

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA IGREJA DE NOSSA SENHORA DOS NAVEGANTES, LISBOA

Pedro Miguel Morais Morgado Almeida Ferreira

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 2024

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2023/2024

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2023/2024 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2024.*

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

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

A meus Pais, Família e Amigos

O sucesso não vale nada se não temos alguém para partilhá-lo.

Anthony Robbins

AGRADECIMENTOS

É com profundo agradecimento que dedico estas palavras a todos aqueles que tornaram possível a realização desta dissertação, marcando uma etapa significativa no meu percurso académico.

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, pelas horas disponibilizadas, pela dedicação, empenho, exigência, pelas sugestões e simpatia que sempre demonstrou ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro António Eduardo Costa, expresso a minha mais sincera gratidão não apenas pela sua contribuição fundamental na realização das medições acústicas na Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, mas também pela sua disponibilidade e simpatia que sempre demonstrou.

À InAcoustics, expresso o meu agradecimento pelas informações fornecidas acerca do projeto, assim como pela disponibilidade em esclarecer dúvidas.

A toda a estrutura da Paróquia de Nossa Senhora dos Navegantes que me recebeu, especialmente ao Cónego Paulo Franco que permitiu a realização deste trabalho.

Aos meus amigos que estiveram sempre comigo ao longo de todo este percurso e me ajudaram de uma forma ou outra. São amizades que levo para a vida.

Por último, um agradecimento à minha família, especialmente aos meus pais que nunca me abandonaram durante todo o meu percurso, pela compreensão, pelo esforço, pelo apoio e pelo incentivo necessário para que conseguisse acabar esta linda jornada académica com sucesso.

A todos,

O meu sincero obrigado.

RESUMO

Atualmente cada vez mais se dá importância à acústica dos edifícios para que o utilizador tenha uma melhor experiência assim que entre nele. A presente dissertação foi elaborada com o intuito de fazer uma caracterização acústica da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, situada na cidade de Lisboa. É um edifício relativamente recente sendo que as suas obras se iniciaram em 2013 e culminaram num templo com uma estrutura circular com uma torre de com cerca de 40 metros de altura. Uma igreja moderna do século XXI e com uma aparência notável.

Neste caso de estudo o objetivo final é a caracterização dos aspetos mais significativos da acústica relativamente a este espaço. A igreja é um local público de culto onde as pessoas fazem as suas orações e em certos momentos ouvem um orador e é fundamental que todos os presentes tenham a perceção das palavras proferidas pelo que deve garantir uma boa inteligibilidade da palavra. É importante também assegurar a ausência de ruído de fundo, que se possa tornar incomodativo, especialmente para as situações de oração individual. Tem também momentos musicais presentes durante a missa o que também faz parte do campo acústico e será tido em conta na sua caracterização.

Foram realizados vários ensaios *in situ* neste edifício e posteriormente foram analisados os seguintes parâmetros: nível sonoro de ruído de fundo (Leq e LAeq), tempo de reverberação (TR), STI (*Speech Transmission Index*), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central (TS). Todos os parâmetros foram obtidos com a igreja desocupada e em vários pontos. Já o ruído de fundo foi analisado sem o funcionamento dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) pois a igreja não os possui.

Com base nos valores obtidos e parâmetros é possível realizar um diagnóstico das condições acústicas do edifício e perceber se a igreja em causa possui as capacidades para ter um bom desempenho acústico para as suas funcionalidades.

Quanto ao Tempo de Reverberação TR [500, 1k Hz], foi alcançado um valor médio de 2,0 segundos. No que diz respeito ao *Speech Transmission Index* (STI), foram obtidos os seguintes valores médios: 0,44 (sistema de som desativado) e 0,54 (sistema de som ativado). O valor médio do nível de pressão sonora (Leq) do ruído de fundo foi de 56 dB, enquanto o valor médio do nível sonoro (LAeq) do ruído de fundo foi de 32 dB. Relativamente à Claridade, o valor médio de C_{80} [500,1k Hz] é de 0,5 dB. Assim como o STI, na Definição também foram registados valores médios para o sistema de som desligado (D_{50} [500,1k Hz] de 0,37) e sistema de som ligado (D_{50} [500,1k Hz] de 0,43). O último valor medido foi o Tempo Central, com um resultado médio de 125 milissegundos para TS [500,1k Hz]. No capítulo 7, procedeu-se a comparações com igrejas do mesmo estilo arquitetónico (contemporâneo) e com igrejas de volumetria semelhante de todas as épocas. Por último serão sugeridos temas para possíveis desenvolvimentos futuros tendo em conta as conclusões retiradas da análise deste caso de estudo com o intuito de ampliar o conhecimento e conceber projetos com qualidade a nível acústico.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Igreja, STI, Tempo de Reverberação, Ruído de Fundo.

ABSTRACT

Currently, there is an increasing emphasis on the acoustic properties of buildings to enhance the user experience upon entering them. This dissertation was prepared with the aim of acoustically characterizing the *Igreja da Nossa Senhora dos Navegantes*, located in Lisbon. It is a relatively recent building, with construction starting in 2013, resulting in a circular structure with a tower approximately 40 meters high. A modern 21st-century church with a notable appearance.

In this case study, the ultimate goal is to characterize the most significant aspects of acoustics concerning this space. The church serves as a public place of worship where individuals pray and, at certain times, listen to a speaker. It is crucial that all presents have a clear perception of the spoken words, ensuring good speech intelligibility. It is also important to ensure the absence of background noise that could become disruptive, especially during moments of individual prayer. Musical elements are also present during the mass, contributing to the acoustic environment and considered in its characterization.

Several in-situ tests were conducted in this building, followed by the analysis of the following parameters: background noise level (Leq and LAeq), Reverberation Time (TR), Speech Transmission Index (STI), Clarity (C_{80}), Definition (D_{50}), and Central Time (TS). All parameters were obtained with the church unoccupied, at various points. Background noise was analyzed without the operation of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems, as the church does not have them.

Based on the values obtained and parameters analyzed, it is possible to diagnose the acoustic conditions of the building and determine if the church in question has the capacity for good acoustic performance in its functions. Regarding the Reverberation Time, an average value of TR [500, 1k Hz] of 2.0 seconds was achieved. In terms of the Speech Transmission Index (STI), the following average values were obtained: 0.44 (sound system off) and 0.54 (sound system on). The average level of background noise (Leq) was 56 dB, while the average sound level (LAeq) of background noise was 32 dB. Concerning clarity, the C_{80} value [500, 1k Hz] is 0.48 dB. Similar to STI, definition values were recorded for the sound system off (D_{50} [500, 1k Hz] of 0.37) and sound system on (D_{50} [500, 1k Hz] of 0.43). Another measured value was the central time, with a result of 125 milliseconds for TS [500, 1k Hz]. In Chapter 7, comparisons were made with churches of the same architectural style (contemporary) and also similar volumetry with all time churches. Finally, suggestions for future development topics are provided, considering the conclusions drawn from the analysis of this case study, aiming to enhance knowledge and design projects with higher acoustic quality.

KEYWORDS: Acoustics, Church, STI, Reverberation Time, Background Noise.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE QUADROS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.3. ESTRUTURA DA TESE	2
2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR	4
2.3. CELERIDADE	5
2.4. INTENSIDADE SONORA	5
2.5. POTÊNCIA SONORA	6
2.6. NÍVEIS SONOROS	6
2.7. FREQUÊNCIA	7
2.7.1. DEFINIÇÃO E UNIDADES	7
2.7.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA	8
2.7.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO	8
2.7.4. COMPRIMENTO DE ONDA	10
2.8. ABSORÇÃO SONORA	11
2.9. RUÍDO DE FUNDO	12
2.10. CURVAS DE INCOMODIDADE	12
2.11. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	13
2.12. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	15
2.13. CLARIDADE	16
2.14. DEFINIÇÃO	16
2.15. TEMPO CENTRAL	17
2.16. RÁCIOS DE BAIXOS	17
3 ACÚSTICA DE IGREJAS	19
3.1. A IGREJA CATÓLICA	19

3.1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO.....	19
3.1.2. EVOLUÇÃO ARQUITETÓNICA DAS IGREJAS CATÓLICAS.....	20
3.1.3. AS IGREJAS E A ACÚSTICA.....	20
3.1.4. CASOS DE ESTUDO RELEVANTES.....	21
3.2. PROBLEMAS ACÚSTICOS EM IGREJAS.....	24
3.2.1. INTRODUÇÃO.....	24
3.2.2. CASO DE ESTUDO - “PREZIOSISSIMO SANGUE DI GESÙ”, RAGUSA ITÁLIA.....	25
3.3. LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL.....	26
4 IGREJA DE NOSSA SENHORA DOS NAVEGANTES	29
4.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	29
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA IGREJA DE NOSSA SENHORA DOS NAVEGANTES	30
5 METODOLOGIA DOS ENSAIOS	41
5.1. INTRODUÇÃO.....	41
5.2. RUÍDO DE FUNDO	43
5.2.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO.....	43
5.2.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR.....	43
5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	45
5.3.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO.....	45
5.3.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR.....	46
5.4 <i>SPEECH TRANSMISSION INDEX</i> / CLARIDADE / DEFINIÇÃO / TEMPO CENTRAL	47
5.4.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO.....	47
5.4.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR.....	48
6 RESULTADOS	49
6.1. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO RUÍDO DE FUNDO	49
6.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	51
6.3. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO STI.....	58
6.4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA CLARIDADE	59
6.5. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA DEFINIÇÃO.....	61
6.6. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO TEMPO CENTRAL.....	64
7 COMPARAÇÃO COM OUTRAS IGREJAS.....	67
7.1. COMPARAÇÃO COM IGREJAS PORTUGUESAS CONTEMPORÂNEAS	67
7.1.1. LISTA DE IGREJAS E PARÂMETROS	67
7.1.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	68
7.1.3. Comparação do RASTI/STI	69

7.1.4. COMPARAÇÃO DA CLARIDADE, DEFINIÇÃO E TEMPO CENTRAL	71
7.2. COMPARAÇÃO DOS VALORES COM IGREJAS PORTUGUESAS DE VOLUME SEMELHANTE	74
7.2.1. LISTA DE IGREJAS E PARÂMETROS	74
7.2.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	76
7.2.3. COMPARAÇÃO DO RASTI/STI	78
7.2.4. COMPARAÇÃO DA CLARIDADE, DEFINIÇÃO E TEMPO CENTRAL	80
8 CONCLUSÃO	83
8.1 CONCLUSÕES.....	83
8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Esquema do ouvido humano. [2]	3
Fig. 2.2 – Propagação do som. [1].....	4
Fig. 2.3 - Variações de pressão e onda sonora. [3]	5
Fig. 2.4 – Gamas de frequências (humanos). [4].....	7
Fig. 2.5 – Curva de igual sensibilidade auditiva (em fone) [5]	9
Fig. 2.6 – Curvas de ponderação (filtros) A, B, C e D. [6].....	9
Fig. 2.7 – Curvas de incomodidade NC (<i>Noise Criterion</i>) [9]	13
Fig. 2.8 – Curvas de incomodidade NR (<i>Noise Rating</i>) [10]	13
Fig. 2.9 – Som direto e som refletido [12]	14
Fig. 2.10 – Definição do Tempo de Reverberação (Valor teórico na foto da esquerda e extrapolação do declive na foto da direita). [46].....	14
Fig. 3.1 – Concílio Vaticano II [17].....	20
Fig. 3.2 - Valores médios de tempos de reverberação das igrejas relacionados com o grupo arquitetónico, com barra de erro padrão. (1-Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4- Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico, 8-Contemporâneo) [19].....	22
Fig. 3.3 – Valores do RASTI associados a cada estilo arquitetónico estudado, com barra de erro de desvio. (1-Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6- Barroco, 7-Neoclássico, 8-Contemporâneo) [19].....	23
Fig. 3.4 – Valores do RASTI em função da distância à fonte sonora (Altar) com regressões lineares de cada estilo arquitetónico. (1-Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5- Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico, 8-Contemporâneo) [19]	24
Fig. 3.5 - (À esquerda) planta da igreja e (à direita) interior da igreja com vista para o Altar. [27]	25
Fig. 3.6 – a) Tempo de Reverberação, b) <i>Early Decay Time</i> (EDT), c) Claridade (C_{80}) e d) Definição (D_{50}) [27].....	26
Fig. 3.7 – Valores médios dos índices após correção acústica: Valor inicial (ponto), Painéis de lâ de rocha (contínua), Painéis micro perfurados (tracejado). A) Tempo de Reverberação, b) <i>Early Decay Time</i> (EDT), c) Claridade (C_{80}) e d) Definição (D_{50})	26
Fig. 4.1 e 4.2 – (À esquerda) Sr. Cardeal-Patriarca de Lisboa, D. Manuel Clemente à data da construção da igreja e (à direita) Cónego Paulo Franco, pároco do Parque das Nações. [34] [33]	30
Fig. 4.3 – Entrada principal da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [36].....	30
Fig. 4.4 – Vista lateral da torre da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [36]	31
Fig. 4.5 – Vista aérea 3D da localização da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [37] 31	
Fig. 4.6 – Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, vista do Altar. [foto do autor]	32
Fig. 4.7 – Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, vista da entrada principal só com luz natural. [foto do autor].....	33
Fig. 4.8 – Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, vista do 1º piso. [foto do autor].....	33
Fig. 4.9 – Foto do Batistério da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, vista de cima. [32]	34
Fig. 4.10 – Escultura de Nossa Senhora dos Navegantes. [foto do autor].....	34
Fig. 4.11 – Planta do piso 0 da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [38].....	35
Fig. 4.12 – Corte longitudinal da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [38]	36
Fig. 4.13 – Placas acústicas suspensas (<i>baffles</i>) no teto da nave da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [foto do autor].....	37

Fig. 4.14 – K-13 projetado no teto da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [foto do autor]	38
Fig. 4.15 – Ressoadores agrupados (ripas de madeira com absorvente colocadas nas paredes da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [foto do autor]	39
Fig. 4.16 – Localização dos altifalantes próprios A1 e A2 na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes (à esquerda) [adaptado de 38] e altifalante instalado na igreja de Nossa Senhora dos Navegante (à direita) [foto do autor].	40
Fig. 5.1 - Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 [39] (à esquerda) e fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 [41] (à direita).....	42
Fig. 5.2 - Calibrador de microfone Brüel & Kjær, modelo 4231 [42] (à esquerda) e Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189 [43] (à direita).	42
Fig. 5.3 - Fonte sonora Brüel & Kjaer (<i>Echo Speech Source</i>) modelo 4720. [44]	43
Fig. 5.4 – Medição do ruído de fundo na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [foto do autor]	43
Fig. 5.5 – Planta da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes com a representação dos dois pontos escolhidos para a as medições do ruído de fundo. RF1, ponto 1 situado no 1º andar e RF2 no piso 0. [adaptado de 38].....	44
Fig. 5.6 – Posicionamento da fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, para medição do tempo de reverberação. [foto do autor].....	45
Fig. 5.7 – Planta da Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes com a representação da localização da fonte sonora (FS) e dos cinco pontos usados para a medição do TR. [adaptado de 38]	46
Fig. 5.8 - Fonte sonora Brüel & Kjaer (<i>Echo Speech Source</i>) modelo 4720 instalado na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [foto do autor].....	47
Fig. 5.9 - Localização da fonte sonora (FS) e dos seis pontos de medição na igreja para avaliação do STI, C_{80} , D_{50} e TS. [adaptado de 38]	48
Fig. 6.1 - Valores dos níveis de pressão sonora e dos níveis de pressão sonora, filtrado A do ruído de fundo na Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.....	51
Fig. 6.2 - Valores do tempo de reverberação dos pontos TR1 ao TR5 em bandas de frequência de 1/3 de oitava da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	54
Fig. 6.3 - Valores do tempo de reverberação do ponto TR1 ao TR5 em bandas de frequência de 1/1 de oitava da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	55
Fig. 6.4 – Valores do tempo de reverberação médio da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes em 1/1 bandas de oitava.....	55
Fig. 6.5 – Valores do tempo de reverberação médio da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes em 1/3 bandas de oitava.....	56
Fig. 6.6 – TR0%, TR50% e TR100% da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	57
Fig. 6.7 – Comparação dos valores de STI médios com altifalantes ligados e desligados e o Δ STI = (STILigado – STIDesligado) na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.....	59
Fig. 6.8 – Claridade (C_{80}) medida nos pontos de P1 a P6 para cada banda de 1/1 oitava na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	60
Fig. 6.9 - Claridade (C_{80}) média dos pontos P1 a P6 para cada banda de 1/1 oitava na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	61
Fig. 6.10 -Valores do D_{50} dos pontos P1 a P6 para cada banda de 1/1 oitava com o sistema do som desligado da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	62
Fig. 6.11 -Valores do D_{50} dos pontos P1 a P6 para cada banda de 1/1 oitava com o sistema do som ligado da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.....	63

Fig. 6.12 - Comparação da definição D_{50} média com e sem altifalantes assim como o $\Delta D_{50} = (D_{50} \text{ Ligado} - D_{50} \text{ Desligado})$ na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	63
Fig. 6.13 – Valores do Tempo Central (TS) medido nos seis pontos para cada banda de oitava de igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.....	65
Fig. 6.14 – Valores do Tempo Central médio (TS) medido nas várias posições para cada banda de oitava de igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	65
Fig. 7.1 – Valores do TR [500, 1k Hz] da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e de igrejas contemporâneas portuguesas. [24][26][48]	68
Fig. 7.2 - Valores médios do TR [500-1k Hz] em função do Volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [24][26][48]	69
Fig. 7.3 – Valores do RASTI/STI médio da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das seis igrejas contemporâneas portuguesas, medidos sem uso do sistema de som. [24][26][48]	70
Fig. 7.4 - Valores médios do RASTI/STI em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	71
Fig. 7.5 - Valores médios do C_{80} [500,1k Hz], em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [24][26][48]	73
Fig. 7.6 - Valores médios do D_{50} [500,1k Hz], em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [24][26][48]	73
Fig. 7.7 - Valores médios do TS [500,1k Hz], em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [24][26][48]	74
Fig. 7.8 - Valores de Tempo de Reverberação [500, 1k Hz] na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas de volume “semelhante”. [24].....	76
Fig. 7.9 - Valores médios do TR [500-1k Hz] em função do Volume de igrejas portuguesas de volume semelhante com a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes.....	77
Fig. 7.10 – Valores médios de RASTI/STI da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas de volumetria “semelhante”.....	78
Fig. 7.11 - Valores médios do RASTI/STI em função do volume das igrejas portuguesas de volume semelhante com a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes.....	79
Fig. 7.12 - Valores médios do C_{80} [500,1k Hz], em função do volume das igrejas portuguesas de volume “semelhante” com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [24]	81
Fig. 7.13 - Valores médios do D_{50} [500,1k Hz], em função do volume de igrejas portuguesas de volume “semelhante” com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [24].....	81
Fig. 7.14 - Valores médios do TR [500-1k Hz] em função do volume de igrejas portuguesas de volume “semelhante” com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [24].....	82

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Expressões para a conversão (dB) e respetivos valores de referência. [1]	7
Quadro 2.2 – Frequências de bandas de oitavas e de um terço de oitavas (Hz) [adaptado de 1].....	8
Quadro 2.3 – Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência 1/1 oitava e 1/3 de oitava. [1]	10
Quadro 2.4 – Exemplo de valores de ordenadas da curva de referência móvel [1]	11
Quadro 2.5 - Correspondência entre o parâmetro STI e a inteligibilidade da palavra. [45]..	16
Quadro 6.1 – Valores dos níveis de pressão sonora (Leq) em bandas de frequência de 1/3 oitava, média logarítmica e valor global nos pontos RF1 e RF2.....	49
Quadro 6.2 – Valores dos níveis de pressão sonora filtrados A (LAeq) do ruído de fundo em dB para bandas de frequência de 1/3 oitava, média logarítmica e valor global nos pontos RF1 e RF2.	50
Quadro 6.3 - Valores obtidos de TR30 na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes para os pontos de TR1 a TR5, assim como a média por frequência de 1/3 oitava e TR [500,1k Hz] e respetivo desvio padrão (s).....	52
Quadro 6.4 - Valores obtidos de TR30 na Igreja da Nossa Senhora dos Navegantes para os pontos de TR1 a TR5, assim como a média por frequência de 1/1 oitava e TR [500,1k Hz] e respetivo desvio padrão (s).....	53
Quadro 6.5 - Valores calculados da absorção inicial da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.	56
Quadro 6.6 – Valores da variação da absorção sonora para bancos de madeira ocupados. [51]	56
Quadro 6.7 – Valores medidos e previstos do Tempo de Reverberação para a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes desocupada (TR0) com 50% (TR50) de lotação e 100% (TR100) de lotação e respetivas áreas de ocupação.....	57
Quadro 6.8 – Valores do STI com sistema de som desligado e ligado nos pontos de P1 a P6, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).	58
Quadro 6.9 - Valores de Δ STI = (STIligado – STIdesligado) para compreensão dos efeitos do sistema de som da igreja.....	58
Quadro 6.10 – Valores medidos relativamente à Claridade (C_{80}) nos pontos P1 a P6, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).	59
Quadro 6.11 -Valores do D_{50} (1ª fase) – sistema de som desligado, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).....	61
Quadro 6.12 –Valores do D_{50} (2ª fase) – sistema de som ligado, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).	62
Quadro 6.13 - Valores de $\Delta D_{50} = (D_{50} \text{ Ligado} - D_{50} \text{ Desligado})$ por banda de frequência e D_{50} [500,1k] para compreensão dos efeitos do sistema de som da igreja.	62
Quadro 6.14 – Valores do Tempo Central (TS) medido dos pontos P1 a P6, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).	64
Quadro 7.1 – Parâmetros arquitetónicos da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das restantes igrejas. [24][26][48]	67
Quadro 7.2 – Valores do tempo de reverberação de igrejas contemporâneas portuguesas. [24] [26][48].....	68
Quadro 7.3 – Valores do RASTI/STI médio da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das seis igrejas contemporâneas portuguesas sem sistema de som. [24][26][48]	70

Quadro 7.4 – Valores médios da Claridade, Definição e Tempo Central da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas contemporâneas portuguesas escolhidas para comparação.[24]	72
Quadro 7.5 – Parâmetros arquitetónicos e estilo arquitetónico dominante da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas seleccionadas para comparação. [24]	75
Quadro 7.6 – Tempos de Reverberação da Igreja da Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas de volume semelhante. [24]	76
Quadro 7.7 –Valores do STI da Igreja da Nossa Senhora dos Navegantes e do RASTI das igrejas de volume semelhante.....	78
Quadro 7.8 - Valores médios da Claridade, Definição e Tempo Central da igreja da Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas de volume “semelhante”. [24]	80
Quadro 8.1 – Quadro síntese dos valores médios medidos. (SS – Sem Sistema de som ligado CS – Com Sistema de som ligado)	83

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α – Coeficiente de absorção sonora

α_w – coeficiente de absorção sonora média padronizada de um material

τ – Coeficiente de transmissão sonora

λ – Comprimento de onda [m]

A – Absorção sonora equivalente [m^2]

AI – Índice de Articulação

AVAC – Sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado

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

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

B&K – Brüel & Kjaer

c – Celeridade [m/s]

C_{80} – Claridade [dB]

C_{80} [500, 1000 Hz] – Claridade média nas frequências 500 Hz e 1000 Hz [dB]

D_{50} – Definição

D_{50} [500, 1000 Hz] – Definição média nas frequências 500 Hz e 1000 Hz

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

f – Frequência [Hz]

FS – Fonte sonora

I – Intensidade sonora (W/m^2)

I_0 – Intensidade sonora de referência [$10^{-12} W/m^2$]

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

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

L_p – Nível de pressão sonora [dB]

L_w – Nível de potência sonora [dB]

NC – *Noise Criterion*

NR – *Noise Rating*

NRC – *Noise Reduction Coefficient*

p – Pressão Sonora [Pa]

p_0 – Pressão sonora de referência [2×10^{-5} Pa]

Q – Coeficiente de direccionalidade

r – Distância [m]

R – Redução sonora [dB]

R' – Redução sonora aparente [dB]

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RRAE – Regulamento dos requisitos acústicos de edificios

S – Superfície real do material [m^2]

STI – *Speech Transmission Index*

T_0 – Tempo de reverberação de referência [0,5 s]

TR – Tempo de reverberação [s]

TR [500, 1000 Hz] – Tempo de reverberação médio nas frequências de 500 Hz e 1000 Hz

TS – Tempo central [ms]

TS [500, 1000 Hz] – Tempo central médio nas frequências de 500 Hz e 1000 Hz [ms]

V – Volume [m^3]

W – Potência sonora [W]

W_0 – Potência sonora de referência [10^{-12} W]

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Atualmente, para garantir qualidade na construção é também necessário que um determinado espaço apresente um desempenho acústico satisfatório. O estudo da acústica em edifícios tem ganho crescente relevância em Portugal, progredindo ao longo do tempo. Diversas pesquisas foram conduzidas para avaliar o desempenho e os atributos sonoros de variados locais públicos, incluindo salas de espetáculos, cinemas, entre outras. No entanto essa abordagem ainda não é amplamente adotada em igrejas em Portugal, com casos excepcionais como por exemplo a Igreja da Santíssima Trindade em Fátima ou a igreja em estudo, a Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes em Lisboa. As igrejas possuem um valor histórico e cultural significativo na sociedade e como tal devem garantir as características acústicas ideais para que seja possível proporcionar uma boa experiência às pessoas que frequentam esses espaços. São locais de oração onde podem existir momentos musicais e por esse motivo existe uma necessidade de melhorar o conforto acústico do edifício.

Assim este trabalho é focado na análise do comportamento acústico interior da Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes que é bastante recente e foi dimensionada com um projeto acústico.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O propósito deste estudo é realizar uma caracterização acústica objetiva do interior da Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes em Lisboa. Como esta igreja foi construída relativamente há pouco tempo (em janeiro de 2013) e foi dimensionada com um projeto acústico, será feita a comparação com os valores aconselháveis e também serão comparados esses valores com igrejas de igual volumetria. Para este efeito o estudo é suportado por ensaios realizados *in situ* onde se obteve os parâmetros de Ruído de fundo, STI, Tempo de reverberação, Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo central para que a sua caracterização acústica seja completa.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

A dissertação encontra-se dividida em oito capítulos:

No primeiro capítulo, com o título “Introdução”, faz-se um breve enquadramento do tema, os seus objetivos e a estrutura do mesmo.

O segundo capítulo, “Conceitos e definições”, tem como objetivo apresentar os conceitos acústicos necessários para a compreensão do trabalho realizado.

No terceiro capítulo com o título “Acústica de igrejas”, foi abordado o contexto histórico deste tipo de edifícios e a sua evolução ao longo do tempo.

No quarto capítulo, “Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes”, é apresentado um enquadramento histórico relativamente à igreja em estudo, assim como uma caracterização da mesma.

No quinto capítulo, “Metodologia dos ensaios”, são descritos todos os ensaios que foram realizados *in situ*, assim como todo o material utilizado e procedimento para a realização dos mesmos.

O sexto capítulo “Resultados”, são expostos todos os resultados obtidos acompanhados de uma discussão sobre os mesmos.

O sétimo capítulo “Comparação com outras igrejas” são feitas comparações com igrejas do mesmo estilo arquitetónico (contemporâneas) e comparações feitas com igrejas de volumetria semelhante.

No oitavo e último capítulo, “Conclusão”, busca-se identificar as conclusões derivadas da realização deste estudo, bem como aponta possíveis direções para futuros desenvolvimentos neste tópico.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

A Acústica é o ramo da Física que se dedica à compreensão e estudo das ondas sonoras e como elas se comportam no ambiente. Esta pode subdividir-se em muitas áreas, contudo este trabalho foi focado na Acústica de Edifícios. A Acústica de Edifícios teve a sua origem científica cerca do ano de 1900, graças aos estudos do físico norte-americano W. C. Sabine (1869-1919).

O ser humano é capaz de entender que o ouvido é o órgão especializado na captação dos sons e da sua transmissão para o cérebro e é lógico que todos os ramos da ciência da Acústica que estudam os fenómenos associados ao mesmo, não teriam utilidade prática significativa caso o sistema auditivo não existisse (Fig. 2.1) [1].

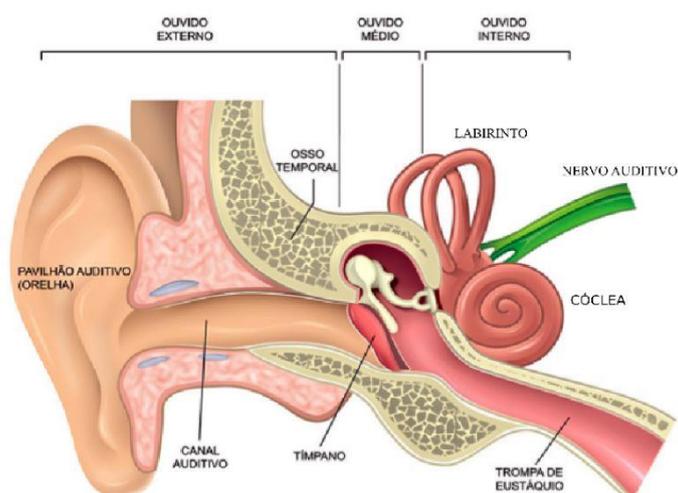


Fig. 2.1 – Esquema do ouvido humano [2].

O som é captado pelo ouvido externo e conduzido pelo canal auditivo até ao tímpano que entra em vibração. Essas vibrações são transmitidas aos ossículos, que são três pequenos ossos situados no ouvido médio: martelo, bigorna e o estribo.

Estes ossos amplificam as vibrações do tímpano transmitindo-as para a cóclea que é uma estrutura em espiral cheia de líquido (perilínfa) localizada no ouvido interno, através da janela oval. Dentro da cóclea dá-se a transformação da vibração em informação neural ao cérebro. O movimento do líquido provoca movimentos na membrana basilar e conseqüentemente a inclinação dos cílios que produz um fenómeno eletroquímico que é transmitido ao cérebro [1].

Neste caso de estudo o meio de propagação de maior relevância é o ar. Assim sendo, nos próximos subcapítulos serão apresentadas as propriedades físicas das ondas sonoras e serão fornecidos os princípios e descrições de parâmetros acústicos que são fundamentais para a compreensão deste campo de estudo.

2.2. PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR

A propagação do som no ar é o processo pelo qual as ondas sonoras se “movem” pelo ar e se “deslocam” de uma fonte sonora (emissor) pelo meio até ao ouvinte (recetor). Por exemplo quando soa um alarme, o som é ouvido em pontos distantes e é transmitido através do ar circundante [1].

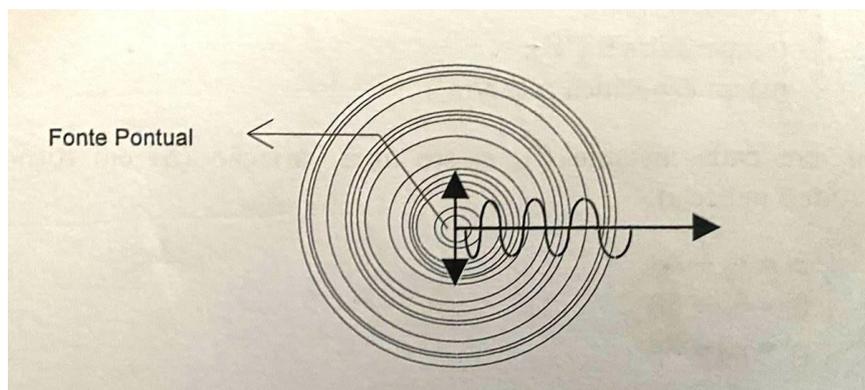


Fig. 2.2 – Propagação do som [1].

O som é resultado de vibrações ou perturbações na fonte sonora o que gera variações de pressão. Essa variação de pressão é provocada pelo movimento de partículas no meio à medida que se deslocam umas em relação às outras, criando uma sequência de compressões e rarefações no meio. A rarefação representa a diminuição da pressão e corresponde ao ponto de pressão mínima na propagação da onda sonora. A compressão, por outro lado, é o ponto de pressão máxima na propagação da onda sonora e ocorre quando as partículas colidem com as partículas à sua frente, que por sua vez colidem com as subsequentes e assim sucessivamente [1] [3].

As ondas são caracterizadas pelo comprimento de onda, período, amplitude e velocidade. O comprimento de onda λ (lambda) é a menor distância entre uma crista e a outra. O período é o tempo gasto numa oscilação completa. A amplitude é a distância entre a crista de uma onda (máxima variação de pressão das partículas) e a pressão média [1] [3].

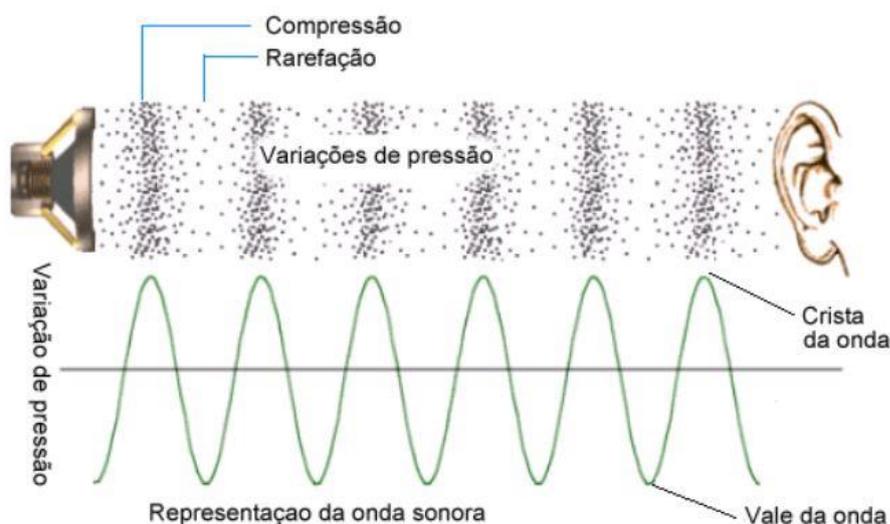


Fig. 2.3 - Variações de pressão e onda sonora [3].

2.3. CELERIDADE

A celeridade ou velocidade de propagação das ondas é a distância percorrida de uma onda sonora por unidade de tempo. No caso do ar, esta varia em função da temperatura de acordo com a expressão (2.1) [1]:

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

Sendo que c corresponde à celeridade, expressa em (m/s), e T corresponde à temperatura do ar em graus kelvin (K). Para a sua conversão de graus celsius ($^{\circ}\text{C}$) em kelvin, utiliza-se a seguinte expressão (2.2):

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

2.4. INTENSIDADE SONORA

A intensidade sonora é o valor da quantidade de potência por unidade de área perpendicular à direção de propagação medida em watt por metro quadrado (W/m^2). O termo intensidade só tem significado quando se especifica a direção, ou seja, permite avaliar a componente direcional do som e este passa a ser representado por uma grandeza vetorial e não escalar como no caso da pressão sonora. Assim pode-se falar em campo de intensidade sonora como um campo vetorial.

A intensidade sonora pode ser expressa pela expressão (2.3) [1]:

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

Onde I é a intensidade sonora (W/m^2), W a potência sonora em watt (W), r a distância à fonte em metros (m), ρ a massa volúmica do ar que corresponde aproximadamente a $1,2 \text{ kg/m}^3$ e c que é a celeridade em m/s que para 20°C é cerca de 343 m/s .

Com o desdobramento desta expressão entende-se que a potência sonora, W , é proporcional à intensidade sonora, I , e é proporcional ao quadrado da pressão sonora, p .

Por exemplo, se a distância à fonte aumentar para o dobro, a mesma quantidade de energia atravessará uma área que é quatro vezes maior e conclui-se que $I_2 = I_1/4$.

2.5. POTÊNCIA SONORA

A potência sonora é uma medida de quantidade total de energia sonora emitida por uma fonte sonora por unidade de tempo e é expressa em watt (W).

É uma característica intrínseca da fonte sonora que não depende do ambiente nem da distância à fonte, como acontece na intensidade sonora.

Esta pode ser calculada através de medições de pressão sonora ou intensidade, usando a expressão (2.3).

2.6. NÍVEIS SONOROS

Um ser humano jovem de audição normal pode ouvir variações de pressão de 10^{-5} Pa , que é denominado como limiar da audição. Em contrapartida o lado extremo o valor máximo a partir do qual a sensação auditiva passa de ruído a dor dá-se com uma variação de pressão de cerca de 100 Pa (limiar da dor) [1].

Assim entende-se que ao estudar os fenômenos acústicos, é comum empregar uma escala logarítmica em vez de valores absolutos de pressão e intensidade sonora. Isso ocorre devido à vasta gama de pressões e intensidades envolvidas. Portanto, uma escala logarítmica é usada para condensar esse amplo intervalo de intensidades em um formato mais gerenciável.

Por esta razão utiliza-se outra unidade para avaliar esta grandeza: o decibel (dB), que é 1/10 de bel (adotado em honra do cientista Alexander Graham Bell) [1].

No quadro (2.1) estão representadas as expressões adotadas para a conversão em decibel do respetivo valor de referência em Pa de cada grandeza.

Quadro 2.1 – Expressões para a conversão (dB) e respetivos valores de referência [1].

Grandezas	Valor de referência	Expressão para conversão (dB)
Pressão sonora	$p_0 = 2 * 10^{-5}$ Pa	$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right)$
Intensidade sonora	$I_0 = 10^{-12}$ W/m ²	$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$
Potência sonora	$W_0 = 10^{-12}$ W	$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right)$

2.7. FREQUÊNCIA

2.7.1. DEFINIÇÃO E UNIDADES

A frequência sonora é uma característica fundamental para descrever um sinal sonoro. É uma grandeza física que indica o número de ocorrência de oscilações que ocorre em um segundo. A sua unidade é o hertz, representado por Hz onde 1 hertz representa uma vibração por segundo, em honra ao físico alemão Heinrich Hertz). A gama audível para a audição humana (quando jovem e audição normal) é de aproximadamente entre 20 e 20kHz. Se a frequência for menor que 20 Hz, é considerado um infrassom. Se for superior aos 20000 Hz, é classificado como um ultrassom (Fig. 2.4) [1] [4].

Em Acústica dos edifícios é comum se distinguir em três grandes zonas de frequências, nomeadamente:

- Frequências graves: 20 a 355 Hz;
- Frequências médias: 355 a 1410 Hz;
- Frequências agudas: 1410 a 20000 Hz.

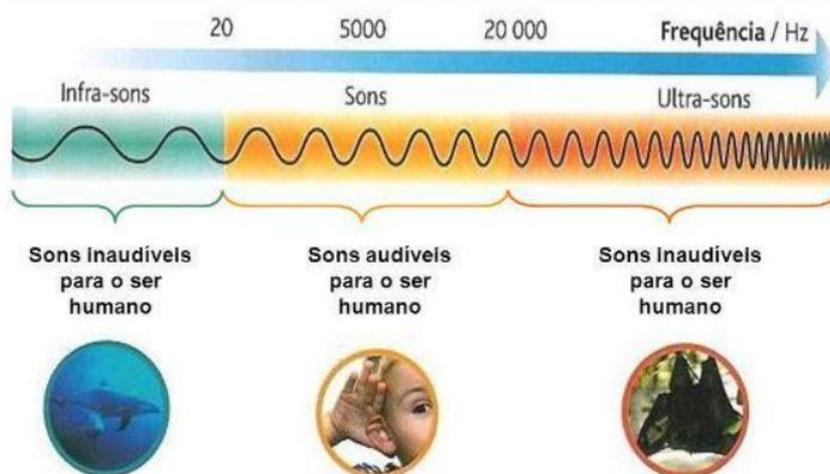


Fig. 2.4 – Gamas de frequências (humanos) [4].

2.7.2. BANDAS DE FREQUÊNCIA

As “bandas” de frequência são intervalos específicos de frequências dentro do espectro de frequência total. Devido à sua grande variedade, é essencial dividir em grupos específicos de frequências denominados de “bandas” de frequência. Uma “banda” é um agrupamento com um limite superior, f_2 , e com um limite inferior f_1 . O valor médio (f_0) é denominado por frequência central e é calculado da seguinte forma [46]:

$$f_0 = \sqrt{f_1 * f_2} \quad (2.4)$$

Existem várias “bandas”, contudo em Acústica de Edifícios somente são usadas 1/1 oitava e 1/3 de oitava como estão representadas no Quadro 2.2. [1]:

Quadro 2.2 – Frequências de bandas de oitava e de um terço de oitavas (Hz) [adaptado de 1]

	Frequências Graves					Frequências Médias					Frequências Agudas				
1/1 oitava	125	250	500	1k	2k										
1/3 oitava	100	125	150	200	250	315	400	500	630	800	1k	1250	1600	2k	2500

2.7.3. CURVAS DE PONDERAÇÃO

O ouvido humano não responde igualmente a todas as frequências de som e verifica-se uma “preferência” por algumas delas, atribuindo maior ou menor importância a diferentes frequências. Essa distinção na sensibilidade auditiva não é observada em dispositivos como microfones, que registam as pressões sonoras de maneira uniforme, independentemente da frequência do som (dentro do seu alcance operacional). Assim surgem as curvas de igual percepção subjetiva da intensidade sonora, com uma unidade denominada de *fone*. (Fig. 2.5) [1].

Esta variação de sensibilidade auditiva também está sujeita à influência da intensidade sonora. Portanto, surge a necessidade de “ajustar” a sensibilidade dos equipamentos de medição para que ela se assemelhe à sensibilidade do ouvido humano. Introduziram-se filtros eletrônicos aos dispositivos de medição para que seja possível correlacionar as leituras obtidas com a resposta auditiva. Como resultado, surgem as curvas de ponderação (Fig. 2.6), que representam os ajustes realizados em função da frequência do som captado. Essas curvas de ponderação foram designadas de A, B, C, e D.

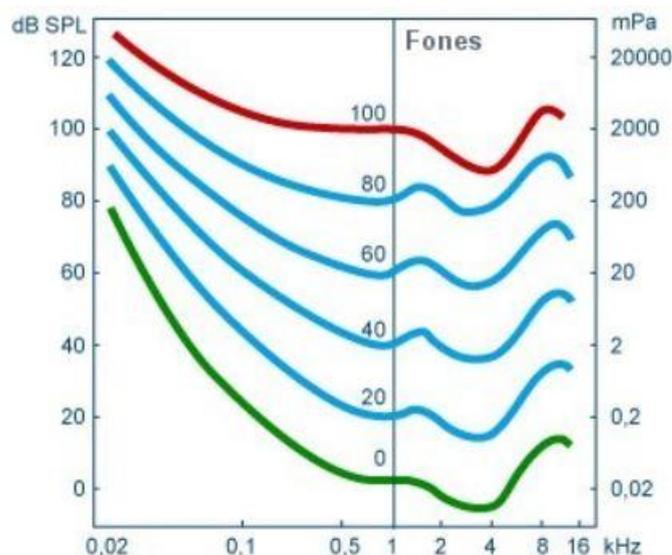


Fig. 2.5 – Curva de igual sensibilidade auditiva (em fone) [5].

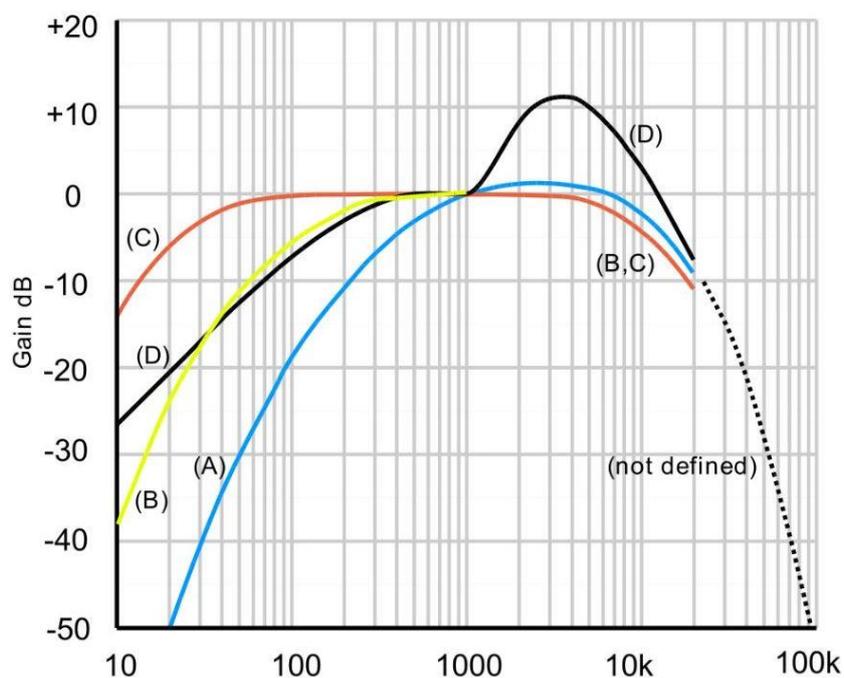


Fig. 2.6 – Curvas de ponderação (filtros) A, B, C e D [6].

A curva A é a mais indicada e universalmente aceite para estudo dos incómodos provocados pelo ruído. Inicialmente o filtro A foi pensado para aproximar os ruídos de intensidade média ou baixa à resposta auditiva humana. As curvas B e C, por outro lado, foram originalmente concebidas para sons com níveis entre 55 e 85 dB e acima de 85 dB, respetivamente. A curva D é utilizada em especial só com ruído de aviões. O nível sonoro em dB(A) representa um valor global que traduz, em um único número, a energia acústica de um ruído filtrado pela curva de ponderação do tipo A. Para determinar o nível sonoro em dB(A), adiciona-se aritmeticamente os valores das correções aos níveis de pressão sonora em dB, conforme representado no Quadro 2.3. Em seguida, esses valores finais são somados logaritmicamente.

Quadro 2.3 – Valores numéricos (dB) das ponderações da curva A para bandas de frequência 1/1 oitava e 1/3 de oitava [1].

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava	Ponderação A para 1/1 oitava
12,5	-63,4	-57
16	-56,7	
30	-50,5	
25	-44,7	-40
31	-39,4	
40	-34,6	
50	-30,2	-26
63	-26,2	
80	-22,5	
100	-19,1	-15,5
125	-16,1	
160	-13,4	
200	-10,9	-8,5
250	-8,6	
315	-6,6	
400	-4,8	-3
500	-3,2	
630	-1,9	
800	-0,8	0
1000	0	
1250	0,6	
1600	1,0	1
2000	1,2	
2500	1,3	
3150	1,2	1
4000	1,0	
5000	0,5	
6300	-0,1	-1
8000	-1,1	
10000	-2,5	
12500	-4,3	-7
16000	-6,6	
20000	-9,3	

2.7.4. COMPRIMENTO DE ONDA

O comprimento de onda é outra característica intrínseca das ondas sonoras e trata-se do comprimento entre dois pontos idênticos consecutivos da onda periódica.

É possível ser calculado por:

$$\lambda = c \cdot T = c / f \quad (2.5)$$

em que λ é o comprimento de onda, em metros (m), c é a celeridade ou velocidade de propagação no ar (m/s), T é o período em segundos (s) e f é a frequência em Hz.

2.8. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é um fenómeno em acústica que descreve a capacidade de um material, superfície ou objeto, de absorver energia sonora em vez de refleti-la. Quando as ondas sonoras atingem um certo material, parte da energia sonora é absorvida e convertida em calor, enquanto o restante pode ser refletido. A perda de energia sonora que é evidenciada nos materiais pode ser quantificada pelo coeficiente de absorção sonora e é designado por α . Esse coeficiente reflete a relação entre a energia sonora absorvida por um determinado material e a energia sonora incidente sobre o mesmo:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.5)$$

O coeficiente α varia entre 0 e 1. Os materiais ditos “absorventes” têm um α superior a 0,5, o que significa que no mínimo absorvem 50% da energia incidente [1].

A absorção sonora de um material específico pode ser caracterizada por meio de outros parâmetros, como por exemplo o NRC (*Noise Reduction Coefficient*). Esse parâmetro nada mais é do que a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora nas frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, com arredondamento para o múltiplo de 0,05 mais próximo:

$$NRC = \frac{(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000})}{4} \quad (2.6)$$

Um outro parâmetro “médio” adotado para classificar as propriedades de absorção sonora dos materiais é o α_w , conforme a norma EN ISO 11654. [7]

Traça-se a curva dos valores de α por banda e determina-se a soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel (Quadro 2.4) e os valores reais. O valor de α_w é obtido para os 500 Hz na curva ajustada de modo que a soma dos desvios positivos seja a mais elevada possível sem ultrapassar os 0,10 (em múltiplos de 0,05). Sempre que o coeficiente de absorção medido ultrapassar o valor de referência em 0,25 ou mais, acrescenta-se uma letra “indicadora de forma” entre parêntesis, L (baixo), M (médio) ou H (alto), quando essa situação ocorre nos intervalos de frequência de 250-500 Hz, 1k-2k Hz e 4k Hz, respetivamente.

Quadro 2.4 – Exemplo de valores de ordenadas da curva de referência móvel [1].

	Bandas de frequência (Hz)				
	250	500	1k	2k	4k
Valores para ajuste da curva de referência móvel	0,80	1,00	1,00	1,00	0,90

Esta norma também atribui classes de absorção sonora: A ($\alpha_w \geq 0,90$), B ($0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$), C ($0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$), D ($0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$), E ($0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$) e não classificado ($\alpha_w \leq 0,10$).

Existem ainda dois métodos normalizados para determinar o coeficiente de absorção sonora: método do tubo de ondas estacionárias (ou tubo de Kundt) e o método da câmara reverberante.

O método da câmara reverberante, que segue a NP EN ISO 354 [8], é o mais eficaz pelo facto de que o som incide na amostra em todos os ângulos, tornando-se mais representativo da realidade em comparação com o outro método que o som incide apenas perpendicularmente sobre a amostra. A desvantagem do método da câmara reverberante é que a amostra tem que ter 10 a 12 m².

Os materiais e sistemas absorventes sonoros podem ser agrupados em três categorias pois atuam em gamas distintas de frequências:

- Porosos e fibrosos (altas frequências);
- Ressonadores (médias frequências);
- Membranas (baixas frequências).

2.9. RÚIDO DE FUNDO

O ruído de fundo (ou ruído residual), em Acústica de Edifícios, refere-se ao nível de ruído ambiente ou sons indesejados que estão presentes em um espaço mesmo na ausência de fontes sonoras específicas. É o nível de ruído causado por diversas fontes ou resultante da atividade humana que existe num ambiente e pode ser causado por diversas fontes exteriores ao edifício como por exemplo o tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo e fontes sonoras no interior do edifício tais como sistemas de aquecimento, ventilação mecânica, ar condicionado (AVAC), tubagens de água entre outros.

O ruído de fundo é importante considerar pois pode afetar a qualidade acústica de um espaço, principalmente quando se trata de salas para a palavra e existem momentos musicais como é o caso aqui presente. Assim, reduzir o ruído de fundo é uma consideração fundamental em projetos de isolamento acústico e/ou condicionamento sonoro, para garantir que o ambiente atenda a critérios específicos de conforto acústico e funcionalidade [1].

2.10. CURVAS DE INCOMODIDADE

As curvas de incomodidade são gráficos que representam o nível de desconforto ou incómodo que as pessoas experimentam em relação a diferentes níveis de ruído. São usadas em estudo de Acústica para avaliar como o ruído afeta o bem-estar e o conforto das pessoas dentro de um determinado espaço (em auditórios, teatros, igrejas, salas de concerto, etc.)

Existem vários tipos de curvas que podem ser utilizadas (NC, NR, RC, NCB, etc.) mas os métodos mais usados são os de aplicação das curvas NC (*Noise Criterion*) criadas por Leo

Beranek em 1957 (Fig. 2.7) e as curvas NR (*Noise Rating*) proposta em 1962 por Kosten e Van Os (Fig. 2.8).

Cada curva NC é definida pelos seus níveis de pressão sonora para oito bandas de 1 oitava entre os 63 e 8000 Hz. Já nas curvas NR as bandas de frequências são de 32 e 8000 Hz. Ambas as curvas usam o método da tangente [1].

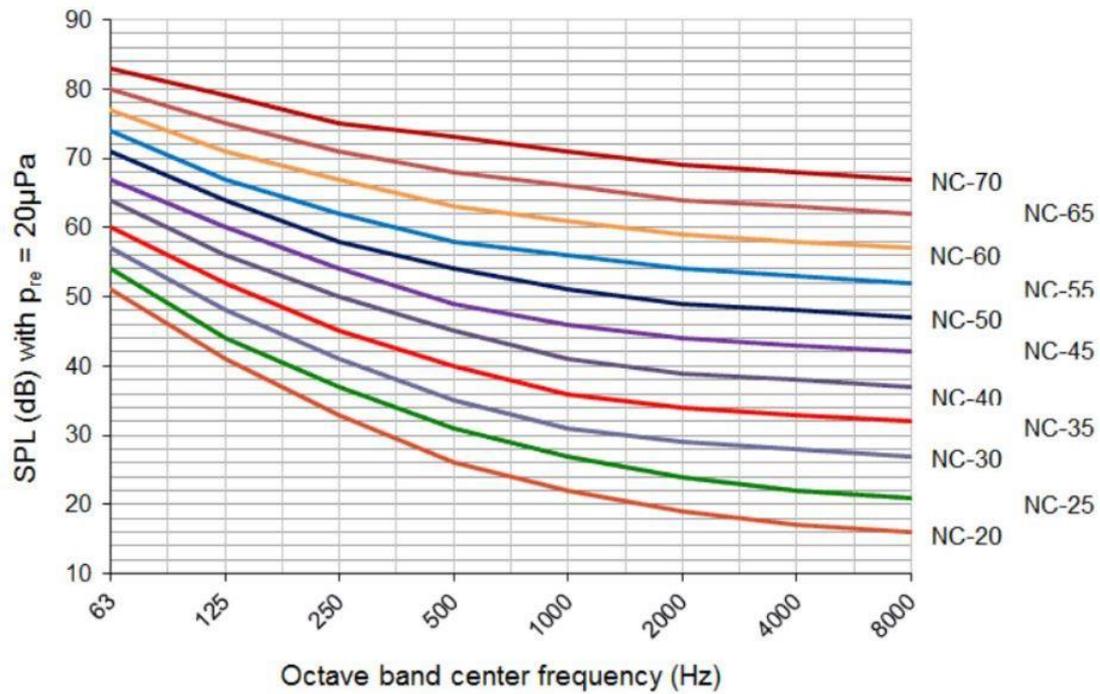


Fig. 2.7 – Curvas de incomodidade NC (*Noise Criterion*) [9]

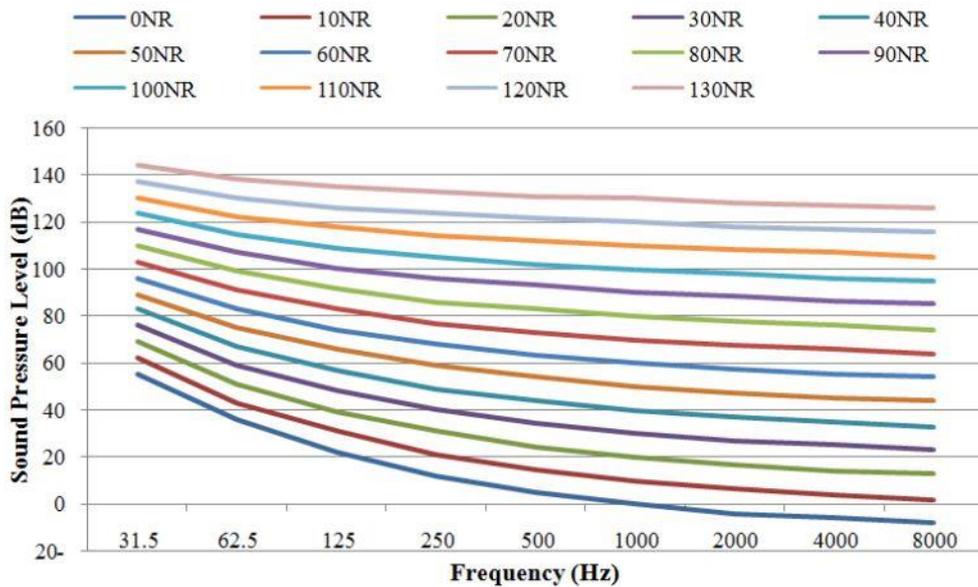


Fig. 2.8 – Curvas de incomodidade NR (*Noise Rating*) [10].

2.11. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Quando existe uma fonte sonora num espaço fechado as ondas geradas por essa fonte chegam ao recetor por origem direta ou refletida. Os sons refletidos até chegarem ao ouvido do recetor podem sofrer reflexões únicas ou múltiplas nas superfícies existentes no compartimento (Fig. 2.9). À medida que elas chegam vão-se tornando mais fracas pelas consecutivas absorções que sofrem pela envolvente do compartimento e também pela absorção do ar [1] [11].

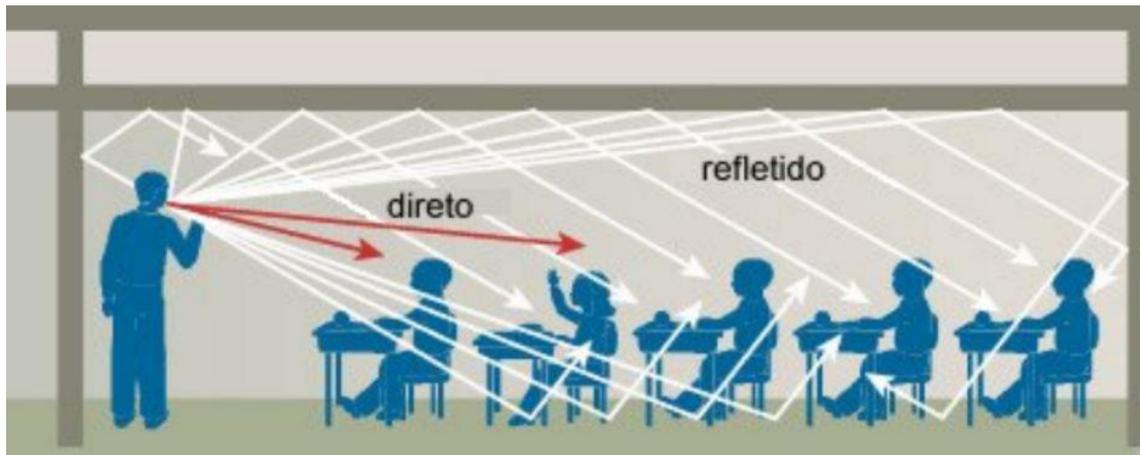


Fig. 2.9 – Som direto e som refletido [12].

O tempo de reverberação é uma medida acústica que é determinada pela duração do som refletido (em segundos) e prolongado após a extinção da fonte sonora original em um ambiente fechado. Por definição é o tempo que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB desde que a fonte sonora cessa de emitir. Visto que na prática é desafiador estimar o decaimento de 60 dB, é comum avaliar o decaimento de 30 dB e extrapolar para os 60 dB.

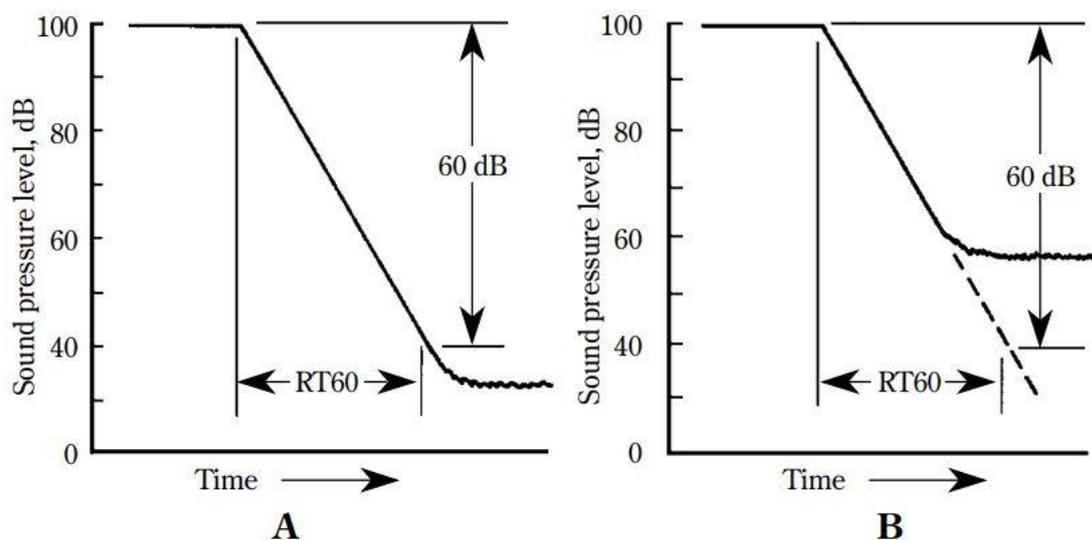


Fig. 2.10 – Definição do Tempo de Reverberação (Valor teórico na foto da esquerda e extrapolação do declive na foto da direita) [46].

Quanto mais limitada for a capacidade das superfícies de absorver som, mais prolongado será o tempo de reverberação do local. Esse efeito é especialmente inadequado em espaços como salas de concerto, cinemas, igrejas, tornando assim crucial a quantificação do tempo de reverberação no projeto acústico [1].

Depois de muitas experiências e tentativas, em 1898, o físico americano Wallace Clement Sabine conseguiu estabelecer a relação entre a absorção sonora, o volume do espaço e tempo de reverberação, que ficou conhecida como a “Fórmula de Sabine”:

$$TR = \frac{0,16 * V}{A} \quad (2.7)$$

Onde TR é o tempo de reverberação em segundos (s), a constante 0,16 foi o valor calculado para uma temperatura de 24 °C pois o valor altera contante a temperatura do compartimento, V o volume do compartimento (m^3), e A a absorção sonora equivalente (m^2) onde:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i * S_i \quad (2.8)$$

O α é o coeficiente de absorção sonoro do material (sem unidades) e o S a superfície real do material (m^2).

2.12. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

A inteligibilidade da palavra refere-se à capacidade de entender e distinguir as palavras ditas num discurso num determinado local. É uma das principais características acústicas em espaços onde a percepção da palavra é muito importante tais como igrejas, salas de aula, auditórios, etc. Existem diferenças acústicas entre vogais e consoantes. As vogais geralmente exigem mais tempo e têm uma intensidade maior em comparação com as consoantes. As vogais são pronunciadas em frequências baixas variando entre 150 a 300 Hz, enquanto as consoantes são pronunciadas em frequências mais elevadas, abrangendo os 3500 a 7000 Hz.

Em relação a duração, as vogais normalmente têm uma média de 90 milissegundos, enquanto as consoantes, em média, são muito mais curtas com cerca de 20 milissegundos. [1]

Existem dois grandes tipos de parâmetros de medida da inteligibilidade da palavra: os objetivos e os subjetivos. Os métodos subjetivos consistem na presença de um orador que vai lendo uma série de palavras e uma audiência distribuída pela sala avalia a compreensão das palavras indicando o que ouviu. Posto isto as respostas fornecidas são examinadas para classificar a inteligibilidade da palavra de acordo com os critérios estabelecidos, nomeadamente a percentagem de palavras reconhecidas pelo ouvinte. [1] [13]

Os métodos objetivos não necessitam a intervenção subjetiva humana na sua determinação e foram evoluindo ao longo dos anos:

Em 1947 apareceu o primeiro método, AI (Índice de Articulação), que 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 casa banda de frequência (p), obtém-se um somatório que dividido por 10000 resulta no valor de AI [1]. Consoante o valor de AI é possível classificar o grau de privacidade e o grau de inteligibilidade.

O SIL (nível de interferência na conversação) define-se como a determinação da média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo em cada uma das bandas de oitava dos 500 Hz aos 2000 Hz:

$$SIL(dB) = \frac{RF_{500Hz} + RF_{1kHz} + RF_{2kHz}}{3} \quad (2.9)$$

Outro método e mais utilizado é o STI (*Speech Transmission Index*) ou a sua simplificação RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*). Utiliza uma escala de classificação que varia entre o 0 (nula inteligibilidade) e 1 (ótima inteligibilidade) (Quadro 2.5). O RASTI é obtido com a ajuda de um aparelho munido de um emissor e um recetor. O STI foi obtido com a ajuda de um *software* chamado de DIRAC [49].

Quadro 2.5 - Correspondência entre o parâmetro STI e a inteligibilidade da palavra [45].

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

2.13. CLARIDADE

A Claridade (C_{80}), é a razão em dB entre a energia sonora inicial contida num intervalo de tempo de 0 a 80 milissegundos e a energia recebida posteriormente no intervalo de 80 milissegundos até ao final do decaimento. Foi proposto por Reichart (1975) a expressão 2.10:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (dB) \quad (2.10)$$

Onde $p(t)$ é a resposta impulsiva da sala num determinado ponto [1] [47].

2.14. DEFINIÇÃO

A Definição (D_{50}) é um parâmetro adimensional, medido pela razão entre a energia recebida nos primeiros 50 milissegundos e pela energia total recebida durante o decaimento. Foi proposto por Thiele (1953) a expressão 2.11:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.11)$$

Onde $p(t)$ é a resposta impulsiva da sala num determinado ponto [1] [47].

2.15. TEMPO CENTRAL

O Tempo central (TS) é o ponto no tempo onde a energia recebida antes deste ponto é igual à energia recebida depois daquele ponto. Foi proposto por Cremer e Müller (1978) a expressão 2.12 e é usual ter uma posição entre 140 a 180 ms [1].

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (ms) \quad (2.12)$$

2.16. RÁCIOS DE BAIXOS

São usualmente utilizados para avaliar o balanço tonal por comparação dos tempos de reverberação e/ou a intensidade sonora para as baixas frequências com os valores das altas frequências. Foram propostos por Beranek (1962) e Gade (1989):

BR_RT – *Bass Ratio* baseado no Tempo de Reverberação:

$$BR_{RT} = \frac{[TR(125)+TR(250)]}{[TR(500)+TR(1k)]} \quad (2.13)$$

BR_L – *Bass Ratio* baseado na Intensidade Sonora:

$$BR_L = \frac{[L(125)+L(250)-L(500)-L(1k)]}{2} \quad (2.14)$$

3

ACÚSTICA DE IGREJAS

3.1. A IGREJA CATÓLICA

3.1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A história da Igreja Católica abrange um longo período de cerca de dois mil anos, que começa nos primórdios do Cristianismo no século I e estende-se até os dias de hoje. A Igreja Católica desempenhou um papel fundamental na transformação da religião, cultura, política e sociedade ao longo dos séculos. As suas origens podem ser rastreadas até a pregação de Jesus Cristo e os esforços dos apóstolos no século I. Após a crucificação e ressurreição de Jesus, os apóstolos começaram a difundir o Cristianismo, estabelecendo comunidades de fiéis em todo o Império Romano [14].

Embora os primeiros cristãos tenham enfrentado perseguições, o Cristianismo continuou a espalhar-se e um marco significativo foi o Édito de Milão, emitido em 313 d.C. pelo Imperador Constantino, que legalizou a religião cristã. A divisão posterior do Império Romano em Ocidente e Oriente resultou no Império Bizantino reconhecendo a autoridade papal, enquanto o “Grande Cisma” do Oriente e do Ocidente em 1054 causou a separação entre a Igreja Católica e a Igreja Ortodoxa [15].

Durante a Idade Média, a Igreja Católica exerceu uma influência poderosa na Europa, desempenhando um papel central na política, cultura e religião. Ordens religiosas, como os beneditinos e franciscanos, desempenharam um papel crucial na caridade, educação e cultura. A Reforma Protestante, liderada por Martinho Lutero em 1517, questionou as doutrinas e práticas católicas, levando à divisão da Igreja em várias denominações. Em resposta, a Igreja Católica lançou a Contrarreforma, promovendo reformas internas e mantendo sua autoridade. O Concílio de Trento (1545-1563) definiu doutrinas, promoveu reformas litúrgicas e reforçou a autoridade do Papa [15] [16].

O Concílio Vaticano II (1962-1965) (Fig. 3.1) introduziu reformas litúrgicas e promoveu o diálogo inter-religioso. A história da Igreja Católica é caracterizada por mudanças contínuas, enfrentando desafios e crises, enquanto desempenha um papel significativo na vida religiosa e cultural em todo o mundo [15] [16].



Fig. 3.1 – Concílio Vaticano II [17].

3.1.2. EVOLUÇÃO ARQUITETÓNICA DAS IGREJAS CATÓLICAS

À medida que a Igreja Católica sofria várias alterações e a sociedade se desenvolvia, as estruturas religiosas passaram por notáveis variações o que resultou na criação de diversos estilos arquitetónicos, cada um com suas próprias características distintas. A arquitetura eclesiástica não evoluiu apenas por preocupações estéticas, mas também em resposta a necessidades históricas e locais, visando proporcionar um espaço mais adequado e atender a todas as exigências dos fiéis [18].

No início, a igreja era em grutas e residências privadas, especialmente numa época em que a religião Católica não era oficialmente reconhecida. Posteriormente, surgiram os vários estilos arquitetónicos, ordenados por ordem cronológica [18] [19]:

- Visigótico (séc. VI-XI);
- Românico (séc. XII-XIII);
- Gótico (séc. XIII-XV);
- Manuelino (séc. XV-XVI);
- Renascentista (séc. XVI-XVII);
- Barroco (séc. XVII-XVIII);
- Neoclássico (séc. XVIII-XIX);
- Contemporâneo (séc. XIX-XX).

3.1.3. AS IGREJAS E A ACÚSTICA

Os primeiros comentários escritos sobre as características acústicas das igrejas são atribuídos ao arquiteto britânico Sir Christopher Wren (1632-1723). Ele escreveu que um pregador médio de uma igreja paroquial não poderia esperar ser inteligível a uma distância maior do que cerca de 15 metros à sua frente, 9 metros de cada lado e 6 metros atrás dele [20].

Relativamente aos primeiros estudos publicados sobre a acústica de igrejas na década de 50 baseavam-se exclusivamente no tempo de reverberação. Desde então, o tempo de reverberação tornou-se um parâmetro comum utilizado na arquitetura porque é facilmente medido e relaciona as propriedades físicas dos materiais e do espaço à acústica de um ambiente [20].

O estudo da acústica em ambientes eclesiais é uma questão de grande complexidade, uma vez que esses edifícios possuem características arquitetónicas e funcionais extremamente distintas. Tanto a oratória quanto a música desempenham papéis significativos nesse contexto, exigindo uma resposta adequada por parte da igreja para ambas, simultaneamente. Surge, portanto, o desafio de que as condições acústicas ideais para a oratória nem sempre coincidem com as ideais para a música, e vice-versa. Por exemplo, a fim de aprimorar a clareza da inteligibilidade da palavra, é preferível que o tempo de reverberação seja muito curto, enquanto nos cânticos religiosos, esse valor deve ser maior para criar uma experiência mais envolvente com a música [24].

O Concílio Vaticano II trouxe mudanças significativas na liturgia e ocorreu a transição para o uso de línguas maternas, uma mudança inovadora, já que no início a língua era grego e a partir do século IV e durante XVI séculos a língua era o latim. Historicamente, a ênfase na compreensão do discurso não estava presente, tornando as condições acústicas específicas menos relevantes para essa finalidade [19].

3.1.4. CASOS DE ESTUDO RELEVANTES

Em 1952, ocorreu um dos primeiros estudos significativos sobre acústica em igrejas, quando Parkin e Taylor [21] investigaram a inteligibilidade da palavra na Catedral de São Paulo, em Londres. Logo no ano seguinte, em 1953, Raes e Sacerdote [22] conduziram um estudo de grande relevância na acústica de igrejas, no qual compararam duas igrejas em Roma: a Basílica de São João de Latrão e a Basílica de São Paulo Fora de Portas. Neste estudo, exploraram a relação entre a arquitetura e o tamanho das igrejas com o tempo de reverberação (TR). Em 1971, Shankland [23] examinou o comportamento acústico da Basílica de São Pedro em comparação com as igrejas de São João Luterano, São Paulo Fora de Portas e Santa Maria Maior. Este estudo observou que a redução no TR é em grande parte influenciada pela arquitetura e pelas aberturas de separação entre capelas adjacentes.

Em Portugal num estudo realizado por Carvalho em 1994 onde, é relacionada a arquitetura das igrejas com parâmetros acústicos. Nesta tese, são apresentadas as medições acústicas realizadas em um amplo levantamento de campo que abrangeu 41 igrejas católicas em Portugal. Essas igrejas, construídas ao longo de um período que se estende desde o sexto século até 1993, foram cuidadosamente selecionadas para representar a evolução dos principais estilos arquitetónicos (Visigótico-1 até ao Contemporâneo-8) na construção de igrejas em Portugal [19].

Foram medidos nove parâmetros entre os quais o tempo de reverberação (TR), *Early Decay Time* (EDT), clareza (C_{80}), nível sonoro (L), RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*), definição (D_{50}), tempo central (TS), BR_L – Rácio de baixos baseado na intensidade sonora (*Bass ratio based on sound level*), BR_RT - Rácio de baixos baseado no tempo de reverberação (*Bass ratio based on reverberation time*).

Após as medições as igrejas foram agrupadas por estilos arquitetónicos, com o intuito de investigar as conexões entre elas e os parâmetros acima mencionados. Evidenciam-se diferenças estatisticamente significativas nas igrejas, referentes aos seus estilos arquitetónicos, no que diz respeito a TR e EDT (Fig. 3.2), particularmente em eras posteriores ao período Gótico (século XV). Ao observar o gráfico retratado na figura 3.2, é evidente que se verifica um aumento do Tempo de Reverberação (TR) até chegar ao Estilo 5 (Renascentista), seguido por um subsequente declínio nos valores de reverberação ao atingir o Estilo 8 (Contemporâneo). O ponto de inflexão temporal, no qual a tendência geral dos dados se modifica, coincide com o período da Reforma e da Contrarreforma, no qual o discurso nas igrejas católicas ganhou importância e a música litúrgica sofreu alterações. O estilo Barroco (6) trouxe uma mudança drástica nas necessidades de comportamento acústico das igrejas testadas. Com a chegada do Neoclássico, a tendência anterior ressurge para ser revertida apenas neste século, no qual o discurso possivelmente se tornou a parte mais crucial dos serviços religiosos [19].

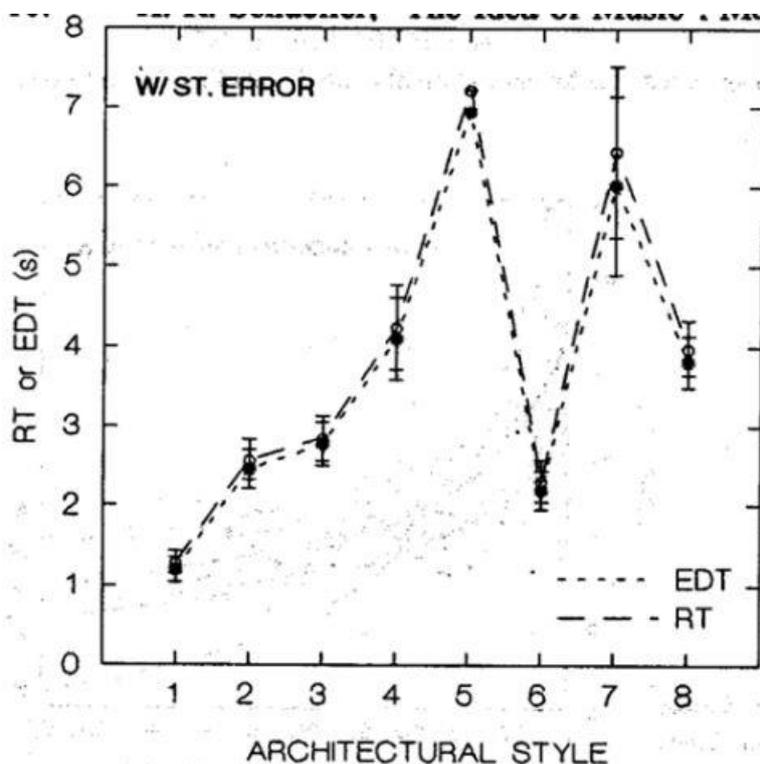


Fig. 3.2 - Valores médios de tempos de reverberação das igrejas relacionados com o grupo arquitetónico, com barra de erro padrão. (1-Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico, 8-Contemporâneo) [19].

Observa-se claramente uma tendência na evolução de alguns parâmetros acústicos ao longo do tempo, com destaque para TR, EDT, TS e RASTI.

Não se conseguem identificar diferenças estatisticamente significativas nas igrejas, relacionadas aos seus estilos arquitetónicos, em relação a D_{50} , L, BR_RT e BR_L. As variações no RASTI (Fig. 3.3 e 3.4) não se apresentam tão distintas quanto as de outros parâmetros acústicos. A figura 3.3 ilustra uma tendência que se assemelha à evolução

previamente analisada do Tempo de Reverberação (TR) e parece corroborar a ideia de que o discurso também desempenhou um papel significativo nas mudanças que ocorreram durante o período da Contrarreforma [19].

Já a figura 3.4 descreve a variação do Índice de Inteligibilidade da Palavra (RASTI) em função da distância até à fonte sonora, localizada no altar (excluindo o campo direto, ou seja, distâncias inferiores a 5 m), com as respetivas linhas de regressão para cada estilo arquitetónico. Neste contexto, o estilo Renascentista revela a classificação mais baixa em termos de inteligibilidade da palavra, enquanto os estilos Visigótico e Barroco apresentam os valores mais elevados de RASTI. No caso do Visigótico isso deve-se a serem igrejas de pequena dimensão [19].

Em suma, este estudo sugere que modificações no desempenho acústico das igrejas podem estar associadas às mudanças nos estilos arquitetónicos.

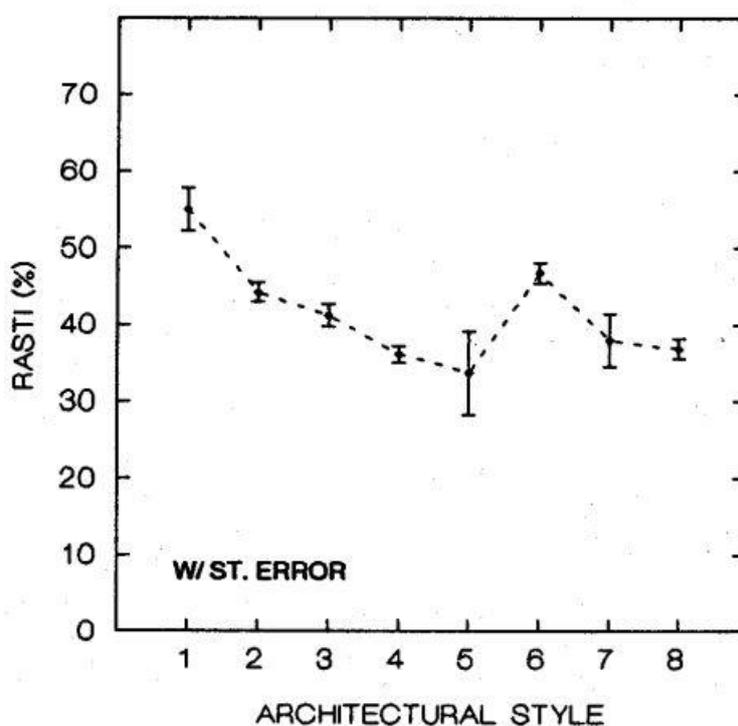


Fig. 3.3 – Valores do RASTI associados a cada estilo arquitetónico estudado, com barra de erro de desvio. (1-Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico, 8-Contemporâneo) [19].

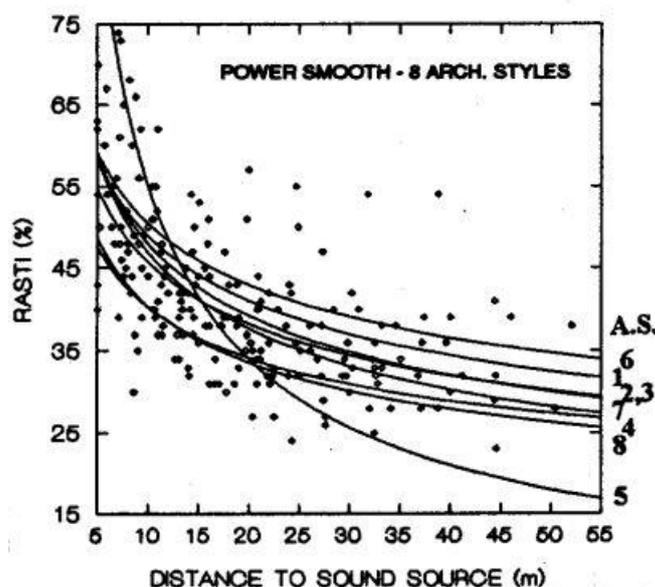


Fig. 3.4 – Valores do RASTI em função da distância à fonte sonora (Altar) com regressões de cada estilo arquitetónico. (1-Visigótico, 2-Românico, 3-Gótico, 4-Manuelino, 5-Renascentista, 6-Barroco, 7-Neoclássico, 8-Contemporâneo) [19].

3.2. PROBLEMAS ACÚSTICOS EM IGREJAS

3.2.1. INTRODUÇÃO

Igrejas são locais de notável complexidade acústica, uma realidade bem conhecida por aqueles envolvidos neste tema. Problemas como excesso de baixas frequências, reverberação prolongada, baixa inteligibilidade e até mesmo ecos, são ocorrências frequentes neste tipo de espaço [25]. Diferenciar a construção de uma nova igreja com boas características acústicas da correção acústica de uma igreja já existente é crucial. As deficiências acústicas em uma igreja recém-construída geralmente derivam de deficiências no projeto acústico. No entanto, tratar acusticamente uma igreja já existente apresenta desafios significativos, com resultados nem sempre satisfatórios. O principal problema que afeta igrejas antigas é o longo tempo de reverberação. Esses espaços geralmente possuem alturas consideráveis, tetos altos, formas irregulares e um grande volume. Todas essas características resultam em tempos de reverberação prolongados. A combinação de tempos de reverberação elevados, irregularidades no campo sonoro e ruído de fundo pode levar a pontos na igreja em que a mensagem do orador se torna impercetível.[26]

Atualmente, tem-se à nossa disposição uma variedade de materiais que podem ser utilizados na construção de edifícios religiosos, de forma a proporcionar um desempenho acústico satisfatório. Embora a arquitetura de igrejas seja notoriamente complexa, avanços tecnológicos e o surgimento de novos materiais permitem a construção de espaços com baixos tempos de reverberação e alta inteligibilidade da palavra. [26]

3.2.2. CASO DE ESTUDO - "PREZIOSISSIMO SANGUE DI GESÙ", RAGUSA ITÁLIA

A igreja contemporânea "Preziosissimo Sangue di Gesù" localizada em Ragusa, Itália, construída em 1980, possui uma forma radial assimétrica invulgar, como ilustrado na Fig. 3.5 [27].

O espaço possui dimensões máximas de 23,10 metros de comprimento e 18,40 metros de largura, com alturas de teto variando entre 6,05 metros e 10,30 metros. O volume total da igreja é de cerca de 3580 metros cúbicos. O piso está dividido em oito seções, correspondendo à subdivisão dos setores do teto, cada um com sua inclinação específica, tanto radial quanto tangencial. Todos esses setores convergem em direção a um óculo localizado a uma altura de 10,80 metros, aproximadamente no centro da igreja. O piso é revestido com mármore, enquanto as paredes e o teto são completamente revestidos com gesso extremamente liso. Quanto ao mobiliário, a igreja conta apenas com bancos de madeira na área destinada à audiência, que cobrem cerca de metade de toda a área do espaço. Essas características de amplo volume e superfícies lisas contribuem para uma deficiência na qualidade acústica, evidenciada pelos longos tempos de reverberação e pela fraca inteligibilidade da palavra [27].

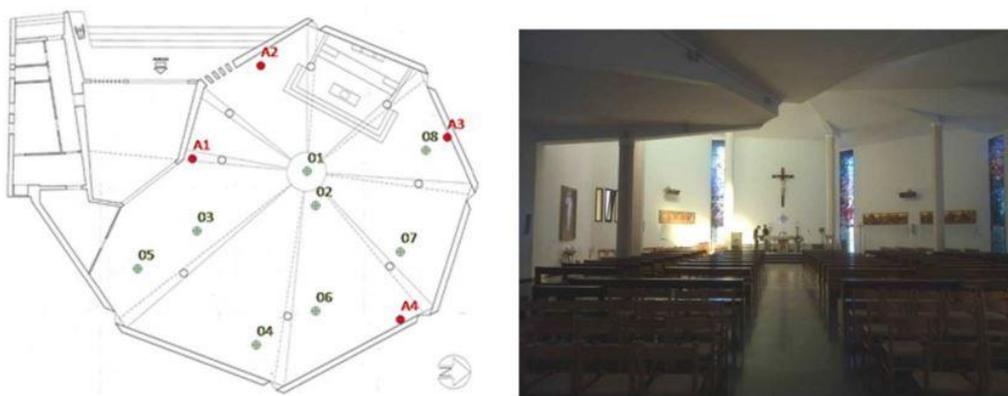
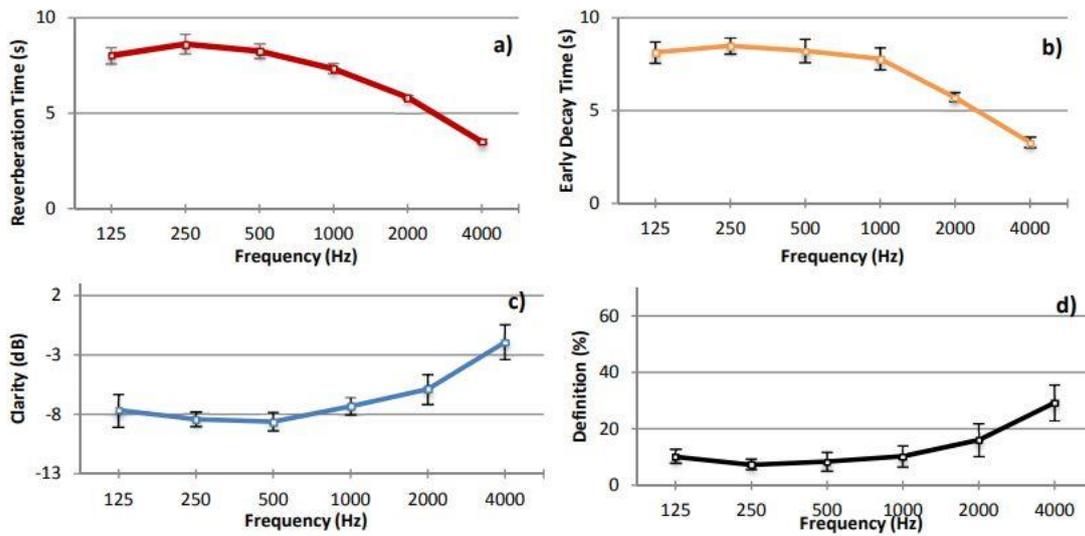


Fig. 3.5 - (À esquerda) planta da igreja e (à direita) interior da igreja com vista para o Altar [27].

Para analisar o problema e identificar as causas das deficiências na qualidade acústica, foram medidos cinco parâmetros (Tempo de reverberação (TR), Definição (D_{50}), Claridade (C_{80}), Early Decay Time (EDT), e STI (*speech transmission index*)) em cada banda de oitava, para uma gama de frequência dos 125 aos 4000 Hz com a respetiva sala desocupada.

Os resultados obtidos (Fig. 3.6), mostram que ao longo de todo o espectro de frequência, não são observadas diferenças significativas entre os valores de TR e EDT. As medições de C_{80} e D_{50} revelam valores muito abaixo do ideal. No entanto, também é importante considerar a possibilidade de apresentações musicais nesse tipo de edifício. Globalmente, é essencial que o tratamento acústico torne a igreja atrativa para ambas as finalidades potenciais. No entanto, os valores de STI permanecem relativamente constantes em toda a sala, embora não sejam suficientes para garantir uma boa qualidade na inteligibilidade da palavra, com uma média de 33%, o que se classifica como "Fraco" [27].



1Fig. 3.6 – a) Tempo de Reverberação, b) *Early Decay Time* (EDT), c) Clareza (C_{80}) e d) Definição (D_{50}) [27].

A pesquisa acústica realizada revelou que os valores do tempo de reverberação, da Clareza, da Definição e do índice de inteligibilidade da palavra estão consideravelmente abaixo dos padrões aceitáveis para esse tipo de ambiente. Por esse motivo foi criado um modelo de computador 3D no *software CATT-Acoustic* para simular o campo acústico dentro da igreja. Uma vez definidas as superfícies onde os materiais absorventes poderiam ser inseridos, foram propostos dois tratamentos diferentes para a correção acústica da sala: o primeiro é um absorvente poroso feito de lã de rocha; o segundo é um painel microperfurado, baseado no princípio do ressonador de Helmholtz. As simulações realizadas revelaram que as duas intervenções acústicas propostas permitem alcançar melhorias significativas para cada índice acústico (por exemplo, TR de cerca de 2,5 segundos a 1000 Hz e STI de cerca de 40%). Ambos os resultados são bem-sucedidos, como se pode constatar na Fig. 3.7 [27].

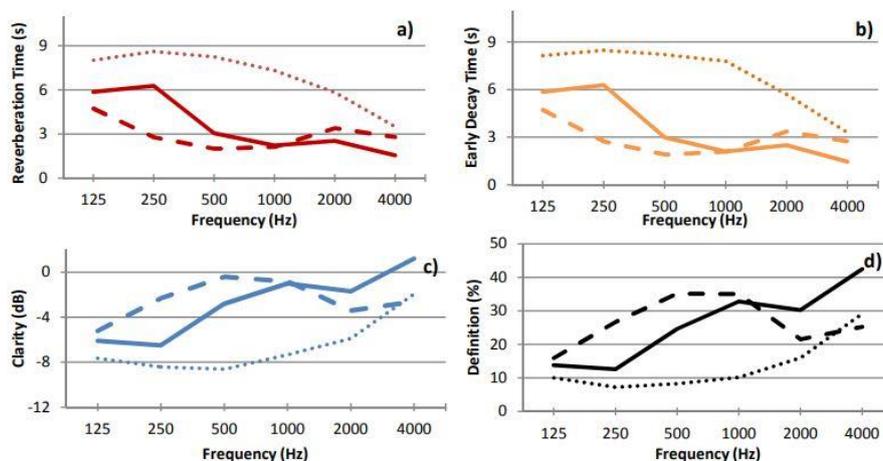


Fig. 3.7 – Valores médios dos índices após correção acústica: Valor inicial (ponto), Painéis de lã de rocha (contínua), Painéis micro perfurados (tracejado). A) Tempo de Reverberação, b) *Early Decay Time* (EDT), c) Clareza (C_{80}) e d) Definição (D_{50})

3.3. LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, o regulamento que estabelece os requisitos acústicos em edifícios é o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), que foi estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 129/2002, tendo sido posteriormente alterado pelo Decreto-Lei n.º 96/2008.

As normas do presente Regulamento aplicam-se à construção, reconstrução, ampliação ou alteração dos seguintes tipos de edifícios, em função dos usos a que os mesmos se destinam:

- Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras;
- Edifícios comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais;
- Edifícios escolares e similares, e de investigação;
- Edifícios hospitalares e similares;
- Recintos desportivos;
- Estações de transporte de passageiros;
- Auditórios e salas [29].

O RRAE não se aplica diretamente a igrejas e templos, contudo, consoante o Artigo 10.º - A (Auditórios e Salas) do RRAE, as instalações cuja função principal seja a realização de atividades que envolvam oratória, como auditórios, salas de conferência, espaços polivalentes e salas de cinema, devem cumprir os requisitos estabelecidos a seguir:

“O tempo de reverberação médio, T , nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, a considerar para estes recintos, quando mobilados normalmente e sem ocupação, deve satisfazer o seguinte:

- i) $T \leq 0,12 V^{\frac{1}{3}}$, se $V < 250 m^3$;
- ii) $T \leq 0,32 + 0,17 \text{Log } V$, se $250 \leq V < 9000 m^3$;
- iii) $T \leq 0,05 V^{\frac{1}{3}}$, se $V \geq 9000 m^3$;

Em que V é o volume do interior, em metros cúbicos” [29].

O RRAE também estipula que as avaliações realizadas no local devem considerar um fator de incerteza relacionado com a determinação das grandezas em causa. Os valores do tempo de reverberação devem ser reduzidos pelo fator I , de acordo com o limite regulamentar em percentagem, como se segue:

- i) 25 %, se $V < 250 m^3$;
- ii) 35 %, se $250 \leq V < 9000 m^3$;
- iii) 40 %, se $V \geq 9000 m^3$. [29]

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

- $LA_{eq} \leq 38 \text{ dB}$, no caso de cinemas;
- $LA_{eq} \leq 30 \text{ dB}$, nos restantes recintos [29].

4

IGREJA DE NOSSA SENHORA DOS NAVEGANTES

4.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Com início da construção em 2013 e inaugurada em 2014 pelo Cardeal-Patriarca de Lisboa, D. Manuel Clemente (Fig. 4.1), a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes em Lisboa serve como sede da paróquia do Parque das Nações, a área urbana que se desenvolveu na zona da Expo'98 [32].

A realização da Exposição Mundial em Lisboa, no ano de 1998, possibilitou a revitalização de uma vasta área na zona oriental da cidade, anteriormente pouco desenvolvida e ocupada por instalações industriais, ruínas, terrenos abandonados e depósitos de lixo. Em paralelo com o espaço de exposição surgiu um projeto urbanístico de qualidade que perduraria para além do término da Expo, atraindo muitas pessoas para residência permanente nessa área da cidade. No entanto, a comunidade que se formou, rapidamente percebeu a ausência de um local de culto religioso, levando um grupo de católicos a procurar um espaço temporário. Foi então adquirida uma loja, no Terreiro dos Corvos, onde foi estabelecida a Igreja com o apoio da paróquia de Moscavide. Iniciaram-se as celebrações da missa dominical e a comunidade cresceu em número e prática cristã, com a introdução de catequese, grupos de jovens, coro e várias iniciativas. O crescimento levou o Sr. Cardeal-Patriarca a criar a paróquia de Nossa Senhora dos Navegantes, sendo o jovem padre Nuno Tavares nomeado como o primeiro pároco. Assim começou o processo para construir a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, a partir do zero, envolvendo negociações com a Parque Expo para aquisição de terreno [32] [35].

Na sequência, o Padre Paulo Franco (Fig. 4.2) foi designado como seu pároco e foi estabelecido um acordo com a Escola Básica Vasco da Gama para a utilização do anfiteatro na realização da Eucaristia Dominical e outras atividades relevantes da paróquia. Simultaneamente, diversos grupos na comunidade estavam em expansão, com destaque para o agrupamento 1100 de escuteiros, que começou as suas atividades e se tornou independente do agrupamento de Moscavide, vindo posteriormente a estabelecer-se na paróquia de Nossa Senhora dos Navegantes. A carência de espaços e outras condições para as diferentes atividades paroquiais era um desafio, mas foi possível adquirir um pavilhão anteriormente usado como *stand* de vendas, instalando-o nas proximidades do futuro local para a nova igreja que viria a ser construída anos depois [32] [35].

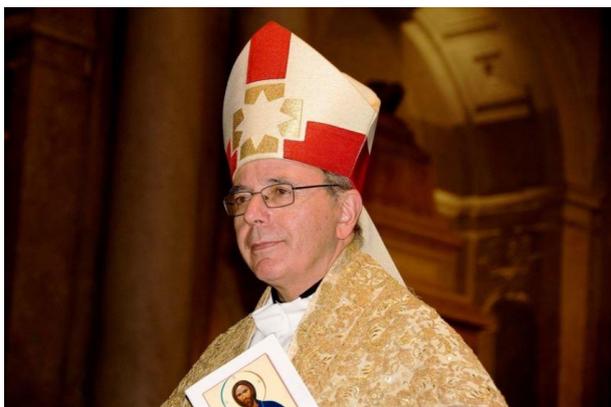


Fig. 4.1 e 4.2 – (À esquerda) Sr. Cardeal-Patriarca de Lisboa, D. Manuel Clemente à data da construção da igreja e (à direita) Cónego Paulo Franco, pároco do Parque das Nações [34] [33].

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA IGREJA DE NOSSA SENHORA DOS NAVEGANTES

A igreja de Nossa Senhora dos Navegantes é uma igreja contemporânea e minimalista, com o projeto da autoria do Arquiteto José Maria Dias Coelho. A sua característica distintiva, no exterior, é a sua forma circular, com a cruz proeminente recortada acima da entrada principal da igreja e com a ponte Vasco da Gama como cenário de fundo (Fig. 4.3) [30] [31].



Fig. 4.3 – Entrada principal da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [36].

A igreja conta ainda com uma torre sineira de cerca de 40 metros de altura (Fig. 4.4), que foi concebida para não passar despercebida, alinhando-se com a altura dos edifícios circundantes e ao nível do tabuleiro da ponte Vasco da Gama. Assim, torna-se também um ponto de referência, quase como um farol que aponta o caminho e identifica o local [35].

A Igreja situa-se no Passeio do Levante, numa zona calma e pacata do Parque das Nações. (Fig. 4.5)

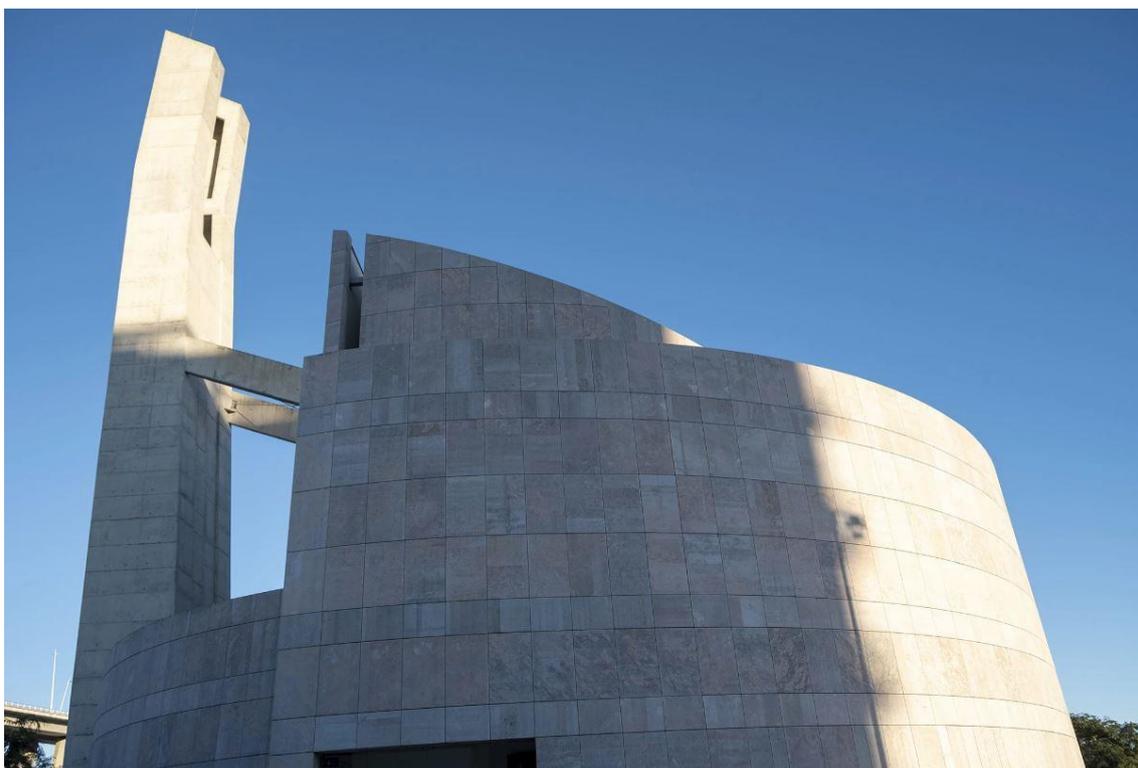


Fig. 4.4 – Vista lateral da torre da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [36].



Fig. 4.5 – Vista aérea 3D da localização da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [37].

No interior da igreja a organização dos espaços e da congregação converge para aquilo que é o seu ponto central: o Altar. É também possível constatar que existe uma simetria na igreja (Fig. 4.6 e 4.7).

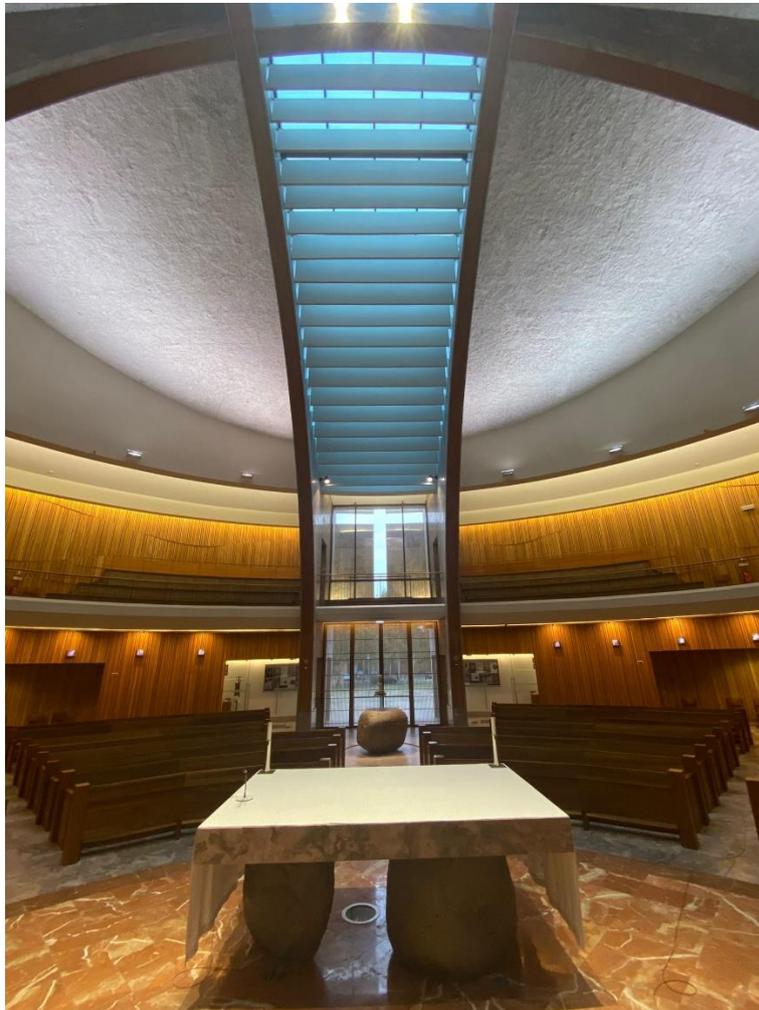


Fig. 4.6 – Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, vista do Altar. [foto do autor]

Quando se entra na igreja, vê-se a luz natural da cruz a irradiar pelo teto da nave até à parede atrás do altar (retábulo) onde se encontra a representação de Jesus Cristo, num estilo parecido com a de um mural (Fig. 4.7).

Já na Fig. 4.8 é possível verificar a convergência dos elementos arquitetónicos para o Altar, em linhas circulares, o que favorece a centralidade do edifício. A igreja está preparada para acolher cerca de 800 pessoas, sendo que 600 dos lugares são sentados e distribuídos por dois pisos e cerca de 200 lugares de pé (Fig.4.8) [32].



Fig. 4.7 – Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, vista da entrada principal só com luz natural [foto do autor].

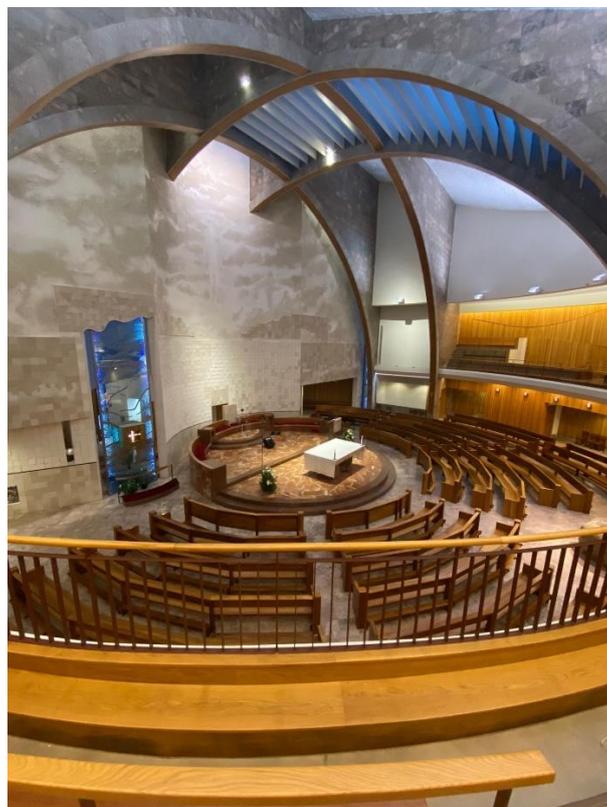


Fig. 4.8 – Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, vista do 1º piso [foto do autor].

A igreja segue um conceito minimalista e são escassos os elementos decorativos, utilizando principalmente materiais naturais como madeira e pedra de granito. Exemplo disso é o Altar (Fig. 4.6) que está assente em duas pedras, o Ambão e o Batistério. A pedra do Batistério é de grandes dimensões, arredondada, de faces irregulares e porosas. A única face polida é a concavidade da água benzida (Fig. 4.9).

Além destas estruturas em pedra, existe uma escultura da padroeira e do padroeiro secundário da igreja. A padroeira é Nossa Senhora dos Navegantes (Fig. 4.10) e o padroeiro é São Paulo.



Fig. 4.9 – Foto do Batistério da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, vista de cima [32].



Fig. 4.10 – Escultura de Nossa Senhora dos Navegantes [foto do autor].

A igreja não tem sistema AVAC, tem sim uma claraboia com abertura manual que dá acesso à cobertura. Com a análise das plantas e cortes longitudinais (Fig. 4.11 e 4.12), foi possível aferir os seguintes parâmetros arquitetónicos:

- Raio máximo: 17,15 m;
- Altura máxima da nave: 17 m;
- Área total da nave principal: 514,63 m²;
- Área total da igreja: 689 m²;
- Volume total da: 8500 m³.

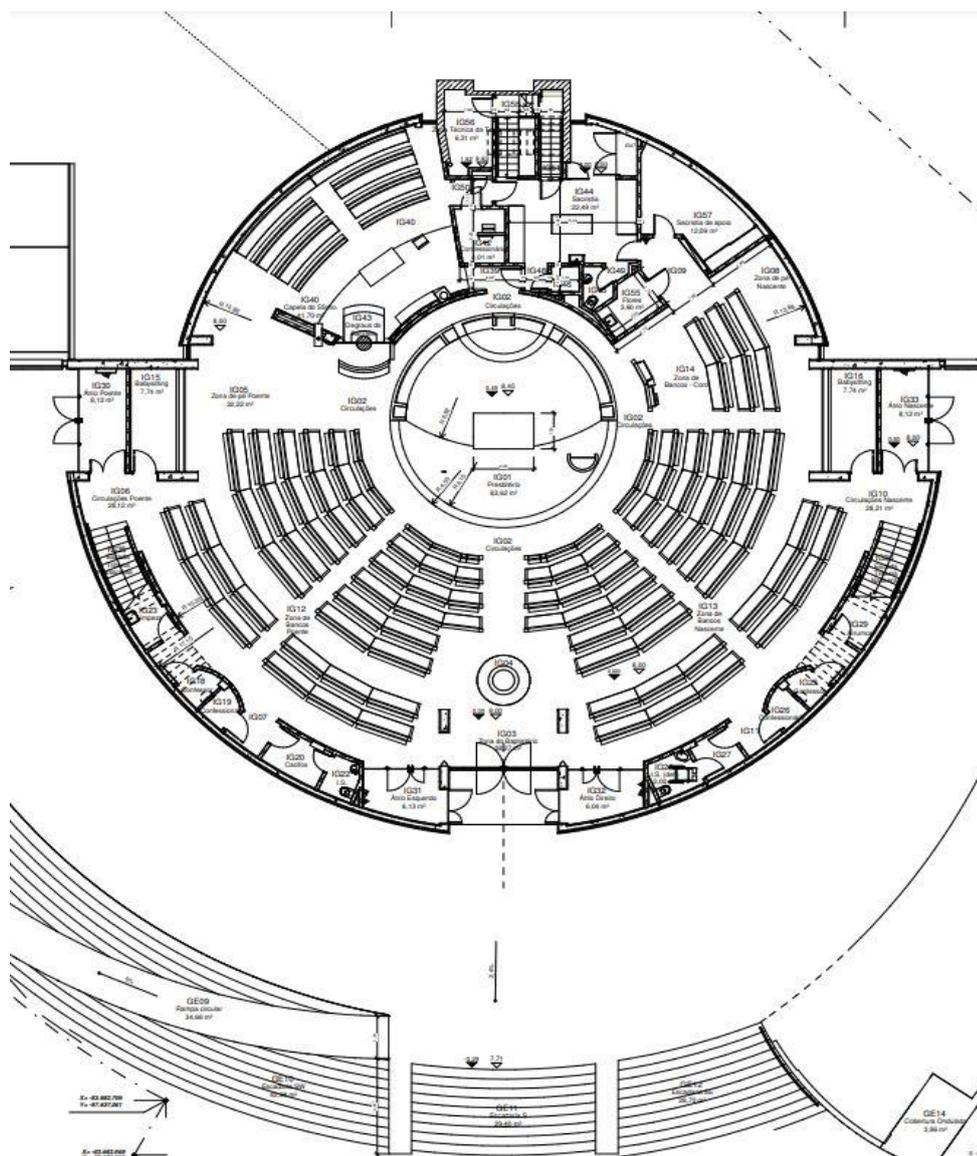


Fig. 4.11 – Planta do piso 0 da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [38].

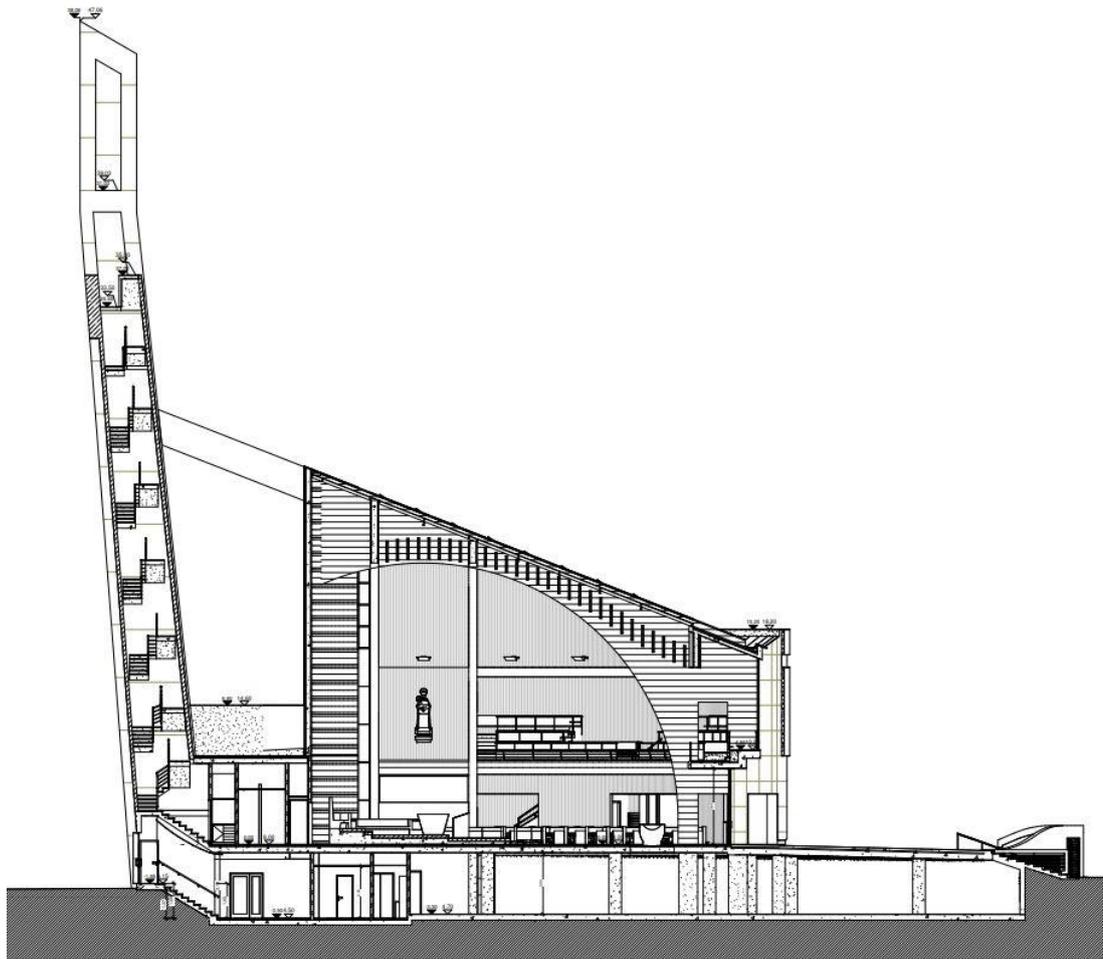


Fig. 4.12 – Corte longitudinal da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [38].

Soluções acústicas que foram incluídas no projeto para que haja um melhor condicionamento acústico, em especial para redução do Tempo de reverberação [38]:

- Placas acústicas suspensas (*baffles*) de altura de 1 metro e espessura de 10 cm (Fig. 4.13) [38];
- Aplicação de *spray* K-13 no teto da nave (Fig. 4.14) [38];
- Aplicadas nas paredes da nave ressoadores agrupados (umas ripas de madeira com espaçamentos diferentes entre elas e com isolamento 5 cm de lã de rocha) (Fig. 4.15) [38].



Fig. 4.13 – Placas acústicas suspensas (*baffles*) no teto da nave da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [foto do autor].



Fig. 4.14 – K-13 projetado no teto da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [foto do autor].



Fig. 4.15 – Ressonadores agrupados (ripas de madeira com absorvente colocadas nas paredes da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [foto do autor].

A nave principal da igreja conta com um reforço eletroacústico de dois altifalantes da marca Axys. Os dois altifalantes fazem uso da tecnologia de *beamforming* pode ser aplicada para direcionar o som de maneira mais precisa em uma determinada direção ou para áreas específicas. Esse conceito é muitas vezes referido como "*beamforming* de áudio".

Ao aplicar o *beamforming* em altifalantes, os dispositivos podem ajustar a saída de áudio para criar feixes direcionados em direção a um local específico no ambiente (sensivelmente a altura da cabeças dos ouvintes). Isso pode ser útil em várias situações, como em sistemas de som ambiente, em que se deseja direcionar o som para uma área específica de uma sala.

Na Fig. 4.16 pode-se ver as zonas onde os dois altifalantes da igreja estão instalados, destacados com os pontos da cor verde (à esquerda) e um altifalante propriamente dito (à direita).

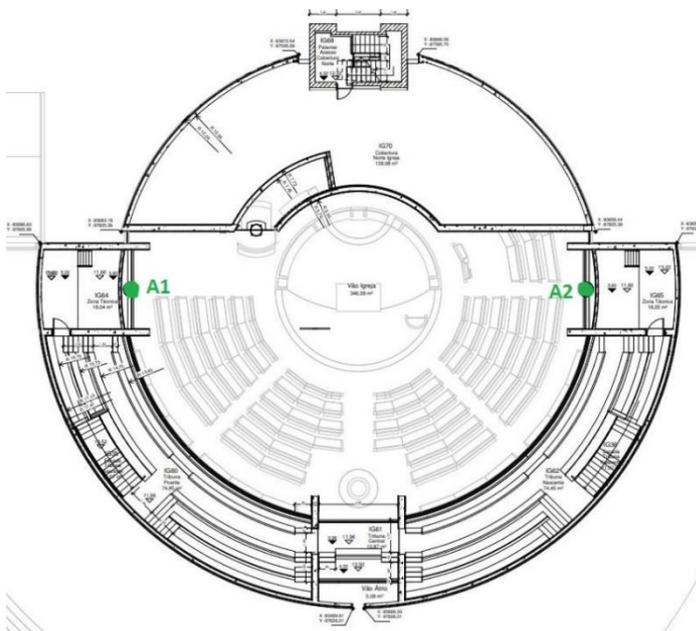


Fig. 4.16 – Localização dos altifalantes próprios A1 e A2 na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes (à esquerda) [adaptado de 38] e altifalante instalado na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes (à direita) [foto do autor].

5

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos os ensaios realizados *in situ* na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, como parte da realização deste estudo. Com o objetivo de caracterizar acusticamente esta igreja foram utilizados equipamentos de medição específicos para cada situação a ser analisada. Estes dispositivos de medição possibilitam a obtenção e o registo dos valores dos parâmetros necessários para a caracterização acústica do espaço. Foram, assim, medidos os seguintes parâmetros acústicos:

- Nível de pressão sonora contínua equivalente do ruído de fundo (Leq e LAeq);
- Tempo de reverberação (TR);
- STI (*Speech Transmission Index*);
- Claridade (C_{80});
- Definição (D_{50});
- Tempo Central (TS).

Os ensaios foram realizados no dia 8 de novembro de 2023, das 16h00 até às 18h30. Não se efetuou a medição do nível sonoro contínuo equivalente de ruído dos sistemas de ventilação, ar condicionado e aquecimento (AVAC), uma vez que a igreja não está equipada com este tipo de sistemas.

A igreja foi testada em total desocupação, exceto pela presença do autor e do Engenheiro António Eduardo Costa. Na fase final dos testes, observou-se um aumento na atividade dentro da igreja e, por essa razão, foi feito um esforço para minimizar ao máximo qualquer perturbação nos resultados. Em situações em que o ruído proveniente desses fatores era claramente prejudicial para os testes, os ensaios foram interrompidos e repetidos. Dadas as proporções da igreja, e especialmente devido às suas propriedades simétricas, a decisão foi realizar testes apenas numa metade do espaço, considerando que os valores obtidos para essa metade são representativos da outra.

O equipamento e *software* utilizado em todos os ensaios é propriedade do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e foram os seguintes:

- Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 (Fig. 5.1);
- Fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 (Fig. 5.1);
- Calibrador de microfone Brüel & Kjær, modelo 4231 (Fig. 5.2);
- Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189 (Fig. 5.2);
- Tripé portátil Brüel & Kjaer, modelo UA0049;
- Fonte sonora Brüel & Kjaer (*Echo Speech Source*) modelo 4720 (Fig. 5.3);
- *Software* DIRAC [49].



Fig. 5.1 - Sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 [39] (à esquerda) e fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 [41] (à direita).



Fig. 5.2 - Calibrador de microfone Brüel & Kjær, modelo 4231 [42] (à esquerda) e Microfone de 13 mm Brüel & Kjær, modelo 4189 [43] (à direita).



Fig. 5.3 - Fonte sonora Brüel & Kjaer (*Echo Speech Source*) modelo 4720 [44].

5.2. RUÍDO DE FUNDO

5.2.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

No ensaio para determinar o ruído de fundo, o objetivo foi avaliar e descrever o ruído de fundo presente no interior da igreja, sem a presença de visitantes e sem equipamentos de climatização, já que o local não dispunha de nenhum sistema desse tipo. Para isso utilizou-se um sonómetro Brüel & Kjær modelo 2260 (Fig. 5.4) para medir o nível de pressão sonora contínua equivalente, com o objetivo de caracterizar e determinar os níveis sonoros existentes no interior, resultantes da interferência direta do ruído ambiente externo, como tráfego e outros, a fim de compreender se poderiam perturbar os usuários desse espaço de oração. Simultaneamente, registrou-se os respetivos espectros sonoros em bandas de frequência de oitava, entre 125 e 8000 Hz.



Fig. 5.4 – Medição do ruído de fundo na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [foto do autor].

5.2.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

No ensaio de determinação do ruído de fundo foram escolhidos dois pontos específicos (RF1 e RF2). Um deles fica situado no piso 0 e o outro fica na tribuna no 1º piso (Fig. 5.4), sendo que locais selecionados para o registo do ruído de fundo encontram-se nos assentos distribuídos pela igreja (Fig. 5.5), à altura média dos ouvidos de uma pessoa.

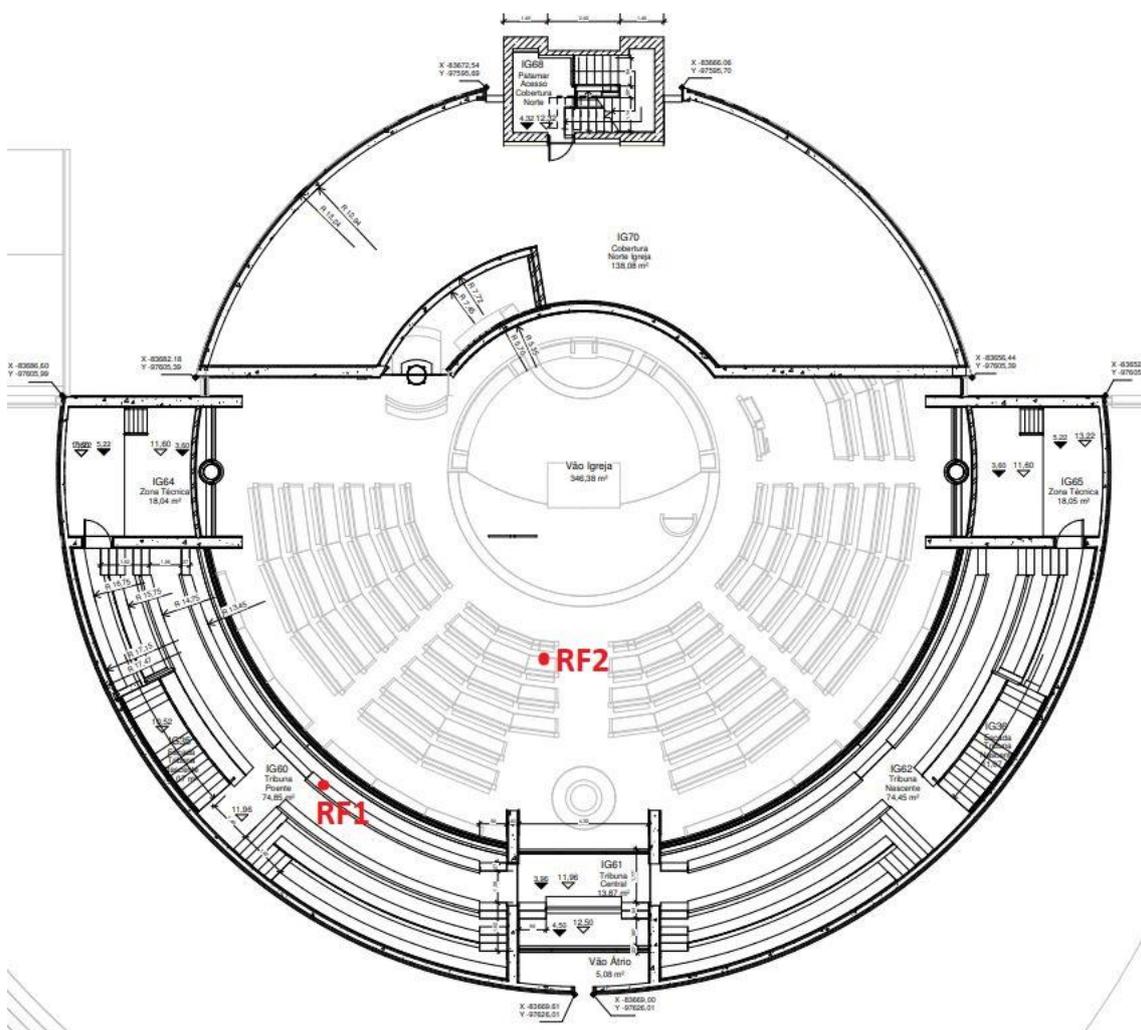


Fig. 5.5 – Planta da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes com a representação dos dois pontos escolhidos para as medições do ruído de fundo. RF1, ponto 1 situado no 1º andar e RF2 no piso 0 [adaptado de 38].

5.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.3.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Para medir os valores do tempo de reverberação, utilizou-se uma fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 como emissor (Fig. 5.6) e um sonómetro Brüel & Kjær, modelo 2260 como recetor. A fonte sonora emitiu ruído branco por 10 segundos. Cada medição foi realizada com o sonómetro a uma altura aproximada de 1,20 m e a fonte sonora foi posicionada no eixo central da igreja, apontada para a entrada principal. Após o término do ruído emitido pela fonte, o sonómetro regista o nível de pressão sonora recebido em cada instante e determina o correspondente decréscimo em relação a 30 dB (TR30) nas bandas de frequência de oitava, entre 125 e 8000 Hz. As medições foram realizadas em cinco posições distintas (sendo que três delas foram no piso 0 e as restantes duas na tribuna da igreja no primeiro andar (Fig. 5.7)), e em cada posição, realizaram-se duas leituras, girando a direção do sonómetro cerca de 90° entre cada leitura em relação à primeira direção. Os valores medidos nas avaliações correspondem à extrapolação para um decréscimo de 60 dB. O valor final de cada ponto da medição representa a média aritmética das duas leituras do tempo de reverberação em cada posição.



Fig. 5.6 – Posicionamento da fonte sonora Brüel & Kjær, modelo 4224 na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, para medição do tempo de reverberação [foto do autor].

5.3.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

Cinco pontos distintos foram escolhidos para a realização das medições no ensaio de medição dos tempos de reverberação, conforme ilustrado na Figura 5.7. Três desses pontos (TR1, TR2 e TR3) estão localizados no piso 0, abrangendo os bancos dispostos diagonalmente à frente do altar. Os dois pontos restantes (TR4 e TR5) foram selecionados no nível superior da igreja (piso 1) para cobrir a área mais ampla possível de lugares sentados. De salientar que também é possível verificar o posicionamento da fonte sonora na Fig. 5.7.

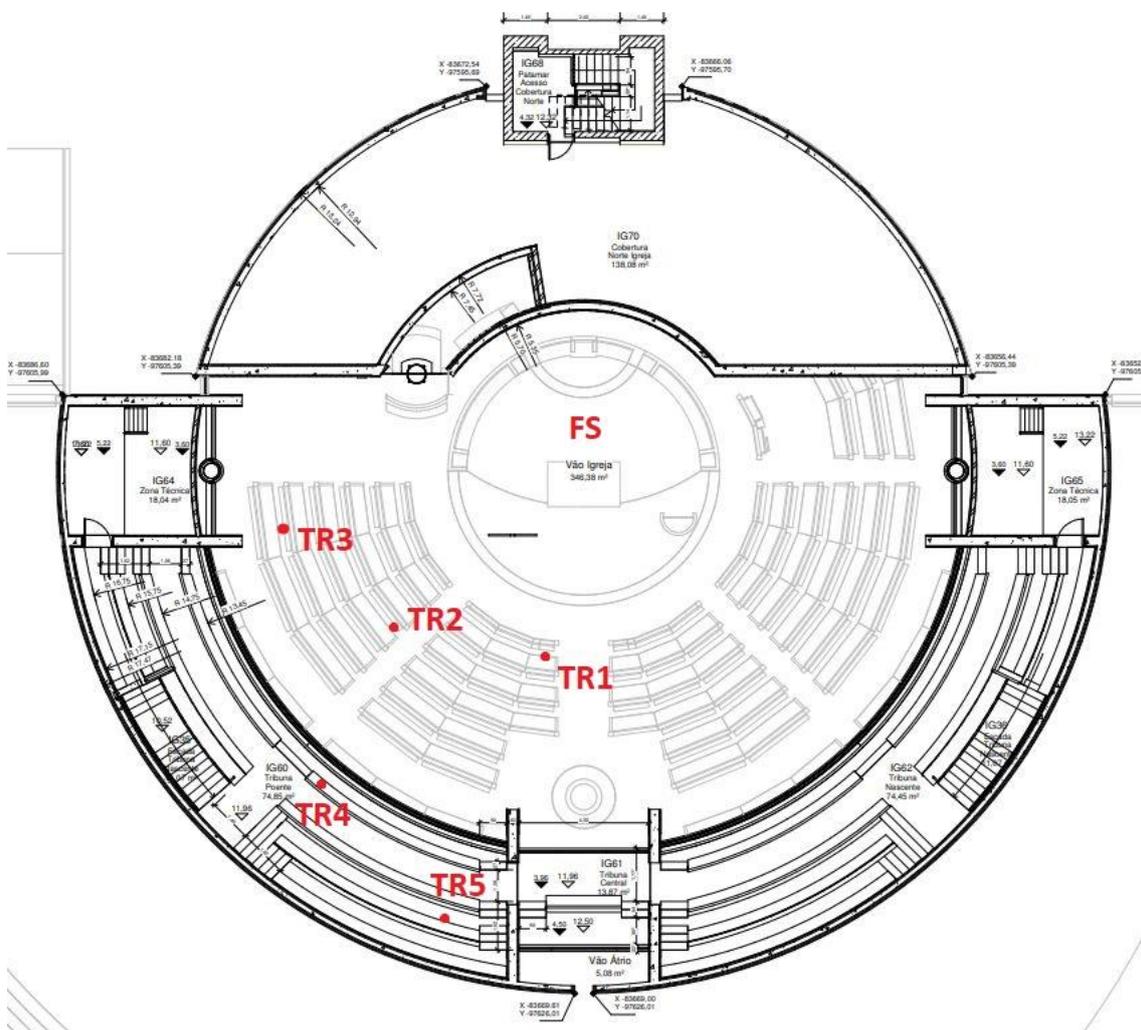


Fig. 5.7 – Planta da Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes com a representação da localização da fonte sonora (FS) e dos cinco pontos usados para a medição do TR [adaptado de 38].

5.4 SPEECH TRANSMISSION INDEX / CLARIDADE / DEFINIÇÃO / TEMPO CENTRAL

5.4.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Neste ensaio foram medidos o STI, Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo central (TS). Utilizou-se um dispositivo composto por uma fonte sonora Brüel & Kjaer (*Echo Speech Source*) modelo 4720, e um recetor sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2260 (Fig. 5.1 e 5.3). O ruído característico emitido pela fonte sonora é filtrado nas bandas de oitava entre 125 e 8000 Hz, pelo recetor que realiza uma medição de 8 segundos. A fonte sonora foi posicionada atrás altar sobre um tripé, junto ao ambão onde está instalado um dos microfones da igreja, alinhado com a entrada principal a uma altura semelhante à da cabeça de um orador (Fig. 5.8). O equipamento recetor foi colocado, a uma altura de aproximadamente 1,20 m correspondendo à altura aproximada da cabeça de uma pessoa sentada num dos bancos da igreja.



Fig. 5.8 - Fonte sonora Brüel & Kjaer (*Echo Speech Source*) modelo 4720 instalado na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [foto do autor].

Mediram-se seis posições diferentes ao longo da igreja e os valores finais do STI, C_{80} , D_{50} e TS para cada posição calcularam-se através do *software* (DIRAC), que processou todos os dados coletados. Na primeira fase, o nível de emissão sonora foi medido apenas com o equipamento emissor ligado, sem amplificação sonora da igreja. Na segunda fase de medição, o sistema de reforço eletroacústico instalado na igreja foi ligado para novas medições do STI e D_{50} .

5.4.2. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

Na Figura 5.9 pode-se ver a localização da fonte sonora (FS) e das seis posições onde foram efetuadas as medições sendo que de P1 a P4 foram no piso inferior e P5 e P6 no piso superior.

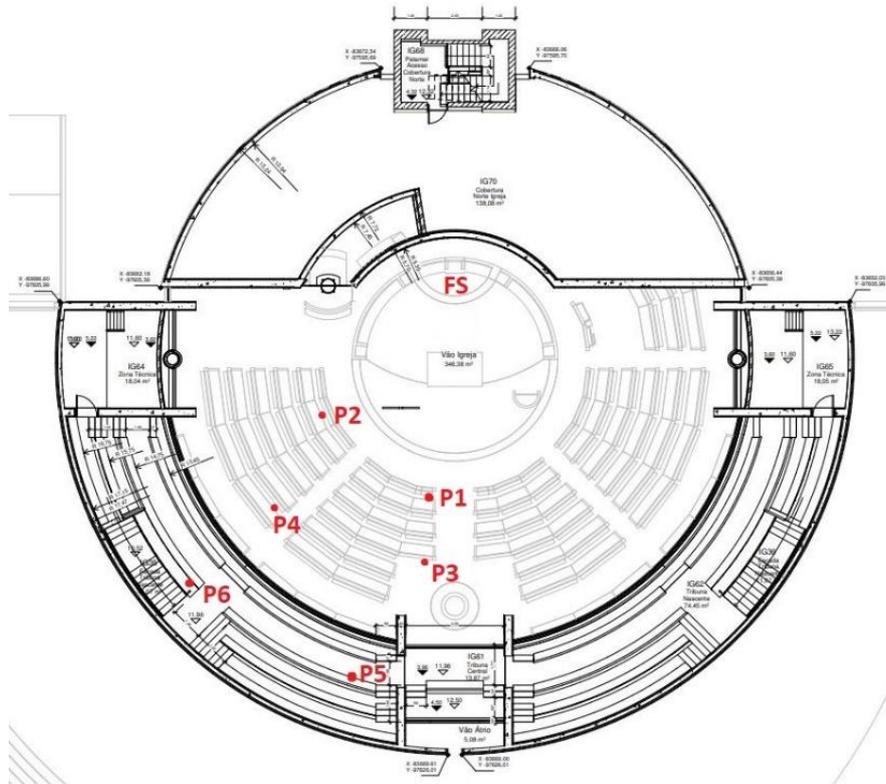


Fig. 5.9 - Localização da fonte sonora (FS) e dos seis pontos de medição na igreja para avaliação do STI, C_{80} , D_{50} e TS [adaptado de 38].

6

RESULTADOS

6.1. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO RUÍDO DE FUNDO

O ruído de fundo pode ser avaliado por meio de vários parâmetros acústicos, tais como o nível sonoro contínuo equivalente LAeq em dB ou nível de pressão sonora Leq em dB. Neste caso de estudo foram ambos valores registados por bandas de frequência de 1/3 de oitava para os dois pontos escolhidos calculada a média logarítmica e o valor global. Os resultados são os apresentados nos Quadros 6.1 e 6.2.

Quadro 6.1 – Valores dos níveis de pressão sonora (Leq) em bandas de frequência de 1/3 oitava, média logarítmica e valor global nos pontos RF1 e RF2.

Banda de Frequência (Hz)	RF 1 (dB)	RF 2 (dB)	Média logarítmica (dB)	Banda de Frequência (Hz)	RF 1 (dB)	RF 2 (dB)	Média logarítmica (dB)
25	47,3	46,3	46,8	1,6k	12,6	13,1	12,9
31,5	47,3	46,5	46,9	2k	11,2	11,3	11,3
40	47,4	46,5	47,0	2,5k	10,5	10,5	10,5
50	47,6	46,9	47,3	3,15k	11,0	10,7	10,9
63	46,7	46,6	46,7	4k	10,0	9,9	10,0
80	42,1	41,5	41,8	5k	9,4	9,4	9,4
100	41,0	40,4	40,7	6,3k	9,2	9,1	9,2
125	39,2	38,8	39,0	8k	9,4	9,4	9,4
160	36,6	36,3	36,5	10k	8,9	9,0	9,0
200	31,2	31,0	31,1	12,5k	8,5	8,5	8,5
250	27,9	28,2	28,1	16k	8,6	8,7	8,7
315	25,1	24,8	25,0	20k	9,3	9,5	9,4
400	20,5	20,4	20,5	Global (dB)	56,7	56,3	56,5
500	18,7	18,8	18,8				
630	19,2	18,8	19,0				
800	18,5	18,2	18,4				
1k	16,4	16,1	16,3				
1,25k	14,0	14,5	14,3				

Quadro 6.2 – Valores dos níveis de pressão sonora filtrados A (LAeq) do ruído de fundo em dB para bandas de frequência de 1/3 oitava, média logarítmica e valor global nos pontos RF1 e RF2.

Banda de Frequência (Hz)	RF 1 (dBA)	RF 2 (dBA)	Média (dBA)	Banda de Frequência (Hz)	RF 1 (dBA)	RF 2 (dBA)	Média (dBA)
25	2,6	1,6	2,1	1,6k	13,6	14,1	13,9
31,5	7,9	7,1	7,5	2k	12,4	12,5	12,5
40	12,8	11,9	12,4	2,5k	11,8	11,8	11,8
50	17,4	16,7	17,1	3,15k	12,2	11,9	12,1
63	20,5	20,4	20,5	4k	11,0	10,9	11,0
80	19,6	19,0	19,3	5k	9,9	9,9	9,9
100	21,9	21,3	21,6	6,3k	9,1	9,0	9,1
125	23,1	22,7	22,9	8k	8,3	8,3	8,3
160	23,2	22,9	23,1	10k	6,4	6,5	6,5
200	20,3	20,1	20,2	12,5k	4,2	4,2	4,2
250	19,3	19,6	19,5	16k	2,0	2,1	2,1
315	18,5	18,2	18,4	20k	0,0	0,2	0,1
400	15,7	15,6	15,7	Global (dB)	31,7	31,4	31,6
500	15,5	15,6	15,6				
630	17,3	16,9	17,1				
800	17,7	17,4	17,6				
1k	16,4	16,1	16,3				
1,25k	14,6	15,1	14,9				

Ao examinar os resultados, constata-se que o ponto RF1 e o ponto RF2 exibem valores praticamente iguais, embora o ponto RF1 esteja mais próximo da parede da igreja. É um local bastante tranquilo e com pouca circulação rodoviária, o que se reflete em níveis de ruído de fundo aceitáveis. O valor médio global do nível de pressão sonora equivalente contínuo do ruído de fundo na sala é de 57 dB.

Depois de aplicar o filtro A (Quadro 6.2 e Fig. 6.1), observa-se que os valores globais obtidos anteriormente diminuem significativamente, especialmente nas baixas frequências, como era de esperar, uma vez que o filtro A visa aproximar os ruídos de baixa intensidade à resposta humana e traduzir de forma concreta, mas acentuada perda de sensibilidade do ouvido humano para as baixas frequências, sendo que o nível de pressão sonora é de 32 dB(A).

No que diz respeito a valores da legislação do RRAE, não existe um valor limite de ruído de fundo para as igrejas. No entanto, um valor “aconselhado” será LAeq ≤ 30 dB, sendo que o medido fica um pouco acima desse valor (32 dB).

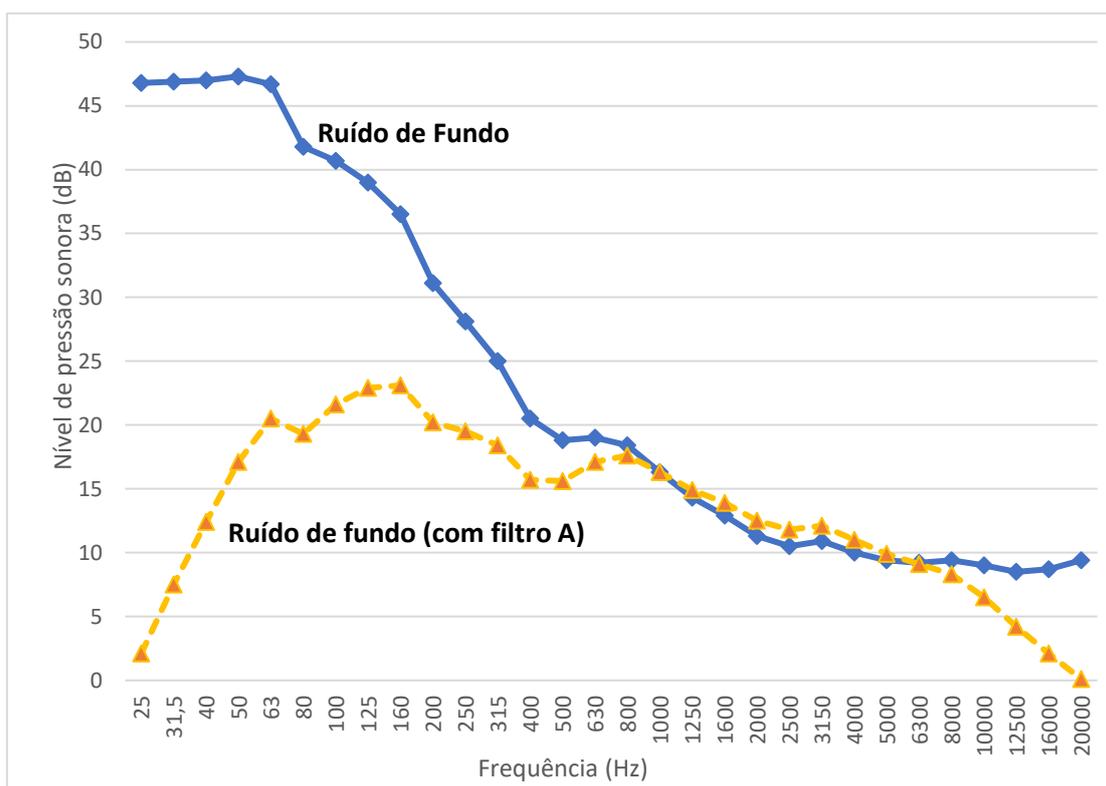


Fig. 6.1 - Valores dos níveis de pressão sonora e dos níveis de pressão sonora, filtrado A do ruído de fundo na Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

6.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Em cada um dos locais ensaiados, foram anotados os valores de Tempo de Reverberação (TR30) para bandas de frequência de 1/3 de oitava e posteriormente calculados para intervalos de frequência de 1/1 oitava, de 125 a 8000 Hz. Os resultados estão detalhados nos Quadros 6.4 e 6.5, assim como a média das medições dos cinco pontos. Os gráficos das Figs. 6.2 e 6.3 mostram os valores do tempo de reverberação por intervalo de frequência. Foram ainda calculados os TR [500,1k Hz] (Quadros 6.4 e 6.5), apesar de alargar o âmbito da sua aplicação a auditórios e salas de espetáculos, nada refere em relação a igrejas, sendo impossível fazer uma comparação e classificação dos valores obtidos nos ensaios do TR com os exigidos por lei. Contudo, pode ser aconselhado valores da mesma natureza e se se admitir uma igreja como um auditório, então os valores máximos de TR [500,1k Hz] aí impostos seriam para a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes de $1,05 + 40\% (I) = 1,47$ segundos para um volume maior ou igual a $9000 m^3$, não muito afastado dos 2,00 segundos, obtido nos ensaios.

Quadro 6.3 - Valores obtidos de TR30 na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes para os pontos de TR1 a TR5, assim como a média por frequência de 1/3 oitava e TR [500,1k Hz] e respetivo desvio padrão (s).

Banda de Frequência (Hz)	TR1 (s)	TR2 (s)	TR3 (s)	TR4 (s)	TR5 (s)	s (s)	Média (s)
100	3,73	3,28	4,33	3,18	3,97	0,42	3,70
125	2,88	3,92	3,22	2,99	2,86	0,39	3,17
160	3,04	3,26	3,17	3,02	2,94	0,11	3,09
200	2,74	2,34	2,37	2,96	2,84	0,25	2,65
250	2,37	2,37	2,47	2,62	2,46	0,09	2,46
315	2,30	2,27	2,34	2,25	2,26	0,03	2,28
400	2,18	2,11	2,23	2,14	2,18	0,04	2,17
500	1,92	1,95	2,24	2,02	2,01	0,11	2,03
630	1,86	1,81	2,03	1,99	1,86	0,08	1,91
800	1,96	1,84	1,97	1,92	1,91	0,04	1,92
1k	1,98	2,05	1,93	1,95	1,96	0,04	1,97
1,25k	2,09	2,04	1,87	1,95	1,95	0,07	1,98
1,6k	1,91	1,97	1,94	1,88	1,99	0,03	1,94
2k	1,82	1,85	1,78	1,82	1,82	0,02	1,82
2,5k	1,72	1,76	1,75	1,71	1,78	0,02	1,74
3,15k	1,69	1,76	1,65	1,77	1,78	0,05	1,73
4k	1,43	1,53	1,58	1,53	1,55	0,05	1,52
5k	1,35	1,32	1,37	1,32	1,36	0,02	1,34
6,3k	1,09	1,13	1,26	1,15	1,12	0,05	1,15
8k	0,94	0,95	1,10	1,00	1,00	0,05	1,00
10k	0,80	0,97	0,85	0,87	0,83	0,05	0,86
TR (s) [500, 1k Hz]	2,35	1,97	2,05	2,00	1,97	0,144	2,00

Quadro 6.4 - Valores obtidos de TR30 na Igreja da Nossa Senhora dos Navegantes para os pontos de TR1 a TR5, assim como a média por frequência de 1/1 oitava e TR [500,1k Hz] e respetivo desvio padrão (s).

	Frequência (Hz)							TR [500,1k Hz] (s)
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
TR1 (s)	3,22	2,74	1,99	2,01	1,82	1,49	0,94	2,00
TR2 (s)	3,49	2,33	1,96	1,98	1,86	1,54	1,02	1,97
TR3 (s)	3,57	2,40	2,17	1,92	1,82	1,53	1,07	2,05
TR4 (s)	3,06	2,61	2,05	1,94	1,80	1,54	1,01	2,00
TR5 (s)	3,26	2,52	2,02	1,94	1,86	1,56	0,98	1,98
s	0,18	0,14	0,07	0,03	0,02	0,02	0,04	0,02
Média (s)	3,32	2,52	2,04	1,96	1,83	1,53	1,00	2,00

Nesta investigação, assumir-se-á que uma perceção adequada da palavra requer tempos de reverberação baixos, situando-se entre 1,0 e 1,5 segundos, ao passo que para a música de órgão, os tempos de reverberação devem ser um pouco mais elevados, oscilando em torno de 2,0-4,0 segundos. [24]

Os tempos de reverberação medidos na igreja são superiores aos valores recomendados para uma perceção adequada da palavra, no entanto, revelam-se bastante interessantes para a música.

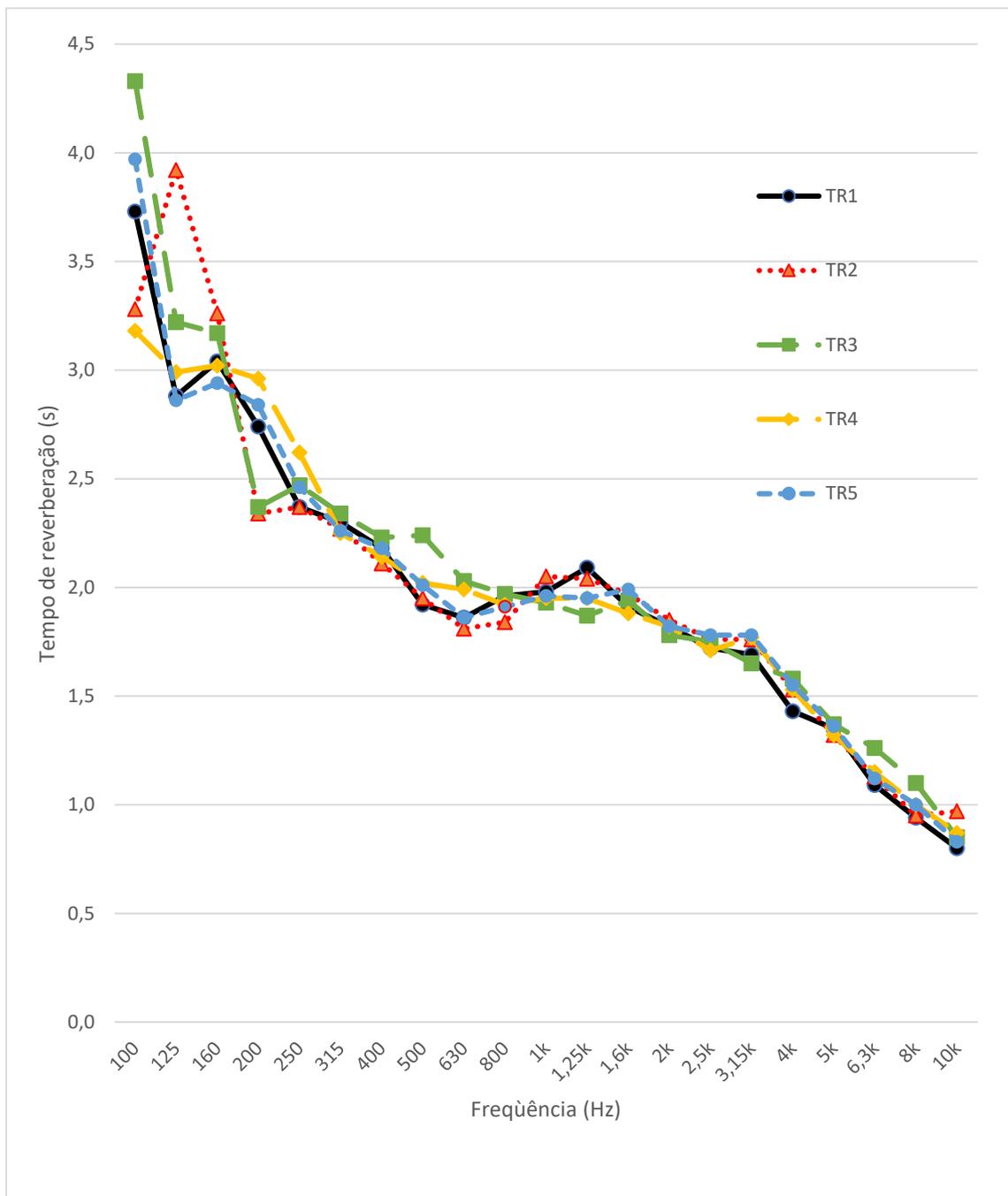


Fig. 6.2 - Valores do tempo de reverberação dos pontos TR1 ao TR5 em bandas de frequência de 1/3 de oitava da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

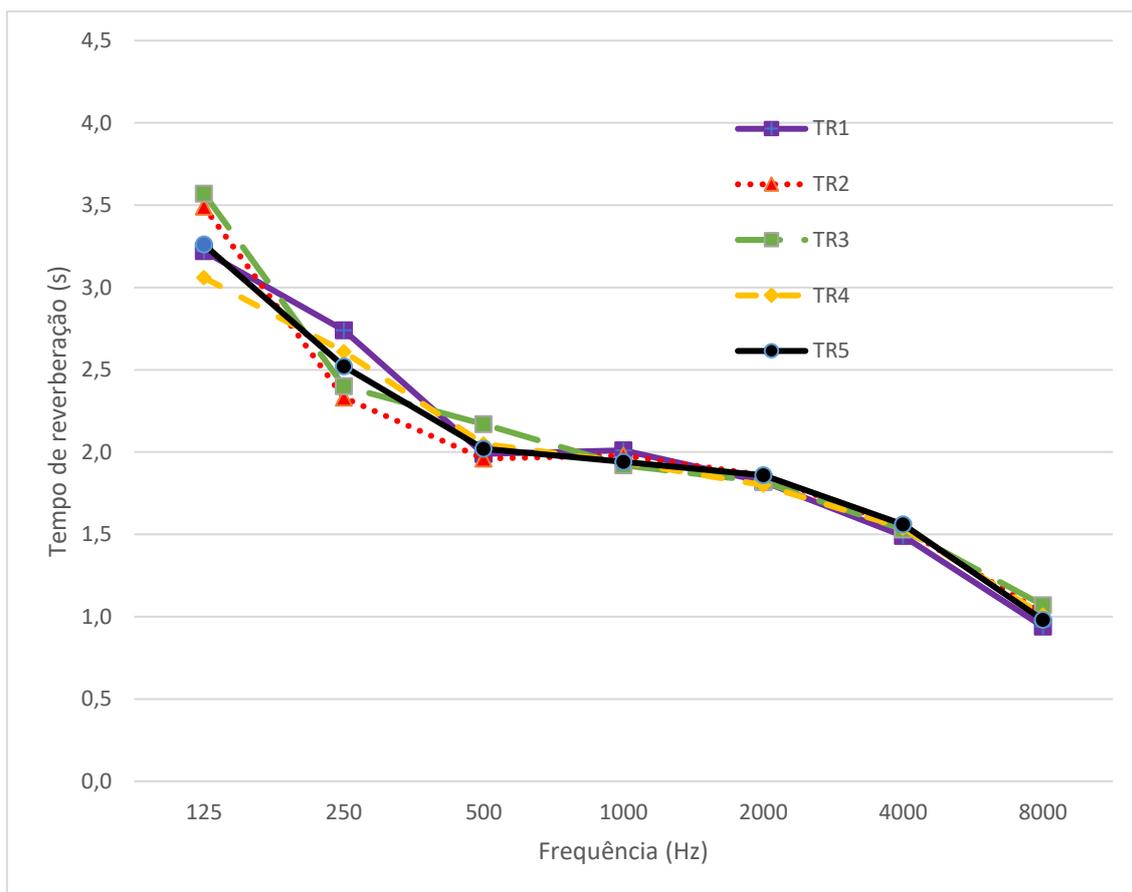


Fig. 6.3 - Valores do tempo de reverberação do ponto TR1 ao TR5 em bandas de frequência de 1/1 de oitava da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

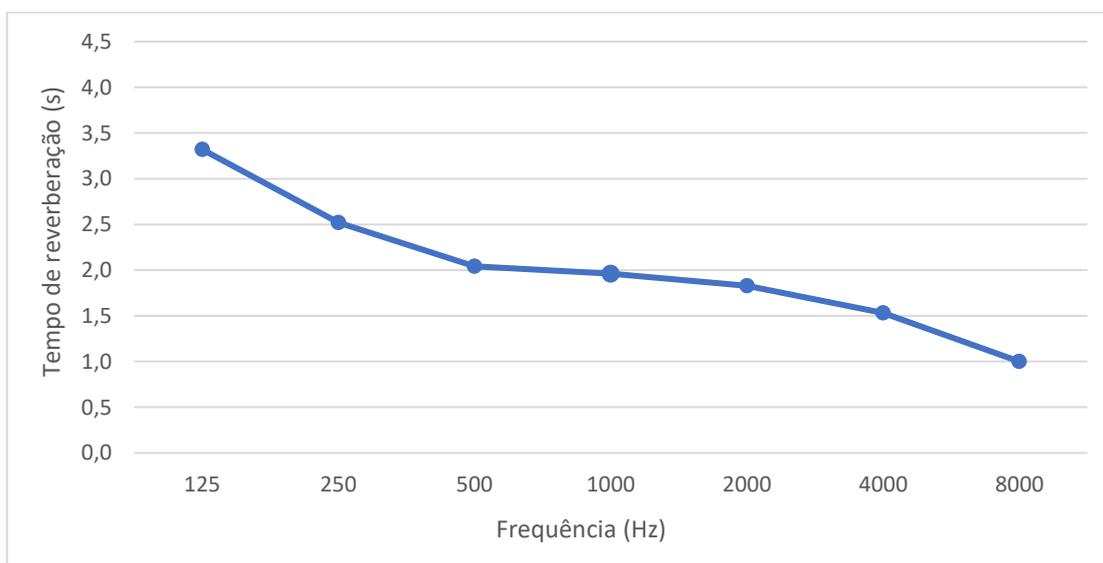


Fig. 6.4 – Valores do tempo de reverberação médio da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes em 1/1 bandas de oitava.

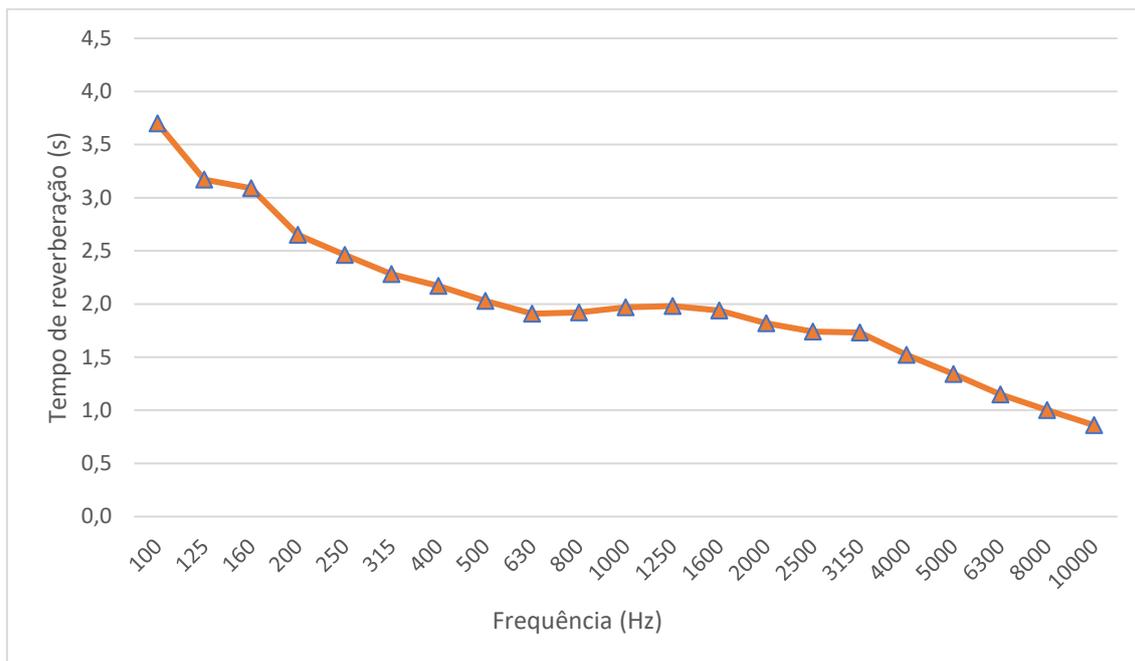


Fig. 6.5 – Valores do tempo de reverberação médio da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes em 1/3 bandas de oitava.

Recorrendo à fórmula de Sabine, procedeu-se ao cálculo para obter as previsões dos valores de tempo de reverberação para a igreja normalmente mobilada, isto é, com bancos de madeira e ocupação pela metade da audiência (TR50%) e para a igreja com ocupação de 100% (TR100%). Considerando os valores médios de TR medidos na igreja vazia (Quadro 6.4) e conhecendo o volume da sala de 8500 m^3 , efetuou-se o cálculo da absorção sonora equivalente da igreja (Quadro 6.5). A este valor somou-se a variação da absorção sonora para os bancos ocupados por m^2 , proveniente de um conjunto de bancos de madeira (Quadro 6.6) [51], incluindo uma margem de 0,5 m no perímetro correspondente ao aumento lateral das áreas de absorção reais, assumindo o valor de 239 m^2 . Com estes novos valores de absorção sonora, foram calculados os TR50% e TR100% previstos para a igreja com os bancos de madeira e com ocupação (Quadro 6.7).

Quadro 6.5 - Valores calculados da absorção inicial da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Absorção inicial da igreja (m^2)	410	539	667	694	743	889

Quadro 6.6 – Valores da variação da absorção sonora para bancos de madeira ocupados. [51]

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
A/m^2	0,24	0,52	1,09	1,39	1,51	1,48

Quadro 6.7 – Valores medidos e previstos do Tempo de Reverberação para a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes desocupada (TR0) com 50% (TR50) de lotação e 100% (TR100) de lotação e respetivas áreas de ocupação.

Frequência (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	TR [500,1k Hz]
Absorção sonora prevista para metade da ocupação (m^2)	450	625	846	922	991	1134	-
Absorção sonora prevista para ocupação completa (m^2)	490	711	1025	1150	1239	1378	-
TR0% (s)	3,32	2,52	2,04	1,96	1,83	1,53	2,0
TR50% (s)	3,02	2,17	1,60	1,47	1,37	1,20	1,5
TR100% (s)	2,77	1,91	1,33	1,18	1,10	0,98	1,3
$\Delta = TR0\% - TR100\%$ (s)	0,55	0,61	0,71	0,78	0,73	0,55	-

Em todas as bandas de frequência existe ganhos com a ocupação completa. Com a igreja cheia de pessoas o Tempo de Reverberação diminui e conseqüentemente favorece a liturgia da Palavra. Na Fig. 6.6 está representada graficamente o TR0%, TR50% e TR100% para bandas de frequência de 1/1 oitava.

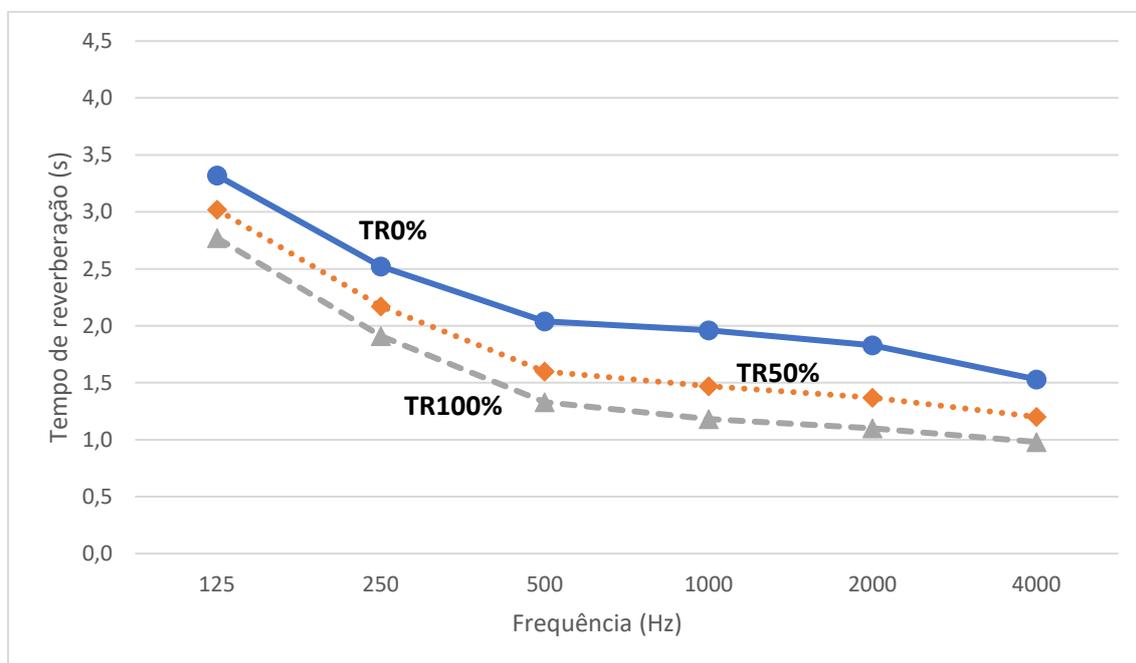


Fig. 6.6 – TR0%, TR50% e TR100% da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

6.3. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO STI

Foram registados os valores para os seis pontos seleccionados nas duas fases de teste (a primeira com a instalação sonora da igreja desligada e a segunda com os altifalantes ligados). Para cada ponto, o STI médio foi calculado pela média aritmética das leituras obtidas no dispositivo do “STI masculino” e do “feminino”. O STI médio da igreja corresponde à média aritmética do STI para todos os pontos. Os resultados de ambas as fases, estão representados no Quadros 6.8. A Fig. 6.6 exhibe os gráficos com os resultados das duas fases de teste, representando os pontos no eixo das abcissas e o valor do STI no eixo das ordenadas assim como o Δ STI. Para melhor compreensão da diferença de valores com e sem os altifalantes ligados, foi organizado o Quadro (6.9) com os respetivos valores.

Quadro 6.8 – Valores do STI com sistema de som desligado e ligado nos pontos de P1 a P6, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).

	STI masculino		STI feminino		STI médio		STI médio global	
	Desligado	Ligado	Desligado	Ligado	Desligado	Ligado	Desligado	Ligado
P1	0,46	0,53	0,48	0,55	0,47	0,54	0,44	0,54
P2	0,41	0,50	0,42	0,51	0,42	0,51		
P3	0,43	0,51	0,46	0,53	0,45	0,52		
P4	0,41	0,60	0,43	0,58	0,42	0,59		
P5	0,45	0,54	0,46	0,55	0,46	0,55		
P6	0,38	0,54	0,40	0,55	0,39	0,55		
s	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03		

Quadro 6.9 - Valores de Δ STI = (STIligado – STIdesligado) para compreensão dos efeitos do sistema de som da igreja.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Média	%
Δ STI	0,07	0,09	0,07	0,17	0,09	0,06	0,10	+23

Como se pode constatar pela Fig. 6.7, a instalação sonora da igreja tem consequências positivas aquando ligada, (aumentando cerca de 23% o STI) nomeadamente no capítulo da inteligibilidade da palavra, como era de esperar. Tanto com o sistema de som ligado como desligado o STI não varia muito de ponto para ponto, mantendo-se razoavelmente semelhante ao longo de toda a igreja. No ponto P4 nota-se uma maior diferença pois é um ponto muito perto do altifalante da igreja.

Ao examinar mais detalhadamente os valores obtidos do STI médio global (Quadro 6.9), pode-se concluir que, no geral, sem os altifalantes ligados o STI é de 0,44 o que representa uma inteligibilidade da palavra de *mediocre*, como se pode verificar pelo Quadro 2.3). Com os altifalantes ligados, o STI médio da igreja sofre um acréscimo de 0,10 e passa a ser 0,54 (+23%) o que se traduz numa inteligibilidade da palavra de *suficiente*, já próxima da *boa*.

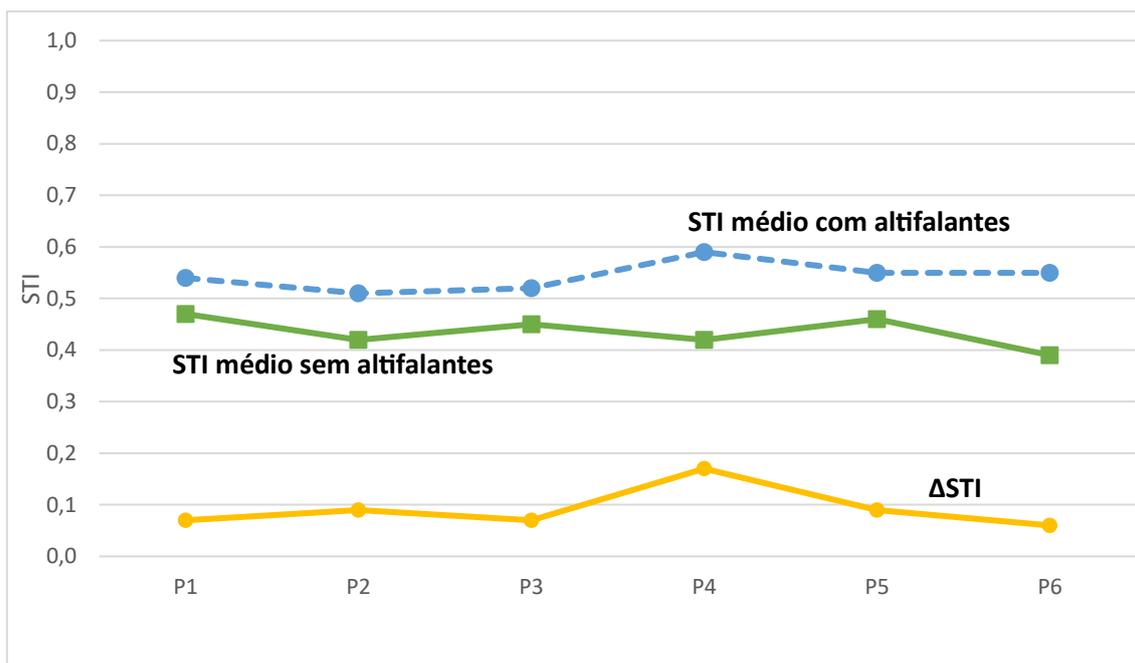


Fig. 6.7 – Comparação dos valores de STI médios com altifalantes ligados e desligados e o Δ STI = (STILigado – STIDesligado) na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

6.4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA CLARIDADE

A Claridade (C_{80}) é um critério que define a “inteligibilidade” das notas musicais e está vinculada ao equilíbrio entre a claridade percebida e o tempo de reverberação, sendo este último aspeto especialmente sensível durante uma audição da música. Este critério é de extrema importância para caracterizar acusticamente espaços onde ocorram espetáculos musicais, mas também onde se exprime a liturgia musical da Palavra. No Quadro 6.10 estão representados os dados retirados *in situ* relativamente à Claridade na igreja da Nossa Senhora dos Navegantes em bandas de frequência de 1/1 oitava.

Quadro 6.10 – Valores medidos relativamente à Claridade (C_{80}) nos pontos P1 a P6, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).

	Frequência (Hz)							C_{80} [500,1k Hz] (dB)
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1	1,26	-0,53	1,41	1,00	2,78	4,59	8,83	1,20
P2	-2,42	0,77	0,92	2,60	4,12	6,75	9,09	1,76
P3	-0,70	-0,88	-1,96	-0,10	1,45	4,57	8,40	-1,03
P4	-2,32	-2,15	0,06	0,30	0,73	2,93	6,15	0,18
P5	0,19	1,45	1,84	1,01	1,47	2,33	3,34	1,43
P6	-4,52	-1,79	-0,80	-0,61	0,59	2,80	5,49	-0,71
s	1,90	1,29	1,31	1,02	1,24	1,51	2,08	1,07
Média	-1,42	-0,52	0,25	0,70	1,86	4,00	6,88	0,50

Importa destacar que ainda não existe uma investigação totalmente precisa que estabeleça o valor ideal para este parâmetro acústico. No entanto, tem-se conhecimento de que cada estilo musical permite algumas variações neste índice, conforme as articulações das notas musicais pertinentes a cada estilo. Assim existe uma faixa de valores ótimos para o parâmetro do C_{80} e situa-se entre -2 dB e 2 dB. [24] Para “música de órgão” o C_{80} tem que ser menos que -2 dB e para “cânticos gregorianos” o C_{80} situa-se ente -3 a -1 dB.

Foram feitas medições em seis pontos distintos, para bandas de frequência de 1/1 oitava e na Fig. 6.8 estão representadas graficamente todos os valores. Posteriormente foi calculada aritmeticamente a média dos seis pontos, para cada banda de frequência, resultando no gráfico da Fig. 6.9.

O cálculo do $C_{80} = 0,50$ dB (Quadro 6.10), o que corresponde ao intervalo aconselhável de -2 a 2 dB, o que significa que cumpre os requisitos para que haja momentos musicais de qualidade.

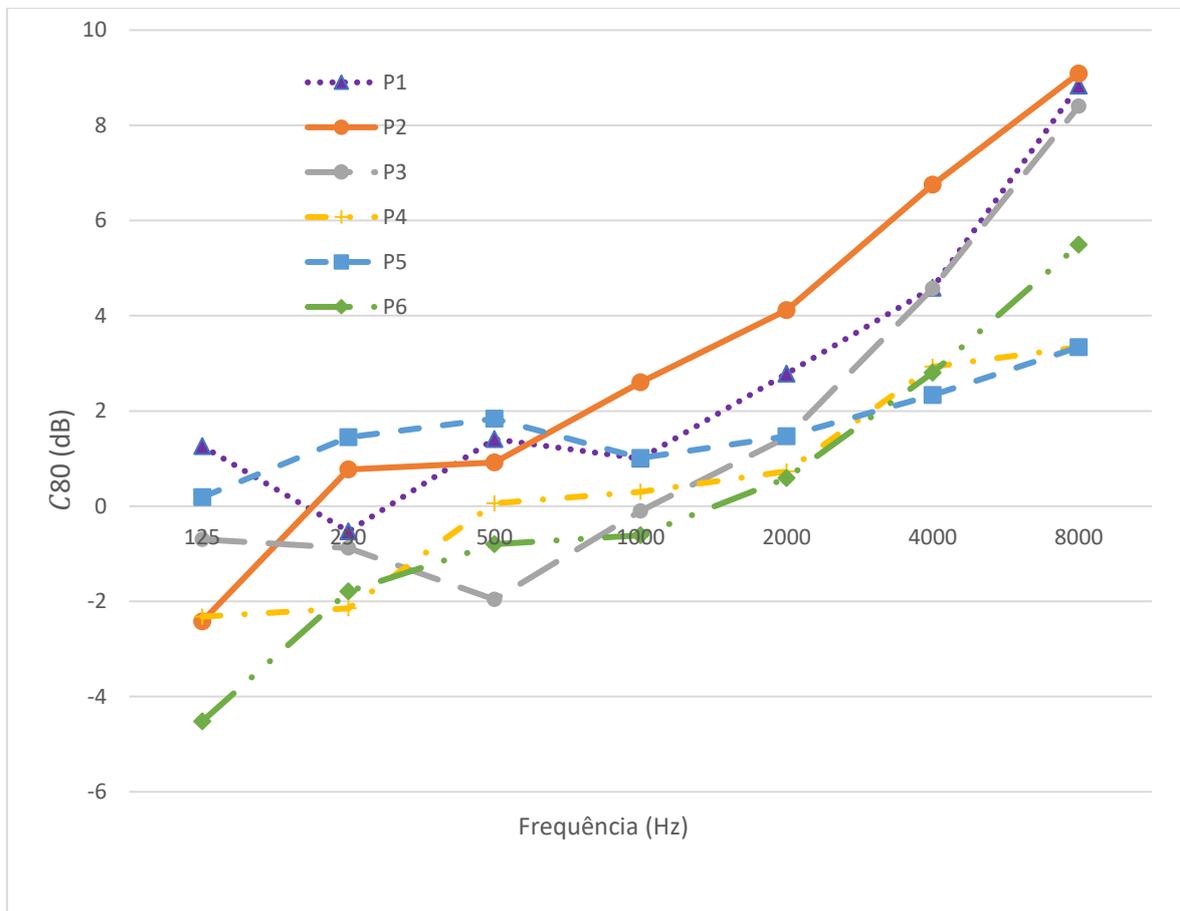


Fig. 6.8 – Claridade (C_{80}) medida nos pontos de P1 a P6 para cada banda de 1/1 oitava na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

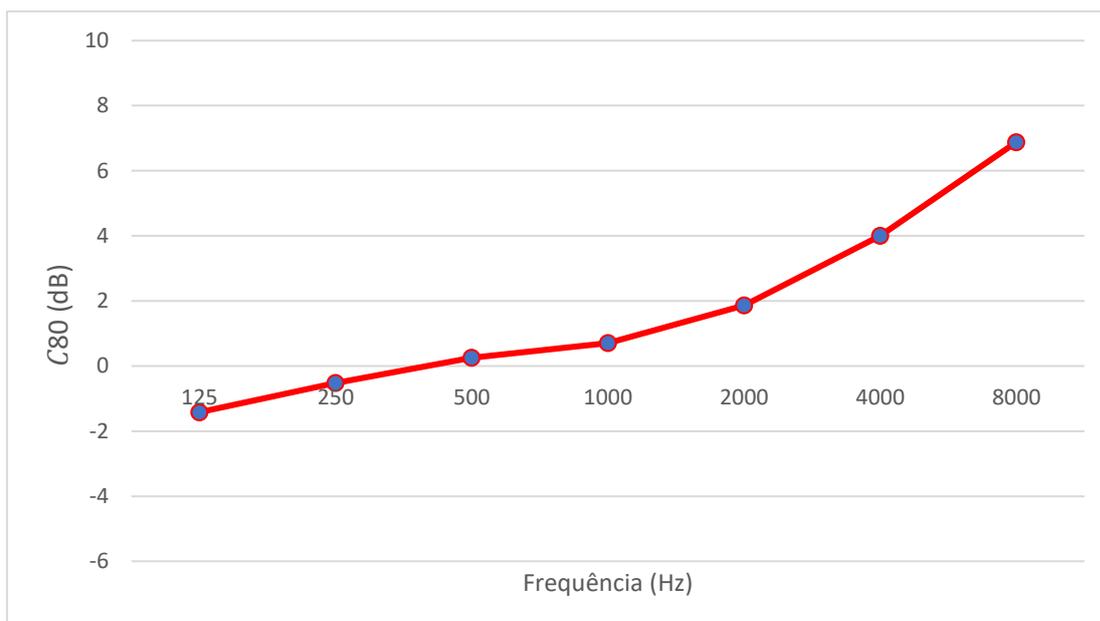


Fig. 6.9 - Clareza (C_{80}) média dos pontos P1 a P6 para cada banda de 1/1 oitava na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

6.5. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA DEFINIÇÃO

A Definição (D_{50}) é um valor adimensional que se situa num intervalo de 0 a 1, sendo que uma proximidade maior à unidade indica uma melhor definição do discurso num dado ambiente. À semelhança do STI, neste parâmetro também foram feitas as medições *com* e *sem* o sistema de som ligado da igreja (Figs. 6.10 e Fig. 6.11). O resultado das medições está expresso nos Quadros 6.11 e 6.12, onde o primeiro traduz os valores da Definição para o caso onde os altifalantes estejam desligados (1ª fase) e o segundo quadro representa os valores com o sistema de som ligado (2ª fase) para cada banda de frequência de 1/1 oitava. O Quadro 6.13 demonstra a diferença de valores *com* e *sem* os altifalantes ligados, assim como no STI.

Quadro 6.11 -Valores do D_{50} (1ª fase) – sistema de som desligado, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).

	Frequência (Hz)							D_{50} [500,1k Hz]
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1	0,15	0,27	0,44	0,28	0,40	0,54	0,80	0,36
P2	0,22	0,49	0,38	0,44	0,55	0,71	0,80	0,41
P3	0,26	0,35	0,25	0,39	0,45	0,64	0,80	0,32
P4	0,15	0,25	0,35	0,29	0,38	0,45	0,47	0,32
P5	0,43	0,52	0,47	0,45	0,51	0,53	0,57	0,46
P6	0,18	0,32	0,38	0,33	0,40	0,51	0,61	0,36
s	0,09	0,10	0,07	0,07	0,06	0,09	0,13	0,05
Média	0,23	0,37	0,38	0,36	0,49	0,56	0,68	0,37

Quadro 6.12 – Valores do D_{50} (2ª fase) – sistema de som ligado, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).

	Frequência (Hz)							D_{50} [500,1k Hz]
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1	0,22	0,30	0,35	0,52	0,48	0,63	0,78	0,44
P2	0,42	0,32	0,30	0,43	0,36	0,50	0,67	0,37
P3	0,25	0,44	0,30	0,41	0,51	0,60	0,73	0,36
P4	0,26	0,29	0,31	0,45	0,45	0,59	1,00	0,38
P5	0,47	0,39	0,51	0,51	0,68	0,66	0,71	0,51
P6	0,10	0,21	0,45	0,55	0,52	0,62	0,81	0,50
s	0,12	0,07	0,08	0,05	0,10	0,05	0,11	0,06
Média	0,29	0,33	0,37	0,48	0,50	0,60	0,78	0,43

Quadro 6.13 - Valores de $\Delta D_{50} = (D_{50} \text{ Ligado} - D_{50} \text{ Desligado})$ por banda de frequência e D_{50} [500,1k] para compreensão dos efeitos do sistema de som da igreja.

	Frequência (Hz)							D_{50} [500,1k Hz]	%
	125	250	500	1k	2k	4k	8k		
ΔD_{50}	0,06	0,04	0,01	0,12	0,01	0,04	0,10	0,06	+16

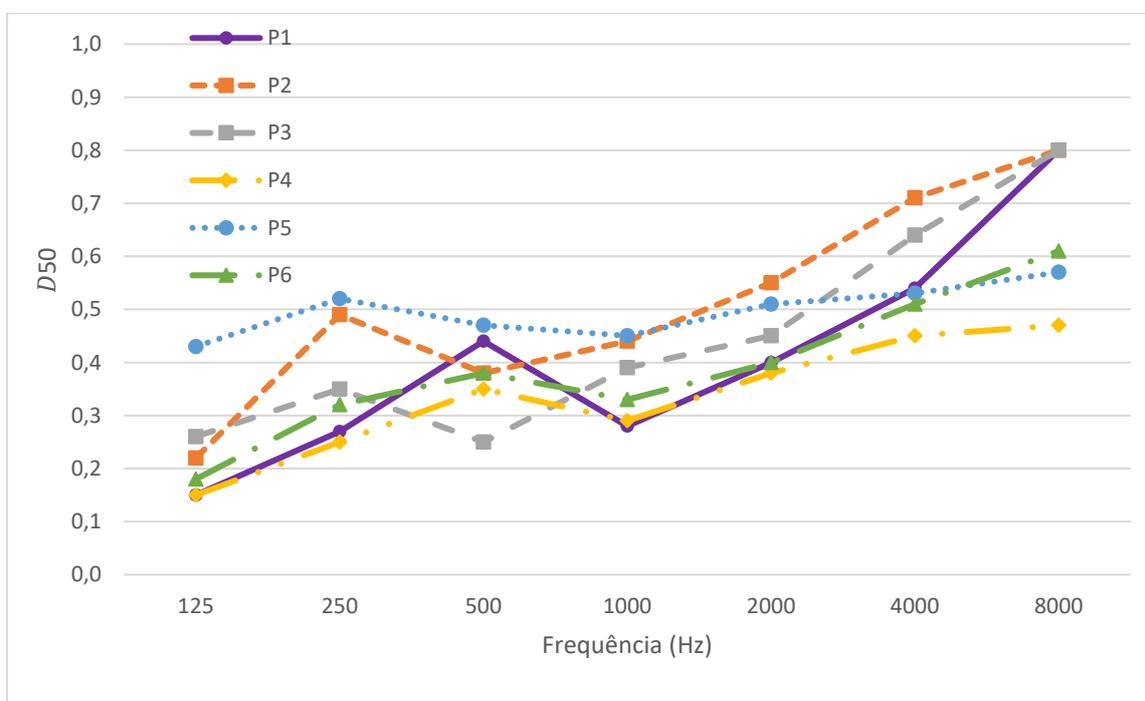


Fig. 6.10 -Valores do D_{50} dos pontos P1 a P6 para cada banda de 1/1 oitava com o sistema do som desligado da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

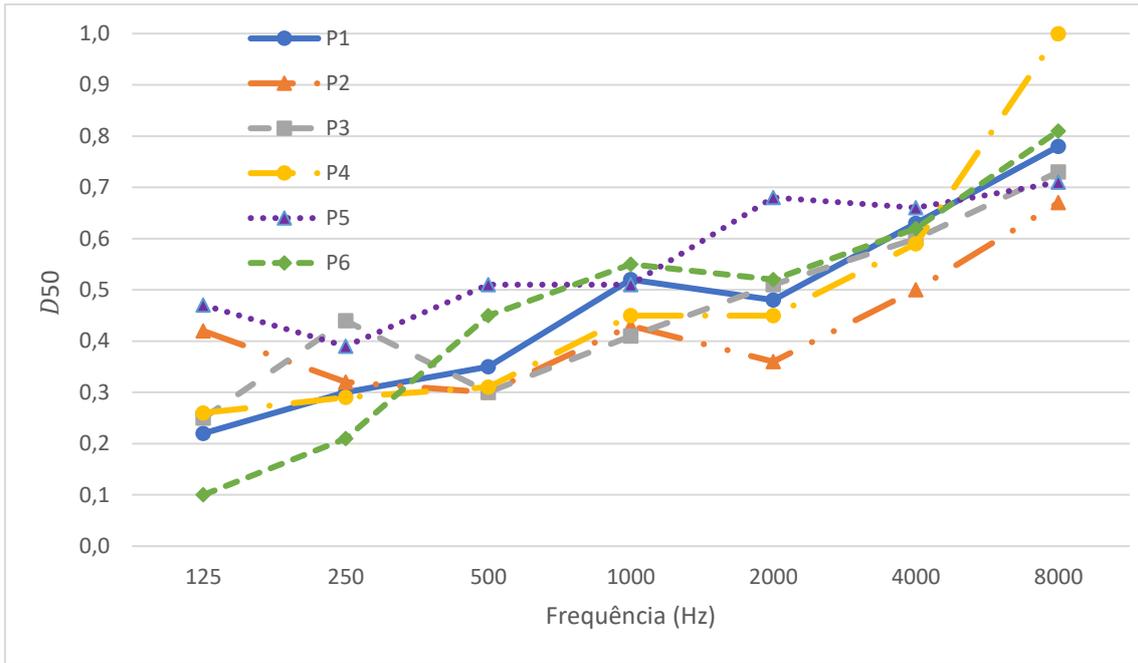


Fig. 6.11 -Valores do D_{50} dos pontos P1 a P6 para cada banda de 1/1 oitava com o sistema do som ligado da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

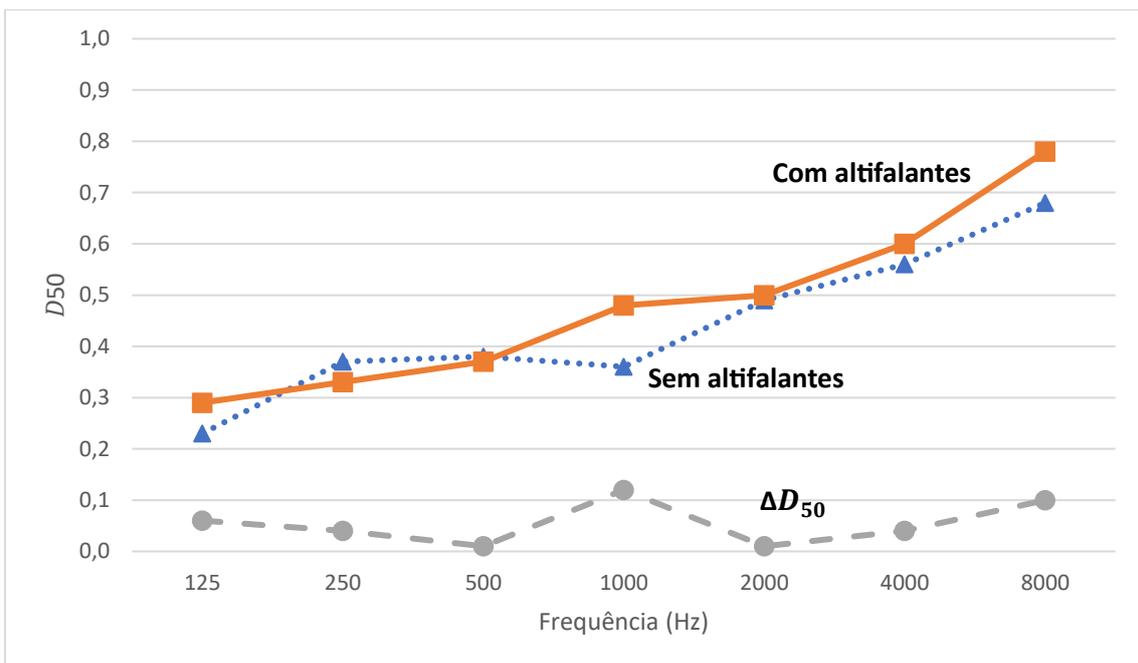


Fig. 6.12 - Comparação da definição D_{50} média com e sem altifalantes assim como o $\Delta D_{50} = (D_{50} \text{ Ligado} - D_{50} \text{ Desligado})$ na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

A comparação revela como a presença de altifalantes influencia a Definição média em diferentes faixas tonais. Na faixa dos 1000 Hz é onde se destaca a maior diferença com um aumento notável na Definição média nesta banda de frequência, sugerindo uma melhoria significativa na clareza para tons médios. Mas de um modo geral, são valores semelhantes onde o valor de D_{50} sem altifalantes é de 0,41, enquanto o valor com o sistema de som ligado

é do 0,45 aumentando ligeiramente a Definição (cerca de 16%). Um valor ótimo para a definição é que seja D_{50} superior a 0,6 [24], o que não se verifica neste caso de estudo.

6.6. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO TEMPO CENTRAL

Para o Tempo Central (TS), foram feitas as medições nos mesmos seis pontos. Os valores obtidos nas diferentes posições estão descritos no Quadro 6.14 e à semelhança do procedimento anteriormente adotado, foi feita uma média dos Tempos Centrais de cada ponto, para cada banda de frequência, resultando numa média geral do Tempo Central da igreja. (Fig. 6.14). Na Fig. 6.13 serão apresentados os resultados em forma de gráficos dos seis pontos medidos, para cada banda de frequência de 1/1 oitava. Os resultados obtidos são bastante positivos, pois é usual o valor do Tempo Central ter uma posição entre 140 e 180 ms para as frequências médias em salas de concerto. [1]

O valor médio obtido é de 125 ms, o que significa que está um pouco abaixo do recomendado para salas de concerto o que é positivo, pois neste parâmetro quanto mais baixo for o valor, mais claro é o som.

Quadro 6.14 – Valores do Tempo Central (TS) medido dos pontos P1 a P6, na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e respetivo desvio padrão (s).

	Frequência (Hz)							TS (ms) [500,1k Hz]
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
P1	236	152	106	113	88	67	29	110
P2	210	140	125	97	74	51	37	112
P3	170	161	147	132	108	65	35	140
P4	230	191	136	124	115	85	62	130
P5	176	138	116	120	105	93	71	118
P6	262	169	135	139	117	88	63	138
s	33	18	14	14	15	15	16	12
Média	214	158	127	121	101	75	49	125

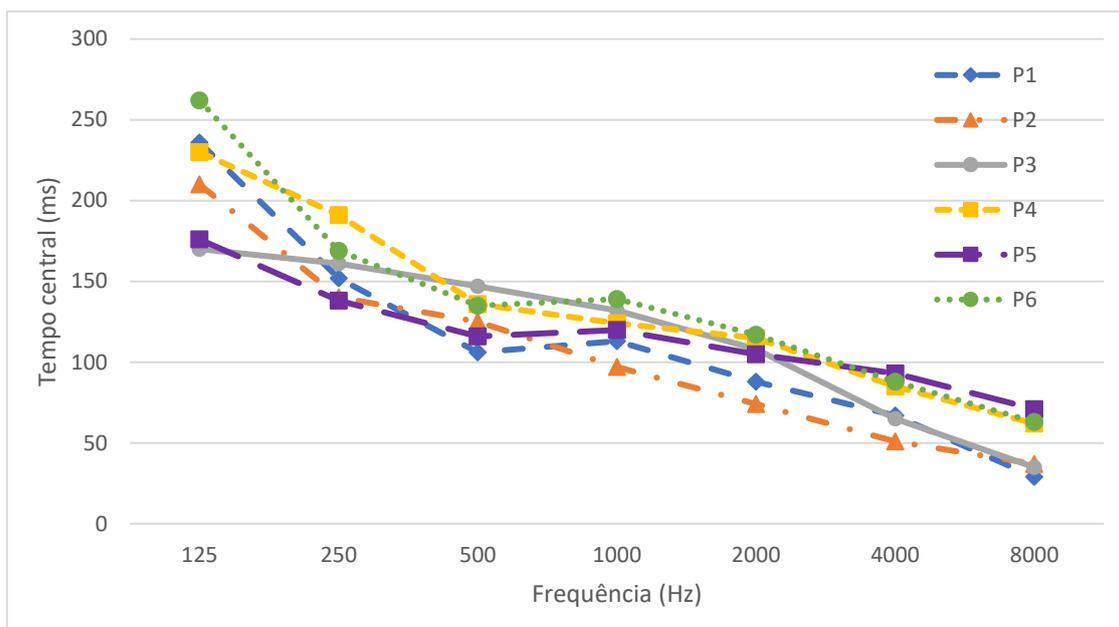


Fig. 6.13 – Valores do Tempo Central (TS) medido nos seis pontos para cada banda de oitava de igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

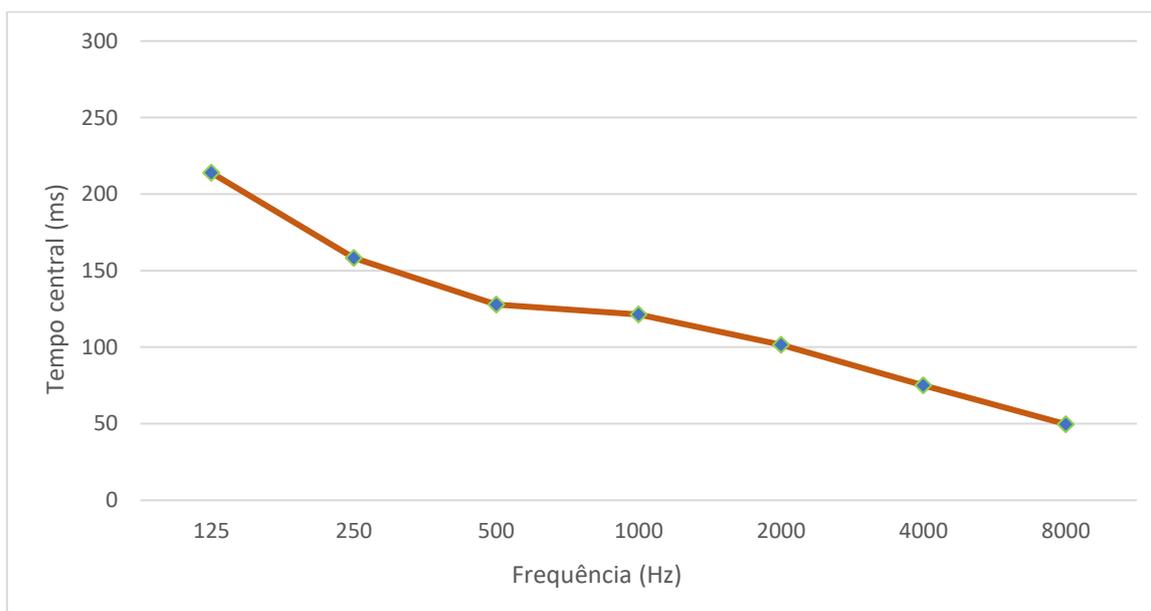


Fig. 6.14 – Valores do Tempo Central médio (TS) medido nas várias posições para cada banda de oitava de igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

7

COMPARAÇÃO COM OUTRAS IGREJAS

7.1. COMPARAÇÃO COM IGREJAS PORTUGUESAS CONTEMPORÂNEAS

7.1.1. LISTA DE IGREJAS E PARÂMETROS

A lista de igrejas usadas para termo de comparação no âmbito deste trabalho foi selecionada através do Guião da Acústica de Igrejas em Portugal e de outros documentos [24][26][48], onde todos os parâmetros foram medidos *in situ* para que seja do mesmo grau de comparação. No Quadro 7.1 estão representadas as igrejas contemporâneas assim como os seus respetivos parâmetros arquitetónicos.

Quadro 7.1 – Parâmetros arquitetónicos da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das restantes igrejas [24][26][48].

Igrejas	Data de construção	Altura máxima (m)	Área (m ²)	Volume total (m ³)
Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa)	2014	17,0	689	8500
S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto)	1963	13,4	966	8470
Nossa Senhora da Conceição (Porto)	1947	17,0	1011	12532
Santuário da Nossa Senhora da Assunção (Santo Tirso)	1934	16,0	715	9855
Nossa Senhora da Boavista (Porto)	1973	7,9	499	3740
Seroa (Paços de Ferreira)	1986	17,0	635	4225
Santíssimo Sacramento (Porto)	1939	15,5	510	6816

7.1.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O Quadro 7.2 apresenta os valores do tempo de reverberação médio para as bandas de frequências de 500 e 1000 Hz (TR [500,1k Hz]) das igrejas: Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa), S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto), Nossa Senhora da Conceição (Porto), Nossa Senhora da Assunção (Santo Tirso), Nossa Senhora da Boavista (Porto), Seroa (Paços de Ferreira) e Santíssimo Sacramento (Porto).

Quadro 7.2 – Valores do tempo de reverberação de igrejas contemporâneas portuguesas [24][26][48].

Igrejas	TR [500,1k Hz] (s)
Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa)	2,0
S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto)	3,1
Nossa Senhora da Conceição (Porto)	6,5
Nossa Senhora da Assunção (Santo Tirso)	11,0
Nossa Senhora da Boavista (Porto)	4,0
Seroa (Paços de Ferreira)	4,6
Santíssimo Sacramento (Porto)	5,0

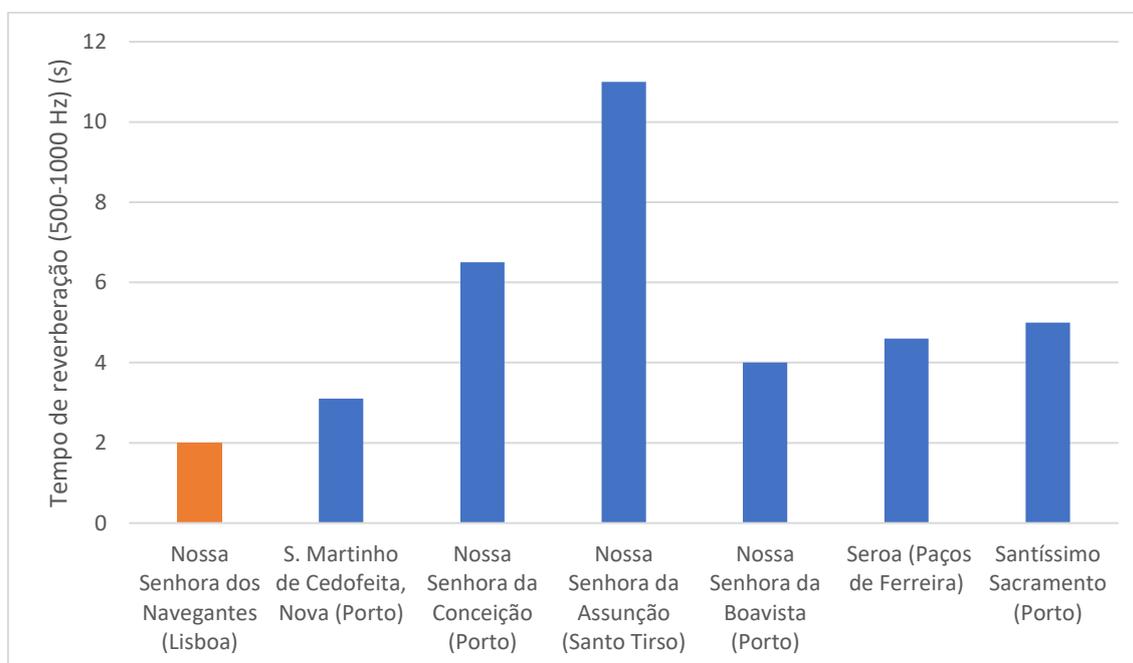


Fig. 7.1 – Valores do TR [500, 1k Hz] da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e de igrejas contemporâneas portuguesas [24][26][48].

Conforme se pode observar na Fig. 7.1, o tempo de reverberação médio na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes é o mais reduzido, situando-se em 2,0 segundos em comparação com as restantes igrejas. Este facto evidencia o tratamento acústico feito, tornando o ambiente mais propício para a inteligibilidade da palavra e ambiente musical. Em contrapartida o santuário da Nossa Senhora da Assunção apresenta um valor extremamente elevado de 11,0 segundos.

Para um melhor termo de comparação foi feita uma análise dos valores médios do Tempo de Reverberação em função do volume como se pode verificar na Fig. 7.2.

Nesta situação, é perceptível que os valores tendem a seguir uma curva ligeiramente ascendente em relação ao aumento do Tempo de Reverberação em função do Volume. No entanto existe uma diferença tão grande entre volumes, o modelo matemático está longe de prever o TR em função do volume, pois o $R^2 = 0,16$ (quanto mais próximo de 1, mais fiável é). Destaca-se então o Santuário de Nossa Senhora da Assunção como uma clara exceção a essa tendência. Apesar de possuir um volume próximo ao das igrejas comparadas, apresenta um Tempo de Reverberação significativamente elevado. Em contrapartida, a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes também sai fora da curva pois o seu TR é inferior aos usados para o termo de comparação, evidenciando o cuidado acústico tido.

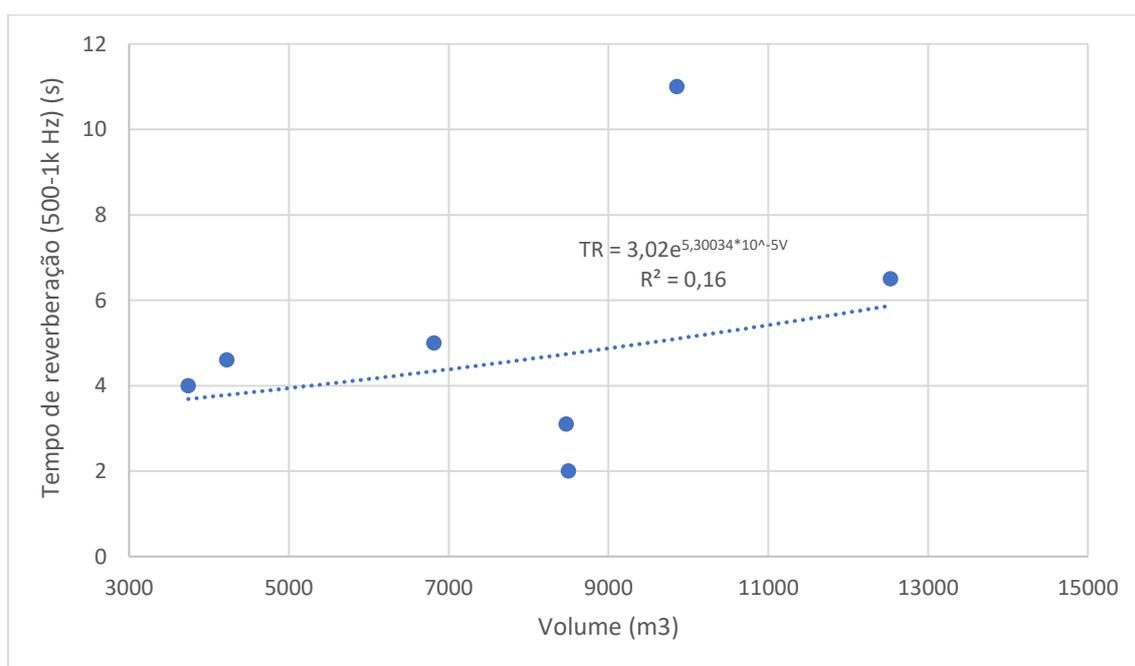


Fig. 7.2 - Valores médios do TR [500-1k Hz] em função do Volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes. [24][26][48]

7.1.3. Comparação do RASTI/STI

Neste subcapítulo a comparação é feita do STI médio medido *in situ* na igreja da Nossa Senhora dos Navegantes com os valores do RASTI médio [24][26][48], visto que o RASTI é um ensaio simplificado do STI. No Quadro 7.3 e Fig. 7.3 estão representados os valores das medições do STI médio da igreja da Nossa Senhora dos Navegantes e do RASTI médio das restantes seis, sendo que foram medidos com o sistema de som desligado.

Quadro 7.3 – Valores do RASTI/STI médio da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das seis igrejas contemporâneas portuguesas sem sistema de som [24][26][48].

Igrejas	RASTI/STI médio
Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa)	0,44
S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto)	0,41
Nossa Senhora da Conceição (Porto)	0,31
Nossa Senhora da Assunção (Santo Tirso)	0,29
Nossa Senhora da Boavista (Porto)	0,41
Seroa (Paços de Ferreira)	0,36
Santíssimo Sacramento (Porto)	0,33

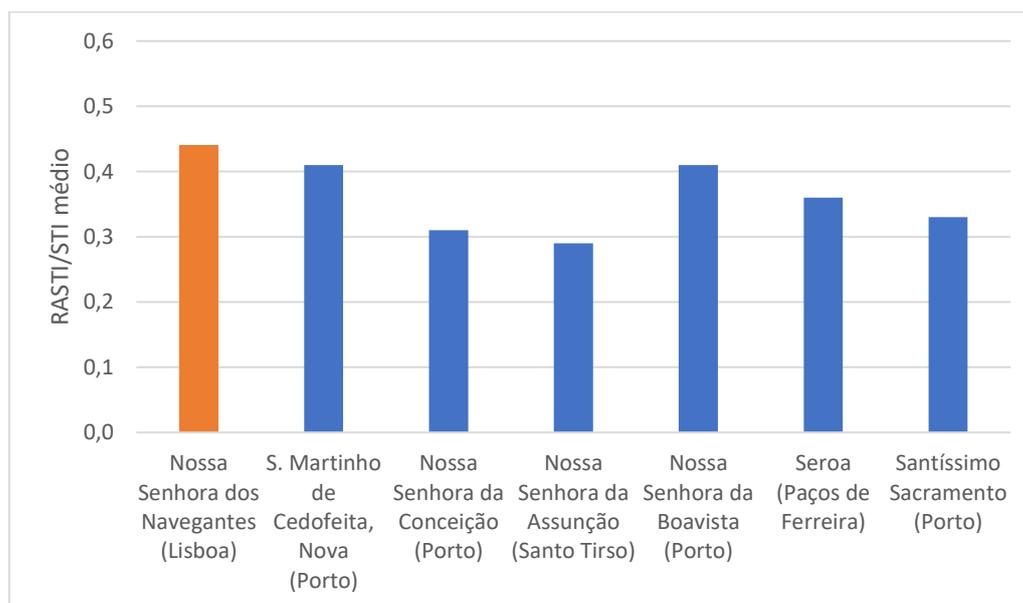


Fig. 7.3 – Valores do RASTI/STI médio da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das seis igrejas contemporâneas portuguesas, medidos sem uso do sistema de som [24][26][48].

Nas condições descritas anteriormente (com sistema de som desligado) a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes apresenta o melhor valor de RASTI/STI médio das sete igrejas, fixado nos 0,44. A igreja nova de Cedofeita e a igreja da Nossa Senhora da Boavista também apresentam valores ligeiramente menores (0,41) o que faz com que estas três igrejas se situem no intervalo de [0,30-0,45[, ou seja, *mediocre* muito perto dos 0,45 de *suficiente*. O Santuário da Nossa Senhora da Assunção apresenta o valor mais baixo (0,29) ficando assim abaixo dos 0,30 o que se traduz numa inteligibilidade da palavra *má*. Ao comparar os valores máximos

e mínimos de RASTI/STI médio nas igrejas analisadas, observamos uma notável disparidade entra a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes e o Santuário da Nossa Senhora da Assunção sendo que o Δ RASTI/STI=0,15.

Na Fig. 7.4 foi feita a comparação dos valores de RASTI/STI médio em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas.

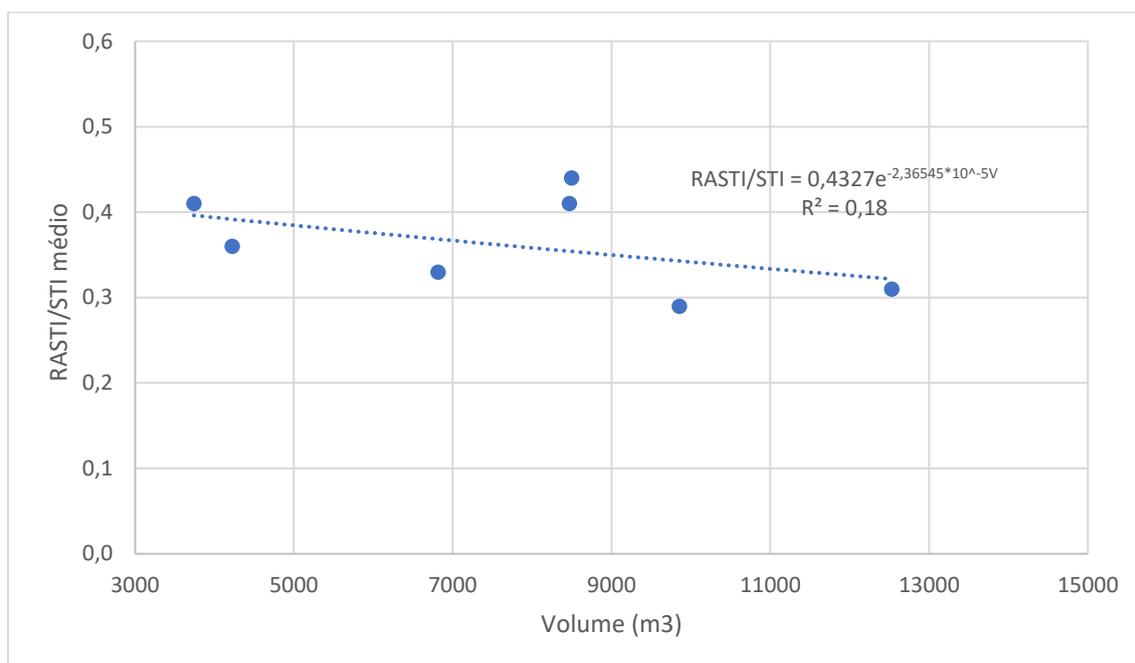


Fig. 7.4 - Valores médios do RASTI/STI em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes.

Logicamente, a dimensão do espaço exerce influência na qualidade acústica (embora não seja o único elemento determinante). Um volume mais amplo geralmente resulta em uma maior extensão de superfícies, o que, por consequência, provoca um aumento no número de reflexões, culminando numa redução na inteligibilidade da palavra. Conforme se pode constatar na Fig. 7.4, nota-se que as duas igrejas com menor RASTI/STI médio são justamente aquelas de dimensões maiores. De facto, observa-se uma tendência decrescente, representada por uma curva de aproximação dos pontos, indicando que o valor médio de RASTI/STI tende a diminuir à medida que o volume do espaço aumenta.

7.1.4. COMPARAÇÃO DA CLARIDADE, DEFINIÇÃO E TEMPO CENTRAL

No Quadro 7.4 estão representados os valores médios da Claridade (C_{80} [500,1k Hz]), Definição (D_{50} [500,1k Hz]) e Tempo Central (TS [500,1k Hz]) das igrejas em comparação. Todos os valores das igrejas comparadas à igreja da Nossa Senhora dos Navegantes foram medidos *in situ* e foram retirados do Guião da Acústica das Igrejas em Portugal [24].

Quadro 7.4 – Valores médios da Claridade, Definição e Tempo Central da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas contemporâneas portuguesas escolhidas para comparação [24].

Igrejas	C_{80} [500,1k Hz] (dB)	D_{50} [500,1k Hz]	TS [500,1k Hz] (ms)
Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa)	0,5 (melhor)	0,37 (melhor)	125 (melhor)
S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto)	-4,2	0,21	224
Nossa Senhora da Boavista (Porto)	-5,1	0,16	280
Seroa (Paços de Ferreira)	-6,6	0,13	348
Santíssimo Sacramento (Porto)	-6,5 (pior)	0,13 (pior)	354 (pior)

As igrejas contemporâneas escolhidas para comparação com a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes ficam todas um pouco aquém dos valores ótimos. No que diz respeito à Claridade (C_{80}), a faixa ideal situa-se entre -2 e 2 dB [24], sendo que apenas a Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes apresenta um valor dentro desse intervalo (0,48). Todas as outras registam valores negativos fora dessa faixa. A Definição (D_{50}) é outro parâmetro em que o valor da igreja em análise é o mais elevado (0,37), embora ainda distante do valor desejado de D_{50} maior que 0,60. De salientar que a igreja da Nossa Senhora da Boavista, a igreja de Seroa e a igreja do Santíssimo Sacramento têm valores extremamente baixos na Definição de 0,16 e 0,13. Quanto ao TS, o valor de referência para um Tempo Central (TS) adequado situa-se entre 140 e 180 milissegundos [1]. Nenhum dos valores se encontra dentro desse intervalo, no entanto, os valores mais próximos são os da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes (125 ms) e da S. Martinho de Cedofeita, Nova (224 ms).

As figuras 7.5, 7.6 e 7.7 representam os gráficos do C_{80} [500,1k Hz], D_{50} [500,1k Hz] e TS [500,1k Hz] em função do volume das igrejas contemporâneas portuguesas, respetivamente.

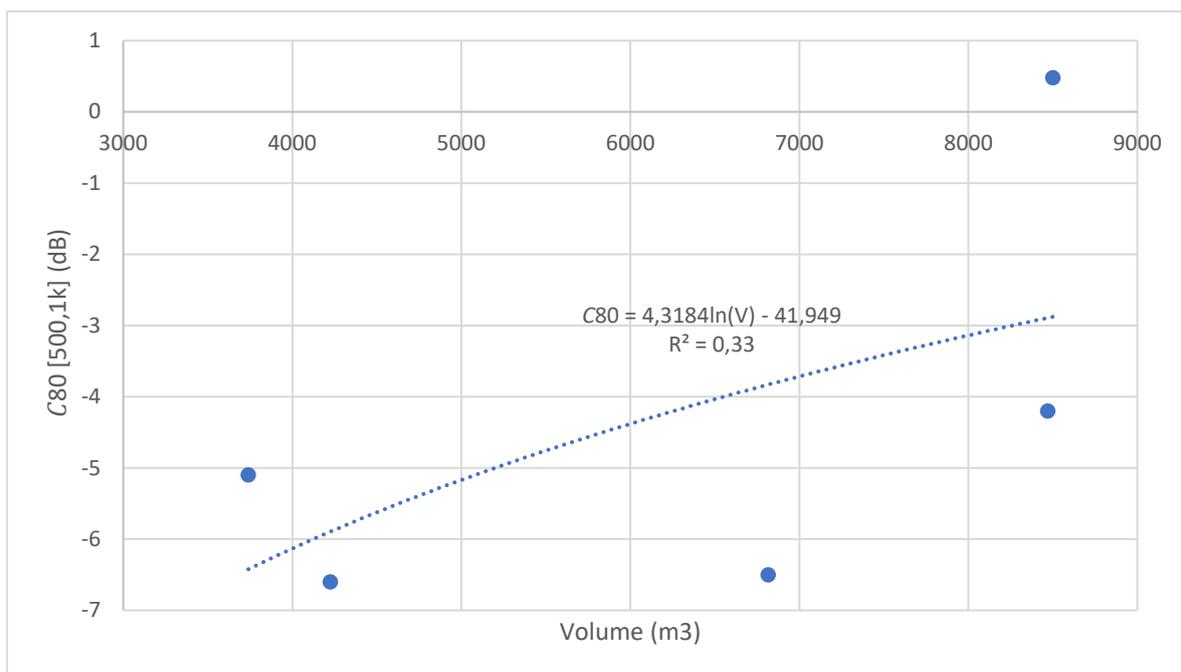


Fig. 7.5 - Valores médios do C_{80} [500,1k Hz], em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [24][26][48].

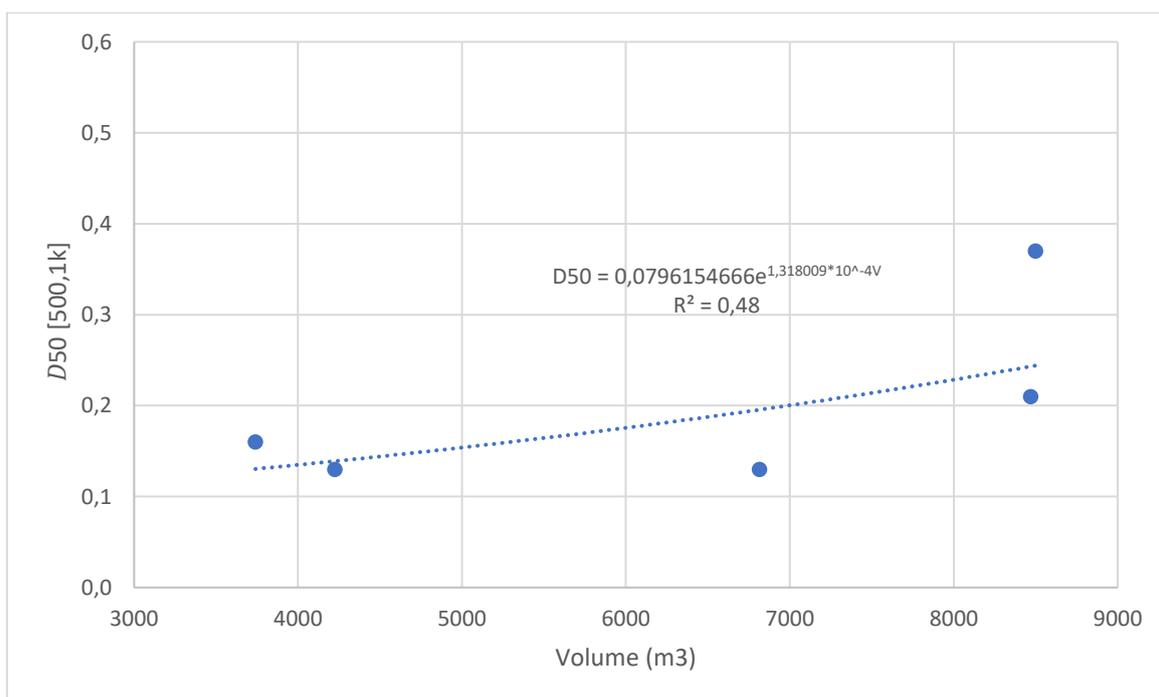


Fig. 7.6 - Valores médios do D_{50} [500,1k Hz], em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [24][26][48].

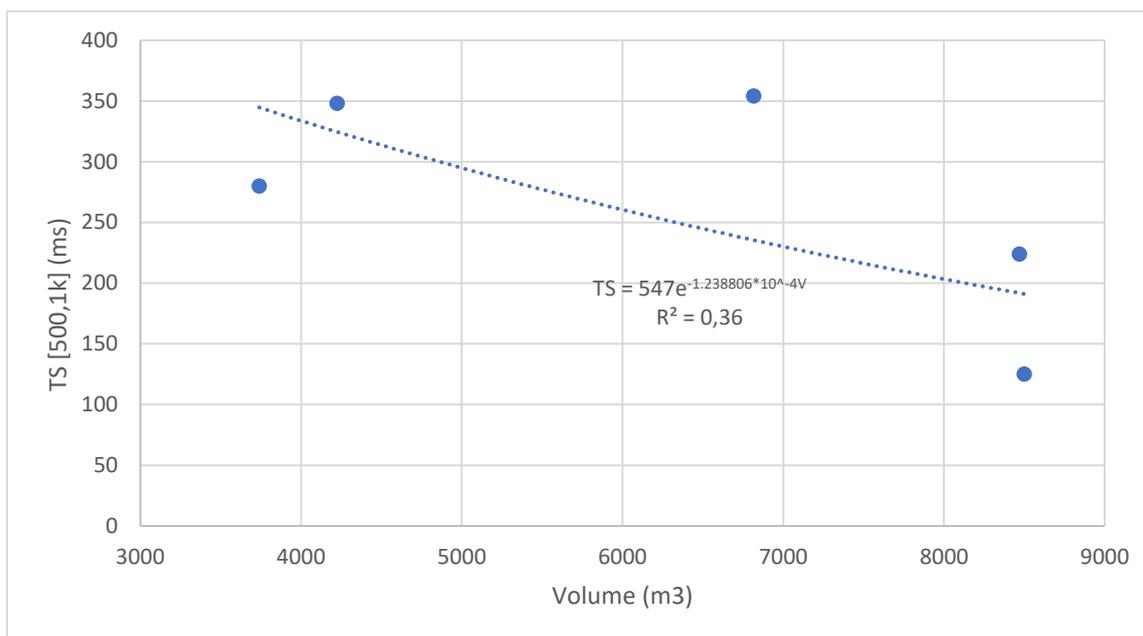


Fig. 7.7 - Valores médios do TS [500,1k Hz], em função do volume de igrejas contemporâneas portuguesas com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [24][26][48].

Para os parâmetros de Claridade, Definição e Tempo Central em igrejas contemporâneas portuguesas, optou-se por utilizar apenas cinco exemplos, uma vez que só nestas as medições desses parâmetros foram realizadas *in situ*. Essa abordagem resulta em uma dispersão significativa dos pontos devido à escassez de dados.

Assim sendo, a Claridade (C_{80} [500,1k Hz]) tem valores bastante dispersos, sendo que o da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes é o único positivo (0,48) e os restantes quatro negativos. O $R^2=0,33$ demonstra que a correlação não é muito forte do C_{80} com o volume possivelmente pela falta de dados.

A Definição (D_{50} [500,1k Hz]) já mostra que apesar dos valores serem baixos e indesejados (nomeadamente da igreja do Santíssimo Sacramento, igreja de Seroa e a igreja de Nossa Senhora da Boavista) já existe uma correlação maior ($R^2=0,48$) e nota-se claramente uma tendência para o D_{50} aumentar em função do volume.

No Tempo Central (TS [500,1k Hz]) os valores já voltam a ser mais díspares e a tendência é de que à medida que o Volume aumenta, o TS diminui, como é possível verificar na Fig. 7.7.

7.2. COMPARAÇÃO DOS VALORES COM IGREJAS PORTUGUESAS DE VOLUME SEMELHANTE

7.2.1. LISTA DE IGREJAS E PARÂMETROS

A seleção de igrejas para comparação, todas com uma volumetria “semelhante” à igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, (com um desvio máximo de aproximadamente $3000 m^3$ de volume, ou seja, de 5500 a $11500 m^3$), foi feita considerando-se todas as épocas e estilos arquitetónicos (Contemporâneo, Gótico, Manuelino, Renascentista, Barroco e Neoclássico).

O Quadro 7.5 apresenta as igrejas escolhidas juntamente com os respetivos parâmetros arquitetónicos fundamentais.

Quadro 7.5 – Parâmetros arquitetónicos e estilo arquitetónico dominante da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas selecionadas para comparação [24].

Igreja	Data de construção	Altura máxima (m)	Área (m^2)	Volume total (m^3)	Estilo Arquitetónico Dominante
Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa)	2013-14	17,0	515	8500	Contemporâneo
Mosteiro de Bustêlo	1695	16,1	515	6476	Barroco
Sé de Silves	Século XIII	16,7	583	10057	Gótico
Mosteiro de Leça do Balio	Século X	19,1	611	9795	Gótico
Mosteiro de Tibães (Braga)	1628-61	19,3	595	8608	Barroco
Matriz de Caminha	1488	14,4	641	5899	Gótico
S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto)	1963	13,4 (menor)	966 (maior)	8470	Contemporâneo
Santíssimo Sacramento (Porto)	1939	15,5	510 (menor)	6816	Contemporâneo
Matriz da Golegã	Século XVI	13,7	545	5563 (menor)	Manuelino
Lapa (Porto)	1756-1863	17,0	753	11423	Neoclássico
Salvador (Paço de Sousa)	Século XII	16,8	546	6028	Gótico
São João Baptista (Moura)	Século XVI	13,4 (menor)	611	6300	Manuelino
Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia)	1538-1672	35,1 (maior)	591	11566 (maior)	Renascentista

7.2.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Todos os valores apresentados no Quadro 7.6 e na Fig. 7.8 foram calculados com a média aritmética dos tempos de reverberação das bandas de frequência de 500 e 1000 Hz.

Quadro 7.6 – Tempos de Reverberação da Igreja da Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas de volume semelhante [24].

Igreja	TR [500,1k] (s)
Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa)	2,0
Mosteiro de Bustêlo	4,1
Sé de Silves	3,9
Mosteiro de Leça do Balio	4,4
Mosteiro de Tibães (Braga)	2,7
Matriz de Caminha	2,9
S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto)	3,1
Santíssimo Sacramento (Porto)	5,0
Matriz da Golegã	3,6
Lapa (Porto)	5,7
Salvador (Paço de Sousa)	2,9
São João Baptista (Moura)	6,6
Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia)	7,8

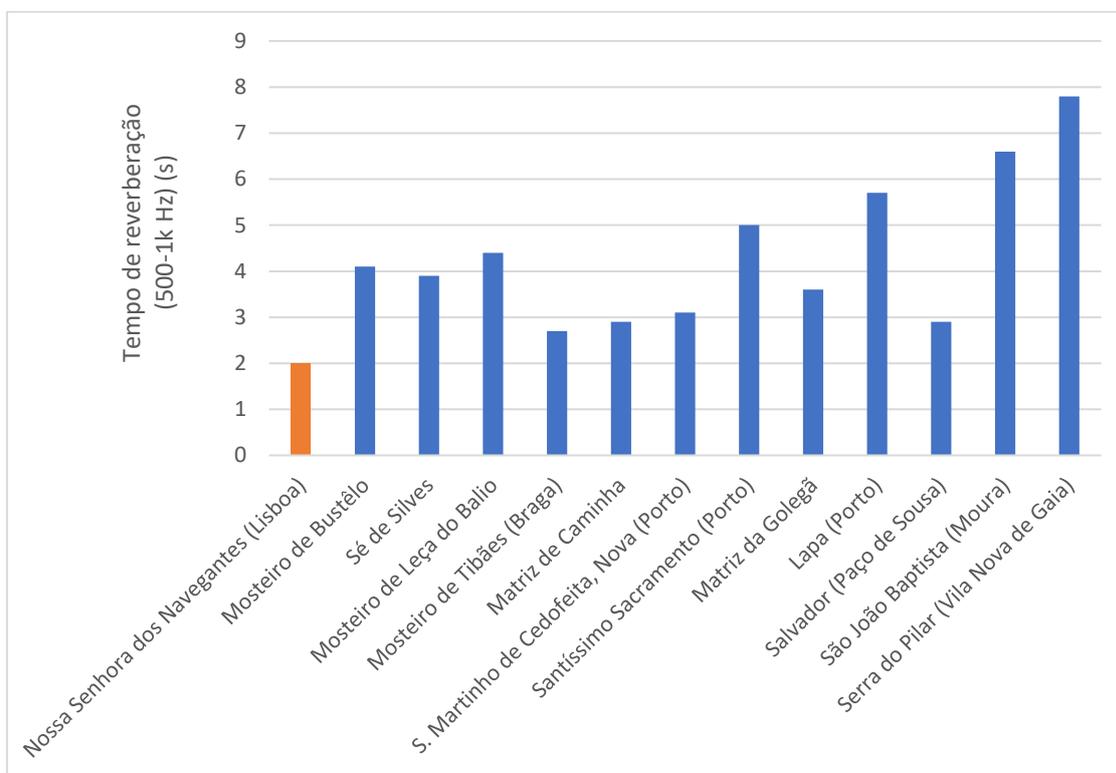


Fig. 7.8 - Valores de Tempo de Reverberação [500, 1k Hz] na igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas de volume “semelhante” [24].

A relação entre a arquitetura e a acústica é evidente ao observar esses dados. Igrejas com alturas significativas, como a igreja da Serra do Pilar, podem proporcionar tempos de reverberação mais longos. A igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, no grupo de igrejas com volumetria semelhante, continua a ter o Tempo de Reverberação médio mais baixo com cerca de 2 segundos, sendo que a média entre as outras é de 4,4 segundos. Sendo uma igreja com projeto acústico fica bastante diferenciada das outras, pois tem um tempo de reverberação bastante aceitável. Na Fig. 7.9 está representado a relação entre o Tempo de Reverberação médio [500, 1k Hz] e o Volume.

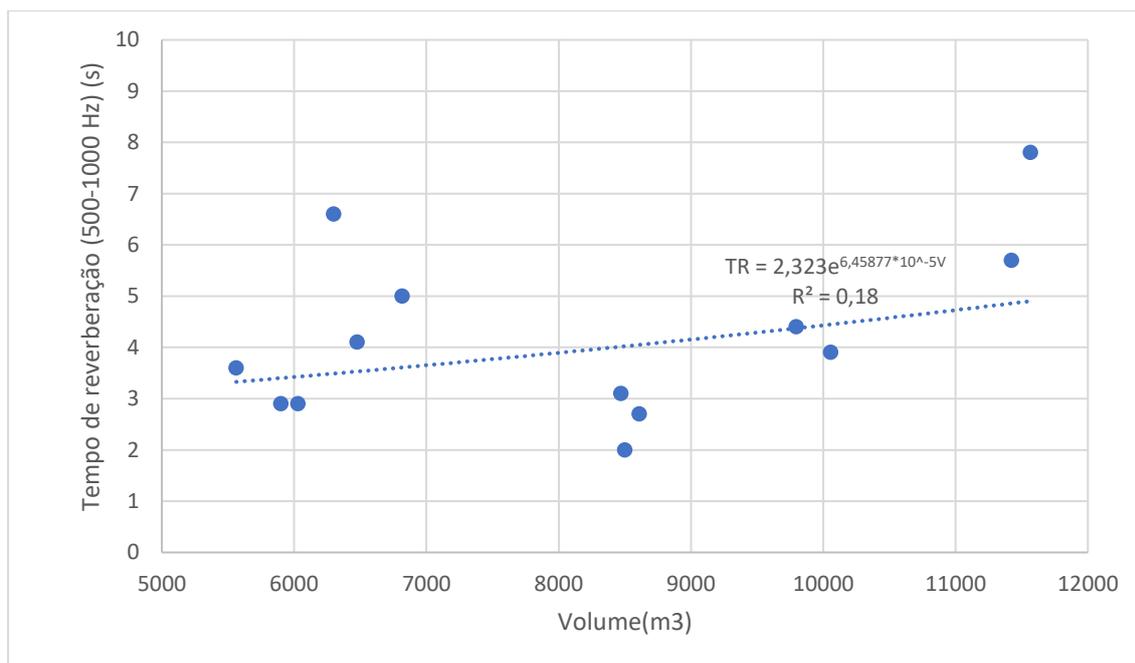


Fig. 7.9 - Valores médios do TR [500-1k Hz] em função do Volume de igrejas portuguesas de volume semelhante com a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes.

Não é possível concluir que tendencialmente com aumento do volume do edifício o Tempo de Reverberação aumenta (devido ao $R^2=0,18$). Essa observação sugere uma conexão entre as dimensões físicas do espaço e as características acústicas que influenciam a persistência do som. A constatação de que o Tempo de Reverberação tende a prolongar-se em espaços de maior volume destaca a importância de considerar as dimensões físicas ao projetar ou avaliar as condições acústicas de edifícios.

No entanto, é fundamental reconhecer que essa tendência pode ser influenciada por diversos fatores, como a presença de materiais absorventes, como é o caso da igreja da Nossa Senhora dos Navegantes pois tem um volume considerável ($8500 m^3$) e apenas 2,0 segundos de TR médio. Em suma, a generalização de que o Tempo de Reverberação aumenta tendencialmente com o aumento do volume do edifício destaca uma relação importante, caso o edifício não tenha qualquer tipo de tratamento acústico.

7.2.3. COMPARAÇÃO DO RASTI/STI

À semelhança da última comparação feita do RASTI/STI nas igrejas contemporâneas, nesta comparação com igrejas portuguesas de volumetria semelhante também será comparado o STI da Igreja da Nossa Senhora dos Navegantes com o RASTI das igrejas escolhidas para a comparação, com o sistema de som desligado [24]. O Quadro 7.7 apresenta todos os valores do RASTI/STI médio e a Fig. 7.10 representa graficamente os mesmos valores.

Quadro 7.7 – Valores do STI da Igreja da Nossa Senhora dos Navegantes e do RASTI das igrejas de volume semelhante.

Igrejas	RASTI/STI médio
Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa)	0,44
Mosteiro de Bustêlo	0,36
Sé de Silves	0,34
Mosteiro de Leça do Balio	0,39
Mosteiro de Tibães (Braga)	0,45
Matriz de Caminha	0,42
S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto)	0,41
Santíssimo Sacramento (Porto)	0,33
Matriz da Golegã	0,39
Lapa (Porto)	0,40
Salvador (Paço de Sousa)	0,39
São João Baptista (Moura)	0,32
Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia)	0,34

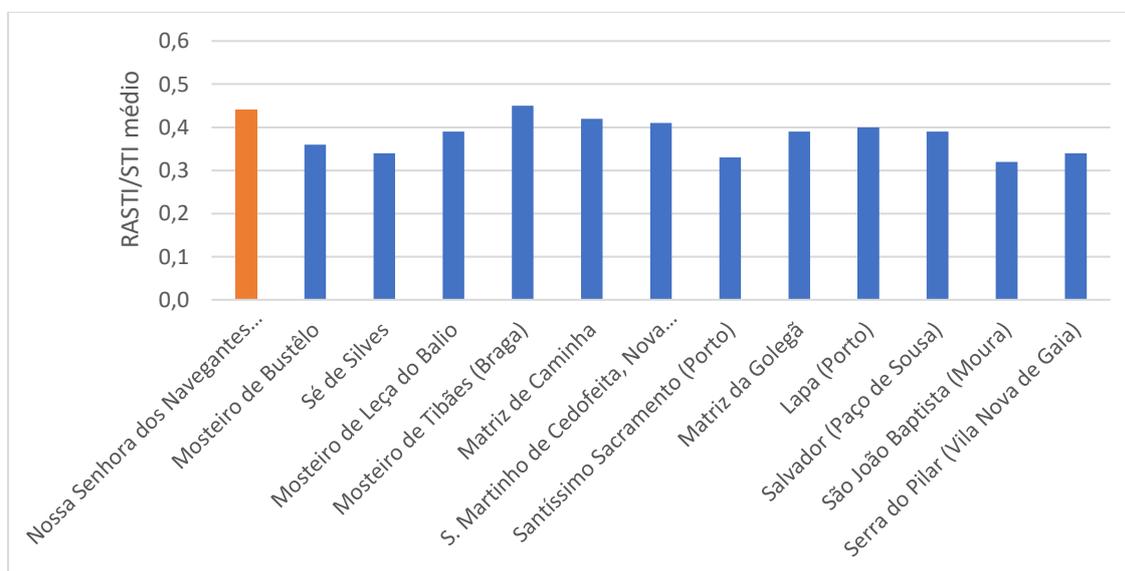


Fig. 7.10 – Valores médios de RASTI/STI da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas de volumetria “semelhante”.

Analisando os valores médios de RASTI/STI para as igrejas mencionadas, observa-se uma variação nas características acústicas de cada espaço. Destaca-se que o valor mais baixo foi encontrado na igreja de São João Baptista (Moura) apresentando um RASTI/STI médio de 0,32. Este resultado sugere uma qualidade acústica inferior, classificado como *mediocre* em termos de inteligibilidade da palavra.

A maioria das igrejas, incluindo a Nossa Senhora dos Navegantes, Mosteiro de Tibães, Matriz de Caminha, S. Martinho de Cedofeita, Nova e da Lapa, registam valores acima dos 0,40 dentro do intervalo de [0,30-0,45[, indicando uma qualidade acústica considerada *mediocre*, mas ainda suficiente para uma compreensão mínima da palavra.

É importante notar que, segundo a escala de avaliação, valores acima de 0,45 até 0,60 são considerados *suficientes* em termos de inteligibilidade. Nesse contexto, a igreja do Mosteiro de Tibães destaca-se com um RASTI/STI de 0,45, indicando uma qualidade acústica relativamente boa.

A Fig. 7.11 demonstra a relação RASTI/STI médio com o volume das igrejas da Nossa Senhora dos Navegantes e as igrejas portuguesas de volume “semelhante”.

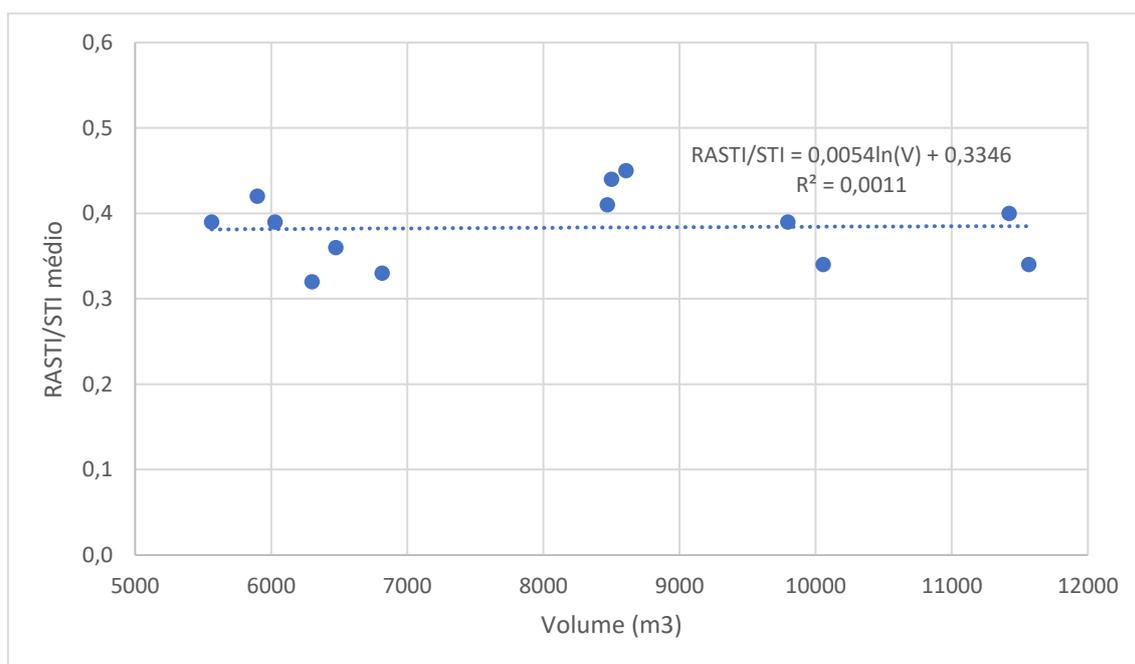


Fig. 7.11 - Valores médios do RASTI/STI em função do volume das igrejas portuguesas de volume semelhante com a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes.

Como se pode constatar pela Fig. 7.11, existe uma ligeira variação dos valores do RASTI/STI médio das treze igrejas. A diferença entre o valor máximo (0,45) da igreja do Mosteiro de Tibães e o mínimo (0,32) igreja de São João Baptista é de 0,13 que já bastante significativo.

7.2.4. COMPARAÇÃO DA CLARIDADE, DEFINIÇÃO E TEMPO CENTRAL

No Quadro 7.8 estão representados os valores médios da Claridade (C_{80} [500,1k Hz]), Definição (D_{50} [500,1k Hz]) e Tempo central (TS [500,1k Hz]) de todas as igrejas portuguesas em comparação, com volumetria “semelhante”.

Quadro 7.8 - Valores médios da Claridade, Definição e Tempo Central da igreja da Nossa Senhora dos Navegantes e das igrejas portuguesas de volume “semelhante” [24].

Igrejas	C_{80} [500,1k Hz] (dB)	D_{50} [500,1k Hz]	TS [500,1k Hz] (ms)
Nossa Senhora dos Navegantes (Lisboa)	0,5	0,37	125
Mosteiro de Bustêlo	-5,4	0,16	291
Sé de Silves	-6,9	0,09	323
Mosteiro de Leça do Balio	-6,7	0,11	317
Mosteiro de Tibães (Braga)	-3,6	0,19	205
Matriz de Caminha	-3,7	0,17	215
S. Martinho de Cedofeita, Nova (Porto)	-4,2	0,21	224
Santíssimo Sacramento (Porto)	-6,5	0,13	354
Matriz da Golegã	-5,0	0,14	265
Lapa (Porto)	-7,6	0,12	428
Salvador (Penafiel)	-5,7	0,12	260
São João Baptista (Moura)	-7,7	0,09	460
Serra do Pilar (Vila Nova de Gaia)	-8,2	0,10	574

Analisando os valores parâmetros acústicos, observa-se uma diversidade significativa nas características sonoras de cada espaço, com alguns valores extremos que merecem destaque. Em relação ao intervalo ideal para o C_{80} (-2 a 2 dB), a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes (0,5 dB) destaca-se positivamente, enquanto a igreja da Lapa e a igreja da Serra do Pilar apresentam valores extremos fora desse intervalo, respetivamente de -7,6 e -8,2 dB. Quanto ao D_{50} , destaca-se que a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes possui um valor de 0,37, indicando uma definição moderada. Já as restantes, todas apresentam valores bastante inferiores e a igreja de São João Baptista e a Sé de Silves tem os valores extremamente baixos de 0,09 ambas.

No que diz respeito ao Tempo Central (TS), o intervalo de referência ideal é de 140 a 180 ms. Embora alguns valores estejam próximos, como o da igreja da Nossa Senhora dos Navegantes (125 ms), outros, como o da igreja da Serra do Pilar (574 ms), indicam uma persistência sonora prolongada, o que pode impactar a inteligibilidade.

À semelhança do que se fez nos parâmetros anteriores, pode ainda ser feita uma análise dos valores da C_{80} [500,1k Hz], D_{50} [500,1k Hz] e TS [500,1k Hz] das diferentes igrejas portuguesas com volume “semelhante” em função do volume (Figs. 7.12, 7.13 e 7.14).

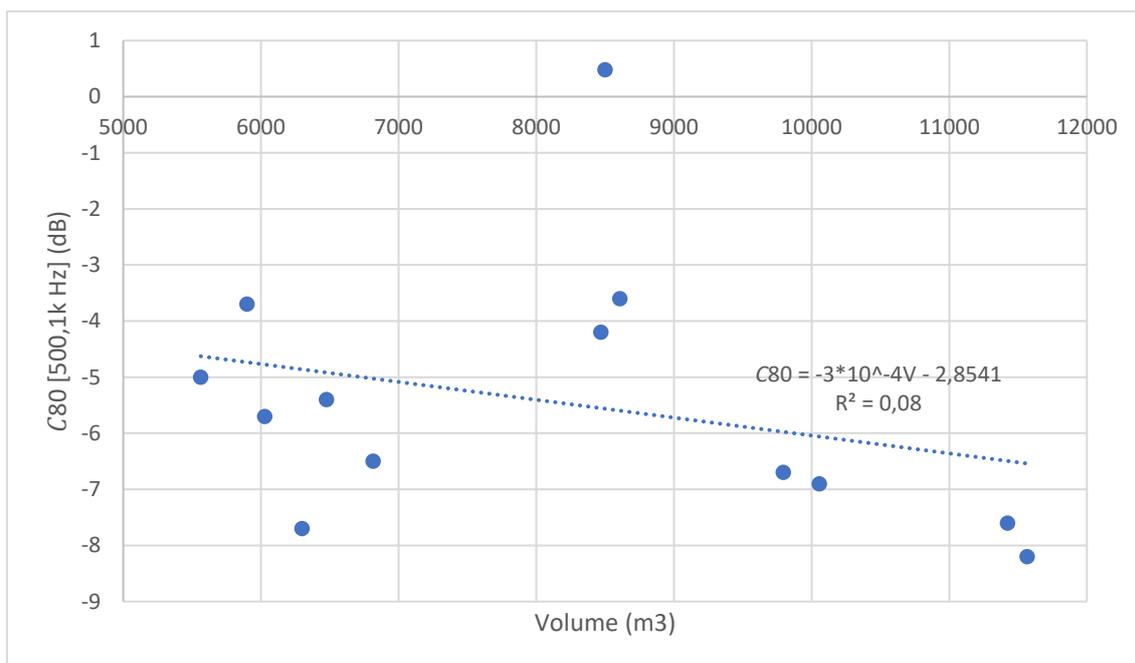


Fig. 7.12 - Valores médios do C_{80} [500,1k Hz], em função do volume das igrejas portuguesas de volume “semelhante” com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [24].

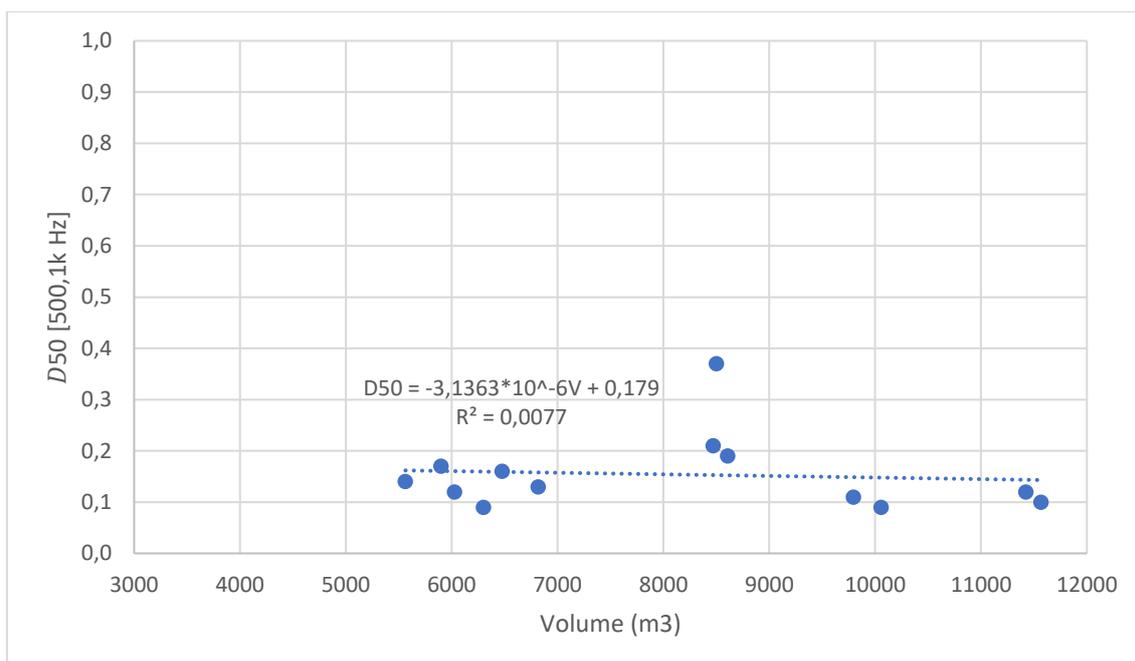


Fig. 7.13 - Valores médios do D_{50} [500,1k Hz], em função do volume de igrejas portuguesas de volume “semelhante” com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [24].

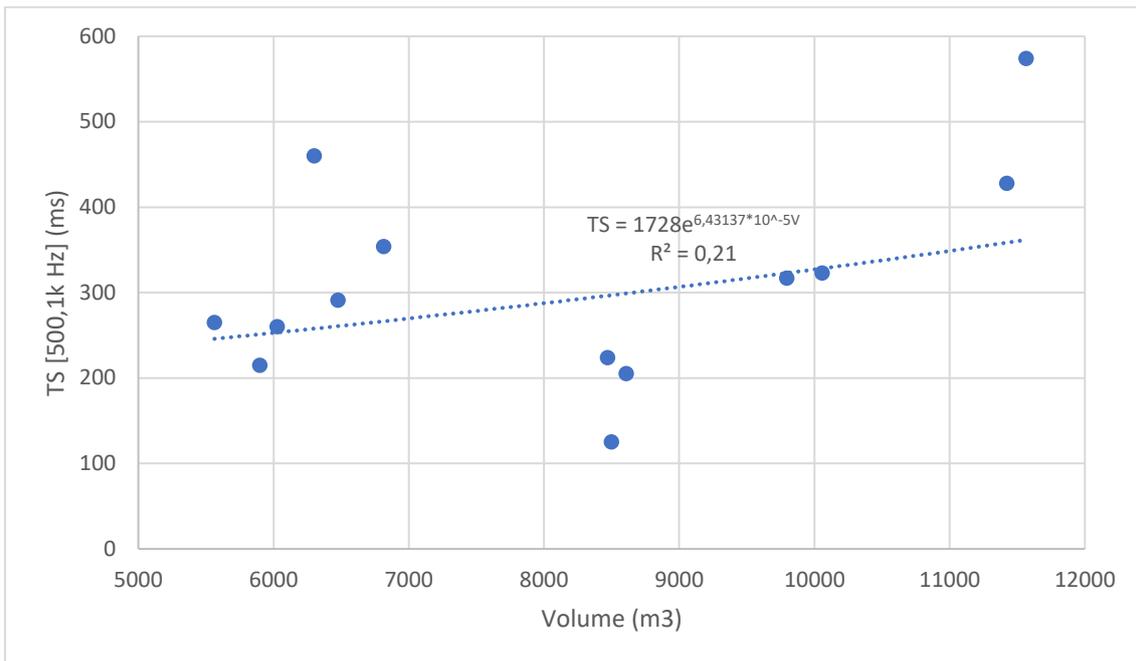


Fig. 7.14 - Valores médios do TR [500-1k Hz] em função do volume de igrejas portuguesas de volume “semelhante” com a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes [24].

Não é possível constatar nada ao verificar a Fig. 7.12 pela regressão linear ($R^2 = 0,08$). Isso ocorre devido à igreja de Nossa Senhora dos Navegantes possuir tratamento acústico e apresentar valores tão discrepantes em relação às demais, refletindo uma péssima regressão linear. Tendencialmente quanto maior for o volume da igreja, menor vai ser o C_{80} . As duas maiores igrejas em questão de volume, nomeadamente a igreja da Serra do Pilar e a igreja de São João Baptista, tem valores mais baixos de C_{80} , respetivamente -8,2 e -7-7 dB. Neste grupo de igrejas, apenas a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes tem o C_{80} positivo (0,5), o que sai fora um pouco da regressão linear, justamente porque tem projeto acústico e mantém-se o intervalo ideal de -2 a 2 dB.

Na Fig. 7.13 a tendência do D_{50} é a mesma. Quanto maior for o volume da igreja, menor vai ser o D_{50} , o que é espectável sem tratamento acústico. Os valores da Definição estão bem longe do aconselhável, como por exemplo a igreja de São João Baptista ou a Sé de Silves (0,09 ambas), e somente a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes está com um valor razoável fixado nos 0,37, ainda assim um pouco longo dos 0,60 aconselhados para a palavra.

Relativamente ao gráfico da evolução do Tempo Central com o Volume, verifica-se justamente o contrário, mas o espectável. Quanto maior for o volume maior o Tempo Central. Somente quatro igrejas estão relativamente perto do intervalo desejável de 140 a 180 milissegundos, sendo elas a igreja da Nossa Senhora dos Navegantes, igreja do Mosteiro de Tibães, igreja Matriz de Caminha e a igreja de Cedofeita (Nova) com os valores de 125, 205, 215 e 224 ms.

8

CONCLUSÃO

8.1 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo principal caracterizar acusticamente o interior da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes em Lisboa, por meio de parâmetros objetivos. Foram realizados ensaios *in situ* utilizando seis parâmetros acústicos escolhidos por serem cruciais para a caracterização acústica da igreja. O estudo também visa comparar os valores obtidos com os de outras igrejas da mesma época (Contemporâneo) e com outras igrejas portuguesas de volumetria “semelhante”. Os parâmetros acústicos selecionados para análise neste trabalho foram:

- Ruído de Fundo, (examinado através dos parâmetros L e L_A);
- Inteligibilidade da Palavra, avaliada com o STI;
- Reverberação, analisada pelo TR;
- Claridade, avaliada pelo C_{80} ;
- Definição avaliada pelo D_{50} ;
- Tempo Central, TS.

Os resultados obtidos foram compilados no Quadro 8.1, desempenhando um papel de síntese dos testes conduzidos ao longo desta investigação.

Quadro 8.1 – Quadro síntese dos valores médios medidos. (SS – Sem Sistema de som ligado CS – Com Sistema de som ligado)

Parâmetros	Simbologia	Valores obtidos
Ruído de Fundo	L_{eq} / L_{Aeq} (dB)	57,4 / 31,5
Inteligibilidade da Palavra	STI	0,44 / 0,54 (SS/CS)
Tempo de Reverberação	TR [500,1k Hz] (s)	2,0
Claridade	C_{80} [500,1k Hz] (dB)	0,48
Definição	D_{50} [500,1k Hz]	0,37 / 0,43 (SS /CS)
Tempo Central	TS [500,1k Hz] (ms)	125

Assim, é possível concluir que a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes apresenta um ruído de fundo baixo e adequado, considerando o seu valor bastante razoável (32 dBA), pois é uma zona pacata e também fruto do pouco trânsito rodoviário das suas imediações.

Ao avaliar o STI, foram obtidos valores médios de 0,44 e 0,54 sem o sistema de som ligado e com o sistema de som ligado, respetivamente. A igreja classifica-se, segundo a escala subjetiva de inteligibilidade da palavra (Quadro 2.5), como "Medíocre Inteligibilidade da Palavra" sem o reforço sonoro e "Suficiente Inteligibilidade da Palavra" com o sistema de som ligado.

Relativamente ao parâmetro Tempo de Reverberação (TR), a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes obteve o valor de 2,0 s para TR (500-1000 Hz) o que é um razoável compromisso entre a perspetiva da perceção da palavra e a música. A análise do TR revela ainda que os materiais utilizados e os dispositivos acústicos instalados na igreja foram eficazes para contrariar as condicionantes acústicas. É relevante notar que esta igreja tem um volume de cerca de 8500 m^3 , sendo de esperar resultados de TR significativamente superiores. Esses resultados refletem o bom trabalho realizado no espaço, incluindo o dimensionamento e a instalação do sistema de reforço eletroacústico, permitindo uma boa perceção da palavra suficiente por toda a audiência.

No que diz respeito à Claridade, a igreja em estudo obteve o valor médio de 0,5 situando-se assim dentro do intervalo considerado ótimo para esse parâmetro, que varia de -2 a 2 dB. Quanto ao parâmetro de Definição, constata-se que o espaço apresenta um valor médio aceitável de 0,37 quando o sistema de som se encontra desativado. No entanto, destaca-se um desempenho ainda mais positivo, atingindo 0,43, quando os altifalantes estão em operação. Por último, no parâmetro do Tempo Central (TS), registou-se um valor médio de 125 ms, o qual é considerado bastante favorável em comparação com outras igrejas e por estar próximo do intervalo ótimo de 140 a 180 ms.

Comparativamente a outras igrejas portuguesas de estilo arquitetónico idêntico e de volume "semelhante" (Capítulo 7), a igreja de Nossa Senhora dos Navegantes destaca-se, globalmente, com os resultados mais favoráveis em todos os parâmetros analisados. Tem o Tempo de reverberação médio mais baixo de todas as igrejas analisadas (2,0 s), tanto no grupo de igrejas contemporâneas como no das igrejas de volume "semelhante" de todas as épocas. O STI médio medido sem sistema electro acústico ligado é de 0,44, muito perto do 0,45 que já é classificado como *suficiente*. Neste parâmetro somente a igreja do Mosteiro de Tibães é tem um RASTI médio melhor (0,45). No parâmetro da Claridade é a única que se encontra no intervalo desejado de -2 a 2 dB. Na Definição é de longe a igreja com melhor parâmetro (0,37) e relativamente ao Tempo Central é a igreja que se encontra mais perto do intervalo ótimo. Posteriormente foram feitos gráficos destes cinco parâmetros analisados em função do volume para melhor esclarecimento.

8.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No intuito de enriquecer esta investigação, seria pertinente, em futuras etapas, conduzir ensaios adicionais considerando parâmetros suplementares, tais como o *Early Decay Time* (EDT) e os Rácios de Baixos, nomeadamente o *Bass Ratio* baseado no tempo de reverberação

(BR_RT) e o *Bass Ratio* baseado na intensidade sonora (BR_L). Esta abordagem visa a obtenção de uma caracterização acústica mais abrangente e refinada da igreja em análise. Seria interessante fazer um estudo relativamente a parâmetros acústicos subjetivos pois eles dependem da opinião pessoal dos auditores, nomeadamente:

- Ruído de Fundo: Se de facto os utilizadores da igreja se sentem incomodados com os ruídos externos de sistemas de ventilação (claraboias manuais), ruídos de tráfego ou outros tipos de ruídos que perturbem o utilizador;
- Intensidade do som: Intensidade geral ou volume do som que está a ser emitido nesse local;
- Ecos: reflexões atrasadas que provoquem distorção da clareza do discurso do orador;
- Inquéritos sobre a qualidade acústica nas igrejas junto a membros independentes da audiência, assegurando que a conformidade com os padrões de qualidade sonora fosse validada, evitando conclusões baseadas exclusivamente no RASTI/STI.

Concluída esta investigação, permanece a convicção de que é viável alcançar elevados padrões de conforto acústico em ambientes de grande envergadura, desde que se realize uma análise apropriada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A.P. Oliveira - *Acústica Ambiental e de Edifícios.*, Edição 8.19, FEUP, 2023.
- [2] *Foto de José Fornari.* https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Diagrama-do-ouvido-onde-e-demonstrado-o-Ouvido-Interno-constituído-pela_fig2_234095120, acessado em outubro de 2023.
- [3] *Propagação do som.* <https://www.fq.pt/som/propagacao-do-som>, acessado em outubro de 2023.
- [4] *Foto Francisco Moura.* <https://francisco-moura-cfq.blogspot.com/2013/06/audicao.html>, acessado em outubro de 2023.
- [5] *Psicoacústica.* <https://www.cochlea.eu/po/som/psicoacustica>, acessado em outubro de 2023.
- [6] *Filtros de ponderação de frequência.*
[https://pt.wikipedia.org/wiki/Decibel%C3%ADmetro#/media/Ficheiro:Acoustic_weighting_curves_\(1\).svg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Decibel%C3%ADmetro#/media/Ficheiro:Acoustic_weighting_curves_(1).svg), acessado em outubro de 2023.
- [7] EN ISO 11654:1997. *European Norm Standard – Sound absorbers for in use in buildings – Rating of sound absorption.*
- [8] NP EN ISO 354:2003. *European Norm Standard – Measurement of sound absorption in a reverberation room.*
- [9] *Noise Criteria: A Background Noise Rating Standard.* <https://altaintegra.com/201912a-noise-criteria/>, acessado em outubro de 2023
- [10] *Foto de Ayman Ismail Madbouly.* https://www.researchgate.net/figure/Noise-rating-curves-for-different-sound-pressure-levels-plotted-over-the-octave-band_fig5_299456797, acessado em outubro de 2023.
- [11] *Quais são as propriedades do som?.* <https://www.explicatorium.com/cfq-8/propriedades-do-som.html>, acessado em outubro de 2023.
- [12] *Reflexão Sonora.*
<https://sites.google.com/a/superensino.com/appondulatoriamnpef/home/materialdidatico/reflexao/07?overridemobile=true>, acessado em outubro de 2023.
- [13] *Inteligibilidade: medindo, prevendo e melhorando.* <https://www.doctorproaudio.com/content.php?2765-inteligibilidade-fala-sti-rasti-stipa-alcons>, acessado em outubro de 2023.
- [14] Eusébio de Cesarea. *História eclesiástica*, II, (VI, 20,2), Madrid, BAC, 1973.
- [15] Verdete, Carlos. *História da Igreja - Vol. II*, Paulus Ed., Portugal, 2009.
- [16] J. Orlandis, *A Short History of the Catholic Church*, Four Courts Press, County Dublin, 1993.
- [17] *Sinopse dos erros atribuídos ao Concílio Vaticano II.* <https://www.fsspx.es/pt/sinopse-dos-erros-atribu%C3%ADdos-ao-conc%C3%ADlio-vaticano-ii>, acessado em novembro de 2023.

- [18] *A construção e arquitetura das catedrais ao longo da história*. <https://engenharia360.com/as-catedrais-e-a-evolucao-da-construcao-e-arquitetura/>, acessado em novembro de 2023.
- [19] Carvalho, A.P. Oliveira – *Effect of Architectural Styles on Objective Acoustical Measures in Portuguese Catholic Churches*, WESTPRAC 1994, Seoul, Coreia do Sul, 1994.
- [20] Girón S., Álvarez-Morales L., Zamarreño T. - *Church acoustics: A state-of-the-art review after several decades of research*, Journal of Sound and Vibration, Sevilha, Espanha, 2017.
- [21] Parkin, P. H., e Taylor, P. H., *Wireless World*, 58, 2 e 3 (1952).
- [22] Raes A. C., Sacerdote G., *Measurement of the acoustical properties of two roman basilicas*, 1953.
- [23] Shankland, R. S. e Shankland, H. K. *Acoustics of St. Peter's and patriarchal basilicas in Rome*. The journal of the Acoustical Soc. of America, (50, 2 Part 1). Abril 1971.
- [24] - Silva, Telma E. L. - *Guião da acústica de igrejas em Portugal*. Porto, 2008.
- [25] *Onde erramos na acústica das igrejas*. <https://www.concepcaoacustica.com/post/onde-erramos-na-acustica-das-igrejas>, acessado em novembro de 2023.
- [26] T. da Cruz, Marlene - *Igrejas modernas com problemas acústicos. O caso da Igreja Nossa Senhora da Conceição (Porto)*. FEUP, Porto, 2011.
- [27] Gagliano A., Nocera F., Cicero A, Gioia M. C., Agrifoglio A., - *Analysis and acoustic correction of a contemporary Italian church*. ScienceDirect, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015.
- [28] Rico, B, León, A.L., Zamarreño, T., Sendra, J.J., Alario, R. Navarro, J. y Díaz, C. - *The acoustic rehabilitation of the Renaissance church of La Anunciación in Seville*. INTERNOISE, Lisboa, 2010.
- [29] RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de junho, Diário da República, 2008.
- [30] *Igreja Nossa Senhora dos Navegantes*. <https://www.quovadislisboa.com/pt/place/nossa-senhora-dos-navegantes>, acessado em novembro de 2023.
- [31] *Lisboa: Igreja de Nossa Senhora dos Navegantes, no Parque das Nações, inaugurada a 30 de março*. <https://agencia.ecclesia.pt/portal/lisboa-igreja-de-nossa-senhora-dos-navegantes-no-parque-das-nacoes-inaugurada-a-30-de-marco/>, acessado em novembro de 2023.
- [32] *Igreja Nossa Senhora dos Navegantes*. <https://www.paroquia-navegantes.org/igreja/>, acessado em novembro de 2023.
- [33] *Igreja Nossa Senhora dos Navegantes*. <https://www.paroquia-navegantes.org/equipa-pastoral/>, acessado em novembro de 2023.
- [34] *D. Manuel Clemente sucede a D. José Policarpo como Patriarca de Lisboa*. <https://www.patriarcado-lisboa.pt/site/index.php?id=2834>, acessado em novembro de 2023.

- [35] *Parque das Nações ganha “igreja do século XXI”*. https://rr.sapo.pt/informacao_detalhe.aspx?fid=29&did=143604, acessido em novembro de 2023.
- [36] *O traço singular da igreja de Nossa Senhora dos Navegantes do Parque das Nações*. <https://viagens.sapo.pt/viajar/viajar-portugal/artigos/o-traco-singular-da-igreja-de-nossa-senhora-dos-navegantes-do-parque-das-nacoes#>, acessido em novembro de 2023.
- [37] *Foto google earth*. <https://earth.google.com/>, acessido em novembro de 2023.
- [38] Contacto por email com a equipa de projeto da *InAcoustics*.
- [39] *Product Data: Modular Precision Sound Analyzer*. <https://www.bksv.com/media/doc/bp1750.pdf>, acessido em novembro de 2023.
- [40] *Foto de sonómetro da Value Tronics*. <https://www.valuetronics.com/product/2260-bruel-kjaer-vibration-and-sound-used>, acessido em novembro de 2023.
- [41] *Product Data: Sound Source Type*. <https://www.bksv.com/media/doc/bp0066.pdf>, acessido em novembro de 2023.
- [42] *Calibrador de nível sonoro*. <https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231>, acessido em novembro de 2023.
- [43] *Microfone de campo livre*. <https://www.bksv.com/pt/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4189>, acessido em novembro de 2023.
- [44] *ECHO SPEECH SOURCE*. <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/sound-sources/echo-speech-source-type-4720>, acessido em novembro de 2023.
- [45] Norma IEC 60268-16 (2011), acessido em novembro de 2023.
- [46] Everest, F. Alton. *The Master Handbook of Acoustics*. 4th Edition, 2011.
- [47] *Qualificação acústica de salas*. <https://portalacustica.info/qualificacao-acustica-de-salas/>, acessido em dezembro de 2023.
- [48] Pereira, G. Cristina. *Igrejas modernas com problemas acústicos. O caso do Santuário da Nossa Senhora da Assunção. (Santo Tirso)*, julho de 2011.
- [49] *Software Dirac*. <https://www.dirac.com/>, acessido em novembro de 2023.
- [50] *Making All the Right Noises: Shaping Sound with Audio Beamforming*. <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/making-all-the-right-noises-shaping-sound-with-audio-beamforming.html#:~:text=Beamforming%20relies%20on%20different%20speakers,direction%20of%20the%20acoustic%20wave>, acessido em Janeiro de 2024.
- [51] Pino, Joana S. de O. – *Estudo acústico de Bancos de Igreja*, tese MEC-FEUP, Porto, 2011.