta da persistência de tais sons, é óbvio que um tempo de reverberação curto é desejável para minimizar os efeitos de mascaramento. A escolha do melhor tempo de reverberação para um determinado recinto deve, portanto, ser um compromisso. [2]

2.4.2.3. Valores ideais

O tempo de reverberação está relacionado com as condições geométricas e com as características de absorção sonora do recinto. Locais como grandes igrejas ou pavilhões gimnodesportivos dispõem habitualmente de elevados tempos de reverberação (4, 5 ou 6 s) enquanto estúdios de gravação se situam no extremo oposto (por exemplo 0,4 s). Atendendo às díspares consequências da reverberação é útil ter valores ideais do tempo de reverberação para as diferentes funções ou atividades dos locais. O Quadro 2.3 expressa os valores ideais do TR médio das bandas de 500 e 1000 Hz em função do tipo de utilização [1].

Em salas para música, o tempo de reverberação tem de ser um pouco superior ao das salas para a palavra, na medida em que é favorável que as notas musicais não sejam entendidas com uma excessiva clareza [1]. Para a perceção musical, a reverberação aumenta a plenitude do tom, o som misturado e a riqueza das frequências graves [3].

Por outro lado, um tempo de reverberação excessivo leva à redução da inteligibilidade da palavra. Tal deve-se a que o baixo nível sonoro de emissão das consoantes e o seu curto período de duração

são superiorizados pelo “rasto sonoro” de vogais imediatamente antecedentes (que são emitidas a nível mais elevado e com maior duração) [1]. Para a palavra, as características de reverberação de uma sala devem manter-se constantes com a frequência, pois um aumento nas frequências graves, resulta num decréscimo de percepção [8].

Quadro 2.3 - Valores ideais do tempo de reverberação em função do tipo de utilização [1]

| Função | TR 500-1000 Hz (s) |
|--------------------------|--------------------|
| Auditório (palavra) | 0,7 – 0,8 |
| Teatro | 0,7 – 0,9 |
| Cinema | 0,8 – 1,0 |
| Estúdio de gravação | 0,4 – 0,6 |
| Ópera (não wagneriana) | 1,3 – 1,7 |
| (Wagner) | 1,8 – 1,9 |
| Música de câmara | 1,4 – 1,7 |
| Música sinfónica Barroca | 1,4 – 1,6 |
| Clássica | 1,6 – 1,8 |
| Romântica | 1,9 – 2,2 |
| Moderna | 1,4 – 1,9 |
| Música popular | 0,8 – 1,0 |
| Música de órgão | 2,5 – 3,5 |
| Coros gregorianos | 3 – 4 |

As gamas preferidas de tempo de reverberação para frequências médias (500 e 1000 Hz) para uma variedade de atividades estão representadas na figura 2.13, e os intervalos, com base na experiência dos ouvintes de audição normal em espaços completos, estão representados por secções tracejadas nas extremidades das barras para indicar os limites extremos de aceitabilidade. [3].

Em geral, as salas grandes devem estar mais próximas da extremidade superior dos intervalos de tempo de reverberação do que as salas mais pequenas do mesmo tipo. Por exemplo, a música de órgão é composta para salas do tamanho de uma igreja ou catedral; a música de câmara é destinada a salas pequenas. De forma a relacionar o tempo de reverberação ótimo com o volume e o tipo de utilização de um espaço, a figura 2.14, evidencia para frequências médias (média do tempo de reverberação da banda dos 500 e 1000 Hz) o tempo de reverberação adequado em auditórios com volumes entre os 10 000 e 1000000 ft³ (1 m³ corresponde aproximadamente a 35,3 ft³) Um desvio de 10% do TR ótimo, será, em geral, satisfatório se outros atributos acústicos importantes da sala tenham sido atingidos. [3]

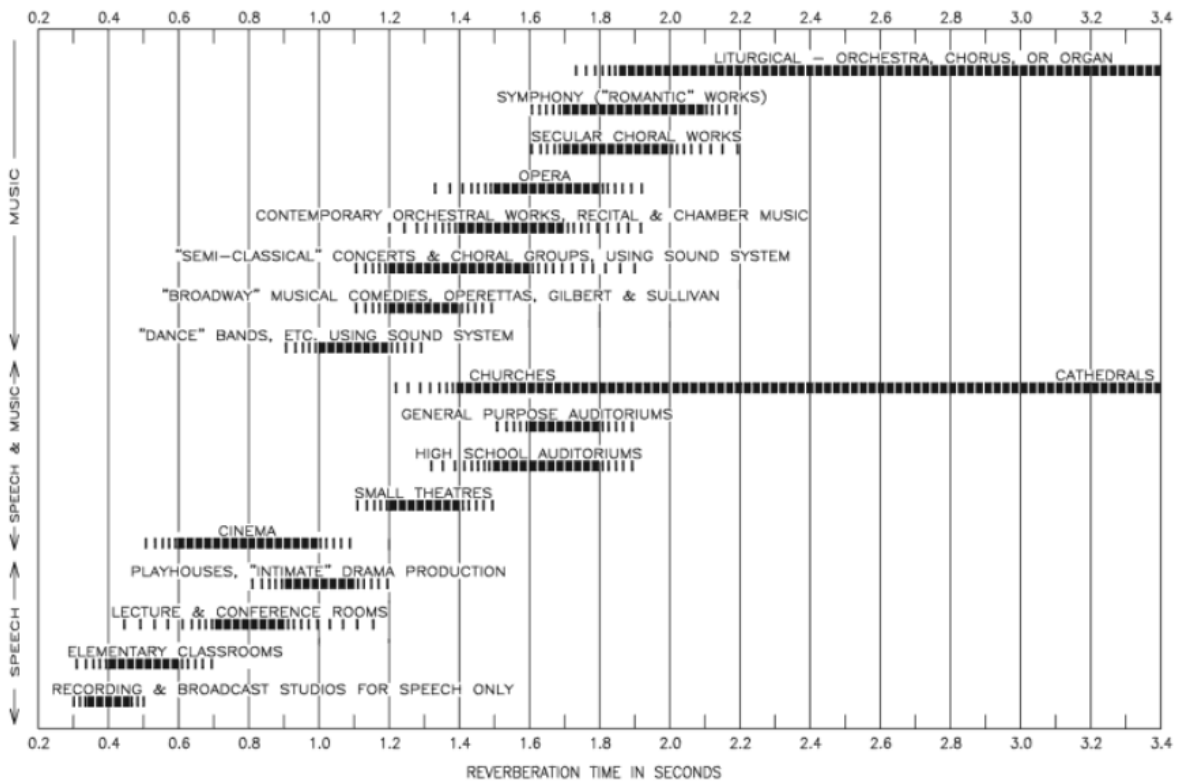


Fig. 2.13 – Valores do tempo de reverberação desejáveis para (500 - 1000 Hz) em função do uso [10]

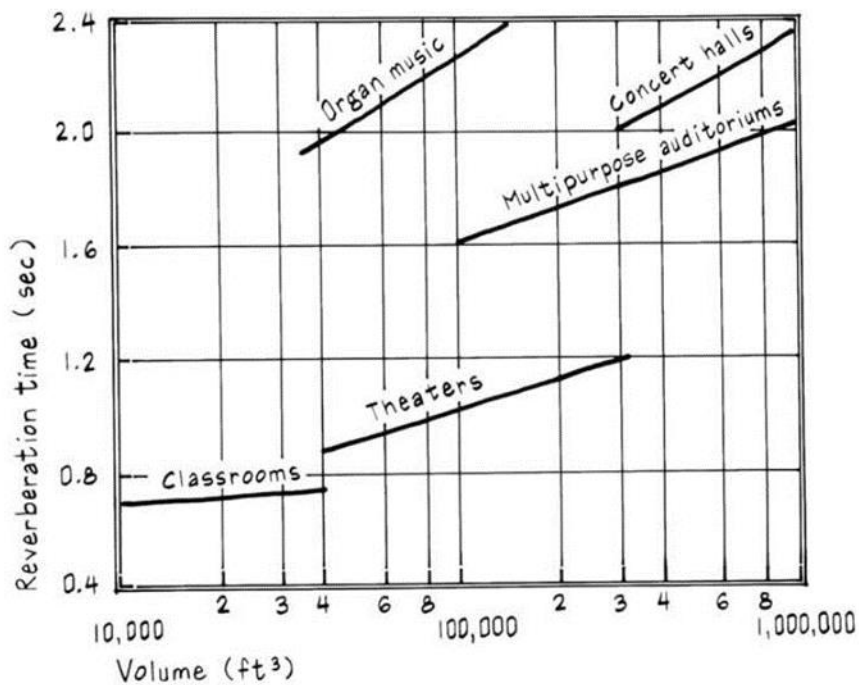


Fig. 2.14 – Valores do tempo de reverberação adequado para (500 - 1000 Hz) em função do uso [3]

2.4.3. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO

Sempre que numa sala está presente uma fonte contínua de som, são produzidos dois campos sonoros. Um é o campo sonoro direto, proveniente das ondas diretas da fonte sonora. O outro, o campo sonoro reverberante, é produzido pelas reflexões das superfícies do compartimento [2].

Num espaço interior, a energia sonora decresce influenciada pelo campo direto apenas a distâncias pequenas da fonte. Como as superfícies das salas refletem o som, haverá pouca redução adicional de ruído a uma distância grande à fonte (campo reverberante). Quanto mais absorção presente num compartimento, menor a acumulação de energia sonora no campo reverberante (Fig. 2.15) [3]. O campo direto decresce com a distância à fonte e o campo reverberado depende da absorção sonora da sala [1].

Na expressão 2.14, a soma no argumento do logaritmo representa essas duas parcelas.

$$L_I = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (2.14)$$

Sendo que L_I representa o nível de intensidade sonora perceptível, L_W consiste no nível de potência sonora da fonte, ambos expressos em dB, Q consiste no coeficiente de direccionalidade da fonte sonora (= 1 se omnidireccional; se essa fonte sonora omnidireccional for colocada junto a uma superfície refletora o Q será igual a 2), r representa a distância entre a fonte sonora e o ouvinte, expressa em m. Por fim, a constante R do local, que toma os valores de $A/(1 - \alpha_{\text{médio}})$, onde A representa a absorção do compartimento e $\alpha_{\text{médio}}$ consiste no coeficiente de absorção sonoro médio dos materiais.

Estes conceitos servem para corrigir salas onde há grande produção de ruído. Pode-se então atuar no campo direto, diminuindo a direccionalidade Q ou colocando ecrãs e no campo reverberado aumentando o valor de R , isto é, aumentando a absorção A . [1]

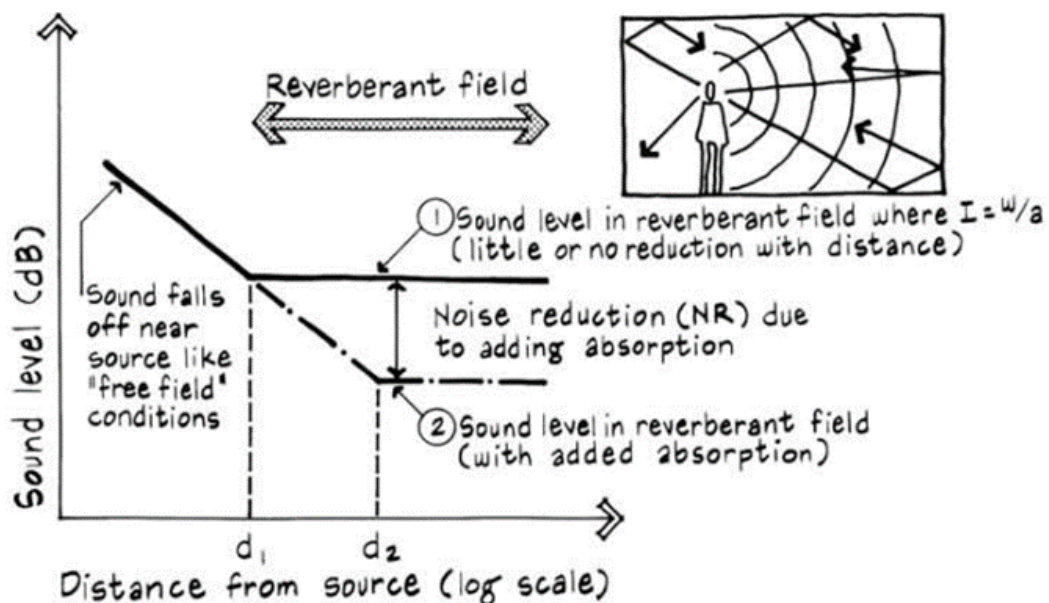


Fig. 2.15 - Efeito da adição de absorção sonora a uma sala [3]

2.4.4. RÚIDO DE FUNDO E CURVAS DE INCOMODIDADE

O ruído de fundo pode ser considerado como qualquer ruído existente num determinado espaço, resultante das atividades envolventes, que não seja alvo de apreciação pelo recetor, ou que mascara os sons que este pretende ouvir [1]. Destas atividades envolventes, a principal contribuidora para o ruído de fundo, é usualmente, a operação do sistema de ventilação (AVAC) [8].

O ruído, como anteriormente mencionado, é um estímulo sonoro indesejável ou sem conteúdo informativo para o recetor e, conseqüentemente, as intensidades deste ruído podem ser traduzidas para outra denominação, a de incomodidade [11].

A avaliação da incomodidade de um local face ao ruído de fundo provocado por equipamentos, em geral AVAC, pode ser avaliada por curvas de incomodidade. As mais usuais são as curvas *NC* (*Noise Criterion*) e *NR* (*Noise Rating*) [1].

As curvas *NC*, propostas em 1957 por Leo Beranek, são definidas pelos seus níveis de pressão sonora para as bandas de oitava dos 63 aos 8000 Hz. O cálculo é realizado por método da tangente, isto é, a classificação atribuída corresponde ao valor da menor curva que não é excedida quando comparada com os valores dos níveis de pressão verificados (Fig. 2.16). [1] O Quadro 2.4 apresenta a gama de valores de *NC* desejáveis para diferentes tipos de espaços

As curvas *NR* propostas em 1962 por Kosten & Van Os, são o critério europeu mais utilizado, sendo instituídas, em 1971, por norma ISO. A definição e classificação destas curvas são idênticas às curvas *NC*, apenas difere na gama de frequência utilizada (bandas de oitava dos 32 aos 8000 Hz) (Fig. 2.16) [1]. O Quadro 2.5 expressa limites máximos de *NR* de alguns tipos de auditórios.

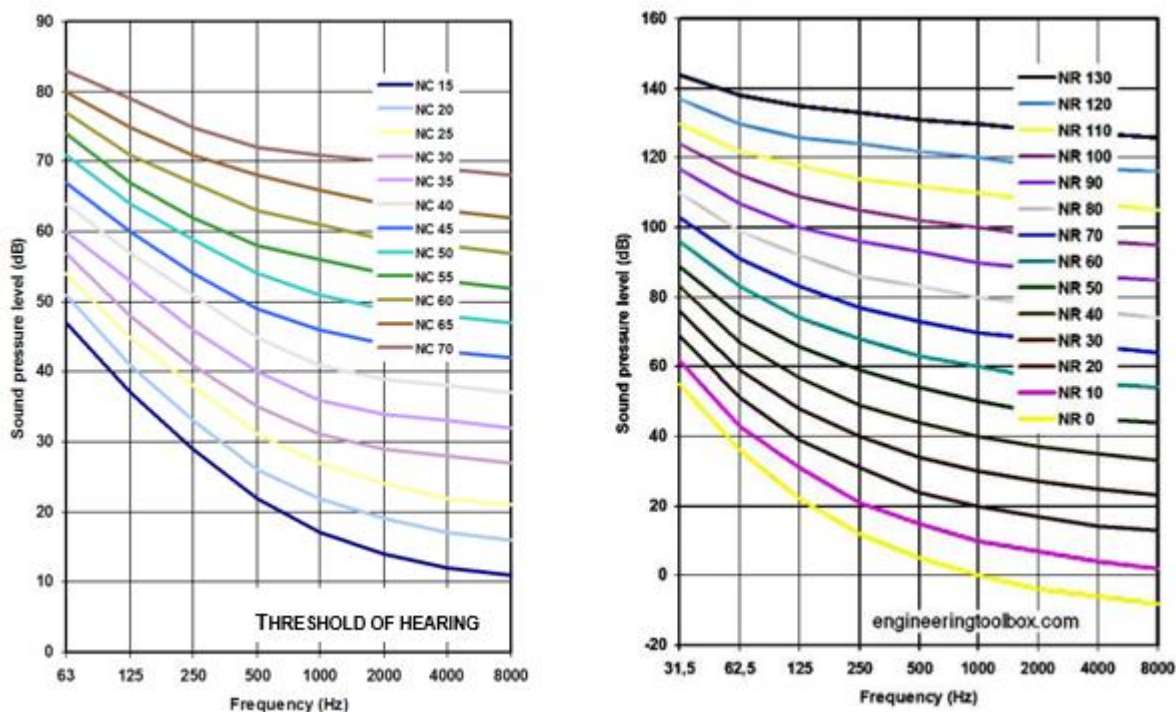


Fig. 2.16 - Curvas NC (esq.) [12] e NR (dir) [13]

Quadro 2.4 - Valores limites máximos de NC para vários espaços [3, adaptado]

| Tipo de espaço | Variação do NC desejada |
|---|--------------------------------|
| Salas de concertos e de ópera, estúdios de gravação, auditórios e igrejas de grandes dimensões (para condições de audição excelentes) | < NC-20 |
| Teatros, salas de cinema e de música, igrejas e auditórios de pequenas dimensões (para condições de audição muito boas) | NC-20 a NC-30 |

Quadro 2.5 - Valores limites máximos de NR para vários tipos de auditório [8, adaptado]

| Tipo de auditório | Limite máximo NR |
|--|-------------------------|
| Salas de concertos de grandes dimensões | NR15 |
| Salas de ópera e teatros | NR20 |
| Auditório de pequenas dimensões (<500 lugares) | NR 25 |

2.4.5. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

2.4.5.1. Características da emissão de voz

A variabilidade da emissão da voz pode ser analisada mediante quatro pontos de vista, sendo estes, a frequência, a intensidade, a duração e a direccionalidade.[1]

No domínio da frequência de emissão, os sons utilizados nas palavras têm uma gama de frequências muito vasta desde o som de mais baixa frequência (vogais, 150-300 Hz) até ao de mais alta frequência (consoantes, 3500-7000 Hz). Em relação ao nível de pressão sonora de emissão, a diferença entre o som mais débil (consoante) e o mais intenso (vogal) é de cerca de 28 dB. Em termos de duração, as vogais são emitidas em média com uma duração de 90 ms enquanto as consoantes são, em média, expressas com cerca de 20 ms.

Em relação à direccionalidade de emissão, a voz humana emite preferencialmente para a frente do orador, mas com variabilidade direccional em função da frequência (Fig. 2.17). As formas dos contornos na figura 2.17, mostram as características direccionais da palavra em frequências baixas (< 500 Hz para representar vogais, que contribuem para o tom da fala de um indivíduo) e em frequências altas (> 4000 Hz para representar consoantes, que influenciam fortemente a inteligibilidade das sílabas). 0° corresponde à direção para onde o indivíduo está virado. Os níveis sonoros para baixas frequências sofrem pequenas diminuições nos lados (orientação 90°) e moderadas diminuições na parte de trás (8 dB mais baixo). Contudo, os níveis sonoros para frequências altas são diminuídos em cerca de 6 dB nos lados e 20 dB na parte de trás. Quando um orador vira as costas à audiência, as consoantes podem tornar-se completamente inaudíveis, o que afeta, em grande nível, o grau de inteligibilidade da palavra pois este depende, estritamente, da correta perceção nas altas frequências, ou seja, das consoantes [1]. As características mais relevantes da palavra encontram-se resumidas no Quadro 2.6.

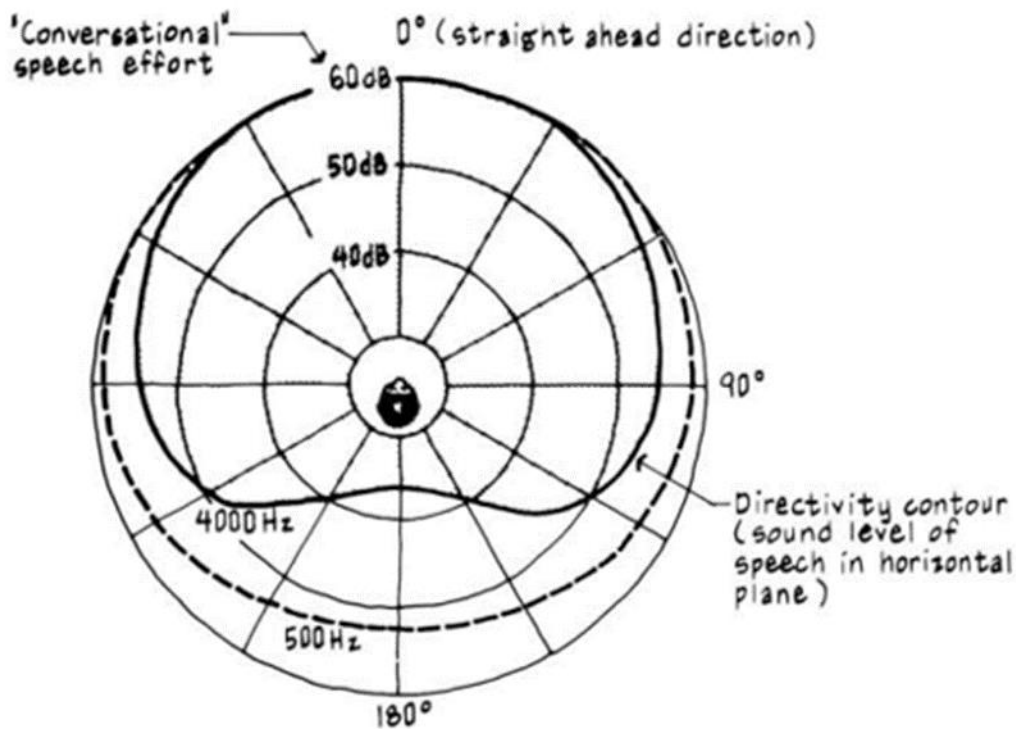


Fig. 2.17 - Contornos da emissão da palavra no plano horizontal (frequências de 500 e 4000 Hz) [3]

Quadro 2.6 - Variações da emissão da voz entre vogais e consoantes [1, adaptado]

| Tipo | Frequência | Intensidade | Duração (ms) | Direccionalidade | Contribuição para a percepção da palavra |
|------------|------------|-------------|--------------|------------------|--|
| Vogais | Baixas | Elevada | 90 | - 5 dB p/ -180° | Baixa |
| Consoantes | Altas | Baixa | 20 | - 20 dB p/ -180° | Elevada |

2.4.5.2. Parâmetros de medida - RASTI

Existem dois grandes tipos de parâmetros de medida da inteligibilidade da palavra: os objetivos e os subjetivos. Dentro dos parâmetros que não necessitam da intervenção subjetiva humana na sua determinação está, entre outros, o *STI* (*speech transmission index*). O método RASTI corresponde ao método simplificado de calcular o *STI*, e consiste na medição da redução de um sinal de teste transmitido que tem certas características representativas da voz humana. Os seus valores variam entre 0 (nula inteligibilidade) e 1 (ótima inteligibilidade).

O Quadro 2.7. representa a relação entre o parâmetro objetivo RASTI e a subjetiva inteligibilidade da palavra.

Quadro 2.7 - Correspondência entre o parâmetro objetivo RASTI e a subjetiva inteligibilidade da palavra [14]

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

2.4.6. OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS

Para além do tempo de reverberação, existem outros descritores importantes, que atualmente são utilizados, em grandes auditórios, com o objetivo de fornecer a melhor descrição potencial das funções da palavra e da música [1]. Estes são:

- **Definição (D_{50} , *early to total sound index*)** - de forma geral, a audição de um indivíduo não consegue perceber, como eventos acústicos separados, reflexões com atrasos inferiores a cerca de 50 ms (limite de percetibilidade da palavra). Tais reflexões aumentam a sonoridade aparente do som direto, pelo que são frequentemente referidas como reflexões úteis. Os restantes reflexos, com maiores atrasos, são responsáveis por aquilo que é percebido como a reverberação da sala. A contribuição relativa dos estímulos úteis pode ser caracterizada pelo parâmetro D_{50} , que se define como a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida (2.15) [15].

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.15)$$

- **Clareza (C_{80} , *early to late sound index*)** – O equilíbrio entre a clareza e o sentimento de reverberação, é importante tanto para a música como para a palavra [16]. Outro parâmetro sugerido para analisar este assunto na acústica de uma sala é a clareza, C_{80} , que corresponde à razão entre a energia recebida nos primeiros 80 ms (limite de percetibilidade para a música) e a energia recebida posteriormente (expressão 2.16).

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.16)$$

- **Tempo de decaimento curto (EDT , *early decay time*)** é uma medida da taxa de decaimento sonoro, expressa da mesma forma que o TR, com base nos primeiros 10 dB (de 0 para -10 dB) (expressão 2.17). Num espaço altamente difuso onde a decomposição é completamente linear, as duas quantidades, TR e EDT, seriam idênticas. [8]

$$EDT = 6 [DS^{-1}(10) - DS^{-1}(0)] \quad (2.17)$$

- **Tempo central (TS)** é o ponto no tempo onde a energia recebida antes deste ponto é igual à energia recebida depois daquele ponto (expressão 2.18). Foi proposto por Cremer e Muller em 1978. É usual ter uma posição entre 140 e 180 ms em salas de concerto (em frequências médias 250-2000 Hz). [1]

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt} \quad (2.18)$$

- **Intensidade sonora (L)** corresponde à razão, em dB, entre a energia total recebida numa posição específica do recinto fechado e a energia recebida para o som direto isolado se medido a uma distância de 10 m a partir da origem num ambiente anecóico (expressão 2.19). Foi primeiro usado por Gade e Rindel em 1985. É uma medida com aptidão para medir a intensidade do som em posições particulares, quando comparadas com a que existiria em meio anecoico. [1]

$$L = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10m}^2(t) dt} \quad (2.19)$$

- **Rácios de baixos (BR_RT e BR_L)** foram propostos por Beranek em 1962 e por Gade em 1989. *BR_RT* é o rácio de baixo com base no tempo de reverberação e é uma medida da resposta de uma sala às ondas sonoras de baixa frequência. Este rácio de baixo corresponde à média da reverberação para os 125 e 250 Hz, a dividir pelo tempo de reverberação para as médias frequências (500-1000 Hz) (expressão 2.20 e 2.21) [3]

BR_L é o rácio de baixo com base na intensidade sonora (*L*) e é usualmente utilizado para avaliar o balanço tonal por comparação dos valores da intensidade sonora para as baixas frequências com os valores das altas frequências. [1]

$$BR_{RT} = [TR(125 \text{ Hz}) + TR(250 \text{ Hz})]/[TR(500 \text{ Hz}) + TR(1\text{kHz})] \quad (2.20)$$

$$BR_L = [L(125 \text{ Hz}) + L(250 \text{ Hz})]/[L(500 \text{ Hz}) + L(1\text{kHz})]/ 2 \quad (2.21)$$

2.5. CORREÇÃO ACÚSTICA

2.5.1. INTRODUÇÃO

A correção acústica num espaço corresponde ao tratamento feito nesse compartimento de forma a melhorar a sua qualidade acústica [1]. Esta intervenção é focada nas superfícies do compartimento com a introdução de materiais e sistemas absorventes sonoros que tem o objetivo de reduzir o campo reverberado, isto é, as ondas refletidas [3].

Para além da redução do tempo de reverberação, de forma que o discurso não seja ilegível e o som pareça vir diretamente da fonte, a absorção sonora também tem aplicações na redução do nível sonoro e controlo de possíveis ecos no compartimento. Embora os materiais que absorvem o som são eficazes no controlo da acumulação de ruído, estes têm uma aplicação limitada, uma vez que cada duplicação da quantidade total de absorção numa sala “apenas” reduz o nível de ruído em 3 dB, o que torna o processo pouco viável para maiores necessidades de minimização do ruído. [3]

Um eco é a repetição distinta do som original, suficientemente elevado para ser claramente ouvido acima da reverberação geral e do ruído de fundo num espaço. Simultaneamente, com o controlo da reverberação, estes materiais absorventes podem ser usados para eliminar os ecos. [3]

Estes materiais importantes no estudo acústico podem ser divididos em três categoriais: materiais porosos e fibrosos, mais eficazes nas altas frequências; ressoadores, atuam maioritariamente nas frequências médias; e as membranas direcionadas que atuam de forma mais eficaz, em baixas frequências (Fig. 2.18) [1].

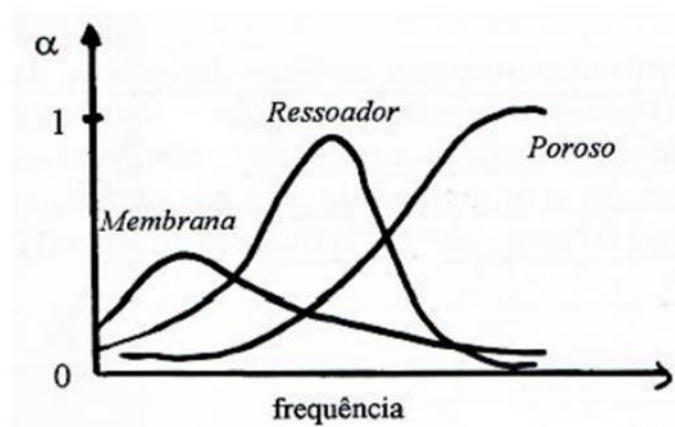


Fig. 2.18 - Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes [1]

Ao escolher as quantidades e distribuições destas classes de absorsores, é possível adaptar o comportamento do tempo de reverberação com a frequência para obter praticamente qualquer ambiente acústico desejado. É mesmo possível conceber uma sala cujas características de reverberação possam ser alteradas por meio de painéis deslizantes ou rotativos que exponham superfícies com diferentes propriedades de absorção. Uma vez que o tempo de reverberação ótimo depende da utilização da sala, é possível, desta forma, projetar salas para utilização polivalente. No entanto, a reverberação artificial introduzida eletronicamente pode ser uma solução menos dispendiosa e mais flexível para este problema, especialmente em salas de grandes dimensões [2]

2.5.2. MATERIAIS POROSOS E FIBROSOS

Materiais porosos, tais como lãs minerais, devem ser colocados no local de máxima incidência das ondas sonoras (por exemplo, parede do fundo do auditório/sala). Estes materiais são caracterizados por redes de poros interligados, característica determinante para obter uma eficiente transformação de energia acústica em calor por fricção [2].

A eficácia da absorção sonora é determinada pelas propriedades físicas de espessura, densidade e porosidade para a maioria dos materiais porosos, e pelo diâmetro e orientação das fibras para os materiais fibrosos [3].

A absorção sonora de tais materiais, relativamente pequena nas frequências mais baixas, aumenta com a espessura do material (Fig. 2.19). Pode também ser melhorada através da colocação do material afastado da parede com caixa de ar [2].

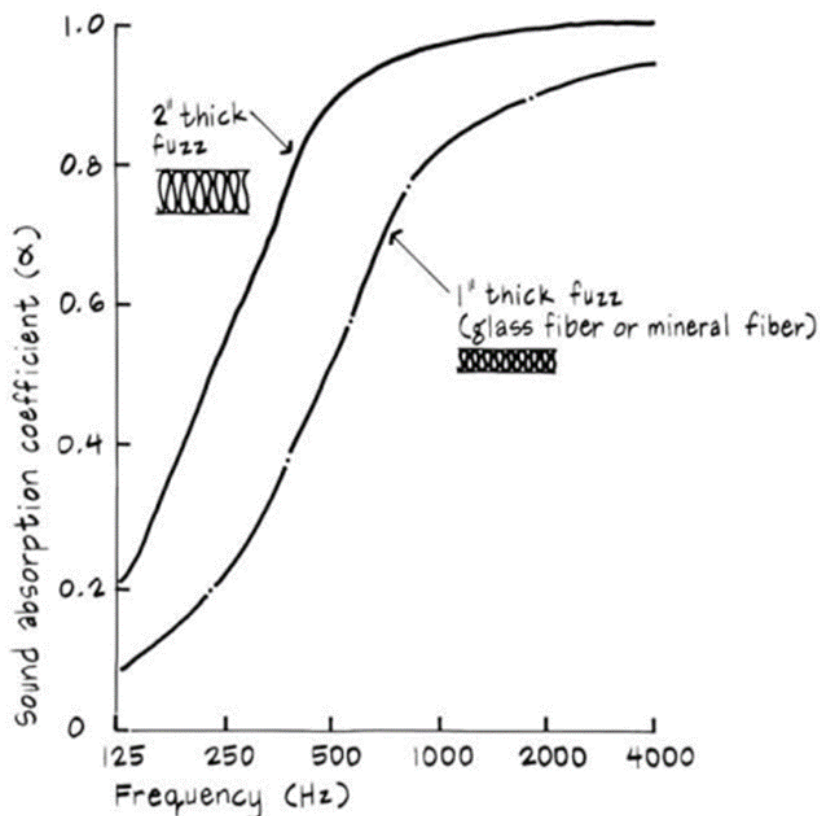


Fig. 2.19 - Influência da espessura no coeficiente de absorção sonora de um material poroso em função da frequência [3]

2.5.3. RESSOADORES

Um ressonador de cavidades consiste num volume confinado de ar ligado à sala por uma abertura estreita. Atua como um ressonador de Helmholtz, absorvendo a energia acústica de forma mais eficiente numa banda estreita de frequências próximas da sua ressonância. Tais absorvedores podem ter a forma de elementos individuais, tais como um bloco de betão padrão com cavidades (Fig. 2.20), ou outras formas, que consistem, por exemplo, em painéis perfurados e treliças de madeira [2].

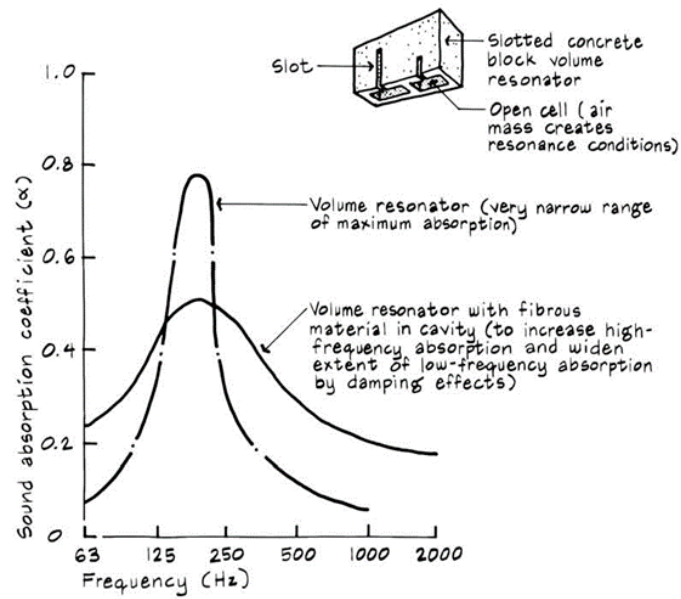


Fig. 2.20 - Variação do coeficiente de absorção sonora (α) para duas situações diferentes de aplicação de ressoadores [3]

2.5.4.MEMBRANAS

Uma membrana, que consiste num painel vibrante não poroso, montada afastada de uma base sólida, vibra sob a influência de um som incidente, e os mecanismos dissipativos no painel convertem alguma da energia acústica incidente em calor. Tais materiais absorventes são muito eficientes a baixas frequências. A adição de um material poroso no espaço entre o painel e a parede irá aumentar ainda mais a eficiência da absorção de baixa frequência [2].

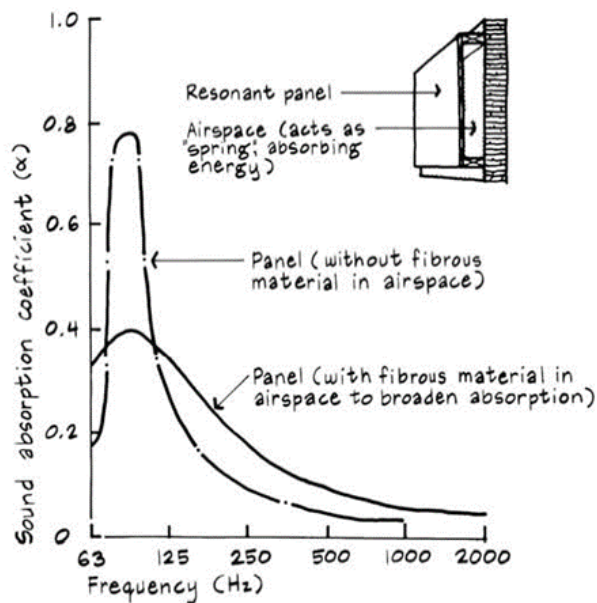


Fig. 2.21 - Variação do coeficiente de absorção sonora (α) para duas situações diferentes de aplicação de membranas [3]

2.6. ISOLAMENTO SONORO

O isolamento sonoro consiste no tratamento realizado num compartimento de forma que o som produzido nesse espaço não seja audível nos locais contíguos e vice-versa. Os ruídos transmitidos de um compartimento para o outro podem ser divididos em duas categorias, nomeadamente, ruídos de percussão, no qual existe solicitação mecânica direta da fonte de irradiação sobre os elementos de construção e ruídos de condução aérea, em que a transmissão se desenvolve unicamente por vibração do ar (Fig. 2.22). Os ruídos de percussão têm uma maior capacidade de se propagar por todo um edifício do que os ruídos aéreos [1]

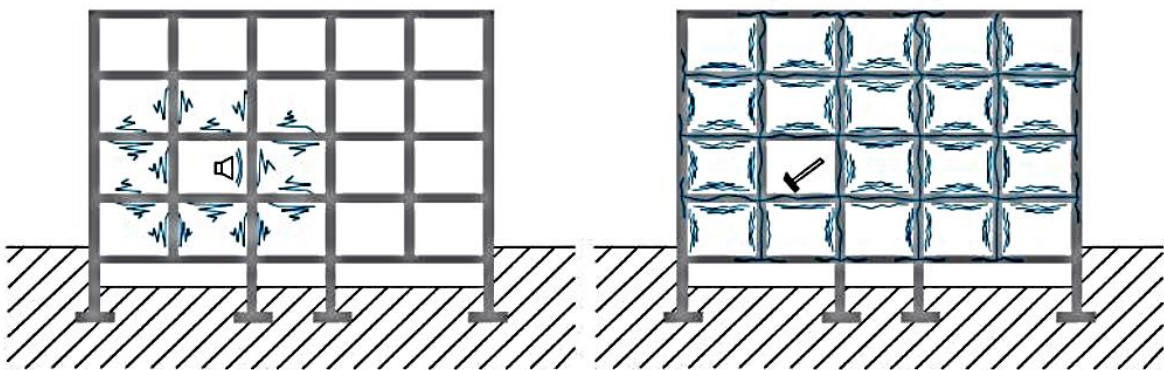


Fig. 2.22 - Esquema de situações de transmissão de ruídos aéreos (esq.) e de percussão (dir) [1]

O comportamento acústico de um elemento construtivo a ruídos de condução aérea depende fundamentalmente da sua massa e/ou da existência de duplicação física do material separador entre dois espaços (emissor-recetor). O parâmetro que mede o isolamento sonoro dos materiais este tipo de ruído é o R , redução sonora, expresso em dB (2.22).

$$R = 10 \log(1/\tau) \quad (2.22)$$

Sendo τ o coeficiente de transmissão sonora.

Para medições realizadas *in situ*, a expressão é utilizada para relacionar o valor da redução sonora aparente (R') com o isolamento sonoro padronizado (DnT) (2.23). Visto que a medição é realizada *in situ*, o valor da redução sonora aparente (R') inclui já a influência das transmissões marginais [33].

$$DnT = R' + 10 \log\left(\frac{0,16V}{S \cdot T_0}\right) \quad (2.23)$$

Sendo que V , corresponde ao volume do compartimento recetor m^3 , S à superfície de elemento separador m^2 e T_0 ao TR de referência (0,5 s).

O isolamento sonoro a ruídos de percussão, por sua vez, não tem como solução a adição de massa do elemento, mas sim é eficaz ao causar a descontinuidade entre fonte e recetor. A intervenção para tratar este tipo de ruído pode ser realizada em três áreas: na fonte, no caminho de transmissão e perto do recetor. [1]

Para efeitos de medição *in situ* [34], é definido o nível de pressão sonora padronizado (L'_{nT}) através da expressão 2.24:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (2.24)$$

Sendo L_i – nível de pressão média no compartimento recetor (dB), T -tempo de reverberação no compartimento recetor (s) e T_0 , TR de referência (0,5 s).

3

ESTADO DA ARTE

3.1.ACÚSTICA DE IGREJAS

3.1.1.ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

No ato de culto o som tem maior impacto do que qualquer outro fator. As atividades relacionadas com a palavra e a música são uma parte essencial de quase todos os serviços nas igrejas católicas. No entanto, a música e a palavra têm necessidades acústicas divergentes [22]. É importante conhecer e compreender a natureza da liturgia da Igreja ao longo da sua história e as correspondentes qualidades do ambiente acústico das igrejas [18].

Atualmente, a Igreja Católica Romana segue as diretivas do Concílio Vaticano II (1965) (Fig. 3.1) mas nos vinte séculos anteriores, existiam regras diferentes [18]. Este Concílio introduziu alterações muito importantes na Liturgia e no ato da veneração que podem ter fortes implicações no ambiente acústico em que estes são realizados. O Concílio decidiu que o ato de pregar sermões deve ser realizado no vernáculo e que durante o serviço, deveria existir música que as pessoas possam cantar. Estas mudanças relevantes no discurso e na música dos serviços exigem condições acústicas adequadas das igrejas [22].



Fig. 3.1 - Concílio Vaticano II (1965) [48]

Esta não foi a primeira vez na história do culto católico que a palavra e a música sofreram transformações relevantes [18]. A liturgia pela palavra, dominante nas sinagogas, foi adotada pelas primordiais igrejas Católicas, mas tornou-se impossível nas catedrais Constantinias (Imperador Constantino, século IV) e foi substituída, em grande parte, pela liturgia musical. Depois de se passar um milénio, a acústica das catedrais, foi alterada para atender às necessidades doutrinárias da Reforma Católica, com um ênfase renovado na palavra [19].

A Reforma Protestante no início do século XVI abalou profundamente a Igreja Católica. A Igreja respondeu com uma mudança geral das suas práticas no que é conhecido como a Contrarreforma (ou Reforma Católica). O Concílio de Trento (1545-1563) (Fig. 3.2) compreendeu a importância de mudar as práticas de culto para reconquistar e manter as congregações inquietas. A língua oficial para os homílios passou a ser a língua local e foram introduzidos os púlpitos nas igrejas. A pregação foi permitida e a música da igreja foi composta para inspirar a contemplação religiosa e não para dar prazer vazio ao ouvido. Estas reformas provocaram o regresso dos cânticos vernáculos cantados pelo povo antes e depois da missa, mas não durante a liturgia. Os profissionais assumiram a execução da música da igreja. Surgiram novas formas musicais, tais como oratórios. Novos estilos evoluíram, floresceram, e tiveram sucesso ao longo do tempo, incluindo o Barroco, o Clássico e o Romântico [18].

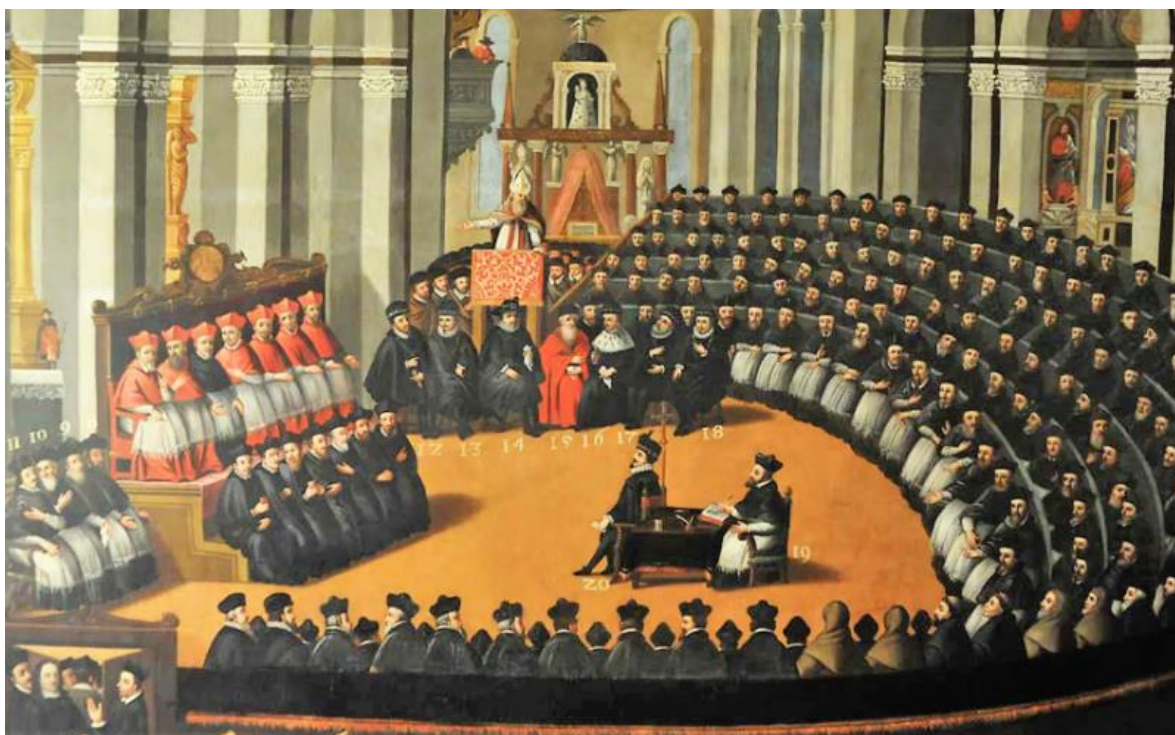


Fig. 3.2 - Concílio de Trento (1545-1563) [47]

A história da civilização ocidental pode ser contada através da acústica dos seus espaços de culto [19]. As igrejas desenvolveram e adaptaram ao longo do tempo a necessidade de um ambiente acústico específico. Na história da Igreja, na grande parte do seu passado, não se deu ênfase à compreensão do que foi dito. Por conseguinte, não foram necessárias condições acústicas adequadas para essa tarefa. A música na Igreja sofreu grandes mudanças ao longo do tempo, passando de um papel importante na adoração até ao seu quase desaparecimento total [22].

A música foi muito importante no nascimento do cristianismo, e os instrumentos musicais eram permitidos [22]. Depois, no século IV, a música na igreja mudou, com uma proibição contra o uso litúrgico de instrumentos nos serviços da igreja. No entanto, a música vocal era permitida [18]. Na ausência de notação escrita, permaneceu simplesmente monofónica. Com o passar dos anos, a voz da assembleia foi silenciada e os católicos começaram a ritualizar sem música. Profissionais assumiram o canto dos fiéis e a igreja passou de grupos de intérpretes a uma multidão de ouvintes [18]. Outra mudança no repertório da igreja surgiu com o cântico gregoriano (século VII) devido à ascensão de grandes comunidades monásticas. Alguns séculos mais tarde, o canto da igreja foi transformado pela introdução de melodias polifónicas [22].

3.1.2. PARÂMETROS ACÚSTICOS OBJETIVOS EM IGREJAS CATÓLICAS PORTUGUESAS

Portugal é um dos países europeus mais antigos e desempenhou um papel proeminente em alguns dos acontecimentos mais significativos da História mundial. Apresenta um local quase perfeito para traçar a história dos edifícios de igrejas católicas no mundo. As igrejas portuguesas podem ser consideradas um exemplo representativo das igrejas católicas no mundo [20].

A investigação iniciada em 1991 por Carvalho [18] explorou métodos para a avaliação e previsão das qualidades acústicas das igrejas portuguesas, como resultado das variações nos parâmetros acústicos e características arquitetónicas objetivas encontradas nos edifícios pesquisados. 41 igrejas portuguesas católicas romanas de dimensão variável (volumes de 1900 a 5800 m³) e estilos arquitetónicos (do Visigótico ao Contemporâneo) foram estudadas [21].

As principais características arquitetónicas destas igrejas estão apresentadas no Quadro 3.1. As igrejas são uma amostra de 14 séculos de construção de igrejas em Portugal e foram selecionadas para representar os principais estilos arquitetónicos encontrados em Portugal e com o objetivo de representar a evolução da construção de igrejas nos países latinos. O resumo dos estilos arquitetónicos das igrejas é apresentado no Quadro 3.2. [20].

Quadro 3.1 - Principais características arquitetónicas das igrejas portuguesas estudadas por Carvalho, 1994 [20]

| Característica Arquitetónica | Mínimo | Máximo | Médio | Mediana | Assimetria |
|------------------------------|--------|--------|-------|---------|------------|
| Volume (m ³) | 299 | 18674 | 5772 | 3918 | 0,99 |
| Área (m ²) | 56 | 1031 | 450 | 427 | 0,41 |
| Altura máxima (m) | 6,5 | 39,0 | 14,8 | 13,4 | 1,67 |
| Comprimento máximo (m) | 11,5 | 62,2 | 33,1 | 30,8 | 0,31 |

Quadro 3.2 - Estilos arquitetónicos por ordem cronológica das igrejas portuguesas analisadas por Carvalho [22]

| Estilo Arquitetónico | Século | Estilo Arquitetónico | Século |
|----------------------|------------|----------------------|--------------|
| 1 – Visigótico | VI – XI | 5 - Renascentista | XVI - XVII |
| 2 – Românico | XII – XIII | 6 – Barroco | XVII - XVIII |
| 3 – Gótico | XIII – XV | 7 – Neoclássico | XVIII - XIX |
| 4 – Manuelino | XV - XVI | 8 – Contemporâneo | XX |

No que diz respeito à análise acústica de igrejas, os principais e mais significativos parâmetros a serem utilizados são: tempo de reverberação (TR), claridade (C_{80}) e nível sonoro (L). Estas três medidas representam três grupos de parâmetros - RT/EDT/TS, C_{80}/D e L – que apresentam níveis elevados de correlação dentro do mesmo grupo [20].

Independentemente da posição do recetor, isto é, se este se encontra no campo direto da fonte sonora ou no campo reverberado, o RASTI pode ser previsto pela utilização do C_{80} (2 kHz) [23]. Na verdade, C_{80} e TR são parâmetros significativos na previsão da inteligibilidade da palavra [24]. Nível sonoro (L) não se apresenta como uma importante característica no que toca à previsão do RASTI, e por extensão, à inteligibilidade da palavra numa igreja [23], o que suporta a ideia de que esta característica, em condições de campo reverberado não depende do nível sonoro (L) [14].

O Quadro 3.3, evidencia as melhores relações entre parâmetros acústicos objetivos.

Quadro 3.3 - Melhores relações entre parâmetros acústicos objetivos, em igrejas (Carvalho) [1]

| Equação | R^2 | Equação | R^2 |
|-----------------------------------|-------|---|-------|
| $EDT = 0,043 + 0,941 TR$ | 0,98 | $C_{80} = 30,94 - 6,422 \ln (TS)$ | 0,86 |
| $EDT = 0,219 + 0,013 TS$ | 0,88 | $D_{50} = 0,347 + 0,048 C_{80} + 0,0016 C_{80}^2$ | 0,88 |
| $C_{80} = 2,88 - 5,572 \ln (TR)$ | 0,56 | $D_{50} = 1,562 - 0,25 \ln (TS)$ | 0,71 |
| $C_{80} = 2,78 - 5,735 \ln (EDT)$ | 0,61 | $TS = 17,82 + 64,203 TR$ | 0,83 |

Em conclusão, os três parâmetros acústicos objetivos escolhidos para serem analisados nas relações com os estilos e parâmetros arquitetónicos são os seguintes: tempo de reverberação (TR), RASTI e nível sonoro (L).

A figura 3.3 mostra o valor médio de RASTI em cada igreja e o seu intervalo de confiança com um desvio padrão. Os valores médios variam de 0,33 a 0,62 onde a qualidade subjetiva é julgado aceitáveis ou pobres. Apenas duas igrejas têm valores RASTI acima de 0,60. A grande maioria das igrejas tem valores RASTI inferiores a 0,45 dando uma má classificação na qualidade da inteligibilidade da palavra. Este valor é inferior ao desempenho mínimo de 0,50 exigido em muitos espaços, por exemplo, quando se utilizam sistemas de voz [14].

A figura 3.4 apresenta a variação de RASTI com a distância à fonte sonora, em igrejas. Existe uma diminuição acentuada nas posições mais próximas do som fonte onde as posições estão localizadas no campo direto e uma inclinação reduzida em distâncias maiores onde as posições estão localizadas no campo reverberante [14].

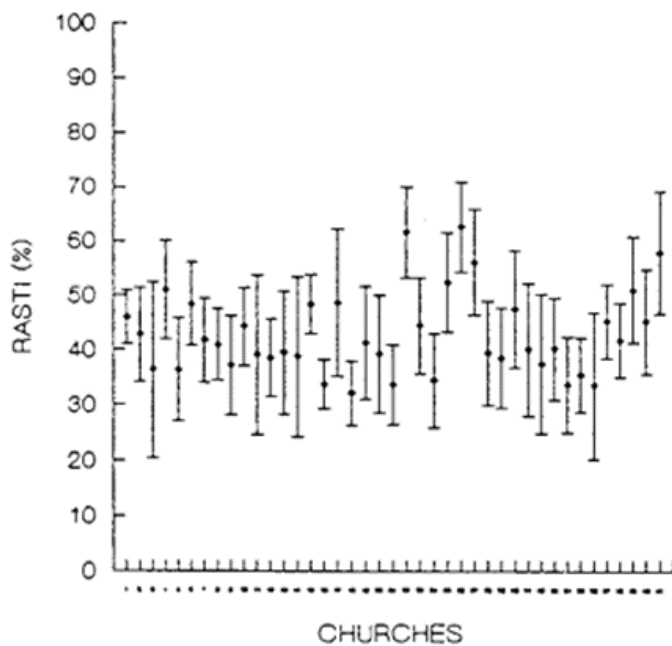


Fig. 3.3 - Valores médios do RASTI e correspondente erro de desvio para cada igreja analisada por Carvalho [14]

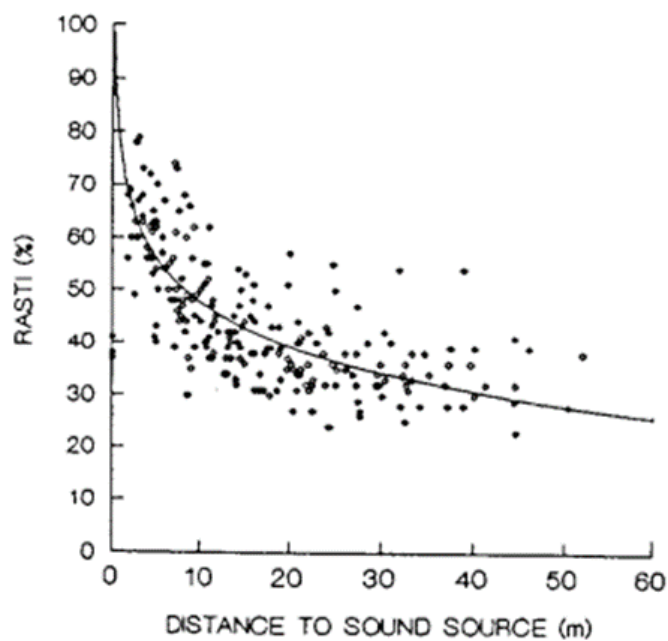


Fig. 3.4 - Valor do RASTI vs. distância do recetor à fonte sonora, para todas as igrejas estudadas por Carvalho [14]

3.1.3. RELAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS COM OS ESTILOS ARQUITETÓNICOS

O efeito de oito estilos arquitetónicos (1-Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico e 8-Contemporâneo) e a sua evolução ao longo dos últimos 14 séculos foi testado em vários parâmetros acústicos. As igrejas testadas foram agrupadas em estilos arquitetónicos, mediante a sua decoração interior, acabamentos e forma. [22]

Uma tendência parece estar presente na variação dos parâmetros acústicos ao longo do tempo e podem ser destacadas diferenças estatisticamente significativas em relação a alguns estilos arquitetónicos. [22]

Os valores do tempo de reverberação parecem aumentar ao longo do tempo com um maior TR a ocorrer por volta dos séculos XVI-XVII (Figura 3.5). Isto coincide com o aumento do uso do órgão na música da igreja, onde se deseja um TR maior. Tempos de reverberação mais elevados aparecem quando os coros da igreja crescem em tamanho, por exemplo o Coro Papal em Roma aumentou de 10 para 24 cantores no final do século XV [22].

Ao analisar o gráfico da figura 3.5, verifica-se que existe um aumento do TR até ao estilo 5 (Renascentista) e conseqüentemente um declínio dos valores de reverberação até o estilo 8 (Contemporâneo). O ponto de rutura no tempo, onde a tendência geral dos dados muda, é o período da Reforma e de Contrarreforma onde o discurso nas igrejas católicas começou a ser importante e a música litúrgica mudou. O estilo Barroco (6), mudou de forma drástica a necessidade do comportamento acústico das igrejas testadas. Essas mudanças parecem ter sido rapidamente esquecidas. Com o Neoclássico, a tendência anterior reaparece para ser invertida apenas neste século, onde o discurso é talvez a parte mais importante dos serviços religiosos. [22]

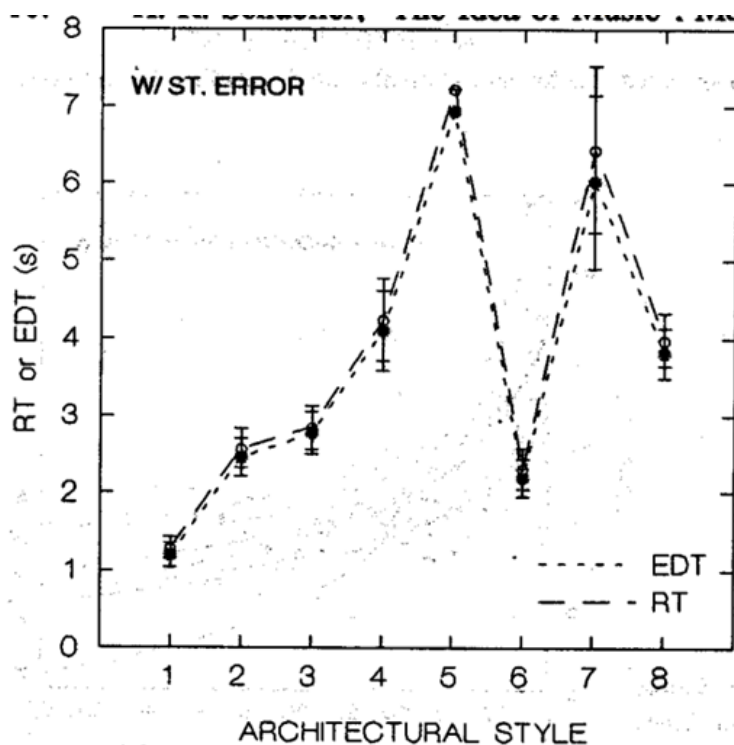


Fig. 3.5 - Valores do tempo de reverberação em relação com o estilo arquitetónico (1 - Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico e 8-Contemporâneo) com barra de erro de desvio [22]

A música da igreja na Renascença mudou de ser executada por vários solistas para a atuação ser realizada por um coro inteiro (masculino). É durante este período que os profissionais tinham o controlo da música da igreja e aproveitavam as condições reverberantes encontradas nas igrejas na música que compunham. Atualmente, a introdução de novos órgãos em igrejas não é comum e quando a inteligibilidade da palavra é fundamental (depois do Concílio Vaticano II), os valores do TR parecem diminuir para se ajustarem a estes novos requisitos [22].

As figuras 3.6 e 3.7 demonstram as análises do comportamento RASTI para os diferentes estilos arquitetónicos. A figura 3.6 demonstra uma tendência semelhante à evolução do TR analisada anteriormente e parece alinhar com a ideia de que também o discurso parece ter desempenhado um papel importante nas mudanças que ocorreu no período da Contrarreforma. [22]

A figura 3.7 caracteriza a variação do RASTI com a distância até à fonte sonora, perto do altar (excluindo o campo direto, distância inferior a 5 m), com as linhas de regressão para cada estilo arquitetónico. Também aqui o estilo da Renascença demonstra a mais baixa classificação de inteligibilidade da palavra enquanto o Visigótico e o Barroco, são os estilos com os valores mais elevados de RASTI. [22]

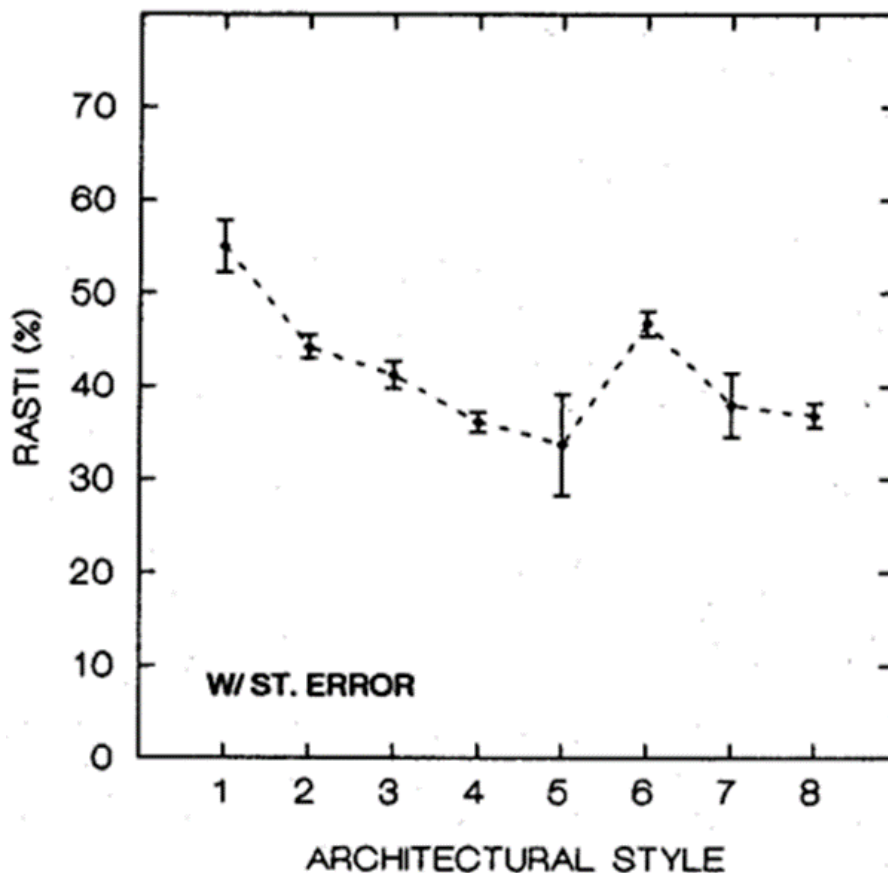


Fig. 3.6 - Valores do RASTI para cada estilo arquitetónico (1 - Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico e 8-Contemporâneo) com barra de erro de desvio [22]

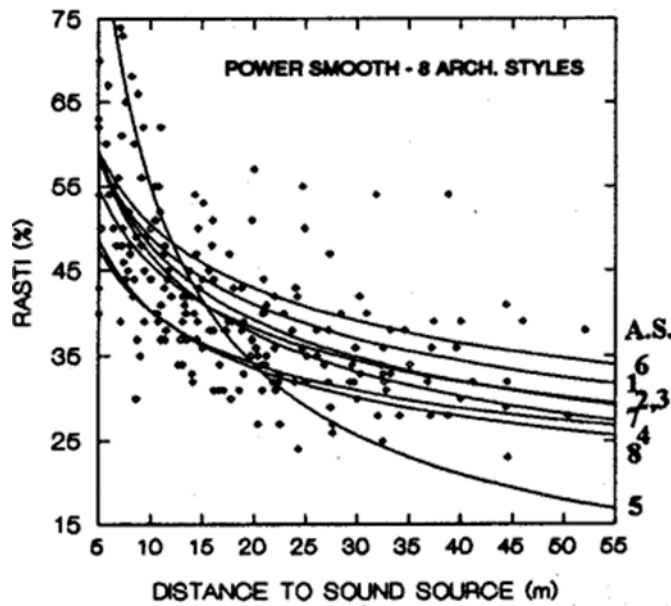


Fig. 3.7 - Valores do RASTI vs. distância à fonte sonora (1 - Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico e 8-Contemporâneo) com ajustes [22]

3.1.4.RELAÇÃO DE PARÂMETROS ACÚSTICOS COM CARACTERÍSTICAS ARQUITETÓNICAS

Relações estatisticamente significativas entre inteligibilidade da palavra e critérios objetivos podem ser encontradas em igrejas. Foram identificadas treze características arquitetônicas que são importantes para definir a inteligibilidade da palavra nas igrejas. Destes parâmetros arquitetônicos, “volume da nave” foi definida como o mais importante, pois apresenta a melhor relação com o RASTI. [24]

Foi calculada uma equação de previsão utilizando três parâmetros arquitetônicos para estimar a média de RASTI nas igrejas. O melhor modelo utilizando três parâmetros arquitetônicos foi encontrado com a largura da nave, absorção sonora média e a altura da nave ($R^2 = 0,73$). 73% da variabilidade entre igrejas da média do RASTI é explicada pela absorção sonora média da igreja, pela largura e altura da nave, utilizando o seguinte modelo (erro padrão da estimativa = 0,04). Em resumo, os melhores modelos para prever um valor médio de RASTI nas igrejas são apresentados na Quadro 3.4 [14]

Quadro 3.4 - Sumário dos melhores modelos matemáticos para previsão do RASTI médio em igrejas [14]

| Modelo | R^2 | Parâmetros Arquitetônicos usados no modelo |
|---|-------------|---|
| Melhor linear | 0,31 | Área Total |
| Melhor não-linear | 0,46 | Volume da Nave |
| Melhor linear com 2 parâmetros arquitetônicos | 0,54 | Absorção Média + Largura da Nave |
| Melhor linear com 3 parâmetros arquitetônicos | 0,73 | Absorção Média + Largura Nave + Altura Nave |

3.1.5. INFLUÊNCIA DA OCUPAÇÃO NA ACÚSTICA DE IGREJAS

A inteligibilidade da palavra é geralmente avaliada através da utilização de parâmetros objetivos, em salas desocupadas. No entanto, em condições normais, a ocupação da sala pode aumentar ou diminuir os valores da inteligibilidade da palavra, considerando o efeito da absorção sonora adicional presente na sala ou pela alteração da relação sinal/ruído (S/N), que representa a sobreposição do nível da palavra sobre o ruído de fundo, o tempo de reverberação e a presença de reflexões tardias perturbadoras [25].

Certos efeitos relacionados com a ocupação da sala podem aumentar os valores de inteligibilidade da palavra, tais como, a redução do tempo de reverberação induzido pela absorção sonora adicional da audiência. A ocupação induz um aumento médio para a inteligibilidade da palavra de 0,050 com a utilização de um sistema de altifalante e de 0,035 sem este sistema [42]. Além disso, a ocupação do público numa sala pode resultar numa redução dos fenómenos de concentração, na medida em que a absorção sonora extra remove um possível eco de *flutter* entre o piso e o teto [25].

As variações de humidade e temperatura causadas pela audiência apresentam alterações insignificantes na mudança nos valores de inteligibilidade da palavra [25]. Outros efeitos, pelo contrário, podem diminuir a inteligibilidade da palavra, como por exemplo, o aumento do nível de ruído de fundo relacionado com a presença do público, bem como a diminuição do nível sonoro com a distância devido à absorção sonora e o efeito do som reverberante [25].

No passado, até há alguns séculos atrás, não existiam bancos ou cadeiras para as pessoas nas igrejas. Por essa razão, a absorção total dos assentos nas igrejas desocupadas, pode não ser muito diferente em algumas bandas de frequência, particularmente nas mais altas, das condições acústicas das igrejas no passado, sem bancos e com uma menor congregação [26].

3.1.6. ESPAÇOS ACOPLADOS EM IGREJAS

Igrejas católicas tradicionais do sul da Europa tem tetos altos, grandes volumes e paredes refletoras. Estas características arquitetónicas causam um valor elevado de tempo de reverberação. Uma vez que muitas das capelas laterais, dentro da igreja principal, atuam como espaços acoplados, este tipos de espaços causam problemas se o tempo de reverberação da capela não coincidir com o TR da sala principal [18]. Carvalho (1994) adotou a fórmula de Sabine para igrejas, de forma a contabilizar a absorção específica de altares, capelas laterais e zonas de corredores laterais que se comportam como espaços acoplados [1]. O α desses espaços “acoplados” será determinado de acordo com a expressão 3.1

$$\alpha_{ig} = \tanh [a (l/w - b)] \quad (3.1)$$

Sendo l , o comprimento e w , largura. O Quadro 3.5 expressa os valores das constantes a e b

Quadro 3.5 - Valores das constantes a e b [1]

| Situação | a | b |
|---------------------|-------|-----|
| Capelas | 0,007 | 0 |
| Altar principal | 0,985 | 0,6 |
| Corredores laterais | 0,012 | -14 |

3.2.ACÚSTICA DE SALAS DE CONCERTOS

As salas de concertos representam um dos mais interessantes tipos de espaços interiores para o estudo da acústica e o projeto deste tipo de salas beneficiou de uma considerável quantidade de investigação [10]. Beranek, em 1962, após um trabalho de investigação com base na avaliação acústica de 54 salas de concertos, condensou no seu livro *Music, Acoustics and Architecture*, 1962 [27], a análise de cada um destes auditórios. Em continuação deste trabalho, em 1992, publica uma lista que resume os sete atributos principais da acústica de salas de concertos [28]. Estes são a reverberância, intensidade do som, amplitude, clareza do discurso musical, intimidade, envolvimento e audição no palco. Estes parâmetros podem ser organizados em três grupos: clareza, envolvimento e intensidade do som [10]

Em conclusão, quando os auditórios são utilizados principalmente para apresentações musicais, o objetivo é atingir em toda a sala, um nível sonoro satisfatório, com clareza, reverberação e intimidade. [3]

- a) **tempo de reverberação** (500-1000 Hz) quando a sala está ocupada deve ser de 1,6 a 2,4 segundos para ópera, sinfonia, órgão e música de coro. Por outro lado, o tempo de reverberação para baixas frequências deve ser superior a 1,2 segundos. [3] Segundo Beranek, o tempo de reverberação de uma sala pode ser associado a valores ideais do rácio de baixos (BR) [27], parâmetro que o mesmo definiu em 1962 como medida de “calor” (*warmth*) de uma sala. Esta característica subjetiva relaciona-se com a predominância dos sons graves dentro de um espaço interior. Os valores ideais do BR associados ao tempo de reverberação são:
- i. $1,1 < BR < 1,25$ s para tempos de reverberação na ordem dos 2,2 s
 - ii. $1,1 < BR < 1,45$ s para tempos de reverberação até 1,8 s

O Quadro 3.6 apresenta rácio de baixos para diferentes salas de concerto de renome e respetivos TR.

Quadro 3.6 . Valores de BR e TR para diversas salas de concertos, com ocupação [29]

| Salas de concerto | BR (s) | TR (s) |
|----------------------------------|--------|--------|
| Amsterdão, Concertgebouw | 1,08 | 2,0 |
| Boston, Symphony Hall | 1,03 | 1,9 |
| Viena, Gr. Musikvereinssaal | 1,11 | 2,0 |
| Basileia, Stadt-Casino | 1,17 | 1,8 |
| Berlim, Konzerthaus | 1,23 | 2,1 |
| Cardiff, Gales, St. David's Hall | 0,96 | 2,0 |
| Zurique, Großer Tonhallaesaal | 1,23 | 2,1 |

- b) **Intimidade** pode ser conseguida fornecendo um intervalo inicial de tempo de atraso (EDT) menor que 20 milissegundos para a energia sonora refletida. Para música sinfónica, salas retangulares devem ter uma relação comprimento/largura inferior a 2 de forma a produzir reflexões laterais fortes [3].

- c) **Clareza musical**, no caso da música, não é uma qualidade acústica para a qual, em que quando maior for valor, melhor. O parâmetro C_{80} , determinado pela relação entre forças relativas de energia sonora útil (reflexões que reforçam o som direto) e energia sonora prejudicial (reflexões que causam mascaramento penoso), pressupõe, desta forma, que existe um equilíbrio ótimo de clareza e reverberância na acústica da música [10]. O Quadro 3.7, apresenta valores característicos da clareza (C_{80}), de algumas salas de concerto internacionais de renome.

Quadro 3.7 – Valores característicos de C_{80} [29]

| Salas de concerto | C_{80} – Sala vazia (dB) |
|----------------------------------|----------------------------|
| Amsterdão, Concertgebouw | -3.3 |
| Boston, Symphony Hall | -2.7 |
| Viena, Gr. Musikvereinssaal | -3.7 |
| Basileia, Stadt-Casino | -2.3 |
| Berlim, Konzerthaus | -2.5 |
| Cardiff, Gales, St. David's Hall | -0.9 |
| Tóquio, Hamarikyu Asahi | -0.2 |
| Zurique, Großer Tonhalleaal | -3.6 |

As salas de concertos devem ter superfícies difusoras nas paredes laterais, varandas, tetos e paredes do palco de modo que os ouvintes recebam o som refletido de muitas direções. Superfícies críticas, como as refletoras de som perto do palco e orquestra, devem ser moldadas de forma que a energia sonora refletida de volta ao palco, proporciona aos intérpretes a sensação de resposta por parte da sala. Devem ser evitadas superfícies que produzem eco, tanto no palco como na sala. [3]

Em resultado, de uma extensiva análise de salas de concerto e de óperas, tanto europeias como norte-americanas, uma relação empírica entre o tempo de reverberação, com ocupação, e os parâmetros do espaço interior, S_T e V , e é sugerida por Beranek (3.2) [29],

$$T_{\text{ocupado}} = 0.14 \frac{V}{S_T} \quad (3.2)$$

em que S_T corresponde à área, em m^2 , do pavimento composto pelo conjunto da audiência, coro e orquestra. V corresponde ao volume interior do espaço, expresso em m^3 .

O Quadro 3.8 apresenta uma seleção de salas de concertos e de óperas classificadas de “muito boas” a “excelentes” [2].

Quadro 3.8 - Valores característicos de algumas salas de espetáculos analisadas por Beranek [adaptado, 2]

| Sala | $V/10^3$ (m ³) | $S_T/10^3$ (m ²) | Tempo de Reverberação(s) | | | | | | Lugares |
|--|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------|-----|-----|-----|-----|---------|
| | | | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | |
| Jerusalem, Binyanei Ha'oomah | 24,7 | 2,4 | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,5 | 3100 |
| Nova Iorque, Carnegie Hall | 24,3 | 2,0 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,6 | 1,6 | 1,4 | 2800 |
| Boston, Symphony Hall | 18,7 | 1,6 | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 1,5 | 2600 |
| Amsterdão, Concertgebouw | 18,7 | 1,3 | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 1,9 | 1,8 | 1,6 | 2200 |
| Glasgow, St. Andrew's Hall | 16,1 | 1,4 | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 1,8 | 1,5 | 2100 |
| Fidatúlia, Academy of Music | 15,7 | 1,7 | 1,4 | 1,7 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 3000 |
| Viena, Grosser Musikvereinsaal | 15,0 | 1,1 | 2,4 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 1,9 | 1,6 | 1700 |
| Bristol, Colston Hall | 13,5 | 1,3 | 1,9 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,4 | 2200 |
| Bruxelas, Plais des Beaux Arts | 12,5 | 1,5 | 1,9 | 1,75 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,1 | 2200 |
| Gothenburg, Konserthus | 11,9 | 1,0 | 1,9 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1400 |
| Leipzig, Neues Gewandhaus | 10,6 | 1,0 | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1600 |
| Basileia, Stadt-Casino | 10,5 | 0,9 | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1400 |
| Cambridge, Mass., Kresge Auditorium | 10,0 | 1,0 | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1200 |
| Buenos Aires, Teatro Colon | 20,6 | 2,1 | - | - | - | - | - | - | 2800 |
| Nova Iorque, Metropolitan Opera | 19,5 | 2,6 | 1,8 | 1,5 | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 2800 |
| Milão, Teatro alla Scala | 11,2 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,0 | 0,9 | 2500 |

3.3. REABILITAÇÃO DE IGREJAS PARA OUTROS FINS – AUDITÓRIOS E SALAS DE CONCERTOS

3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A reabilitação de igrejas para outros fins ocorre porque com o fim das ordens religiosas, em Portugal, no século XIX, um grande número de igrejas ficou sem uso ou foram vendidas com o objetivo de servirem de edifícios industriais, escolares, hospitalares, etc. Desta forma, existem, atualmente, um conjunto de igrejas do domínio público, onde existe a possibilidade de reabilitação para outros fins, de entre os quais, sala de concertos. Para este fim, existe dois grandes problemas que o espaço interior de uma igreja possui, tetos altos e valores do tempo de reverberação elevados.

O volume, acabamentos e forma de um espaço de uma igreja afetarão a percepção da palavra e a qualidade da música. Para mitigar os efeitos de focalização, os tetos côncavos podem ser alisados no centro ou tratados com elementos difusores de som. As superfícies das paredes e tetos devem ser refletoras de som com irregularidades em grande escala de forma a contribuir para a reverberação desejada, difusão, e reflexões laterais. Em geral, devem ser evitados materiais que absorvam seletivamente a energia sonora a baixas frequências. [3] As áreas do músico devem ser mais altas do que a congregação e próximas de superfícies refletoras, e nunca colocadas em recessos profundos para permitir a projeção dos seus sons no volume principal da igreja. [3] A música tem melhor projeção em igrejas com planimetria relativamente estreita e elevado volume de espaço. Planos largos, que envolvem os assentos congregacionais em redor da zona do púlpito não fornecem som lateral suficiente. A sua ausência contribui para que o som pareça distante, faltando-lhe a plenitude do tom. Devem ser evitadas áreas de assento que protejam os ouvintes do som reverberante. [3]

3.3.2. CASO DE ESTUDO – ANTIGO MOSTEIRO S. TOMASSO, PERUGIA

O antigo mosteiro S. Tomasso, Perugia é um edifício do século XV, usado parte como escola, parte como um pequeno museu e parte como complexo de apartamentos. Foi estudado por Buratti C., [30] o projeto de reabilitação da igreja do mosteiro para um novo espaço, um pequeno auditório de 64 lugares (Fig. 3.8).

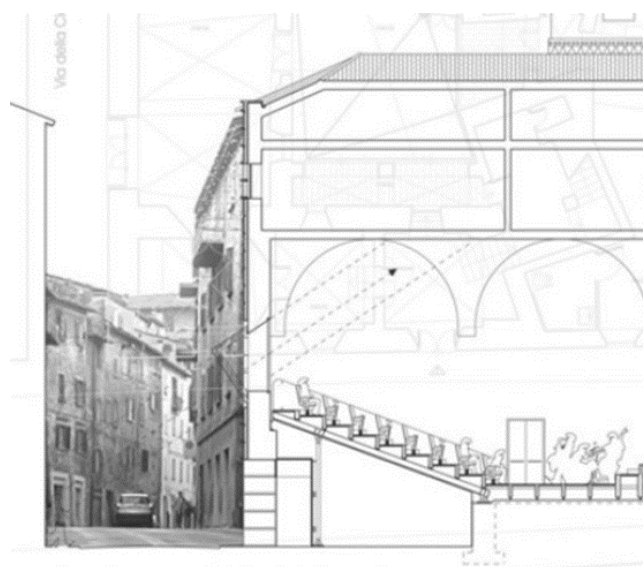


Fig. 3.8 - Corte transversal da igreja de S. Tomasso (Perugi) reabilitada [30]

A qualidade acústica da sala foi verificada usando o *software* de previsão acústica RAMSETE, que permite a modelação da sala através de superfícies planas com os seus coeficientes de absorção sonora. [30]

Foram consideradas duas configurações diferentes para o espaço, nomeadamente, a de sala de concertos e sala de conferências. Os seguintes parâmetros foram calculados tempo de reverberação (T_{60}), nível de pressão sonora equivalente - Leq (A), claridade (C_{80}), definição (D_{50}) e o RASTI.

Para o caso de sala de concertos (Fig. 3.9), os valores do tempo de reverberação obtidos para a configuração inicial da igreja foram demasiados altos, especialmente nas médias e altas frequências (TR médio de 2,1 s) enquanto o C_{80} apresentou valores adequados (Fig. 3.10). Consequentemente, materiais absorvedores sonoros, bem como audiência, foram inseridas no modelo e o valor obtido do TR no modelo acústico de 1,6 s (500 Hz) atingiu a gama de valores ideais para uma sala de concertos do volume da igreja (700 m³)[30]. Os valores finais (T_{60} , C_{80} e Leq (A)), obtidos para as simulações correspondente à configuração de sala de concertos estão representados na figura 3.10.

Para o caso de sala de conferências, o valor ótimo a atingir para TR era de 0,8 s. Com o fim de obter uma boa inteligibilidade da palavra, era necessário que os valores da claridade (C_{80}) e definição, (D_{50}) (Fig. 3.11) fossem mais elevados. Desta forma, foi introduzido materiais na simulação com o objetivo de aumentar a difusão acústica da sala. Consequentemente, a energia sonora ficou concentrada nos primeiros momentos, o que resultou numa melhoria dos valores de claridade e definição. O valor do RASTI médio da sala, subiu de valor de 0,54 (situação inicial) para 0,59 (simulação), o que corresponde a valores dentro do intervalo 0,45 – 0,75, logo uma boa inteligibilidade da palavra foi atingida [30]. Os valores finais (T_{60} , C_{80} , LAeq e D_{50}), obtidos para as simulações correspondentes à configuração de sala de conferências estão representados na figura 3.11.

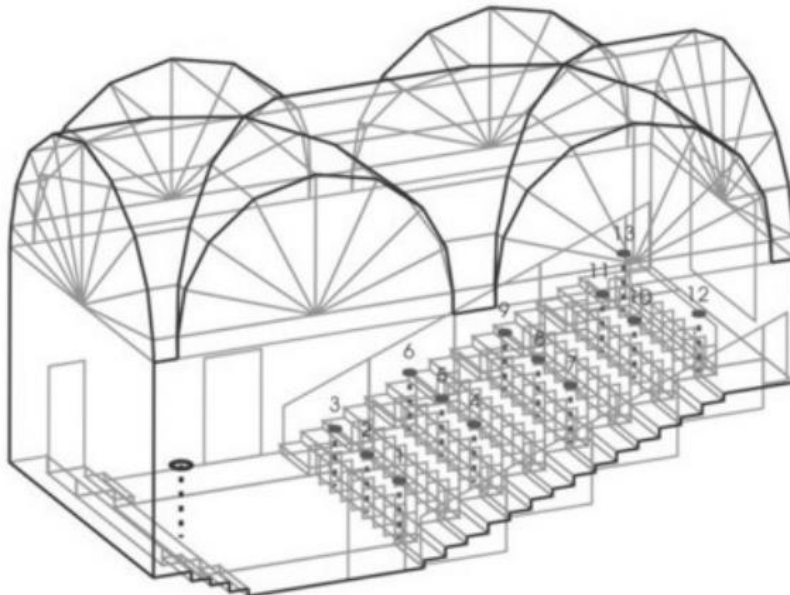


Fig. 3.9 - Simulação do espaço da igreja de S. Tomasso, para o uso de sala de concertos [30]

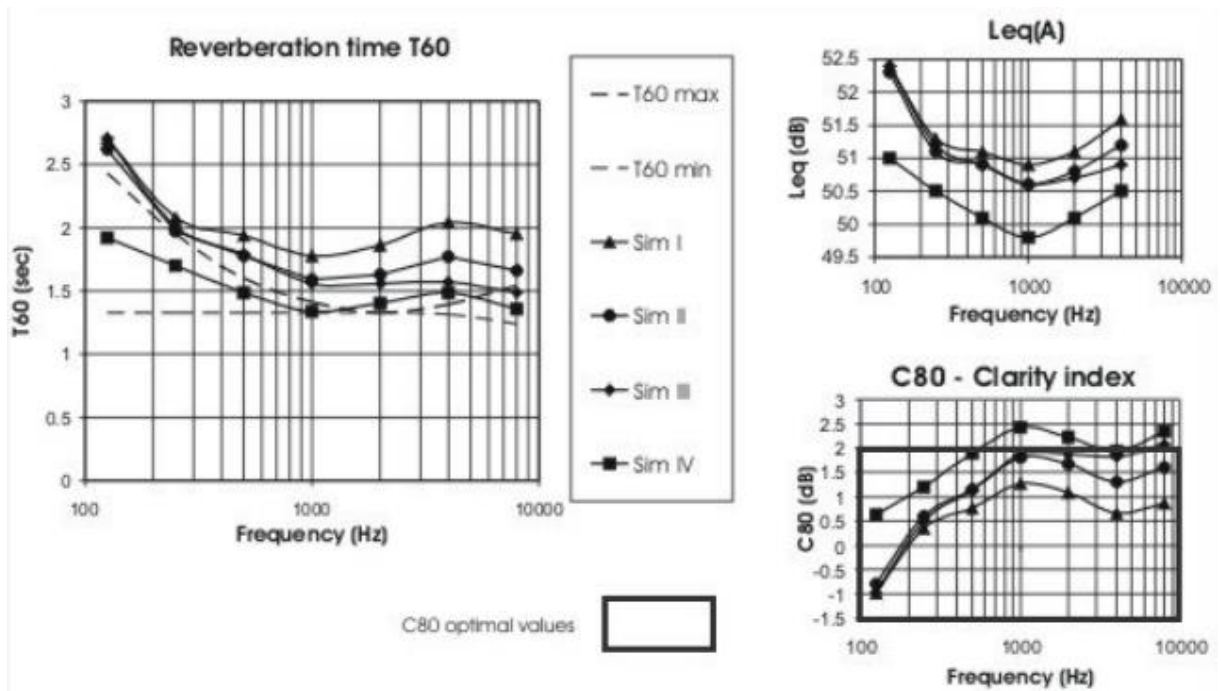


Fig. 3.10 – Igreja de S.Tomasso, sala de concertos – situação final: T_{60} , C_{80} e L_{Aeq} [30]

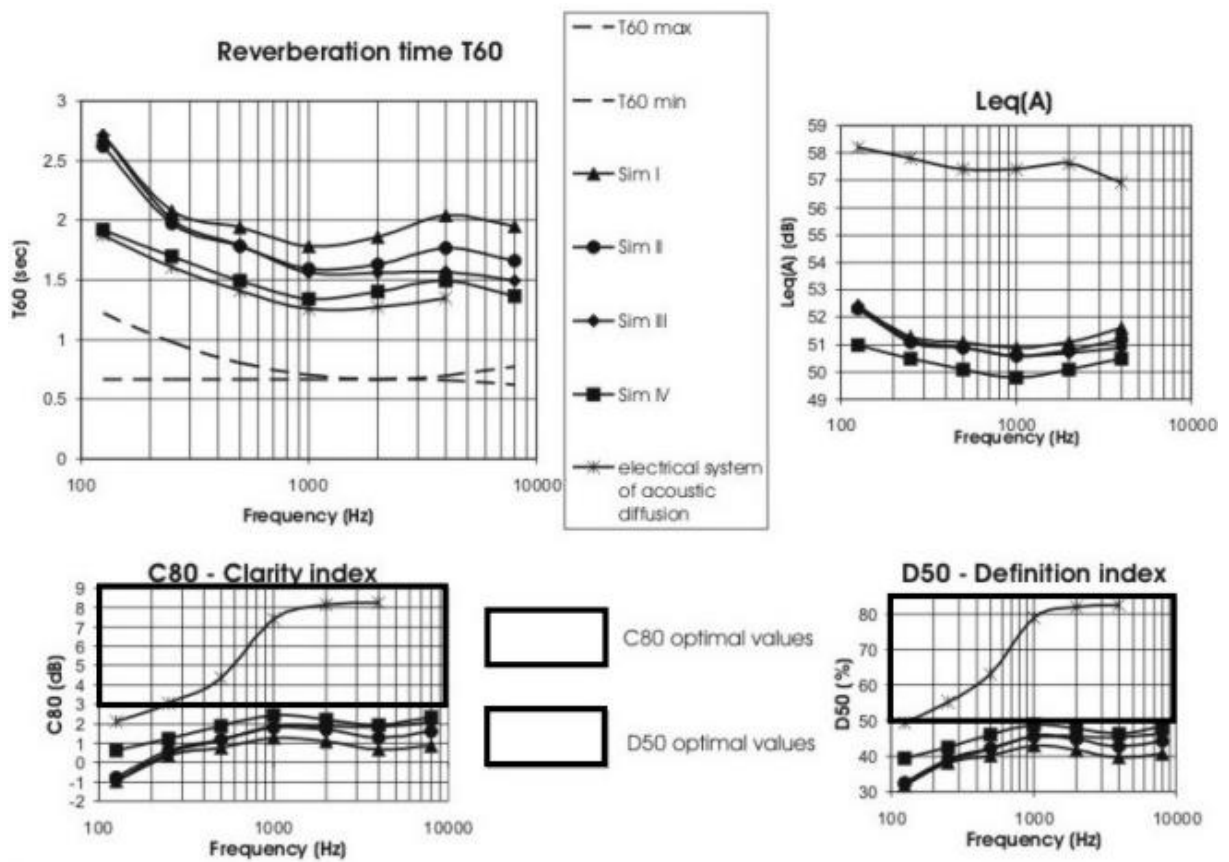


Fig. 3.11 – Igreja de S.Tomasso, situação sala de conferências– situação final: T_{60} , C_{80} , L_{Aeq} e D_{50} [30]

3.3.3.CASO DE ESTUDO – IGREJA DE LA ANUNCIACIÓN, SEVILHA

A igreja Renascentista de La Anunciación, em Sevilha, é utilizada, não só para serviços religiosos, mas também como sala de concertos. As condições acústicas não são adequadas para este último propósito, uma vez que a igreja apresenta tempos de reverberação elevados. Deste modo, uma equipa de investigação da Universidade de Sevilha, levou a cabo um estudo com o objetivo de analisar o comportamento acústico da igreja renascentista e encontrar soluções de correção acústica [31].

A igreja, apresenta uma planta retangular, com uma nave de largura elevada e sem capela laterais (Fig. 3.12). O volume interior da igreja é de 14085 m^3 , com um pavimento de área 1189 m^2 . O comprimento, largura e altura média é de 46,8 m, 19,70 m e 20 m, respetivamente. Tem capacidade para 150 pessoas [31].

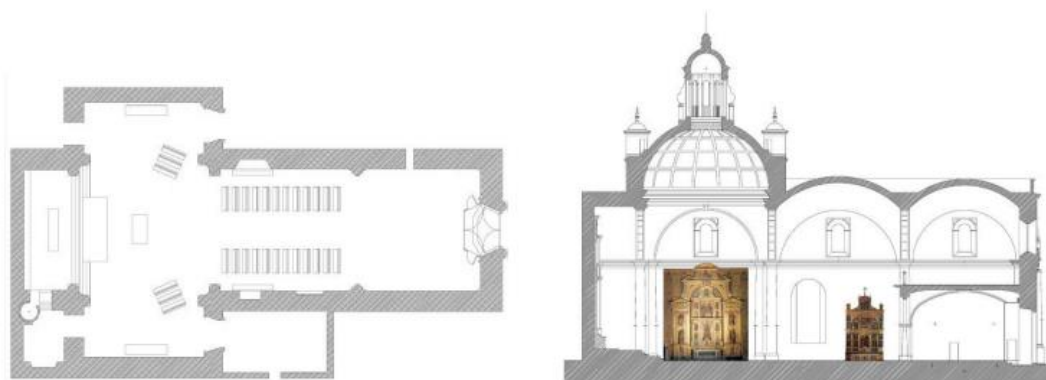


Fig. 3.12 - Planta (esq.) e corte transversal da igreja La Anunciación, Sevilha [31]

Os parâmetros acústicos medidos, na igreja sem ocupação, foram o TR, EDT, Tempo Central, Claridade, Definição, Intensidade do som, eficiência energética lateral (*LF*) e *Interaural cross-correlation* (IACC). Posteriormente, um modelo da igreja, no estado atual, sem ocupação, foi projetado e conseqüente foram realizadas simulações de tratamentos acústicos para obter a melhor solução. Ao analisar os resultados das medições, verificou-se que os valores médios do tempo de reverberação, na situação atual, para cada banda de oitava são mais elevados do que os recomendados para essa sala (Fig.3.13)

Dentro das propostas de correção acústica da igreja, destacam-se o tratamento das paredes da nave e do coro com painéis perfurados de gesso laminado com adição de material poroso na superfície.

Ao comparar as situações inicial e final, conclui-se que existem melhoramentos significativos nos parâmetros que caracterizam a reverberação, TR e EDT. O tempo de reverberação medido é de 4,4 s, enquanto o simulado é de 2,8 s, o que corresponde a um ΔTR da correção acústica simulada de 1,6 s. O EDT tem uma variação é de 2,1s entre o valor médio medido (4,4 s) e o simulado para a igreja reabilitada (2,3 s) De seguida, é possível verificar que o tempo central (TS) reduziu em metade o seu valor de 600 ms para 300 ms. Além disso, existe um aumento na Clareza musical de mais que 5 dB para todas as bandas de oitava, assim como, o valor da Definição que aumenta para o dobro, de 0,2 para 0,4. Os resultados obtidos para as duas localizações diferentes da fonte sonora e respetivas simulações estão representados na figura 3.14 [31].

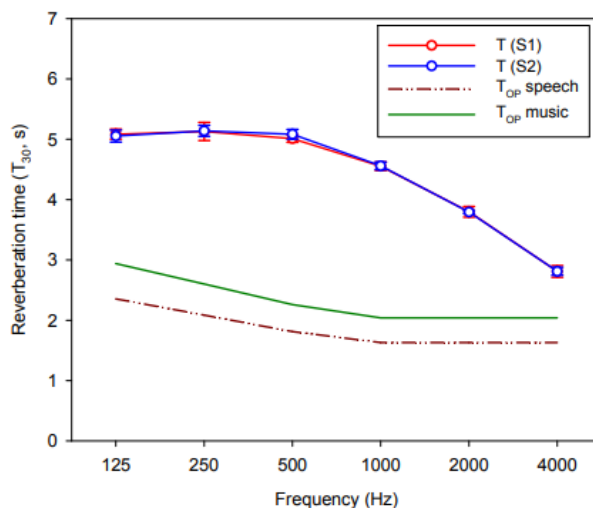


Fig. 3.13 - Tempo de reverberação vs. frequência (condição atual da igreja de La Anunciacion)

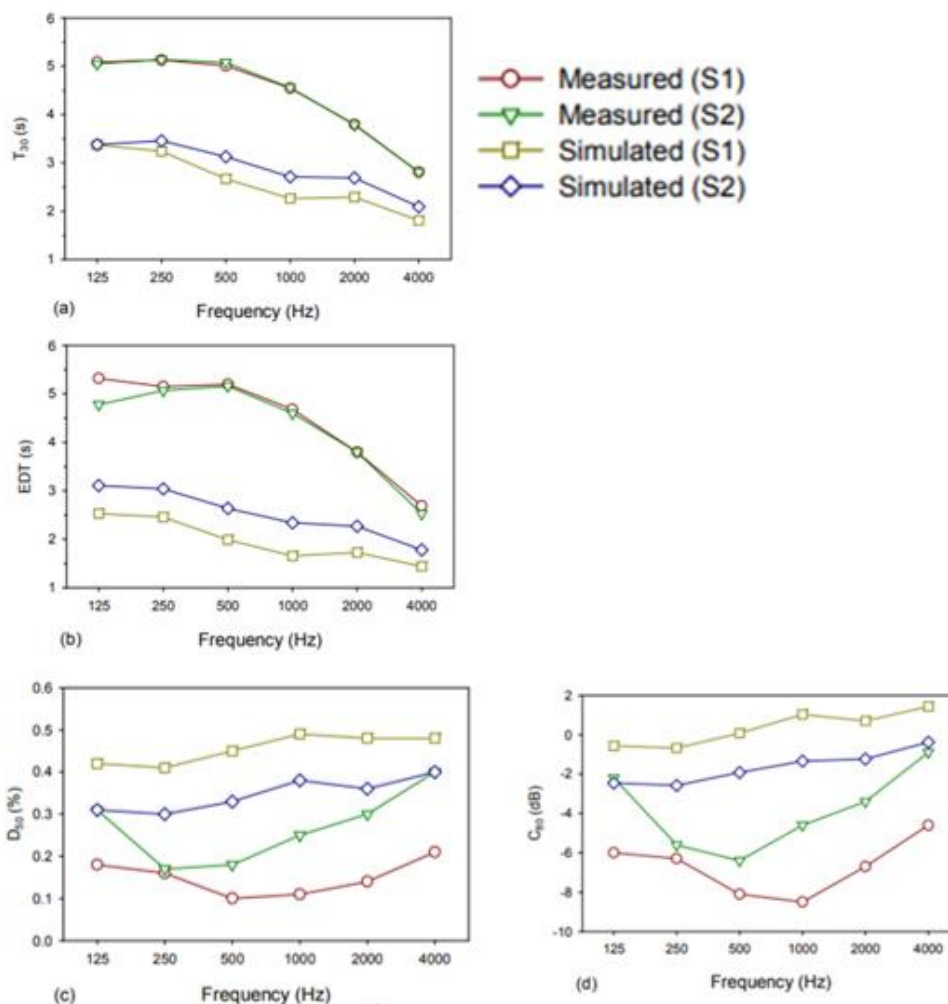


Fig. 3.14 - Valores medidos e simulados dos parâmetros (T_{30} , EDT, D_{50} e C_{80}) para duas fontes sonoras diferentes [31]

3.4.LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

3.4.1.INTRODUÇÃO

O Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE) instituído primeiramente pelo DL nº129/2002 e depois alterado pelo DL nº 96/2008, aplica-se aos seguintes tipos de edifícios:

- Habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- Comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais;
- Escolares e similares, e de investigação;
- Hospitalares e similares;
- Recintos desportivos;
- Estações de transporte de passageiros;
- Auditórios e salas [32].

3.4.2.TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Segundo o Artigo 10.º - A (Auditório e Salas) do RRAE, os recintos cuja principal valência corresponda a atividades assentes na oratória, nomeadamente de auditórios, salas de conferência e salas polivalentes, e nas salas de cinema, estão sujeitos aos seguintes requisitos [32]:

- O tempo de reverberação médio, T , nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, a considerar para estes recintos, quando mobilados normalmente e sem ocupação, deve ser:
 - i) $T \leq 0,12 V^{1/3}$, se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - ii) $T \leq 0,32 + 0,17 \log V$, se $250 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - iii) $T \leq 0,05 V^{1/3}$, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$

em que V é o volume interior do recinto.

O RRAE refere ainda que avaliações *in situ* devem ter em conta um fator de incerteza, associado à determinação das grandezas em causa. Os valores obtidos para o tempo de reverberação vêm-se diminuídos do fator I , no valor percentual do limite regulamentar, de acordo com o seguinte:

- i) $I = 25 \%$, se $V < 250 \text{ m}^3$;
 - ii) $I = 35 \%$, se $250 \leq V < 9000 \text{ m}^3$;
 - iii) $I = 40 \%$, se $V \geq 9000 \text{ m}^3$
- O projeto de condicionamento acústico destes espaços deve incluir um estudo específico destinado a assegurar uma característica de reverberação adequada no restante espectro de frequências e uma boa inteligibilidade da palavra nos diversos locais do recinto. [32]

Nos auditórios e salas cuja principal valência não corresponda a atividades assentes na oratória, nomeadamente de auditórios para música ou salas de espetáculo, o projeto de condicionamento acústico destes espaços deve incluir um estudo específico destinado a assegurar a conformação acústica adequada à sua utilização funcional [32].

3.4.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS AÉREOS

As fachadas dos recintos referido devem assegurar que os valores do índice de isolamento a sons aéreos, $D2 m, nT, w$, corrigido do termo de adaptação aplicável, C ou C_{tr} , sejam os necessários para que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior do recinto, determinado a partir da média espacial de pontos representativos, na ausência de funcionamento das instalações técnicas do edifício, L_{Aeq} , satisfaça o seguinte:

$$L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB}$$

3.4.4. RUÍDO DE EQUIPAMENTOS

No interior dos recintos, o nível sonoro contínuo equivalente do ruído particular, L_{Aeq} , associado ao funcionamento dos equipamentos e instalações técnicas, designadamente de instalações de aquecimento, ventilação e ar condicionado, deve, com a sala desocupada, satisfazer o seguinte:

- $L_{Aeq} \leq 38 \text{ dB}$, no caso de cinemas;
- $L_{Aeq} \leq 30 \text{ dB}$, nos restantes recintos.

4

IGREJA REABILITADA DE SÃO FRANCISCO, COIMBRA

4.1.PASSADO HISTÓRICO

A primeira pedra do Convento de São Francisco foi lançada a 2 de maio de 1602, para acolher a ordem religiosa dos Franciscanos. Apesar da ocupação do convento, por parte dos frades franciscanos, começou em 1609, as obras prolongaram-se até ao final do século XVII [36].

O edifício, localizado na margem esquerda do rio Mondego (Fig. 4.1), começou a ser contruído depois da destruição parcial de um antigo convento franciscano, que não resistiu às cheias constantes [2]. A subida do leito do Mondego, responsável por sucessivas inundações e assoreamentos, obrigou os frades a construir um novo edifício num local mais seguro [36].

Assim, a nova localização foi pensada para ser mais afastada do leito do rio, e a uma cota mais elevada na colina de Santa Clara. Dos vários espaços constituintes do convento, a igreja do Convento de São Francisco situa-se na parte mais a sul do complexo conventual, sendo que a fachada principal se encontra virada a Este e voltada para a cidade de Coimbra (Fig. 4.2) [35].



Fig. 4.1 - Convento de São Francisco, cerca de 1875 [35]

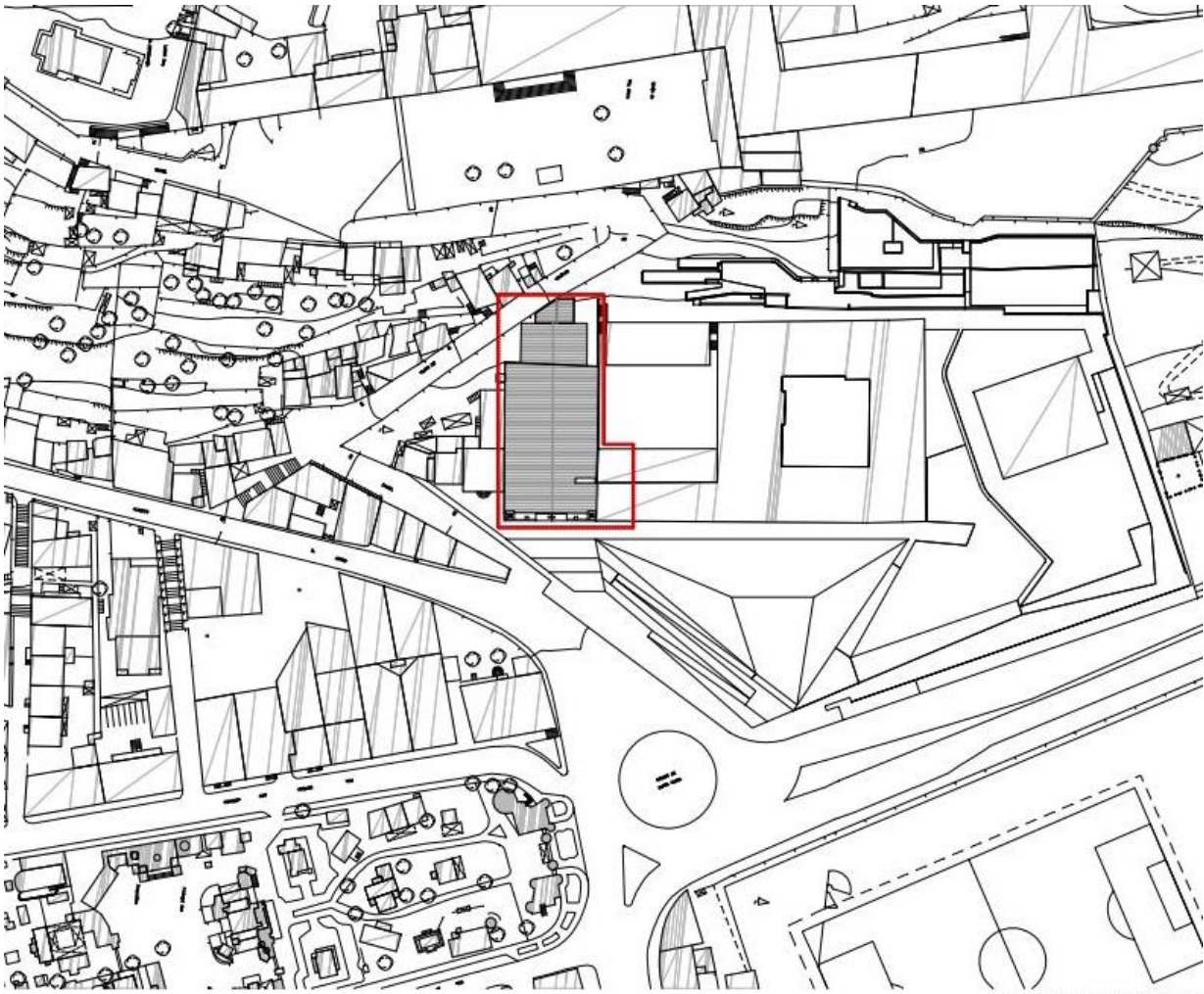


Fig. 4.2 - Implantação do Convento de São Francisco (Coimbra), com o edifício da igreja destacado [35]

Em 1659, o convento passa a ser coabitado pelos Franciscanos e pela Venerável Ordem Terceira. A diferente vivência, entre as duas ordens religiosas, desencadeou várias alterações, tanto em espaços conventuais, como na igreja. A função religiosa do convento manteve-se até à extinção das ordens religiosas, em Portugal, em 1834 [35].

Durante o século XIX, o convento viria a assumir outras funcionalidades. Em 1854, o espaço da igreja de São Francisco passou a sede da nova freguesia de Santa Clara. Em 1875, a antiga igreja transformou-se numa fábrica de massas alimentícias. Vendido em 1842, o espaço do convento acolheu uma fábrica têxtil para a fiação, torcedura e tinturaria de algodão, lã e seda [36].

Com a ocupação fabril (Fig. 4.3), o Convento de São Francisco de Coimbra sofreu várias alterações, especialmente ao nível dos espaços interiores. Contudo, o sistema estrutural primitivo do convento permaneceu inalterado. Algumas das mudanças consistiram na conversão, do espaço interior, da igreja num armazém, e do espaço do coro alto numa área de maquinaria [35].



Fig. 4.3 - Convento de São Francisco (Coimbra), enquanto fábrica de lanifícios de Santa Clara [35]

Após o fecho da empresa têxtil, em 1986, o edifício foi adquirido pela Câmara Municipal de Coimbra. Nos anos seguintes, o convento nunca teve uma ocupação permanente e era palco de eventos pontuais, nomeadamente, de foro artístico [36].

Em 1998, a Câmara Municipal de Coimbra, lança um concurso público, denominado “Concurso para o projeto de recuperação do Convento de S. Francisco (para Centro de Congressos) e área ribeirinha”. A intervenção no convento e área envolvente, tinha como objetivo reforçar a articulação entre as duas margens, através da recuperação do edifício [35].

Da autoria do arquiteto João Luís Carrilho da Graça, o projeto concretizado pela Câmara Municipal de Coimbra, com financiamento comunitário, reabilitou o Convento, conferindo-lhe uma dinâmica contemporânea, ainda que mantendo os traços originais, contemplando também a construção de raiz de um auditório com capacidade para 1125 lugares (Fig. 4.4) [36].

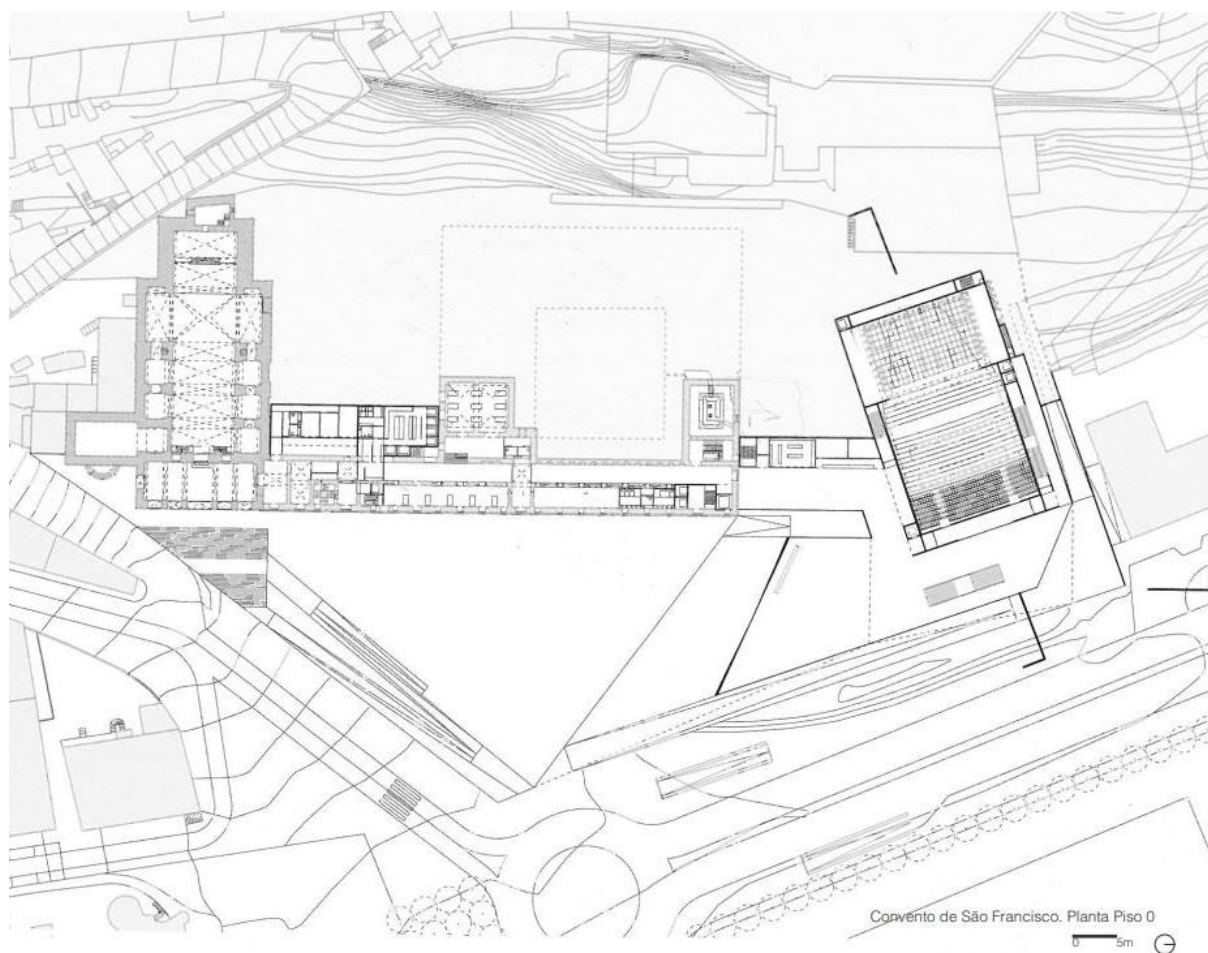


Fig. 4.4 - Planta do projeto inicial de reabilitação do Convento de São Francisco (Coimbra), da autoria do arquiteto Carrilho da Graça.

No ano de 2015, foi iniciada a obra de recuperação da antiga igreja do Convento de São Francisco que, tendo regressado, em 1996, à posse da Diocese de Coimbra, foi por esta novamente entregue à Câmara Municipal de Coimbra em 2009. O projeto de arquitetura de recuperação da igreja é da responsabilidade de Gonçalo Byrne [36].

Esta intervenção municipal conjunta aos dois espaços (igreja e espaço do convento) dotou o Convento de São Francisco de um auditório e de várias salas polivalentes, que transformaram o edifício num Centro Cultural e de Congressos, aberto ao público a 8 de abril de 2016 (Fig. 4.5). Atualmente, o *Convento São Francisco - Coimbra Cultura e Congressos - Património Municipal* é um espaço multifuncional que conjuga a economia, a cultura, o conhecimento e a inovação ao serviço do desenvolvimento da cidade, da região e do país. [36]

A antiga igreja de São Francisco, espaço que outrora acolhia atividades religiosas, é agora a sala D. Afonso Henriques do Centro Cultural e de Congressos de Coimbra, uma sala de espetáculos artísticos e culturais, com capacidade de 402 lugares (Fig. 4.6 e 4.7) [36]

A figura 4.8 e 4.9 apresentam uma comparação do espaço da capela-mor e a fachada, respetivamente, antes e depois da intervenção de reabilitação da antiga igreja de São Francisco.



Fig. 4.5 - Convento de São Francisco (Coimbra), após a intervenção, 2018 [35]



Fig. 4.6 - Interior da igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra, agora Sala D. Afonso Henriques do Centro de Cultural e de Congressos de Coimbra [45]



Fig. 4.7 - Interior da igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra vazia [foto do autor]



Fig. 4.8 - Comparação do interior da igreja de São Francisco, capela-mor, antes (esq.) e depois (dir.) da reabilitação [35]



Fig. 4.9 - Comparação da fachada da igreja de São Francisco, antes (esq.) e depois (dir.) da reabilitação [35]

4.2. CARACTERIZAÇÃO

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO ARQUITETÓNICA

O Convento de São Francisco foi construído ao longo do século XVII. Em Portugal, este período foi marcado pela Arquitetura Chã, que teve origem na Companhia de Jesus em Portugal. Paralelamente, noutros países, o modo artístico predominante era o Maneirismo. Contudo, em Portugal, este não se pode associar à Arquitetura Chã, uma vez que estes dois modos, de fazer arquitetura, podem ser antagónicos [35].

O Maneirismo surgiu em Itália, posteriormente ao Renascimento. Este estilo artístico foi motivo de controvérsia, uma vez que existiam opiniões distintas quanto ao seu conceito. Enquanto, para uns, era entendido como uma evolução do Renascimento para o Barroco, para outros, era uma expressão simbólica do movimento da Contrarreforma. Adicionalmente, este estilo arquitetónico surge em oposição do Renascimento, pois visa quebrar os seus ideias.[35]

Já a Arquitetura Chã, é a continuação do período renascentista português, marcado pela ordem e a proporção. Este estilo arquitetónico baseia-se em três modelos de igreja distintas, sendo que todos privilegiam a nave única, com capelas colaterais intercomunicantes. Uma das principais características destas igrejas, que adotaram o modelo jesuíta, é o desenho e a conceção de um espaço interior, como se este se tratasse de uma praça pública. O modelo jesuíta tem duas variações, o modelo nacional e o internacional. [35]

O modelo nacional (Fig.4.10), apresenta uma planta com uma forma retangular, como se fosse uma caixa, com uma só nave, com capelas intercomunicantes. O desenho de um transepto insinuado não existe. A capela-mor apresenta uma forma bastante reduzida, é pouco profunda e a sua largura é inferior à largura da nave. Já o seu teto é abobadado [35].

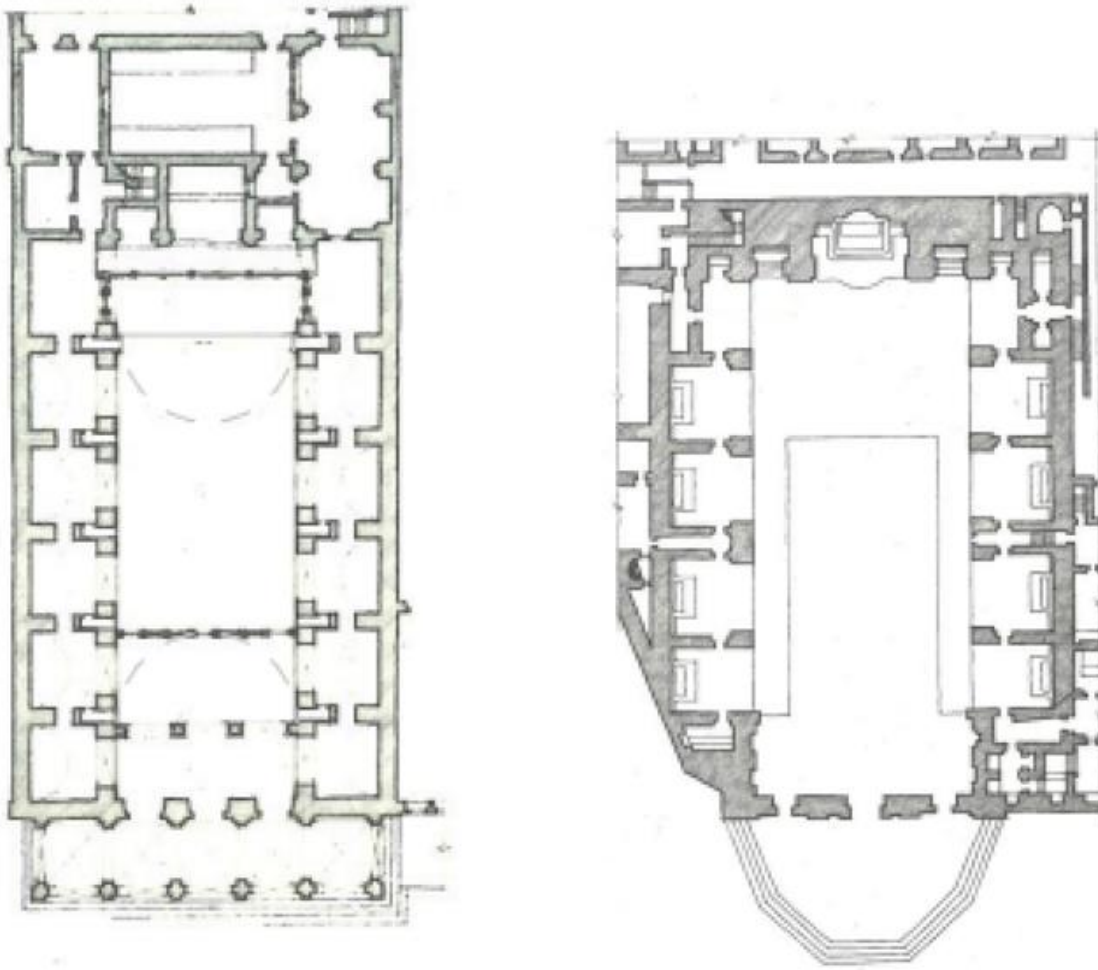


Fig. 4.10 - Planta da igreja do Espírito Santo, Évora, 1556 (esq.) e da igreja de São Roque, Lisboa, 1565 (dir.) - Modelo Nacional jesuíta [35]

Por outro lado, o modelo jesuíta internacional (Fig. 4.11) manifesta-se a partir de tendências europeias, que chegaram a Portugal. Em termos de morfologia planimétrica, apresenta um desenho retangular alongado, no qual se verifica a presença de uma planta em cruz latina. O cruzamento dos dois eixos, da nave e do transepto, é marcado pelo desenho de uma cúpula. A capela-mor é mais larga e profunda que o modelo nacional. O transepto é acentuado, com largura superior à das capelas colaterais, distinguindo-se também do primeiro modelo de plantas [35].

A igreja do Convento de São Francisco consiste numa igreja formalmente muito simples, com planimetria e volumetria monumentais, depurada de excesso decorativo, e com elementos que atestam o interesse do arquiteto pelas regras da tratadística italiana [37]. Em termos planimétricos, possui o desenho de um transepto pronunciado, embora menos pronunciado que o do modelo internacional (Fig. 4.12) [35]

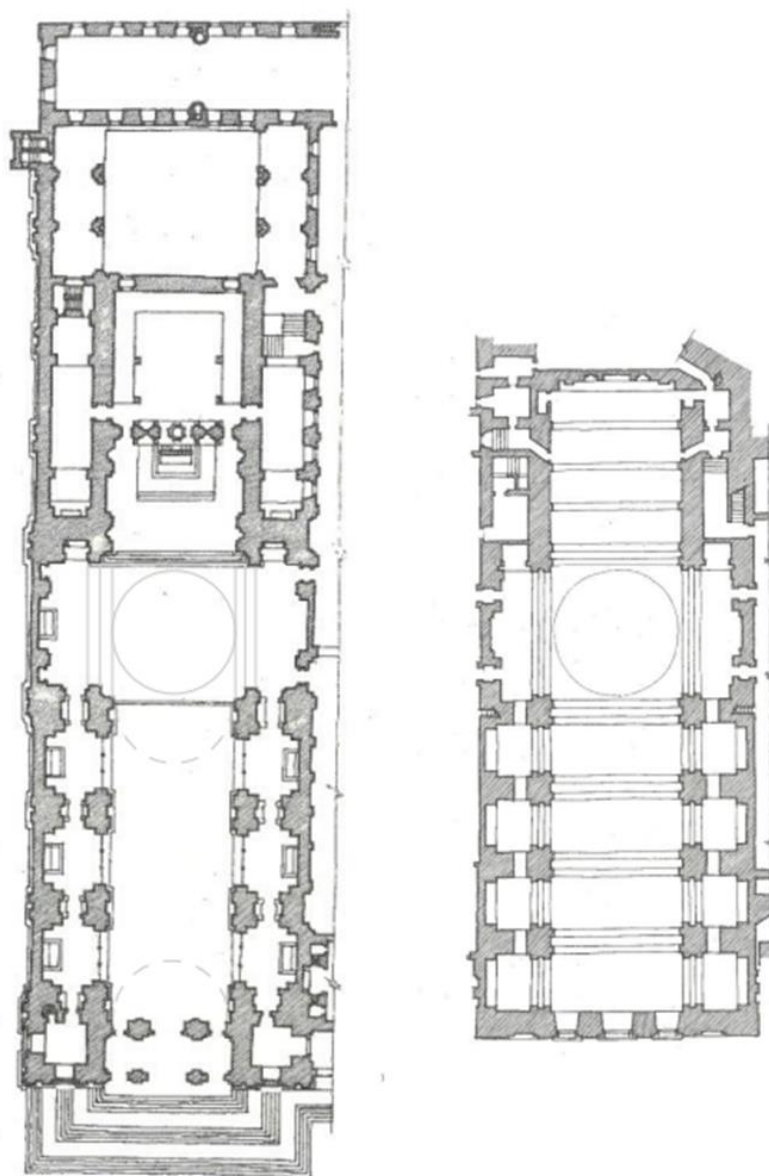


Fig. 4.11 - Planta da igreja e Mosteiro de São Vicente de Fora, Lisboa, 1582 (esq.) e da Igreja Sé Nova, Coimbra 1598 (dir.) - Modelo internacional jesuíta [35]

O acesso à igreja faz-se através de um pequeno nártex observando-se, no interior, as abóbadas de berço da nave e capela-mor, bem como as três capelas intercomunicantes de cada lado [26]. A abóboda cruzada de arestas, no cruzamento dos eixos da nave e do transepto, tem um pé direito superior ao do das capelas laterais, todavia, inferior às alturas da capela-mor e da nave principal [35].

A capela-mor, em termos de largura e profundidade, é superior ao “modelo nacional”, mas inferior ao “internacional”, e desenvolve-se em duas partes, que correspondem a dois níveis de pavimento diferentes. O tramo junto do transepto tem uma cota inferior em relação ao tramo posterior. Este espaço tem a largura e a altura da nave principal [35].



Fig. 4.12 - Planta da igreja de São Francisco, Coimbra, antes da intervenção no espaço interior [35]

4.2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

O espaço em estudo neste trabalho é a igreja rehabilitada do Convento de São Francisco, agora sala D. Afonso Henriques, inserida no Centro Cultural e de Congressos Convento São Francisco, do qual fazem parte um grande auditório e outras salas destinadas para a palavra, música ou multíusos.

Em relação à envolvente da igreja rehabilitada, este espaço encontra-se bastante isolado das outras salas, especialmente do auditório principal, visto que se encontra na ponta oposta do convento. Além disso, o nártex da igreja, corredor de ligação da igreja aos restos das salas, cria uma zona de corte tanto para com o exterior (Avenida Guarda Inglesa, via bastante movimentada) como para as salas mais próximas do convento.

A igreja rehabilitada é prioritariamente um espaço vocacionado para concertos. No entanto, a sala está equipada com meios de apresentação e comunicação multimédia (projektor e colunas), e desta forma, também realiza outros tipos de eventos culturais, tais como cinema e conferências.

A figura 4.13 apresenta a planta da igreja com uma totalidade de 402 lugares, bem como a disposição dos lugares, em leque, na zona do transepto da igreja, e de forma retangular, na nave principal (à data dos ensaios acústicos a sala estava sem cadeiras).

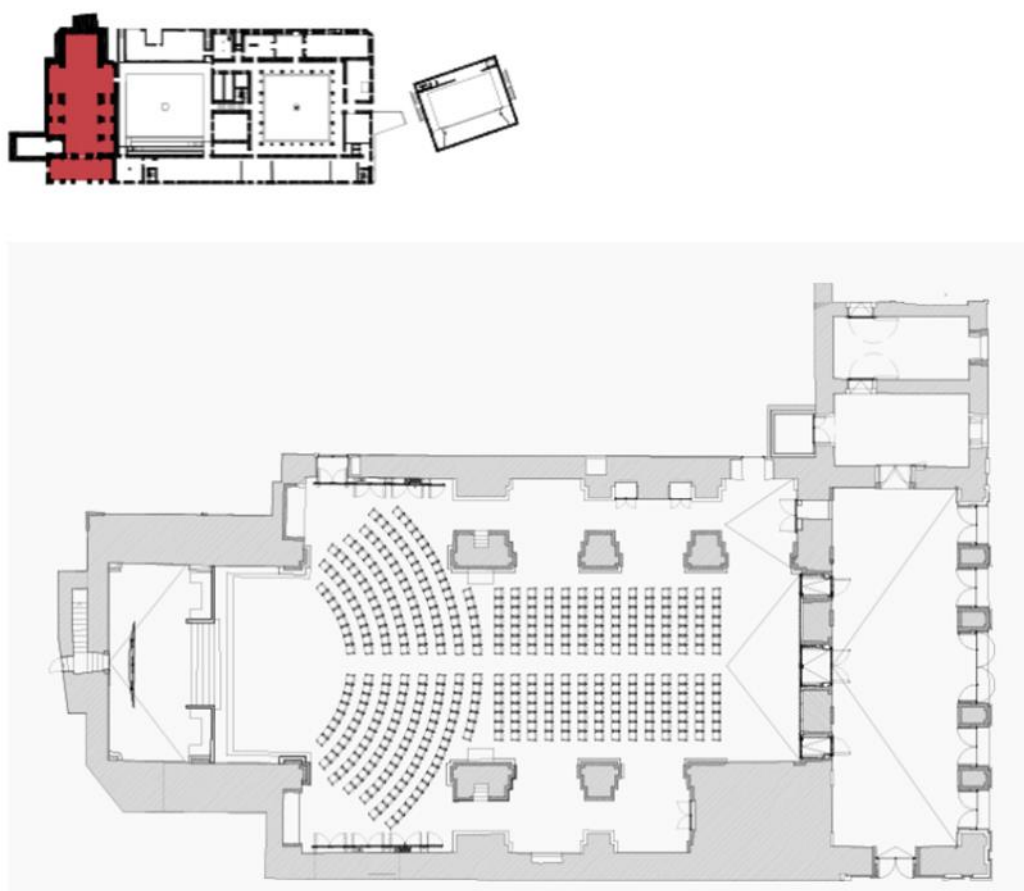


Fig. 4.13 - Plana da igreja de São Francisco, Coimbra, como Sala D. Afonso Henriques e respetiva disposição dos lugares da plateia [44]

Através de cálculos simples, com recurso ao ficheiro em AutoCAD da planta da igreja, fornecida pela equipa projetista da *InAcoustics* [46], e também à informação obtida no *website* do Convento São Francisco [44], foi possível aferir os parâmetros arquitetónicos do espaço: comprimento, largura da nave central, altura máxima e das capelas laterais e por fim, área da superfície da plateia e volume (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Valores dos diversos parâmetros arquitetónicos da igreja reabilitada de São Francisco

| Comprimento | Largura nave central | Largura máxima | Altura Máxima | Altura capelas laterais | Superfície plateia | Volume |
|-------------|----------------------|----------------|---------------|-------------------------|--------------------|----------------|
| m | m | m | m | m | m ² | m ³ |
| 42,00 | 11,35 | 21,90 | 17,50 | 11,20 | 364,5 | 11200 |

O valor do tempo de reverberação da sala, previstos pela *InAcoustics*, antes da reabilitação acústica, corresponde a 9,5 s para as frequências dos 500 e 1000 Hz [49]. Este valor demasiado elevado, tanto para a função da palavra como da música, pode ser explicado pelo grande volume, tetos altos, e paredes refletoras da igreja, e reafirma a necessidade de reabilitação acústica do espaço.

O processo de reabilitação da igreja de São Francisco, teve como objetivo transformar a igreja numa sala de espetáculos para uma grande variedade de evento (desde música a conferências). Dada a volumetria do espaço e a dificuldade de intervenção sem alterar de forma significativa os traços arquitetónicos da igreja, o tratamento acústico foi mais ajustado para a música em deterioramento de outro tipo de função, que por si, requeria um menor tempo de reverberação [49].

A igreja de São Francisco (Fig. 4.14) no processo de reabilitação, sofreu tratamento de correção acústica no seu interior [49], nomeadamente:

- Colocação de painéis difusores sonoros de madeira nas paredes laterais (8*4 m²) (Fig. 4.15) transepto (primeira linha das ondas sonoras diretas);
- Aplicação de tetos lisos para absorção sonora do tipo BASWAphon, constituído por painéis de lã mineral de alta densidade, com acabamento de massa mineral. Colocados no teto da nave principal, de forma a o produto final ser uma superfície contínua;
- Revestimento da parede traseira da plateia (acesso ao interior da Igreja) com painéis absorvedores e difusores sonoros em madeira Fig. 4.16);
- Instalação de painel refletor sonoro em madeira no Coro (Fig. 4.15).

Relativamente ao isolamento sonoro, de forma a garantir níveis de ruído no interior do edifício regulamentares, foram colocados:

- Vãos envidraçados com índice de redução sonora R_w superior a 40 dB em todas as fachadas da igreja;
- Portas acústicas com índice de redução sonora R_w superior a 40 dB nos acessos com antecâmara;
- Portas acústicas com índice de redução sonora R_w superior a 50 dB nos acessos sem antecâmara;



Fig. 4.14 - Planta da igreja de São Francisco, Coimbra, antes (esq.) [35] e depois da reabilitação [44] com a localização da colocação dos painéis absorvedores e difusores na parede traseira da plateia (A), dos painéis difusores sonoros de madeira (B) e do painel refletor sonoro no coro (C)



Fig. 4.15 - Interior da Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra. Painéis difusores sonoros de madeira colocados em cada uma das paredes laterais do transepto (B) e painel refletor sonoro em madeira no coro (C) [46]

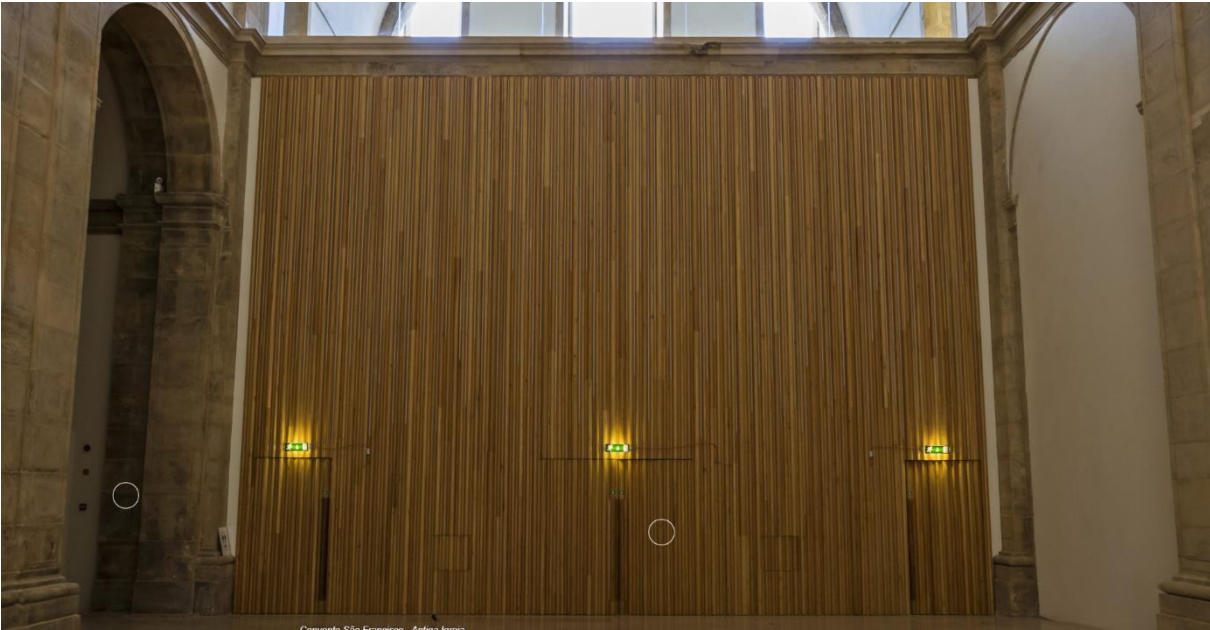


Fig. 4.16 - Interior da Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra. Painéis absorsores e difusores de madeira colocados na parede de fundo da nave (B) [46]

5

MEDIÇÕES ACÚSTICAS

5.1. INTRODUÇÃO

As medições foram realizadas com a igreja reabilitada completamente vazia, isto é, sem visitantes e sem cadeiras, e com todas as entradas para a sala fechadas.

Os ensaios acústicos realizados no interior da igreja serviram para avaliar os parâmetros:

- Nível sonoro contínuo equivalente de ruído de fundo (L_{eq});
- Tempo de reverberação (TR);
- *Rapid Speech Transmission Index*, RASTI.

Não foi realizada medição acústica do nível sonoro contínuo equivalente de ruído dos equipamentos de climatização, $L_{eq}(AVAC)$, pois a igreja tem piso radiante e, desta forma, não utiliza equipamentos de climatização.

Os equipamentos utilizados nos ensaios foram:

- Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260; e respetivos *softwares* de análise, Brüel & Kjær, modelo BZ7210 e modelo BZ7204 [38] (Fig. 5.1)
- Fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 [39];
- Equipamento de RASTI Brüel & Kjær, modelo 3361, constituído por um emissor modelo 4225 e um recetor modelo 4419 [40] (Fig. 5.2);
- Calibrador de microfone Brüel & Kjær, modelo 4231 [41] (Fig. 5.3);
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189 [42] (Fig. 5.3).

Os ensaios foram realizados no dia 13 de maio de 2022, das 14h30 às 17h30. As dimensões da sala estão representadas no Quadro 4.1 e a planta, corte transversal e longitudinal da igreja estão representadas na figura 5.4, 5.5 e 5.6, respetivamente.



Fig. 5.1 - Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 [43] (esq.) e fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 [39] (dir.)

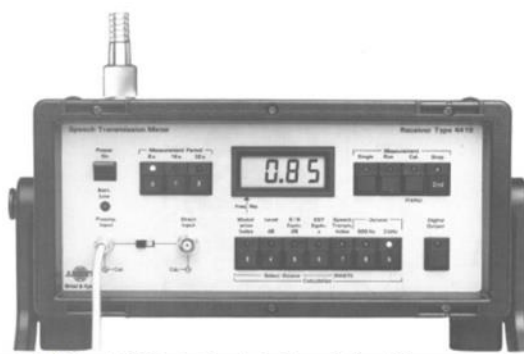


Fig. 5.2 - Equipamento de RASTI Brüel & Kjær, modelo 3361, constituído por um emissor modelo 4225 (esq.) e um recetor modelo 4419 (dir.) [40]



Fig. 5.3 - Calibrador de microfone Brüel & Kjær, modelo 4231 [41] (esq.) e Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189 [42] (dir)

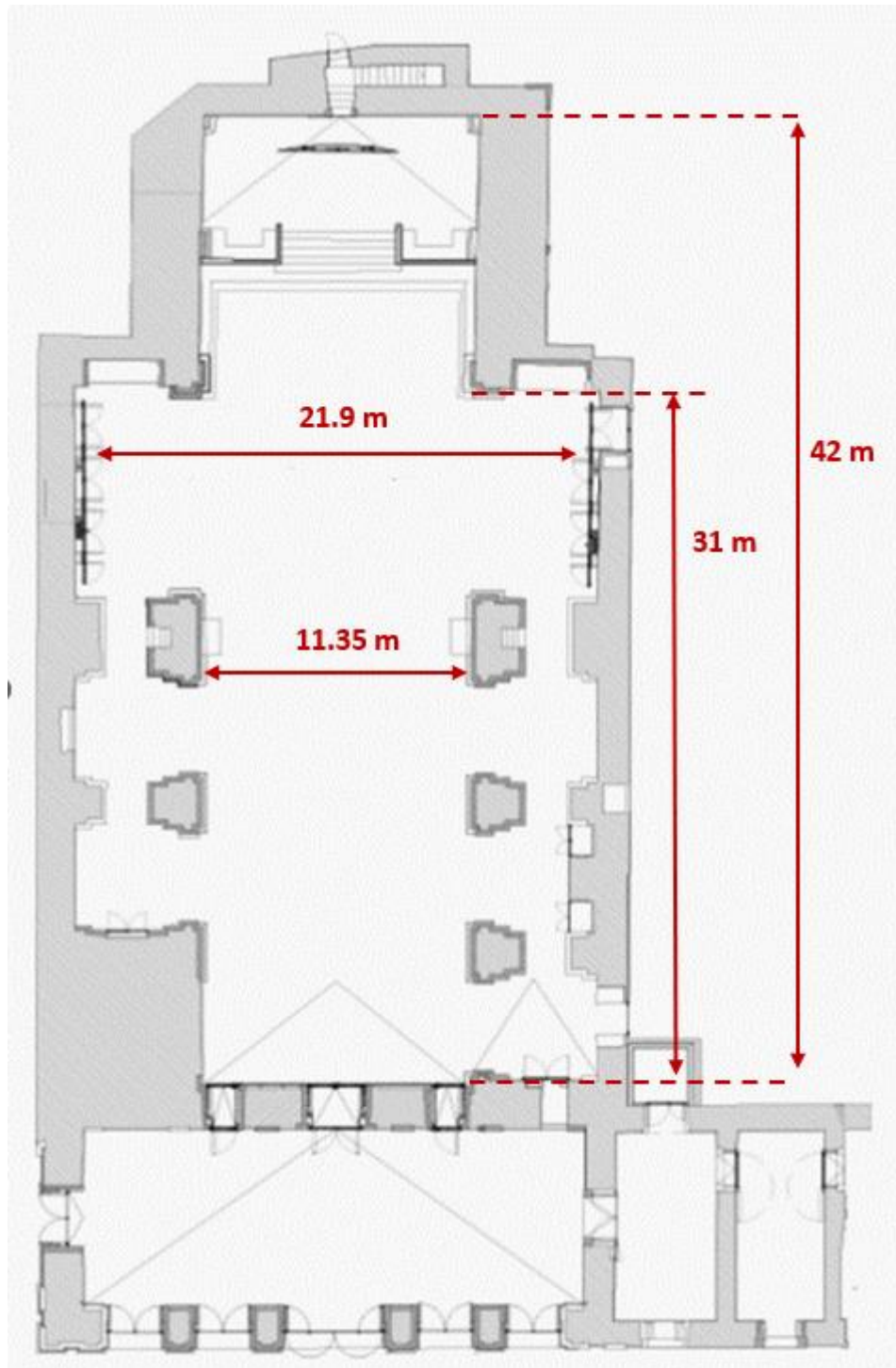


Fig. 5.4 - Planta da igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra [44]

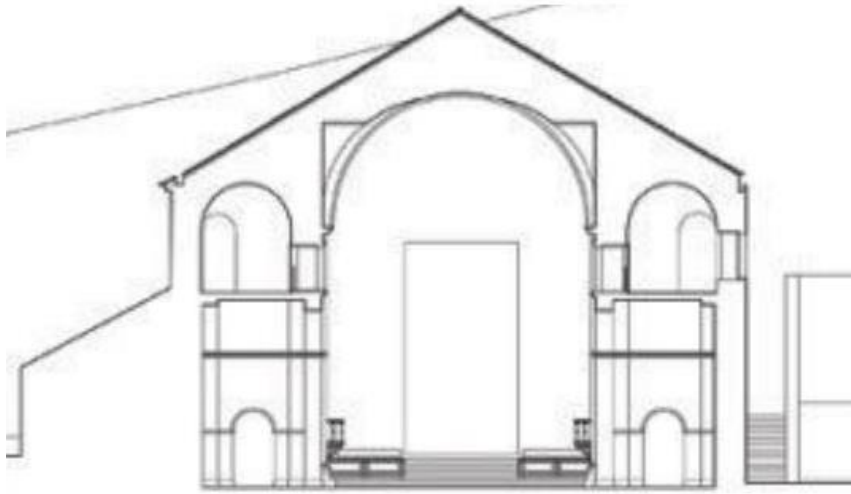


Fig. 5.5 - Corte transversal da igreja de São Francisco [35]

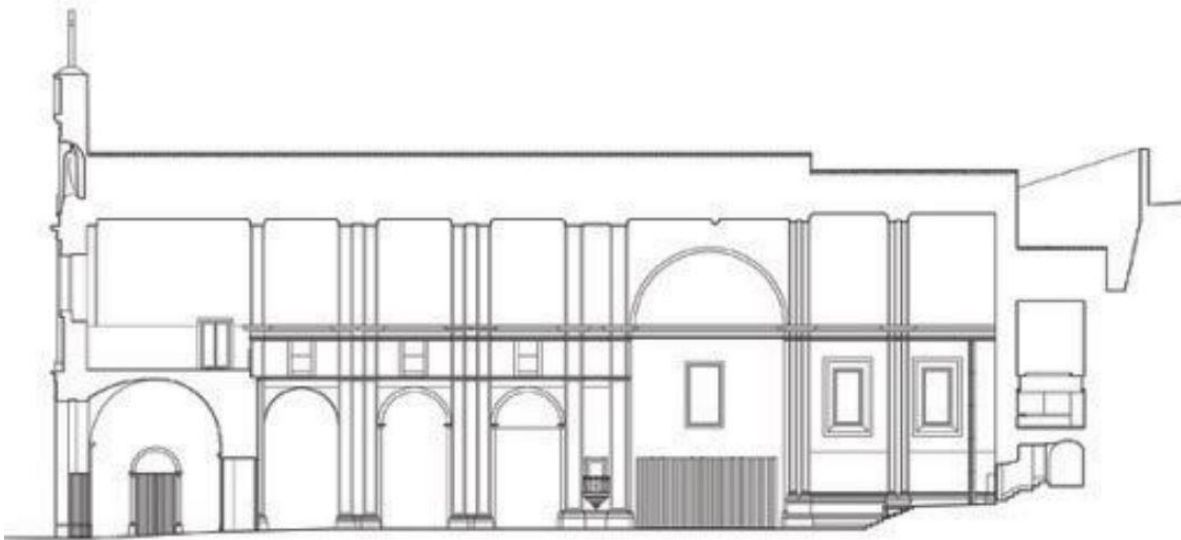


Fig. 5.6 - corte longitudinal da igreja de São Francisco

5.2.METODOLOGIA

5.2.1. NÍVEL SONORO CONTÍNUO EQUIVALENTE DE RUÍDO DE FUNDO

Neste ensaio pretendeu-se avaliar e caracterizar o ruído de fundo existente no interior da igreja, sem visitantes, de modo a perceber a influência que o ruído ambiente tem no interior da sala. Para isso recorreu-se ao sonómetro Brüel & Kjør, modelo 2260 (Fig.5.6) para medir o nível de pressão sonora contínua equivalente, L_{eq} , do interior da igreja. Procurou-se que nas medições não houvesse picos de ruído, quer no interior quer no exterior. O recetor foi colocado em dois pontos na sala (Fig. 5.7).



Fig. 5.7 - Sonómetro Brüel & Kjør, modelo 2260 [fotos do autor]

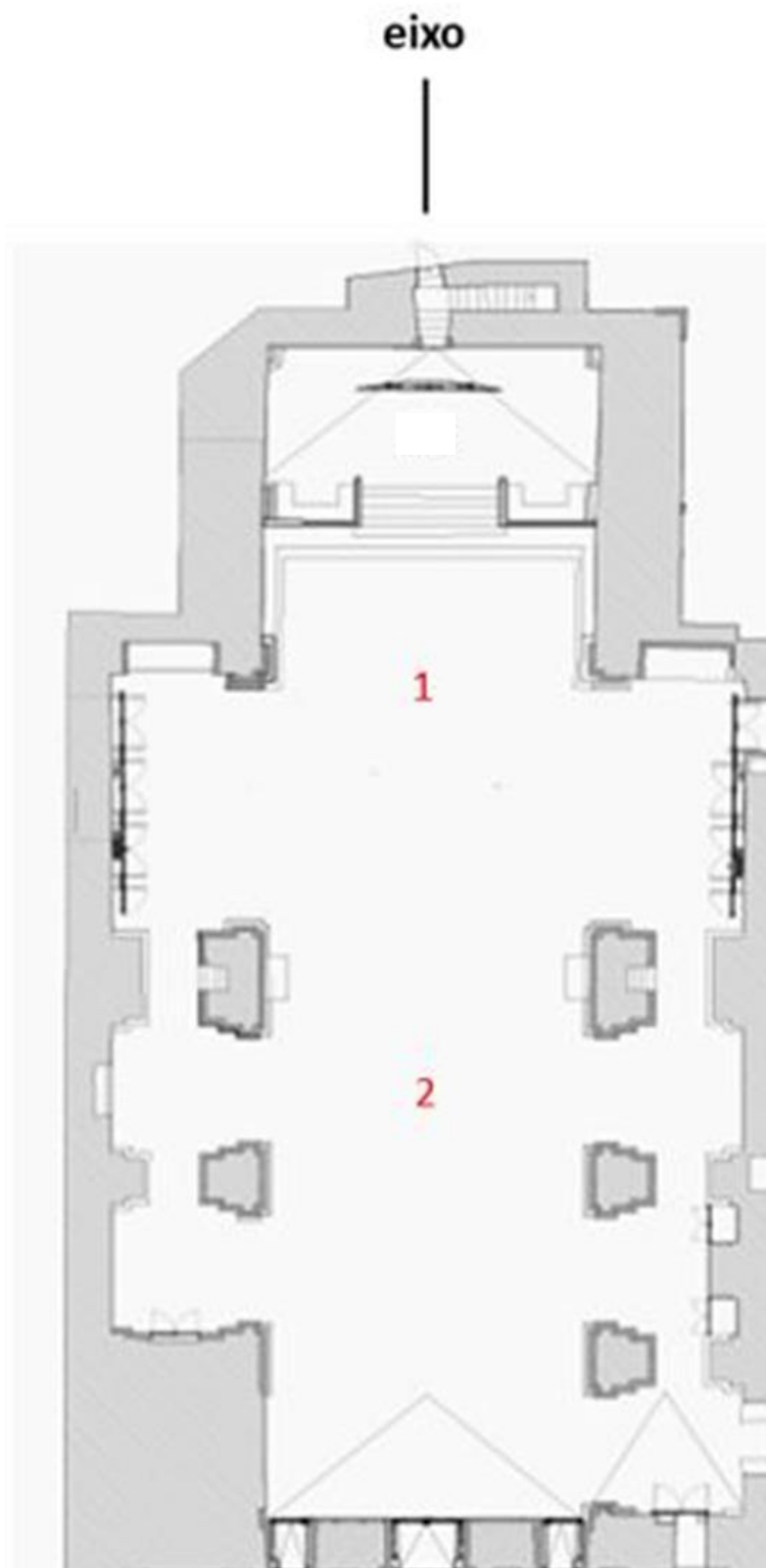


Fig. 5.8 - Localização da fonte sonora (FS) e dos dois pontos de medição na igreja de São Francisco para avaliação do Leq do ruído de fundo (dir.)

5.2.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O equipamento utilizado no ensaio para determinação dos valores do tempo de reverberação foi uma fonte sonora Brüel & Kjær (B&K), modelo 4224, e um recetor, o sonómetro Brüel & Kjær (B&K), modelo 2260. (Fig.5.8)

O ensaio consiste na emissão, por parte da fonte sonora, de um ruído branco, durante 10 segundos e que após o cessar deste ruído, o sonómetro regista o decaimento de 30 dB (TR30), nas bandas de frequência de um terço de oitava de 125 a 4000 Hz, e automaticamente extrapola para um decaimento de 60 dB, sendo este o valor para cálculo e sujeito a posterior análise. O decaimento de 60 dB não é medido de forma direta, devido à sobreposição do som reverberado pelo ruído de fundo.

A fonte sonora foi colocada inclinada a 45° com o plano horizontal, num único ponto, nomeadamente no palco, no eixo central. Este ângulo é escolhido com o objetivo de se transmitir mais energia para o volume da sala, para tentar excitar melhor o campo reverberante da igreja. Esta posição do altifalante também proporcionou mais omnidireccionalidade à fonte sonora ao localizar os lados do altifalante com menos direccionalidade, tal como na parte de trás, virado para o piso. [1]

Através da utilização de um difusor, uma peça cónica engravada na frente da fonte sonora, a emissão do som torna-se mais difusa e conseqüente, resulta em medições menos dependentes da posição e do ângulo de inclinação da fonte sonora. Além disso, tem a finalidade de baixar os valores do coeficiente de direccionalidade [1]. O sonómetro, é colocado em cima de um tripé, a uma altura aproximada de 1,30 m, de forma a simular a posição de um espectador na sala de concerto (Fig. 5.8).

Para a medição do TR foram escolhidos oito pontos da igreja (Fig.5.9) com o objetivo de perceber a evolução e o comportamento do campo reverberado, ao longo de toda a sala. Para cada ponto foram efetuadas duas medições, uma com o sonómetro virado para a esquerda e outra para a direita, divergindo entre si de 60° a 80°.



Fig. 5.9 - Fonte sonora B&K, modelo 4224 (esq.) e sonómetro B&K, modelo 2260 (dir.) [fotos do autor]

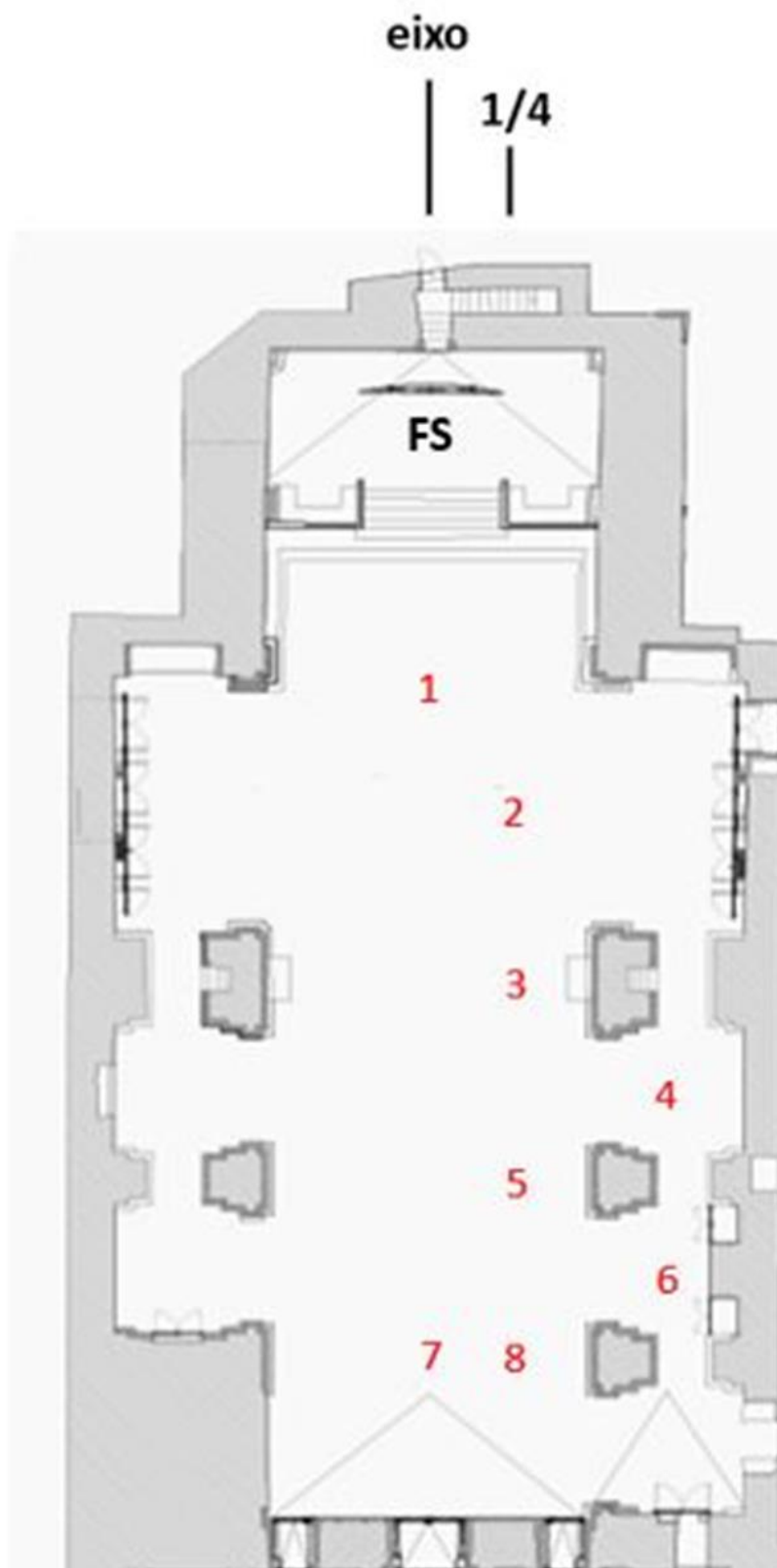


Fig. 5.10 - Localização dos oitos pontos de medição e da fonte sonora (FS) na igreja de São Francisco para avaliação do TR

5.2.3.RASTI

A inteligibilidade da palavra é estimada através do cálculo do RASTI. O método RASTI envolve a medição da redução de um sinal de teste transmitido que tem certas características, tais como intensidade, modulações e propriedades direcionais, representativas da voz humana. [14]

Os equipamentos utilizados neste ensaio foram uma fonte sonora do RASTI Brüel & Kjaer, modelo 4225, e um recetor Brüel & Kjaer, modelo 4419 (Fig.5.10). A fonte sonora gera um ruído rosa a níveis de pressão sonora de 59 e 50 dB, nas bandas de oitava de 500 e 2000 Hz, respetivamente, para imitar o espectro da palavra a longo prazo e com propriedades direcionais semelhantes. [14] O recetor executa uma medição simples de 8s e regista assim a “inteligibilidade” do sinal sonoro comparando-o com um valor de referência.

A fonte sonora foi colocada no palco, no eixo central, e foram efetuadas três medições em cada um dos quinze pontos (Fig. 5.11).



Fig. 5.11 -Fonte sonora RASTI B&K 4225 (esq.), recetor B&K 4419 e medição do RASTI (dir.) [fotos do autor]

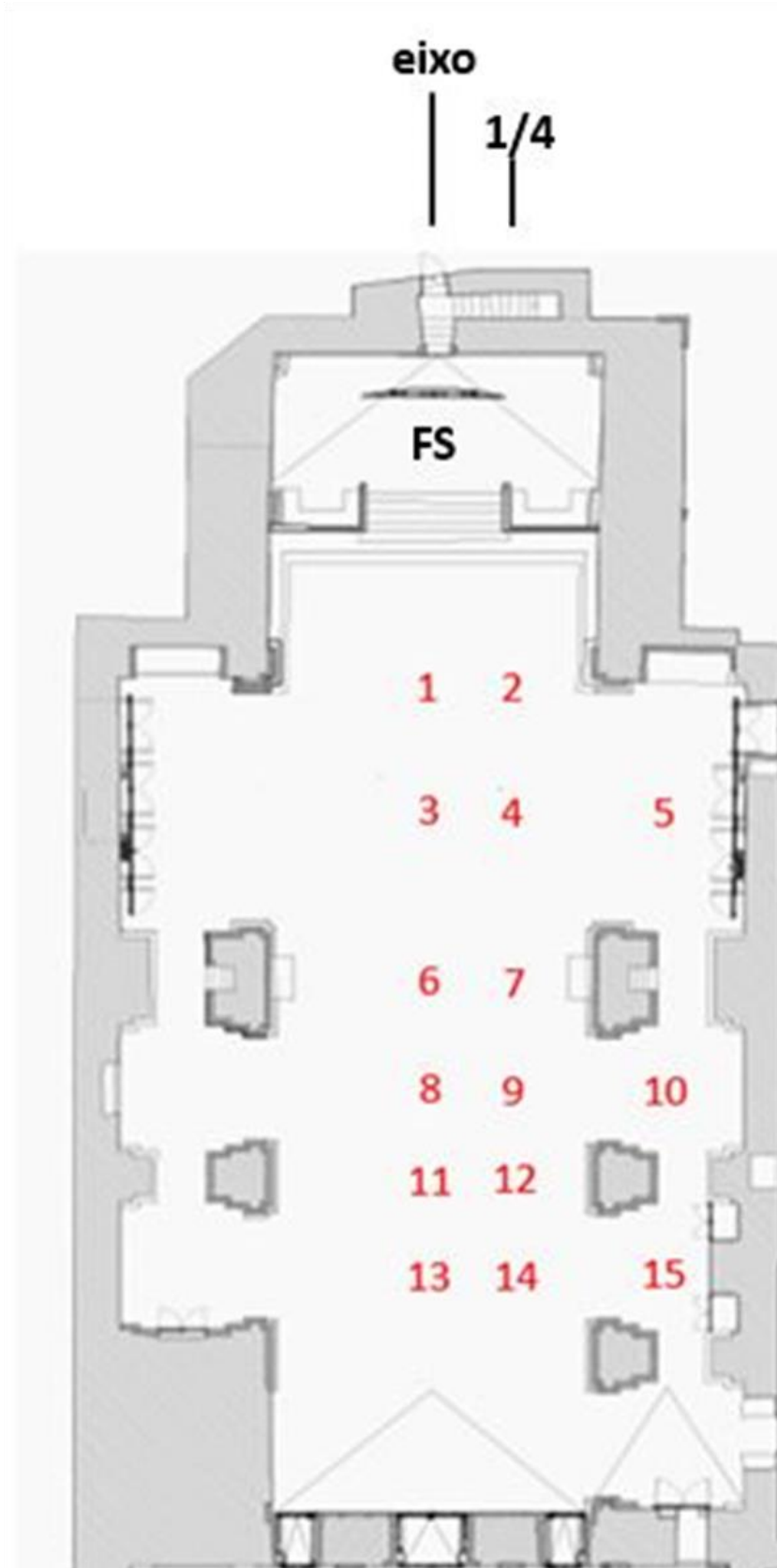


Fig. 5.12 -Localização dos quinze pontos de medição e da fonte sonora (FS) na igreja de São Francisco para avaliação do RASTI

5.3.RESULTADOS

5.3.1.NÍVEL SONORO CONTÍNUO EQUIVALENTE DE RUÍDO DE FUNDO

Os valores obtidos dos níveis de pressão sonora equivalente contínua de ruído de fundo da igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra, encontram-se representadas no Quadro 5.2 e na Fig. 5.12.

Ao analisar os resultados verifica-se que o ponto 1 e o ponto 2 apresentam valores praticamente idênticos, embora o ponto 2 esteja mais próximo da fachada frontal da igreja, na face da Avenida da Guarda Inglesa. O valor do nível de pressão sonora equivalente contínuo global de ruído de fundo da sala é de 51 dB.

Após aplicação do filtro A (Quadro 5.3 e Fig. 5.12) verifica-se que os valores globais anteriormente obtidos baixam consideravelmente, nomeadamente nas baixas frequências como esperado, uma vez que o filtro A tem como objetivo aproximar à resposta humana, os ruídos de fraca intensidade e transpor para valores concretos a gradual, mas acentuada perda de sensibilidade do ouvido humano para as baixas frequências. [1] O nível sonoro é 28 dB(A).

Quadro 5.1 - Valores obtidos dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo da Igreja de São Francisco reabilitada

| Freq. (Hz) | Leq (rf) (dB) | | | | | | | | | | | Leq.global (dB) |
|------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| | 16 | 31 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k | 16k | |
| Ponto 1 | 45,3 | 47,3 | 43,1 | 24,1 | 19,8 | 20,3 | 21,2 | 21,0 | 20,2 | 18,1 | 19,6 | 51,6 |
| Ponto 2 | 44,8 | 46,5 | 42,5 | 24,6 | 21,2 | 20,9 | 22,1 | 21,3 | 20,8 | 18,2 | 19,7 | 50,8 |
| Média | 45,1 | 46,9 | 42,8 | 24,4 | 20,5 | 20,6 | 21,7 | 21,1 | 20,5 | 18,2 | 19,6 | 51,2 |

Quadro 5.2 - Valores obtidos dos níveis de pressão sonora filtrado A do ruído de fundo da igreja de São Francisco reabilitada

| Freq. (Hz) | LA (rf) (dB) | | | | | | | | | | | LAeq.global (dB) |
|------------|--------------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| | 16 | 31 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k | 8k | 16k | |
| Ponto 1 | -4,7 | 7,3 | 17,1 | 8,6 | 11,3 | 17,3 | 21,2 | 22,0 | 21,2 | 17,1 | 12,6 | 27,7 |
| Ponto 2 | -5,2 | 6,5 | 16,5 | 9,1 | 12,7 | 17,9 | 22,1 | 22,3 | 21,8 | 17,2 | 12,7 | 28,2 |
| Média | -4,9 | 6,9 | 16,8 | 8,9 | 12,0 | 17,6 | 21,7 | 22,1 | 21,5 | 17,2 | 12,6 | 28,0 |

Segundo o artigo 10^o - A (Auditórios e Salas), alínea 3 do RRAE, o isolamento sonoro das fachadas de auditórios, $D_{2m,nT,w}$, corrigido do termo de adaptação aplicável C (ruído rosa) e C_{tr} (ruído de tráfego), deve ser o necessário para que o nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente no interior, determinado a partir da média espacial de pontos representativos, na ausência de funcionamento das instalações técnicas do edifício, LA_{eq} (3.1), satisfaça o seguinte: LA_{eq} menor ou igual a 30 dB associado a um fator de incerteza, I , de 3 dB.

O valor contínuo do nível ruído de fundo é de 28 dB(A), o que representa um valor inferior ao limite que tem de ser satisfeito, segundo o RRAE, concluindo que o LAeq da sala tem um valor adequado e cumpre o regulamento.

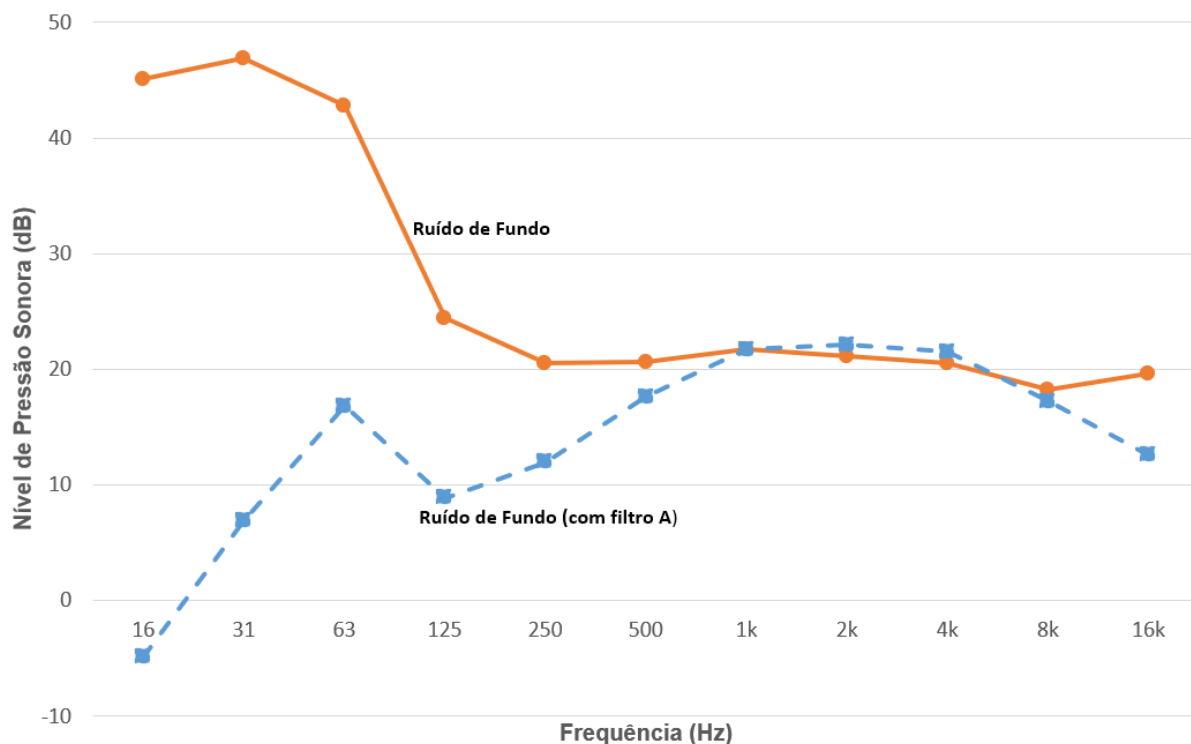


Fig. 5.13 - Valores dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo e dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo filtrado A na Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra

5.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Os resultados obtidos no ensaio do tempo de reverberação para os oito pontos nas bandas de 1/3 de oitava, dos 100 aos 5000 Hz, encontram-se representados no Quadro 5.4 e figura 5.14. Estes valores foram obtidos com a sala sem cadeiras e com todas as portas e janelas fechadas.

Para efeitos de cálculo e análise perante a legislação e valores ótimos mediante o tipo de função do espaço, foram obtidos valores do tempo de reverberação para a frequências em bandas de oitava. Os valores obtidos estão representados no Quadro 5.5 e na figura 5.12

Ao abrigo do *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*, artigo 10º, alínea 1a), o tempo de reverberação médio obtém-se através da média aritmética dos valores de *TR* nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz [32]. Os valores deste parâmetro encontram-se calculados no Quadro 5.5.

$$TR_{\text{médio}} = \frac{TR(500 \text{ Hz}) + TR(1000 \text{ Hz}) + TR(2000 \text{ Hz})}{3}$$

Quadro 5.3 - Valores obtidos de TR30 na Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra para os pontos 1 a 8

| Freq. (Hz) | TR30 (s) | | | | | | | | Média |
|-------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| | Pontos | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 100 | 4,92 | 4,99 | 4,98 | 5,42 | 4,84 | 5,87 | 5,25 | 5,04 | 5,2 |
| 125 | 4,05 | 4,23 | 4,73 | 4,06 | 4,93 | 4,08 | 4,83 | 4,28 | 4,4 |
| 160 | 3,94 | 3,82 | 3,57 | 3,98 | 4,21 | 4,15 | 3,85 | 3,84 | 3,9 |
| 200 | 3,57 | 3,40 | 3,42 | 3,82 | 4,28 | 4,39 | 3,89 | 3,58 | 3,8 |
| 250 | 3,37 | 3,31 | 3,49 | 3,36 | 3,39 | 3,24 | 3,34 | 3,50 | 3,4 |
| 315 | 3,72 | 3,46 | 3,63 | 3,25 | 3,58 | 3,27 | 3,38 | 3,31 | 3,5 |
| 400 | 3,62 | 3,37 | 3,53 | 3,24 | 3,28 | 3,52 | 3,24 | 3,44 | 3,4 |
| 500 | 3,20 | 3,30 | 3,29 | 3,44 | 3,27 | 3,39 | 3,40 | 3,21 | 3,3 |
| 630 | 3,11 | 2,99 | 3,28 | 2,98 | 3,11 | 3,39 | 3,16 | 2,93 | 3,1 |
| 800 | 2,76 | 2,75 | 2,90 | 3,05 | 2,96 | 3,20 | 3,04 | 2,90 | 3,0 |
| 1000 | 3,02 | 2,90 | 2,95 | 2,95 | 3,06 | 2,97 | 3,06 | 2,82 | 3,0 |
| 1250 | 2,87 | 2,92 | 2,76 | 2,83 | 2,79 | 2,98 | 2,90 | 2,94 | 2,9 |
| 1600 | 2,68 | 2,68 | 2,72 | 2,75 | 2,70 | 2,75 | 2,88 | 2,85 | 2,8 |
| 2000 | 2,59 | 2,62 | 2,83 | 2,76 | 2,64 | 2,75 | 2,87 | 2,77 | 2,7 |
| 2500 | 2,61 | 2,54 | 2,64 | 2,59 | 2,67 | 2,64 | 2,63 | 2,56 | 2,6 |
| 3150 | 2,49 | 2,51 | 2,52 | 2,50 | 2,60 | 2,60 | 2,62 | 2,65 | 2,6 |
| 4000 | 2,11 | 2,14 | 2,34 | 2,31 | 2,39 | 2,39 | 2,35 | 2,34 | 2,3 |
| 5000 | 1,81 | 1,88 | 1,99 | 2,02 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,0 |

Quadro 5.4 - Valores obtidos de TR30 na Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra para os pontos 1 a 8

| Freq. (Hz) | TR ₃₀ (s) | | | | | | | | Média (500, 1k, 2k) |
|------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------|
| | Pontos | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 125 | 4,30 | 4,35 | 4,43 | 4,49 | 4,66 | 4,70 | 4,64 | 4,39 | 4,5 |
| 250 | 3,55 | 3,39 | 3,51 | 3,48 | 3,75 | 3,63 | 3,54 | 3,46 | 3,5 |
| 500 | 3,31 | 3,22 | 3,37 | 3,22 | 3,22 | 3,43 | 3,27 | 3,19 | 3,3 |
| 1000 | 2,88 | 2,86 | 2,87 | 2,94 | 2,94 | 3,05 | 3,00 | 2,89 | 2,9 |
| 2000 | 2,63 | 2,61 | 2,73 | 2,70 | 2,67 | 2,71 | 2,79 | 2,73 | 2,7 |
| 4000 | 2,14 | 2,18 | 2,28 | 2,28 | 2,36 | 2,31 | 2,35 | 2,36 | 2,3 |

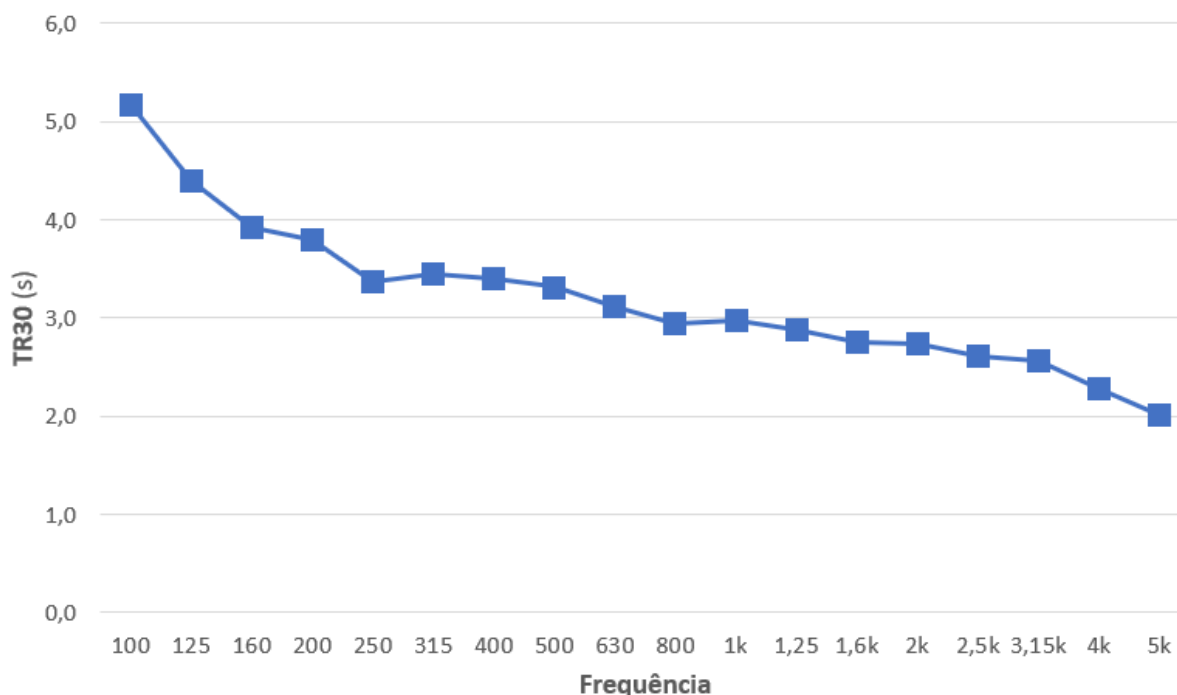


Fig. 5.14 - Valores obtidos de TR30 na Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra

Os valores do tempo de reverberação médio, ao longo da sala, demonstram ser bastante uniformes, o que corresponde a um resultado positivo. Pode-se concluir que o tratamento acústico realizado na parede de fundo da sala, resultou na eliminação de possíveis ecos criados nessa parede. Além disso, a adição de painéis de madeira absorventes e a sua forma irregular, nas paredes laterais do transepto da igreja, eliminou possíveis ecos de repetição, das paredes lisas e paralelas da igreja existentes no espaço antes da intervenção acústica.

O tempo de reverberação médio, considerando salas normalmente mobiladas e sem ocupação, deve satisfazer, segundo o RRAE, e para o volume existente, o seguinte valor:

- Para volumes V , superiores a 9000 m^3 , $T \leq 0,05 V^{1/3}$ associado a uma incerteza de 40% [32].

De forma a obter os valores previsíveis do tempo de reverberação para a sala normalmente mobilada, isto é, com as cadeiras da audiência, e sem ocupação, utilizou-se a *fórmula de Sabine*. Com os valores do TR medidos na sala vazia (Quadro 5.4), e sabendo que o volume da sala é de 11200 m^3 calculou-se a absorção sonora inicial da sala (Quadro 5.5). A este valor acrescentou-se o valor da absorção sonora adicional de um conjunto de cadeiras vazias de estofado leve (Quadro 5.6) agrupadas numa área de pavimento da audiência, que inclui uma margem de 0,5 m correspondente ao acréscimo em altura das áreas de absorção reais, e assume o valor de $412,1 \text{ m}^2$. Para este cálculo de adição de absorção sonora, considerou-se que o pavimento tem uma absorção sonora aproximadamente igual a zero. Com estes novos valores da absorção sonora, calculou-se os valores do TR previsíveis para a sala normalmente mobilada e sem ocupação (Quadro 5.7).

Quadro 5.5 - Valores previstos da absorção inicial da Igreja de São Francisco vazia

| Frequência (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|---|-----|-----|-----|------|------|------|
| Absorção sonora inicial da sala (m ²) | 399 | 506 | 547 | 612 | 665 | 786 |

Quadro 5.6 - Valores de coeficientes de absorção sonora (α) para um conjunto de cadeiras de estofado leve agrupadas [1]

| Frequência (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| $\alpha_{\text{cadeiras vazias, estofado leve}}$ | 0,35 | 0,45 | 0,57 | 0,61 | 0,59 | 0,55 |

Quadro 5.7 - Valores previsíveis do TR com a igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra com cadeiras e sem ocupação

| Frequência (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | TR médio (s) [500, 1k, 2k] |
|---|-----|-----|-----|------|------|------|-------------------------------|
| Absorção sonora prevista da sala com cadeiras desocupadas (m ²) | 543 | 692 | 781 | 863 | 908 | 1012 | 2,1 |
| Tempo de Reverberação (s) | 3,3 | 2,6 | 2,3 | 2,1 | 2,0 | 1,8 | |

A sala tem um volume de 11200 m³, logo superior a 9000 m³, e de forma a satisfazer o critério do RRAE (para a palavra), o tempo de reverberação médio tem de ser inferior a 1,1 s. O tempo de reverberação médio previsto, é de 2,1 s, o que associado a uma incerteza de 40%, corresponde a 1,3 s, valor este superior a 1,1 s, concluindo-se que não cumpre o RRAE (para a palavra).

Para efeitos comparativos com valores ideais do tempo de reverberação (capítulo 2 e 3), calculou-se os valores do tempo de reverberação com a sala totalmente ocupada, recorrendo novamente à *fórmula de Sabine*. Aos valores já obtidos da absorção sonora da sala inicial (Quadro 5.5), acrescentou-se o valor da absorção adicional de uma audiência em cadeiras de estofado leve (Quadro 5.8) para área de pavimento de audiência, anteriormente definida de 412 m².

Com estes novos valores da absorção sonora (Quadro 5.9), calculou-se os novos valores do TR, que correspondem aos valores do tempo de reverberação previsíveis para a sala totalmente ocupada (Quadro 5.9). O tempo de reverberação médio relativo às bandas de frequência de 500 e 1000 Hz da igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra é de 3,1 s para a sala vazia e de 2,0 s com a sala totalmente ocupada.

Os valores obtidos no ensaio do tempo de reverberação e previsões para a sala mobilada, mas sem ocupação e para a sala totalmente ocupada estão representados na figura 5.16. Os valores para a sala ocupada são comparados, no Quadro 5.10, com os valores adequados para diversos tipos de função. Os valores previstos e fornecidos pela InAcoustics [49] antes da intervenção acústica estão

bem como os ΔTR destas mesmas situações e por fim a comparação com o RRAE. estão representados na figura 5.15.

Quadro 5.8 - Valores de coeficientes de absorção sonora (α) para um sistema de audiência com cadeiras com estofado leve [1]

| Sistema | Frequência (Hz) | | | | | |
|---------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Audiência (estofado leve) | 0,56 | 0,68 | 0,79 | 0,83 | 0,86 | 0,86 |

Quadro 5.9 - Valores do TR previstos para a igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra ocupada

| Frequência (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | TR médio (s) [500, 1k] |
|---|-----|-----|-----|------|------|------|---------------------------|
| Absorção prevista da sala ocupada (m ²) | 630 | 786 | 872 | 954 | 1018 | 1140 | 2,0 |
| Tempo de Reverberação (s) | 2,8 | 2,3 | 2,1 | 1,9 | 1,8 | 1,6 | |

Quadro 5.10 - Comparação dos valores ideais do tempo de reverberação (500-1000 Hz) em função do tipo de utilização [1] com o valor obtido (2,0s) obtido na Igreja reabilitada de São Francisco, Coimbra

| Função | TR 500-1000 Hz (s) | Adequação à função |
|--------------------------|--------------------|--------------------|
| Auditório (palavra) | 0,7 – 0,8 | Desadequado |
| Teatro | 0,7 – 0,9 | Desadequado |
| Cinema | 0,8 – 1,0 | Desadequado |
| Estúdio de gravação | 0,4 – 0,6 | Desadequado |
| Ópera (não wagneriana) | 1,3 – 1,7 | Pobre |
| (Wagner) | 1,8 – 1,9 | Razoável |
| Música de câmara | 1,4 – 1,7 | Pobre |
| Música sinfónica Barroca | 1,4 – 1,6 | Pobre |
| Clássica | 1,6 – 1,8 | Razoável |
| Romântica | 1,9 – 2,2 | Bom |
| Moderna | 1,4 – 1,9 | Razoável |
| Música popular | 0,8 – 1,0 | Desadequado |
| Música de órgão | 2,5 – 3,5 | Desadequado |
| Coros gregorianos | 3 – 4 | Desadequado |

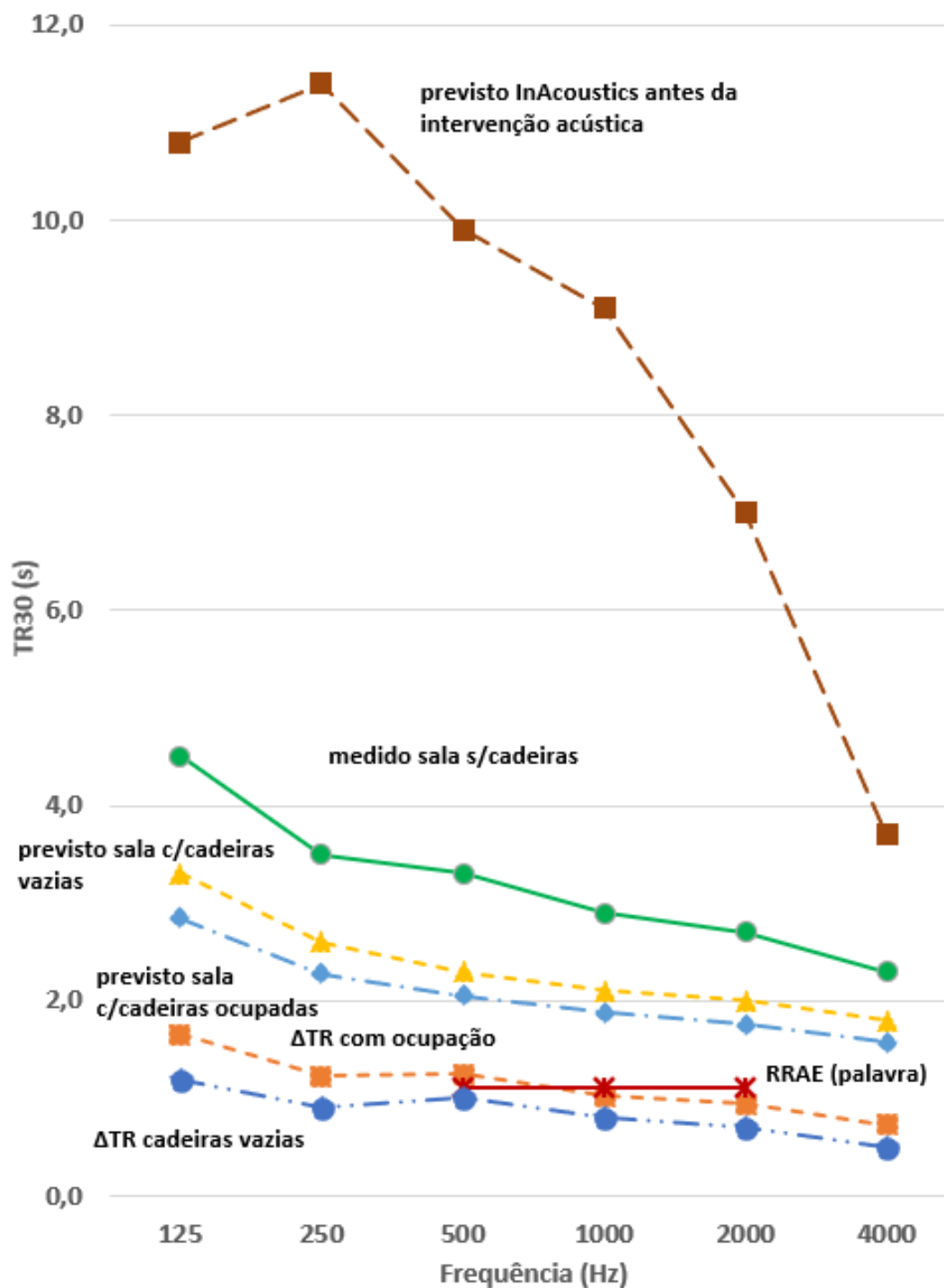


Fig. 5.15 - Valores de TR30 na igreja reabilitada (sem cadeiras) e ajustado para sala mobilada sem ocupação e ocupada. Comparação com valores limite máximo do RRAE e valores previstos pela InAcoustics [49] antes da intervenção acústica

5.3.3.RASTI

Os resultados obtidos neste ensaio encontram-se representados no Quadro 5.11. Para a avaliação dos dados realizou-se dois tipos de análise. Primeiro, dividiu-se a sala em cinco zonas e em segundo, identificou-se na planta da Igreja as curvas de igual RASTI (Fig.5.15). A zona 1, que consiste nos pontos 1 e 2, corresponde à zona central da igreja mais próxima da fonte sonora, isto é, do palco. A zona 2 corresponde ao eixo central da nave da Igreja, representada pelos pontos 3 e 4. A zona 3, inclui os pontos 6, 7, 8, 9, com o objetivo de representar o fim da nave e consequente estreitamento do espaço da audiência. O ponto 5 está representado nesta zona, e não na anterior, de forma a perceber a relação entre pontos relativamente equidistantes à fonte sonora. De seguida, a zona 4, corresponde aos pontos 11 e 12 e a zona 5, é composta pelos pontos 13 e 14. Estes quatro pontos não foram agrupados na mesma zona, pois é notório um declínio do RASTI, na zona 4, e consequentemente, uma subida do valor do RASTI na zona 5. Os pontos 10 e 15, que correspondem às medições realizadas nas capelas laterais não estão agrupadas em nenhuma zona, pois as reflexões das ondas sonoras apresentam comportamentos singulares e além disso, estes dois pontos não fazem parte da área da plateia. Tanto a divisão em zonas como a identificação das curvas de igual RASTI, tem como objetivo perceber a variação da “inteligibilidade da palavra” com a localização do espetador relativamente ao eixo central da Igreja, com o aumento da distância relativamente ao emissor e, por fim, com a existência de espaços singulares na sala que alteram o campo reverberado das ondas sonoras e, consequentemente, a percepção da palavra.

Quadro 5.11 - Valores obtidos de RASTI na Igreja rehabilitada

| Pontos de medição | RASTI | | | | Média da zona | Média da Sala |
|----------------------|------------|------------|------------|-------------|------------------|------------------|
| | 1ª medição | 2ª medição | 3ª medição | Média | | |
| 1 | 0,64 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,64 | |
| 2 | 0,63 | 0,63 | 0,62 | 0,63 | | |
| 3 | 0,57 | 0,57 | 0,56 | 0,57 | 0,55 | |
| 4 | 0,53 | 0,53 | 0,52 | 0,53 | | |
| 5 | 0,48 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | | |
| 6 | 0,47 | 0,47 | 0,46 | 0,47 | | |
| 7 | 0,45 | 0,46 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | |
| 8 | 0,42 | 0,41 | 0,42 | 0,42 | | |
| 9 | 0,42 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | | |
| 10 | 0,37 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | |
| 11 | 0,37 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | |
| 12 | 0,37 | 0,36 | 0,35 | 0,36 | | |
| 13 | 0,40 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,40 | |
| 14 | 0,40 | 0,39 | 0,40 | 0,40 | | |
| 15 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | |

Perante os resultados obtidos verifica-se que o valor do RASTI é mais elevado quando o recetor se encontra em frente, na zona central, ao emissor do que quando se encontra na lateral (ponto 5) e nas capelas laterais (ponto 10 e 15). Além disso, é notória a relação entre a distância à fonte sonora e os valores do RASTI, na medida em que, estes valores são inferiores quanto maior for a distância do recetor à fonte sonora. Esta relação não é congruente com as medições dos pontos 11 e 12.

O Quadro 5.12. representa a relação entre o parâmetro objetivo RASTI e a subjetiva inteligibilidade da palavra.

Ao analisar, com mais pormenor, as curvas de igual RASTI (Fig.5.13) e a função estabelecida no Quadro 5.12., pode-se concluir que apenas a primeira fila da plateia tem o que se pode caracterizar como uma *Boa* inteligibilidade da palavra. Os restantes espectadores na área da audiência do transepto da Igreja, tem apenas uma *Suficiente* perceção da palavra. A audiência localizada na área da nave, tem um declínio, no geral, do nível anterior de *Suficiente* para *Medíocre*, em que o maior declínio se verifica nos pontos 11 e 12 (aproximadamente 0,37). Em geral, a igreja apresenta um RASTI de 0,45, o que se traduz num nível *Suficiente* de inteligibilidade da palavra, mais concretamente na fronteira do *Medíocre* para o *Suficiente*.

Quadro 5.12 - Correspondência entre o parâmetro objetivo RASTI e a subjetiva inteligibilidade da palavra [14]

| RASTI | Inteligibilidade da palavra |
|---------------|-----------------------------|
| [0,00 – 0,30[| <i>Má</i> |
| [0,30 – 0,45[| <i>Medíocre</i> |
| [0,45 – 0,60[| <i>Suficiente</i> |
| [0,60 – 0,75[| <i>Boa</i> |
| [0,75 – 1,00] | <i>Excelente</i> |

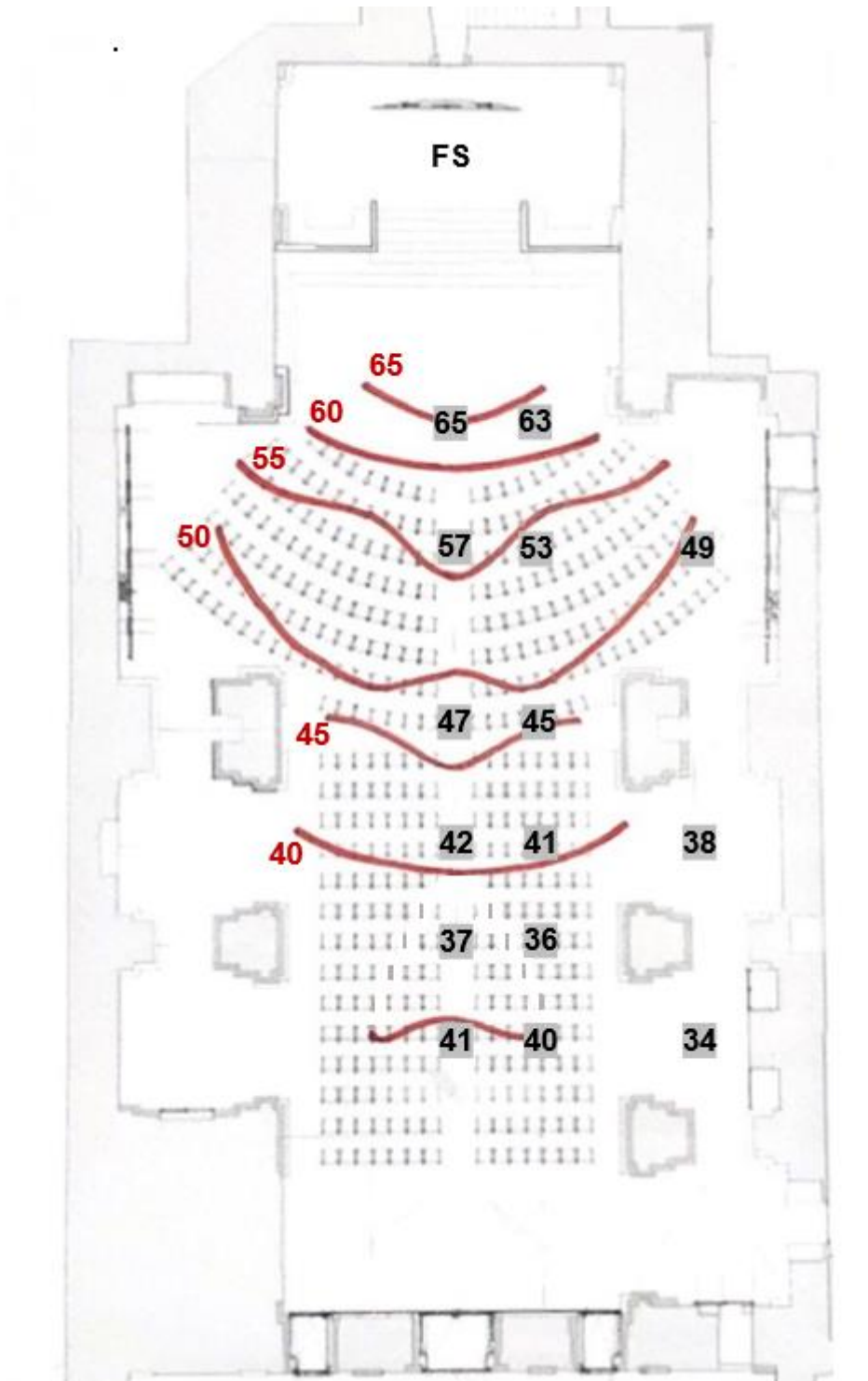


Fig. 5.16 - Medições acústicas do RASTI em 15 pontos (1 a 15) e curvas de igual RASTI da Igreja rehabilitada de São Francisco, Coimbra

6 CONCLUSÃO

6.1. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho consistiu em realizar o estudo e caracterização acústica de igrejas reabilitadas para sala de concertos, tendo como caso de estudo, a igreja reabilitada de São Francisco, em Coimbra.

Para tal, foram realizadas medições *in situ* na atual sala D. Afonso Henriques do Centro Cultural e de Congressos de Coimbra (antiga igreja de São Francisco), de forma a avaliar três parâmetros acústicos objetivos:

- Tempo de reverberação;
- *Rapid Speech Transmission Index* (sem amplificação sonora)
- Nível sonoro de ruído de fundo (sem AVAC – não existe sistema de climatização na sala).

Nos Quadros 6.1 apresenta-se o resumo dos valores obtidos dos ensaios realizados e a previsão, tanto para a sala mobiliada, mas sem ocupação, e também para a sala totalmente ocupada. A comparação destes valores é feita para os valores ideais para cada parâmetro (RASTI medido e TR previsto para a sala totalmente ocupada) e os valores regulamentares (LAeq e TR para a sala mobiliada, sem ocupação).

Quadro 6.1 - Valores obtidos nos ensaios realizados na igreja reabilitada (RASTI, TR, LAeq) e valores previstos do TR para comparação com valores ideais e valores regulamentares,

| | Medições <i>in situ</i> (sem cadeiras) | Sala mobilada (s/ ocupação) | Sala ocupada | Valores Regulamentares | Valores Ideais |
|---|--|--------------------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Tempo de Reverberação (s) [500 – 1k Hz] | 3,1 | 2,2 | 2,0 | RRAE (Palavra) | Não adequado |
| | | | | TR [500 – 1k -2k] Hz | Palavra |
| | | | | 1,1 (Não cumpre) | Adequado Música Sinfónica |
| RASTI médio | 0,45 | - | | Valor mínimo 0,45 | 0,45 a 0,75 |
| LAeq (rf) (dB) | 28 | . | | Valor máximo 30 | - |

Relativamente ao tempo de reverberação médio, na gama de frequências dos 500 e 1000 Hz (Quadro 6.1), a sala atinge o valor ótimo (2.0 s) aproximado para uma sala de concertos, quando totalmente ocupada, para alguns tipos de música sinfónica (por exemplo, romântica). Relativamente aos valores regulamentares, o valor do TR médio previsto para as frequências 500, 1000 e 2000 Hz, com a sala mobiliada e sem ocupação, não cumpre com o máximo estipulado pelo RRAE para a palavra, de 1,1 s ($TR_{\text{médio}}=1,3$ s, com incerteza de 40 %) para espaços com o volume interior da sala D. Afonso Henriques.

Ao analisar o TR previsto para as frequências dos 500 e 1000 Hz, com a sala totalmente ocupada conclui-se que a igreja reabilitada, apresenta tempos de reverberação recomendados para a música sinfónica romântica e um pouco mais reverberantes do que o desejável para música de câmara ou música sinfónica do período Barroco.

A figura 6.1 apresenta tanto os valores médios medidos *in situ* e comparação com os respetivos tempos de reverberação previstos para a sala totalmente ocupada e para a sala mobiliada e sem ocupação. É apresentado também na figura 6.1, os valores previstos pela InAcoustics antes da intervenção de reabilitação da igreja.

Pode-se concluir que o tratamento acústico da superfície do teto na nave principal, com material de absorção sonora e a colocação de painéis absorventes e difusores sonoros de madeira nas paredes laterais junto da fonte sonora (campo direto) e na parede do fundo (campo reverberado) resultou num maior impacto do tempo de reverberação nas baixas e médias frequências atingido. Desta forma, a igreja reabilitada, atingiu valores adequados de tempo de reverberação para uma sala de concertos em especial para alguns géneros musicais.

Ao analisar o parâmetro RASTI, sem reforço electro acústico, a igreja reabilitada apresenta um valor médio de 0,45, o que traduz para um nível *suficiente* de inteligibilidade da palavra. No entanto, em vários pontos na sala, a percepção da palavra atinge valores classificados de nível *mediocre*, sendo o mais baixo, 0,36. Ao analisar as curvas de igual RASTI, é possível perceber que apenas as primeiras filas da sala, atingem valor de RASTI classificado de *bom* (0,60 a 0,65). Estes valores foram todos obtidos sem ampliação sonora, logo, não é possível caracterizar as condições acústicas da sala para a palavra para outros usos.

Em relação ao nível sonoro de ruído de fundo, a sala apresenta um valor de 28 dB(A) o que satisfaz o requerido pelo RRAE para auditórios para a música, que consiste em que o L_{Aeq} seja igual ou inferior a 30 dB.

Devido ao valor do TR, a sala não é acusticamente favorável para atividades associadas ao uso da palavra (teatro, conferências, etc.).

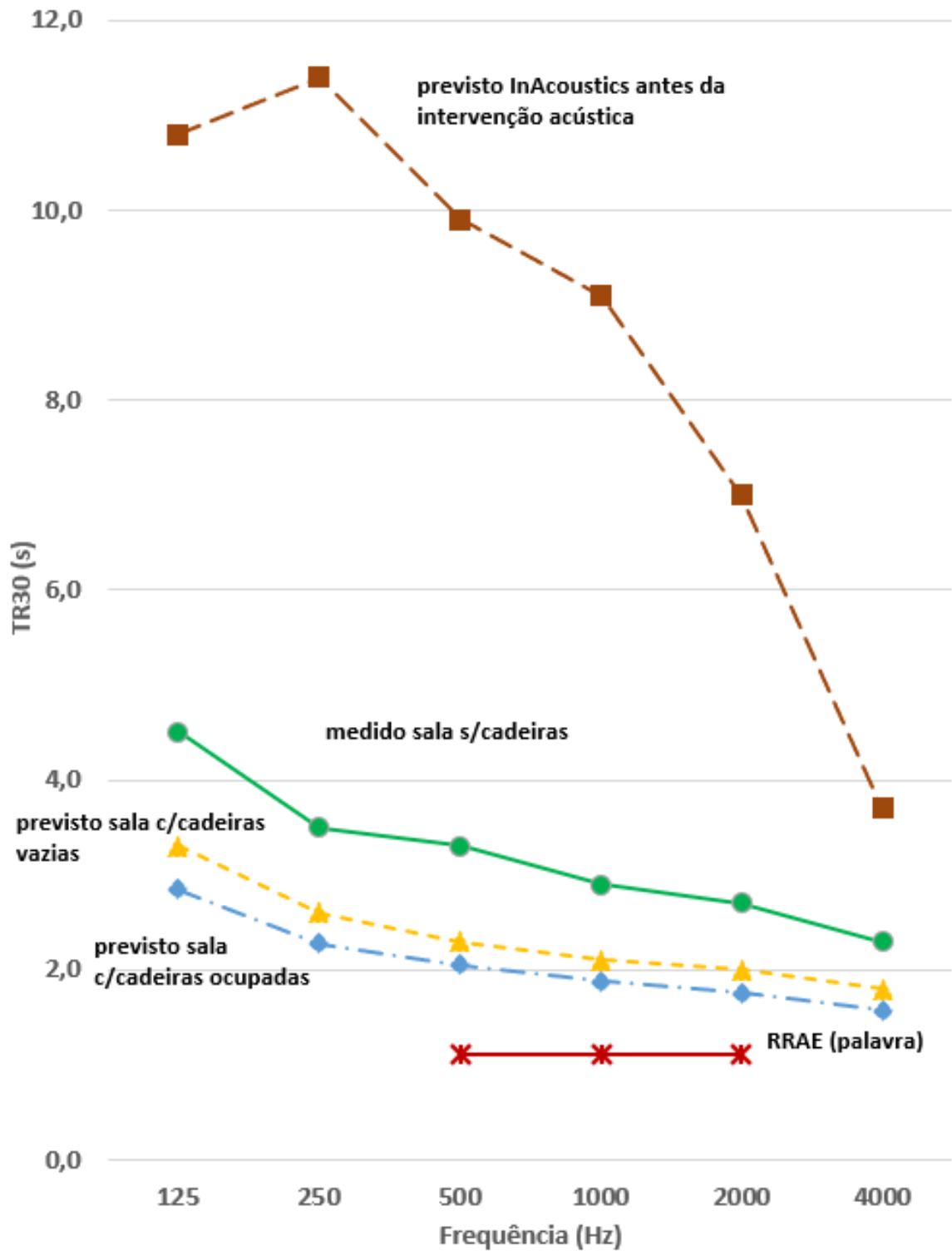


Fig. 6.1 - Valores de TR30 na Igreja rehabilitada (vazia) e valores do TR ajustado para sala mobilada sem ocupação e ocupada. Comparação com limites máximos do RRAE e com os valores previstos pela InAcoustics [49] antes da intervenção acústica

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar este estudo, poderiam ser ensaiados, no futuro, outros parâmetros como o de Definição (D_{50}) e Claridade (C_{80}), de forma a obter uma melhor caracterização acústica da igreja em relação ao seu desempenho para a função da palavra e da música, (D_{50} e C_{80} , respetivamente).

Seria importante também realizar medições *in situ* do RASTI (ou do STIPA) com sistema de amplificação sonora (existente na sala D. Afonso Henriques, mas sem técnico para operar o sistema de PA, *Public Address*) e do TR com cadeiras (402 lugares) e com pessoas.

A realização de testes subjetivos, seria também útil, com o propósito de ter um campo maior de dados com a introdução de parâmetros subjetivos e conseqüentemente análise das relações estes e os parâmetros objetivos neste tipo de espaços

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A.P. Oliveira. *Acústica Ambiental e de Edifícios.*, Edição 8.18, FEUP, Porto, 2021.
- [2] Lawrence, E. Kinsler, *et al. Fundamental of Acoustics*, 3ª edição, Nova Iorque, John Wiley, 1982
- [3] Egan, David M. *Architectural Acoustics*, 1ª edição, J. Ross, EUA, 2007
- [4] Sound propagation -https://www.researchgate.net/figure/Propagation-of-sound-with-its-impact-pressure-on-air-molecule-in-sinusoidal-form_fig1_339286218, acessado em 06/2022
- [5] Brüel & Kjær, *Environmental Noise*, Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, 2001.
- [6] Ondas sonoras: <https://conhecimentocientifico.r7.com/ondas-sonoras/>, acessado em 06/2022
- [7] Curvas da mesma audibilidade <http://portalacustica.info/conceitos-basicos-da-acustica-parte-ii/>, acessado em 06/2022
- [8] Barron, M. – *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, 2ª ed., Spon Press, Taylor & Francis, 2010
- [9] EN ISO 11654: 1997, *Acoustics absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption*
- [10] Cavanaugh, W. J.; Wilkes, J. *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. 2ª ed., J.W. & Sons, Inc., 1999
- [11] Silva, P. M. – *Projeto de condicionamento acústico de edifícios*, LNEC, Lisboa, 2009
- [12] NC – Noise Criterion : https://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_725.html , acessado em 06/2022
- [13] NR – Noise Rating: http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_60.html., acessado em 06/2022.
- [14] Carvalho, A.P. Oliveira. *Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches*. Applied Acoustics 58, pág. 33-49,1999
- [15] Kuttruff, H. *Acoustics – An introduction*, 2ª ed, Taylor & Francis, 2007
- [16] Vigran, T. E. *Building Acoustics*, 2ª ed, Taylor & Francis, 2008
- [17] Bistafa, S.R.; A.R. *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*, 3ª Ed., Edgard Blücher, 2018
- [18] Carvalho, A.P. – *Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*, Ph.D. Dissertação, Universidade da Florida, EUA, 1994
- [19] Lubman, D.; Kiser, B. – *The History of Western Civilization Told Through the Acoustic of its Worship Spaces*, David Lubman & Associates, Westminster
- [20] Carvalho, A.P - *Objective Acoustical Analysis of Room Acoustic Measurements in Portuguese Catholic Churches*, Noise-Con 94, Ft. Lauderdale, Florida, 1994
- [21] Giron, S., *et al. Church acoustic: A state-of-the-art review after several decades of research*, Journal of Sound and Vibration 411, 378-408, 2017
- [22] Carvalho, A.P – *Effect of Architectural Styles on Objective Acoustical Measures in Portuguese Catholic Churches*, WESTPRAC 1994, Seoul, Coreia do Sul, 1994

- [23] Carvalho, A.P. - *Relations between RASTI and other acoustical measures in portuguese churches*, Inter-Noise 94, Japan, 1994
- [24] Carvalho, A.P., *et al.* – *Relationships between speech intelligibility and objective acoustical parameters or architectures features in catholic churches*, NOISE-CON97, 355-360, 1997
- [25] Desarnaulds, V., *et al.* – *Church Acoustics and the Influence of Ocupancy*, Building Acoustics, Volume 9, pag 29-47, 2002
- [26] Carvalho, A.P., - *The use of the Sabine and Eyring Reverberation Time Equations to Churches*, 129th meeting of the Acoustical Society of America, Washington DC, 1995
- [27] Beranek, L. – *Music, Acoustics and Architecture*, John Wiley & Sons, Inc, EUA, 1962
- [28] Beranek, L. - *Music, Acoustics and Architecture*, American Academy of Arts & Sciences, Vol 45., pg. 25-46, 1992
- [29] Beranek, L. – *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Woodbury, Acoustical Society of America, Nova Iorque, 1996
- [30] Buratti, C., *et al.* *Acoustics design of S. Tommaso ex-Monastery Church*, ICSV12, Lisboa, 2005
- [31] Rico, B., *et al.* *The acoustic rehabilitation of the Renaissance church of La Anunciación in Seville* INTERNOISE, Lisboa, 2010
- [32] *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho, Diário da República*, 2008
- [33] NP EN ISO 717-1:2009 – *Medição in situ do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos e determinação do índice de isolamento sonoro*
- [34] NP EN ISO 717-2:2009 – *Medição in situ do isolamento sonoro a sons de percussão sobre pavimentos e determinação do índice de isolamento sonoro*
- [35] Dias Costa, A. – *Convento de São Francisco de Coimbra: da construção no século XVII à recuperação no século XXI*, Tese Mestrado FAUP, 2018
- [36] Convento São Francisco: <https://coimbraconvento.pt/pt/convento-sao-francisco/historia/> acedido em 06/2022
- [37] Cronologia: http://www.monumentos.gov.pt/site/app_pagesuser/sipa.aspx?id=4240 acedido em 06/2022
- [38]: Modular precision sound analyzer <https://www.bksv.com/media/doc/bp1750.pdf>
- [39] :Sound source type 4224 <https://www.bksv.com/media/doc/bp0066.pdf>
- [40] The B & K RASTI-Instruments: <https://www.bksv.com/pdf/Bo0116.pdf>
- [41] Sound Calibrator Type 4231: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1311.ashx>
- [42] :Free-field microphone – type 4189: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2210.ashx>
- [43] 2260 INVESTIGATOR BRÜEL & KJAER: <https://www.leasametric.com/en/product/bruel-kjaer-2260-investigator/>

[44] Sala D. Afonso Henriques (antiga igreja) <https://www.coimbraconvento.pt/pt/espacos/sala-d-afonso-henriques-antiga-igreja/> acedido em 06/2022

[45] Galeria de imagens: <https://www.coimbraconvento.pt/pt/galeria-imagens/programacao-cultural/> acedido em 06/2022

[46] Equipa projetista *InAcoustics* (conversa informal)

[47] Concílio de trento: <https://conhecimentocientifico.com/concilio-de-trento/> acedido em 06/2022

[48] Second Vatican Council: <https://www.carroll.edu/mission-catholic-identity/second-vatican-council> acedido em 06/2022

[49] Contacto email equipa projetista *InAcoustics*