

# **CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DAS DUAS IGREJAS DE SANTO OVÍDIO, MAFAMUDE**

**CÁTIA DENISE FERREIRA MARTINS**

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

JANEIRO DE 2010

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

A meus Pais



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar um particular agradecimento ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, orientador exemplar, pelos seus ensinamentos, pelo apoio que sempre me prestou, pela disponibilização de elementos bibliográficos e particularmente pelas sugestões e pelo interesse demonstrado.

Ao Engenheiro António Eduardo Costa pela contribuição na realização dos ensaios nas Igrejas de Santo Ovídio e pelas dicas e auxílio prestados durante a realização do trabalho.

Ao pároco de Santo Ovídio, Sr. Padre Queirós, pela colaboração, interesse e dedicação que demonstrou por esta investigação.

São também devidos agradecimentos a todo o pessoal das Igrejas visitadas, pela ajuda concedida em todas as ocasiões.

Agradecimento especial ao Pedro por todo o apoio, paciência e auxílio ao longo deste percurso.

Finalmente agradeço à minha Família, a quem dedico esta tese.



## RESUMO

Este trabalho analisa o comportamento acústico interior das duas igrejas de Santo Ovídio em Mafamude, Vila Nova de Gaia tendo como objectivos a sua caracterização e comparação quer entre si quer com outras igrejas de volume semelhante.

Este estudo pretende analisar a igreja antiga de Santo Ovídio que data de 1950 e a igreja nova de Santo Ovídio inaugurada em 2002 cujo projecto acústico foi da responsabilidade do Instituto da Construção (FEUP) através do Professor A. P. Oliveira de Carvalho e Diamantino Freitas (Electroacústica).

Sendo uma igreja um espaço público de oração, a percepção das palavras proferidas pelo pregador nas missas por parte de todos os presentes é o mais importante. De igual importância é a necessidade de garantir a ausência de ruído de fundo incomodativo. De modo a atingir os requisitos acústicos neste tipo de edifício foram escolhidos os seguintes parâmetros para avaliação *in situ*: tempo de reverberação, RASTI (com e sem uso da instalação sonora) e Ruído de Fundo.

Estes parâmetros foram medidos com a igreja desocupada (com excepção dos técnicos responsáveis pelos ensaios) e em vários pontos do seu interior. Os valores obtidos dos ensaios *in situ* foram comparados entre as duas igrejas e entre igrejas de volume semelhante.

Os valores de Ruído de Fundo foram de 51dB(A) na igreja antiga e de 30 dB(A) na igreja nova o que resulta num valor desadequado para um local de culto no primeiro caso e num resultado bastante favorável no segundo.

Relativamente ao RASTI, constatou-se uma melhoria dos valores da igreja nova relativamente aos valores da igreja antiga. Concluiu-se que a inteligibilidade da palavra da igreja antiga é medíocre e que a instalação sonora não traz grandes benefícios. Por outro lado a igreja nova tem uma inteligibilidade suficiente sem a utilização da instalação sonora passando a boa quando se liga a amplificação.

Em relação ao Tempo de Reverberação, os valores médios variaram entre 2,3 e 3,1 s na igreja antiga e entre 2,2 e 4,5 na igreja nova.

Através da comparação entre igrejas do mesmo volume conclui-se que igreja nova de Santo Ovídio tem um índice de inteligibilidade muito bom. O valor médio de RASTI sem utilização do sistema de som nesta igreja é superior ao valor obtido pelas outras igrejas mesmo com a utilização do sistema sonoro. A igreja antiga de Santo Ovídio tem um valor baixo de RASTI quando comparada com igrejas de volume idêntico.

PALAVRAS-CHAVE: TEMPO DE REVERBERAÇÃO, RUÍDO DE FUNDO, RASTI, IGREJAS, ACÚSTICA



## ABSTRACT

This thesis analyzes the acoustic behavior within the two churches of St. Ovídio in Mafamude, Vila Nova de Gaia targeting the characterization and comparison with each other and with other churches of similar volume.

This study aims to examine the old church of St. Ovídio dating from 1950 and the new church of St. Ovídio opened in 2002 whose acoustic project was the responsibility of the Institute of Construction (FEUP) by Professor A. P. Oliveira de Carvalho and Diamantino Freitas (Electroacoustics).

Being the church a public space of oration, the perception of the preacher's spoken words in the masses by all present is the most important. Of equal importance is the need to ensure the absence of background noise. In order to achieve the acoustic requirements in this type of building, the following parameters were chosen to be evaluated *in situ*: reverberation time, RASTI (with and without the use of public address system) and background noise level.

These parameters were measured with the empty church (with the exception of the technical testers) and at various points of the church. The values obtained from *in situ* testing were compared between the two churches and between churches of similar volume.

The values of background noise were 51 dB(A) in the old church and of 30 dB(A) in the new church, which is an inadequate value for a place of worship in the first case and a very positive result in the second.

For the RASTI, there was an improvement of the values on the new church regarding the values on the old church. It was concluded that the speech intelligibility in the old church is poor and that the sound amplification system does not bring great benefits. Moreover, the new church has a fair speech intelligible without the use of sound amplification system and a good one when the sound amplification system is on.

For the reverberation time, the average values ranged between 2.3 and 3.1 s in the old church and between 2.2 and 4.5 in the new church.

The comparison between churches of the same volume led to the conclusion that the new church of St. Ovídio has an index of speech intelligibility very good. The average RASTI without the use of sound system in this church is greater than the value obtained in other similar churches even with the use of their sound system. The old church of St. Ovídio has a low value of RASTI compared with churches of the same volume.

**KEYWORDS:** REVERBERATION TIME, BACKGROUND NOISE, RASTI, CHURCHES, ACOUSTICS



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	xii
<b>1. OBJECTIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICAÇÃO DA TESE .....	1
1.2 OBJECTIVOS .....	1
1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....	2
<b>2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES .....</b>	<b>3</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	3
2.2 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS EM MEIOS ELÁSTICOS .....	3
2.3 CELERIDADE .....	4
2.4 INTENSIDADE .....	5
2.5 POTÊNCIA SONORA .....	5
2.6 NÍVEIS .....	7
2.7 FREQUÊNCIA .....	8
2.8 CURVAS DE PONDERAÇÃO PARA OUVIDO HUMANO .....	13
2.9 NÍVEL SONORO EQUIVALENTE PONDERADO A (LAEQ) .....	14
2.10 RUÍDO DE FUNDO .....	15
2.11 CURVAS DE INCOMODIDADE .....	16
2.12 REVERBERAÇÃO .....	17
2.13 ABSORÇÃO SONORA .....	19
2.14 ISOLAMENTO SONORO E CORRECÇÃO ACÚSTICA .....	19
2.15 INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA .....	21
<b>3 ACÚSTICA DE IGREJAS .....</b>	<b>25</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	25
3.2 A ACÚSTICA DE DIFERENTES TIPOS DE IGREJAS .....	25
3.2.1 IGREJAS CRISTÃS E MEDIEVAIS .....	25
3.2.2 IGREJAS RENASCENTISTAS E TRIDENTINAS .....	29
3.2.3 IGREJAS BARROCAS E BARROCO TARDIO .....	32
3.3 OBJECTIVOS ACÚSTICOS DE UMA IGREJA .....	35
3.4 FALHAS ACÚSTICAS FREQUENTES EM IGREJAS .....	37

<b>4 IGREJAS PAROQUIAIS DE SANTO OVÍDIO</b> .....	39
<b>4.1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA</b> .....	39
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS IGREJAS</b> .....	40
4.2.1 IGREJA ANTIGA DE SANTO OVÍDIO .....	40
4.2.2 IGREJA NOVA DE SANTO OVÍDIO .....	44
4.2.2 COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS ARQUITECTÓNICOS ENTRE AS DUAS IGREJAS.....	52
<b>5 ENSAIOS</b> .....	53
<b>5.1 INTRODUÇÃO</b> .....	53
<b>5.2 RUÍDO DE FUNDO</b> .....	54
5.2.1 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR .....	54
5.2.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO .....	55
5.2.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	56
<b>5.3 RASTI</b> .....	60
5.3.1 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR .....	60
5.3.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO .....	60
5.3.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	61
<b>5.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO</b> .....	68
5.4.1 LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR .....	68
5.4.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO .....	69
5.4.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	70
<b>6 COMPARAÇÃO DAS DUAS IGREJAS DE SANTO OVÍDIO COM IGREJAS DE VOLUMETRIA SEMELHANTE</b> .....	75
<b>6.1 COMPARAÇÃO DOS VALORES DE RASTI</b> .....	75
6.1.1 IGREJA ANTIGA DE SANTO OVÍDIO .....	75
6.2.1 IGREJA NOVA DE SANTO OVÍDIO.....	77
<b>6.2. COMPARAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO</b> .....	79
6.2.1. IGREJA ANTIGA DE SANTO OVÍDIO .....	79
6.2.1 IGREJA NOVA DE SANTO OVÍDIO .....	75
<b>7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	83
<b>7.1 CONCLUSÕES</b> .....	83
<b>7.2 OPINIÃO DOS UTILIZADORES</b> .....	85
<b>7.3 PISTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	85
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ondas transversais e longitudinais [7].....	4
Figura 2.2 – Propagação do som sob a forma de esferas concêntricas numa fonte pontual .....	4
Figura 2.3 – Funcionamento de um diapasão e ilustração da propagação de uma onda sonora .....	6
Figura 2.4 – Representação das frequências centrais das bandas de oitava [7] .....	9
Figura 2.5 – Representação das frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava [7] .....	10
Figura 2.6 – Bandas de 1 oitava e de 1/3 de oitava [7] .....	11
Figura 2.7 – Espectrograma com a representação em oitavas e em terços de oitava [7] .....	12
Figura 2.8 – Curvas de ponderação A, B, C e D [8] .....	13
Figura 2.9 – Formas de representação de um ruído [7] .....	14
Figura 2.10 – Níveis de pressão sonora em situações do dia a dia .....	16
Figura 2.11 – Curvas NC [11].....	17
Figura 2.12 – Tempo de reverberação numa sala de controlo [9] .....	18
Figura 3.1 – Interior da Igreja de San Vicente de Cardona, Barcelona [17] .....	27
Figura 3.2 – Fotografia Planta da Igreja de S. Francisco, Porto [14] .....	29
Figura 3.3 – Interior da igreja de S. Lourenço, Florença [16].....	30
Figura 3.4 – Alçado e planta da igreja de São Sebastião, Mantua, Itália [18] [19] .....	31
Figura 3.5 – Propriedade bifocal da elipse [20] .....	33
Figura 3.6 – Cúpula da igreja de Sant'Ivo em Roma [21] .....	34
Figura 3.7 – Interior da igreja barroca da Venerável Ordem Terceira de São Francisco da Penitência, Rio de Janeiro [22] .....	34
Figura 4.1 – Santo Ovídio [1] .....	39
Figura 4.2 – Fachada da Igreja Antiga de Santo Ovídio [10] .....	41
Figura 4.3 – Igreja Santo Ovídio, vista entrada [foto da autora] .....	41
Figura 4.4 - Igreja Santo Ovídio, vista altar [foto da autora] .....	42
Figura 4.5 – Localização da Igreja Antiga de Santo Ovídio [10] .....	42
Figura 4.6 – Planta e Corte da Igreja Antiga de Santo Ovídio.....	43
Figura 4.7 – Fachada da Igreja Nova de Santo Ovídio [10] .....	44
Figura 4.8 – Igreja Nova Santo Ovídio, vista entrada [foto da autora] .....	44
Figura 4.9 – Igreja Nova Santo Ovídio, vista altar [foto da autora] .....	45
Figura 4.10 – Localização da Igreja Nova de Santo Ovídio (B) e da Igreja Antiga (A) [10] .....	45
Figura 4.11 – Igreja Nova Santo Ovídio, Tapeçaria do Presbitério [foto da autora] .....	46
Figura 4.12 – Igreja Nova Santo Ovídio, Via-sacra [foto da autora] .....	47
Figura 4.13 – Igreja Nova Santo Ovídio, Capela do Santíssimo Sacramento [foto da autora] .....	47
Figura 4.14 – Igreja Nova Santo Ovídio, Sacrário da Capela do Santíssimo Sacramento [foto da autora] .....	48
Figura 4.15 – Igreja Nova Santo Ovídio, Vitrais do Baptistério [foto da autora] .....	48
Figura 4.16 - Igreja Nova Santo Ovídio, Pia Baptismal [foto da autora] .....	49
Figura 4.17 - Planta da Igreja Nova de Santo Ovídio .....	50
Figura 4.18 – Alçado 1 da Igreja Nova de Santo Ovídio .....	50
Figura 4.19 – Alçado 2 da Igreja Nova de Santo Ovídio .....	51
Figura 4.20 – Sonaspray k3 aplicado no tecto da Igreja Nova de Santo Ovídio [foto da autora] .....	52
Figura 5.1 – Localização dos pontos ensaiados para a avaliação do L (Ruído de Fundo) na igreja antiga .....	54
Figura 5.2 – Localização dos pontos ensaiados para a avaliação do L (Ruído de Fundo) na igreja nova .....	55

Figura 5.3 – Sonómetro <i>B&amp;K</i> 2260 [Foto da autora] .....	56
Figura 5.4 – Representação gráfica dos resultados médios de L em dB nas duas igrejas .....	57
Figura 5.5 – Diferenças de nível de pressão sonora ( $\Delta L$ ) por banda de frequência .....	58
Figura 5.6 – Representação gráfica dos resultados médios de L em dBA (filtro A) nas duas igrejas .....	59
Figura 5.7 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios RASTI na igreja antiga .....	62
Figura 5.8 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios RASTI na igreja nova .....	63
Figura 5.9 – Representação gráfica das diferenças nos resultados obtidos nos ensaios RASTI com e sem amplificação nas duas igrejas .....	64
Figura 5.10 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios RASTI com e sem o sistema de som ligado nas duas igrejas .....	64
Figura 5.11 – Sistema de reforço electroacústico na igreja antiga [foto da autora] .....	66
Figura 5.12 – Sistema de reforço electroacústico na igreja nova [foto da autora] .....	67
Figura 5.13 – Localização dos quatro pontos a ensaiar e fonte emissora (E) para avaliação do TR na igreja antiga .....	68
Figura 5.14 – Localização dos quatro pontos a ensaiar e fonte emissora (E) para avaliação do TR na igreja nova .....	69
Figura 5.15 – Fonte emissora <i>B&amp;K</i> 4225 [Foto da autora] .....	70
Figura 5.16 – Valores de TR por banda de frequência para os quatro pontos testados na igreja antiga .....	72
Figura 5.17 – Valores de TR por banda de frequência para todos os pontos testados na igreja nova .....	72
Figura 5.18 – Valores do TR médio por banda de frequência nas duas igrejas .....	73
Figura 5.19 – Características de reverberação referidas aos valores nas frequências médias .....	74
Figura 6.1 – Valores de RASTI na igreja antiga e em igrejas de volume semelhante .....	76
Figura 6.2 – Valores de RASTI na igreja nova e em igrejas de volume semelhante .....	78
Figura 6.3 – Valores de RASTI na igreja nova e em igrejas de volume muito inferior .....	78
Figura 6.4 – Valores de Tempo de Reverberação médio (500, 1k Hz) na igreja antiga de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante .....	80
Figura 6.5 – Valores de Tempo de Reverberação médio (500, 1k Hz) na igreja nova e em igrejas de volume semelhante .....	81

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Frequências centrais das bandas de oitava e 1/3 de oitava .....	9
Quadro 2.2 – Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência de oitava na gama do audível .....	13
Quadro 2.3 – Percepção subjectiva para a inteligibilidade da palavra em função dos valores numéricos do AI [42].....	22
Quadro 2.4 – SIL (dB) para o qual a comunicação da palavra é, no limite, possível (M: Masculino; F: Feminino) [42] .....	23
Quadro 4.1 – Parâmetros arquitectónicos nas duas igrejas .....	52
Quadro 5.1 – Valores médios dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo na igreja antiga de Santo Ovídio .....	56
Quadro 5.2 – Valores médios dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo na igreja nova de Santo Ovídio .....	57
Quadro 5.3 – Valores médios dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo nas igrejas de Santo Ovídio.....	57
Quadro 5.4 – Valores médios dos níveis sonoros ( $L_A$ ) do Ruído de Fundo nas igrejas de Santo Ovídio .....	58
Quadro 5.5 – Escala de RASTI [37] .....	60
Quadro 5.6 – RASTI (1ª fase) – sistema de som desligado, na igreja antiga .....	61
Quadro 5.7 – RASTI (1ª fase) – sistema de som desligado, na igreja nova .....	61
Quadro 5.8 – RASTI (2ª fase) – sistema de som ligado, na igreja antiga .....	62
Quadro 5.9 – RASTI (2ª fase) – sistema de som ligado, na igreja nova .....	62
Quadro 5.10 – $\Delta$ RASTI (diferença do valor de RASTI com e sem amplificação) na igreja antiga .....	63
Quadro 5.11 – $\Delta$ RASTI (diferença do valor de RASTI com e sem amplificação) na igreja nova .....	63
Quadro 5.12 – Valores médios do RASTI e inteligibilidade da palavra nas igrejas de Santo Ovídio .....	65
Quadro 5.13 – Valores médios do RASTI em cada ponto nas igrejas de Santo Ovídio .....	65
Quadro 5.14 – Valores medidos do Tempo de Reverberação (s) na igreja antiga .....	71
Quadro 5.15 – Valores medidos do Tempo de Reverberação (s) na igreja nova .....	71
Quadro 5.16 – Coeficientes de absorção do Sonapray k13 .....	74
Quadro 6.1 – Parâmetros arquitectónicos da Igreja antiga de Santo Ovídio e das igrejas escolhidas para comparação dos valores de RASTI .....	75
Quadro 6.2 – RASTI médio na Igreja Antiga de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante .....	76
Quadro 6.3 – Parâmetros arquitectónicos da Igreja Nova de Santo Ovídio e das igrejas escolhidas para comparação .....	77
Quadro 6.4 – RASTI médio na Igreja Nova de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante .....	77
Quadro 6.5 – Volumes da Igreja Antiga de Santo Ovídio e das igrejas escolhidas para posterior comparação dos valores de Tempo de Reverberação .....	79
Quadro 6.6 – TR médio (500, 1kHz) na Igreja Antiga de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante.....	79
Quadro 6.7 – Volumes da Igreja Nova de Santo Ovídio e das igrejas escolhidas para comparação dos valores de Tempo de Reverberação .....	80
Quadro 6.8 – TR médio (500, 1kHz) na Igreja Nova de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante. ....	81
Quadro 7.1 – Quadro-resumo dos valores medidos .....	81
Quadro 7.2 – Quadro-resumo da qualidade subjectiva dos valores medidos .....	82
Quadro 7.3 – Quadro-resumo da opinião dos utilizadores. ....	84





## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AI – *Articulation Index*

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BR – *Bass Ratio*

B&K – *Brüel & Kjaer*

c – Celeridade (m/s)

C<sub>50</sub> – Claridade (dB, base 50 ms)

C<sub>80</sub> – Claridade (dB, base 80 ms)

CLA – Clareza do discurso musical

DIR - Direccionalidade

EDT – Tempo de decaimento curto (s)

EQT – Equilíbrio Tímbrico

D – Som directo

D<sub>50</sub> – Definição

E - Emissor

G – Factor de Força (dB)

I – Intensidade Sonora (W/m<sup>2</sup>)

I<sub>0</sub> – Intensidade Sonora de referência (W/m<sup>2</sup>)

INTM – Intimidade

L<sub>A</sub> – Nível pressão sonora (dBA)

L<sub>p</sub> – Nível de pressão sonora (dB)

L<sub>I</sub> – Nível de intensidade sonora (dB)

L<sub>w</sub> – Nível de potência sonora (dB)

NC – *Noise Criterion* (dB)

p – Pressão (Pa)

p<sub>0</sub> – Pressão de referência (Pa)

P80 – Número de palavras entendidas numa lista de oitenta palavras

QAI – Qualidade Acústica de Igreja

R – Receptor

r – Distância à fonte (m)

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

REV - Reverberância

RF – Ruído de Fundo (dB)

S – Área (m<sup>2</sup>)

STI – *Speech Transmission Index*

T – Temperatura do ar (K)

T<sub>mid</sub> – Média entre TR (500 Hz) e TR (1.000 Hz) (s)

TR – Tempo de Reverberação (s)

TR (125Hz) – Tempo de Reverberação na banda de frequência dos 125 Hz (s)

TR (250Hz) – Tempo de Reverberação na banda de frequência dos 250 Hz (s)

TR (500-1000Hz) – Média entre TR (500Hz) e TR (1.000 Hz)

TS – Tempo Central (ms)

V - Volume ( $m^3$ )

W – Potência Sonora (W)

$W_0$  – Potência Sonora de referência (W)

WAQS – Índice de qualidade acústica em edifícios religiosos

$\alpha$  – Coeficiente de absorção

$\alpha_w$  – Coeficiente de absorção ponderado e ajustado

$\rho$  – Massa volúmica do ar

$\eta_i$  – Pesos em método multi-critério





# 1

## OBJECTIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO

### 1.1 JUSTIFICAÇÃO DA TESE

As igrejas possuem grande importância social na vida das comunidades. São edifícios que constituem um tipo arquitectónico bastante singular uma vez que apesar de serem construídas com um objectivo bastante específico (lugares próprios para oração), as igrejas desempenham diversas funções como espaços culturais. Constituem os grandes halls da comunidade, nos quais música instrumental e coral são executadas, peças de teatro são exibidas, palestras educativas são proferidas à população, além do espaço se prestar muitas vezes para o exercício político das organizações sociais.

Em virtude do uso dos idiomas nacionais, a partir de meados do séc. XX, do ponto de vista da acústica das salas, resultou uma maior demanda por boa inteligibilidade da palavra falada.

A acústica em edifícios religiosos tem tomado a atenção de grupos de pesquisa em Portugal (Carvalho, [15], [39]), Espanha (Galindo; Zamarreño; Giron, [44]), Suíça (Desarnaulds, [45]) e Itália (Cirillo; Martellotta, [40], [41]). Mas a quantidade de informação sobre este tipo de sala ainda é pequena quando comparada às salas de concerto e auditórios.

Surge assim da necessidade de continuidade destes estudos, este trabalho de análise do comportamento acústico do interior das igrejas de Santo Ovídio em Mafamude, Vila Nova de Gaia.

### 1.2 OBJECTIVOS

O objectivo deste estudo é caracterizar acusticamente, através de parâmetros objectivos, a antiga e a nova Igreja de Santo Ovídio em Mafamude (V. N. Gaia). Este estudo é suportado por uma valiosa componente prática, que consiste nos ensaios *in situ* dos parâmetros acústicos a avaliar para a caracterização acústica das igrejas (RASTI, Ruído de Fundo e Tempo de Reverberação). A partir da análise dos resultados dos ensaios, faz-se a comparação dos valores dos parâmetros acústicos entre as duas igrejas e a comparação desses com os de outras igrejas com volume similar.

### **1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO**

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos: no 1º capítulo faz-se uma breve descrição do trabalho e dos objectivos deste; O 2º capítulo fornece as bases acústicas essenciais para a compreensão do estudo efectuado; No 3º Capítulo faz-se uma abordagem à Acústica de Igrejas, descrevendo o seu estado actual e a sua evolução ao longo da história, enumeram-se os objectivos acústicos de uma igreja e os problemas frequentes relacionados com a acústica que aparecem em edifícios deste tipo; O 4º capítulo caracteriza as igrejas alvo deste trabalho, a Igreja Antiga e a Igreja Nova de Santo Ovídio, fornecendo informações sobre a arquitectura das igrejas e as suas histórias; O 5º capítulo diz respeito aos ensaios realizados *in situ* para a elaboração deste trabalho. São descritos pormenorizadamente e apresentados e analisados os seus resultados ao longo deste capítulo; No 6º capítulo comparam-se os valores de RASTI obtidos com os valores apresentados noutros trabalhos em igrejas de volume semelhante; O 8º capítulo apresenta as conclusões do estudo e pistas para desenvolvimentos futuros.

# 2

## CONCEITOS E DEFINIÇÕES

### 2.1 INTRODUÇÃO

A Acústica estuda a geração, propagação e recepção de ondas sonoras, além de fenómenos que interferem na propagação dessas ondas.

São aqui apresentadas as características físicas de ondas sonoras e tecidos alguns comentários sobre a geração e a recepção dessas ondas ao mesmo tempo em que apresentam os conceitos e definições dos parâmetros de Acústica a desenvolver neste trabalho.

### 2.2 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS EM MEIOS ELÁSTICOS

Quando se toca um sino ou se liga o rádio, o som é ouvido em pontos distantes, sendo transmitido através do ar circundante. São situações físicas produzidas num ponto do espaço, propagadas através deste, e que foram percebidas depois, noutro ponto. Estes processos são exemplos de movimentos ondulatórios.

O som é resultado da percepção de distúrbios das moléculas de um meio em certo espaço de tempo. Esses distúrbios, por sua vez, apresentam-se em forma de ondas na sua propagação pelo meio. Para este fenómeno ocorrer há a necessidade de haver três elementos relacionados num sistema:

Emissor - Meio – Receptor

O emissor tem a função de produzir um distúrbio no meio, que será percebido pelo receptor. É importante notar que o meio tem influência na qualidade do distúrbio percebido, pois afecta a maneira como este se propaga. Estes distúrbios de natureza mecânica são pequenas e rápidas variações de pressão do meio, causadas pelo movimento das moléculas, caracterizados por compressões e rarefações (descompressões, expansões).

Esse movimento é sempre relacionado com uma onda de pressão que se propaga pelo meio. As ondas de pressão que caracterizam o som, chamadas de ondas sonoras, são do tipo longitudinal, onde o movimento das moléculas se dá na mesma direcção de propagação da onda e propagam-se por uma série de compressões/descompressões num meio, normalmente o ar.

A forma de propagação pode ser através ondas transversais ou por ondas longitudinais. Se um meio elástico for considerado como constituído pela superposição de planos paralelos é fácil visualizar esses dois tipos de ondas (Fig. 2.1). O som propaga-se no ar por ondas de compressão que atingem o ouvido

humano comprimindo de forma alternada o tímpano e produzindo a sensação sonora. Por outro lado, pontos da corda de um instrumento musical oscilam perpendicularmente à corda e a oscilação avança ao longo dessa corda por ondas transversais.

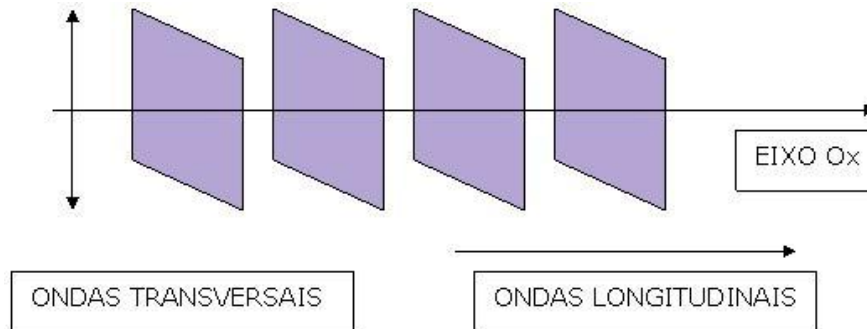


Figura 2.1 – Ondas transversais e longitudinais [7]

A vibração de um meio homogêneo, como o ar, excitado num ponto é simétrica e gera ondas esféricas de compressão concêntricas a partir daquele ponto (Fig. 2.2). Por exemplo, um objecto atingindo uma superfície de água parada, gera ondas transversais circulares concêntricas no ponto de impacto do objecto.

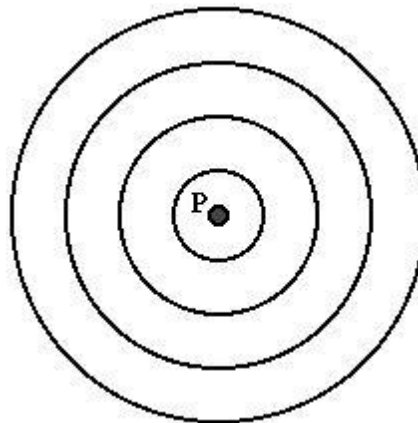


Figura 2.2 – Propagação do som sob a forma de esferas concêntricas numa fonte pontual

### 2.3 CELERIDADE

A velocidade de propagação de ondas sonoras no ar (celeridade) é independente da pressão atmosférica, variando somente em função da temperatura, sendo directamente proporcional à raiz quadrada da temperatura em Kelvin como apresentado na seguinte expressão:

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

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

Para a conversão de temperaturas apresentadas na escala de Celsius (°C) em Kelvin utiliza-se a seguinte expressão:

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

Como exemplo, a 20°C, a velocidade do som no ar é 344 m/s.

## 2.4 INTENSIDADE

É o fluxo de energia por unidade de área. Refere-se ao produto da pressão pela velocidade das partículas num meio fluido, o que é equivalente à potência recebida por unidade de área.

Em termos acústicos a intensidade é o valor médio do fluxo de energia por unidade de área perpendicular à direcção de propagação, medida em watt por metro quadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Relaciona-se com outras grandezas através da seguinte expressão:

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

Onde I é a intensidade sonora ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), W a potência sonora em watt (W), r a distância à fonte em metros (m), p a pressão sonora em Pascal (pa),  $\rho$  a massa volúmica do ar que corresponde normalmente a cerca de  $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  e c a celeridade em m/s que em condições normais ( $T \approx 15^{\circ}\text{C}$ ) ronda os 340m/s.

Estas expressões mostram claramente que a potência sonora, W, é proporcional à intensidade sonora, I, e é proporcional ao quadrado da pressão sonora, p. Do mesmo modo se verifica que a intensidade sonora e a pressão sonora diminuem com o quadrado da distância à fonte.

Se a distância à fonte aumenta para o dobro, a mesma quantidade de energia atravessará uma área que é quatro vezes maior e portanto  $I_2 = I_1/4$ .

Se a intensidade sonora diminui para 1/4, a pressão sonora diminui para 1/2.

A potência sonora pode ser calculada a partir de medições de pressão sonora ou intensidade sonora e fazendo as correcções necessárias à envolvente acústica no caso da pressão e apenas à superfície de medição no caso da intensidade.

A potência sonora serve fundamentalmente para classificar, em termos quantitativos, as fontes de ruído. A intensidade sonora permite localizar e qualificar as fontes de ruído, sendo por isso extremamente útil no estudo de soluções para controlo de ruído. A pressão sonora é o parâmetro utilizado quando o objectivo é a avaliação de situações de incomodidade ou de risco do trauma auditivo.

## 2.5. POTÊNCIA SONORA

Quando uma fonte sonora, por exemplo como um diapasão, vibra, provoca variações de pressão no ar ambiente que se sobrepõem à pressão estática do ar que, em condições normais, tem o valor de 1 atmosfera ou aproximadamente  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ , tal como mostra a Figura 2.3, em que se observam as sucessivas compressões e rarefacções das partículas de ar, de modo que o movimento de uma partícula provoca a vibração da partícula vizinha, resultando na propagação sonora.

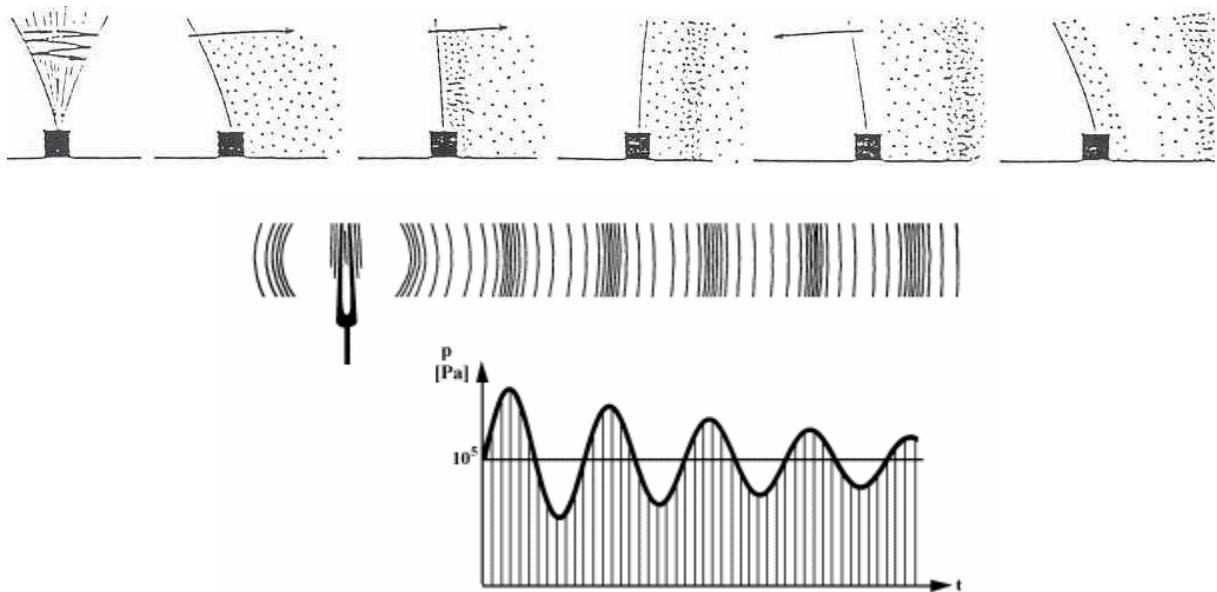


Figura 2.3 - Funcionamento de um diapasão e ilustração da propagação da onda sonora [7]

Aquando da passagem das ondas sonoras num determinado ponto há uma pressão adicional,  $p$ . Logo, a pressão sonora será a variação em relação ao valor de equilíbrio da pressão provocada pela propagação das ondas sonoras. A pressão sonora,  $p$ , num determinado ponto é dada por:

$$p = Patm + A \sin(2\pi f)t$$

em que  $Patm$  é pressão atmosférica ( $10^5$  Pa);  $f$  a frequência da onda sonora (Hz);  $A$  é a amplitude da onda sonora (m);  $t$  o tempo (s).

Ao contrário do que acontece com a intensidade, a potência não depende do ambiente nem da distância da fonte. Seu valor não varia já que a potência sonora se refere à energia emitida pela fonte. É a energia acústica total emitida por uma fonte por unidade de tempo, medida em watt ( $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ ).

Comparada com a pressão estática do ar, a variação da pressão sonora na gama audível é muito pequena, situando-se entre os  $20 \mu \text{ Pa}$  e os  $100 \text{ Pa}$ . O som mais fraco que o indivíduo médio consegue ouvir corresponde a  $20 \mu \text{ Pa}$  e por isso é considerado o limiar de audição. Uma pressão sonora de  $100 \text{ Pa}$  é de tal forma tão elevada que causa dor e por isso é considerado o limiar de dor.

A aplicação directa de escalas lineares em Pascal (Pa), conduz a números muito grandes e, portanto, nada práticos, de serem utilizados. Além disso, sabe-se que o ouvido humano responde de uma forma logarítmica e não linear aos estímulos sonoros. Recorre-se, por isso, à definição de nível.

## 2.6. NÍVEIS

Os valores das grandezas no domínio da acústica, nomeadamente a pressão, intensidade e potência sonoras, são expressos em termos dos seus níveis, considerados relativamente a valores de referência e não a unidades apropriadas às suas fórmulas dimensionais. A utilização de níveis permite reduzir a extensão da escala dos valores absolutos correspondentes.

O nível de uma grandeza física ( $L_G$ ) é definido como o logaritmo decimal da razão entre os valores medidos ( $G$ ) e o valor de referência dessa grandeza ( $G_0$ ) e exprime-se em décibel - dB (adoptado em memória do inventor norte-americano Alexander Graham Bell).

$$L_G = \log \frac{G}{G_0}$$

Em que  $L_G$  representa o nível da grandeza  $G$ ;  $G$  é o valor medido;  $G_0$  o valor de referência.

Na prática de protecção acústica a potência sonora expressa-se pelo Nível Sonoro e utiliza-se o decibel, dB, que corresponde à décima parte do Bel, ou seja: 1B = 10dB. A expressão anterior pode reescrever-se, em decibel, da seguinte forma:

$$L_G = 10 \log \frac{G}{G_0}$$

O valor de referência adoptado internacionalmente é de  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>, pois aproxima-se da intensidade mínima audível a 1000 Hz, correspondendo ao valor de 0 dB na escala de níveis sonoros. Deste modo a escala de variação de 1 bilião de W/m<sup>2</sup>, entre o limiar de audição e o limiar de dor é substituído por uma variação de apenas 120 dB.

Assim, o nível de pressão sonora é dado por:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$$

Em que  $p_0$  é a pressão de referência,  $p_0=2 \times 10^{-5}$  Pa.

O nível de intensidade sonora:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Em que  $I_0$  é a intensidade sonora de referência,  $I_0=10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>.

E finalmente, o nível de potência sonora:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

Em que  $W_0$  é a potência sonora de referência,  $W_0=10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>.

## 2.7 FREQUÊNCIA

A frequência de um som é o número de oscilações por segundo que o corpo em vibração executa. A unidade de frequência é o hertz, cujo símbolo é Hz. O ouvido humano normal é capaz de ouvir sons entre 20 e 20.000 Hz, desde que a intensidade seja suficiente para fazer vibrar o tímpano do ouvido. Contudo, algumas frequências abaixo dos 20 Hz (infra-sons) e acima dos 20000 Hz (ultra-sons) podem ser captadas pelo nosso corpo podendo provocar reacções no cérebro, a nível do subliminar.

A frequência de uma onda é a grandeza que determina a altura tonal com que percebemos o som. Em Acústica de Edifícios, sons de elevada frequência são chamados agudos (entre 1.410 e 20.000 Hz), de baixa frequência são chamados graves (entre 20 e 355 Hz) existindo ainda o grupo de frequências médias no intervalo entre estes.

Um som puro é um som com uma vibração sinusoidal uni-dimensional que é apenas composta por uma frequência. Por oposição, um som constituído por diversas frequências (situação mais comum) tem o nome de som complexo, e é portanto, resultado da soma de vários sons puros.

No estudo do ruído ocupacional, da acústica ambiental e da acústica de edifícios, é apenas necessário decompor o ruído em determinados intervalos de frequências. Esses intervalos designam-se por bandas de frequência e para efeitos da análise do ruído são utilizadas as bandas (filtros) de oitava e 1/3 de oitava.

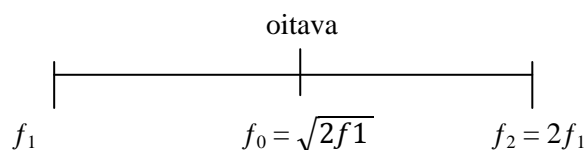
Uma oitava é o intervalo compreendido entre dois sons puros. As frequências estão entre si, duas a duas, na relação de 2/1. Uma oitava é uma banda em que a frequência limite superior,  $f_2$ , é o dobro da frequência limite inferior,  $f_1$ , ou seja,  $f_2 = 2 f_1$ . As bandas de frequência são caracterizadas pela sua frequência central,  $f_0$ .

Numa oitava a sua frequência central,  $f_0$ , é tal que:

$$\frac{f_0}{f_1} = \frac{f_2}{f_0} = f_0^2 \Rightarrow f_1 f_2 = 2 f_1^2 \Rightarrow f_0 = \sqrt{2 f_1}$$

A largura da banda de frequência,  $B$ , é aproximadamente igual a 70% da frequência central,  $f_0$ :

$$B = \Delta f = f_2 - f_1 = 2 f_1 - f_1 = f_1 \Rightarrow B = \frac{f_0}{\sqrt{2}} = 0,7 f_0$$



Nos casos em que é necessário fazer uma análise mais rigorosa do ruído no domínio da frequência, deve-se recorrer aos filtros de 1/3 de oitava. Cada banda de oitava contém 3 bandas de 1/3 de oitava. Numa banda de 1/3 de oitava, a frequência superior  $f_2$ , é tal que:

$$f_2 = \sqrt[3]{2 f_1} = 1,26 f_1$$

Um filtro de 1/3 de oitava tem uma largura de banda aproximadamente igual a 23% da sua frequência central:  $B = 0,23 f_0$ .

Em acústica de edifícios é costume distinguir três grandes bandas de frequência:

- Frequências graves → 20 - 360 Hz;
- Frequências médias → 360 - 1 400 Hz;
- Frequências agudas → 1400 - 20 000 Hz.

As frequências centrais das bandas de oitava e 1/3 de oitava, definidas na normalização internacional e relevantes para o estudo do ruído ocupacional, da acústica ambiental e da acústica de edifícios, são as representadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Frequências centrais das bandas de oitava e 1/3 de oitava (Hz)

	Frequências Graves		Frequências Médias				Frequências Agudas											
Oitava	125	250	500	1k	2k	4k												
1/3 Oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1250	1600	2k	2500	3150	4k	5k

Nas Figuras 2.4 e 2.5 são as representadas as características das bandas de oitava e de terço de oitava.

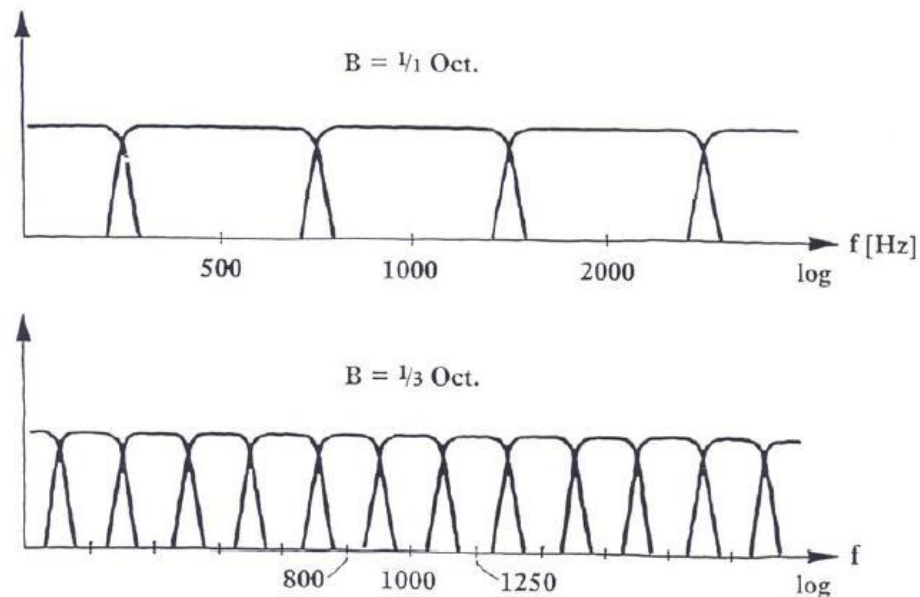


Figura 2.4 - Representação das frequências centrais das bandas de oitava [7]

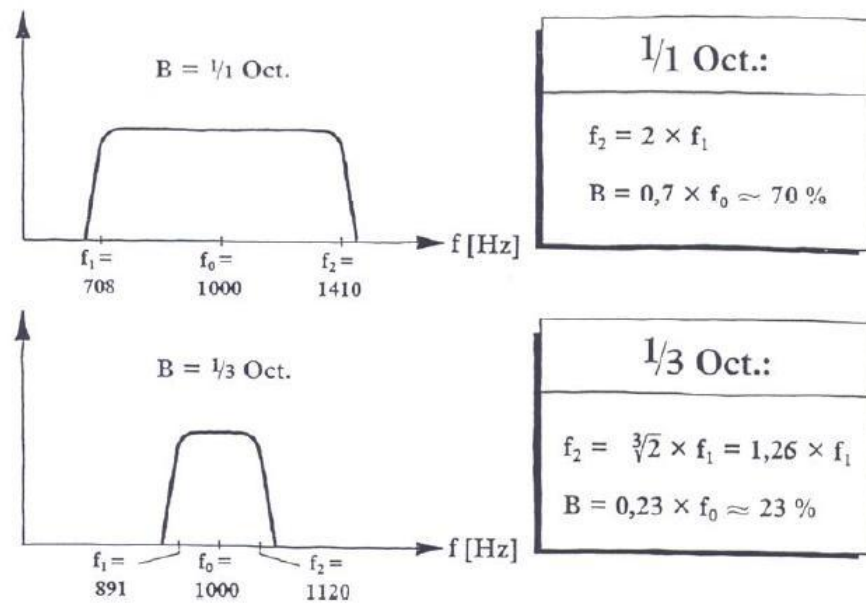


Figura 2.5 - Representação das frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava [7]

A gama audível está dividida em 10 oitavas e 30 1/3 de oitavas. As frequências centrais, assim como os limites inferior e superior, estão normalizados internacionalmente estando a gama no intervalo entre os 20 e os 20000Hz (Figura 2.6).

Bandas de oitava e 1/3 de oitava		
Frequência central Nominal (Hz)	Banda de 1/3 Oitava (Hz)	Banda de Oitava
1,25	1,12 – 1,41	
1,6	1,41 – 1,78	
2	1,78 – 2,24	1,41 – 2,82
2,5	2,24 – 2,82	
3,15	2,82 – 3,55	
4	3,55 – 4,47	2,82 – 5,56
5	4,47 – 5,62	
6,3	5,62 – 7,08	
8	7,08 – 8,91	5,62 – 11,2
10	8,91 – 11,2	
12,5	11,2 – 14,1	
16	14,1 – 17,8	11,2 – 22,4
20	17,8 – 22,4	
25	22,4 – 28,2	
31,5	28,2 – 35,5	22,4 – 44,7
40	35,5 – 44,7	
50	44,7 – 56,2	
63	56,2 – 70,8	44,7 – 89,1
80	70,8 – 89,1	
100	89,1 – 112	
125	112 – 141	89,1 – 178
160	141 – 178	
200	178 – 224	
250	224 – 282	178 – 355
315	282 – 355	
400	355 – 447	
500	447 – 562	355 – 708
630	562 – 708	
800	708 – 891	
1000	891 – 1120	708 – 1410
1250	1120 – 1410	
1600	1410 – 1780	
2000	1780 – 2240	1410 – 2820
2500	2240 – 2820	
3150	2820 – 3550	
4000	3550 – 4470	2820 – 5620
5000	4470 – 5620	
6300	5620 – 7080	
8000	7080 – 8910	5620 – 11200
10000	8910 – 11200	
12500	11200 – 14100	
16000	14100 – 17800	11200 – 22400

Figura 2.6 - Bandas de 1 oitava e de 1/3 de oitava [7]

Quando se faz a medição do nível sonoro de um ruído numa dada banda de frequência, filtra-se o ruído de modo a só deixar passar as frequências na banda considerada. O nível sonoro medido corresponde assim a toda a energia acústica contida nesta banda de frequência.

Esta energia pode ser traduzida em intensidade acústica ou no quadrado da pressão acústica:

$$\text{Níveis em dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{\rho^2}{\rho_0^2}$$

Uma banda de oitava é, por definição, a justaposição de três bandas de terços de oitava. Se medirmos um ruído numa banda de oitava, medimos então de uma só vez a soma das energias contidas nas três bandas de terços de oitava.

Suponhamos que os níveis sonoros de três bandas de terços de oitava sejam  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ .

$$L_1 = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{\rho_1^2}{\rho_0^2}$$

$$L_2 = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{\rho_2^2}{\rho_0^2}$$

$$L_3 = 10 \log_{10} \frac{I_3}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{\rho_3^2}{\rho_0^2}$$

O nível sonoro na banda de oitava composta por três terços de oitava é:

$$L = 10 \log_{10} \frac{l_1 + l_2 + l_3}{l_0} = 10 \log_{10} \frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \rho_3^2}{\rho_0^2}$$

Se se dispõe dos níveis  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$  é preciso calcular as relações  $l_1/l_0$ ,  $l_2/l_0$  e  $l_3/l_0$  correspondentes e fazer a soma dessas relações para calcular o nível  $L$ .

No espectrograma é apresentado o mesmo sinal analisado em banda fina, em 1/3 de oitava e em oitava. Pode observar-se que o nível medido com um filtro é igual à soma dos níveis dos componentes individuais nessa banda de frequência, isto é, a soma de três bandas consecutivas de 1/3 de oitava será igual ao valor da banda de oitava correspondente, tal como mostra a Figura 2.7.

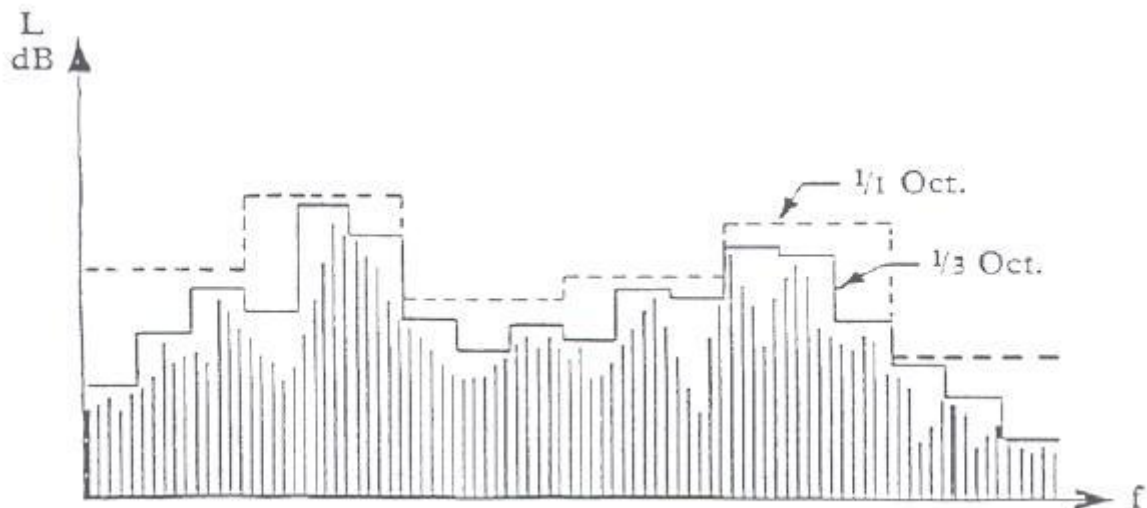


Figura 2.7 - Espectrograma com a representação em oitavas e em terços de oitava [7]

## 2.8. CURVAS DE PONDERAÇÃO PARA OUVIDO HUMANO

Aquando das medições do ruído, o microfone traduz fielmente as pressões e sempre com a mesma sensibilidade, qualquer que seja a frequência. O ouvido interpreta-as e dá-lhes importância maior ou menor, conforme as pressões sejam emitidas em frequências graves, médias ou agudas.

A resposta do ouvido em frequência tem uma variação não linear e por isso foram introduzidos nos sonómetros filtros de ponderação com o objectivo de correlacionar os valores medidos com a resposta do ouvido. Estes filtros têm a particularidade de atenuar o sinal sonoro de acordo com curvas de ponderação que seguem aproximadamente as curvas isofónicas. Nas normas internacionais estão definidas 4 curvas: A, B, C e D, apresentadas na Figura 2.8.

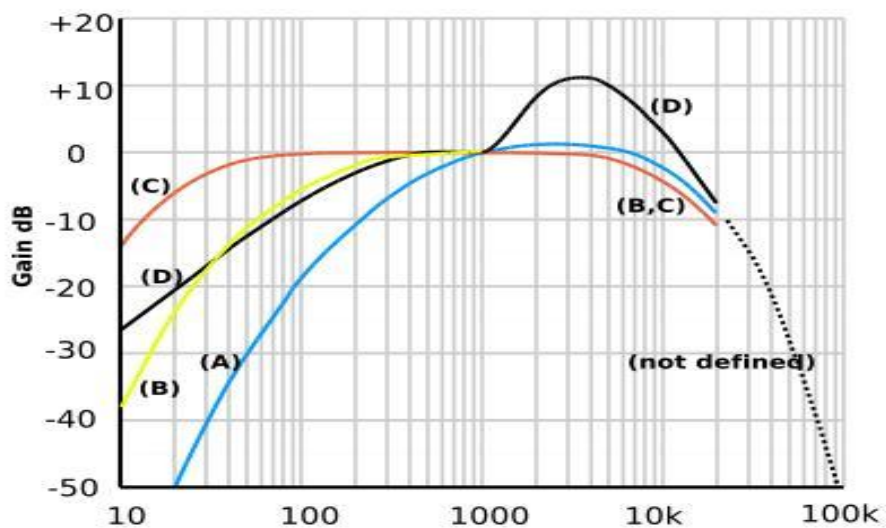


Figura 2.8 – Curvas de ponderação A, B, C e D [8]

A curva de ponderação mais utilizada é a curva A por ser aquela que melhor correlaciona os valores medidos com a incomodidade ou risco de trauma auditivo do sinal sonoro. A utilização dos filtros de ponderação é aconselhada em função dos níveis de ruído que são analisados, uma vez que a sensibilidade auditiva se altera, à medida que o som é mais intenso.

O filtro A é utilizado para sons abaixo de 55 dB, o filtro B para sons entre 55 e 85 dB e o filtro C para sons acima de 85 dB. A curva D dá especial ênfase à gama de frequências entre 1000 Hz e 10000 Hz. É normalmente utilizada em medições de ruído de tráfego aéreo.

Quadro 2.2 – Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência de oitava na gama do audível

Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Ponderação (dB)	-26	-15,5	-8,5	-3	0	+1	+1	-1	-7

O aparelho de medição (em geral um sonómetro) conta ainda com um circuito de resposta rápida, resposta lenta ou impulsos. O de resposta rápida é usado para ruídos com níveis mais constantes; o de resposta lenta, para grandes oscilações de níveis sonoros; e o de impulsos é aconselhado para ruídos de impacto.

Para um ruído típico, as diferentes curvas de ponderação conduzem a valores diferentes. Estes valores traduzem o nível sonoro global e são a forma mais simples de avaliar e comparar níveis de ruído. Para distinguir e identificar a curva de ponderação utilizada é habitual especificar os níveis sonoros em termos de dB(A), dB(B), dB(C) ou dB(D).

Quando se exprime o valor de um nível sonoro apenas em dB significa que não foi feita qualquer ponderação, isto é, este nível traduz o nível sonoro que realmente existe e não a forma como o ouvido humano o apercebe. Na caracterização acústica de fontes de ruído e em estudos de propagação trabalha-se sempre em dB.

Para determinar o nível em dB(A) de um ruído do qual se tem o espectro por bandas de frequência, é preciso corrigir o nível sonoro em cada banda de frequência e calcular a soma das energias correspondentes aos níveis corrigidos.

A Figura 2.9 mostra um espectro de ruído no domínio da frequência e os correspondentes níveis sonoros agrupados por bandas de 1/3 de oitava e de oitava. Mostra ainda que o valor único do nível sonoro,  $L_{\text{lin}}$  [dB], que caracteriza o ruído é superior ao valor do nível sonoro ponderado A,  $L_A$  [dB(A)].

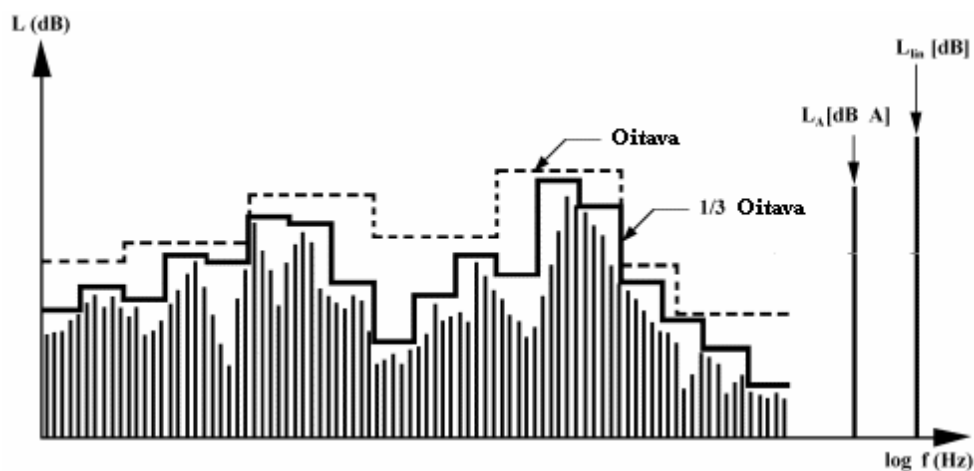


Figura 2.9 - Formas de representação de um ruído [7]

## 2.9. NÍVEL SONORO EQUIVALENTE PONDERADO A (LAEQ)

O nível sonoro contínuo equivalente ponderado, define-se como sendo o valor do nível de pressão sonora ponderado A de um ruído uniforme que, no intervalo de tempo T, tem o mesmo valor eficaz da pressão sonora do ruído considerado, cujo nível varia em função do tempo.

Este parâmetro é calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$LA_{eq,T} = 10 \log \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \right) \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} \right) dt$$

Onde:

$LA_{eq,T}$  é o nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, em decibel dB(A), determinado num intervalo de tempo T, com início em  $t_1$  e fim em  $t_2$ ;  $p_0$  é a pressão sonora de referência (20  $\mu$ Pa);  $p_A(t)$  é a pressão sonora instantânea, ponderada A, do sinal sonoro.

Poderão ainda ser utilizadas as seguintes fórmulas equivalentes:

$$LA_{eq,T} = 10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_i n_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$$

$$LA_{eq,T} = 10 \log_{10} \frac{1}{100} \sum_i f_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$$

Sendo:

$L_i$ , o nível sonoro, em dB(A) correspondente ao valor central da classe de ordem  $i$ ;  $f_i$  a fracção expressa em percentagem, do período de referência em que o valor do nível sonoro pertence à gama de valores da classe de ordem  $i$ ;  $n_i$  o número de medidas que pertencem à gama de valores da classe de ordem  $i$ ;  $N = \sum n_i$ .

## 2.10. RUÍDO DE FUNDO

Considera-se ruído “o conjunto de sons susceptíveis de adquirir para o homem um carácter afectivo desagradável e/ou intolerável, devido sobretudo aos incómodos, à fadiga, à perturbação e não à dor que pode produzir” [Definição CEE, 1977].

A percepção do ruído depende das pessoas, dos momentos e dos locais. O ruído de fundo é o ruído resultante. O termo ruído pode ser utilizado em vários contextos. É algo inoportuno, indesejável, que pode prejudicar a percepção de um sinal (eléctrico, por exemplo) ou gerar desconforto (no caso de um ruído sonoro). É um atributo qualitativo (e não quantitativo). Quantitativamente mede-se, no caso de um determinado som, o seu nível de pressão sonora.

O ruído de fundo, em Acústica de Edifícios é o ruído resultante das actividades envolventes. Pode ter origem de ruídos do exterior como, tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo, obras, indústrias em laboração, etc. Pode ainda ter origem no interior do edifício tal como o ruído de tubagens, de elevadores, circulação de pessoas ou proveniente dos aparelhos de aquecimento, ventilação e ar condicionado.

Na figura 2.10 apresentam-se vários exemplos de níveis de pressão sonora de actividades e locais comuns no dia-a-dia.

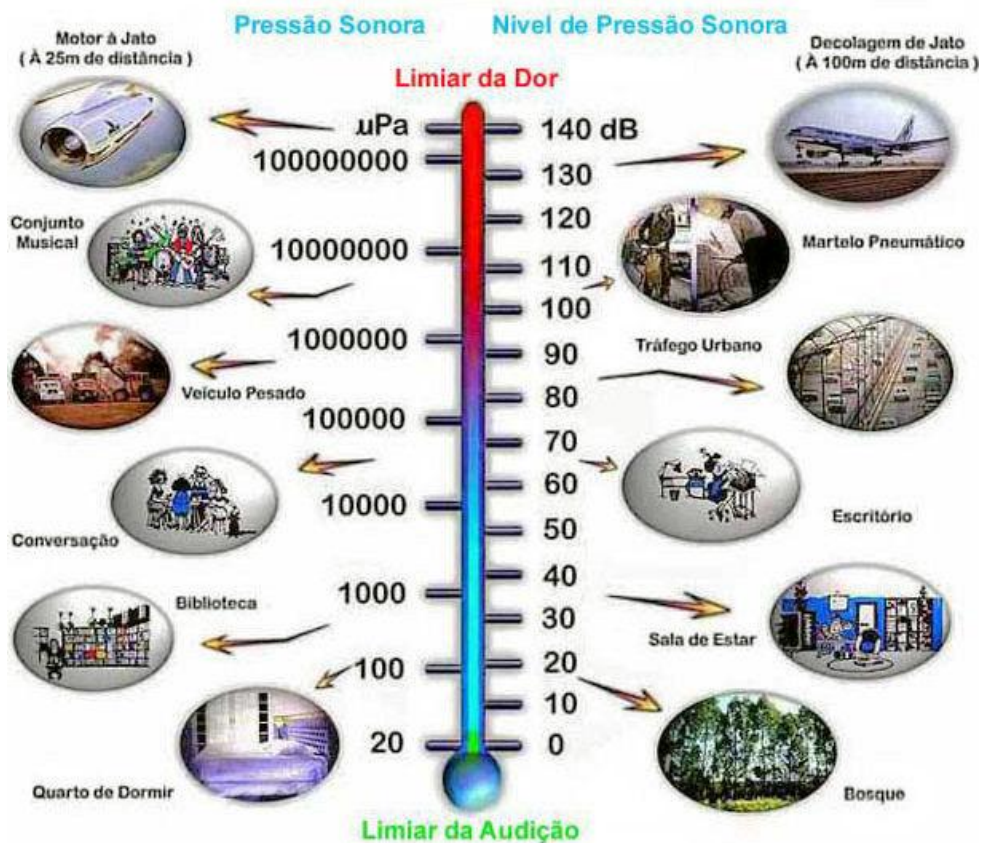


Figura 2.10 - Níveis de pressão sonora em situações do dia-a-dia [56]

## 2.11. CURVAS DE INCOMODIDADE

O método mais utilizado para avaliar a incomodidade causada pelo ruído de fundo em ambientes fechados é a aplicação das curvas NC (*Noise Criterion*) criadas por L. L. Beranek em 1957.

O método consiste num conjunto de critérios de curvas no intervalo de frequências dos 63 aos 8000 Hz, e num procedimento de avaliação de tangência. Depois de medido o nível de pressão sonora do ruído de fundo em vários pontos de uma sala é construído um espectro que será seguidamente comparado com as Curvas de Incomodidade (Figura 2.11).

A classificação NC pode ser obtida através da representação gráfica dos níveis de banda de oitava para um espectro de ruído dado - as curvas NC. O espectro de ruído é especificado como tendo a mesma classificação NC que a curva de menor valor que não é excedida por nenhum dos níveis de pressão sonora do espectro.

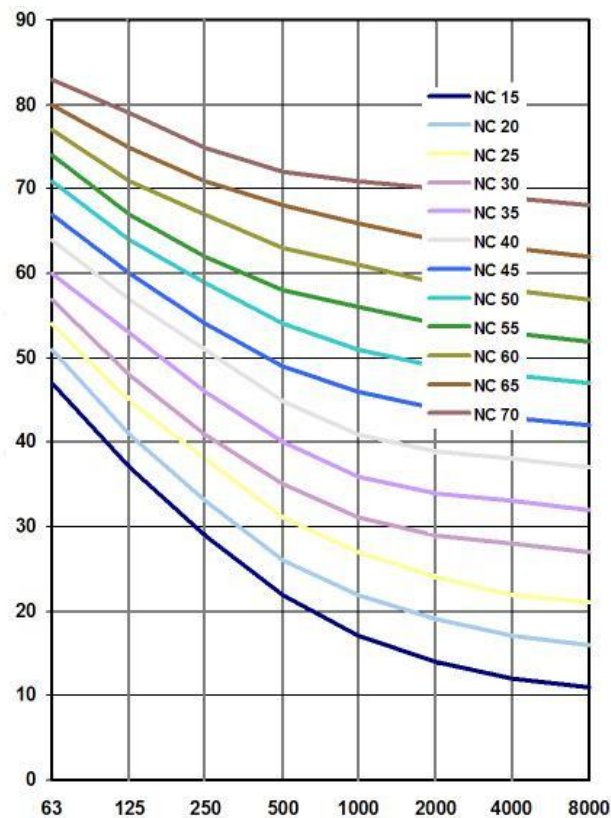


Figura 2.11 – Curvas NC [11]

As curvas NR (*Noise Rating*) foram desenvolvidas pela Organização Internacional de Normalização (ISO) para determinar o ambiente interior aceitável para preservação da audição, e inteligibilidade da palavra.

## 2.12. REVERBERAÇÃO

Quando o som atinge uma superfície rígida ele tende a reflectir-se de volta. Esse é o fenómeno básico da reflexão que tende a gerar os efeitos conhecidos do eco e da reverberação. O eco é geralmente uma repetição simples com diferença de tempo de mais de 0,05 segundos do som original e da sua reflexão. Reverberação é um conjunto de reflexões rápidas e complexas em superfícies de um ambiente fechado.

A ocorrência desses fenómenos dá-se pela percepção humana dos factos, por analogia, ao batermos com o braço numa parede, mesmo após o término do estímulo, sentimos dores ou incómodos múltiplos. Estes fenómenos sonoros ocorrem porque o ouvido humano só consegue distinguir sons que são produzidos num intervalo maior que 0,05 s.

Quando ocorre o fenómeno da reverberação, o ouvinte tem a sensação que o som ainda não se extinguiu. Se não houver superfícies reflectoras entre a fonte de som e os nossos ouvidos, apenas é

ouvido o som directo e não há reverberação. Se o som for gerado numa sala, há muita reflexão e cada uma destas viagens tem caminhos diferentes com distâncias diferentes a caminho do receptor. Sempre que o som choca com uma superfície, pode perder alguma energia se a superfície for absorvente.

O tempo de reverberação é definido pelo tempo que o som demora a decair 60 dB após a paragem da fonte. Uma vez que na prática é difícil avaliar o decaimento de 60 dB por suposição do ruído de fundo, é costume avaliar-se o decaimento de 30 dB e extrapolar para os 60 dB.

Na vida real, podemos experimentar tempos de reverberação de aproximadamente 0 s até tempos de reverberação de 10-12 s. Em câmaras especiais de reverberação, o tempo pode exceder os 20 s. As salas de controlo, normalmente, têm um tempo de reverberação à volta de 0,2 – 0,3 s.

Esta medida é quantificada pela fórmula de Sabine. Sabine é o “pai” da acústica moderna, ele descobriu que o tempo de reverberação é descrito pela relação entre o volume da sala e a quantidade de absorção na sala. Salas maiores possuem maior reverberação, enquanto que salas com grande absorção possuem tempos de reverberação menores.

$$T = \frac{0,16V}{\sum \alpha_i \cdot S_i}$$

Em que, T é o tempo de reverberação em segundos (s), V o Volume em metros cúbicos (m<sup>3</sup>),  $\alpha_i$  é o coeficiente de absorção de cada material i e  $S_i$  é a área de material i correspondente em metros quadrados (m<sup>2</sup>).

Um tempo de reverberação apropriado deve ser constante com a frequência, mas isso nem sempre é o caso, por causa do comportamento dos materiais da sala. As baixas frequências são as mais difíceis de controlar. É por isso que o tempo de reverberação contra a frequência na prática, pode parecer-se com a Figura 2.12.

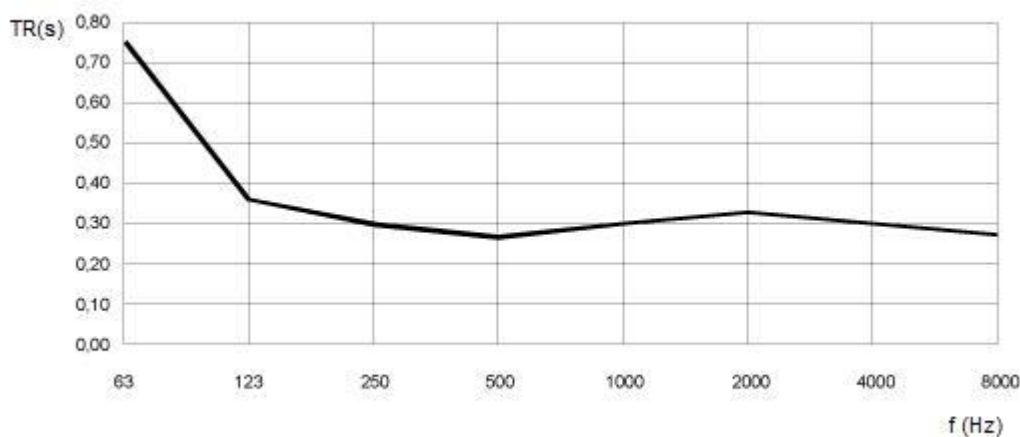


Figura 2.12 - Tempo de reverberação numa sala de controlo. [9]

### 2.13. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora trata do fenómeno que minimiza a reflexão das ondas sonoras num mesmo ambiente, ou seja, diminui o nível de reverberação num mesmo ambiente. Nestes casos deseja-se, além de diminuir os níveis de pressão sonora do recinto, melhorar o nível de inteligibilidade da palavra.

À razão entre a quantidade de energia que por unidade de tempo se dissipa na superfície de um material e a energia que durante esse intervalo de tempo incide nessa superfície, dá-se o nome de coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ). Por exemplo, um material que possui um  $\alpha$  de 0,1 absorve 10% da energia que sobre ele incide e reemite os restantes 90%.

Este coeficiente varia entre 0 e 1. Os materiais reflectores têm  $\alpha$  próximo de 0 (ex. mármore polido), os materiais absorventes têm um  $\alpha$  superior a 0,5.

Um material muito reflector (por exemplo, mármore polido) apresenta um coeficiente de absorção sonora quase nulo (cerca de 0,01). Um material absorvente (tipo lã de rocha) tem um  $\alpha$  de cerca de 0,60. Por vezes aparecem valores de  $\alpha$  ligeiramente superiores a 1,0 que se devem unicamente à metodologia da sua determinação experimental.

O valor de  $\alpha$  varia com a frequência do som incidente e existem tabelas com os valores de  $\alpha$  para muitos materiais em função da frequência do som incidente. Quanto mais reflectores forem os materiais que revestem um recinto, mais demorado será o decaimento do som no local, o que provoca um tempo de reverberação elevado e nefasto para a "inteligibilidade da palavra".

O método mais eficaz e útil para determinar o coeficiente de absorção sonora é o método da câmara reverberante que se rege pelas determinações da norma internacional ISO 354. A desvantagem deste método é a de que necessita de uma amostra de grandes dimensões (superior a 10 m<sup>2</sup>).

A câmara reverberante é um grande compartimento para uso experimental que dispõe de todas as superfícies envolventes completamente lisas e desprovidas de qualquer adereço ou mobiliário para criar uma muito elevada reverberação.

Os materiais ou sistemas cuja função é a absorção sonora não têm igual absorção para todas as bandas de frequências. São então agrupados nas seguintes três categorias:

- Porosos e fibrosos: são mais eficazes para as altas frequências (tecidos e alcatifas, massas porosas, materiais plásticos, aglomerados de cortiça, etc.);
- Ressonadores: são mais eficazes nas médias frequências (Ressonador de Helmholtz e ressonadores agrupados);
- Membranas: são mais eficazes nas baixas frequências (membranas ressonantes e painéis vibrantes).

### 2.14. ISOLAMENTO SONORO E CORRECÇÃO ACÚSTICA

A correcção acústica e o isolamento sonoro são dois conceitos quem importa distinguir. A correcção acústica refere-se a corrigir um compartimento para o som aí emitido, o isolamento sonoro refere-se ao tratamento para sons de/para locais contíguos.

O primeiro caso refere-se a situações como salas de aula, auditórios, salas de concerto, etc. onde o som aí produzido e aí audível com qualidade é a razão principal do estudo acústico. O segundo caso refere-

se a situações como por exemplo, discotecas onde o som aí produzido não pode ser audível (como ruído) nos vizinhos contíguos [42].

Para correcção acústica são aplicados os materiais com absorção sonora descritos em 2.13 consoante os problemas a tratar, variando o tipo de material, a sua quantidade e ainda a sua disposição.

Na teoria do isolamento sonoro torna-se necessário distinguir, de modo claro, dois casos. São eles o isolamento sonoro a:

- Ruídos de percussão, em que há solicitação mecânica directa da fonte de irradiação sobre os elementos de construção;
- Ruídos de condução aérea, em que a transmissão é feita preponderantemente por vibração do ar.

Ambos estes ruídos ainda se podem subdividir em duas formas de transmissão: via directa; via marginal.

O isolamento sonoro a ruídos aéreos de elementos construtivos depende de se considerar o comportamento isolado de um único elemento (parede, pavimento, etc.) ou de estar em causa a transmissão global entre dois espaços (emissor - receptor) nesta ultima hipótese não está apenas em questão o elemento estritamente separador desses dois espaços contíguos mas também todo o comportamento da sua envolvente directa.

O comportamento acústico de um elemento construtivo a ruídos de condução aérea depende fundamentalmente da sua massa e/ou da existência da duplicação física do material separador.

O elemento caracterizador do isolamento sonoro a ruídos aéreos de um elemento é o R (redução sonora, em dB) que muito genericamente se define como:

$$R = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{\tau} \right)$$

em que  $\tau$  é o coeficiente de transmissão que se define como sendo a razão da energia sonora transmitida face à incidente [42].

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

Os ruídos de percussão podem, em geral, incomodar todo um imóvel já que a energia comunicada directamente ao elemento construtivo se reparte muito rapidamente por ele e por todos os que lhe estão rigidamente ligados.

A origem dos ruídos de percussão pode ser dividida em dois tipos:

- Fontes estáticas (sistemas de bombagem, ventoinhas, ar condicionados, maquinas de lavar, etc.);
- Fontes de impacto (bater de portas, martelar, queda de objectos, passos, saltos, etc.).

No caso dos ruídos de percussão, actuar na massa do elemento construtivo não tem grande efeito na propagação do ruído. Em termos básicos gerais a acção eficaz é actuar sobre os revestimentos das superfícies (tornando-as resilientes) ou sobre a continuidade dos elementos, cortando-os para obter um isolamento suficiente por redução da sua capacidade de propagação do estímulo [42].

Há três áreas genéricas de intervenção para controlar a transmissão de ruídos de percussão:

Na fonte:

- Colocar a fonte de vibração afastada da área onde baixos níveis sonoros são desejados;
- Reduzir a potência da fonte de vibração;
- Providenciar isolamento à vibração entre a fonte e a estrutura;
- Aplicar camadas resilientes em superfícies sujeitas a impacto;
- Reduzir a velocidade das massas de impacto;
- Dar rigidez à estrutura nos pontos de excitação.

No caminho de transmissão:

- Isolar a fonte de vibração de áreas onde são desejados baixos níveis sonoros (por descontinuidades estruturais; completa separação estrutural; etc.)
- Separação dinâmica de componentes (por camada resiliente, ligação flexível, etc.)
- Aplicar tratamento para aumento de amortecimento na estrutura que transmite a vibração)

Perto do receptor:

- Cobrir as superfícies radiantes (com tecto suspenso resilientemente, etc.)
- Reduzir as vibrações de superfícies que radiam som por aplicação de capas amortecedoras.

## 2.15. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

A inteligibilidade da palavra é uma das principais características acústicas de um ambiente, pois reflecte o grau de entendimento das palavras no interior. Para locais onde a comunicação é primordial, como igrejas, ou salas de aula, a inteligibilidade acústica é um factor decisivo.

Esta depende sobretudo da percepção das consoantes, na medida em que, por exemplo, só se conseguem distinguir as seguintes cinco palavras se for possível identificar as respectivas consoantes: *cai, dai, pai, sai, vai*. Reparando na forma como são pronunciadas as cinco palavras anteriores, constata-se que se utiliza mais tempo e maior intensidade (em média mais 70 ms e mais 12 dB) nas vogais do que nas consoantes, sendo o espectro das vogais mais rico em graves e o espectro das consoantes mais rico em agudos, o que condiciona ainda mais a inteligibilidade da palavra pois os sons agudos são mais facilmente mascaráveis por absorção.

Nestas circunstâncias, para que haja boa inteligibilidade da palavra será necessário, primeiro que tudo, que o ruído de fundo seja muito reduzido para que não ocorra um mascaramento das consoantes. É ainda recomendável um nível sonoro de ruído de fundo menor ou igual a 30 dB (A). É fácil de perceber que a existência de um ruído de fundo reduzido não é condição suficiente para a existência de uma boa inteligibilidade da palavra, pois a própria sala pode produzir um mascaramento das consoantes através das diferentes reflexões nos elementos que a constituem.

Segundo o denominado Efeito de Precedência, todas as reflexões que chegam ao ouvido humano mais ou menos nos primeiros 50 ms, após a chegada do som directo, são apercebidas como um único som (o som directo) e contribuem para uma maior sensação de intensidade desse som e, por conseguinte, para uma melhor inteligibilidade da palavra. As reflexões que chegam mais ou menos depois dos 50 ms são apercebidas como outro som e contribuem, assim, para a possibilidade de mascaramento e, por conseguinte, para a perda de inteligibilidade da palavra. Deste modo, uma das formas objectivas de caracterização da inteligibilidade da palavra consiste na comparação da energia sonora, da resposta

impulsiva, correspondente aos primeiros milissegundos, com a energia sonora posterior a esses milissegundos.

Uma das formas objectivas de caracterização da inteligibilidade da palavra consiste no método analítico. A inteligibilidade do local é obtida através do modelo matemático que consiste em medir dois parâmetros acústicos do ambiente: o espectro do ruído de fundo do local e os tempos de reverberação para várias frequências da banda audível. Com estes valores é possível obter-se o STI (*Speech Transmission Index*), que é um número entre 0 e 1, proporcional à inteligibilidade da palavra para cada ponto avaliado do local.

Este método foi entretanto simplificado, tendo surgido o RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) - Índice de transmissão rápida da palavra, que utiliza uma escala que varia de 0 a 1, onde o “0” corresponde a uma inteligibilidade nula enquanto o valor “1” corresponde a uma inteligibilidade perfeita (na prática ambas inatingíveis). Na realidade este parâmetro é obtido com recurso a uma fonte que emite um sinal modulado e um receptor que analisa a distorção desse mesmo som.

Outro dos testes objectivos de medição da inteligibilidade da palavra é o AI (Índice de Articulação). O AI é obtido através da diferença entre o nível de conversação de referência (nc) e o ruído de fundo (rf) no local, pesada através da importância relativa de cada banda de frequências (p), obtém-se um somatório que dividido por 10000 resulta no valor de AI. O quadro 2.2 apresenta a percepção subjectiva para a inteligibilidade da palavra em função dos valores numéricos do AI.

Quadro 2.3 – Percepção subjectiva para a inteligibilidade da palavra em função dos valores numéricos do AI [42].

AI (Índice de Articulação)	Grau de Privacidade	Grau de Inteligibilidade
<0,05	Confidencial	Nula
[0,05 – 0,20[	Normal	Fraca
[0,20 – 0,30[	Marginal/pobre	Boa
≥0,30	Muito pobre ou nulo	Muito boa

O SIL (*Speech Interference Level*) define-se como a média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo em cada uma das bandas de oitava dos 500 Hz aos 2000 Hz:

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

O quadro 2.3 apresenta os valores de SIL (em dB) para o qual a comunicação da palavra é, no limite, possível (M: Masculino; F: Feminino).

Quadro 2.4 – SIL (dB) para o qual a comunicação da palavra é, no limite, possível (M: Masculino; F: Feminino) [42].

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



# 3

## ACÚSTICA DE IGREJAS

### 3.1 INTRODUÇÃO

Novas igrejas estão a ser construídas e igrejas de qualidade histórica e arquitectónica notável estão muitas vezes a sofrer remodelações. No entanto, a falta de um estudo acústico no processo de renovação ou de construção pode levar a problemas funcionais. Neste capítulo, são salientadas as características especiais deste tipo de espaço, que tem desempenhado um papel tão importante na história da arquitectura.

Esses problemas funcionais podem ser explicados, em alguns casos, por falta de consideração, pela parte dos arquitectos, da acústica como aspecto fundamental que merece um estudo detalhado. Noutros casos, a resultante acústica deficiente aparece como uma “surpresa” para os arquitectos que, nos seus planos, se limitaram a reabilitar a sala da igreja, um lugar que tinha sido, originalmente concebido para pregar a "palavra de Deus" e que poderia agora ter como função ouvir música.

Na realidade, se se entender a igreja como uma reunião ou assembleia para os fiéis, a audição da palavra falada, principalmente da pregação, terá sido uma prioridade nas primeiras comunidades cristãs (São Paulo refere: "A fé vem de ouvir a mensagem, e a mensagem é ouvida mediante a palavra de Cristo") [Romanos 10:17]. No entanto, de uma forma única e característica, e por causa da falta de uma arquitectura específica e especializada no intervalo de tempo que separa o Odeon grego do auditório dos dias modernos, a igreja, certamente se destaca entre os diferentes tipos de edifícios como o lugar que, por um tempo, testemunhou o nascimento e o desempenho de composições musicais [16].

### 3.2. A ACÚSTICA DE DIFERENTES TIPOS DE IGREJAS

#### 3.2.1. IGREJAS CRISTÃS E MEDIEVAIS

A igreja cristã primitiva reunia-se em casas particulares (*domus ecclesiae*) ou em locais já existentes de um tamanho adequado para reuniões. A maior parte das primeiras igrejas cristãs foram construídas

após o Édito de Milão no ano 313, quando esta religião, favorecida pelo Imperador Constantino, pôde ser proclamada abertamente e o seu número de devotos começou a crescer.

Como modelo para as suas igrejas, entendidas como assembleias ou locais para reunião de uma congregação de crentes, escolheram a basílica romana civil, que tinha um piso plano longitudinal, em forma de cruz. Este projecto, altamente simbólico, mostrou-se ideal para as aspirações de evangelização: o ensino religioso, a propagação da fé através da pregação, e a conversão de um grande número de pessoas. A separação entre a “igreja de Deus”, associada com o clero e a “igreja do povo”, associada com o leigo, pode ser vista em duas partes fundamentais da planta basilical: o presbitério<sup>1</sup> e a nave [16].

O sistema estrutural das basílicas romanas e posteriormente cristãs, era porticado, com telhados de madeira que transmitiam pequenas cargas e pressões. A única parte abobadada era a abside<sup>2</sup>. A proporção adequada e harmoniosa, os telhados de madeira relativamente baixos e a ausência de grandes secções de paredes reflectoras foram propícias à acústica interior, muito melhor nestas igrejas do que o que mais tarde se iria ver nas igrejas românicas medievais e góticas [16].

Às vezes, a nave principal tinha um tecto em caixão de madeira horizontal, que era adequado para ajudar a difundir o som do interior.

A transição dos primeiros cristãos para a arquitectura românica surgiu lentamente. Devido a conflitos civis e a perturbações no contexto medieval turbulento, as vigas de suporte da cobertura em madeira de muitas igrejas arderam, causando danos enormes. Isto levou os construtores românicos a projectarem um tecto mais durável e resistente ao fogo. Foi escolhida uma estrutura feita essencialmente de pedra, com um tecto abobadado [16] (Figura 3.1).

---

<sup>1</sup> Presbitério: É no presbitério que acontece a função litúrgica e é nesse local que se encontram as peças principais e os objectos litúrgicos. É o lugar onde costuma ficar aquele que preside a celebração. É lá também que ficam, a mesa da eucaristia e a mesa da Palavra [23].

<sup>2</sup> Abside: Parede semicircular ou poligonal por detrás do altar-mor e que fecha a nave central de uma igreja, dossel que encima o sacrário [24]. É a ala de um edifício (normalmente religioso) que se projecta para fora de forma semi-cilíndrica ou poliédrica e em que o remate superior é geralmente uma semi-cúpula (planta circular) ou abóbada (planta poligonal). Nas igrejas orientadas, este anexo é aberto para o interior (capela-mor) no seguimento do eixo da nave, situando-se na extremidade Este. Após o altar, na área do coro, este anexo pode ainda acoplar absides mais pequenas (capelas radiantes).



Figura 3.1 – Interior da Igreja de San Vicente de Cardona, Barcelona [17].

Esta decisão alterou grandemente as condições acústicas das igrejas cristãs. A substituição dos telhados de madeira das basílicas cristãs pelas duras e reflectivas abóbadas de pedra da igreja medieval, foi um grande passo para trás do ponto de vista da acústica.

De qualquer forma, em contraste com as igrejas cristãs, a inteligibilidade da palavra já não era de grande importância na igreja medieval. Os fiéis, na sua maior parte, não compreendiam o latim que era a língua litúrgica. A pregação tinha praticamente desaparecido, dando lugar a uma religiosidade mais natural baseada em mistério. As igrejas foram gradualmente descartadas do seu papel como um lugar de reunião e participação para os crentes tornando-se templos sagrados para a celebração de rituais solenes oficiados pelos seus ministros.

Por outro lado, a sonoridade dessas igrejas era muito apropriada para a interpretação do canto gregoriano. As notas prolongadas do canto devidas a elevados valores do tempo de reverberação, produziam uma plenitude de som e uma sensação de audição de harmónicos que não estavam presentes na melodia mas que foram criados graças à acústica do grande e reverberante espaço da igreja.

A evolução da escura igreja românica para a etérea catedral gótica trouxe condições acústicas ainda piores. O grande volume da igreja, a altura da nave principal, as grandes paredes interiores reflectivas e as altas abóbadas, causavam não só o excesso de reverberação, como ainda por vezes a produção de ecos.

As capelas laterais, introduzidas no período gótico e posteriormente desenvolvidas na Renascença, actuaram por vezes como ressoadores, contribuindo para a absorção e difusão. Além disso, estas capelas são frequentemente ornamentadas, o que contribui ainda mais para a absorção e difusão.

À parte dessas excepções, quase não havia mais absorção do som na catedral gótica, do que o originado pela congregação durante os serviços religiosos. Ainda não havia lugares sentados para a congregação durante este período. Os bancos foram introduzidas pelos protestantes por causa dos seus longos serviços religiosos e a Igreja Católica começou a usá-los mais tarde.

Perto do final da Idade Média, no século XII, um número de ordens mendicantes surgiu assentando na reforma e purificação em resposta às exigências de uma maior espiritualidade na igreja. Os franciscanos<sup>1</sup> e os dominicanos<sup>2</sup> foram duas das mais significativas dessas ordens.

Apesar das ordens mendicantes não terem um tipo específico de construção de igreja e os princípios que regiam a construção dos seus templos dependerem muito das tradições de construção do lugar, o seu espírito de reforma levou-os a conceber as suas igrejas com dois objectivos principais em mente, a liturgia e pregação. Os dominicanos estabeleceram um limite para o tamanho de suas igrejas, especialmente para a altura da sua nave. Para os franciscanos, a única parte da igreja que devia ser abobadada era a abside. As naves das igrejas geralmente tinham um tecto de madeira assente em arcos transversais, embora, em muitos casos, estes telhados tenham sido substituídos por abóbadas. Além disso, os franciscanos escolheram o modelo de nave única (Figura 3.2) em vez do modelo nave tripla. Esta planta de espaço aberto facilitou que a congregação pudesse ver e ouvir o pregador [16].

---

<sup>1</sup> A Ordem dos Frades Menores (em latim *Ordo Fratrum Minorum*, O. F. M.), também conhecida por Ordem dos Franciscanos ou Ordem Franciscana, é a ordem religiosa fundada por São Francisco de Assis. A sua regra esteve na base da Segunda Ordem Franciscana - a Ordem das Clarissas, fundada por Santa Clara de Assis e também a Ordem Franciscana Secular para leigos. Os franciscanos não são monges, mas sim religiosos: realizam voto de pobreza, castidade e obediência. Vivem em fraternidades, que se designam por conventos e não como abadias ou mosteiros. Os seus conventos são tradicionalmente dentro das cidades ou junto delas. Os princípios Franciscanos são a humildade, a simplicidade e a justiça [46].

<sup>2</sup> A Ordem dos Pregadores (em latim: *Ordo Prædicatorum*, O. P.), também conhecida por Ordem dos Dominicanos, é uma ordem religiosa católica que tem como objectivo a pregação da mensagem de Jesus Cristo e a conversão ao cristianismo. Foi fundada em Toulouse, França, no ano de 1216 por São Domingos de Gusmão, sacerdote castelhano, o qual era originário de Caleruega. Os dominicanos vivem em comunidade, que se designam por conventos que são tradicionalmente junto das cidades. As suas características são essencialmente urbanas: vida em comunidade, vida itinerante, vida de pobreza como exemplo e pregação. A ordem nasceu sob o signo da Verdade, isto é o estudo, a reflexão e a pregação da verdade revelada por Jesus Cristo e pela Igreja. Daí que não surpreenda que inúmeros membros da ordem se tenham tornado famosos teólogos, escritores e pregadores. A sua actividade de ensino e da busca e disputa intelectual, tiveram como fruto grandes pensadores, e deram inúmeros contributos para a história da Europa e do mundo. Actualmente a Ordem dos Pregadores tem mais de 100 mil membros em todo o mundo, a maior parte leigos, isto é cristãos comprometidos com a missão da ordem (pregação), mas que vivem inseridos nas suas famílias, trabalho e comunidades, desenvolvendo projectos apostólicos e formas laicais de pregação [47].

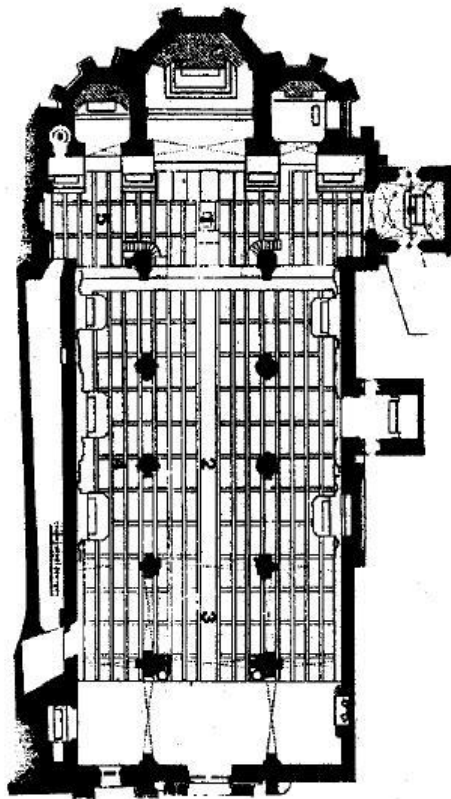


Figura 3.2 – Planta da Igreja de S. Francisco, Porto [14]

Essas ordens, sofreram um crescimento tão rápido devido à pregação discursiva ser tão simples e popular. No caso dos franciscanos, estes utilizavam linguagem comum para expor o Evangelho, o que atraía as massas urbanas. S. Francisco de Assis era leigo e não sabia o latim e nem situar passagens bíblicas correctamente, por isso ele era auxiliado por vários companheiros na hora de fundamentar suas regras [24].

### 3.2.2 IGREJAS RENASCENTISTAS E TRIDENTINAS

Toscana foi o centro artístico do Quattrocento e Alberti<sup>1</sup> e Brunelleschi<sup>2</sup> foram os seus dois grandes arquitectos. Eles desenvolveram um tipo de igreja com um plano central e outro tipo de igreja com uma planta longitudinal. Estes dois tipos serviram como modelos para o renascimento da arquitectura religiosa [16].

As naves das igrejas tinham tectos em caixão em madeira, as capelas laterais eram abobadadas, e no cruzamento tinham uma cúpula (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Interior da igreja de S. Lourenço, Florença [16].

---

<sup>1</sup> Leon Battista Alberti (1404 - 1472) foi um arquitecto e teórico de arte: um humanista italiano, ao estilo do ideal renascentista e filósofo da arquitectura e do urbanismo, pintor, músico e escultor. Filho ilegítimo de um florentino exilado em Génova, pertencente a uma família de mercadores. Estudou Direito na Universidade de Bolonha. Sua carreira jurídica foi abreviada em consequência de uma doença que lhe provocou a perda parcial da memória. Os interesses de Alberti viraram-se, então, para a ciência e para a arte. Leitor atento de Vitruvius, escreveu seu célebre tratado “*De re aedificatoria*” (impresso depois de sua morte) tomando como base de referência a arte da Antiguidade. Baseava na música dos números a harmonia das proporções e concebia o edifício como um todo, solidário em cada um de seus elementos. Deve-se-lhe a frontaria de Santa Maria Novella e o Palácio Rucellai, em Florença; San Sebastiano e Sant’Andrea, em Mântua; e o Templo Malatesta, de Rimini: a Igreja de São Francisco, à qual deu por fachada um arco de triunfo. Uma célebre frase sua foi *Uma obra está completa quando nada pode ser acrescentado, retirado ou alterado, a não ser para pior*. Sabe-se que de 1432 a 1434 viveu em Roma, e mais tarde em Florença, Bolonha, Mântua e Ferrara onde trabalhou também como arquitecto. A partir de 1443 ficou mais tempo em Roma, onde se concentrou no estudo do legado clássico da cidade, cujo resultado surgiu em seu livro “*Descriptio urbis Roma*” (Descrição da cidade de Roma). Tornou-se assistente do papa Nicolau V, aconselhando-o em numerosos projectos, como o desenho da reforma da igreja de Santo Estêvão Redondo e nos novos planos do Vaticano. Em Roma, em 1452, completou seu principal trabalho teórico, “*De re aedificatoria libri decem*” ou Dez Livros sobre Arquitectura, o primeiro grande tratado moderno de arquitectura [48].

<sup>2</sup> Filippo Brunelleschi (Florença, 1377 — Florença, 1446) foi um arquitecto renascentista. Começou a vida como ourives e foi, posteriormente, um arquitecto, o pioneiro desta arte na Renascença. A sua obra mais conhecida é a cúpula da catedral (Duomo em italiano) Santa Maria del Fiore, em Florença. Construída em 1434, foi a primeira cúpula de grandes dimensões, erguida na Itália, desde a Antiguidade sobre uma enorme base octogonal. Brunelleschi também projectou o Hospital dos Inocentes, que era caracterizado pela sua proporção e pela repetição de colunas, as quais constituíam o elemento de sustento e a sua planta de cruz latina. Esta foi considerada a primeira manifestação de uma nova arquitectura, clara e organizada de uma forma racional. Outra grande obra deste artista é o Palácio Pitti, sendo este o protótipo do estilo palaciano renascentista. As igrejas de São Lourenço e Santo Espírito também são obras de Brunelleschi, tal como a Capela Pazzi, que é caracterizada pela sua estrutura geométrica e, é de salientar ainda que só os elementos arquitectónicos participavam, ou seja, todos os elementos supérfluos foram dispensados: nem retábulos, nem imagens de santos (excepto uns medalhões de Donatello) [49].

Do ponto de vista da acústica, o triunfo da horizontalidade sobre a crescente verticalidade do gótico, as proporções mais harmoniosas, o tecto de madeira na nave principal e a ausência de grandes superfícies de parede reflectoras só poderia ter um efeito benéfico [16].

A mudança substancial no consenso sobre a acústica de igrejas ocorreu na segunda metade do século XVI e foi influenciada por decisões do Concílio de Trento<sup>1</sup> e pela importância que o Conselho fixou da pregação como instrumento da Contra-Reforma<sup>2</sup>.

Essa atitude já tinha precedentes na arquitectura promovida pelas ordens mendicantes, começando no século XIII e na arquitectura de certos movimentos de reforma dentro da Igreja durante a primeira metade do século XVI. Estes movimentos de reforma, defendiam uma arquitectura para toda a humanidade em que a simplicidade, o senso comum e a razão que predominam em vez da arquitectura de tribunal (imperial) promovida pelos tratados de renascentistas (Figura 3.4) [16].

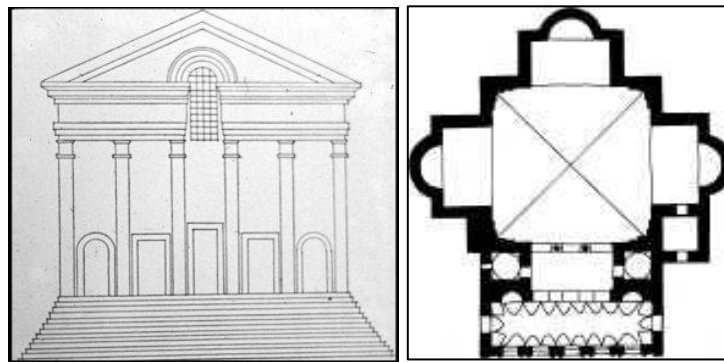


Figura 3.4 – Alçado e planta da igreja de São Sebastião, Mantua, Itália [18] [19]

<sup>1</sup> O Concílio de Trento, realizado de 1545 a 1563, foi o 19º concílio ecuménico. É considerado um dos três concílios fundamentais na Igreja Católica. Foi convocado pelo Papa Paulo III para assegurar a unidade da fé (sagrada escritura histórica) e a disciplina eclesiástica, no contexto da Reforma da Igreja Católica e a reacção à divisão então vivida na Europa devido à Reforma Protestante, razão pela qual é denominado como Concílio da Contra-Reforma. Foi o mais longo concílio da história da Igreja. Emitiu numerosos decretos disciplinares e especificou claramente as doutrinas católicas quanto à salvação, os sacramentos e o cânone bíblico, em oposição ao protestantismo. Unificou o ritual da missa de rito romano, abolindo as variações locais, instituindo a chamada "Missa Tridentina" (referência à cidade de Trento, onde o concílio transcorreu). Regulou as obrigações dos bispos. Confirmou a presença de Cristo na Eucaristia. Foram criados seminários como centros de formação sacerdotal e reconheceu-se a superioridade do papa sobre a assembleia conciliar. Foi instituído o índice de livros proibidos (o "Index Librorum Prohibitorum") e reorganizada Inquisição [50].

<sup>2</sup> A Contrarreforma, também denominada Reforma Católica é o nome dado ao movimento criado no seio da Igreja Católica em resposta à Reforma Protestante iniciada com Lutero, a partir de 1517. Em 1543, a igreja Católica Romana convocou o Concílio de Trento estabelecendo entre outras medidas, a retomada do Tribunal do Santo Ofício (inquisição), a criação do "Index Librorum Prohibitorum", com uma relação de livros proibidos pela igreja e o incentivo à catequese dos povos do Novo Mundo, com a criação de novas ordens religiosas dedicadas a essa empreitada, incluindo aí a criação da Companhia de Jesus. Outras medidas incluíram a reafirmação da autoridade papal, a manutenção do celibato, a criação do catecismo e seminários, a proibição das indulgências [51].

A inteligibilidade da palavra e até mesmo da música foi fundamental para a Contra-Reforma católica, e foi defendida pelo Conselho de Trento. Existem provas documentais de que durante este período de tempo houve preocupação com a acústica na construção das igrejas de algumas ordens religiosas, especialmente os dos jesuítas e franciscanos; *Formula Instituti* [26], *Constituições da Companhia de Jesus* [27], *Regulae Concionatorum* [28], *Canones Congregationum Generalium Societatis Iesu* [29], *Compendium Privilegiorum et Gratiarum Societatis Iesu* [30] e *Tratado Breve del modo de predicar el Santo Evangelio* – San Francisco de Borja [31]. Isso explica a preferência pela igreja de nave única, com um telhado de madeira, que havia já sido utilizada com sucesso por algumas ordens mendicantes

### 3.2.3 IGREJAS BARROCAS E BARROCO TARDIO

A partir da segunda metade do século XVI, quando os ideais reformistas de algumas ordens religiosas, defendendo uma arquitetura modesta e simples, prevaleceram, houve uma transformação clara em relação ao que poderia ser considerado a personificação triunfante da Contra-Reforma católica. A igreja barroca foi o símbolo desse espírito triunfante [16].

Do ponto de vista acústico, as igrejas barrocas geralmente tinham uma melhor acústica do que seus antecessores clássicos, principalmente por causa da sua ornamentação. Este efeito pode ser observado principalmente com sons agudos. Molduras, pilastras, entablamentos, cornijas, colunas e capitéis adornados com óvulos, grinaldas e contas, ajudam à difusão do som. O mesmo ocorre com estuques esculpidos, apliques de madeira, talha dourada, altares, órgãos, as portas interiores e outros móveis. Por outro lado, a abundância de capelas laterais, neste tipo de plano, difunde sons mais graves [16].

---

<sup>1</sup> Johannes Kepler (Weil der Stadt, perto de Estugarda, 27 de Dezembro de 1571 - Regensburgo, 15 de Novembro de 1630) foi um astrónomo. Formulou as três leis fundamentais da mecânica celeste, conhecidas como leis de Kepler. Dedicou-se também ao estudo da óptica. Naquela época a astronomia e astrologia não eram distintas, pelo contrário, um astrónomo era necessariamente um astrólogo, e aconselhar reis e imperadores em questões astrológicas fazia parte das atribuições de qualquer astrónomo. Não obra de Kepler é feita a transição da superstição à ciência. Kepler conseguiu também determinar a órbita de Marte, tentando representá-la com uma oval, e rapidamente descobriu que uma elipse ajustava muito bem os dados. A posição do Sol coincidia com um dos focos da elipse. Ficou assim explicada também a trajetória quase circular da Terra, com o Sol afastado do centro [52].

<sup>2</sup> Athanasius Kircher foi um jesuíta, matemático, físico, alquimista e inventor alemão nascido em Geisa, uma cidade pequena no banco do norte da Rânia Superior, Buchônia, famoso por sua versatilidade de conhecimentos e particularmente sua habilidade para o conhecimento das ciências naturais. Estudou ciências humanas na Faculdade Jesuítica, em Fulda, e em 1618 entrou para a Sociedade de Jesus, em Paderborn. Ao término do noviciado mudou-se para Colónia para estudar Filosofia, em plena Guerra dos 30 Anos. O jovem e talentoso estudante dedicou-se especialmente às ciências naturais e aos idiomas clássicos, especialidade na qual ele logo passou a ensinar nas filiais das faculdades Jesuíticas, em Coblentz e Heiligenstadt. Em Mainz, onde ele começou os estudos teológicos em 1625, atraiu a atenção por sua habilidade como um experimentalista. Ordenado padre em 1628, antes mesmo de terminar seu último ano probatório, em Speyer, foi convidado para assumir a cadeira de Ética e Matemática na Universidade de Würzburg, enquanto ao mesmo tempo já ensinava sírio e hebreu. Porém, por causa da guerra, foi obrigado a ir primeiro para Lyon, na França (1631), e depois para Avignon. Viveu o resto de sua vida em Roma, cidade onde morreu, onde papas, imperadores, príncipes e prelados respeitavam suas investigações e, essencialmente, suas opiniões [53].

Para muitos, a planta oval é o exemplo mais claro do barroco. Esta forma tinha já precedentes na segunda metade do século XVI e início do século XVII como uma tentativa de conjugar as aspirações clássicas das igrejas com uma planta central com as necessidades litúrgicas estabelecidas no Concílio de Trento, que exigiu uma planta longitudinal [16].

Mesmo os jesuítas tinham proposto plantas ovais para algumas igrejas, entre outras razões, por causa de considerações acústicas. O oval tornou-se o formato preferido para os teatros de ópera, porque seu efeito de focalização se mostrou muito útil [16].

Foi no início do século XVII, mais especificamente em 1605, que Kepler<sup>1</sup> definiu a elipse como agora a compreendemos. Enunciou as três leis que têm o seu nome e que regem o movimento dos planetas no seu estudo no *Astronomia Nova* em 1609 [32]. Imediatamente, uma série de documentos e estudos sobre os problemas de reflexão de luz e som foram escritos. Um dos mais marcantes foi *Phonurgia Nova*, publicado em 1673 por um jesuíta chamado Kircher<sup>2</sup>, que deu uma única representação gráfica mostrando que qualquer raio de som, com a sua origem no foco da elipse (neste caso, uma abóbada elipsoidal), depois de reflectido numa superfície, passa pelo outro foco (Figura 3.5) [33].

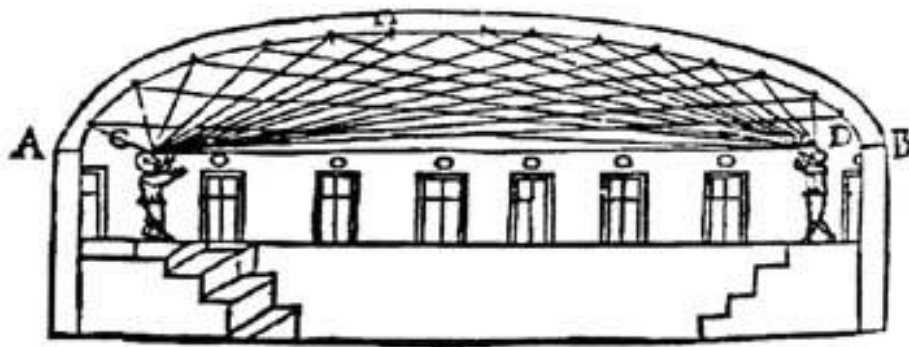


Figura 3.5 – Propriedade bifocal da elipse [20]

No entanto, a oval não se mostrou ser uma forma apropriada para grandes igrejas, nem permitia muita variação. Só aquando do aparecimento dos arquitectos barrocos, Borromini (1599-1667) e Guarini (1624-1683), é que novos modos de expressão foram encontrados. O dinamismo dos espaços arquitectónicos que eles projectaram levou à utilização de formas côncavas e convexas, que só poderia ter efeitos benéficos para as condições acústicas das igrejas (Figura 3.6) [34] [35].

Ainda hoje, essas igrejas são consideradas como o espaço ideal a partir do ponto de vista óptico e acústico para a execução de música barroca (Figura 3.7).



Figura 3.6 – Cúpula da igreja de Santo Ivo em Roma [21]



Figura 3.7 – Interior da igreja barroca da Venerável Ordem Terceira de São Francisco da Penitência, Rio de Janeiro [22]

Uma das operações barrocas com a maior repercussão sobre a acústica da igreja foi a ornamentação com tapeçarias e cortinas grandes, especialmente para as principais celebrações civis ou religiosas de ocasiões alegres ou tristes. Beatificações, canonizações, exéquias e funerais, a proclamação de dogmas e procissões levaram a uma rica arquitectura efémera, da qual muitos testemunhos escritos e iconográficos permanecem [16].

Esta será uma constante nos seguintes anos: as efémeras modificações das propriedades de absorção dos cortinados para adaptá-los às interpretações musicais e corais. A abundância de tapetes e tapeçarias, veludos e damascos, juntamente com a profusa decoração em geral (como é exemplo a

talha dourada) e do grande número de pessoas vestidas com roupas pesadas e fluidas só poderia aumentar a absorção do som nessas igrejas, amortecimento dos ecos e reverberações altas frequências [16].

### 3.3 OBJECTIVOS ACÚSTICOS DE UMA IGREJA

O julgamento da qualidade acústica de uma sala tem comumente tomado o paradigma da arquitectura moderna de Sullivan, para o qual “a forma deve sempre seguir a função” [54]. A qualidade acústica de uma sala é sempre avaliada em função do seu uso, da sua finalidade. Desta forma desenvolveram-se soluções exclusivas para as diferentes exigências da palavra e da música e é comum a construção de salas específicas para filarmónicas, orquestras de câmara, ópera, teatro e conferências [36].

A caracterização acústica de igrejas envolve algumas dificuldades em particular. Igrejas são acusticamente espaços complexos. Esta complexidade é, por um lado, produto da multiplicidade de geometrias presentes nesses edifícios e de “espaços dentro de espaços”, como capelas, naves laterais e nichos, nos quais, o comportamento das reflexões torna muitas vezes um determinado atributo acústico muito heterogêneo em função da localização do receptor dentro da sala [36].

Por outro lado, nas igrejas, as exigências litúrgicas são múltiplas e dificultam as soluções e o diagnóstico acústico, uma vez que devem atender satisfatoriamente às actividades da palavra e da música (música de órgão e os cantos da congregação) [36].

Cirillo e Martellotta [37] adoptam uma simplificação acústica do serviço religioso para o diagnóstico das salas. Consideram apenas duas exigências a serem contempladas, tomando em conjunto a música e o canto da congregação como uma única demanda e a palavra como outra.

Os estudos sobre condições óptimas em igrejas são mais raros que os estudos em óperas e salas de concerto, o que torna a comparação de valores obtidos em medição com valores óptimos recomendados um problema ainda em aberto. Valores de referência para os descritores objectivos para acústica de salas serão apresentados mais adiante.

Tratando-se de grandes igrejas, usualmente construídas com materiais de baixa absorção sonora, a literatura mostra que a aplicação das equações tradicionais para obtenção de estimativas do tempo de reverberação geralmente sobrestima os valores preditos [42].

Num dos primeiros estudos publicados sobre acústica em igrejas, Raes e Sacerdote [38], observaram em duas das mais famosas igrejas de Roma (Basílica de S. João de Latrão e Basílica de São Paulo Extramuros (ou Basílica de São Paulo Fora de Portas) que, embora semelhantes em tamanho e nos materiais construtivos e por não apresentarem bancos nem quaisquer outros materiais absorventes, as diferenças geométricas do espaço interno interferiram bastante nos tempos de reverberação (TR).

R. Shankland e H. Shankland [55] fizeram medições e estudos acústicos na Basílica de S. Pedro, em Roma e compararam o seu comportamento acústico com o das Basílicas de S. João de Latrão, S. Paulo

Fora de Portas e Sta. Maria Maior chegando a resultados semelhantes quanto aos baixos tempos de reverberação. Observaram que a redução da reverberação, além de ser em grande medida influenciada pela difusão sonora, promovida pelos detalhes arquitectónicos e ornamentos, também depende do grau de conexão dos volumes de ar dos espaços acoplados (capelas, naves laterais e nichos). Pouco acoplamento, isto é, pequenas aberturas de comunicação entre os volumes tendem a aumentar a difusão no interior do espaço e reduzir o TR no volume principal.

Uma ampla difusão sonora não apenas previne ecos, mas também, aumenta o número de múltiplas reflexões do som nas superfícies do interior dos espaços acoplados promovendo uma maior degradação da energia em regiões que possuem baixa absorção. Os espaços acoplados possuem características semelhantes a janelas, têm um determinado coeficiente de absorção que depende das suas dimensões [36].

Os espaços nas igrejas foram divididos em três tipos: área do altar principal, capelas e naves laterais. Existem duas razões predominantes para esta divisão de tipos. A primeira razão é a posição relativa entre a fonte sonora e o espaço acoplado, isto é, em relação a direção com a qual o som entra no espaço acoplado. A segunda é o volume do espaço acoplado relativo ao volume da sala principal. Observou-se que estas alcovas se comportam como espaços acoplados se a relação comprimento da alcova/largura da abertura superior a 0,6 ou se a largura da nave lateral/altura da abertura for superior a 0,4 [39].

Quanto à reverberação, a tipologia arquitectónica de grandes igrejas tende a favorecer os usos para palavra e música quando o volume de ar é dividido em volumes menores (volumes dos espaços acoplados) e o edifício possui grande ornamentação, capelas e abóbadas.

Em contraste à boa qualidade acústica encontrada nos estudos anteriores, Cirillo e Martellotta em 2003 [40] observam resultados para tempo de reverberação e inteligibilidade (RASTI) menos satisfatórios para um grupo de nove igrejas românicas da Apúlia (região da Itália meridional, cuja capital é Bari).

As igrejas românicas da Apúlia têm o mesmo estilo arquitectónico, mas apresentam características individuais diferentes e volumes variando de 1500 a 32000 m<sup>3</sup>. As igrejas apresentam as seguintes características comuns: planta de basílica com nave principal e naves laterais; forro em madeira sustentado por treliças; piso de mármore; bancos de madeira; paredes de alvenaria rebocadas e pintadas e colunas delimitando a nave central.

Na investigação, observaram um aumento do Tempo de Reverberação nas igrejas com nave coberta em abóbada de aresta em relação àquelas com tecto plano de madeira pintada. Nestas, os Tempos de Reverberação são menores, particularmente nas médias e baixas frequências, quando comparadas igrejas de mesmo volume.

Como consequência dos longos tempos de reverberação, a maioria das igrejas investigada teve uma inteligibilidade da fala má. A análise dos resultados das posições individuais mostrou que o RASTI estava relacionado com a distância relativa entre a fonte e o receptor. Este comportamento foi relacionado à atenuação do som directo e das primeiras reflexões com o aumento da distância.

Ainda segundo os mesmos autores [41], em estudo de um grupo maior de igrejas de diferentes estilos (dos princípios do cristianismo até o período moderno), tipos arquitectónicos (basílica, central, cruciforme, etc.) e tamanho (de 5.500 a 160.000 m<sup>3</sup>), a análise das medições, com a igreja vazia, demonstrou que o som nas igrejas se propaga segundo caminhos complexos.

Na maioria dos casos, as primeiras reflexões atingem os pontos mais distantes da fonte com pouca energia. O nível sonoro relativo decresce em função da distância como acontece nas salas de concerto e em outros espaços geometricamente proporcionais, mas a razão do decaimento é significativamente mais acentuada em igrejas.

Pode-se dizer que diferentes elementos arquitectónicos (como colunas, capelas, abóbadas, tectos etc.) afectam as primeiras reflexões, de forma que a sua intensidade é reduzida, tornando o decaimento sonoro exponencial significativamente atrasado após a incidência do som directo. Capelas laterais profundas parecem reflectir o som de maneira complexa, enquanto naves laterais e paredes decoradas reduzem as reflexões laterais, fazendo-as mais fracas e difusas. Os forros suspensos por treliças demonstram comportamento similar, enquanto abóbadas, especialmente as de berço produzem fortes reflexões [41].

É muito difícil conjugar uma boa percepção da palavra e da música em simultâneo, uma vez que a palavra requer tempos de reverberação baixos, entre os 0,8 e os 1,0 s e a música requer um acréscimo no tempo de reverberação [42]. Dentro dos diversos estilos e períodos musicais, há diferenças assinaláveis nos valores considerados ideais para o tempo de reverberação, desde os valores mais baixos para a ópera (1,6 s) até aos mais elevados para a música sinfónica romântica e a música para órgão (de 2,0 a 3,4 s) [42]. A acústica de uma igreja deve proporcionar um ambiente musical tão bom quanto possível desde que não interfira com a inteligibilidade da palavra.

### **3.4 FALHAS ACÚSTICAS FREQUENTES EM IGREJAS**

É muito diferente construir uma igreja nova de raiz com boas condições acústicas ou tratar acusticamente uma igreja já construída.

Uma igreja que vai ser construída de raiz deve respeitar os objectivos acústicos descritos no subcapítulo anterior. Tratar acusticamente uma igreja construída é um desafio maior que nem sempre leva a resultados satisfatórios.

As igrejas antigas, na sua maioria, proporcionam um tempo de reverberação elevado o que constitui o maior problema em termos de inteligibilidade da palavra. Esta característica típica das igrejas antigas, principalmente das de grande volume, deve-se à arquitectura destas. Normalmente são espaços amplos com tectos muito altos, formas irregulares e de grande volume, logo têm tempos de reverberação elevados e campos sonoros irregulares com reflexões irregulares.

Um tempo de reverberação, associado à irregularidade do campo sonoro e ao ruído de fundo, faz com que nalguns pontos da igreja, a mensagem a transmitir pelo orador seja imperceptível e por vezes até inaudível.

Outro problema frequente em igrejas é o da inadequação ou incorrecta aplicação dos sistemas de reforço electroacústicos. Na escolha de um sistema destes e no seu posicionamento deve-se ter em atenção as características acústicas interiores e a própria geometria do espaço de modo a não serem criadas reflexões artificiais a somar às naturais, já excessivas.

# 4

## IGREJAS PAROQUIAIS DE SANTO OVÍDIO

### 4.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Embora existam várias capelas dedicadas a Santo Ovídio em Portugal, a paróquia de Santo Ovídio, Vila Nova de Gaia é a única que lhe presta devoção como seu padroeiro e que possui igreja com o seu nome.

A paróquia foi criada em 1964 e canonicamente reconhecida em 2002.

Na actualidade existem duas igrejas de santo Ovídio, uma antiga (1950) e uma nova (2002) que serão designadas no presente documento por Igreja Antiga de Santo Ovídio e Igreja Nova de Santo Ovídio respectivamente.

Santo Ovídio (Figura 4.1), *Auditus* em Latim, é o santo padroeiro da paróquia de Santo Ovídio, Mafamude, Vila Nova de Gaia.



Figura 4.1 - Santo Ovídio [1]

O “Evangelho Quotidiano” [2] resume a vida deste santo como um cidadão romano, que teria assistido às pregações de Pedro e Paulo e unido as suas forças ao ímpeto evangelizador dos primeiros tempos da Igreja. O Papa S. Clemente teria reconhecido nele qualidades de pastor e o enviado à Hispânia a fim

de reger a jovem Igreja Bracarense. No noroeste peninsular, teria sido um apóstolo fervoroso e dado um visível esplendor ao cristianismo nascente. A tradição diz ainda que foi martirizado, encontrando-se hoje as suas relíquias na Sé de Braga.

Toda a informação recolhida indica que pouco se sabe sobre a sua biografia existindo apenas suposições em várias hagiografias do século XVI [3].

Giorgio Cardozo, em seu “*Agiologio Lusitano*”, diz que no início do século XVII, nas montanhas mais altas de Portugal encontravam-se várias ermidas antigas, onde Auditus aparece retratado em vestes romanas, segurando o Evangelho na sua mão esquerda e mostrando com a direita “*digito in aurem intento*”. [3]

Estas pinturas parecem ser suficientes para afirmar a antiguidade do culto a Auditus. Cardozo acrescentou que, na mesma catedral de Braga, perto da sala do tesouro, se encontra o túmulo do santo, cuja base apresenta dois orifícios onde os surdos devotos do santo introduziam os dedos levando-os em seguida aos seus ouvidos: A tradição diz que o seu nome era sempre invocado contra as doenças da audição. Para facilitar esta prática para as mulheres, que seriam obrigadas a uma posição socialmente inadequada, D. Diogo de Sousa, em 1527 erigiu um novo monumento na catedral, à direita da entrada com a inscrição “✠ OSSA B. AUDIT. EPISCOPI D. S. ARCHIEPISCOPUS FECIT MDXXVII”. Sobre o túmulo foi pintada uma imagem de Auditus em vestes pontifícias.

Perto do final do século XVI, ou início do séc. XVII, G. Román de la Higuera, em “*Flavii Lucii Dextri Chronicon*”, transformou arbitrariamente em Ovídio a palavra ouvido (tradução popular do latim Auditus), “inventando” um novo santo, que disse ser siciliano de nascimento e um cidadão romano. Este, enviado pelo Papa Clemente a Braga tornou-se o terceiro bispo daquela cidade (95) onde se diz que terá baptizado Santa Marinha e suas irmãs depois destas terem sido abandonadas por sua mãe [4]. Foi mártir pela sua fé cristã no ano 135.

Rodrigo da Cunha (1627-35), na sua “*História Eclesiástica dos arcebispos de Braga*” e no “*Breviarium*” (publicado em 1634) avaliou e confirmou a história do santo, indicando que o mesmo se encontra sepultado na Sé de Braga onde se encontra a inscrição “✠ OSSA S. OVIDII TERTII BRACARENSIS EPISCOPI” [3].

A festa deste bispo de Braga é comemorada a 3 de Junho [5].

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS IGREJAS

### 4.2.1 IGREJA ANTIGA DE SANTO OVÍDIO

A igreja antiga de Santo Ovídio (Figura 4.2) situa-se na freguesia de Mafamude, com 5,4 km<sup>2</sup> de área e cerca de 39.000 habitantes (2001), do concelho de Vila Nova de Gaia, Distrito do Porto. Foi inaugurada em Maio de 1950 para substituir a capela do Senhor do Padrão, situada à margem da estrada nacional n.º1 que estava então praticamente demolida.

A capela do Senhor do Padrão, que serviu de matriz em diversas épocas, começou a ser designada por capela de Santo Ovídio, conforme era conhecida na moderna geração, em virtude de nela ter sido colocada a imagem de santo Ovídio. Esta imagem estava exposta à veneração dos fiéis, numa antiga capelinha sita em frente à actual rua de Pinto de Aguiar, que foi demolida por motivo por incompatibilidade com o traçado da estrada nacional n.º1.

Graças à generosidade da família do Sr. Luís Fernando Ameal Vasconcelos Porto, e, também ao auxílio da Câmara Municipal de V. N. de Gaia, na presidência do Sr. Dr. Fernando Moreira, foi edificada a igreja de Santo Ovídio (Figura 4.3 e 4.4).



Figura 4.2 – Fachada da Igreja Antiga de Santo Ovídio [10]

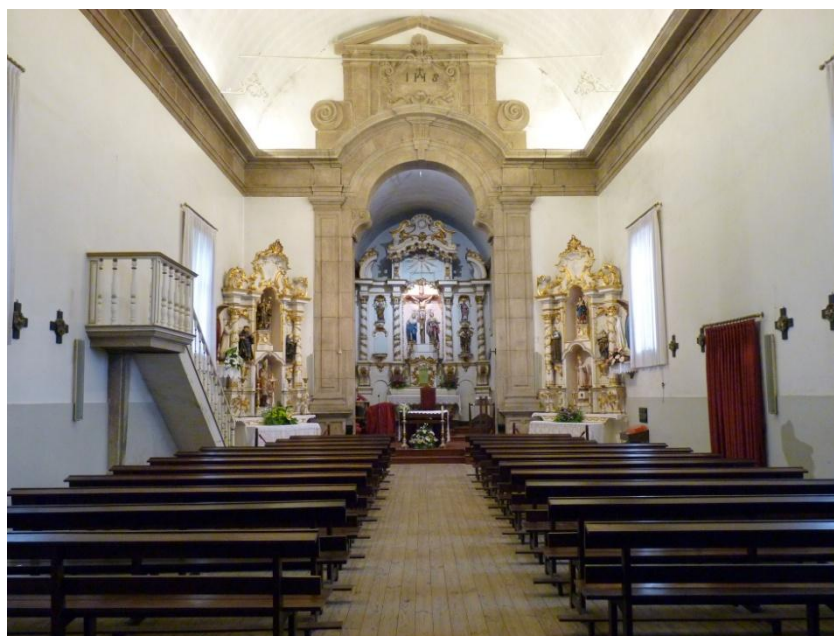


Figura 4.3- Igreja Santo Ovídio, vista entrada [foto da autora]



Figura 4.4 - Igreja Santo Ovídio, vista altar [foto da autora]

Situa-se bastante perto da rotunda de Santo Ovídio, no cruzamento da Rua Coats Clark com a Rua Conceição Fernandes (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Localização da Igreja Antiga de Santo Ovídio [10]

Face à impossibilidade de consulta do projecto desta igreja, os parâmetros arquitectónicos foram obtidos através de observação directa e medições realizadas no local pela autora.

As dimensões encontram-se resumidas na Figura 4.6 que consiste na planta e um corte transversal. Dividindo a igreja em três zonas (entrada, nave central e altar), obtêm-se os seguintes valores:

- Área entrada =  $19,3 \text{ m}^2$
- Área nave =  $125 \text{ m}^2$ ; Volume =  $1305 \text{ m}^3$
- Área altar =  $28 \text{ m}^2$ ; Volume =  $238 \text{ m}^3$

Ignorando o volume da entrada, para maior facilidade nos cálculos obtêm-se um volume total aproximado de  $1543 \text{ m}^3$ .

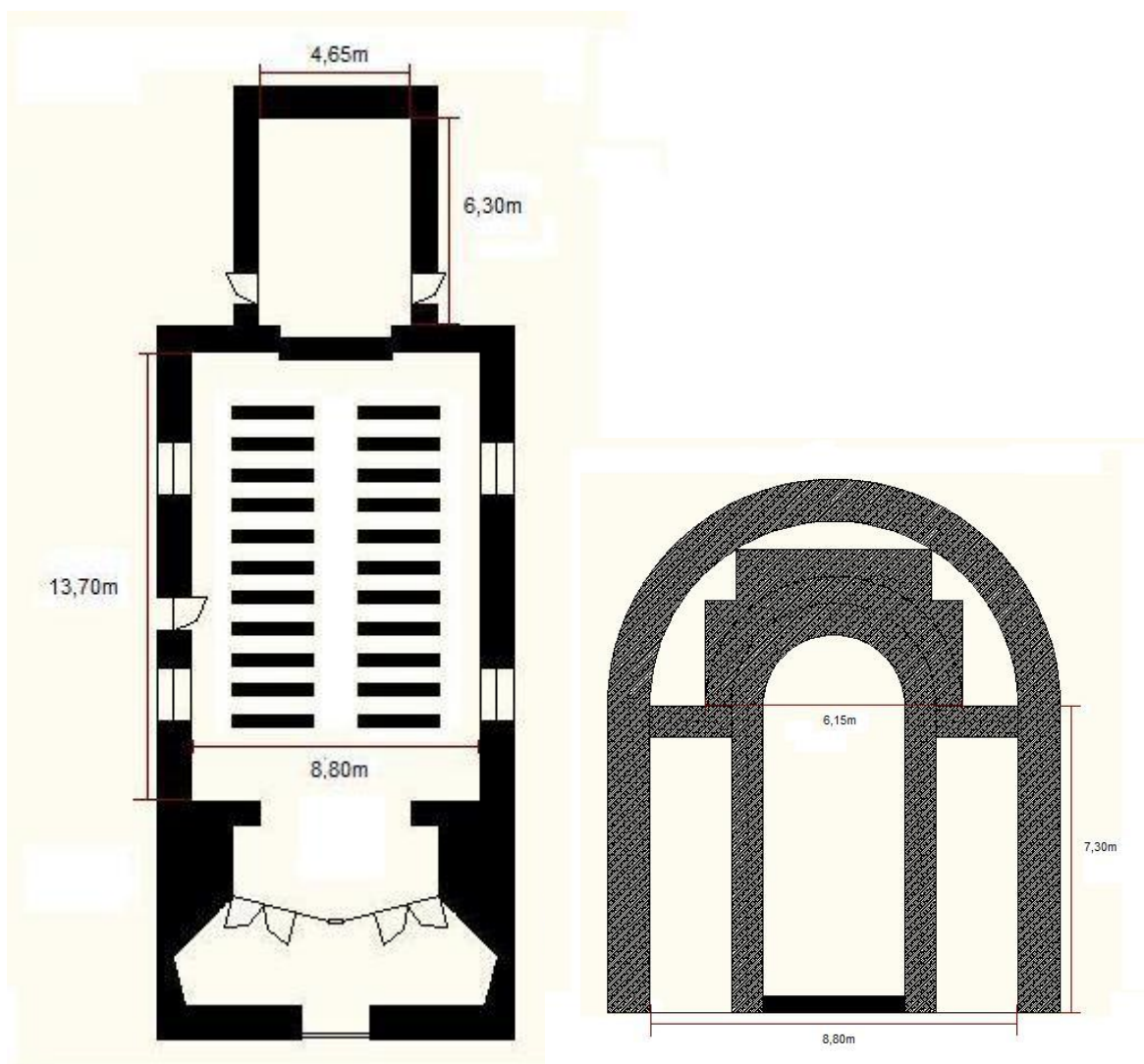


Figura 4.6 – Planta e Corte da Igreja Antiga de Santo Ovídio

#### 4.2.2 IGREJA NOVA DE SANTO OVÍDIO

A 10 de Março de 2002, foi inaugurada por D. Armindo Lopes Coelho, Bispo do Porto, a nova igreja paroquial de Santo Ovídio (Figura 4.7, 4.8 e 4.9), da autoria do arquitecto Manuel Carlos Abreu Gomes da Silva.



Figura 4.7 – Fachada da Igreja Nova de Santo Ovídio [10]

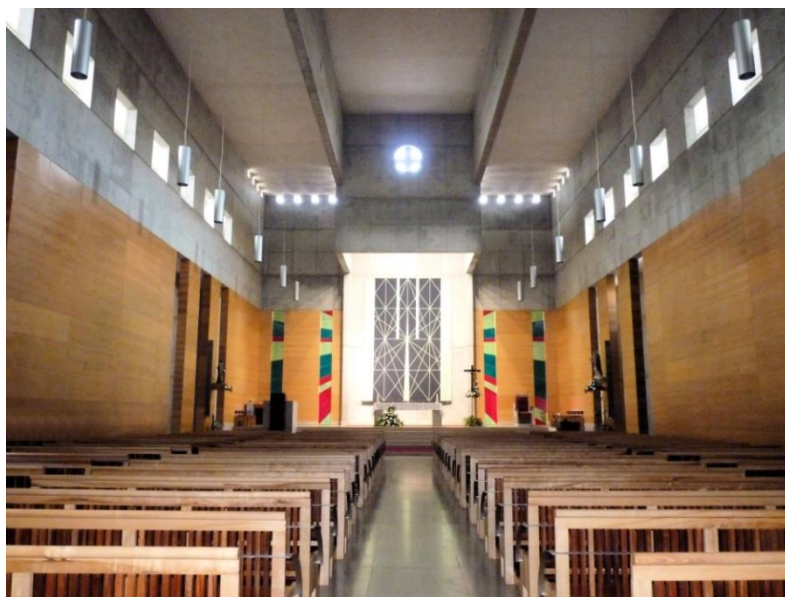


Figura 4.8 - Igreja Nova Santo Ovídio, vista da entrada [foto da autora]



Figura 4.9 - Igreja Nova Santo Ovídio, vista do altar [foto da autora]

A nova Igreja situa-se na Rua Conde D. Pedro, encontrando-se mais afastada da azáfama habitual da rotunda de Santo Ovídio mas mais perto da auto-estrada (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Localização da Igreja Nova de Santo Ovídio (B) e da Igreja Antiga (A) [10]

A respeitabilidade do local, a sua imponência granítica, a sua grandiosidade dimensional, são alguns dos parâmetros conseguidos arquitectonicamente, neste novo edifício que enriquece o património da cidade de Vila Nova de Gaia. A pretensão de tradução do impacto secular do templo, de aspecto bizantino, as dimensões, a austeridade e seriedade afiguradas, não se diminuem pela inclusão numa conjectura actual e pós moderna.

Para amenizar a fria dureza do betão e do granito, ao centro do altar encontra-se uma enorme tapeçaria (cerca de 30 m<sup>2</sup>) tecida na Manufatura de Portalegre, iluminada por um canhão de luz natural (Figura 4.11). Fernando Lanhas, o seu autor, é um nome incontornável na História da Arte em Portugal, no séc. XX, tendo sido o primeiro a praticar o abstraccionismo na pintura portuguesa.



Figura 4.11 - Igreja Nova Santo Ovídio, Tapeçaria do Presbitério, da autoria de Fernando Lanhas [foto da autora]

A igreja possui um deambulatório onde se podem visualizar as 15 estações da Via Sacra (Figura 4.12), em que figuram em quadros contemporâneos, da autoria de Ernesto Ricou, os últimos momentos da vida de Jesus na Terra.

O sacrário da Capela do Santíssimo Sacramento (Figura 4.13) é da autoria de Zulmiro de Carvalho (Figura 4.14) e no Baptistério podem-se apreciar vitrais de Helena Abreu (Figura 4.15) e a fonte baptismal concebida pelo arqt.º F. Abrunhosa de Brito (Fig. 4.16).



Figura 4.12 - Igreja Nova Santo Ovídio, Via-sacra de Ernesto Ricou [foto da autora]



Figura 4.13 - Igreja Nova Santo Ovídio, Capela do Santíssimo Sacramento [foto da autora]



Figura 4.14 - Igreja Nova Santo Ovídio, Sacrário da Capela do Santíssimo Sacramento de Zulmiro de Carvalho [foto da autora]



Figura 4.15 - Igreja Nova Santo Ovídio, Vitrais do Baptistério de Helena Abreu [foto da autora]



Figura 4.16 - Igreja Nova Santo Ovídio, Pia Baptismal de Abruñhosa de Brito [foto da autora]

Pertença desta igreja são ainda três relíquias de Santo Ovídio, Santa Maria Goreti e do Beato José de Anchieta, encontrando-se as mesmas guardadas debaixo do altar.

Embora a paróquia de Santo Ovídio tivesse sido criada no ano de 1964, o seu reconhecimento canonicamente apenas se deu em 2002. Condição necessária para este reconhecimento foi a ampliação da Igreja Matriz assim como a criação de infra-estruturas de apoio como salas de catequese, secretaria, etc. Assim, o arquitecto M. Gomes da Silva, com a colaboração dos Engs. Paulo A. R. Guedes (estabilidade), Fernando Silva e João A. Granjo (instalações eléctricas e telefónicas), Rogério Paulo da Gama Pereira (instalações mecânicas) criou o projecto da Igreja Nova de Santo Ovídio, do qual se apresentam algumas imagens (Figura 4.17, 4.18 e 4.19). Esta igreja sofreu um projecto acústico da responsabilidade do Instituto da Construção (FEUP) através do Professor A. P. Oliveira de Carvalho e Diamantino Freitas (Electroacústica).

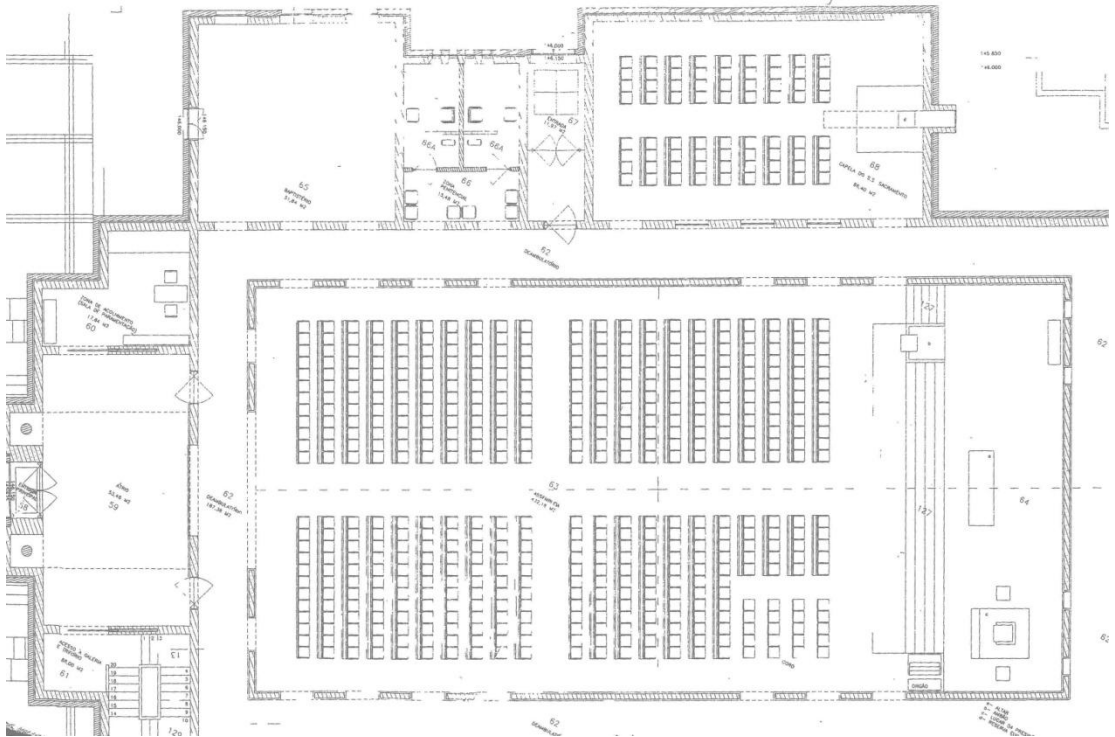


Figura 4.17 - Planta da Igreja Nova de Santo Ovídio

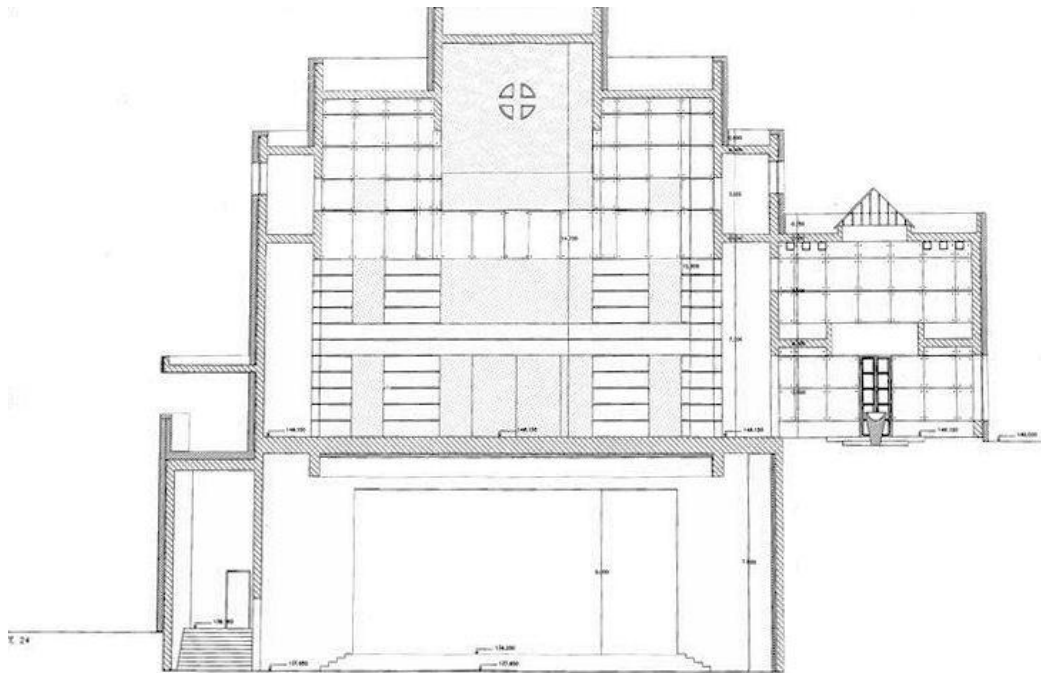


Figura 4.18 – Corte transversal da Igreja Nova de Santo Ovídio

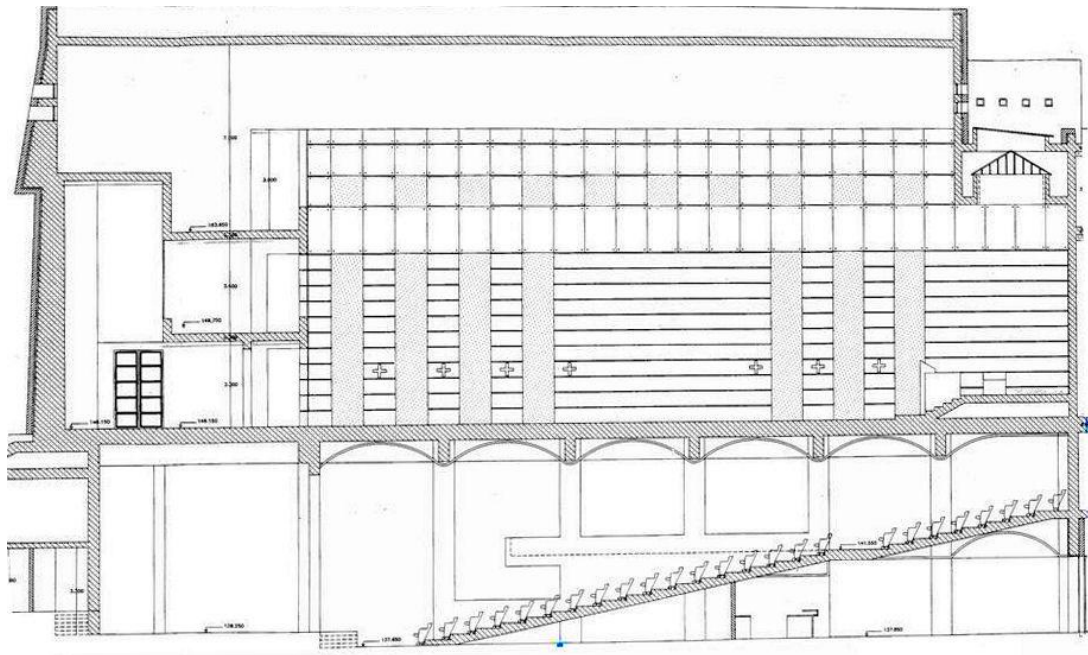


Figura 4.19 – Corte longitudinal da Igreja Nova de Santo Ovídio

Da análise das Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 podem verificar-se os seguintes parâmetros arquitectónicos:

- Altura máxima – 14,7 m
- Altura mínima – 12,6 m
- Área nave – 432 m<sup>2</sup>
- Área deambulatório – 187 m<sup>2</sup>
- Volume nave – 5897 m<sup>3</sup>
- Volume deambulatório – 2553 m<sup>3</sup>

Os dirigentes eclesiásticos ambicionaram para esta igreja um aspecto austero e de profundo recolhimento, que condicionou a criatividade do arquitecto. Este garantiu-o através da mistura do betão com a madeira e o granito polido. Contudo, sendo uma igreja, por definição, um local privilegiado de recolhimento é ainda uma local de comunhão da palavra, onde se deseja que a música de louvor seja audível, clara e presente em todo o espaço.

Numa forma geométrica regular como esta, com as vigas mestras que cortam o tecto e criam dispersão, os índices de inteligibilidade seriam previsivelmente muito baixos e o tempo de reverberação muito elevado, com valores inaceitáveis para percepção da palavra.

De modo a resolver este problema, sem colidir com o aspecto e decoração da igreja, foram projectados 40 mm de Sonaspray k13 [11], branco, aplicado exclusivamente no tecto (Figura 4.20). Com a aplicação deste material esperou-se obter um baixo tempo de reverberação, e uma muito boa inteligibilidade, proporcionando boa qualidade na utilização do coro e entendimento da palavra em todo o espaço da igreja.

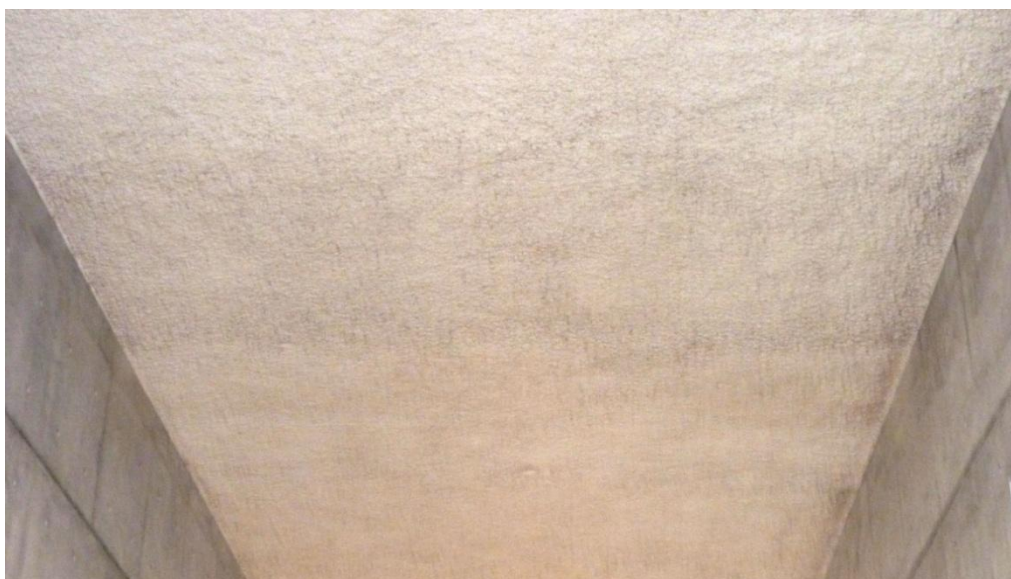


Figura 4.20 – Sonaspray k13 aplicado no tecto da Igreja Nova de Santo Ovídio [foto da autora] [57]

#### 4.2.3 COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS ARQUITECTÓNICOS ENTRE AS DUAS IGREJAS

No quadro 4.1 sintetizam-se os parâmetros arquitectónicos das duas igrejas e apresenta-se ainda a razão entre esses mesmos parâmetros na Igreja Nova (IN) e na Igreja Antiga (IA).

Quadro 4.1 – Parâmetros arquitectónicos nas duas igrejas

Parâmetro	Igreja Nova	Igreja Antiga	IN / IA
Área (m <sup>2</sup> )	432	125	3,5
Volume (m <sup>3</sup> )	5897	1543	3,8
Altura máxima (m)	14,7	11,6	1,3
Largura (m)	14,8	8,5	1,7
Lugares sentados	504	72	7,0

# 5

## ENSAIOS E RESULTADOS

### 5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo abordam-se os ensaios acústicos realizados *in situ* às duas igrejas de Santo Ovídio no âmbito da realização deste trabalho e analisam-se os resultados obtidos.

Os ensaios foram realizados no dia 18 de Novembro de 2009.

As igrejas foram ensaiadas totalmente desocupadas, com a excepção da autora e do Eng. António Eduardo Costa. Uma vez que a igreja antiga de Santo Ovídio se encontra muito próxima da rotunda de Santo Ovídio, com grande movimento de tráfego e do acesso ao hospital de Vila Nova de Gaia, acarretando o ruído provocado pelas sirenes das ambulâncias, houve um esforço para evitar ao máximo tal perturbação nos resultados, parando ou repetindo os ensaios sempre que o ruído resultante destes factores era evidentemente prejudicial para os testes.

Foram ensaiados os seguintes parâmetros:

- L (níveis de pressão sonora) do Ruído de Fundo;
- RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*);
- TR (Tempo de Reverberação).

O equipamento utilizado em todos os ensaios é propriedade do Laboratório de Acústica do Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foi manuseado pelo Eng. António Eduardo Costa e foi o seguinte:

- Sonómetro B&K tipo 2260;
- Calibrador B&K 4231;
- Microfone de 13 mm, marca Brüel & Kjaer, modelo 4189;
- Fonte sonora, marca Brüel & Kjaer modelo 4224;
- Módulo estatístico, marca Brüel & Kjaer, modelo BZ7210;
- Módulo estatístico, marca Brüel & Kjaer, modelo BZ7204;

- Tripé de fixação portátil, marca Brüel & Kjaer, modelo UA0049;
- Analisador do RASTI, marca Brüel & Kjaer, modelo 3361, o qual consiste num emissor (modelo 4225) e um receptor (modelo 4419).

Nos próximos subcapítulos apresentam-se descritos cada um dos três ensaios efectuados assim como os resultados obtidos.

## 5.2. RUÍDO DE FUNDO

### 5.2.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

Escolheram-se três pontos estratégicos (Figuras 5.1e 5.2) para a avaliação do ruído de fundo de forma a caracterizar a totalidade da sala analisada. Os pontos escolhidos para o registo do ruído de fundo situam-se nos lugares sentados espalhados pela sala ao nível médio dos ouvidos de uma pessoa.

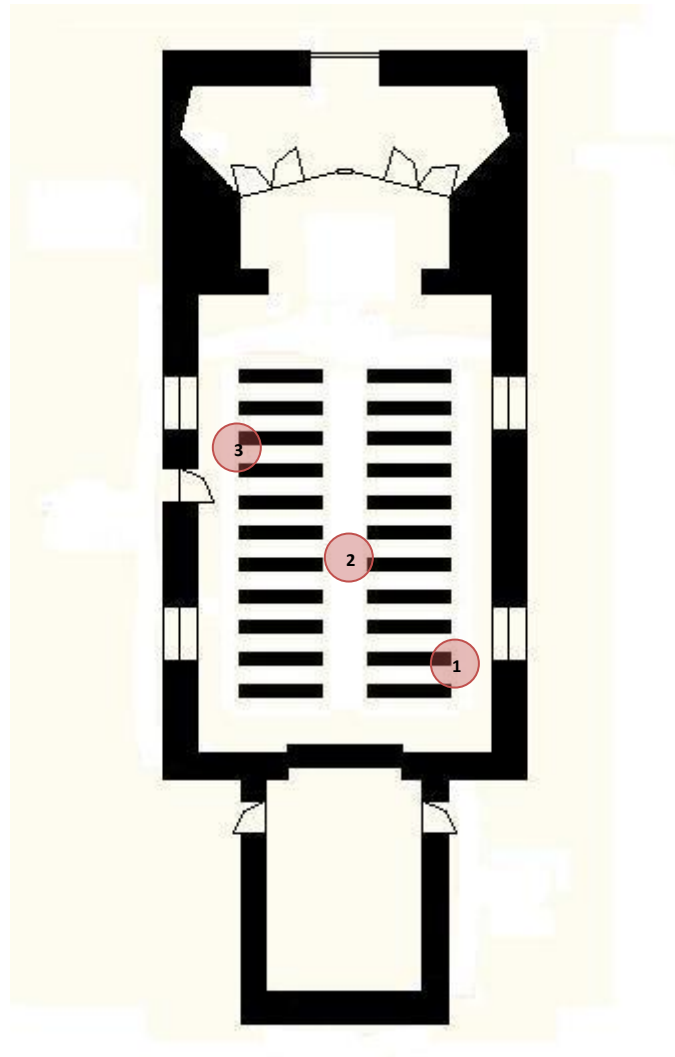


Figura 5.1 - Localização dos pontos ensaiados para a avaliação do L (Ruído de Fundo) na igreja antiga.

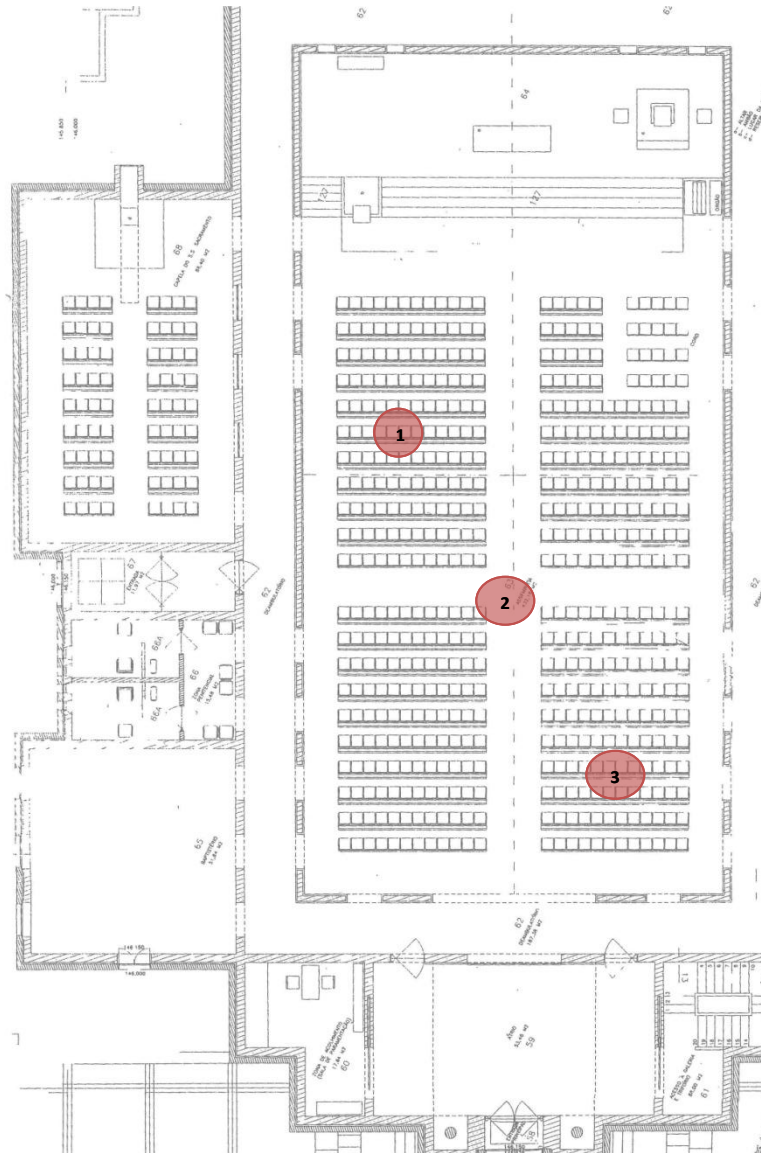


Figura 5.2 - Localização dos pontos ensaiados para a avaliação do L (Ruído de Fundo) na igreja nova.

### 5.2.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio foi realizado com um sonómetro *Briuel & Kjaer* 2260 (Figura 5.3). Houve o cuidado de registar os valores com o ruído de fundo médio evitando picos causados por sirenes de ambulâncias ou arranques de automóveis.



Figura 5.3. – Sonómetro B&K 2260. [Foto da autora]

Registaram-se os valores de nível de pressão sonora (L) do ruído de fundo nas duas igrejas para os três pontos escolhidos em banda de oitava dos 63 aos 16000 Hz.

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no subcapítulo seguinte.

### 5.2.3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Registaram-se os valores dos níveis de pressão sonora por bandas de frequência de 1 oitava nas duas igrejas e para os três pontos escolhidos. Os resultados são os apresentados nos Quadros 5.1. e 5.2.

Quadro 5.1. – Valores dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo na igreja antiga de Santo Ovídio

Pontos	Frequência (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
1	47,7	51,4	55,7	50,6	37,6	34,4	32,9	30,8	23,2
2	48,8	53,4	58,0	48,3	40	36,5	34,8	31,0	25,3
3	47,9	55,2	53,9	48,3	40,2	36,3	34,5	32,3	26,4
Valor médio	48,1	53,3	55,9	49,1	39,3	35,7	34,1	31,4	25,0

Quadro 5.2. – Valores dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo na igreja nova de Santo Ovídio

Pontos	Frequência (Hz)									
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
1	50,0	36,2	28,6	24,6	22,0	18,9	15,5	14,2	12,1	
2	49,7	35,9	28,2	24,3	21,6	18,5	15,2	13,9	11,9	
3	49,6	35,8	28,1	24,2	21,6	18,5	15,1	13,9	11,9	
Valor médio	49,8	36,0	28,3	24,4	21,7	18,6	15,3	14,0	12,0	

No Quadro 5.3 estão representados os valores médios dos níveis de pressão sonora (L (dB)) nas duas igrejas.

Quadro 5.3 – Valores médios dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo nas duas igrejas de Santo Ovídio

L (dB)	Frequência (Hz)										$\Sigma$
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000		
Igreja antiga	48,1	53,3	55,9	49,1	39,3	35,7	34,1	31,4	25,0	<b>58,8</b>	
Igreja nova	49,8	36,0	28,3	24,4	21,7	18,6	15,3	14,0	12,0	<b>50,0</b>	
$\Delta L$	<b>-1,7</b>	<b>17,3</b>	<b>27,6</b>	<b>24,7</b>	<b>17,6</b>	<b>17,1</b>	<b>18,8</b>	<b>17,4</b>	<b>13</b>	<b>8,8</b>	

Os resultados podem ser mais facilmente comparados através da observação das figuras 5.4 e 5.5. A figura 5.4 apresenta os diferentes níveis de ruído de fundo (L) para as frequências testadas e a figura 5.5 apresenta a diferença de ruído de fundo ( $\Delta L$ ) nas duas igrejas.

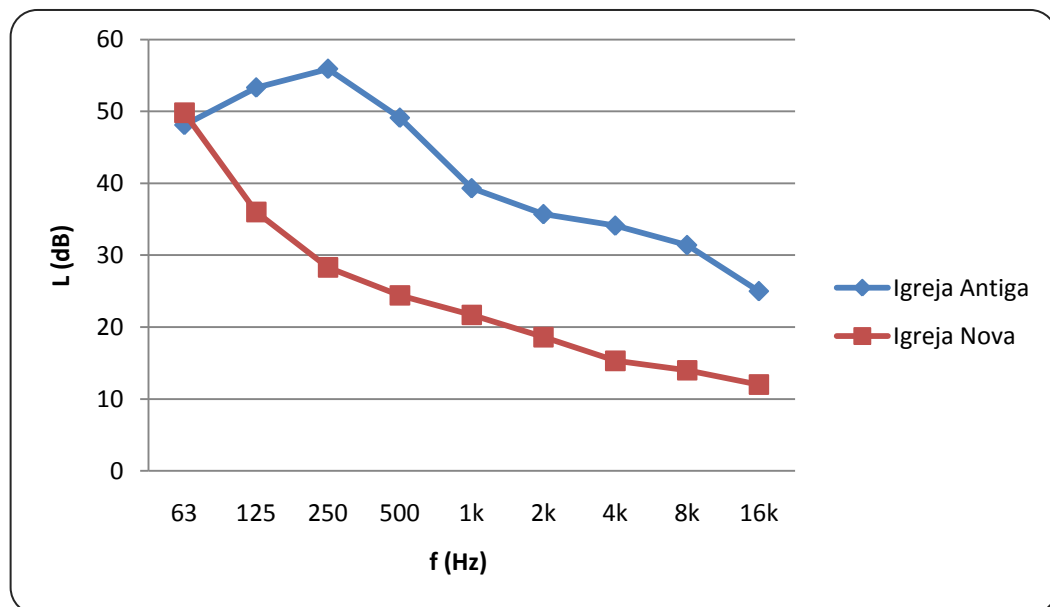


Figura 5.4 – Representação gráfica dos resultados médios de L em dB nas duas igrejas.

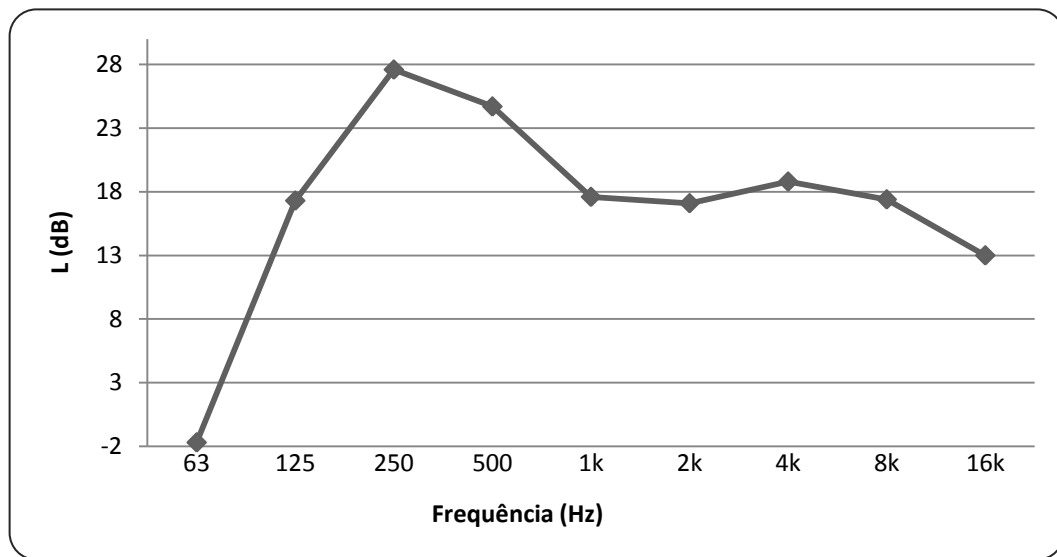


Figura 5.5 – Diferenças de nível de pressão sonora ( $\Delta L$ ) por banda de frequência.

Conforme o apresentado no subcapítulo 2.8, importa saber os resultados corrigidos com o filtro A para o ouvido humano, pelo que se apresenta no quadro 5.4 os níveis sonoros ( $L_A$  (dB)) nas duas igrejas e a diferença de níveis entre estas.

Quadro 5.4 – Valores médios dos níveis sonoros ( $L_A$ ) do Ruído de Fundo nas duas igrejas de Santo Ovídio

$L_A$ (dB)	Frequência (Hz)									$\Sigma$
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
Igreja antiga	22,1	37,8	47,4	46,1	39,3	36,7	35,1	30,4	18	<b>50,8</b>
Igreja nova	23,8	20,5	19,8	21,4	21,7	19,6	16,3	13	5	<b>29,5</b>
$\Delta L_A$	<b>-1,7</b>	<b>17,3</b>	<b>27,6</b>	<b>24,7</b>	<b>17,6</b>	<b>17,1</b>	<b>18,8</b>	<b>17,4</b>	<b>13</b>	<b>21,3</b>

A figura 5.6 apresenta o  $L_A$  (ruído de fundo ponderado para o ouvido humano) nas duas igrejas e o  $\Delta L_A$ .

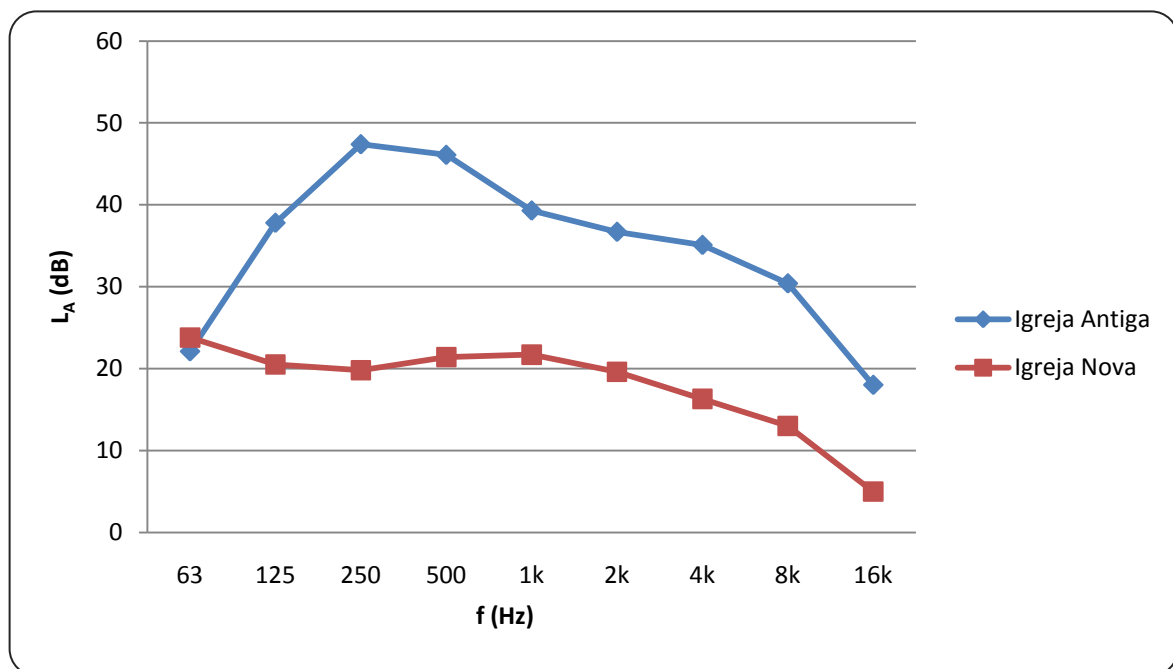


Figura 5.6 - Representação gráfica dos resultados médios de  $L_A$  em dB nas duas igrejas.

A partir da análise dos quadros 5.3 e 5.4 pode-se verificar que há uma diminuição expressiva no valor de ruído de fundo na igreja nova relativamente à igreja antiga. O valor total de  $L$  diminui 8,8 dB na igreja nova, analisando o  $L_A$  essa melhoria é ainda mais significativa, havendo uma redução de 21,3 dB no ruído de fundo.

Sabendo que a situação desejável é ter um ruído de fundo tanto menor quanto possível, é possível verificar nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5 a melhoria que se conseguiu na igreja nova e que pode ser explicada pelo melhor isolamento sonoro do edifício. Quanto à sua localização, embora esta igreja se encontre mais longe da rotunda de Santo Ovídio (zona de tráfego intenso) localiza-se mais perto da auto-estrada pelo que se conclui que, neste caso, a localização não influi nos resultados.

Comparando os resultados do  $L$  das duas igrejas com as actividades e locais apresentados na figura 2.10 pode-se verificar que a igreja antiga de Santo Ovídio tem um valor de ruído de fundo desadequado a um local de culto uma vez que é mais ruidoso que uma sala de estar e pouco menos ruidoso que um escritório. Por outro lado, os resultados obtidos na igreja nova de Santo Ovídio revelam-se já um pouco melhores uma vez que esta igreja tem um ruído de fundo que, embora se situe no mesmo intervalo referido, é significativamente inferior.

### 5.3. RASTI

#### 5.3.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

Seleccionaram-se os mesmos três pontos descritos no subcapítulo anterior para este ensaio (Figuras 5.1 e 5.2).

Dividindo-se a área das igrejas em três partes iguais, quer horizontal, quer verticalmente, utilizou-se o centro de cada uma das partes como local de medições. O ponto 1, situado na posição mais próxima do orador e do lado esquerdo; o ponto 2, situado no corredor central que divide a igreja em duas partes simétricas situando-se em frente à posição do orador no altar; o ponto 3, simétrico ao ponto 1 (Figuras 5.1 e 5.2).

A escolha da localização destes pontos baseou-se na variação da inteligibilidade da palavra com a distância ao orador e direccionalidade da emissão, daí serem analisadas direcções e distâncias diferentes.

#### 5.3.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O método RASTI surgiu em 1971 por simplificação do método STI (referido no capítulo 2), tornando a avaliação objectiva da inteligibilidade da palavra muito mais rápida. Os valores do RASTI podem ser relacionados com uma escala subjectiva de inteligibilidade da palavra (Quadro 5.5), segundo a norma CEI 268-16 (CEI1988) [12].

Quadro 5.5 – Escala de RASTI [37]

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

É um método usado para comparar a qualidade da transmissão sonora dentro de uma sala variando a posição do receptor ou para comparar a inteligibilidade da palavra em salas diferentes.

O ensaio consiste na emissão de um sinal sonoro por parte da fonte sonora localizada no altar na posição de orador, tal como em trabalhos anteriormente desenvolvidos [13], [14] e [15] e recepção com um microfone nas várias posições escolhidas.

Neste método analisam-se só duas bandas de frequência, 500 e 2000 Hz, daí a rapidez em relação ao método STI. O sinal sonoro emitido cobre as gamas de frequências utilizadas na palavra e origina as mesmas flutuações de intensidade sonora da fala. O equipamento receptor regista em cada posição a maneira como o sinal é modificado desde que parte da fonte sonora até chegar ao microfone receptor.

O valor do RASTI é calculado automaticamente pelo aparelho com base em nove frequências de modulação.

Em cada ponto obtiveram-se quatro leituras, sendo que o mínimo admissível para este teste é de três leituras. O valor final do RASTI para cada ponto calculou-se pela média aritmética das leituras fornecidas pelo aparelho.

Numa primeira fase o nível de emissão sonora foi o de referência e na segunda fase de medição, ligou-se o sistema de som instalado na igreja e usou-se o nível de emissão de referência.

O equipamento usado é da marca Brüel & Kjaer que foi a grande responsável pelo desenvolvimento comercial deste método em 1985, colocando no mercado o equipamento para este ensaio. Foi usado um transmissor modelo 4225 e um receptor modelo 4419, ambos propriedade do Laboratório de Acústica do Instituto da Construção da FEUP com o apoio do Eng. António Eduardo Costa.

### 5.3.3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Registaram-se os valores para os três pontos escolhidos para as duas fases de ensaio. Para cada ponto, o RASTI foi calculado pela média aritmética das leituras obtidas no aparelho receptor. O índice RASTI médio sala corresponde à média aritmética do RASTI para todos os pontos. Os resultados obtidos para a primeira fase, nas duas igrejas estão nos quadros 5.6 e 5.7.

Para a segunda fase de ensaios, com o sistema de som ligado, obtiveram-se os resultados conforme os quadros 5.8 e 5.9.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 apresentam-se os gráficos com os resultados obtidos para as duas fases de ensaio, representando nas abcissas os pontos e nas ordenadas o valor do RASTI.

Quadro 5.6 – RASTI (1ª fase) – sistema de som desligado, na igreja antiga.

Pontos	RASTI				Média	RASTI médio sala
1	0,43	0,41	0,41	0,43	0,42	0,38
2	0,37	0,38	0,37	0,38	0,38	
3	0,34	0,33	0,36	0,35	0,35	

Quadro 5.7 – RASTI (1ª fase) – sistema de som desligado, na igreja nova.

Pontos	RASTI				Média	RASTI médio sala
1	0,58	0,59	0,58	0,57	0,58	0,53
2	0,53	0,53	0,53	0,54	0,53	
3	0,46	0,47	0,49	0,47	0,47	

Quadro 5.8 – RASTI (2ª fase) – sistema de som ligado, na igreja antiga

Pontos	RASTI				Média	RASTI médio sala
1	0,40	0,42	0,40	0,42	0,41	0,43
2	0,42	0,43	0,43	0,42	0,43	
3	0,46	0,45	0,45	0,46	0,46	

Quadro 5.9 – RASTI (2ª fase) – sistema de som ligado, na igreja nova

Pontos	RASTI				Média	RASTI médio sala
1	0,62	0,63	0,63	0,62	0,63	0,62
2	0,60	0,62	0,60	0,62	0,61	
3	0,62	0,61	0,62	0,60	0,61	

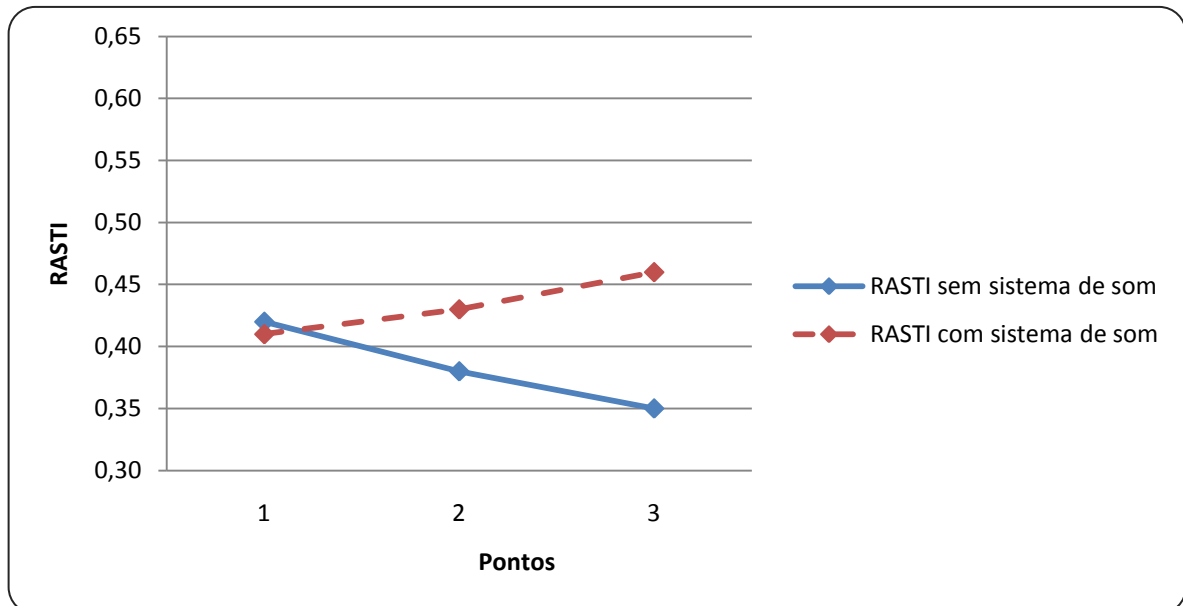


Figura 5.7 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios RASTI na igreja antiga

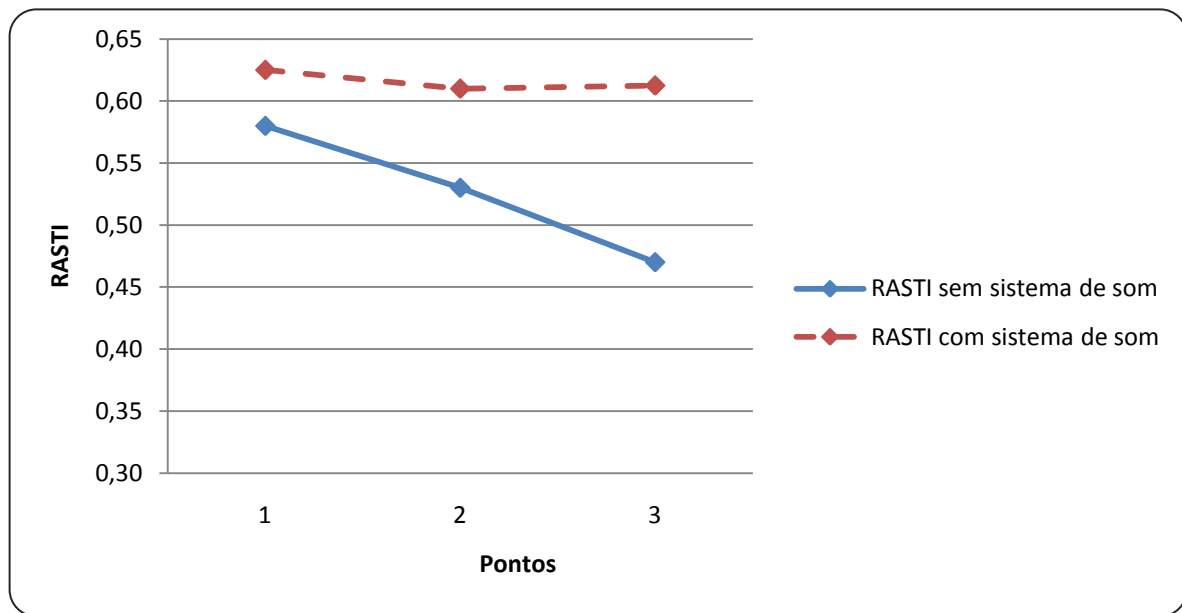


Figura 5.8 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios RASTI na igreja nova

Nos quadros 5.10 e 5.11 apresentam-se os ganhos nos valores de RASTI com sistema de som através da diferença de resultados com e sem instalação sonora (I.S.).

Na Figura 5.9 apresenta-se o gráfico com o  $\Delta$ RASTI (diferença entre os valores com e sem a utilização do sistema de som) nas duas igrejas.

Quadro 5.10 –  $\Delta$ RASTI (diferença entre RASTI com I.S. e RASTI sem I.S.) na igreja antiga.

Pontos	$\Delta$ RASTI					Média	Média Global
1	-0,03	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	
2	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05
3	0,12	0,12	0,09	0,11	0,11	0,11	

Quadro 5.11 –  $\Delta$ RASTI (diferença diferença entre RASTI com I.S. e RASTI sem I.S.) na igreja nova.

Pontos	$\Delta$ RASTI					Média	Média Global
1	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	
2	0,07	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09
3	0,16	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	

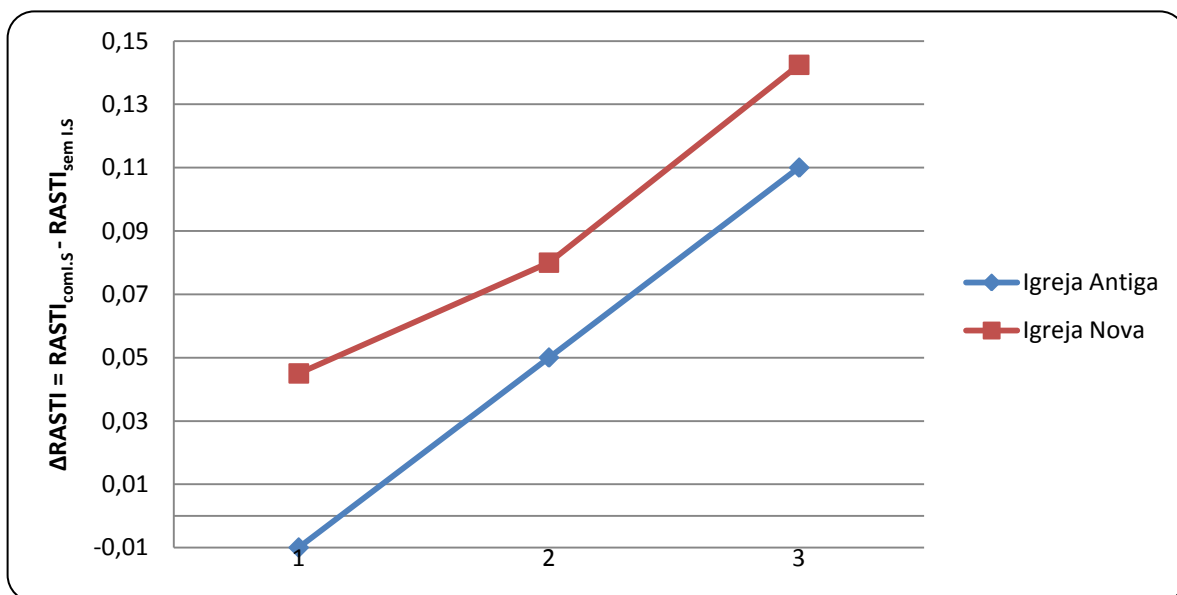


Figura 5.9 – Representação gráfica das diferenças nos resultados obtidos nos ensaios RASTI com e sem a utilização do sistema sonoro nas duas igrejas.

Na Figura 5.10 apresenta-se o gráfico comparativo dos resultados obtidos para as duas igrejas nas duas fases de ensaio, representando nas abcissas os pontos e nas ordenadas o valor do RASTI.

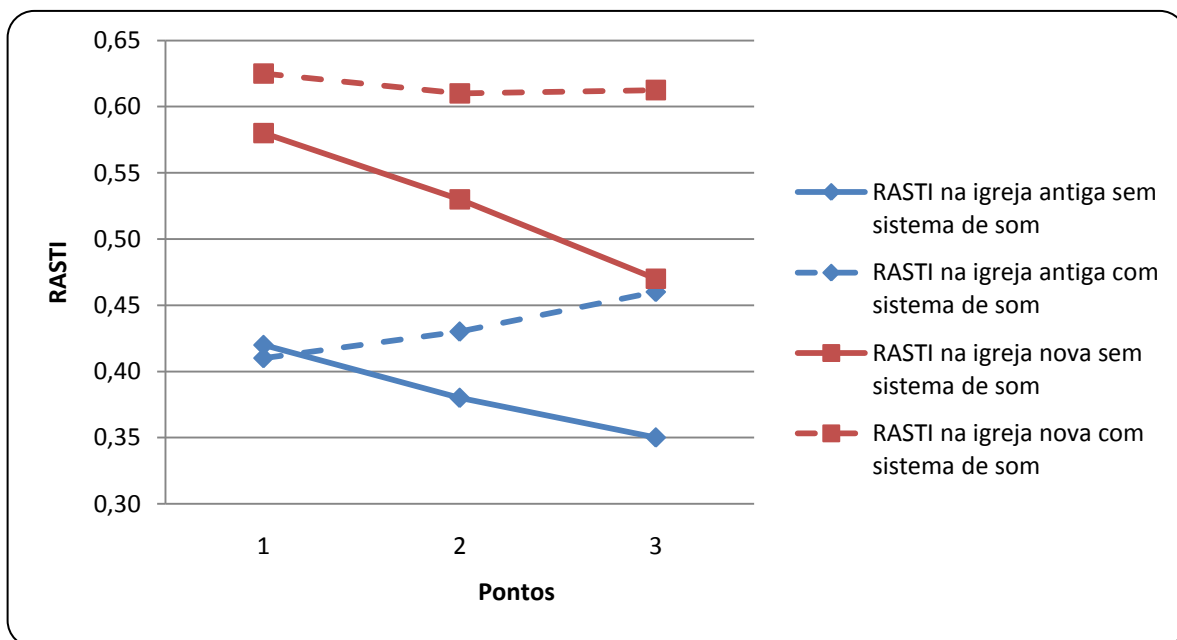


Figura 5.10 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios RASTI com e sem o sistema de som ligado nas duas igrejas

Os valores médios do RASTI de cada igreja e a sua respectiva inteligibilidade da palavra com e sem sistema de som encontram-se no quadro 5.12.

Tal como se verificou no subcapítulo anterior também nos resultados do RASTI se apura uma melhoria dos valores da igreja nova relativamente aos valores da igreja antiga. Observando o quadro 5.10 conclui-se que a inteligibilidade da palavra na igreja antiga é “medíocre” e que a instalação sonora não traz benefícios significativos. Por outro lado a igreja nova tem uma inteligibilidade da palavra “suficiente” sem a utilização da instalação sonora passando a “boa” quando se liga a amplificação.

Quadro 5.12 – Valores médios do RASTI e inteligibilidade da palavra nas igrejas de Santo Ovídio

	RASTI médio sala	Inteligibilidade da palavra
Igreja antiga sem sistema de som	0,38	Medíocre
Igreja antiga com sistema de som	0,43	Medíocre (quase suficiente)
Igreja nova sem sistema de som	0,53	Suficiente
Igreja nova com sistema de som	0,62	Boa

Como foi explicado no capítulo 2, a inteligibilidade da palavra diminui com o aumento da distância ao orador. Pelo que os valores de RASTI sem sistema de som decrescem do ponto 1 para o 3 como era de prever (Quadro 5.13). Com a utilização do sistema sonoro, na igreja nova, a inteligibilidade da palavra é praticamente uniforme em todos os pontos tendo como variação máxima 0,02. Isto prova que o sistema sonoro está correctamente instalado e é adequado às características acústicas da sala.

Quadro 5.13 – Valores médios do RASTI em cada ponto nas igrejas de Santo Ovídio

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	$\Delta_{\text{máx}}$
Igreja antiga sem sistema de som	0,42	0,38	0,35	0,07
Igreja antiga com sistema de som	0,41	0,43	0,46	0,05
Igreja nova sem sistema de som	0,58	0,53	0,47	0,11
Igreja nova com sistema de som	0,63	0,61	0,61	0,02

Observando-se os valores apresentados para as igrejas com utilização do sistema de som verifica-se a correcta instalação do sistema de reforço electroacústico. Em zonas muito próximas do orador, ponto 1, a diferença do RASTI obtido entre as duas fases do ensaio é pequena. À medida que os pontos se vão afastando do emissor (pontos 2 e 3), em vez de uma diminuição do RASTI, como na primeira fase, verifica-se um aumento.

Estes resultados indicam que o sistema de som está a funcionar correctamente, pois está direccionado para a audiência aumentando significativamente (principalmente no caso da igreja nova) os valores de RASTI para os pontos mais afastados e logo mais problemáticos, relativamente ao ensaio sem uso do sistema de som disponível.

O sistema de som das igrejas consiste em microfones colocados no altar e no ambão e colunas nas paredes voltadas para a audiência. Na figura 5.11 pode ver-se uma das colunas instaladas na igreja antiga da marca UNC e na figura 5.12 uma das duas únicas colunas instaladas na igreja nova da marca Axys. De realçar que esta marca de equipamentos de som pode ser encontrada também como solução para aeroportos internacionais como no Dubai, França (*Charles de Gaulle*, Paris) e Estados Unidos da América (*JFK Airport*, Nova Iorque), para estações de metro e de comboio, (Bilbao, Espanha; *Gare du Nord*, Paris, França; *Grand Central Terminal*, Nova Iorque, Estados Unidos da América; *Kings Cross Railway Station*, Londres, Inglaterra.) para diversas igrejas espalhadas pelo mundo (como por exemplo: *Notre Dame*, França; *Kipchak Mosque*, Turquemenistão; *Covington Cathedral*, EUA; *Il Duomo di Milano*, Itália; *Sain Paul's Cathedral*, Inglaterra; *Iglesia Ntra.Sra.de Begoña*, *Iglesia del Carmelo*, Espanha; Basílica do Santuário de Fátima, Casa Paroquial Vila Cova da Lixa, Cripta Santuário do Sameiro, Igreja Matriz de Caminha, Igreja Siza Vieira - Igreja Santa Maria, Portugal) teatros e salas de concerto (*The Sage Gateshead*, Inglaterra; *Auditorio Villajoyosa*, *Auditorio Torrevieja*, Espanha; Centro Cultural de Ílhavo, Casa da Música, Portugal), estádios e recintos desportivos e ainda no *Parlamento de la Rioja*, *Logronõ*, Espanha e no *Musée du Louvre*, Paris, França [43].



Figura 5.11 – Sistema de reforço electroacústico na igreja antiga [foto da autora]



Figura 5.12 – Sistema de reforço electroacústico na igreja nova [foto da autora]

## 5.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

### 5.4.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

Para a selecção dos pontos para o ensaio do Tempo de Reverberação (TR) seguiu-se a mesma lógica apresentada em 5.3., optando-se por utilizar quatro pontos espalhados pela sala na igreja antiga, sete na nave principal da igreja nova e ainda quatro pontos espalhados pela capela do Santíssimo Sacramento (Igreja Nova).

A localização dos pontos nas duas igrejas é apresentada nas figuras 5.13 e 5.14.

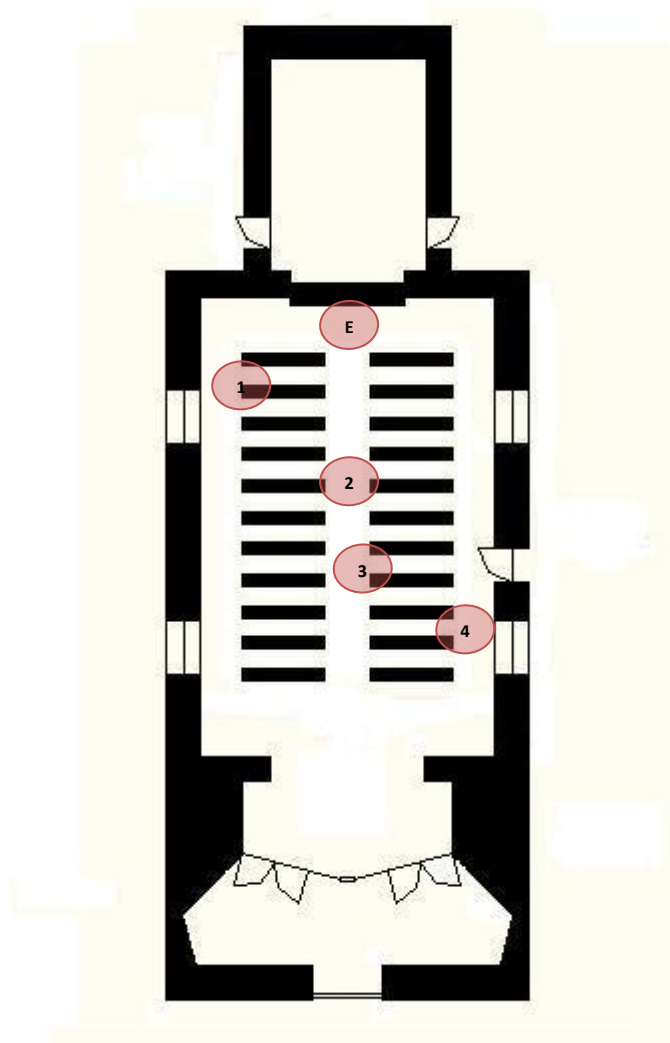


Figura 5.13 – Localização dos quatro pontos a ensaiar e fonte emissora (E) para avaliação do TR na igreja antiga.

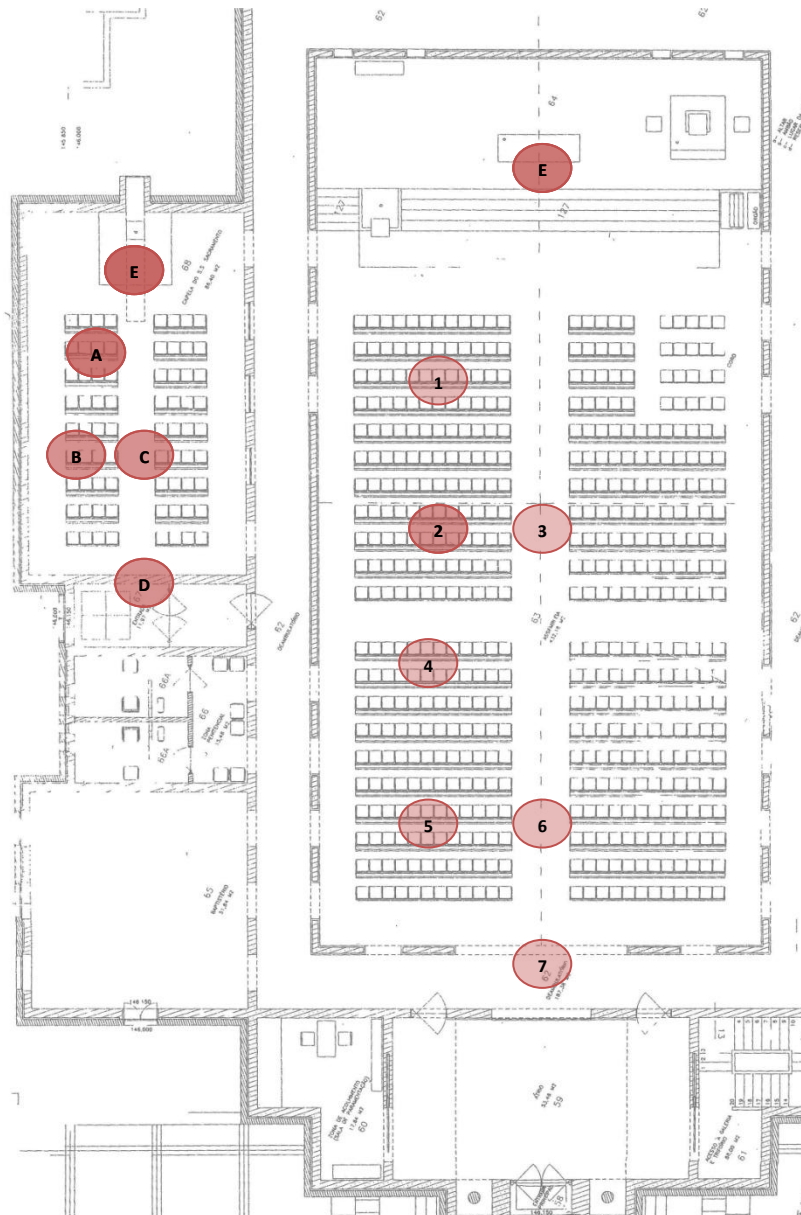


Figura 5.14 – Localização dos sete pontos a ensaiar na nave central, dos quatro na Capela do Santíssimo Sacramento e da fonte emissora (E) para avaliação do TR na igreja nova.

#### 5.4.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Para medir o tempo de reverberação das salas usou-se uma fonte sonora que emitiu um ruído de teste que varria todo o espectro frequencial de interesse de forma a assegurar que o decaimento se sobrepunha sempre ao ruído de fundo. Os decaimentos que foram registados foram os de 30 dB, os de 20 dB e o EDT que corresponde ao decaimento de 10 dB. Embora a máquina registre através destes

métodos, de decaimento mais curto que os 60 dB teóricos, o valor que é fornecido no sonómetro é o valor extrapolado para os 60 dB.

O equipamento usado foi o sonómetro modelo 2260, a fonte sonora modelo 4224 (Figura 5.16), e o tripé de fixação modelo UA0049, tudo da marca *Briuel & Kjaer*, como foi atrás referido. Todo o equipamento foi também manuseado pelo Eng. António Eduardo Costa



Figura 5.15 – Fonte emissora *B&K 4225* [Foto da autora].

#### 5.4.3. RESULTADOS

Para cada um dos pontos ensaiados foram registados os valores de TR por bandas de frequência de uma oitava dos 125 aos 4.000 Hz.

Os resultados estão presentes nos Quadros 5.14 e 5.15 e ainda nas Figuras 5.16 e 5.17.

No gráfico da Figura 5.18 apresenta-se os valores de TR<sub>médio</sub> por banda de frequência para as duas igrejas.

Quadro 5.14 – Valores medidos do Tempo de Reverberação (s) na igreja antiga.

Pontos	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	2,72	2,95	3,11	2,98	2,70	2,31
2	2,62	2,88	3,04	2,94	2,65	2,32
3	2,76	2,84	3,19	3,07	2,70	2,33
4	2,87	2,95	3,03	2,88	2,74	2,31
Média	2,74	2,90	3,09	2,97	2,69	2,32

Quadro 5.15 – Valores medidos do Tempo de Reverberação (s) na igreja nova (A a D na Capela do Santíssimo Sacramento).

Pontos	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	4,75	3,25	3,08	2,92	2,85	2,32
2	4,70	3,22	3,07	2,94	2,68	2,16
3	4,68	3,05	2,88	2,76	2,73	2,28
4	4,77	3,41	3,14	2,95	3,06	2,44
5	4,87	3,13	3,17	3,03	3,08	2,54
6	5,01	3,10	3,16	3,08	3,01	2,43
7	5,18	3,13	3,24	3,10	3,13	2,58
Média	4,85	3,18	3,11	2,97	2,93	2,39
A	3,97	2,66	2,22	2,10	2,01	1,76
B	3,35	2,58	2,07	2,11	1,92	1,71
C	4,31	2,69	2,45	2,16	2,05	1,75
D	3,88	2,54	2,19	2,06	2,04	1,75
Média	3,88	2,62	2,23	2,11	2,01	1,74

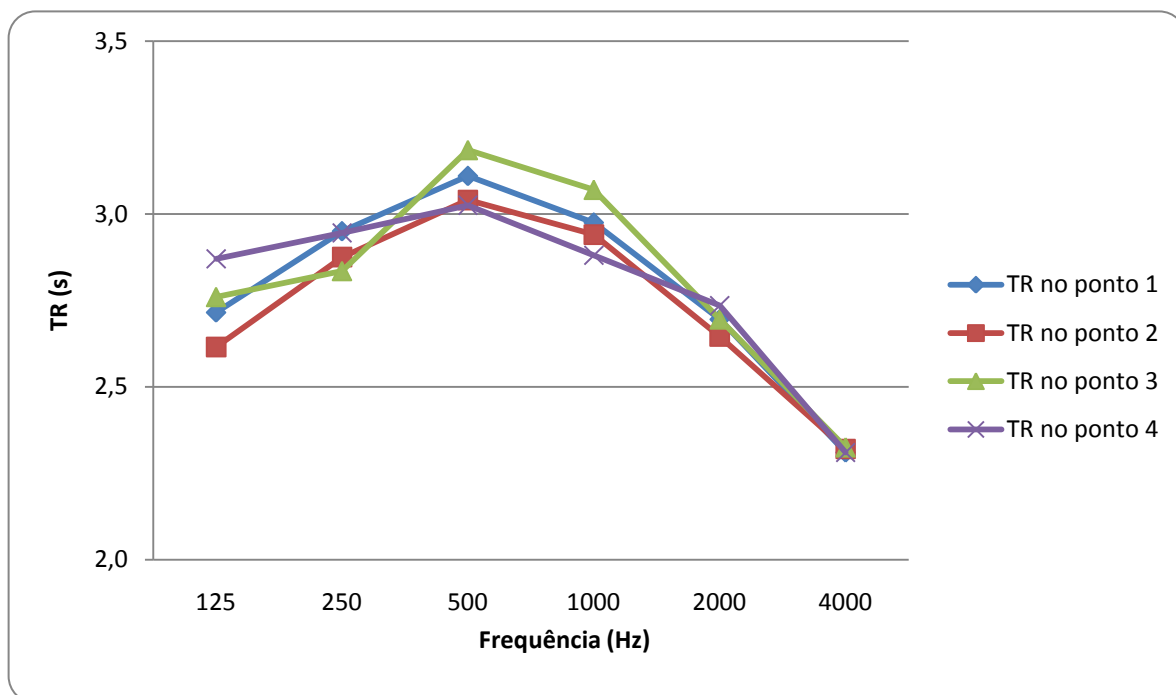


Figura 5.16 – Valores do Tempo de Reverberação por banda de frequência para todos os pontos testados na igreja antiga.

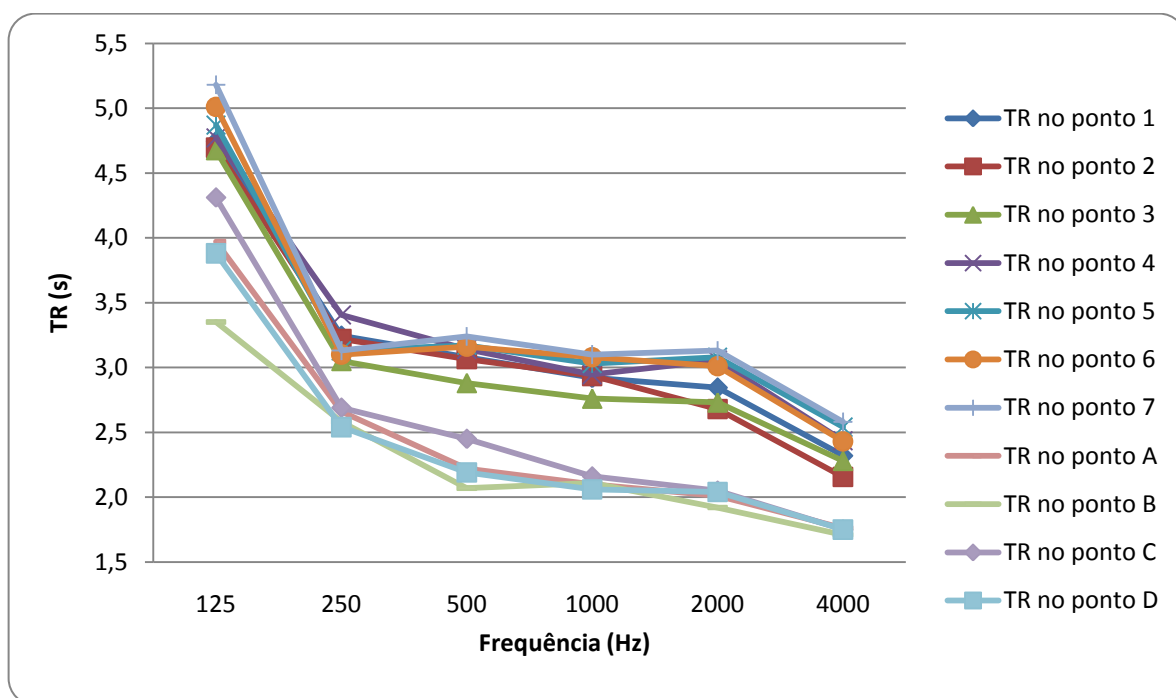


Figura 5.17 – Valores do Tempo de Reverberação por banda de frequência para todos os pontos testados na igreja nova (A a D, pontos na Capela do Santíssimo Sacramento).

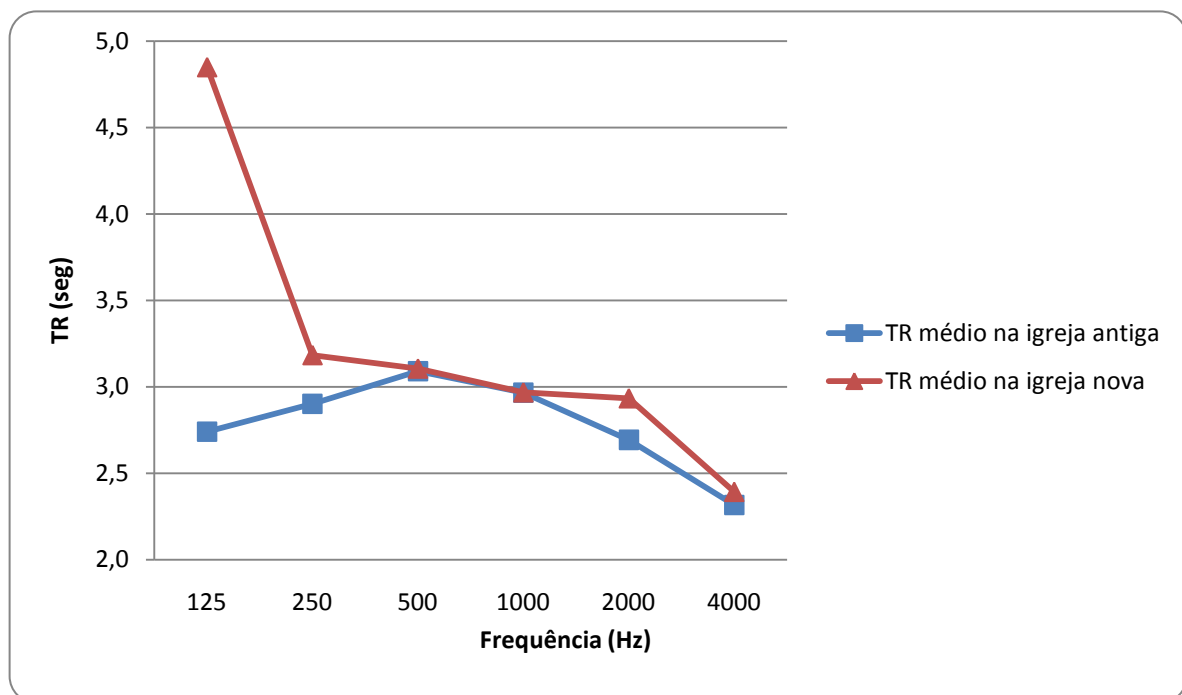


Figura 5.18 – Valores do TR médio por banda de frequência nas duas igrejas.

Como já foi referido o principal objectivo de uma igreja é a inteligibilidade da palavra, sem no entanto descuidar os requisitos acústicos para a música que acompanha as cerimónias religiosas. Os estudos sobre condições óptimas em igrejas são mais raros que os estudos em óperas e salas de concerto, o que torna a comparação de valores obtidos em medição com valores óptimos recomendados um problema ainda em aberto.

Neste estudo considerar-se-á que para haver uma boa percepção da palavra são necessários baixos tempos de reverberação entre os 0,8 e 1,0 s enquanto para a música de órgão os tempos de reverberação devem ser altos, a rondar os 2,0-2,2 s ou até mais [42].

Os valores do tempo de reverberação registados nas duas igrejas são superiores aos valores recomendados para boa percepção da palavra, mas são muito bons para a música.

Sendo que o volume da igreja nova de Santo Ovídio é cerca de 4 vezes maior do que o da igreja antiga seria de esperar que os valores do tempo de reverberação fossem também muito superiores, ou seja, esperar-se-ia que na igreja nova não houvesse boa percepção da palavra. No entanto, como se pode constatar na figura 5.16 os valores do TR para frequências superiores a 250 Hz são menores na igreja nova do que na igreja antiga, o que quer dizer que não só a igreja nova tem valores de tempo de reverberação melhores do que o que seria de esperar, como também que são mais favoráveis que os obtidos na igreja antiga, muito mais pequena. Isto só é possível devido ao tratamento acústico a que esta igreja foi submetida, tratando-se as superfícies reflectoras como foi referido no capítulo 3.

Na igreja antiga de Santo Ovídio os valores do tempo de reverberação são aproximadamente idênticos em todo o espectro de frequências. Já no caso da igreja nova, verifica-se um aumento nos valores do tempo de reverberação na banda de frequência de 125 Hz. Este valor acrescido parece ser consequência dos espaços acoplados (como a capela do Santíssimo Sacramento). Esses valores

elevados de tempo de reverberação nessa banda de frequência podem também dever-se ao baixo coeficiente de absorção sonora do *Sonapray k13* nessa mesma frequência (os valores da absorção sonora para a espessura de 32 mm apresentam-se resumidos no quadro 5.16).

Quadro 5.16 – Coeficientes de absorção do Sonapray k13 [57].

$\alpha$	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
	0,18	0,60	0,98	1,03	1,04	1,05

No entanto, muitos autores [57] referem que em grandes salas (especialmente para música), as reflexões nas baixas frequências e o TR daí consequente são subjectivamente bastante desejáveis conferindo “calor” à sala. Como se verifica na Figura 5.19, o tempo de reverberação numa grande sala deve ter um tempo de reverberação nas baixas frequências (125 Hz) superior em cerca de 25% (mas pode variar entre 15% e 60%) ao das médias/altas (1 kHz, 2 kHz e 4 kHz). Assim, a igreja nova de Santo Ovídio revela condições excelentes para a propagação de música permitindo a obtenção de um campo sonoro com “calor”.

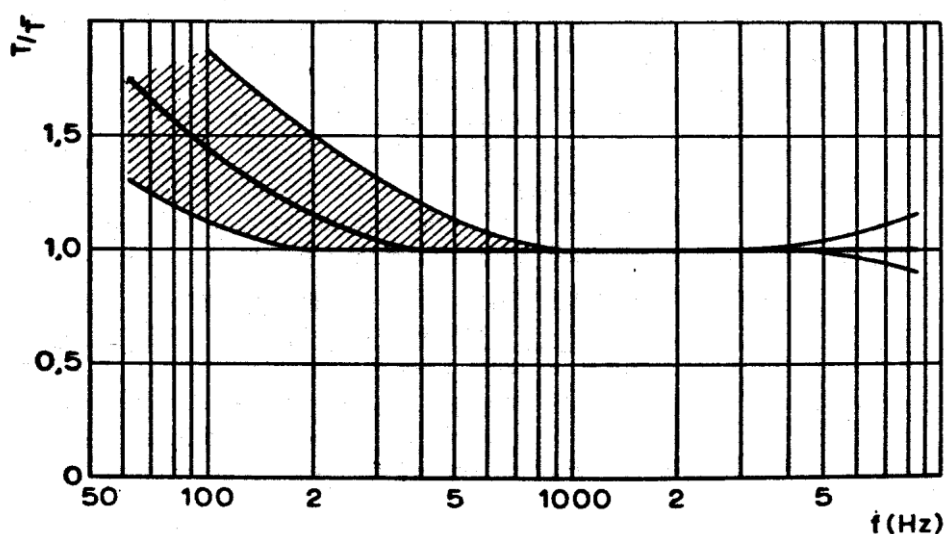


Figura 5.19 – Características de reverberação referidas aos valores nas frequências médias [74].

Figura 5.19 – Características ideais para o espectro dos valores do tempo de reverberação tendo como referência os valores nas frequências médias/altas (1 a 4 kHz) [74].

## 6

## COMPARAÇÃO DAS DUAS IGREJAS DE SANTO OVÍDIO COM IGREJAS DE VOLUMETRIA SEMELHANTE

### 6.1. COMPARAÇÃO DOS VALORES DE RASTI

#### 6.1.1. IGREJA ANTIGA DE SANTO OVÍDIO

No quadro 6.1 apresentam-se os parâmetros arquitectónicos da igreja antiga de Santo Ovídio e das igrejas portuguesas escolhidas para a comparação dos seus valores de RASTI. As igrejas foram escolhidas de acordo com o seu volume e são as seguintes: Nevogilde (Porto); S. Martinho de Cedofeita (Porto); Cête (Paredes).

Os valores relativos a estas igrejas foram retirados da tese de mestrado de Margarida Maria Mendes de Freitas de Queiroz e Lencastre “A inteligibilidade da palavra em igrejas católicas, através de análises de carácter objectivo e subjectivo” [14].

Quadro 6.1 – Parâmetros arquitectónicos da Igreja antiga de Santo Ovídio e das igrejas escolhidas para comparação dos valores de RASTI (semelhante volumetria).

Parâmetro	Santo Ovídio (Antiga)	Nevogilde	S. Martinho	Cête
Área (m <sup>2</sup> )	125	176	126	155
Volume (m <sup>3</sup> )	1543	1137	1117	1515
Altura máxima (m)	11,6	8,6	10,7	11,8
Largura média (m)	8,5	6,6	5,9	5,4

Quadro 6.2 – RASTI médio na Igreja Antiga de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante.

Igreja	RASTI médio	RASTI (Instalação Sonora) médio
Antiga Santo Ovídio (V. N. Gaia)	0,38	0,43
Nevogilde (Porto)	0,53	0,51
Cedofeita (Porto)	0,41	0,36
Cête (Paredes)	0,40	0,45

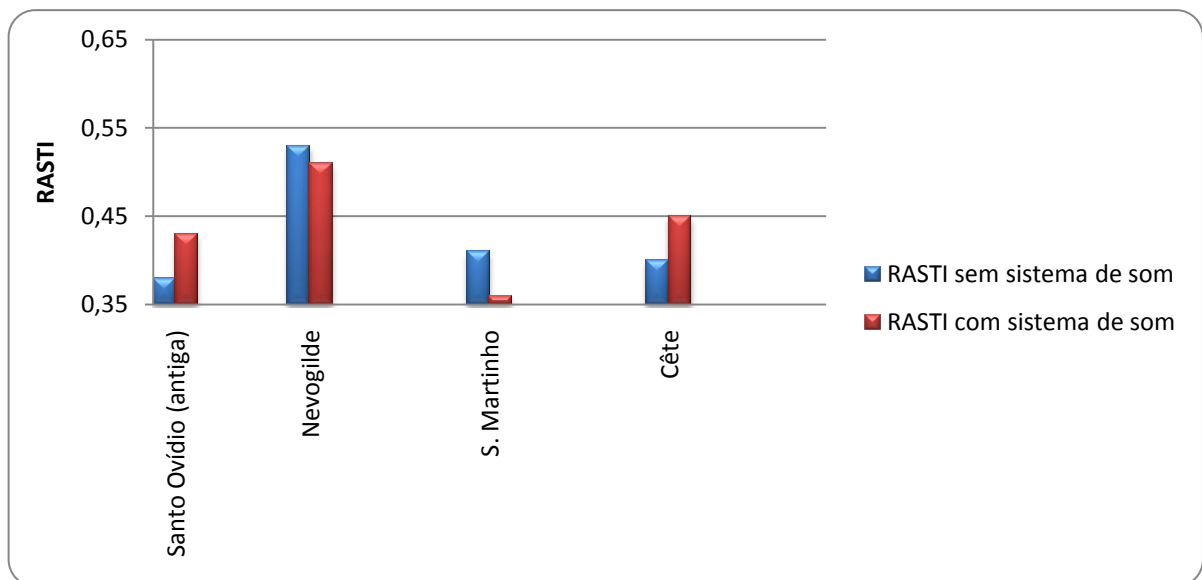


Figura 6.1 – Valores de RASTI na igreja antiga e em igrejas de volume semelhante.

De acordo com a figura 6.1 e o quadro 6.2 pode verificar-se que a igreja antiga de Santo Ovídio tem um valor baixo de RASTI quando comparada com igrejas de volume idêntico. O seu índice de inteligibilidade ultrapassa apenas o da igreja de S. Martinho de Cedofeita e de Cête e apenas se o sistema de som de Santo Ovídio estiver em funcionamento.

## 6.1.2 IGREJA NOVA DE SANTO OVÍDIO

O quadro 6.3 apresenta os parâmetros arquitectónicos da Igreja nova de Santo Ovídio e das igrejas alvos de comparação dos valores obtidos para avaliação da inteligibilidade da palavra. As igrejas, escolhidas de acordo com o seu volume, são as seguintes: Clérigos (Porto); Santíssimo Sacramento (Porto); Bustelo (Penafiel); Paço de Sousa; S. João Baptista (Porto).

Mais uma vez, os valores relativos às outras igrejas estão de acordo com os expostos na tese de mestrado de Margarida Lencastre “A inteligibilidade da palavra em igrejas católicas, através de análises de carácter objectivo e subjectivo” [14].

Quadro 6.3 – Parâmetros arquitectónicos da Igreja nova de Santo Ovídio e das igrejas escolhidas para comparação.

Parâmetro	Nova Santo Ovídio (V. N. Gaia)	Clérigos (Porto)	Stmº Sacramento (Porto)	Bustelo (Penafiel)	Paço de Sousa	S. João Baptista (Porto)
Área (m <sup>2</sup> )	432	273	510	515	546	412
Volume (m <sup>3</sup> )	5897	5130	6816	6476	6028	6048
Altura máxima (m)	14,7	20	15,5	16,1	16,8	16,7
Largura média (m)	14,8	9,5	13	12,6	15,9	9

Quadro 6.4 – RASTI médio na Igreja Nova de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante.

Igreja	RASTI médio	RASTI (Instalação Sonora) médio
Nova Santo Ovídio (V. N. Gaia)	0,53	0,62
Clérigos	0,38	0,52
Stmº Sacramento	0,38	0,41
Bustelo	0,38	0,39
Paço de Sousa	0,40	0,42
S. João Baptista	0,42	0,51

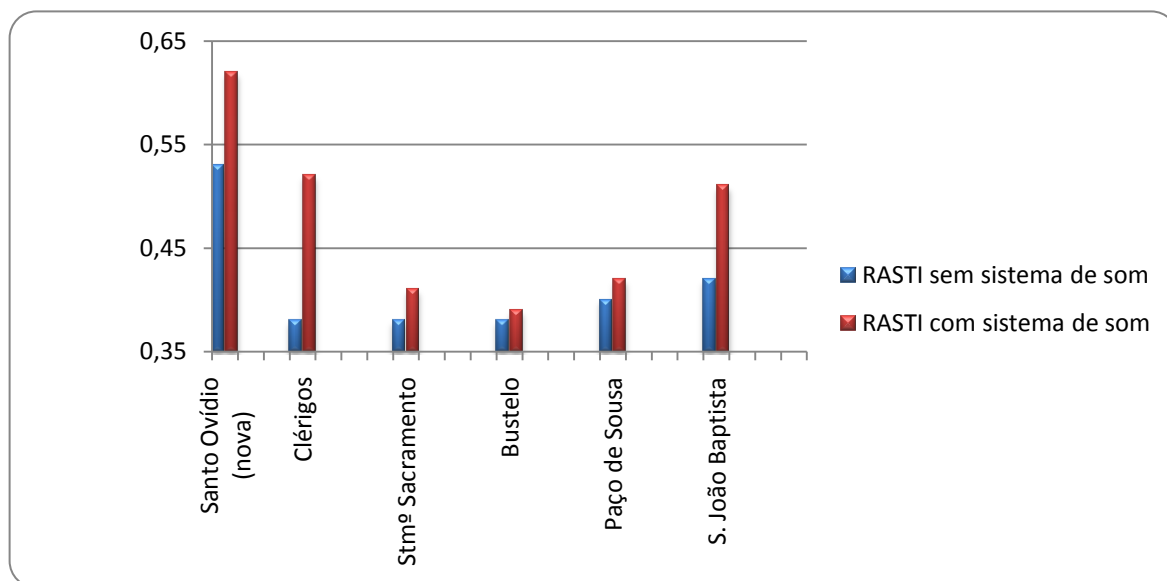


Figura 6.2 – Valores de RASTI na igreja nova e em igrejas de volume semelhante.

Como se pode verificar no quadro 6.4 e na figura 6.2, a igreja nova de Santo Ovídio quando comparada com as outras tem um índice de inteligibilidade muito bom. O valor médio de RASTI sem utilização do sistema de som nesta igreja é superior ao valor obtido pelas outras igrejas mesmo com a utilização do sistema sonoro.

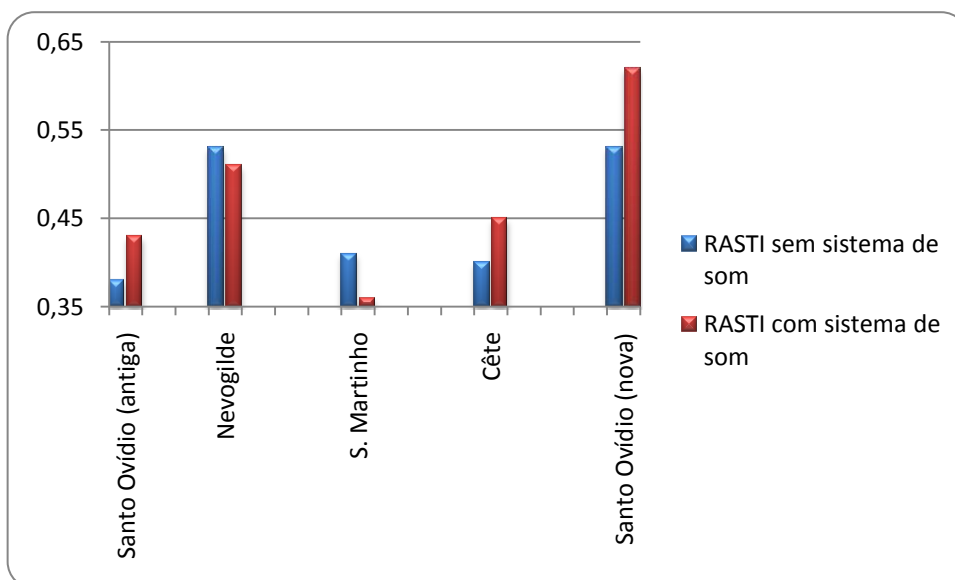


Figura 6.3 – Valores de RASTI na igreja nova e em igrejas de volume muito inferior.

A figura 6.3 mostra que a igreja nova de Santo Ovídio tem resultados superiores de RASTI mesmo quando comparada com igrejas de volume muito menor. Uma vez que aumentando o volume da sala a

inteligibilidade tem tendência a diminuir, estes resultados traduzem um bom projecto acústico da sala em questão para a função que lhe foi destinada.

## 6.2. COMPARAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO

### 6.2.1. IGREJA ANTIGA DE SANTO OVÍDIO

O quadro 6.5 apresenta os valores dos volumes da igreja antiga de Santo Ovídio e das igrejas portuguesas escolhidas para a comparação dos seus tempos de reverberação. As igrejas foram escolhidas por semelhante volumetria e são as seguintes: S. Martinho de Cedofeita (Porto); Cête (Paredes); Lourosa (Oliveira do Hospital); Mértola; São Bento de Castris (Évora); Vila do Bispo; Vila Nova de Azeitão e; Vouzela.

Esses valores retirados do programa de investigação “Acústica de Igrejas” da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [15].

Quadro 6.5 – Volumes da Igreja Antiga de Santo Ovídio e das igrejas escolhidas para posterior comparação dos valores de Tempo de Reverberação.

Parâmetro	Santo Ovídio (Antiga)	S. Martinho (Porto)	Cête	Lourosa	Mértola	S. B. Castris (Évora)	Vila do Bispo	V. N. Azeitão	Vouzela
Volume (m <sup>3</sup> )	1543	1117	1515	1163	1950	1314	1290	1239	1148

Quadro 6.6 – TR médio (500, 1k Hz) na Igreja Antiga de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante.

Igreja	TR médio (500, 1k Hz)	Igreja	TR médio (500, 1k Hz)
Antiga Santo Ovídio (V. N. Gaia)	3,0	S. B. Castris (Évora)	3,1
Cedofeita (Porto)	3,6	Vila do Bispo	1,8
Cête (Paredes)	2,3	V. N. Azeitão	2,3
Lourosa (Oliveira do Hospital)	1,6	Vouzela	1,5
Mértola	4,6		

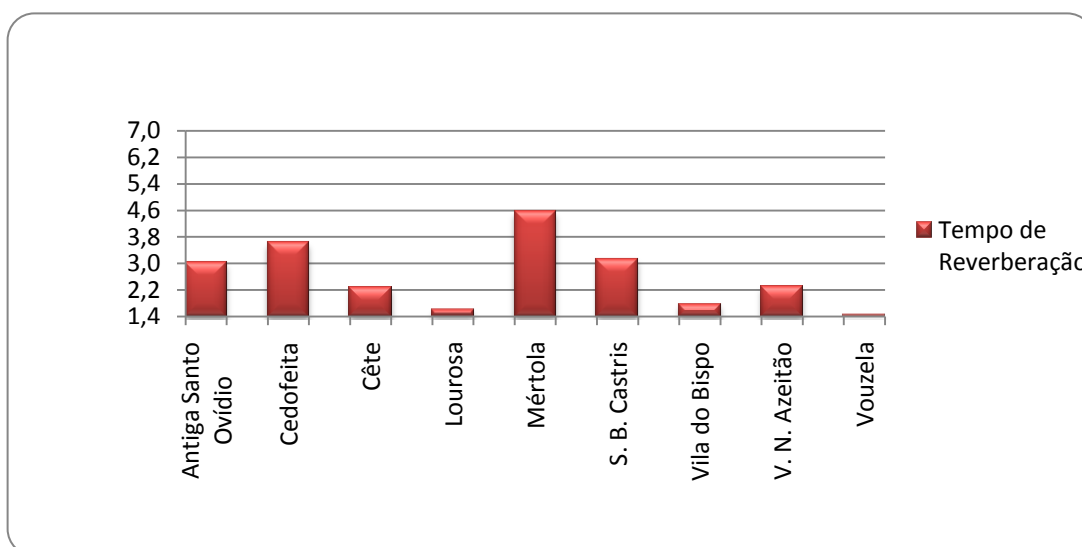


Figura 6.4 – Valores de Tempo de Reverberação médio (500, 1k Hz) na igreja antiga de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante.

De acordo com a figura 6.4 e o quadro 6.6 pode verificar-se que a igreja antiga de Santo Ovídio tem um tempo de reverberação intermédio, relativamente às outras igrejas em questão. As igrejas de Vouzela, Vila do Bispo e Lourosa têm tempos de reverberação muito inferiores, bastante favoráveis para a compreensão da palavra.

### 6.2.2. IGREJA NOVA DE SANTO OVÍDIO

No quadro 6.7 são apresentados os valores dos volumes da igreja nova de Santo Ovídio e das igrejas portuguesas escolhidas para a comparação dos seus tempos de reverberação. As igrejas, escolhidas de acordo com semelhante volumetria, são as seguintes: Bustelo (Penafiel); Clérigos (Porto); Golegã; Moura; Paço de Sousa e; Santíssimo Sacramento (Porto).

Os valores relativos a estas igrejas foram também retirados do programa de investigação “Acústica de Igrejas” da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [15].

Quadro 6.7 – Volumes da Igreja Nova de Santo Ovídio e das igrejas escolhidas para comparação dos valores de Tempo de Reverberação.

Parâmetro	Santo Ovídio (Nova)	Bustelo	Clérigos (Porto)	Golegã	Moura	Paço Sousa	Sto Sacramento (Porto)
Volume (m <sup>3</sup> )	5897	6476	5130	5563	6300	6028	6816

Quadro 6.8 – TR médio (500, 1k Hz) na Igreja Nova de Santo Ovídio e em igrejas de volume semelhante.

Igreja	TR	Igreja	TR
Nova Santo Ovídio (V. N. Gaia)	3,2	Moura	6,6
Bustelo (Penafiel)	4,1	Paço de Sousa	2,9
Clérigos (Porto)	3,4	Santíssimo Sacramento (Porto)	5,0
Golegã	3,6		

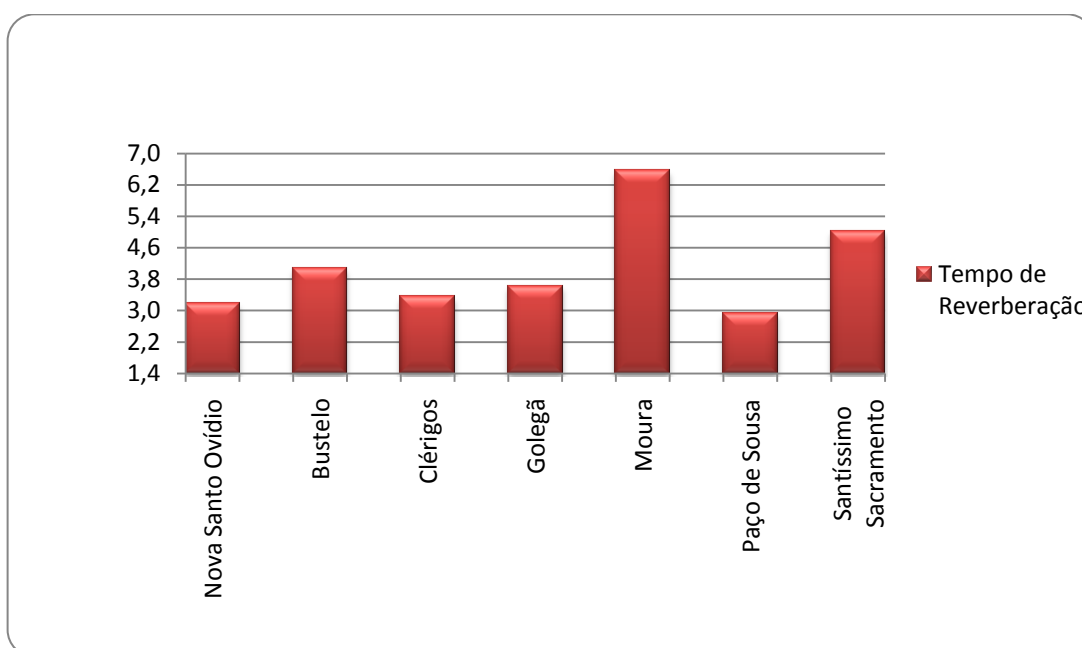


Figura 6.5 – Valores de Tempo de Reverberação médio (500, 1k Hz) na igreja nova e em igrejas de volume semelhante.

De acordo com a figura 6.4 e o quadro 6.8 pode verificar-se que a igreja antiga de Santo Ovídio tem um tempo de reverberação baixo, em relação ao valor obtido nas outras igrejas em questão. A igreja de Paço de Sousa, que tem maior volume que a igreja de Santo Ovídio, detém o menor tempo de reverberação, tornando o espaço mais propício para a compreensão da palavra.



## 7

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1 CONCLUSÕES

Este estudo tinha como principal objectivo, caracterizar acusticamente, através de parâmetros objectivos, o interior das duas Igrejas de Ovídio em Vila Nova de Gaia. Pretendia-se ensaiar *in situ* esse espaço em três parâmetros acústicos. Esses parâmetros foram escolhidos por serem vitais para caracterizar objectivamente o interior da igreja.

Além da caracterização, o estudo teve também como objectivo, comparar os valores obtidos entre elas e com outras igrejas de volumetria semelhante.

Os parâmetros acústicos escolhidos para análise no presente trabalho foram o Ruído de Fundo, analisado com os parâmetros L e  $L_A$ ; Inteligibilidade da Palavra, analisada com o RASTI e a Reverberação, avaliada com o TR.

Os resultados obtidos estão presentes no Quadro 7.1. que serve como resumo dos ensaios efectuados ao longo deste estudo.

Quadro 7.1 – Quadro-resumo dos valores medidos

Parâmetros	Igreja Antiga Santo Ovídio	Igreja Nova Santo Ovídio
<b>Ruído de Fundo no interior</b> (devido ao ambiente exterior) $L_{Aeq}$ (dB)	51	30
<b>Tempo de Reverberação</b> (igreja vazia) $TR$ 500-1k Hz médio (s)	3,0	2,7
<b>Inteligibilidade da Palavra</b> ( $RASTI$ médio)		
Sem instalação sonora	0,38	0,53
Com instalação sonora	0,43	0,62

Os resultados obtidos podem ser interpretados subjectivamente como se apresenta no quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Quadro-resumo da qualidade subjectiva dos valores medidos

Qualidade Subjectiva	Igreja Antiga Santo Ovídio	Igreja Nova Santo Ovídio
<b>Ruído de Fundo no interior</b> (devido ao ambiente exterior)	Inadequado	Excelente
<b>Reverberação</b>		
Para a Palavra	Mau	Suficiente
Para a Música (cânticos)	Bom	Bom
<b>Inteligibilidade da Palavra</b>		
Sem instalação sonora	Mau	Suficiente
Com instalação sonora	Medíocre	Bom

Assim, conclui-se relativamente ao Ruído de Fundo, que a igreja antiga de Santo Ovídio têm um ruído de fundo inadequado, uma vez que o seu valor é bastante elevado (51 dB (A)). Conclui-se também que a igreja nova de Santo Ovídio tem condições excelentes no que respeita ao ruído de fundo, pois tem um valor de  $L_{Aeq}$  muito baixo (30 dB).

Relativamente ao parâmetro Tempo de Reverberação (TR), as duas igrejas de Santo Ovídio obtiveram para TR (500-1000 Hz) valores de 3,0 s e 2,7 s, na igreja antiga e na igreja nova, respectivamente. Assim, e na perspectiva da percepção da palavra, considera-se que a igreja antiga de Santo Ovídio é má e a igreja nova obtém a classificação de suficiente. Para a música, ambas as igrejas têm bons resultados quanto à reverberação.

Da análise do TR conclui-se ainda que os materiais usados e dispositivos acústicos montados, na igreja nova foram suficientes para contrariar as iniciais características arquitectónicas muito desfavoráveis a um bom desempenho acústico deste espaço. A lembrar que esta igreja tem um volume aproximadamente 4 vezes superior ao volume da igreja antiga pelo que seria de esperar resultados de TR muito superiores. Estes resultados reflectem o bom trabalho que foi feito no espaço e no dimensionamento e instalação do sistema de som, permitindo haver boa percepção da palavra em toda a audiência.

Da avaliação do RASTI resultaram os valores de 0,38 e de 0,53, na igreja antiga e na nova respectivamente, para RASTI (sem sistema de som), e 0,43 e 0,62 para RASTI (com sistema de som).

A Igreja Antiga de Santo Ovídio pode então classificar-se, segundo a escala subjectiva de inteligibilidade da palavra normalizada (Quadro 5.5) com “Má Inteligibilidade da Palavra” quando tem o reforço electroacústico desligado e “Medíocre Inteligibilidade da Palavra” quando o tem ligado.

A Igreja Nova de Santo Ovídio ser classificada, de acordo com o mesmo quadro (Quadro 5.5) com “Suficiente Inteligibilidade da Palavra” quando tem o reforço electroacústico desligado e “Boa Inteligibilidade da Palavra” quando o tem ligado.

Em comparação com outras igrejas portuguesas de volume semelhante (capítulo 6), a Igreja Antiga de Santo Ovídio tem os resultados piores em relação a todos os parâmetros, por outro lado, a Igreja Nova de Santo Ovídio tem os melhores resultados mesmo quando comparada com igrejas de volume 4 vezes inferior.

## 7.2 OPINIÃO DOS UTILIZADORES

O quadro 7.3 apresenta de forma sintética as opiniões dos utilizadores das igrejas de Santo Ovídio obtidas através do diálogo com o pároco de Santo Ovídio, Sr. Padre Queirós

Quadro 7.3 – Quadro-resumo da opinião dos utilizadores.

Qualidade Subjectiva (opinião dos utilizadores)	Igreja Antiga	Igreja Nova
<b>Ruído de Fundo no interior</b> (devido ao ambiente exterior)	Mau	Excelente
<b>Reverberação</b>		
Para a Palavra	Mau	Bom
Para a Música (cânticos)	Suficiente	Excelente
<b>Inteligibilidade da Palavra</b>		
Sem instalação sonora	Mau	Bom
Com instalação sonora	Medíocre	Muito Bom

Como se pode verificar (quadros 7.32 e quadro 7.3) as opiniões dos utilizadores vão de encontro aos resultados obtidos nos ensaios, notando-se, porém nalguns casos, talvez um certo exagero linguístico.

O Sr. Padre Queirós referiu que as muitas queixas de elevado ruído de fundo e de incompreensão da palavra na igreja antiga foram impulsionadoras da decisão de construção da igreja nova. Mencionou também que estas queixas se mantiveram, mesmo após a instalação do reforço electro-acústico.

Relativamente à igreja nova os relatos foram mais positivos, especialmente no que toca à aptidão das características da igreja nova para a audição de música.

## 7.3 PISTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De modo a completar este estudo, poderiam ser ensaiados no futuro, outros parâmetros como a Claridade ( $C_{80}$ ), a Definição ( $D_{50}$ ), o Tempo Central (TS), a percentagem de perda de consoantes (ALCONS) e o TR com auditores dentro das Igrejas de modo a otimizar a sua classificação através de métodos multi-critério.

Outro desenvolvimento a efectuar seria a obtenção de parâmetros acústicos subjectivos, com grupos de auditores e a recolha de informação sobre as opiniões dos utilizadores dos espaços. Esta recolha poderia confirmar a disparidade de valores entre uma e outra igreja quer no que respeita ao ruído de fundo, quer ao índice de inteligibilidade da palavra.

Após o término deste estudo fica a ideia que é possível obter bons resultados a nível de conforto acústico mesmo num espaço vasto, desde que seja feito um estudo adequado.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://avozdegaia.wordpress.com/2008/09/18/festas-de-santo-ovidiohistoria-de-mafamude/> acessado em Setembro de 2009.
- [2] <http://www.evangelhoquotidiano.org/> acessado em Setembro de 2009.
- [3] “AUDENZIO di TOLEDO-AUDOMARO di THÉROUANNE” AUDITO (port. Ouvido) de Braga, santo.
- [4] <http://www.santibeati.it/dettaglio/91134> acessado em Setembro de 2009.
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Saint\\_Ovidius](http://en.wikipedia.org/wiki/Saint_Ovidius) acessado em Setembro de 2009.
- [6] <http://br.geocities.com/resumodefisica/acustica/> acessado em Setembro de 2009.
- [7] Silva, Sandra Monteiro; Almeida, Manuela Guedes. *Climatização e Instalações das Construções II – Acústica*. Universidade do Minho Escola de Engenharia. Data desconhecida.
- [8] [http://chracustica.zip.net/arch2008-09-07\\_2008-09-13.html](http://chracustica.zip.net/arch2008-09-07_2008-09-13.html) acessado em Outubro de 2009.
- [9] <http://br.geocities.com/resumodefisica/acustica/acu11.htm> acessado em Outubro de 2009.
- [10] <http://maps.google.com/> acessado em Outubro de 2009.
- [11] <http://www.engineeringtoolbox.com> acessado em Outubro de 2009.
- [12] CEI IEC 268-16, Rapport de la Commission Electrotechnique Internationale. *Equipements pour systèmes électroacoustiques – seizième partie: Evaluation objective de l’intelligibilité de la parole dans les salles de conférence par le méthode RASTI* “. 1988.
- [13] Morgado, A. E. Jorge. *Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas por Parâmetros Subjectivos* - Dissertação de Mestrado – FEUP. Setembro de 1996.
- [14] Lencastre, Margarida. *A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de análises de carácter Objectivo e Subjectivo* - Dissertação de Mestrado – FEUP. 1998.
- [15] Carvalho, A. P. Oliveira de. *Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*. (Doctoral Dissertation) University of Florida. Dezembro 1994.
- [16] Sendra, J.J. *Computational acoustics in architecture* - Wit Pr/Computational Mechanics. Sevilha. 1999.
- [17] <http://www.spainparador.com/Parador-Cardona.htm> acessado em Novembro de 2009.
- [18] [http://architecturetraveljournal.blogspot.com/2008\\_02\\_01\\_archive.html](http://architecturetraveljournal.blogspot.com/2008_02_01_archive.html) acessado em Novembro de 2009.
- [19] [http://rubens.anu.edu.au/new/books\\_and\\_papers/classical\\_tradition\\_book/chap7.html](http://rubens.anu.edu.au/new/books_and_papers/classical_tradition_book/chap7.html) acessado em Novembro de 2009.
- [20] [http://home.nordnet.fr/~ajuhel/Surfaces/quad\\_archi\\_cyl.html](http://home.nordnet.fr/~ajuhel/Surfaces/quad_archi_cyl.html) acessado em Novembro de 2009.
- [21] <http://kierandmurray.com/page9.htm> acessado em Novembro de 2009.
- [22] <http://popturismo.wordpress.com/2006/11/27/> acessado em Novembro de 2009.
- [23] [www.arquitetura-religiosa.arq.br/doc/artigo02.doc](http://www.arquitetura-religiosa.arq.br/doc/artigo02.doc) acessado em Novembro de 2009.
- [24] <http://www.priberam.pt/DLPO/default.aspx?pal=abside> acessado em Novembro de 2009.
- [25] Veronica Aparecida Silveira Aguiar. *A pregação franciscana segundo as Regulae e Testamentum*. Anais do XIX Encontro Regional de História: Poder, Violência e Exclusão. ANPUH/SP – USP. São Paulo, 08 a 12 de Setembro 2008.
- [26] Formula Instituti – Centrum Ignatianum Spiritualitas, Roma, 1981.
- [27] Constituições da Companhia de Jesus, Lisboa, 1975.
- [28] Regulae Concionatorum – Institutum Societatis Iesu. Vol. Tertium, Florentiae, 1893.
- [29] Canones Congregationum generalium Societatis Iesu, Romae, 1606.
- [30] Compendium privilegiorum et gartiarum Societatis Iesu, Romae, 1615.

- [31] Tratado Breve del modo de predicar el Santo Evangelio in Tratado Espirituales de San Francisco de Borja, Roma, 1964.
- [32] Kepler, Johannes. *Astronomia nova*, 1609.
- [33] Kircher, Athanasius. *Phonurgia nova, sive conjugium mechanico-physicum artis & natvrae paranympha phonosophia concinnatum*. 1673.
- [34] Bösel, Richard and Frommel, Christoph L., eds. *Borromini e l'universo barocco*. Milan, 2000.
- [35] Meek, H.A. *Guarino Guarini and His Architecture*. New Haven, 1988.
- [36] Cirillo, Ettore; Martellotta, Francesco. *Worship, Acoustics, and Architecture*. 2007.
- [37] Sant'ana, David Queiroz de. *Avaliação Acústica de Edifícios Religiosos - Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná*. 2008.
- [38] Raes A.C., Sacerdote G.. *Measurement of the Acoustical Properties of Two Roman Basilicas*. (1953).
- [39] Carvalho, António Pedro O.. *The Use Of The Sabine And Eyring Reverberation Time Equations To Churches*. 129th meeting of the Acoustical Society of America, Washington DC, 1995.
- [40] Cirillo E.; Martellotta F.. *Acoustics of Apulian-Romanesque Churches: Correlations Between Architectural and Acoustic Parameters*. 2003.
- [41] Cirillo E, Martellotta F.. *Sound propagation and energy relations in churches*. 2005.
- [42] Carvalho, António Pedro O.. *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Edição 7.0. FEUP. 2008.
- [43] <http://www.duran-audio.com.pt/pt/install.html> acedido em Dezembro de 2009.
- [44] Galindo, Miguel; Zamarreño, Teófilo; Giron, Sara. *Measured acoustic parameters versus predicted ones in two mudejar-gothic churches*. 1999.
- [45] Desarnaulds, Victor. *De l'acoustique des églises en Suisse : une approche pluridisciplinaire*. 2002.
- [46] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Franciscanos> acedido em Janeiro de 2010.
- [47] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Dominicanos> acedido em Janeiro de 2010.
- [48] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Leon\\_Battista\\_Alberti](http://pt.wikipedia.org/wiki/Leon_Battista_Alberti) acedido em Janeiro de 2010.
- [49] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Brunelleschi> acedido em Janeiro de 2010.
- [50] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Conc%C3%ADlio\\_de\\_Trento](http://pt.wikipedia.org/wiki/Conc%C3%ADlio_de_Trento) acedido em Janeiro de 2010.
- [51] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Contra-Reforma> acedido em Janeiro de 2010.
- [52] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Johannes\\_Kepler](http://pt.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler) acedido em Janeiro de 2010.
- [53] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Athanasius\\_Kircher](http://pt.wikipedia.org/wiki/Athanasius_Kircher) acedido em Janeiro de 2010.
- [54] Sullivan, Louis H.. *The tall office building artistically considered*. Março, 1896.
- [55] Shankland, R. S. and H. K. Shankland. *Acoustics of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome*. 1971.
- [56] <http://www.vibrasom.ind.br/imagens/tabela-nivel-sonoro.jpg> acedido em Janeiro de 2010.
- [57] <http://www.stier-acustica.com/html/sonaspray.html> acedido em Janeiro de 2010.
- [58] Knudsen, V.O.. *Architectural Acoustics*. 1932



