

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA INTERIOR DA NOVA IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE EM FÁTIMA

PEDRO MIGUEL AGUIAR DA SILVA

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

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 - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

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

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

A meus Pais

Uma pessoa inteligente resolve o problema, um sábio previne-o

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Queria expressar os meus agradecimentos ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pelos seus ensinamentos, orientação, sugestões e pela disponibilidade e compreensão demonstrada ao longo deste percurso.

Agradeço ao Eng^o António Costa pela colaboração incansável na realização dos ensaios na Igreja da Santíssima Trindade e pelas dicas e apoio prestados durante a realização do trabalho.

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

Sentidos agradecimentos à Carolina por todo o apoio, compreensão e ajuda durante esta difícil fase final do meu curso.

Por final, queria agradecer aos meus pais, avó e irmão pelo apoio prestado ao longo de todo o curso e sem os quais a minha ingressão no Ensino Superior não teria sido possível.

RESUMO

Este trabalho analisa o comportamento acústico interior da nova Igreja da Santíssima Trindade em Fátima tendo como objectivos a sua caracterização e comparação quer com os requisitos impostos previamente pelo dono-de-obra quer com outros locais do mesmo tipo. Este estudo pretende analisar a igreja principal do complexo conhecido como Igreja da Santíssima Trindade, inaugurada em 12 de Outubro de 2007, a maior igreja de Portugal em número de lugares sentados (cerca de 9000) e para a qual foram impostos exigentes requisitos acústicos. Serve o presente estudo para verificar de que modo esses requisitos acústicos foram cumpridos e classificar globalmente a acústica desta igreja. Sendo uma igreja um espaço público de oração, o mais importante nestes espaços é a percepção das palavras proferidas pelo pregador nas missas por parte de todos os presentes. De igual importância é necessário garantir a ausência de ruído de fundo incomodativo sobretudo para as situações em que a igreja é usada como sítio para oração individual. Para ir ao encontro destas necessidades acústicas neste tipo de edifício foram escolhidos os seguintes parâmetros para avaliação *in situ*: tempo de reverberação, RASTI (com e sem uso da instalação sonora) e NC (com e sem o uso dos sistemas de AVAC). Estes parâmetros foram então medidos com a igreja desocupada, (com excepção dos técnicos responsáveis pelos ensaios) e em vários pontos da igreja. Os valores obtidos dos ensaios *in situ* foram comparados com os valores pré-fixados em fase de projecto. Os valores de NC com os dispositivos de AVAC em funcionamento variaram entre os 30 e 35 dB, que embora baixos, superaram os 30 dB de limite aceitável imposto.

Relativamente ao RASTI, obtiveram-se valores na sala entre 0,62 e 0,73 que corresponde a uma *Boa* Inteligibilidade da Palavra na escala normalizada, superando os 0,50 considerados limite ideais mínimos para ante-projecto.

Em relação ao Tempo de Reverberação, obtiveram-se os valores médios de 2,1 s e 2,03 para TR (500-1000 Hz) e TR (250 Hz) respectivamente. Os limites máximos aceitáveis eram de 2,6 para o primeiro e 3,4 s para o segundo, atingindo-se portanto, os objectivos pretendidos (embora os limites ideais impostos tenham sido de 2,1 e 2,8 s respectivamente).

Os resultados obtidos demonstraram que o interior da igreja apresenta um bom comportamento acústico e que o único parâmetro que não cumpre os existentes limites impostos pelo dono-de-obra foi o NC.

Por fim, procedeu-se à caracterização global do comportamento acústico da igreja, utilizando dois métodos de análise multi-critério. O primeiro método, baseando-se em parâmetros acústicos objectivos, classificou a Igreja da Santíssima Trindade com “Muito Boa Qualidade Acústica Interior”. O segundo método, previa a classificação através de parâmetros subjectivos. Como só se dispunham de parâmetros objectivos dos testes efectuados, usaram-se as relações matemáticas prevista pelo método para obter parâmetros acústicos subjectivos a partir de parâmetros acústicos objectivos. Obteve-se, com este método uma classificação de “Boa Qualidade Acústica da Igreja”.

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

ABSTRACT

This work analyzes the acoustic interior behaviour of the new church of the Holy Trinity in Fátima with the objectives of its characterization and comparison either with the requirements imposed by the Owner and to other places of the same type. This study pretends to analyze the main church of the complex known as *Igreja da Santíssima Trindade*, inaugurated on October 12, 2007, the biggest church in Portugal in number of seats (around 9000) and which demanded serious acoustic requirements. The present study verifies if the acoustic requirements were accomplished and classifies globally the acoustics of this church. Being the church, a public space of oration, the most important is the perception of words spoken by all the faithful presents. Of equal importance is to ensure the absence of background noise especially troublesome for those situations where the church is used as a place for individual prayer. To meet these acoustic needs in this type of building, the following parameters were chosen for *in situ* evaluation: reverberation time, RASTI (with and without the sound amplification system) and NC (with and without the HVAC system). These parameters were measured with the church unoccupied (with the exception of the technical staff responsible for the evaluations) and at various points within the church. The values obtained from *in situ* tests were compared with the values fixed in the design project. The values of NC with HVAC devices running ranged between 30 and 35 dB, exceeding the proposed acceptable limit of 30 dB.

For the RASTI, the values obtained for the room were from 0.62 to 0,73 which is a “Good“ Intelligibility of the Word in the standard scale and fulfills the minimum requirements of 0,50 set by the owner.

The reverberation time had the mean values of 2,1 and 2,0 for TR (500-1000 Hz) and TR (250 Hz) respectively. The acceptable limits were 2,6 for the first and 3,4 s for the second, so the desired objectives were reached.

The results showed that the only parameter that does not meet the limits imposed by the owner of the workforce was the NC.

Finally, an attempt was made to characterize the overall acoustic behavior of the church, using two methods of multi-criteria analysis. The first method, based on objective acoustic parameters, described the Church of the Holy Trinity with "Very Good Quality Interior Acoustics". In the second method, the classification was provided by subjective parameters. There were only objective parameters available from the tests, so the mathematical relations provided by the method, were used, to obtain subjective acoustic parameters from the objective acoustic parameters. It was obtained with this method a rating of "Good Quality Acoustics of the Church."

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

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	vii
1. OBJECTIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO	1
1.1. JUSTIFICAÇÃO DA TESE	1
1.2. OBJECTIVOS	1
1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO	1
2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	4
2.2.1. CELERIDADE	4
2.2.2. INTENSIDADE SONORA	4
2.2.3. POTÊNCIA SONORA.....	4
2.2.4. NÍVEIS	4
2.2.5. FREQUÊNCIA	5
2.2.6. CURVAS DE PONDERAÇÃO PARA OUVIDO HUMANO.....	6
2.2.7. RUÍDO DE FUNDO	7
2.2.8. CURVAS DE INCOMODIDADE	7
2.2.9. REVERBERAÇÃO	9
2.2.10. ABSORÇÃO SONORA	11
2.2.11. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA.....	11
2.2.12. TEMPO CENTRAL	12
2.2.13. DEFINIÇÃO	12
2.2.14. CLARIDADE	12
2.2.15. FACTOR DE FORÇA	13
3. ACÚSTICA DE IGREJAS	15
3.1. OBJECTIVOS ACÚSTICOS DE UMA IGREJA	15
3.2. FALHAS ACÚSTICAS FREQUENTES EM IGREJAS	17
3.3. TRATAMENTO ACÚSTICO DE IGREJAS ANTIGAS	17

3.4. ESTUDOS REALIZADOS NO ÂMBITO DA ACÚSTICA DE IGREJAS	17
4. IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE	19
4.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA	19
4.2. A IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE	22
4.2.1. CARACTERIZAÇÃO ARQUITECTÓNICA DA IGREJA.....	22
4.2.1.1. Introdução.....	22
4.2.1.2. Parâmetros Arquitectónicos.....	23
4.2.1.3. Materiais	24
4.2.2. CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA IGREJA	28
4.2.2.1. Valores propostos para projecto	28
4.2.2.2. Soluções adoptadas.....	30
5. ENSAIOS	35
5.1. INTRODUÇÃO	35
5.2. RUÍDO DE FUNDO	36
5.2.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR.....	36
5.2.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO	37
5.2.3. RESULTADOS	39
5.3. RASTI	39
5.3.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR.....	39
5.3.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO	40
5.3.3. RESULTADOS	43
5.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	45
5.4.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR.....	45
5.4.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO	46
5.4.3. RESULTADOS	47
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS E COMPARAÇÃO COM OS VALORES ESTABELECIDOS EM PROJECTO	51
6.1.1. RUÍDO DE FUNDO.....	51
6.1.2. RASTI.....	56
6.1.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	60
6.2. COMPARAÇÃO DA IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE COM IGREJAS DO MESMO TIPO	62

6.3. COMPARAÇÃO DA IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE COM SALAS DESTINADAS A ESPECTÁCULOS MUSICAIS	64
7. CLASSIFICAÇÃO DA IGREJA SEGUNDO MÉTODOS MULTI-CRITÉRIO	69
7.1. OBJECTIVOS	69
7.2. INDEX METHOD OF THE ACOUSTIC QUALITY ASSESSMENT OF SACRAL BUILDINGS	69
7.2.1. INTRODUÇÃO	69
7.2.2. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REVERBERAÇÃO	70
7.2.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DISTÚRBO EXTERNO	71
7.2.4. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE MUSICAL	71
7.2.5. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	73
7.2.6. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE UNIFORMIDADE DA PRESSÃO SONORA	74
7.2.7. CLASSIFICAÇÃO FINAL	74
7.3. METODOLOGIA MULTI-CRITÉRIO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE ACÚSTICA EM IGREJAS	75
7.3.1. INTRODUÇÃO	75
7.3.2. RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS SUBJECTIVOS E OBJECTIVOS	76
7.3.3. CLASSIFICAÇÃO FINAL	77
8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	79
8.1. CONCLUSÕES	79
8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. – Propagação do som sob a forma de esferas concêntricas. [2]	3
Figura 2.2. – a) som puro; b) som puro; c) som complexo = som puro a) + som puro b). [2]	5
Figura 2.3. – Curvas de igual sensibilidade auditiva do ouvido humano. [3]	6
Figura 2.4. – Curvas de Ponderação A, B, C e D. [2]	7
Figura 2.5. – Curvas NC. [5]	8
Figura 2.6. – Som directo (D) e som reflectido numa sala (E – Emissor; R – Receptor). [3]	9
Figura 2.7. – Relação entre os valores do tempo de reverberação e o volume, para médias frequências, onde: 1) igrejas; 2) salas de concerto para orquestras; 3) salas de concerto para música ligeira; 4) estúdios de concerto; 5) salas de dança; 6) teatros de ópera; 7) auditórios para a palavra; 8) cinemas e salas de conferência; 9) estúdios de televisão; 10) estúdios de rádio. [6]	10
Figura 2.8. – Decaimento de 60 dB para definição do TR por valor teórico (à esquerda) e por extrapolação (à direita). [2]	10
Figura 3.1. – Plantas de igrejas em cruz latina (à esquerda – Catedral de Santiago de Compostela) [16] e em cruz grega (à direita – Capela de São Frutuoso de Montélios-Real-Braga). [17]	15
Figura 3.2. – Relação entre valores de TR óptimo e volume de uma Igreja. [3]	16
Figura 3.3. – Relação entre valores de TR óptimo e volume de uma Igreja para diferentes religiões. [3]	16
Figura 4.1. – Fotografia dos 3 pastorinhos. [32]	20
Figura 4.2. – Fotografia da 1ª missa dada na Capela das Aparições (13-10-1921). [32]	20
Figura 4.3. – Fotografia da antiga Capela destruída pelo atentado (06-03-1922). [32]	21
Figura 4.4. – Peregrinação - Fotografia tirada a 13 de Maio de 1982 com o espaço reservado para a futura igreja da Santíssima Trindade ao fundo. [32]	21
Figura 4.5. – Igreja da Santíssima Trindade pronta (em cima); Maquete da Igreja da Santíssima Trindade (em baixo à esquerda e à direita). [33]	22
Figura 4.6. – Pormenor das Capelas subterrâneas na parte inferior da maquete, do lado esquerdo as duas capelas mais pequenas para estrangeiros e do lado direito a capela maior. [33]	23
Figura 4.7. – Planta da Igreja Santíssima Trindade [34]	24
Figura 4.8. – Pormenor da membrana translúcida que tapa a cobertura e permite entrada de luz. [Foto do Autor] ..	25
Figura 4.9. – Painel de ouro e terracota na parede de trás do altar de Pe. Marko Ivan Rupnik. [Foto do Autor] ..	26
Figura 4.10. – Pormenor dos desenhos do painel de Pe. Marko Ivan Rupnik. [Foto do Autor]	26
Figura 4.11. – Fragmento marmóreo do túmulo de S. Pedro. [Foto do Autor]	27
Figura 4.12. – Escultura em bronze de Cristo crucificado de Catherine Green. [Foto do Autor]	27
Figura 4.13. – Escultura de Nossa Senhora de Fátima de Benedetto Pietogrande. [Foto do Autor]	28
Figura 4.14. – Pormenor das cadeiras almofadadas. [Foto do Autor]	31
Figura 4.15. – Pormenor do painel perfurado de madeira das portas laterais. [Foto do Autor]	31

Figura 4.16. – Parede da rectaguarda do coro. [Foto do Autor]	32
Figura 4.17. – Difusores Acústicos da parede de retaguarda da assembleia. [Foto do Autor]	32
Figura 4.18. – Parede revestida com “Akustaplan” (parte branca). [Foto do Autor]	33
Figura 4.19. – Colunas responsáveis pela amplificação do órgão e <i>Wave Cannons</i> . [Foto do Autor]	34
Figura 5.1. – Localização dos pontos ensaiados para a avaliação do NC. Planta retirada de [34].	36
Figura 5.2. – Registo do nível de pressão sonora do Ruído de Fundo. [Foto do Autor]	37
Figura 5.3. – Sonómetro <i>B&K 2260</i> . [36]	37
Figura 5.4. – Pormenor dos ventiladores no piso com ruído anormal [Foto do Autor]	38
Figura 5.5. – Pormenor das frinchas na porta de emergência [Foto do Autor]	38
Figura 5.6. – Localização dos pontos ensaiados para avaliação do RASTI. [34]	40
Figura 5.7. – Posição do transmissor do sinal sonoro ao nível do orador. [Foto do Autor]	42
Figura 5.8. – Recepção do sinal sonoro para avaliação do RASTI. [Foto do Autor]	42
Figura 5.9. – 2ª fase do ensaio de RASTI com sistema de som ligado [Foto do Autor]	43
Figura 5.10. – Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios RASTI.....	44
Figura 5.11. – Fonte sonora situada a cerca de 0,5 m das escadas para ensaios de Tempo de Reverberação. [Foto do Autor]	45
Figura 5.12. – Localização dos nove pontos a ensaiar e fonte emissora (E) para o TR. [7]	46
Figura 5.13. – Valores de TR por banda de frequência para os 9 pontos testados.	48
Figura 5.14. – Valores dos TR _{min} , TR _{max} e TR _{médio} por banda de frequência.....	48
Figura 5.15. – Comparação TR _{médio} com valores do TR dos pontos 1 e 6.	49
Figura 6.1. – Valores de ΔL por banda de frequência.	52
Figura 6.2. – Comparação dos valores de L no ponto 1 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.	53
Figura 6.3. – Comparação dos valores de L no ponto 2 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.	53
Figura 6.4. – Comparação dos valores de L no ponto 3 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.	54
Figura 6.5. – Comparação dos valores de L no ponto 4 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.	54
Figura 6.6. – Comparação dos valores de L no ponto 5 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.	55
Figura 6.7. – Comparação dos valores de L _{médio} com as curvas NC25 e NC30.	55
Figura 6.8. – Comparação de RASTI com os valores objectivo e limite aceitável sugeridos em projecto.	56
Figura 6.9. – Valores de $\Delta RASTI$ para compreensão dos efeitos do sistema de som.	57
Figura 6.10. – Altifalantes pendurados sobre o altar [Foto do Autor]	58
Figura 6.11. – ISORASTI sem sistema de som em funcionamento.	59
Figura 6.12. – ISORASTI com sistema de som em funcionamento.	60
Figura 6.13. – Comparação dos valores medidos de TR (500-1000Hz) com valores de projecto	61
Figura 6.14. – Comparação dos valores de TR (250Hz) com valores de projecto.....	62

Figura 6.15. – Comparação dos valores de TR (500-1000Hz) Mega-Igrejas.....	64
Figura 6.16. – Comparação dos valores de TR (500-1000Hz) Mega-Igrejas em função do volume (m ³).....	65
Figura 6.17. – Valores de TR (500-1000Hz) de salas para concerto desocupadas sob a forma gráfica.	67
Figura 7.1. – Gráfico que relaciona Tmid com Wm1. [8]	72
Figura 7.2. – Gráfico que relaciona BR com Wm2. [8]	72
Figura 7.3. – Gráfico que relaciona C ₈₀ com Wm ₃ . [38]	73
Figura 7.4. – Gráfico que relaciona Ts com Wm ₄ . [38]	73
Figura 7.5. – Gráfico que relaciona RASTI com Ws2. [8]	74

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1. – Condições limite estabelecidas pelo Dono-de-Obra. [1]	29
Quadro 4.2. – Condições limite estabelecidas pelo Dono-de-Obra para sistema electroacústico. [1]	29
Quadro 4.3. – Medições do ruído exterior. [1]	29
Quadro 4.4. – Valores previstos de alguns parâmetros acústicos (para igreja ocupada). [1]	30
Quadro 4.5. Coeficientes de absorção médio (α_w) e por banda de frequência de 1 oitava do material de revestimento <i>Akustaplan</i> para as espessuras de 50, 100 e 400 mm. [35]	33
Quadro 5.1. – Valores médios dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo sem AVAC em funcionamento	39
Quadro 5.2. – Valores médios dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo com AVAC em funcionamento.....	39
Quadro 5.3. – Escala de RASTI	41
Quadro 5.4. – RASTI (1ª fase) – sistema de som desligado.....	43
Quadro 5.5. – RASTI (2ª fase) – sistema de som ligado	44
Quadro 5.6. – Valores medidos do Tempo de Reverberação (s)	47
Quadro 6.1. – Valores dos níveis de pressão sonora equivalente (L e L_A) obtidos nos ensaios para cada ponto e variação entre os valores com e sem AVAC (ΔL e ΔL_A).	51
Quadro 6.2. – NC obtido para cada ponto ensaiado [31]	52
Quadro 6.3. – RASTI dos ensaios vs RASTI requeridos no projecto	57
Quadro 6.4. – TR dos valores médios dos ensaios vs TR do projecto	62
Quadro 6.5. – Referências de Mega-Igrejas [1], [33], [34], [35], [36] e [37]	63
Quadro 6.6. – Referência de salas de espectáculo.....	66
Quadro 7.1. – L_A para ruído de fundo sem AVAC.....	71
Quadro 7.2. – Classificação QAI [24]	76
Quadro 7.3. – Escala de conversão para a normalização [24]	76
Quadro 7.4. – Modelos de previsão de relação entre parâmetros acústicos subjectivos e objectivos, resultados da conversão e resultados da conversão normalizados. [24]	77
Quadro 8.1. – Quadro-Resumo dos valores medidos e comparações	79

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AI – *Articulation Index*

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BR – *Bass Ratio*

B&K – *Brüel & Kjaer*

c – Celeridade (m/s)

C₅₀ – Claridade (dB, base 50 ms)

C₈₀ – Claridade (dB, base 80 ms)

CLA – Clareza do discurso musical

DIR - Direccionalidade

EDT – Tempo de decaimento curto (s)

EQT – Equilíbrio Tímbrico

D – Som directo

D₅₀ – Definição

E - Emissor

G – Factor de Força (dB)

I – Intensidade Sonora (W/m²)

I₀ – Intensidade Sonora de referência (W/m²)

INTM – Intimidade

L_A – nível pressão sonora (dBA)

L_p – Nível de pressão sonora (dB)

L_I – Nível de intensidade sonora (dB)

L_w – Nível de potência sonora (dB)

NC – *Noise Criterion* (dB)

p – Pressão (Pa)

p₀ – Pressão de referência (Pa)

P80 – Número de palavras entendidas numa lista de oitenta palavras

QAI – Qualidade Acústica de Igreja

R – Receptor

r – Distância à fonte (m)

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

REV - Reverberância

RF – Ruído de Fundo (dB)

S – Área (m²)

STI – *Speech Transmission Index*

T – Temperatura do ar (K)

Tmid – Média entre TR (500 Hz) e TR (1.000 Hz) (s)

TR – Tempo de Reverberação (s)

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

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

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

TS – Tempo Central (ms)

V - Volume (m³)

W – Potência Sonora (W)

W₀ – Potência Sonora de referência (W)

WAQS – Índice de qualidade acústica em edifícios religiosos

α – Coeficiente de absorção

α_w – Coeficiente de absorção médio

ρ – Massa volúmica do ar

η_i – Pesos em método multi-critério

1

OBJECTIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO

1.1. JUSTIFICAÇÃO DA TESE

A Igreja da Santíssima Trindade em Fátima (2007) foi pioneira em vários aspectos pois trata-se da maior igreja em Portugal (em número de lugares) e foi merecedora de um grande e exaustivo estudo acústico. Esta prática tem vindo a assumir importância em Portugal noutra tipo de obras, como salas de espectáculo, cinemas ou auditórios. Mas no que toca a igrejas, a da Santíssima Trindade foi a primeira em Portugal com esta envergadura de intervenção acústica. Este tipo de estudo vem dar mais crédito à Acústica como área vital na construção dos edifícios. Surge assim a necessidade de um estudo do comportamento acústico do interior da Igreja da Santíssima Trindade para caracterizar os resultados obtidos e para verificar o cumprimento dos objectivos propostos pelo dono de obra [1] agora que a igreja está em funcionamento.

1.2. OBJECTIVOS

O objectivo deste estudo é caracterizar acusticamente, através de parâmetros objectivos, um tipo específico de espaço, a igreja, tomando como caso de estudo a nova Igreja da Santíssima Trindade do Santuário de Fátima inaugurada em 12 de Outubro de 2007. Este estudo é suportado por uma valiosa componente prática, que consiste nos ensaios *in situ* dos parâmetros acústicos a avaliar para a caracterização acústica do interior da Igreja da Santíssima Trindade. A partir da análise dos resultados dos ensaios, faz-se a verificação dos requisitos acústicos impostos na fase de ante-projecto para esta igreja e a comparação desses valores com os de outras igrejas do mesmo tipo.

1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em oito capítulos: no 1º Capítulo faz-se uma breve descrição do trabalho e dos objectivos deste; O 2º Capítulo fornece as bases acústicas essenciais para a compreensão do estudo efectuado; No 3º Capítulo faz-se uma abordagem à Acústica de Igrejas, descrevendo o seu estado actual e trabalhos já feitos nesta área, enumeram-se os objectivos acústicos de uma igreja e os problemas frequentes relacionados com a acústica que aparecem em edifícios deste tipo; O 4º Capítulo caracteriza a igreja alvo deste trabalho, a Igreja da Santíssima Trindade em Fátima, fornecendo informações sobre a arquitectura da igreja, os materiais usados na sua concepção e quais os objectivos acústicos pretendidos para o seu funcionamento assim como uma comparação com os parâmetros acústicos que caracterizam outras igrejas; O 5º Capítulo diz respeito aos ensaios realizados

in situ para a elaboração deste trabalho. São descritos pormenorizadamente e apresentados os seus resultados ao longo deste capítulo; No 6º Capítulo analisam-se os resultados expostos no capítulo anterior, faz-se uma discussão destes e comparam-se com os valores propostos em projecto assim como os valores que caracterizam outros edifícios do mesmo tipo; No 7º Capítulo atribui-se uma classificação ao comportamento acústico interior da igreja com base em dois métodos multi-critério. O 8º Capítulo apresenta as conclusões do estudo e pistas para desenvolvimentos futuros.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

Todos os fenómenos acústicos estudados no presente trabalho ocorrem no ar. O ar é um meio de propagação como tantos outros, mas em acústica de edifícios é o meio que mais interessa estudar porque é através deste que o som se propaga desde a fonte sonora até aos ouvidos do receptor. O ar é composto por oxigénio, azoto, dióxido de carbono, hidrogénio, vapor de água e gases raros. Estes elementos encontram-se misturados de uma forma homogénea e isotrópica, de tal forma que se não houver perturbação o ar encontra-se em equilíbrio. A propagação do som no ar dá-se devido a variações de pressão a que o ar é submetido. A fonte sonora, libertando energia, vai alterar as condições de estado de equilíbrio do ar (como pressão, temperatura e massa específica) fazendo com que haja propagação do som por ondas elásticas. Essas ondas propagam-se em todas as direcções a partir da fonte pontual sob a forma de esferas concêntricas (Figura 2.1.).

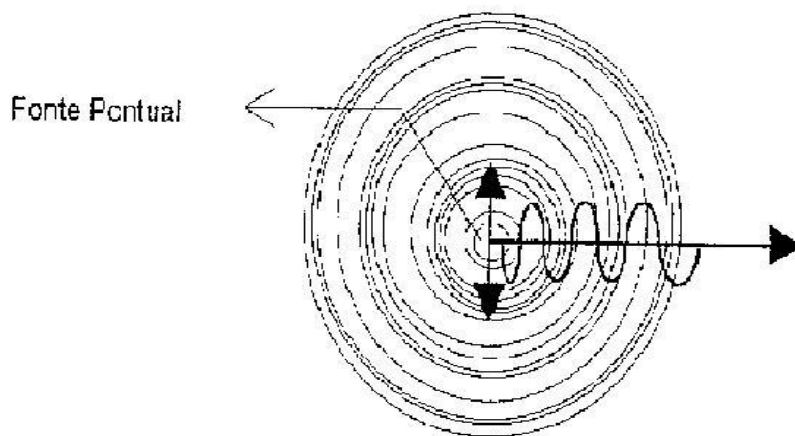


Figura 2.1. – Propagação do som sob a forma de esferas concêntricas numa fonte pontual. [2]

No interior de um edifício, existem diversos fenómenos entre a emissão do sinal sonoro e a captação deste pelo ouvido humano. Seguem-se no próximo subcapítulo um conjunto de conceitos e definições essenciais para a compreensão deste estudo em particular e da Acústica de Edifícios em geral.

2.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.2.1. CELERIDADE

A celeridade é a velocidade de propagação das ondas sonoras no ar. Varia com a temperatura deste, obedecendo à seguinte expressão:

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

Onde c é a celeridade (m/s) e T é a temperatura absoluta do ar em graus Kelvin (K). Para converter a temperatura da escala de célsius (°C) como habitualmente vem quantificada para a escala absoluta ou de Kelvin (K) utiliza-se a seguinte expressão:

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

2.2.2. POTÊNCIA SONORA

A potência sonora depende exclusivamente da fonte e é a energia total que atravessa uma esfera fictícia centrada na fonte sonora. Quantifica-se em watt (W).

2.2.3. INTENSIDADE SONORA

Para uma determinada direcção a intensidade sonora é a quantidade média de energia que atravessa uma área de 1 m² perpendicularmente a essa direcção. É uma grandeza vectorial e exprime-se em W/m². Pode ser quantificada através da seguinte expressão:

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

Onde I é a intensidade sonora (W/m²), W a potência sonora em watt (W), r a distância à fonte em metros (m), p a pressão sonora em pascal (Pa), ρ a massa volúmica do ar que corresponde normalmente a cerca de 1,2 kg/m³ e c a celeridade em m/s que em condições normais ($T \approx 15$ °C) ronda os 340 m/s.

2.2.4. NÍVEIS

O ouvido humano responde quase logaritmicamente aos estímulos sonoros, ou seja, a intensidade da sensação auditiva aumenta aproximadamente com o aumento do logaritmo do estímulo. Os estímulos são a variação de pressão, sendo a variação mínima audível cerca de 10⁻⁵ Pa e a máxima 100 Pa. A estes valores dão-se os nomes de *limiar da audição* e *limiar da dor* respectivamente. O nível exprime-se em decibel (dB) que é um décimo do bel [unidade que surgiu em honra a Alexander Graham Bell, cientista americano nascido na Escócia a quem foi atribuída, durante muitos anos, a invenção do telefone]. Esta grandeza não é só utilizada na Acústica, mas sim em qualquer situação em que se pretende quantificar uma grandeza em relação a um valor de referência. Na acústica temos:

- Nível de pressão sonora: $L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$ em que p_0 é a pressão de referência, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa;
- Nível de intensidade sonora: $L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$ em que I_0 é a intensidade sonora de referência,

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

- Nível de potência sonora: $L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$ em que W_0 é a potência sonora de referência, $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

2.2.5. FREQUÊNCIA

A frequência é uma das características mais importantes para descrever um som. É o número de ciclos completos por segundo e exprime-se em hertz [em honra do físico alemão Heinrich Hertz]. Todos os sons, excepto os puros ou simples, contêm diversas frequências (sons complexos - Figura 2.2.). O ouvido humano capta frequências entre os 20 Hz e os 20.000 Hz e no entanto, não consegue distinguir pequenas diferenças em frequência. Em Acústica de Edifícios dividem-se as frequências em três grandes grupos:

- Frequências graves: entre 20 e 355 Hz;
- Frequências médias: entre 355 e 1.410 Hz;
- Frequências agudas: entre 1.410 e 20.000 Hz.

Como existem milhares de frequências torna-se difícil analisar os sons em todas elas, pelo que são agrupadas em bandas de frequência com intervalos normalizados. Existem os intervalos de banda de oitava centrados nas seguintes frequências 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000, 16.000 Hz e os de terço de oitava centradas nas seguintes 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000, 5.000, 6.300, 8.000, 10.000, 12.500, 16.000 e 20.000 Hz. Na Acústica de Edifícios usam-se habitualmente para os intervalos de banda de oitava as frequências dos 125 Hz aos 2.000 Hz e para intervalos de banda de terço de oitava as frequências entre os 100 Hz e os 3.150 Hz.

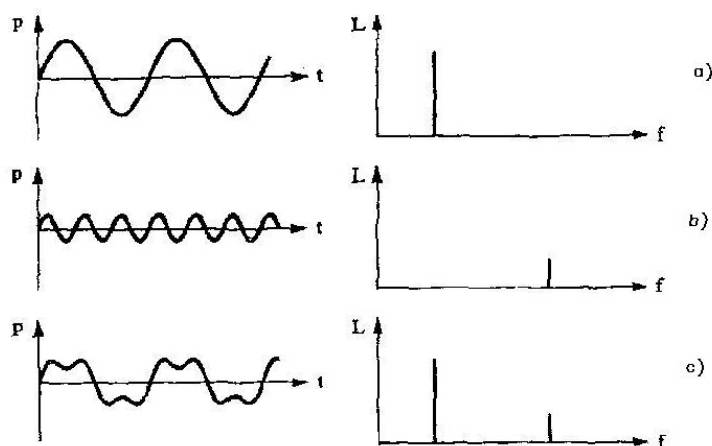


Figura 2.2. – a) som puro; b) som puro; c) som complexo = som puro a) + som puro b). [2]

2.2.6. CURVAS DE PONDERAÇÃO PARA OUVIDO HUMANO

O ouvido humano tem uma sensibilidade diferente para diferentes frequências (Figura 2.3.).

Devido a esta particularidade é necessário “corrigir” os equipamentos que captam as pressões sonoras com total fidelidade para as diferentes frequências, para o ouvido humano. A curva de ponderação mais usada para este efeito é a Curva A (Figura 2.4.).

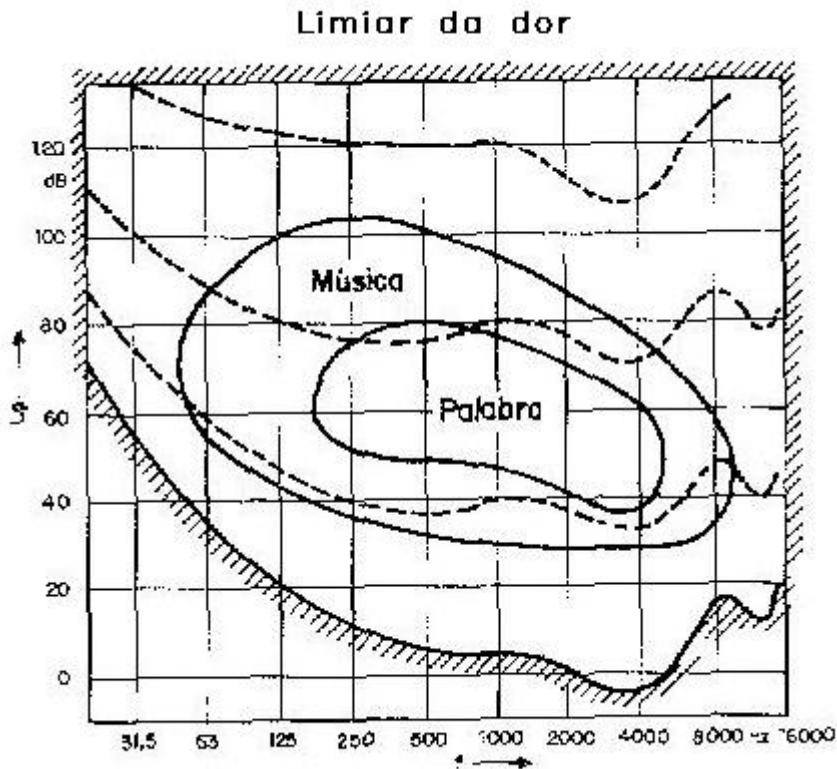


Figura 2.3. – Curvas de igual sensibilidade auditiva do ouvido humano [3]

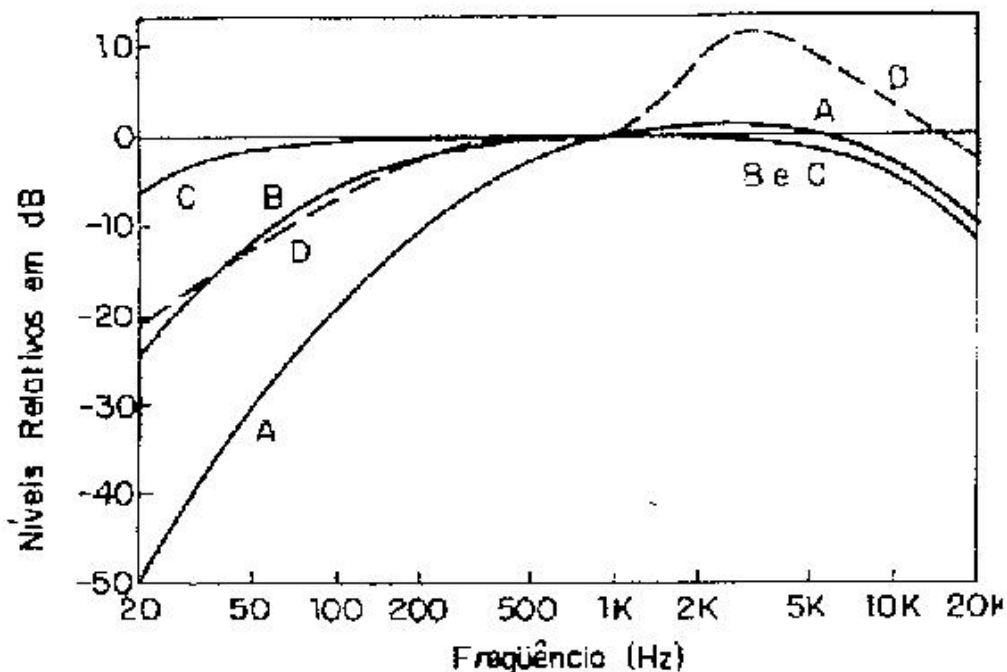


Figura 2.4. – Curvas de Ponderação A, B, C e D. [2]

2.2.7. RÚIDO DE FUNDO

O que distingue um som de um ruído é o seu significado para o auditor. O som tem informação útil para o auditor, ou soa de uma forma agradável, enquanto o ruído é um estímulo sonoro desagradável e/ou incomodativo para o auditor. O ruído de fundo (RF) em Acústica de Edifícios é o ruído resultante de todas as actividades envolventes e exteriores ao domínio de privacidade e/ou interesse do auditor. O ruído interfere na privacidade, porque mascara outros sons que o auditor pretende ouvir, ou seja, faz elevar o limiar da audição de um dado som que se pretende ouvir, quer seja o som da televisão, da rádio, aparelhagem ou mesmo da conversação, obrigando os interlocutores a elevar o tom de voz. O ruído de fundo pode resultar de ruídos do exterior como, obras, tráfego ferroviário, rodoviário, aéreo, naval, indústrias em laboração, circulação de pessoas, etc. Pode também resultar de ruídos provenientes do interior do edifício, como o ruído das instalações de água e esgotos, funcionamento de válvulas e torneiras, instalações de bombagem, aparelhos sanitários, escoamento de águas, ruído de elevadores, portas de entrada, circulação de pessoas nas zonas de comunicação horizontal comum e caixa de escadas e ainda o ruído proveniente dos aparelhos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC).

2.2.8. CURVAS DE INCOMODIDADE

A incomodidade causada pelo ruído de fundo proveniente dos equipamentos dentro de um espaço fechado é avaliada através das *Curvas de Incomodidade*. Nesta avaliação é medido o nível de pressão sonora do ruído de fundo em vários pontos de uma sala (à altura dos ouvidos de um ouvinte) para

bandas de 1 oitava. Com esta informação é possível construir um espectro que é comparado com as Curvas de Incomodidade.

A curva mais usada é a *NC* (*Noise Criterion*) que é definida pelos níveis de pressão sonora para bandas de 1 oitava dos 63 Hz aos 8 kHz [4]. A classificação *NC* num ponto é feita com o método da tangente, ou seja, o valor da menor curva *NC* (Figura 2.5.) que não é excedido por nenhum dos níveis de pressão sonora (*L*) do espectro do ponto, é o valor *NC* desse ponto.

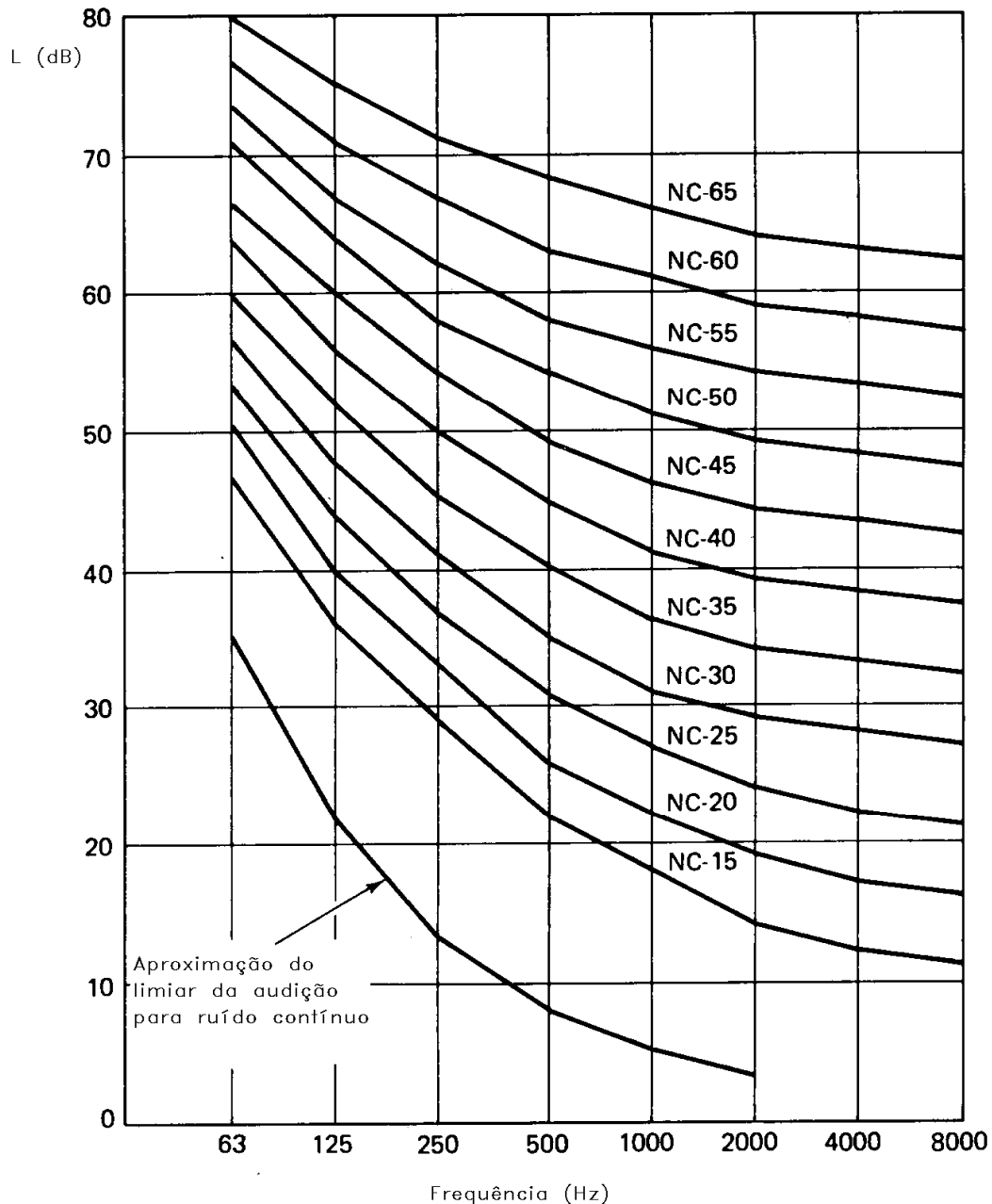


Figura 2.5. – Curvas NC. [5]

2.2.9. REVERBERAÇÃO

A reverberação é um fenómeno muito importante que serve como critério fundamental de avaliação acústica de todo o tipo de salas. Este fenómeno consiste na maior ou menor persistência de um som numa sala, após a fonte sonora deixar de emitir o sinal sonoro. Quando uma fonte sonora emite num compartimento surgem dois tipos de ondas sonoras, de origem directa, e de origem reflectida (ver Figura 2.6.) As directas atingem o ouvinte directamente após o percurso mais rápido possível (em linha recta) entre a fonte e o ouvinte. As reflectidas atingem o ouvinte após reflectir numa ou em várias superfícies existentes no compartimento. Estas reflexões podem ser únicas ou múltiplas antes de atingir o ouvinte. As ondas reflectidas vão perdendo intensidade à medida que aumenta o número de reflexões, devido às absorções provocadas pelas diversas superfícies. Quanto menor for a capacidade de absorção média das superfícies, maior será a reverberação. A reverberação pode ter efeitos negativos na qualidade acústica de uma sala, porque as reflexões podem mascarar sons directos, perturbando em parte ou totalmente a percepção do som emitido.

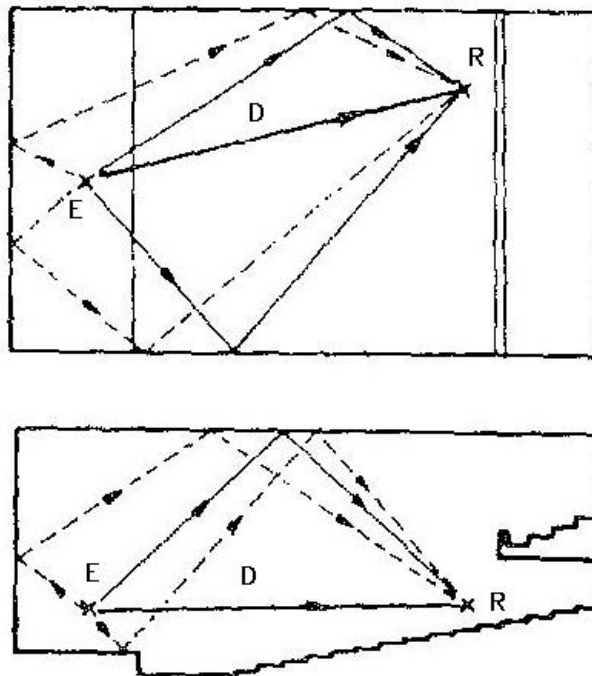


Figura 2.6. – Som directo (D) e som reflectido numa sala (E - Emissor; R - Receptor). [3]

Este efeito é particularmente indesejável em salas de concerto, ópera, cinemas, igrejas, pelo que é necessário quantificar a reverberação de modo a ser disponibilizado num só número as características gerais para uma sala conforme a serventia que irá ter (Figura 2.7.). Esse número é o Tempo de Reverberação (TR) que corresponde ao intervalo de tempo que qualquer som demora a decair 60 dB no nível de pressão sonora (Figura 2.8.). Na prática é difícil avaliar o decaimento de 60 dB porque o ruído de fundo sobrepõe-se, por isso é costume avaliar os decaimentos de 30 dB e 20 dB extrapolando-se para os 60 dB.

O físico americano Wallace Sabine foi o primeiro a quantificar o Tempo de Reverberação (TR). Propôs em 1898 a fórmula (de Sabine) que faz depender o TR do volume, coeficiente de absorção dos materiais da envolvente e suas áreas de superfície:

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

Onde TR é o tempo de reverberação em segundos (s), V é o volume do compartimento em metros cúbicos (m³), α_i é o coeficiente de absorção de cada material i e S_i é a área de material i correspondente em metros quadrados (m²).

A limitação deste método é ser independente de como o material absorvente está distribuído pela sala, sendo por isso o TR constante para qualquer posição dos materiais e do receptor, o que não é completamente válido na realidade, porque o percurso das ondas reflectidas varia conforme a geometria da sala e disposição dos materiais, sendo por isso possível a existência de tempos de reverberação diferentes para diferentes posições numa mesma sala.

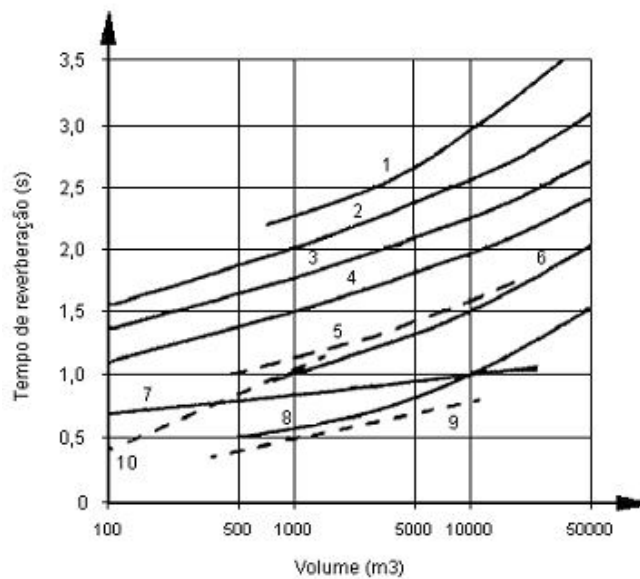


Figura 2.7. - Relação entre os valores do tempo de reverberação e o volume, para médias frequências, onde: 1) igrejas; 2) salas de concerto para orquestras; 3) salas de concerto para música ligeira; 4) estúdios de concerto; 5) salas de dança; 6) teatros de ópera; 7) auditórios para a palavra; 8) cinemas e salas de conferência; 9) estúdios de televisão; 10) estúdios de rádio. [6]

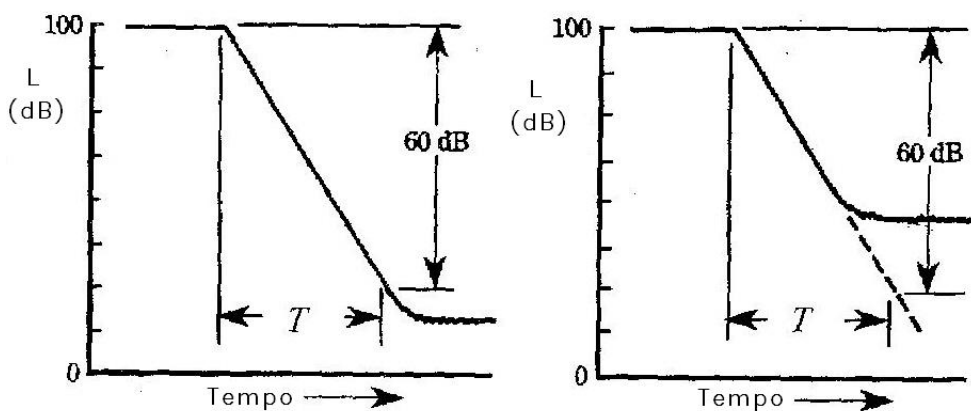


Figura 2.8. – Decaimento de 60 dB para definição do TR por valor teórico (à esquerda) e por extrapolação (à direita). [2]

2.2.10. ABSORÇÃO SONORA

A maioria dos materiais possuem uma propriedade que lhes permite transformar parte da energia sonora que neles incide noutro tipo de energia, normalmente a térmica. À razão entre a quantidade de energia que por unidade de tempo se dissipa na superfície de um material e a energia que durante esse intervalo de tempo incide nessa superfície, dá-se o nome de coeficiente de absorção sonora (α). Este coeficiente varia entre 0 e 1. Os materiais reflectores têm α próximo de 0 (ex. mármore polido), os materiais absorventes têm um α superior a 0,5.

Os materiais ou sistemas cuja função é a absorção sonora não têm igual absorção para todas as bandas de frequência. Assim sendo, dividem-se em três categorias:

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

2.2.11. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

A inteligibilidade da palavra é uma qualidade acústica fundamental nas salas destinadas à palavra. É a maior ou menor facilidade em entender a palavra proferida no espaço. Varia com o nível de intensidade sonora, ruído de fundo, tempo de reverberação, distância do receptor ao locutor, direccionalidade da emissão, duração da emissão e frequência.

As vogais e consoantes têm características acústicas distintas o que torna por vezes difícil a percepção dos dois tipos de sons da palavra para as mesmas condições numa determinada sala. As vogais são emitidas em frequências mais baixas, entre 150 e 500 Hz, enquanto as consoantes entre os 1.500 e 7.000 Hz. A diferença de nível de pressão sonora entre o som mais fraco (consoante) e o mais forte (vogal) é de cerca de 28 dB. Quanto à duração, a das vogais é em média de cerca de 90 milissegundos (ms) enquanto as consoantes é de cerca de 20 ms. Estas diferenças entre as vogais e consoantes aliadas a uma acústica deficiente do espaço onde é proferida a palavra (principalmente tempo de reverberação elevado) podem tornar imperceptível uma simples palavra.

A inteligibilidade da palavra pode ser avaliada por métodos subjectivos como nas teses “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas por Parâmetros Subjectivos*” de António Morgado de 1996 [7] e “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de carácter Subjectivo e Objectivo*” de Margarida Lencastre de 1998 [4] em que um orador lia uma lista de palavras e grupos de auditores espalhados pelo espaço avaliavam a inteligibilidade da palavra respondendo a inquéritos em que indicavam a palavra ouvida. Posteriormente as respostas dos inquéritos foram analisadas estatisticamente de forma a classificar a inteligibilidade da palavra segundo escalas definidas pelos autores em função da percentagem de palavras percebidas pelos auditores. Já existem normas (normas ANSI [9] e ISO [10]) que fornecem indicações de como este tipo de ensaios deve ser conduzido de forma a generalizar o método para poderem ser obtidos resultados passíveis de serem comparados.

Os métodos objectivos são bem mais rápidos que os anteriores. Desde que se disponha do equipamento certo torna-se muito vantajoso utilizar estes métodos em detrimento dos subjectivos.

O primeiro método a aparecer foi o *Articulation Index* (AI) desenvolvido por French e Steinberg em 1947 que tiveram como seguidores Kyrter e Beranek e a publicação da norma ANSI em 1969 [9]. Este método tem em consideração o ruído envolvente e as frequências. Mais tarde este método foi melhorado pelo *Sii* (*Speech Intelligibility Index*) conforme a norma ANSI S3.5 publicada em 1997 [45].

Outro método é o nível de interferência na conversação – *SIL* (*Speech Interference Level*) que consiste no cálculo da média aritmética dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo em cada banda de frequência dos 500 aos 2.000 Hz (oitavas).

Em 1971 surge o STI (*Speech Transmission Index*) [11]. Este método, para além de ter em conta o ruído de fundo tem também em conta a reverberação. A determinação deste índice baseia-se na diminuição da modulação de um sinal sonoro de experiência emitido por uma fonte sonora, contendo as gamas de frequências e flutuações de nível de intensidade da voz humana que vai ser captado por um microfone receptor situado nos lugares dos auditores. Essa diminuição de modulação será a função de modulação de transferência emissor-receptor que é convertida para taxa de inteligibilidade. A desvantagem deste método é que é necessário determinar funções de modulação em 98 pontos que vem de 14 frequências de modulação, ou seja são necessárias 98 medições para cada ponto.

Em 1971 surgiu o RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) [12] que é uma simplificação do STI e é actualmente o mais usado. Este método será descrito no Capítulo 5 visto tratar-se do método usada para avaliação da inteligibilidade da palavra da igreja em estudo neste trabalho.

2.2.12. TEMPO CENTRAL

O Tempo Central (TS) é um parâmetro acústico objectivo obtido por equipamentos através de relações energéticas do sinal recebido. É o ponto no tempo onde a energia recebida antes deste ponto é igual à que é recebida depois desse ponto [13]. Expressa-se em milissegundos (ms). Em salas de concerto, para frequências médias (250 – 2000 Hz) é habitual ter uma posição entre 140 e 180 ms.

Traduz-se pela seguinte relação matemática:

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

2.2.13. DEFINIÇÃO

A Definição é também um parâmetro obtido à custa de equipamentos de ensaios acústicos e corresponde a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida [14]. Expressa-se em percentagem ou numa escala de 0 a 1.

Traduz-se pela seguinte expressão:

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

2.2.14. CLARIDADE

A Claridade (C_{80}) é também um parâmetro acústico objectivo obtido por equipamentos através de relações energéticas do sinal recebido. É a razão entre a energia recebida nos primeiros 80

milissegundos (ms) de um sinal recebido e a energia recebida posteriormente e exprime-se em dB. Considera-se que o limite de 80 ms é o adequado para a música [15].

A claridade pode-se traduzir na seguinte relação matemática:

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

2.2.15. FACTOR DE FORÇA

O *Factor de Força* (*strength factor* – G) é a razão entre a energia total recebida numa posição dum espaço fechado e a energia recebida para o som directo isolado se medido a uma distância de 10 m a partir da origem num ambiente anecóico, ou seja, um ambiente em que não existem reflexões ($TR \approx 0$ s). Exprime-se também em dB.

Traduz-se pela seguinte relação matemática:

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

$p_{10m}(t)$ é medida a 10 m a partir da origem em ambiente anecóico.

3

ACÚSTICA DE IGREJAS

3.1. OBJECTIVOS ACÚSTICOS DE UMA IGREJA

As igrejas são espaços públicos que requerem características acústicas muito particulares. São espaços concebidos para os rituais e tradições da religião católica, e são também espaços com muitas preocupações no que diz respeito à beleza arquitectónica, variando a sua arquitectura com a época. Várias formas são conhecidas na arquitectura de igrejas, como por exemplo a cruz latina e a cruz grega (Figura 3.1.) e espaços acoplados entre si.

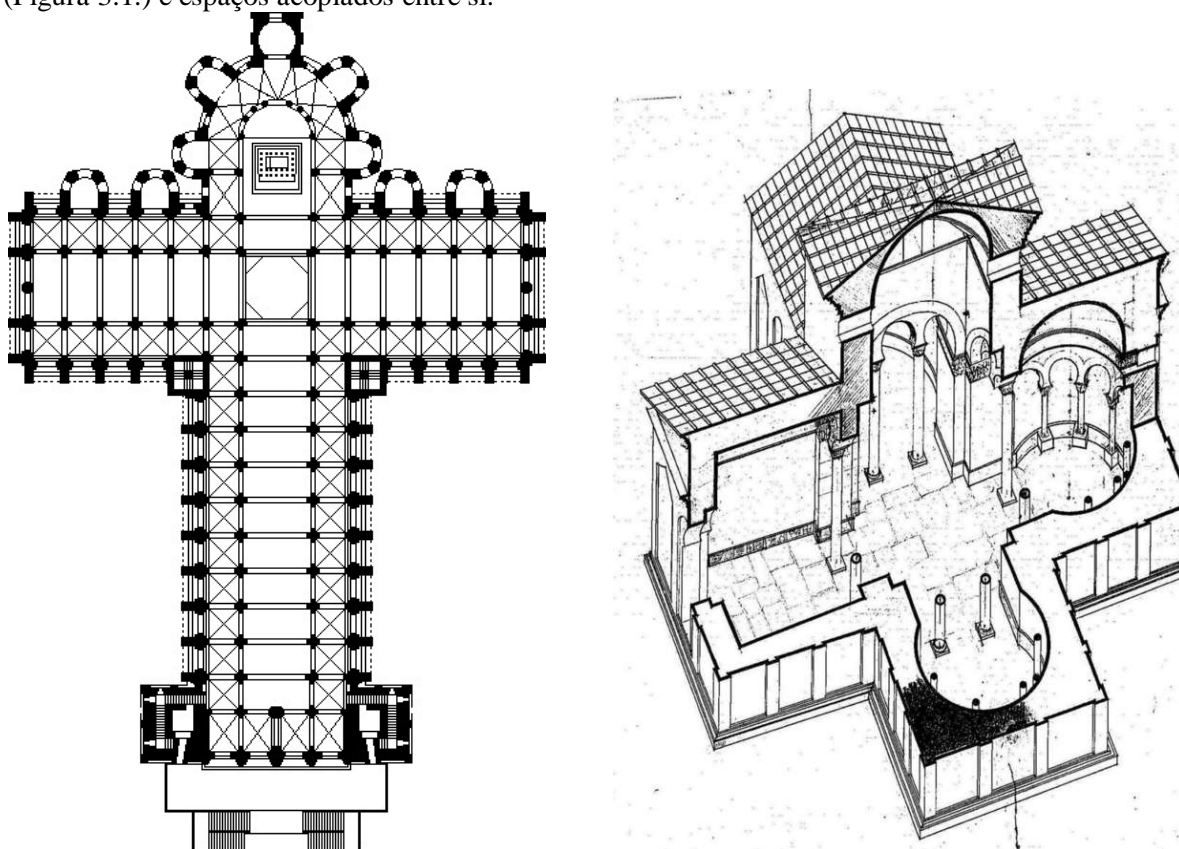


Figura 3.1. – Plantas de igrejas em cruz latina (à esquerda – Catedral de Santiago de Compostela) [16] e em cruz grega (à direita – Capela de São Frutuoso de Montélios-Real-Braga). [17]

Estas formas complexas obrigam a considerar as propriedades acústicas de cada espaço em separado e a combinação de todos eles. O órgão necessita de boas condições para música, o presbitério de boas condições para a palavra enquanto a nave central deve ter simultaneamente boas condições para a palavra e para a música.

Em todos os espaços é essencial o silêncio em redor para não perturbar a meditação e oração. É na nave que surge o maior problema da Acústica de Igrejas devido à grande contradição causada pelas

exigências acústicas desta parte da igreja. Como atrás foi referido, na nave de uma igreja é necessário haver uma boa percepção da palavra e da música em simultâneo, só que são dois objectivos difíceis de conjugar. Para haver uma boa percepção da palavra são necessários baixos tempos de reverberação entre os 0,8 e 1,0 s enquanto para a música de órgão os tempos de reverberação devem ser altos, a rondar os 2,0-2,2 s ou até mais. Hoje em dia a opinião mais generalizada é que se deve conservar um ambiente musical tão bom quanto possível, desde que não interfira com a inteligibilidade da palavra. V.O. Knudsen [18] chegou a apresentar relações numéricas entre TR e volume da igreja e religião praticada no seu interior (Figuras 3.2. e 3.3.).³

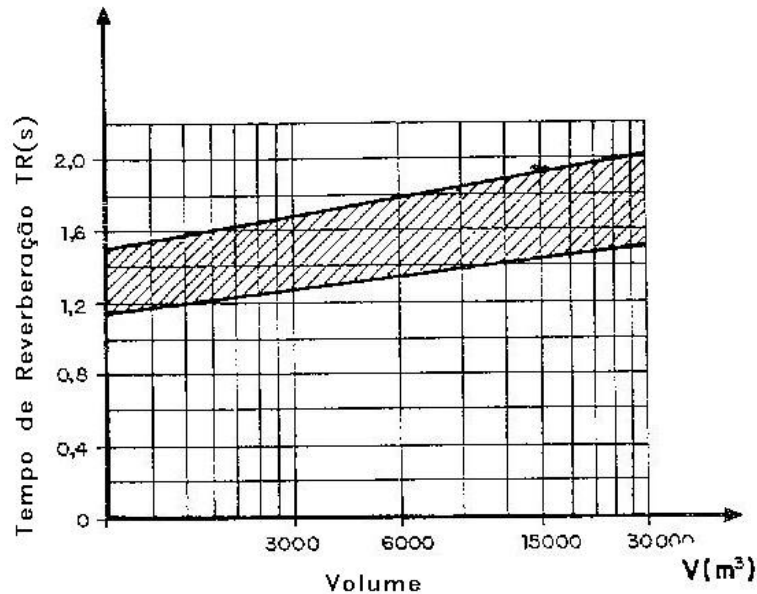


Figura 3.2. – Relação entre valores de TR óptimo e volume de uma Igreja. [3]

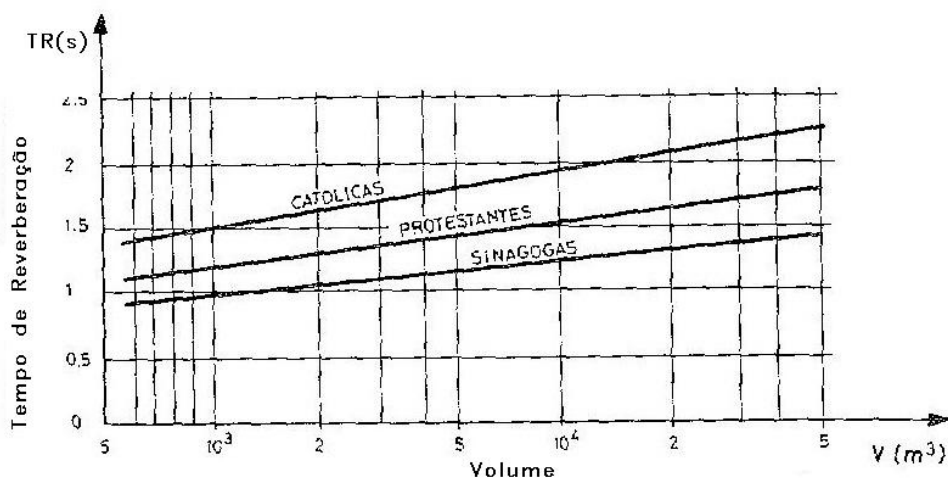


Figura 3.3. – Relação entre valores de TR óptimo e volume de uma Igreja para três diferentes religiões. [3]

Quanto ao sistema de amplificação de som a instalar, este deve garantir que o som directo chega com a intensidade adequada a todos os ouvintes, ou seja, a intensidade do som directo deve ser superior à do som reverberado para uma boa percepção da palavra e sem atrasos detectáveis.

3.2. FALHAS ACÚSTICAS FREQUENTES EM IGREJAS

Devem ser diferenciados os problemas de construir uma igreja nova de raiz com boas condições acústicas e tratar acusticamente uma igreja já construída. Uma igreja que vai ser construída de raiz deve respeitar os objectivos acústicos descritos no subcapítulo anterior. Tratar acusticamente uma igreja construída é um desafio maior que nem sempre leva a resultados satisfatórios. O grande problema que afecta as igrejas antigas é o TR elevado. As igrejas antigas têm um som típico, o “som de catedral” [3] e consiste na elevada persistência do som no espaço. Esta característica típica das igrejas antigas, principalmente as de grande volume, deve-se à arquitectura destas. Normalmente são espaços amplos com tectos muito altos, formas irregulares e de grande volume, logo têm TR elevado e campos sonoros irregulares com reflexões irregulares. O TR elevado diminui a inteligibilidade da palavra que, associada à irregularidade do campo sonoro e ao Ruído de Fundo, faz com que nalguns pontos da igreja, a mensagem a transmitir pelo orador seja imperceptível e por vezes até inaudível.

3.3. TRATAMENTO ACÚSTICO DE IGREJAS ANTIGAS

Para tratar os problemas atrás referidos, podem ser colocados tapetes e outros elementos absorventes, almofadar os assentos, de forma a obter uma área de superfície de absorção sonora maior, para baixar o TR. Para uniformizar o campo sonoro, e caso o tamanho da igreja o obrigue, instalar um sistema de reforço electroacústico, com sistemas de atraso (*delay*) e espalhar convenientemente altifalantes por todo o espaço garantindo que o som chega a todos os ouvintes sem contudo criar nova e nefastas reflexões artificiais. No entanto, não se deve descurar a monumentalidade do espaço, “escondendo” sempre que possível os altifalantes nas naves laterais. Quanto ao Ruído de Fundo, deve-se isolar principalmente as paredes das capelas e confessionários com material de isolamento sonoro. O ruído proveniente do exterior não tem grande importância, devendo-se no entanto tratar as aberturas para o exterior, portas e janelas garantindo que fecham adequadamente e fornecem o isolamento adequado. O ruído dos passos no pavimento deve também ser minimizado.

3.4. ESTUDOS REALIZADOS NO ÂMBITO DA ACÚSTICA DE IGREJAS

Existem já bastantes trabalhos desenvolvidos sobre a Acústica de Igrejas. Por exemplo e por ordem cronológica:

Em 1952 Parkin e Taylor estudaram a inteligibilidade da palavra na Catedral de S. Paulo em Londres através da análise dos diferentes sistemas electro-acústicos instalados ao longo do tempo [19].

Em 1953 Auguste C. Raes e Gino G. Sacerdote relacionaram a arquitectura com o comportamento acústico nas basílicas de S. João Luterano e S. Paulo Fora de Portas [20].

McCandless e Lane em 1963 desenvolveram um tratamento para as paredes da S. Lucas Episcopal Church em Dallas de forma a melhorar a inteligibilidade da palavra no espaço [21].

R. S. Shankland e H. K. Shankland em 1971 compararam o comportamento acústico da basílica de S. Pedro em Roma com as de S. João Luterano, S. Paulo Fora de Portas e Sta. Maria Maior [22].

Em 1973 Fitzroy descreveu a sua experiência como consultor acústico na construção da Catedral de Sta. Maria em S. Francisco [23].

Em 1975 Tzekakis analisou a variação do tempo de reverberação com o estado de ocupação da Igreja de Jorge de Salónica na Grécia [24].

Em 1982 Meeks sugere um processo de dimensionamento de sistemas sonoros para igrejas [25].

Lewers e Anderson em 1984 estudam a reverberação da Catedral de S. Paulo assim como a inteligibilidade baseados no método de Beranek [26].

Manuel Recuero Lopez e Constantino Gil Gonzalez desenvolvem em 1987 um estudo experimental sobre a acústica do Mosteiro de Santo Domingos de Silos em Burgos [27].

Em Portugal começaram a aparecer em 1994 trabalhos de António Pedro Oliveira Carvalho, que inicia o estudo desta área em Portugal, publicando a tese de doutoramento “*Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*” [28], em que estuda 41 igrejas católicas portuguesas através da medição de parâmetros objectivos e relaciona-os com parâmetros arquitectónicos. Nos anos seguinte vários trabalhos nesta área são publicados no âmbito do Programa de Investigação em Acústica de Igrejas da Feup [29].

Em 1996 Morgado na sua tese de mestrado “*Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas através de parâmetros subjectivos*” analisa, agora através de parâmetros subjectivos, 36 igrejas portuguesas já estudadas por Carvalho [7].

Em 1998 Margarida Lencastre estuda a inteligibilidade da palavra através de parâmetros objectivos e subjectivos na tese de mestrado “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de Análises de Carácter Objectivo e Subjectivo*” [8].

Em 2008 surgem as teses de mestrado integrado de Cândido Monteiro “*Comparação entre a Acústica em Igrejas Católicas e em Mesquitas*” [30] e de José Loureiro “*Metodologia Multi-Critério para Análise da Qualidade Acústica em Igrejas*” [31].

4

IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE

4.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Desde que em 13 de Maio de 1917 a Virgem Maria apareceu a três meninos pastores (figura 4.1), que Fátima se tornou um centro de peregrinação conhecido mundialmente. As aparições foram várias, e decorreram entre 13 de Maio e 13 de Outubro de 1917 e foi-lhes reconhecida credibilidade eclesial pelo Bispo de Leiria a 13 de Outubro de 1930 em carta pastoral que oficializou o culto de Nossa Senhora de Fátima.

Em 1919 é iniciada a construção da Capelinha das Aparições, tendo sido celebrada a primeira missa em 1921 (Figura 4.2.). Na noite de 6 para 7 de Março de 1922, a Capelinha é alvo de um atentado destruidor com dinamite (Figura 4.3.). É reconstruída entre 13 de Dezembro de 1922 e 13 de Janeiro de 1923.

A afluência de peregrinos à Capela das Aparições veio exigir mais espaço e então iniciou-se a construção de um novo templo mais amplo, hoje conhecido como “Basílica” a 13 de Maio de 1928. No entanto, só foi sagrada a 7 de Outubro de 1953 pelo Cardeal Patriarca de Lisboa, D. Manuel Gonçalves Cerejeira. Em 1954 o Papa Pio XII confere-lhe o título de “basílica menor”.

Em 1951 foram trasladados os restos mortais de Jacinta Marto do cemitério de Fátima para a Basílica e em 1952 o mesmo para os restos mortais de Francisco Marto que seguiram o mesmo caminho. A Irmã Lúcia juntou-se aí aos restantes “pastorinhos” em 2006.

A última remodelação da Capela teve início em 1981 e foi inaugurada pelo Papa João Paulo II que era devoto da Nossa Senhora de Fátima a 13 de Maio de 1982, precisamente um ano depois da tentativa de seu assassinato na praça de São Pedro, a 13 de Maio de 1981.

Em 2000 completa-se o processo de beatificação de Jacinta Marto e Francisco Marto por João Paulo II.

Com o passar dos anos, Fátima foi promovida a vila em 1977 e promovida a cidade pela Assembleia da República em 1997. Hoje é uma cidade com cerca de 8.000 habitantes, munida de várias escolas, 15 congregações masculinas e 47 femininas, e dispõe de cerca de 10.000 camas como capacidade hoteleira.

A Basílica do Santuário de Fátima começou a revelar-se insuficiente para a afluência de peregrinos a Fátima, pois tinha capacidade apenas para algumas centenas de pessoas. Milhares de peregrinos de todo o mundo começaram por deslocar-se ao Santuário de Fátima só no dia 13 de Maio (Figura 4.4.), depois, ao dia 13 de todos os meses, e mais recentemente nos fins-de-semana e dia-a-dia também, perfazendo um total de cerca de 5 milhões de visitas anuais ao Santuário. Exigia-se então a construção de uma nova igreja que pudesse acolher melhor os peregrinos. Decidiu-se então no 75º aniversário das aparições a construção da Igreja da Santíssima Trindade com capacidade para 9000 lugares sentados a ser inaugurada em 2007 no 90º aniversário das Aparições.

A 12 de Outubro de 2007 foi inaugurada a Igreja da Santíssima Trindade (Figura 4.5.).



Figura 4.1. – Fotografia dos 3 pastorinhos. [32]



Figura 4.2. – Fotografia da 1ª missa dada na Capela das Aparições (13-10-1921). [32]



Figura 4.3. – Fotografia da antiga Capela destruída pelo atentado (06-03-1922). [32]



Figura 4.4. – Peregrinação - Fotografia tirada a 13 de Maio de 1982 com o espaço reservado para a futura igreja da Santíssima Trindade ao fundo. [32]

4.2. A IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO ARQUITECTÓNICA DA IGREJA

4.2.1.1. Introdução

A Igreja da Santíssima Trindade (Figura 4.5.) situa-se no topo Sudoeste (Figura 4.6.) do Santuário de Fátima, a 250 m da Basílica e tem uma área de intervenção de 230×155 m². O projecto desta nova mega-igreja para o Santuário de Fátima ficou a cargo duma equipa liderada pelo arquitecto grego Alexandros N. Tombazis. Tombazis elegeu a forma circular com 125 m de diâmetro, sustentada por uma grande viga que suporta toda a cobertura e evita colunas no interior. A igreja tem um volume de 130.000 m³ e capacidade para 8633 pessoas sentadas (3175+5458 nas suas duas zonas) incluindo 76 lugares para deficientes. Existem duas modalidades de ocupação, uma para 3175 pessoas que é separada por uma divisória amovível do resto da nave, que pode ser recolhida se se pretender usar a totalidade dos lugares. Tornou-se assim a maior igreja portuguesa em lugares sentados e uma das maiores igrejas Católicas Romanas no mundo. O complexo suporta também três igrejas mais pequenas em subterrâneo, as Capelas da Reconciliação (Figura 4.6.). Duas especialmente pensadas para estrangeiros com 120 lugares cada e uma outra com 600 lugares. Existem ainda 64 confessionários no complexo.

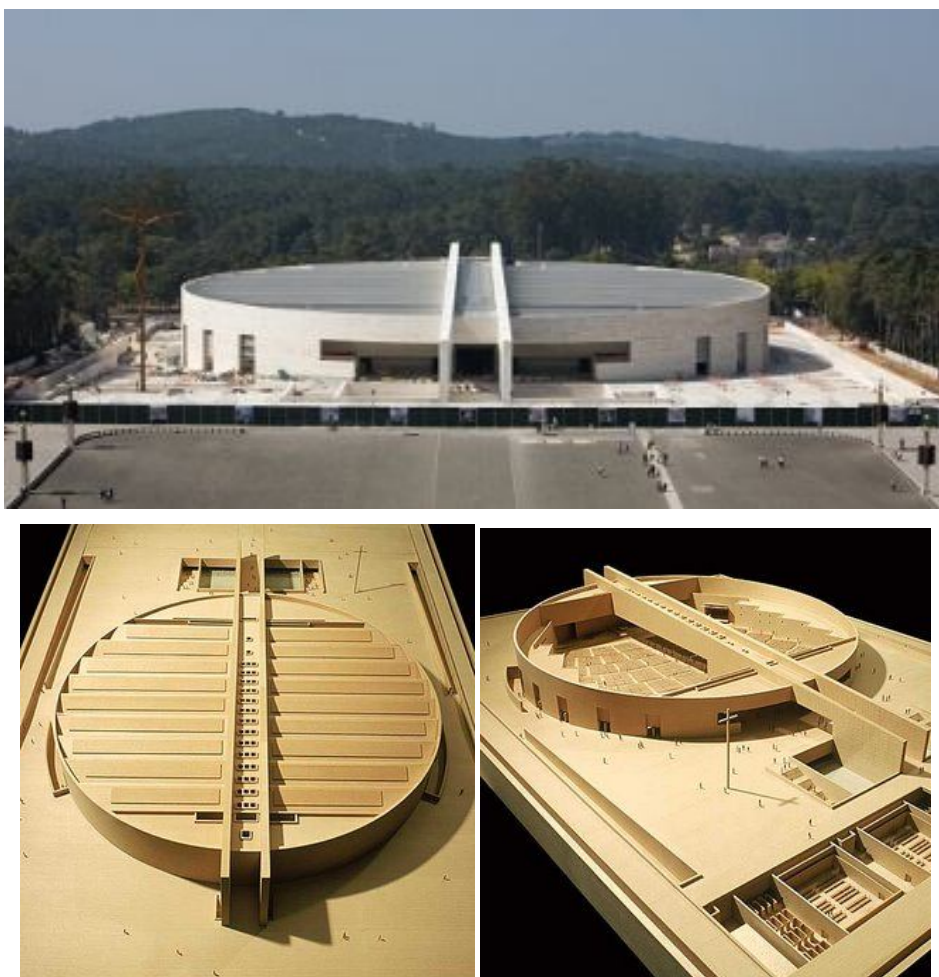


Figura 4.5. – Igreja da Santíssima Trindade pronta (em cima); Maquete da Igreja da Santíssima Trindade (em baixo à esquerda e à direita). [33]

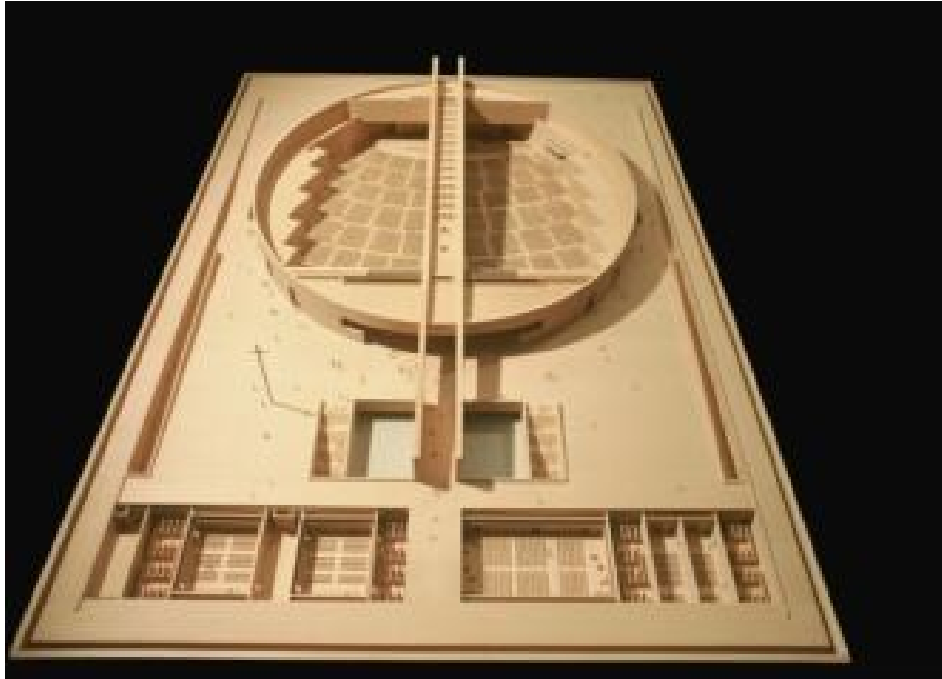


Figura 4.6. – Pormenor das Capelas subterrâneas na parte inferior da maquete (do lado esquerdo as duas capelas mais pequenas e do lado direito a capela maior). [33]

4.2.1.2. Parâmetros Arquitectónicos

No ano da sua inauguração a Igreja da Santíssima Trindade recebeu o “Prémio Secil de Engenharia Civil” [34]. Este prémio é atribuído de dois em dois anos, alternando com o “Prémio Secil Arquitectura”. É o maior galardão que pode ser atribuído a projectos de autoria de projectistas portugueses. O projecto de engenharia (estruturas) foi da autoria do Eng. José Mota Freitas. A obra destaca-se pela utilização de betão branco, pelas duas vigas de betão pré-esforçado que suportam toda a cobertura da nave central. Pela sua inovação e complexidade, o júri, presidido pelo Engº Raimundo Delgado decidiu atribuir este prémio à Igreja da Santíssima Trindade, que pela visibilidade que terá, vai contribuir seguramente para prestigiar a engenharia civil portuguesa.

De seguida apresentam-se as dimensões principais da igreja.

Dimensões principais da Igreja da Santíssima Trindade (Figura 4.7.):

- Volume – 130.000 m³;
- Área – 8.700 m²;
- Altura máxima – 20 m;
- Altura média – 15 m;
- Altura mínima – 9 m;
- Comprimento máximo – 95 m;
- Comprimento médio – 85 m;
- Largura máxima – 115 m;
- Largura média – 105 m.

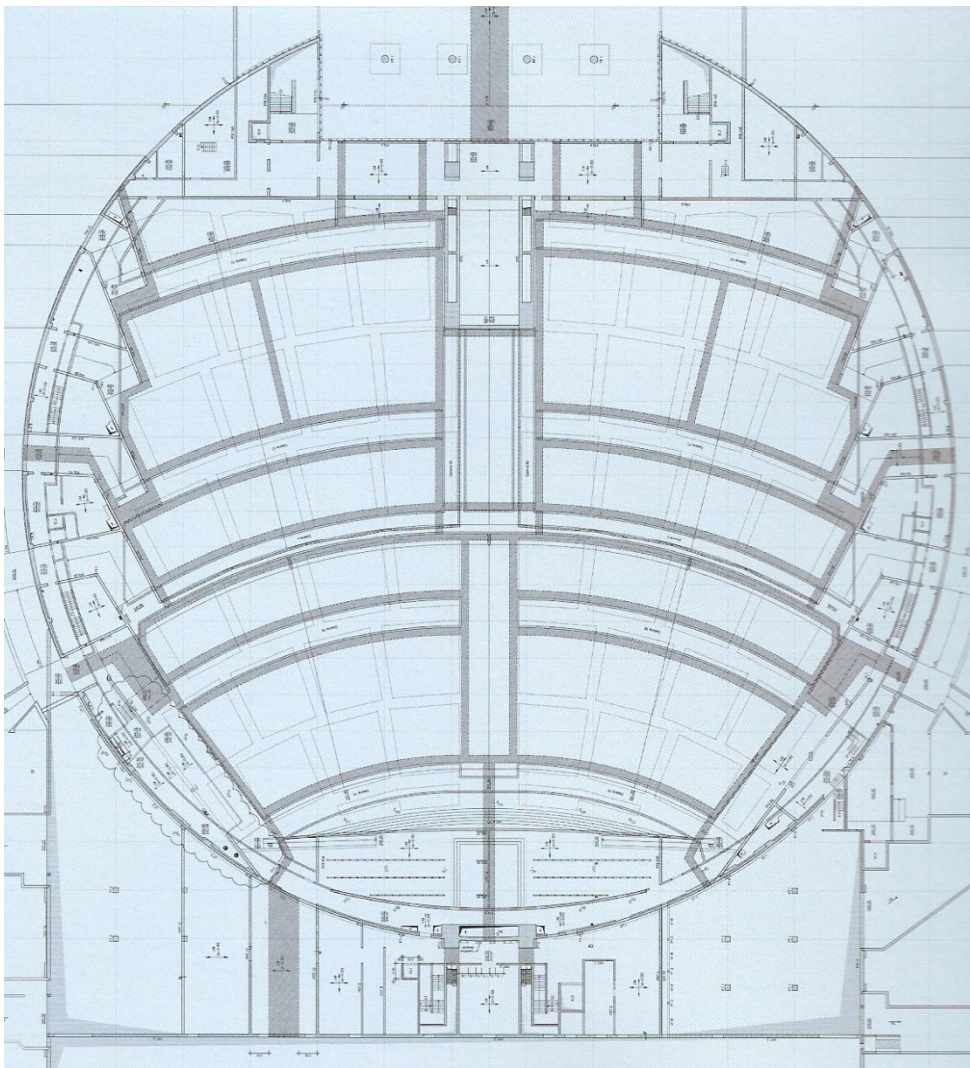


Figura 4.7. – Planta da Igreja Santíssima Trindade [34]

4.2.1.3. Materiais

Na fase de Fundações e Estruturas que decorreu entre 2004 e 2006 foram usados os seguintes materiais e quantidades:

- Área de construção: 40.000 m²;
- Volume de escavação: 245.000 m³;
- Comprimento total de estacas: 5.300 ml;
- Betão cinzento (C25/35): 45.000 m³;
- Betão branco (C35/45): 7.000 m³;
- Moldes para betão cinzento: 120.000 m²;
- Moldes para betão branco: 25.000 m²;
- Aços passivos (A400NR): 7.000 ton;
- Aços para pré-esforço (de baixa relaxação com $f_{puk} \geq 1860$ MPa): 150 ton;

- Aço para estrutura metálica: 950 ton;
- Contenções provisórias: 1.700 m².

Nos acabamentos, fase que decorreu entre 2006 e 2007, destacam-se os seguintes elementos:

- Utilização em todo o tecto de uma membrana elástica translúcida (Figura 4.8.) que esconde a estrutura da cobertura e permite a difusão uniforme da luz, para todo o interior. A luz pode ser natural fornecida pelas janelas na cobertura, voltadas a Norte ou artificial, regulável através de um sistema computadorizado;



Figura 4.8. – Pormenor da membrana translúcida que tapa a cobertura e permite entrada de luz [Foto do Autor]

- A parede do altar é decorada por um painel de 500 m² em ouro e terracota (Figura 4.9. e 4.10.), da autoria do padre jesuíta esloveno Marko Ivan Rupnik e com o título de “Chamamento Universal da Igreja”;
- Sob o altar está colocado numa caixa de prata, um fragmento marmóreo do túmulo de S. Pedro oferecido pelo Papa João Paulo II (Figura 4.11.);
- No centro do altar está um crucifixo de 7,5 m de bronze esculpido pela irlandesa Catherine Green (Figura 4.12.);
- No presbitério está também uma escultura de Nossa Senhora de Fátima com 3 m de altura em mármore branco do autor italiano Benedetto Pietrogande (Figura 4.13.).



Figura 4.9. – Painel de “ouro” e terracota na parede de trás do altar de Pe. Marko Ivan Rupnik. [Foto do Autor]



Figura 4.10. – Pormenor dos desenhos do painel do altar de Pe. Marko Ivan Rupnik. [Foto do Autor]

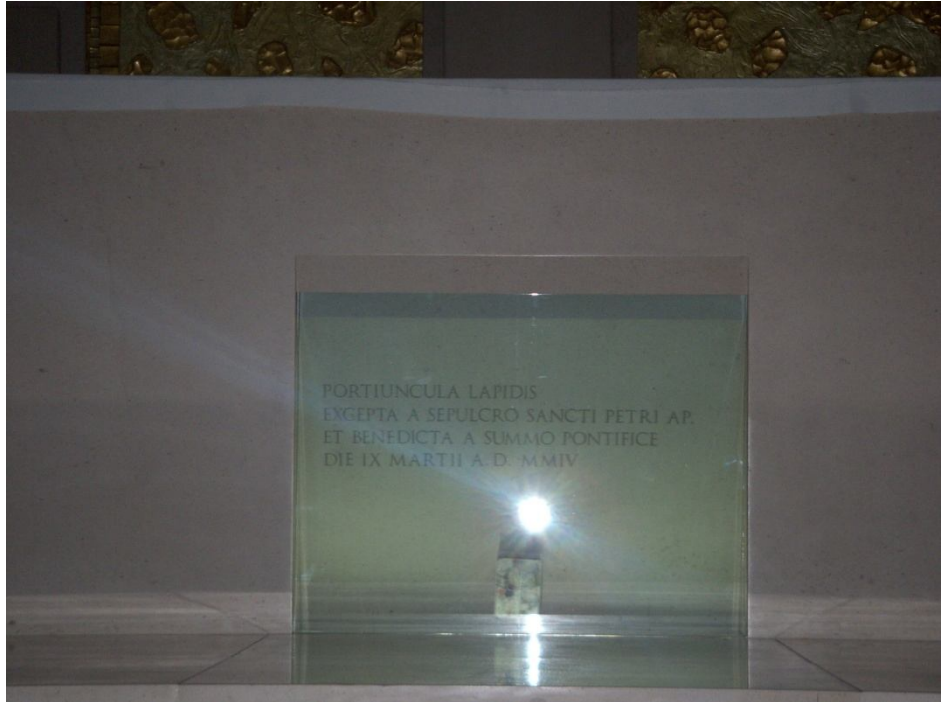


Figura 4.11. – Fragmento marmóreo do túmulo de S. Pedro [Foto do Autor]



Figura 4.12. – Escultura em bronze de Cristo crucificado de Catherine Green. [Foto do Autor]



Figura 4.13. – Escultura de Nossa Senhora de Fátima de Benedetto Pietrangeli. [Foto do Autor]

4.2.2. CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA IGREJA

4.2.2.1. Valores propostos para projecto

Como referido no capítulo 3, numa igreja o objectivo principal da Acústica é conseguir a percepção da palavra em todo o espaço, e tornar o ambiente musical tão bom quanto a inteligibilidade da palavra o permita.

Como tal foram previamente estabelecidos pelo dono-de-obra requisitos acústicos a cumprir em posterior fase de projecto. Esses requisitos foram também publicados no trabalho “*The New Megachurch for The Sanctuary of Fátima*” de António P. O. Carvalho e D. Freitas [1].

Relativamente ao Ruído de fundo o valor proposto tem em conta que a igreja é também um espaço de oração e meditação pessoal, pelo que o silêncio é vital.

Quanto ao tempo de reverberação adoptaram-se valores que reflectem a decisão do dono-de-obra de privilegiar a inteligibilidade da palavra sem descurar o conforto mínimo para a música.

Os limites impostos estão presentes no Quadro 4.1.

No que diz respeito ao parâmetro RASTI para avaliação da inteligibilidade, e para o sistema electroacústico foram exigidos os valores conforme o Quadro 4.2.

Foram também medidos (2002) os ruídos exteriores da envolvente do complexo no período nocturno e diurno para o posterior dimensionamento dos envidraçados conforme o Quadro 4.3.

Foram ainda previstos em fase final de projecto, para a igreja ocupada, os parâmetros *Tempo Central (TS)*, *Definição (D₅₀)*, *Clareza (C₈₀)* e *Intensidade Sonora* ou *Strength Factor (G)* conforme o Quadro 4.4.

Quadro 4.1. – Condições limite estabelecidas pelo Dono-de-Obra. [1]

Parâmetros	Objectivos de projecto	Condições limite aceitáveis
Igreja no modo de 9000 lugares		
TR(500-1000 Hz) 100% ocupada	≤ 1,6 s	≤ 2,0 s
TR(250 Hz) 100% ocupada	≤ 2,4 s	≤ 2,8 s
TR(500-1000 Hz) desocupada	≤ 2,1 s	≤ 2,6 s
TR(250 Hz) desocupada	≤ 2,8 s	≤ 3,4 s
NC	≤ 25 dB	≤ 30 dB *
Igreja no modo de 3000 lugares		
TR(500-1000 Hz) 100% ocupada	≤ 1,5 s	≤ 2,0 s
TR(250 Hz) 100% ocupada	≤ 2,4 s	≤ 2,7 s
TR(500-1000 Hz) desocupada	≤ 2,0 s	≤ 2,6 s
TR(250 Hz) desocupada	≤ 2,8 s	≤ 3,1 s
NC	≤ 20 dB	≤ 30 dB *

* em pelo menos 95% dos lugares

Quadro 4.2. – Condições limite estabelecidas pelo Dono-de-Obra para sistema electroacústico. [1]

Parâmetros	Objectivos de projecto	Condições limite aceitáveis
RASTI*	≥ 0,50	≥ 0,45**
ΔL (45-11.200 Hz) entre quaisquer dois lugares*	≤ 4 dB	≤ 6 dB
ΔL máximo em 1/3 oitava (141 - 5.620 Hz) entre quaisquer dois lugares *	≤ 6 dB	≤ 8 dB

* sistema de som ligado; ** em pelo menos 95% dos lugares

Quadro 4.3. – Medições do ruído exterior. [1]

Período de tempo	LA95 (dB)	LAeq (dB)	LA05 (dB)
Condições nocturnas :			
ruído de fundo "standard "da envolvente	37	40	44
durante celebrações na área de peregrinação*	69	80	83
Condições diurnas :			
ruído de fundo "standard "da envolvente	43	49	55
durante celebrações na área de peregrinação	72	77	84
com cantos/órgão na área de peregrinação	81	85	86
sinos da igreja	66	68	69

* apenas presente 6 vezes por ano

Quadro 4.4. – Valores previstos de alguns parâmetros acústicos (para igreja ocupada). [1]

Parâmetros	Gama de valores previstos
TS	100 a 120 ms
D ₅₀	0,5 a 0,6
C ₈₀	+1 a +4 dB
G	-5 a -10 dB

4.2.2.2. Soluções adoptadas

Numa igreja deste comprimento, forma e volumetria, e com os revestimentos escolhidos, nomeadamente o mármore no pavimento que é uma superfície muito reflectora, podia facilmente prever-se um desastre acústico. No entanto, foram adoptadas medidas para contrariar as características arquitectónicas muito desfavoráveis a um ambiente de conforto acústico.

Segue-se uma listagem desses pormenores de acabamentos no interior da igreja que têm funções acústicas e que visam atingir o conforto acústico desejado e exigido em projecto:

- As fileiras de bancos são em madeira e almofadadas, logo absorventes para as altas frequências (Figura 4.14.);
- A face interior das 12 portas de entrada têm um aglomerado de madeira perfurado que funciona com um sistema de ressoadores agrupados para actuar nas médias frequências (Figura 4.15.);
- As paredes de fundo do espaço dedicado ao coro, assim como a parede da retaguarda da assembleia foram tratadas com difusores acústicos (Figuras 4.16. e 4.17.);
- A parede do presbitério tem uma ligeira inclinação;
- As paredes laterais são revestidas de material “Akustaplan” (Figura 4.18.) [28] que é um material com coeficientes de absorção (α e α_w) elevados (Quadro 4.5) que permitem uma boa absorção do som pelas paredes;
- A todos estes elementos junta-se o sistema de reforço electroacústico instalado com altifalantes da marca “Bose”, amplificação “Crown”, processamento “BSS” e sistemas de microfones “AKG”. De realçar as duas colunas com cinco altifalantes suspensas ao centro do altar (Figura 4.12.), responsáveis pela difusão da palavra captada no altar. Do lado direito do altar existem 6 colunas e 4 de graves responsáveis pela amplificação do órgão e 6 *Wave Cannons* para extensão da linha de difusão do órgão (Figura 4.19.).



Figura 4.14. – Pormenor das cadeiras almofadadas. [Foto do Autor]

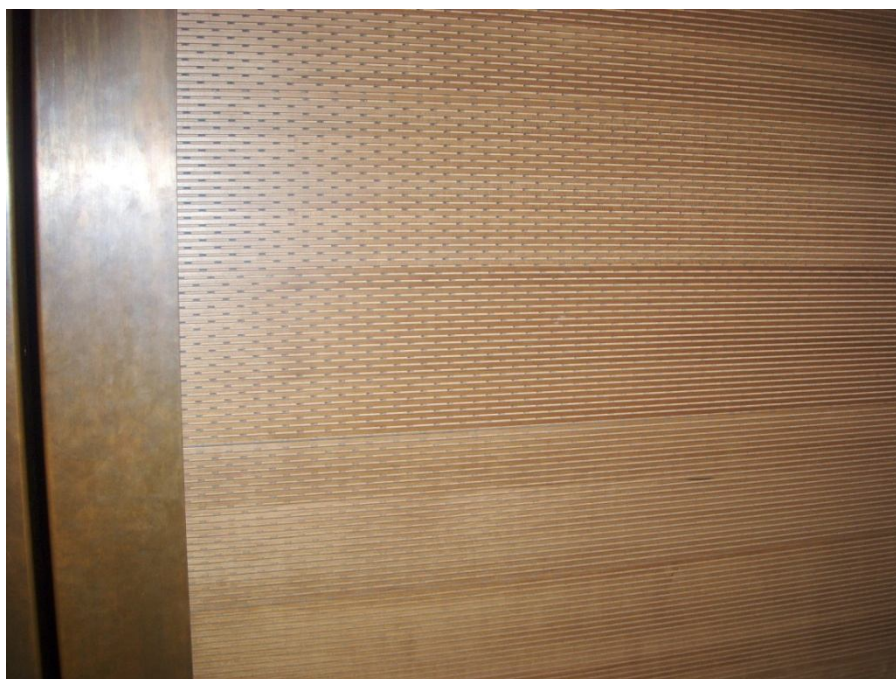


Figura 4.15. – Pormenor do painel perfurado de madeira das portas laterais [Foto do Autor]



Figura 4.16. – Parede da retaguarda do coro [Foto do Autor]

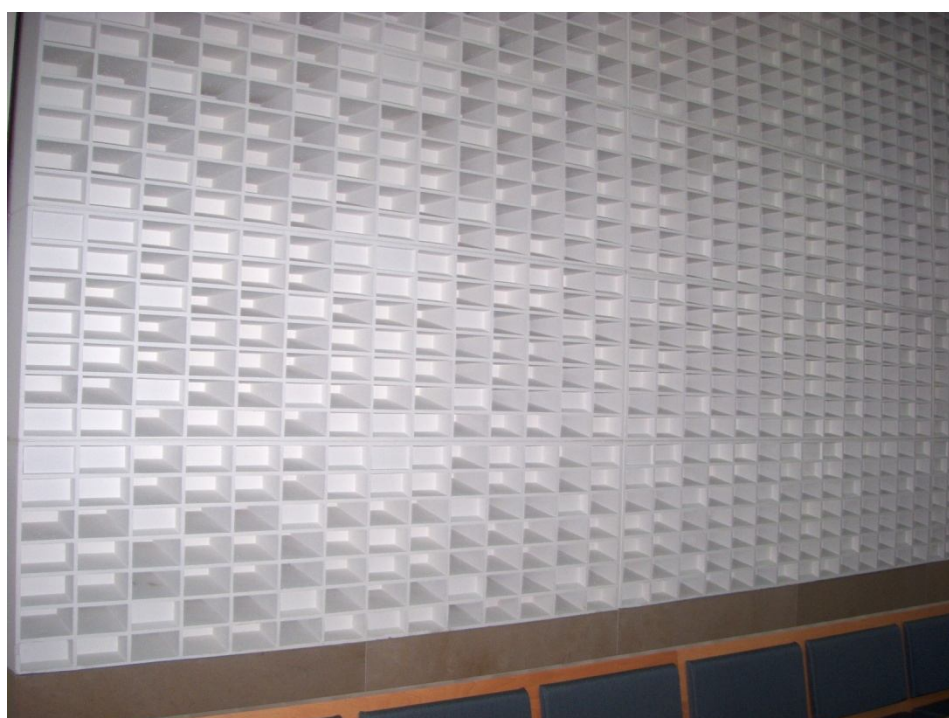


Figura 4.17. – Difusores Acústicos da parede de retaguarda da assembleia [Foto do Autor]



Figura 4.18. – Parede revestida com “Akustaplan” (parte branca). [Foto do Autor]

Quadro 4.5. Coeficientes de absorção médio (α_w) e por banda de frequência de 1 oitava do material de revestimento *Akustaplan* para as espessuras de 50, 100 e 400 mm. [35]

<i>Akustaplan</i>	α_w	f (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
V 50 mm	0,70	0,14	0,36	0,93	0,96	0,67	0,76
V 100 mm	0,75	0,38	0,76	0,85	0,68	0,72	0,73
V 400 mm	0,70	0,63	0,73	0,60	0,70	0,73	0,81



Figura 4.19. – Colunas responsáveis pela amplificação do órgão e *Wave Cannons*. [Foto do Autor]

No capítulo seguinte procede-se à caracterização dos ensaios acústicos efectuados na igreja no âmbito deste trabalho. O objectivo é verificar a eficácia dos sistemas adoptados retratados neste capítulo, comparando os valores dos parâmetros ensaiados *in situ* com os valores desejáveis retratados neste capítulo e obter assim uma caracterização acústica objectiva da Igreja da Santíssima Trindade.

5

ENSAIOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo abordam-se os ensaios acústicos realizados *in situ* à Igreja da Santíssima Trindade em Fátima no âmbito da realização deste trabalho.

Os ensaios foram realizados no dia 23 de Março de 2009 tendo início por volta das 12h30 e terminado às 18h30. Ensaiou-se a Igreja com a modalidade de 9000 lugares sentados e pretendia-se ensaiar com a igreja totalmente desocupada, o que nem sempre foi possível, visto tratar-se do horário de visitas. No entanto houve um esforço para evitar ao máximo a perturbação dos resultados, parando ou repetindo os ensaios sempre que o ruído provocado pelas pessoas era evidentemente prejudicial para os testes. O número máximo de pessoas em circulação dentro da igreja nunca foi superior a 30 pessoas, mas é importante realçar que o acesso estava aberto à circulação livre das pessoas que queriam visitar a igreja.

Foram ensaiados os seguintes parâmetros:

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

Devido ao grande tamanho da igreja, e sobretudo devido às propriedades de simetria da mesma, optou-se por ensaiar apenas em metade do espaço, sendo os valores obtidos para esta metade válidos para a outra também.

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

- Sonómetro *B&K* tipo 2260 (verif. no ENAC – Cert. de Cal. nº 12175-A de 07/05/2008 e Cert. De Cal. Filtros nº 12166-A de 30/04/2008);
- Calibrador *B&K* 4231 (verif. no ENAC – Cert. de Cal. nº 12166-A de 05/05/2008);
- Microfone de 13 mm, marca *Brüel & Kjaer*, modelo 4189;
- Fonte sonora, marca *Brüel & Kjaer* modelo 4224;
- Módulo estatístico, marca *Brüel & Kjaer*, modelo BZ7210;
- Módulo estatístico, marca *Brüel & Kjaer*, modelo BZ7204;
- Tripé de fixação portátil, marca *Brüel & Kjaer*, modelo UA0049;

- Analisador do RASTI, marca *Brüel & Kjaer*, modelo 3361, o qual consiste num emissor (modelo 4225) e um receptor (modelo 4419).

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

5.2. RUÍDO DE FUNDO

5.2.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

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

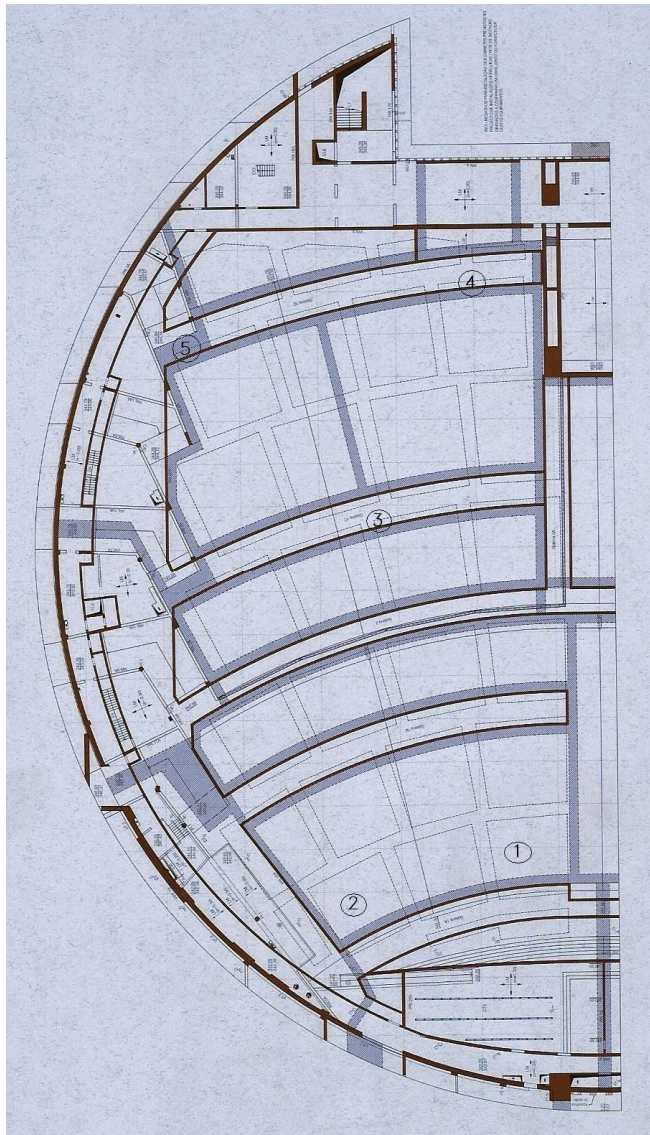


Figura 5.1.- Localização dos pontos ensaiados para a avaliação do NC. Planta retirada de [34].



Figura 5.2. – Registo dos níveis de pressão sonora do Ruído de Fundo. [Foto do Autor]

5.2.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio foi realizado com um sonómetro *Briuel & Kjaer 2260* (Figura 5.3.). Houve o cuidado de registar os valores com o menor número possível de pessoas em circulação e conversação.



Figura 5.3. – Sonómetro *B&K 2260*. [36]

Numa primeira situação registaram-se os valores de nível de pressão sonora (L) do ruído de fundo para os cinco pontos escolhidos sem funcionamento de qualquer dispositivo de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) em banda de 1/3 de oitava. De seguida, repetindo os mesmos pontos mediram-se os valores de L com o sistema de AVAC ligado.

Notou-se algum ruído anormal por parte de alguns dos ventiladores situados no piso (Figura 5.4.). Outro facto que pode ter interferido na realização da segunda fase do ensaio foi uma das portas de emergência não fechar de forma totalmente adequada, notando-se frinchas que facilitam a passagem de ruído do exterior para o interior da igreja (Figura 5.5.).

Os valores de L obtidos em bandas de 1/3 de oitava foram depois tratados e convertidos para banda de 1/1 oitava de modo a construir os espectros do Ruído de Fundo por banda de frequência para comparação com as curvas de incomodidade NC exigidas para o efeito.

Os resultados obtidos são apresentados no subcapítulo seguinte.



Figura 5.4. – Pormenor dos ventiladores no piso com ruído anormal [Foto do Autor]

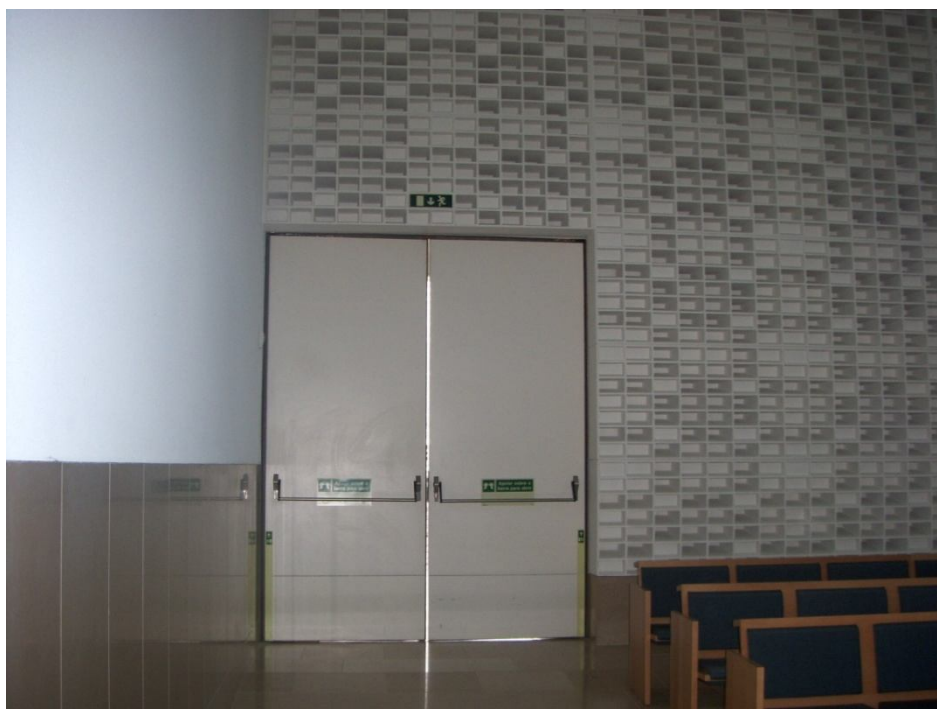


Figura 5.5. – Pormenor das frinchas numa porta de emergência [Foto do Autor]

5.2.3. RESULTADOS

Registaram-se os valores dos níveis de pressão sonora por bandas de frequência de 1/1 oitava) para as duas situações (sem AVAC e com AVAC) e para os cinco pontos escolhidos. Os resultados são os apresentados nos Quadros 5.1. e 5.2.

Quadro 5.1. – Valores médios dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo sem AVAC em funcionamento

Pontos	L (s/AVAC) (dB)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	34,2	23,6	17,0	16,9	19,6	17,3	15,4	13,4
2	33,9	23,4	16,8	16,7	19,3	17,2	15,3	13,3
3	33,6	23,4	17,1	16,9	19,0	17,1	15,4	8,7
4	28,5	23,8	18,3	18,1	18,0	17,1	13,8	12,5
5	28,4	23,8	17,8	18,0	17,9	12,9	8,9	7,5

Quadro 5.2. – Valores médios dos níveis de pressão sonora (L) do Ruído de Fundo com AVAC em funcionamento

Pontos	L (c/AVAC) (dB)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	50,4	42,6	39,8	33,8	29,2	30,5	26,8	24,7
2	50,3	42,9	39,4	33,0	28,8	29,2	25,1	22,4
3	50,9	44,4	39,7	33,8	30,0	29,9	25,3	18,6
4	51,1	45,1	42,1	36,9	32,8	34,4	29,5	20,2
5	51,1	45,3	42,2	36,1	32,6	34,0	29,1	19,0

5.3. RASTI

5.3.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

Seleccionaram-se oito pontos distintos para este ensaio (Figura 5.6.). Cinco situados no corredor central que divide a igreja em duas partes simétricas e situado em frente à posição do orador no altar. Os pontos deste corredor encontram-se distribuídos desde a primeira fila de cadeiras do público até à Porta Central situada no início do corredor central. Os restantes três pontos estão situados sensivelmente a meio da metade da igreja analisada. A lógica da localização destes pontos baseia-se na variação da inteligibilidade da palavra com a distância ao orador e direcionalidade da emissão, daí serem analisadas direcções diferentes e oito distâncias diferentes.

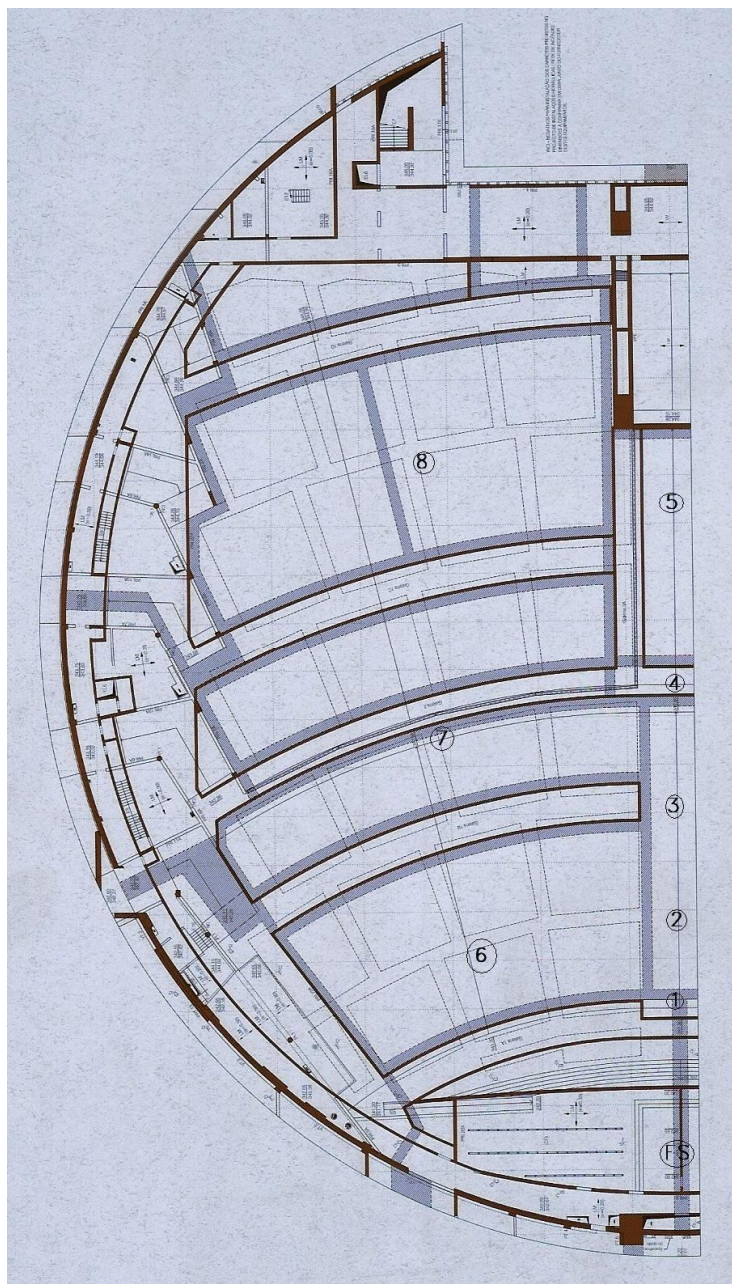


Figura 5.6. – Localização dos pontos ensaiados para avaliação do RASTI. [34]

5.3.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O método RASTI surgiu em 1971 por simplificação do método STI (descrito no capítulo 2), tornando a avaliação objectiva da inteligibilidade da palavra muito mais rápida. Os valores do RASTI podem ser relacionados com uma escala subjectiva de inteligibilidade da palavra (Quadro 5.3.), segundo a norma CEI 268-16 (CEI1988) [37].

Quadro 5.3. – Escala de RASTI [37]

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

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

O ensaio consiste na emissão de um sinal sonoro por parte da fonte sonora localizada no altar na posição de orador (Figura 5.7.), indo de encontro aos trabalhos anteriormente desenvolvidos [7], [8] e [28] e recepção com um microfone nas várias posições escolhidas (Figura 5.8.). Neste método analisam-se só duas bandas de frequência 500 e 2000 Hz daí a rapidez em relação ao método STI. O sinal sonoro emitido cobre as gamas de frequências utilizadas na palavra e origina as mesmas flutuações de intensidade sonora da fala. O equipamento receptor regista em cada posição a maneira como o sinal é modificado desde que parte da fonte sonora até chegar ao microfone receptor. O valor do RASTI é calculado automaticamente pelo aparelho com base em nove frequências de modulação.

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

Numa primeira fase o nível de emissão sonora foi o de referência com um acréscimo de 10 dB e na segunda fase de medição, ligou-se o sistema de som instalado (Figura 5.9.) na igreja e usou-se o nível de emissão de referência.

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



Figura 5.7. – Posição do transmissor do sinal sonoro ao nível do orador para avaliação do RASTI. [Foto do Autor]



Figura 5.8. – Recepção do sinal sonoro para avaliação do RASTI. [Foto do Autor]



Figura 5.9. – 2ª fase do ensaio de RASTI com sistema de som ligado [Foto do Autor]

5.3.3. RESULTADOS

Registaram-se os valores para os oito pontos escolhidos para as duas fases de ensaio. Para cada ponto o RASTI foi calculado pela média aritmética das leituras obtidas no aparelho receptor. O índice *RASTI médio sala* corresponde à média aritmética do RASTI para todos os pontos.

Os resultados obtidos para a primeira fase estão no Quadro 5.4.

Para a segunda fase de ensaios, com o sistema de som ligado, obtiveram-se os resultados conforme o Quadro 5.5.

Quadro 5.4. – RASTI (1ª fase) – sistema de som desligado

Pontos	RASTI (1ª fase)					RASTI médio
	Medições					
	1	2	3	4	5	
1	0,66	0,65	0,66	0,67	0,65	0,66
2	0,63	0,61	0,62	0,60	0,59	0,61
3	0,57	0,56	0,56	0,56		0,56
4	0,54	0,50	0,53	0,53		0,53
5	0,52	0,55	0,51	0,53		0,53
6	0,58	0,60	0,58	0,58		0,59
7	0,55	0,57	0,56	0,56		0,56
8	0,52	0,50	0,51	0,50		0,51
	RASTI médio sala					0,57

Quadro 5.5. – RASTI (2ª fase) – sistema de som ligado

Pontos	RASTI (2ª fase)					RASTI médio
	Medições					
	1	2	3	4	5	
1	0,65	0,66	0,65	0,65	0,64	0,65
2	0,64	0,61	0,62	0,64	0,61	0,62
3	0,69	0,69	0,66	0,68		0,68
4	0,69	0,72	0,70	0,69		0,70
5	0,72	0,72	0,73	0,74		0,73
6	0,63	0,64	0,64	0,65		0,64
7	0,68	0,71	0,70	0,73		0,71
8	0,67	0,68	0,65	0,64	65	0,66
RASTI médio sala						0,67

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

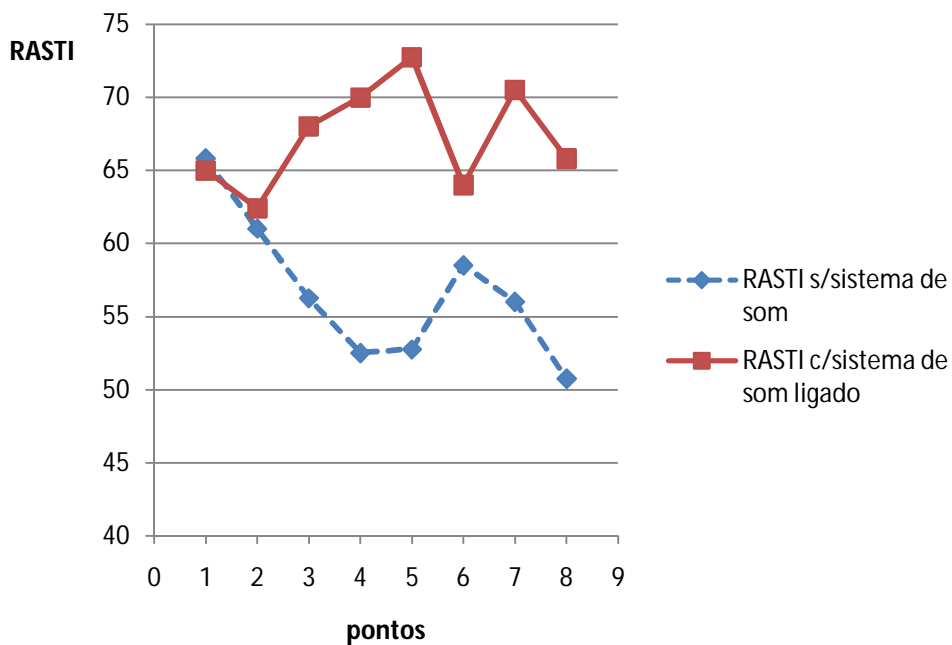


Figura 5.10. – Representação gráfica dos resultados médios obtidos nos ensaios RASTI

5.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

5.4.1. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS A ENSAIAR

Para a selecção dos pontos para este ensaio houve a limitação do comprimento do cabo de ligação entre a fonte sonora e o equipamento de recepção. A fonte estava a cerca de 0,5 m da escada de acesso ao altar (Figura 5.11.) e só havia 50 m de cabo disponível. Optou-se por utilizar os três primeiros pontos já utilizados para avaliar o RASTI e medir mais um ponto no corredor central, o ponto 4 que corresponde ao alcance máximo do cabo. A partir desse ponto rodou-se o cabo mantendo-o esticado sempre que necessário de forma a abranger a maior área possível da zona de lugares sentados e marcaram-se mais cinco pontos (Figura 5.12.).



Figura 5.11. – Fonte sonora situada a cerca de 0,5 m das escadas, para ensaios de Tempo de Reverberação.

[Foto do Autor]

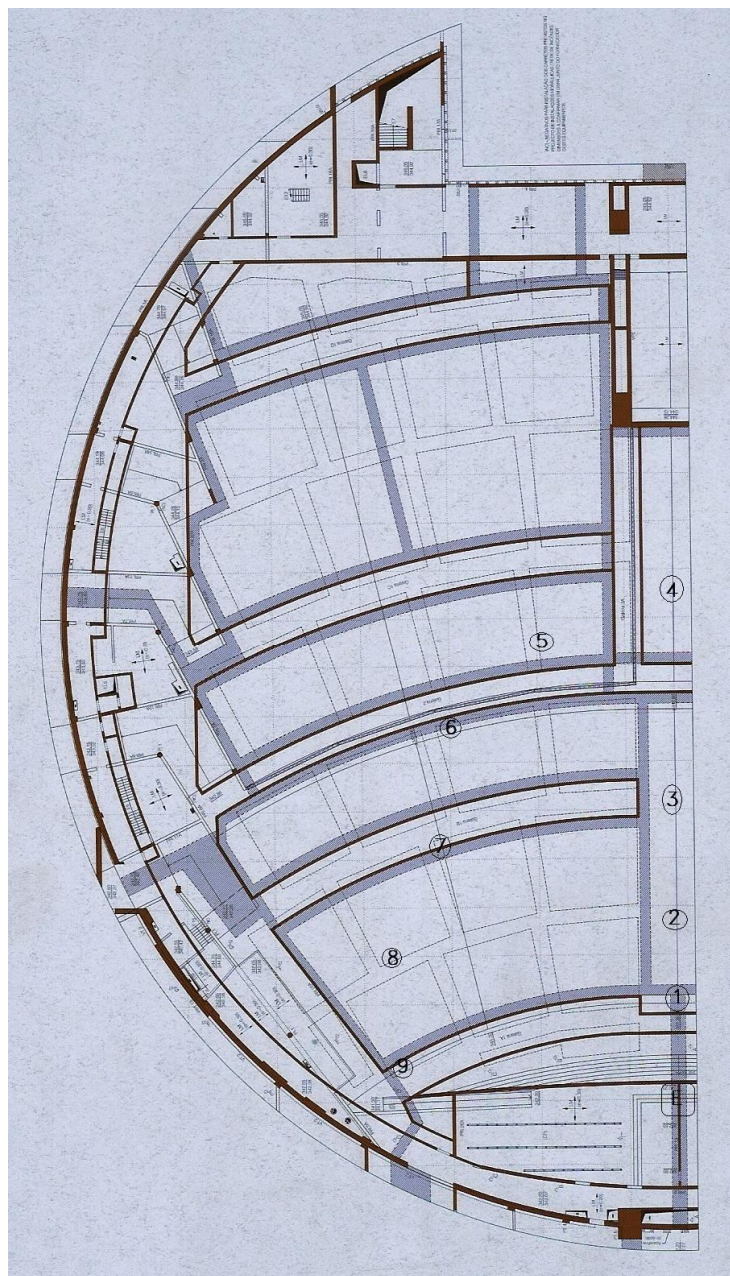


Figura 5.12. – Localização dos nove pontos a ensaiar e fonte emissora (E) para o TR. [34]

5.4.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Para medir o tempo de reverberação da sala usou-se uma fonte sonora que emitiu um ruído de teste que varria todo o espectro frequencial de interesse de forma a assegurar que o decaimento se sobrepunha sempre ao ruído de fundo. Os decaimentos que foram registados foram os de 30 dB, os de 20 dB e o EDT que corresponde ao decaimento de 10 dB. Embora a máquina registre através destes métodos, de decaimento mais curto que os 60 dB teóricos, o valor que é fornecido no sonómetro é o valor extrapolado para os 60 dB.

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

5.4.3. RESULTADOS

Para cada um dos pontos ensaiados foram registados os valores de TR por bandas de frequência de uma oitava dos 125 aos 4.000 Hz. Foi ainda calculado o valor TR(500-1000 Hz) para cada ponto porque é este valor, média entre TR(500Hz) e TR(1000Hz) para comparação com os valores de projecto.

Os resultados estão no Quadro 5.6. e na Figura 5.13.

Quadro 5.6. – Valores medidos do Tempo de Reverberação (s)

TR (s)	f(Hz)						TR(500-1000Hz)
Pontos	125	250	500	1000	2000	4000	
1	1,96	1,81	1,70	1,84	2,24	2,22	1,77
2	2,40	1,72	1,65	1,83	2,34	2,24	1,74
3	2,54	2,06	1,93	2,11	2,54	2,32	2,02
4	1,97	2,02	2,05	2,17	2,48	3,08	2,11
5	2,07	1,91	2,01	2,22	2,89	4,20	2,12
6	2,47	2,34	2,47	2,46	2,97	2,52	2,47
7	2,35	2,25	2,45	2,43	2,89	2,49	2,44
8	2,07	2,43	2,33	2,25	2,38	2,49	2,29
9	2,00	1,69	1,85	2,02	2,96	2,39	1,94
TRmédio	2,20	2,03	2,05	2,15	2,63	2,66	2,10

No gráfico da Figura 5.14. apresenta-se os valores mínimos e máximos de TR por banda de frequência em comparação com o TRmédio.

Fez-se ainda a comparação (Figura 5.15.) entre o TRmédio e os pontos com TR(500-1000Hz) mais alto e mais baixo, ou seja, ponto 6 e ponto 1 respectivamente.

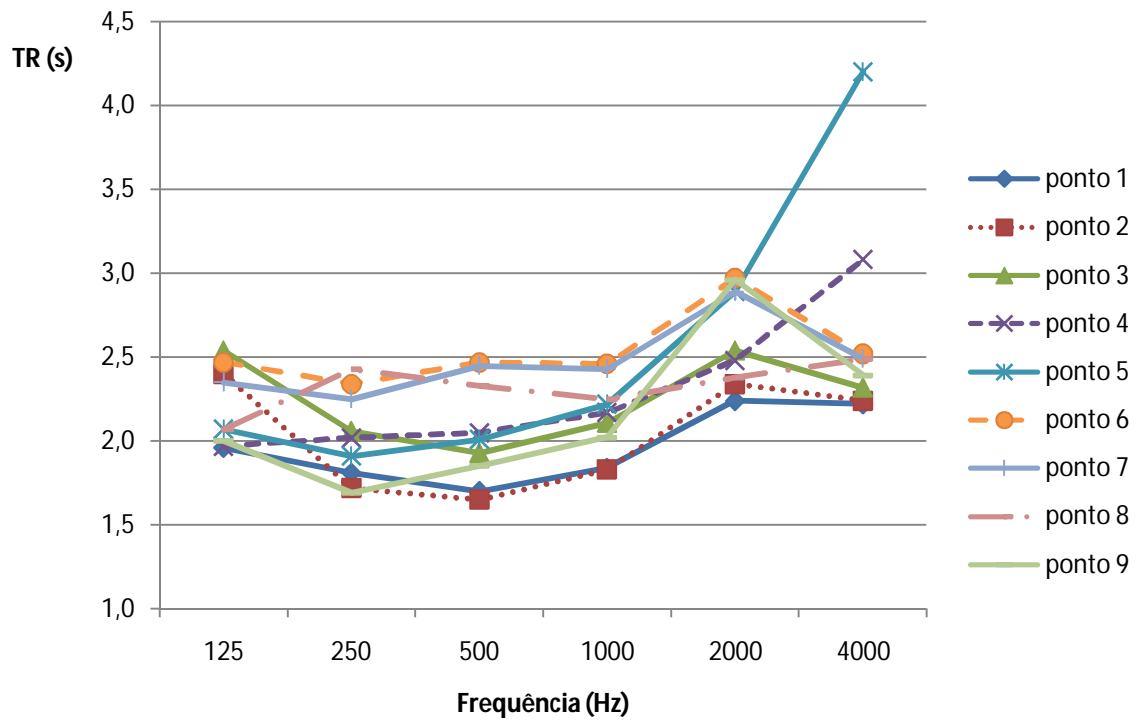


Figura 5.13. – Valores de TR por banda de frequência para os 9 pontos testados.

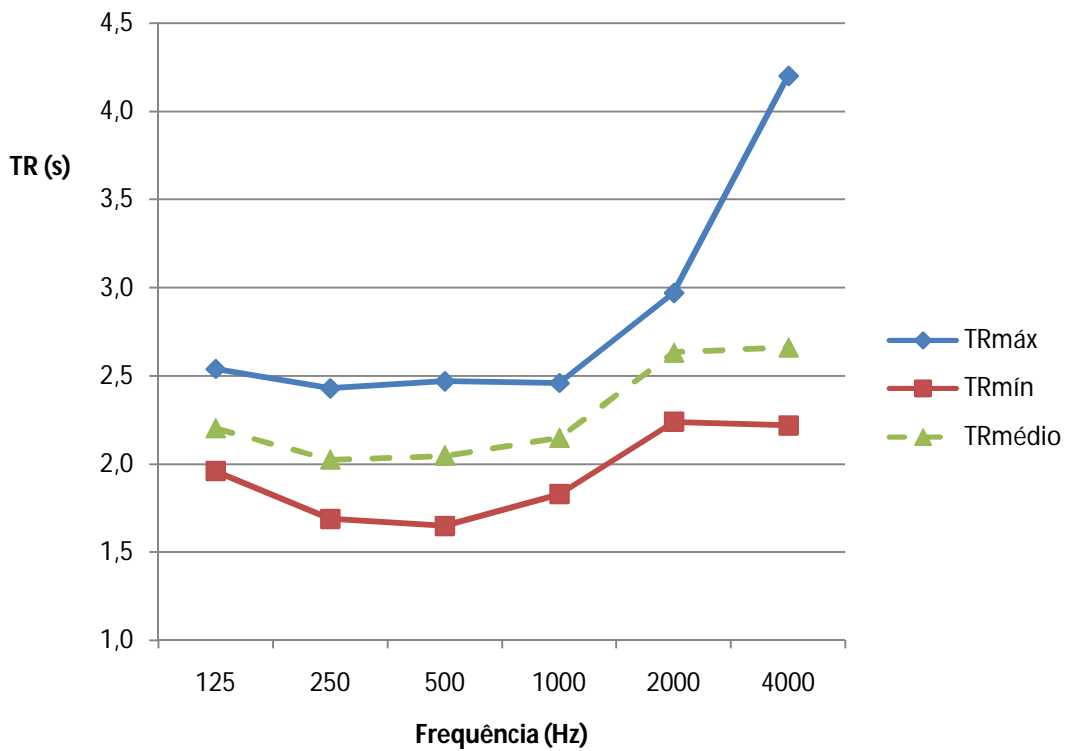


Figura 5.14. – Valores dos TRmin, TRmax e TRmédio por banda de frequência.

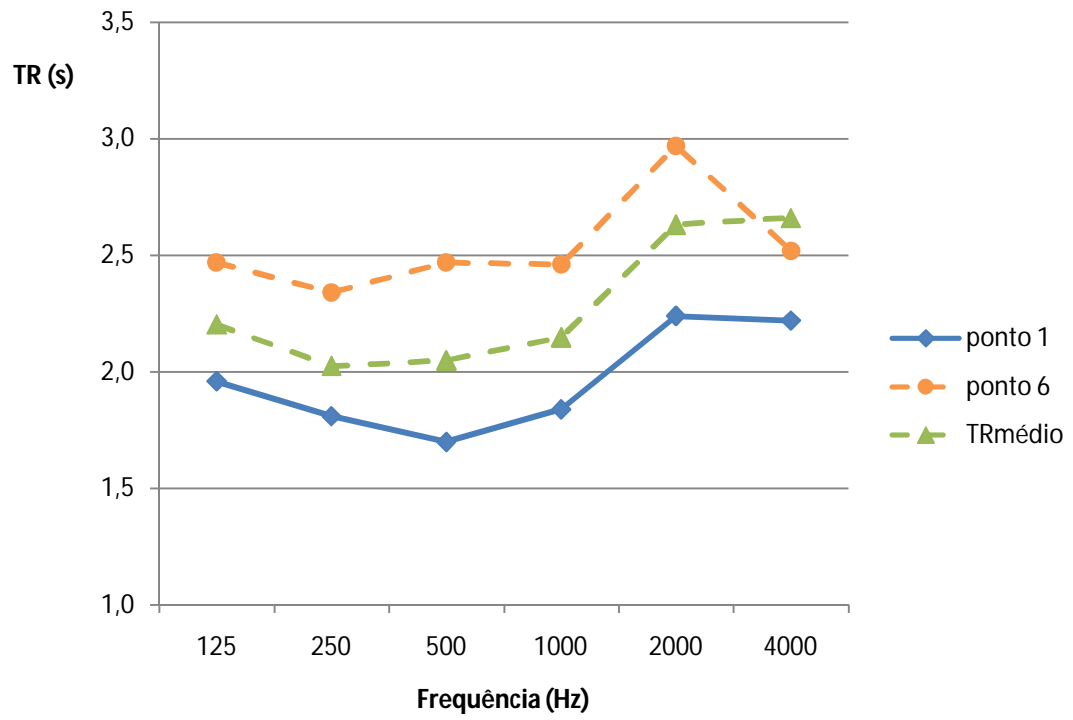


Figura 5.15. – Comparação do TRmédio com valores do TR dos pontos 1 e 6.

6

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS E COMPARAÇÃO COM OS VALORES ESTABELECIDOS EM PROJECTO

6.1.1. RUÍDO DE FUNDO

Foi decidido pelo dono-de-obra que os níveis de pressão sonora dentro da Igreja da Santíssima Trindade devido ao Ruído de Fundo não deveriam ultrapassar, para o modo de 9000 lugares sentados, os valores das curvas de incomodidade “*Noise Criterion*”, NC25, com a tolerância até à NC30 como valores limites aceitáveis a cumprir em pelo menos 95% dos lugares sentados.

No Quadro 6.1. estão representados os valores dos níveis de pressão sonora (L(dB)) com e sem AVAC, os níveis sonoros (L_A (dB)) que são exactamente os valores de L(dB) corrigidos com o filtro A para o ouvido humano, também com e sem AVAC em funcionamento. Estão ainda neste quadro as diferenças entre o nível de pressão sonora com e sem AVAC ($\Delta L = L_{c/AVAC} - L_{s/AVAC}$) e as diferenças entre os níveis sonoros com e sem AVAC ($\Delta L_A = L_{A\ c/AVAC} - L_{A\ s/AVAC}$). Estas diferenças correspondem aos aumentos no Ruído de Fundo devido ao uso dos dispositivos de AVAC da igreja.

Na Figura 6.1. estão dispostos sob a forma de gráfico as diferenças de nível de pressão sonora (ΔL) por banda de frequência, efectuadas a partir dos Quadros 5.1. e 5.2.

Quadro 6.1. – Valores dos níveis de pressão sonora equivalente (L e L_A) obtidos nos ensaios para cada ponto e variação entre os valores com e sem AVAC (ΔL e ΔL_A).

Ponto	L (dB)		L_A (dB)		ΔL (dB)	ΔL_A (dB)
	c/AVAC	s/AVAC	c/AVAC	s/AVAC		
1	51,5	35,0	38,3	24,2	16,5	14,1
2	51,4	34,7	37,3	24,0	16,7	13,3
3	52,2	34,4	38,0	23,8	17,8	14,2
4	52,7	30,9	41,0	23,5	21,8	17,5
5	52,8	30,6	40,6	21,7	22,2	18,9
média	52,1	33,1	39,0	23,4	19,0	15,6

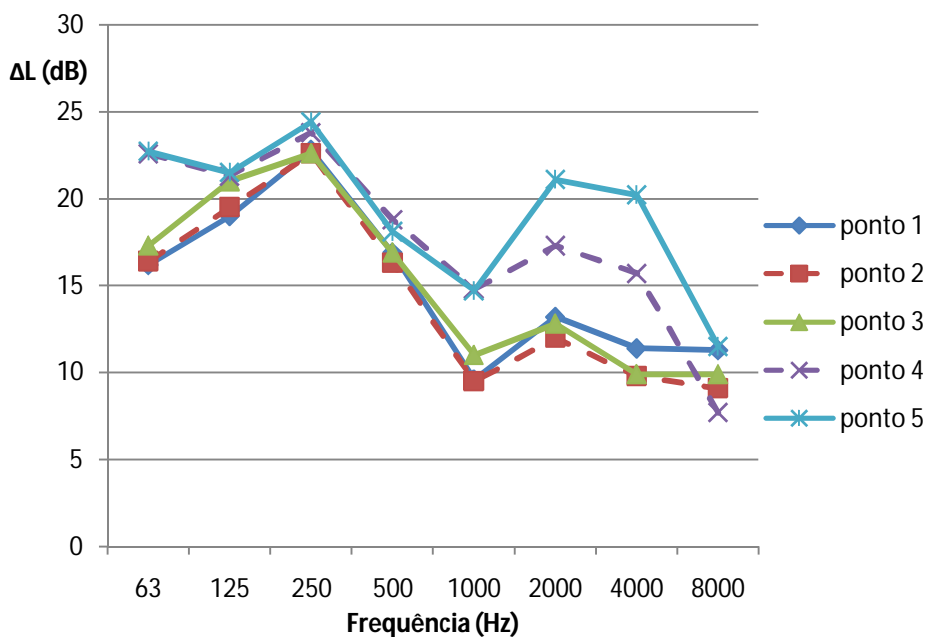


Figura 6.1. – Valores de ΔL por banda de frequência.

Da análise do Quadro 6.1. conclui-se que o RF proveniente dos dispositivos de AVAC fez aumentar o nível sonoro (L_A) entre 13 e 19 dB(A) e o nível de pressão sonora (L) entre 17 e 22 dB.

A partir da Figura 6.1. é possível verificar que a pior frequência é a dos 250 Hz, que atinge acréscimos de 22,2 dB (ponto 5) no nível de pressão sonora com o funcionamento dos dispositivos de AVAC.

Nas Figuras 6.2. a 6.7. segue-se a comparação dos níveis de pressão sonora por banda de 1/1 oitava com as curvas de incomodidade NC25 e NC30.

A partir do valor de L (dB) por banda de frequência, com o auxílio de um *software online* [5] calculou-se o NC para cada ponto testado na igreja. Os resultados obtidos estão presentes no Quadro 6.2.

Quadro 6.2. Valores de NC obtidos para cada ponto ensaiado [5]

Ponto	NC c/AVAC	NC s/AVAC	ΔNC
1	32	18	14
2	30	17	13
3	31	18	13
4	35	17	18
5	35	16	19
ΔNC (espacial)	5	2	6
Média	33	17	15

Todos os pontos têm NC c/AVAC acima dos 30 dB que era o limite aceitável para a igreja. Os valores de NC s/AVAC são muito mais baixos que os NC c/AVAC, o que demonstra que não há outra fonte de ruído significativa no interior da igreja, que não seja a dos dispositivos de AVAC.

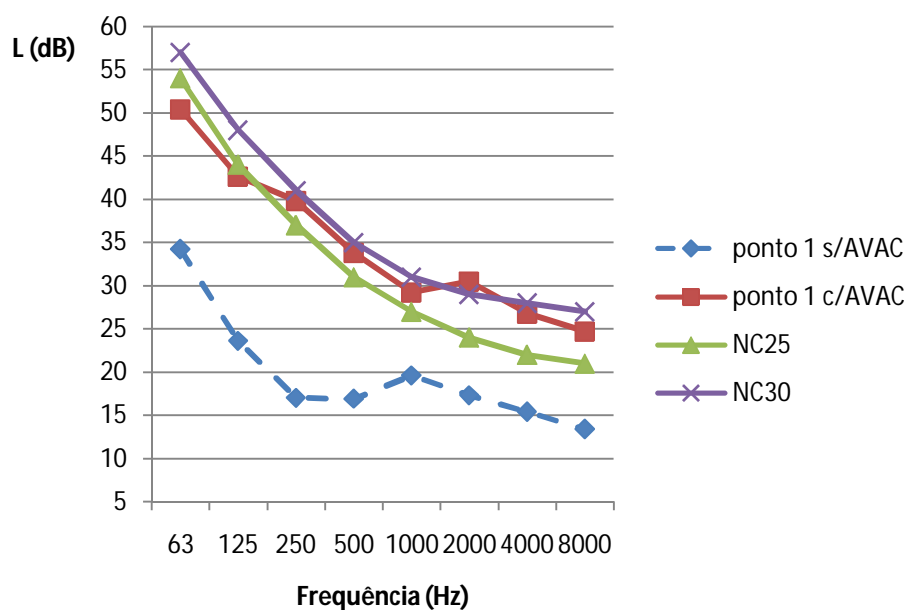


Figura 6.2. – Comparação dos valores de L no ponto 1 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.

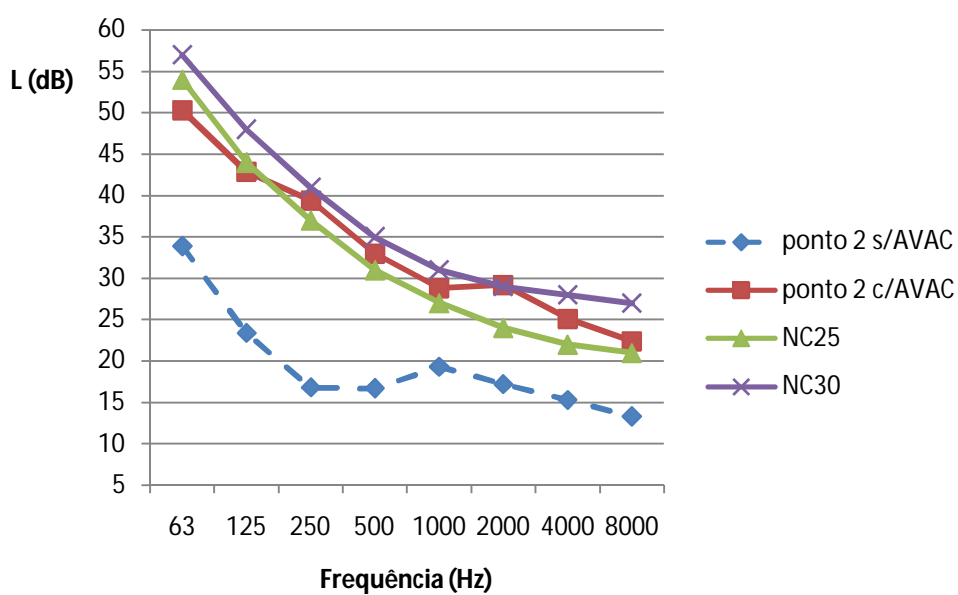


Figura 6.3. – Comparação dos valores de L no ponto 2 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.

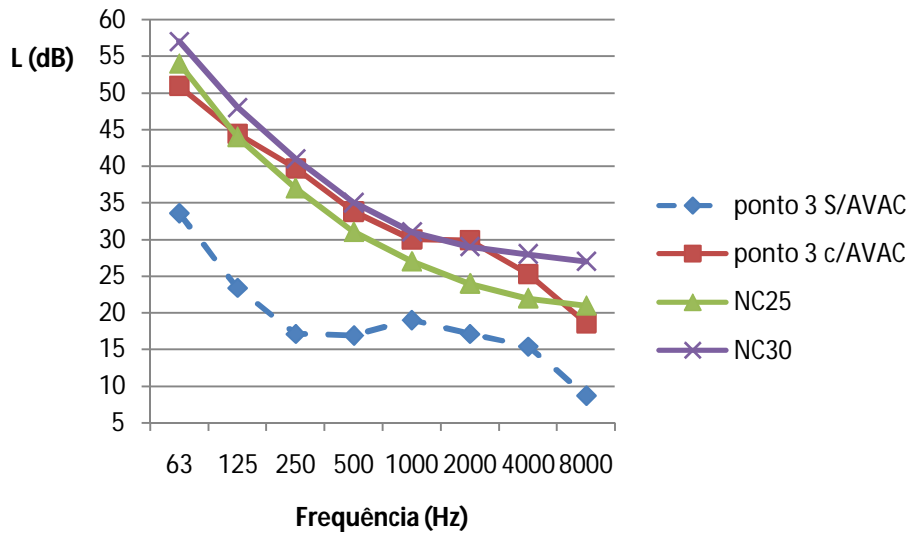


Figura 6.4. – Comparação dos valores de L no ponto 3 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.

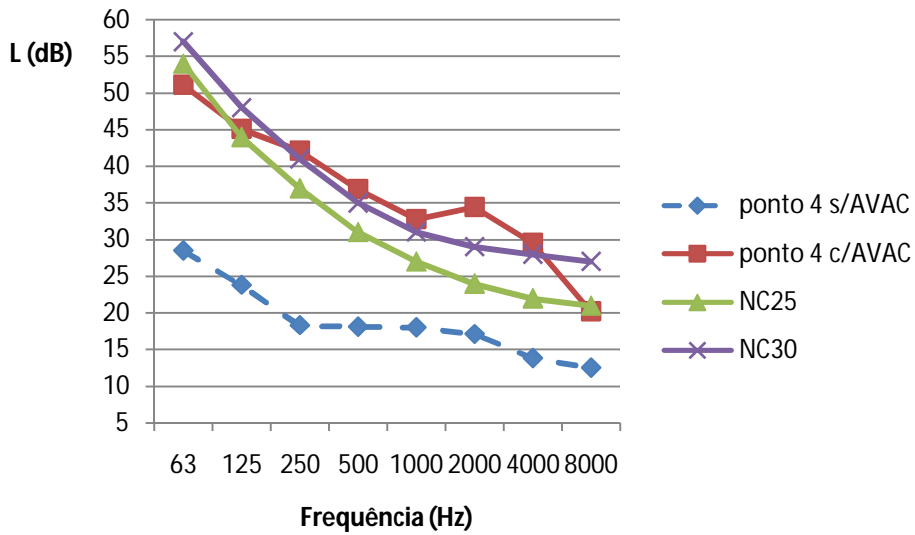


Figura 6.5. – Comparação dos valores de L no ponto 4 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.

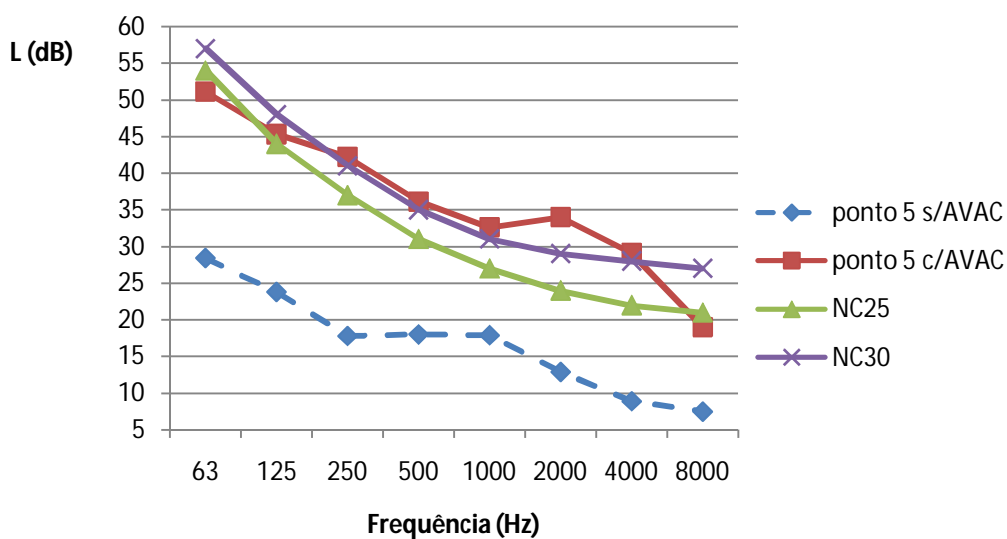


Figura 6.6. – Comparação dos valores de L no ponto 5 (com e sem AVAC) com as curvas NC25 e NC30.

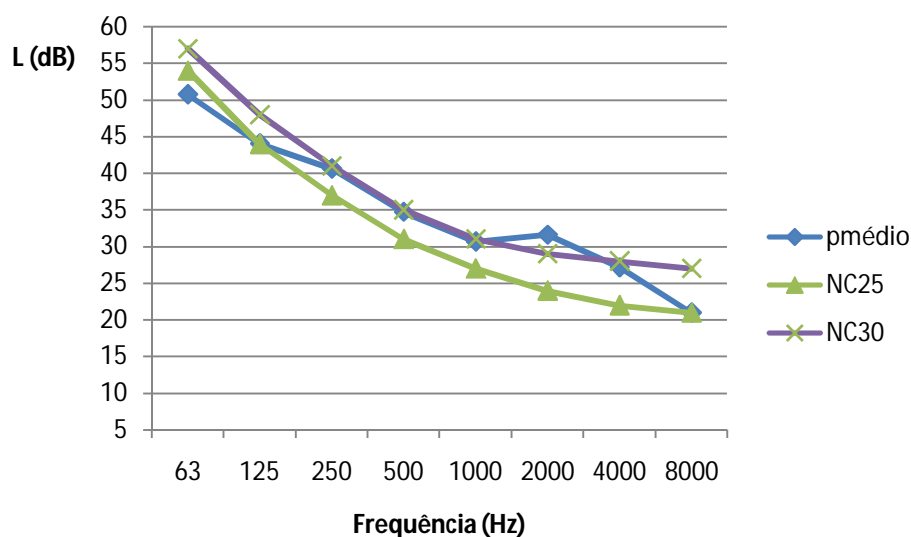


Figura 6.7. – Comparação dos valores de Lmédio com as curvas NC25 e NC30.

Da análise das Figuras 6.2. a 6.7. tiram-se as seguintes conclusões:

- L (s/AVAC) foi sempre inferior em todos os pontos a NC25;
- L (c/AVAC) excedeu em todos os pontos NC30;
- A média de todos os pontos (Lmédio) excede NC30.

Todos os pontos excederam a curva NC30 na banda de frequência dos 2.000 Hz, sendo então esta banda a que caracteriza os valores de NC obtidos. Esta é a frequência mais condicionante e prejudicial para a avaliação do NC e deve por isso ser tratada.

Conclui-se pelos resultados atrás apresentados que os limites exigidos pelo dono-de-obra não são cumpridos para este parâmetro de avaliação (Quadro 4.1.). No entanto, para baixar estes valores e talvez já para os limites exigidos pelo dono-de-obra, a reparação dos ventiladores (Figura 5.4.) é desejável.

6.1.2. RASTI

Garantir a inteligibilidade da palavra foi uma preocupação em projecto. Como tal foi proposto como objectivo, que o RASTI com o funcionamento do sistema de reforço electroacústico fosse superior a 0,50 e como limite aceitável inferior 0,45 em pelo menos 95% dos lugares (Quadro 4.2.).

Na Figura 6.8. dá-se a comparação gráfica entre os valores obtidos nos ensaios e os valores exigidos para projecto.

Na Figura 6.9. representa-se graficamente a diferença entre os valores de RASTI com sistema de som ligado e RASTI sem sistema de som ($\Delta RASTI = RASTI\ c/sistema\ de\ som\ ligado - RASTI\ s/sistema\ de\ som$).

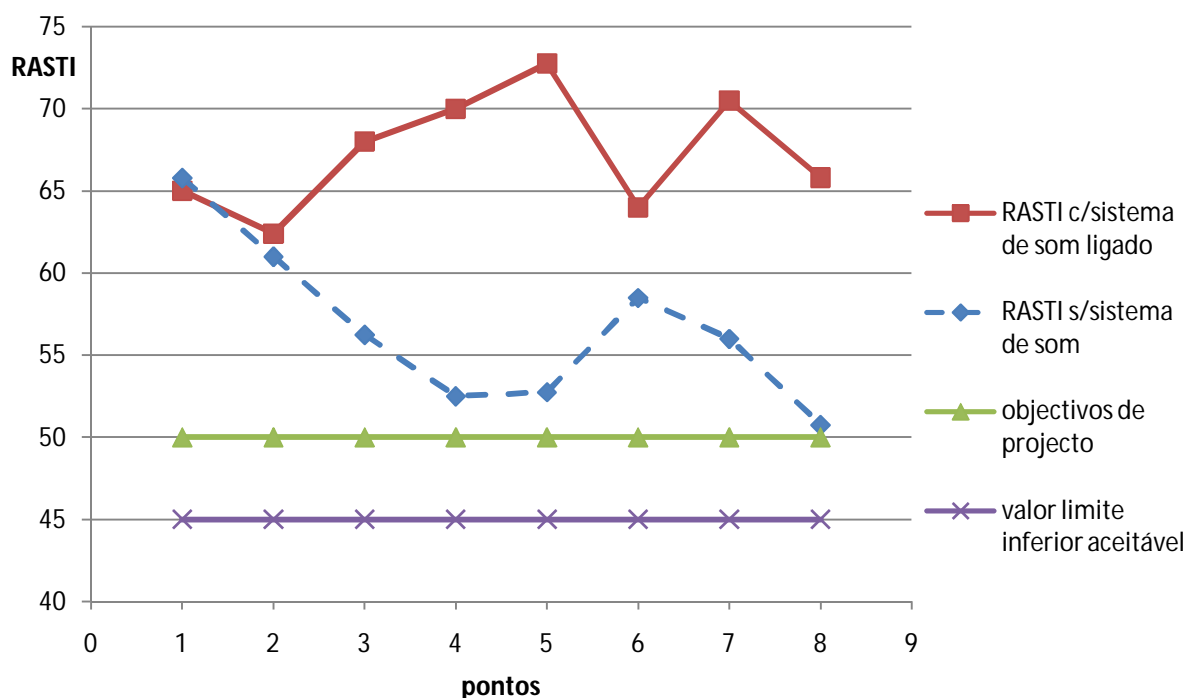


Figura 6.8. – Comparação de RASTI com os valores objectivo e limite aceitável impostos para projecto.

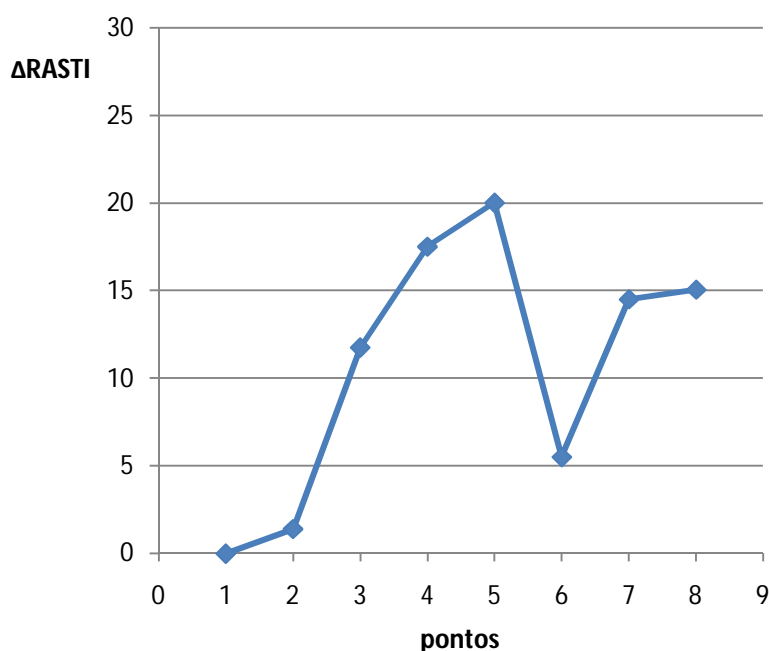


Figura 6.9. – Valores de Δ RASTI para compreensão dos efeitos do sistema de som.

A partir da Figura 6.8. verifica-se que o RASTI cumpre com o estabelecido em projecto em todos os pontos analisados (com e sem o funcionamento do sistema de som amplificado).

Da Figura 6.9. pode-se verificar que o sistema de reforço electroacústico introduz melhorias do RASTI em todos os pontos excepto no ponto 1.

Como foi explicado no subcapítulo 2.2.10., a inteligibilidade da palavra diminui com o aumento da distância ao orador. Pelo que a curva azul (tracejada) da Figura 6.8., que corresponde aos valores de RASTI sem funcionamento do sistema de som, decresce com a distância ao orador nos pontos 1, 2, 3, 4 e nos pontos 6, 7, 8 como era de prever. O aumento do ponto 5 para o 6 deve-se à maior proximidade do ponto 6 em relação ao emissor.

Por sua vez, a curva da Figura 6.9. demonstra a correcta instalação do sistema de reforço electroacústico na Igreja. Em zonas muito próximas do orador (pontos 1 e 2) a diferença do RASTI obtido entre as duas fases do ensaio é pequena. No entanto à medida que os pontos se vão afastando do emissor, em vez de uma diminuição do RASTI como na primeira fase verifica-se um aumento (pontos 2, 3, 4 e 5 e pontos 6, 7). O decréscimo do ponto 5 para o ponto 6 e do 7 para o 8 justifica-se com a mudança de direcção de análise do RASTI.

Estes resultados demonstram que o sistema de som está a funcionar correctamente, pois está direccionado para a audiência, pendurado sobre o altar (Figura 6.10.) e junto aos tubos do órgão, aumentando significativamente os valores de RASTI para os pontos mais afastados e logo mais problemáticos, relativamente ao ensaio sem uso do sistema de som disponível.

Nas Figuras 6.11. e 6.12. estão representadas as linhas de ISORASTI para as duas situações ensaiadas, com e sem o sistema de som ligado. Estas linhas pretendem unir os pontos da sala com os mesmos valores de RASTI, ou seja, os pontos na sala em que a percepção da palavra é supostamente idêntica.



Figura 6.10. – Altifalantes pendurados sobre o altar [Foto do Autor]

Quadro 6.3. – RASTI dos ensaios vs RASTI requeridos no projecto

	Valores nos pontos	Valor médio	Objectivos do projecto	Valor limite aceitável	Verificação
RASTI c/sistema de som	0,62 a 0,73	0,67	≥0,50	≥0,45	ok

Calculou-se a média do RASTI da sala para as duas fases do ensaio para comparação com os valores de projecto no Quadro 6.3.

Verifica-se então o cumprimento dos valores exigidos em projecto para o RASTI.

Relacionando os valores obtidos com a escala subjectiva de inteligibilidade da palavra normalizada (Quadro 5.3.) verifica-se que ficam no intervalo 0,60 a 0,75 que corresponde a uma *Boa* Inteligibilidade da Palavra.

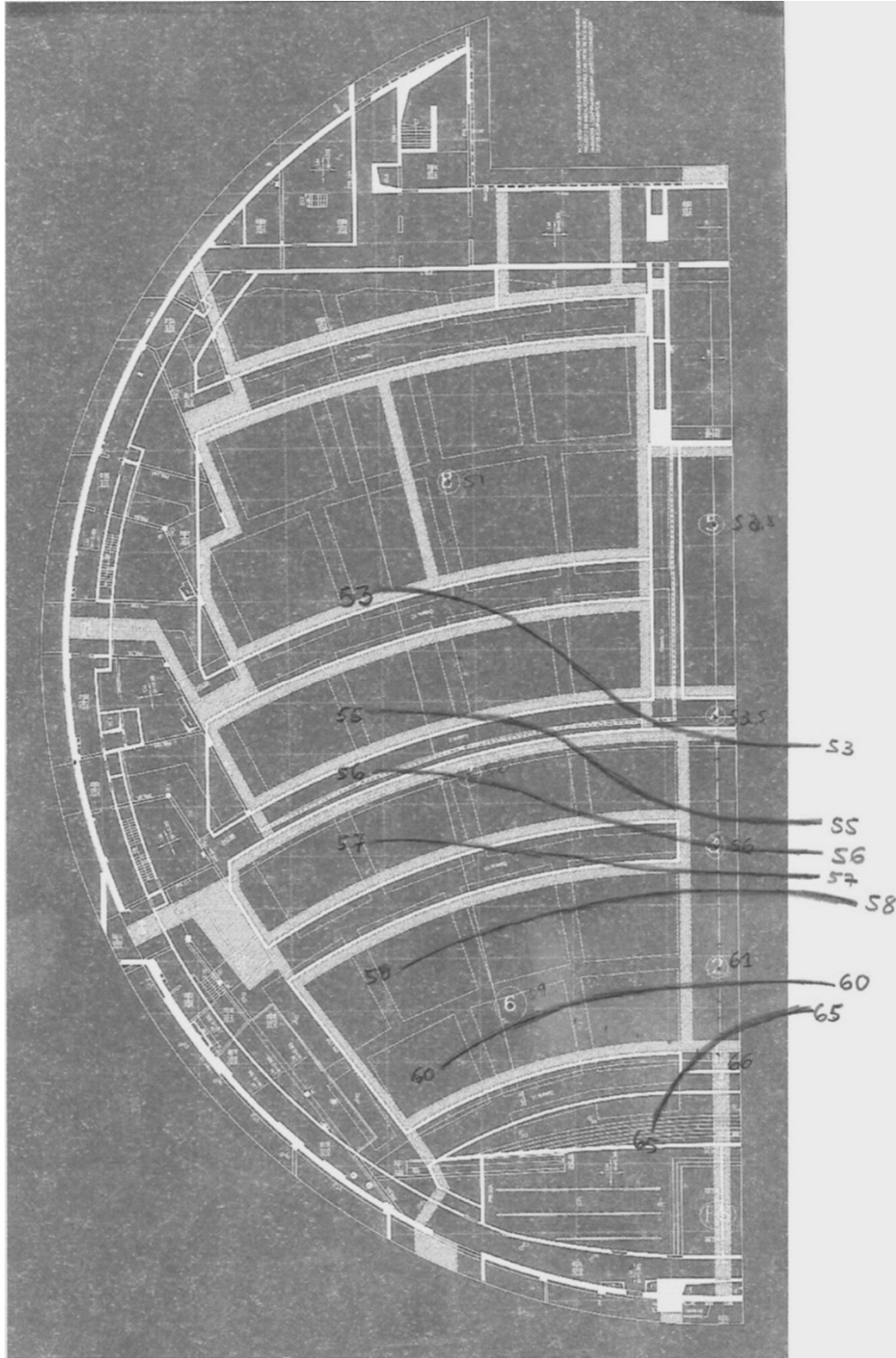


Figura 6.11. – Linhas de ISORASTI sem sistema de som em funcionamento.

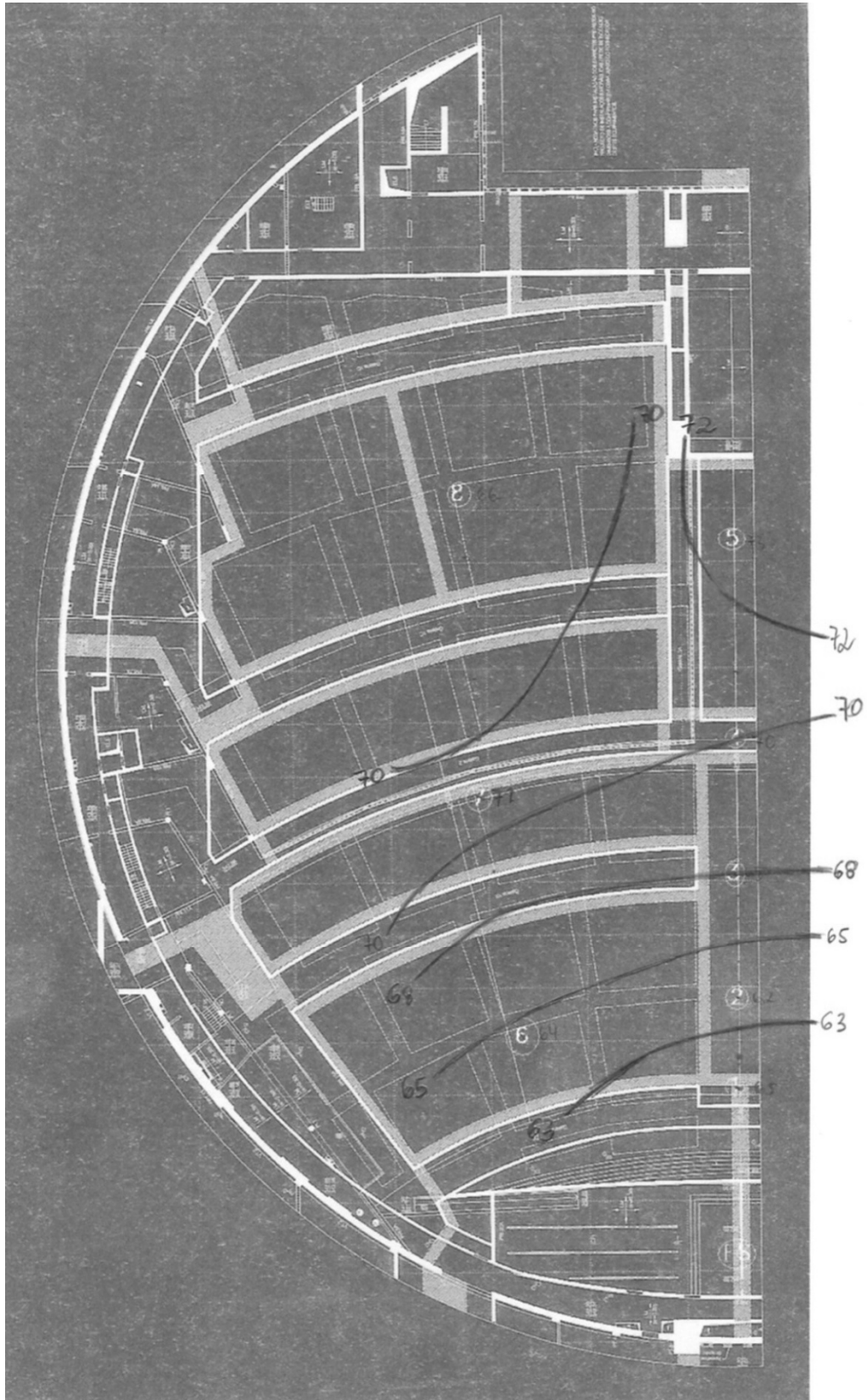


Figura 6.12. – Linhas de ISORASTI com reforço acústico em funcionamento.

6.1.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Como já foi referido o principal objectivo desta igreja é a inteligibilidade da palavra, sem no entanto descurar os requisitos acústicos para a música que acompanha as cerimónias religiosas. Como tal o limite para a igreja desocupada foi fixado em 2,1 s como valor ideal e 2,6 s como valor limite aceitável para o TR (500-1000Hz) e de 2,8 s e 3,4 s para o TR (250 Hz) (Quadro 4.1.).

Nas Figuras 6.13. e 6.14. fazem-se as comparações para cada ponto dos valores de TR (500-1000Hz) e TR (250Hz) com os valores ideais e limite exigidos para o projecto.

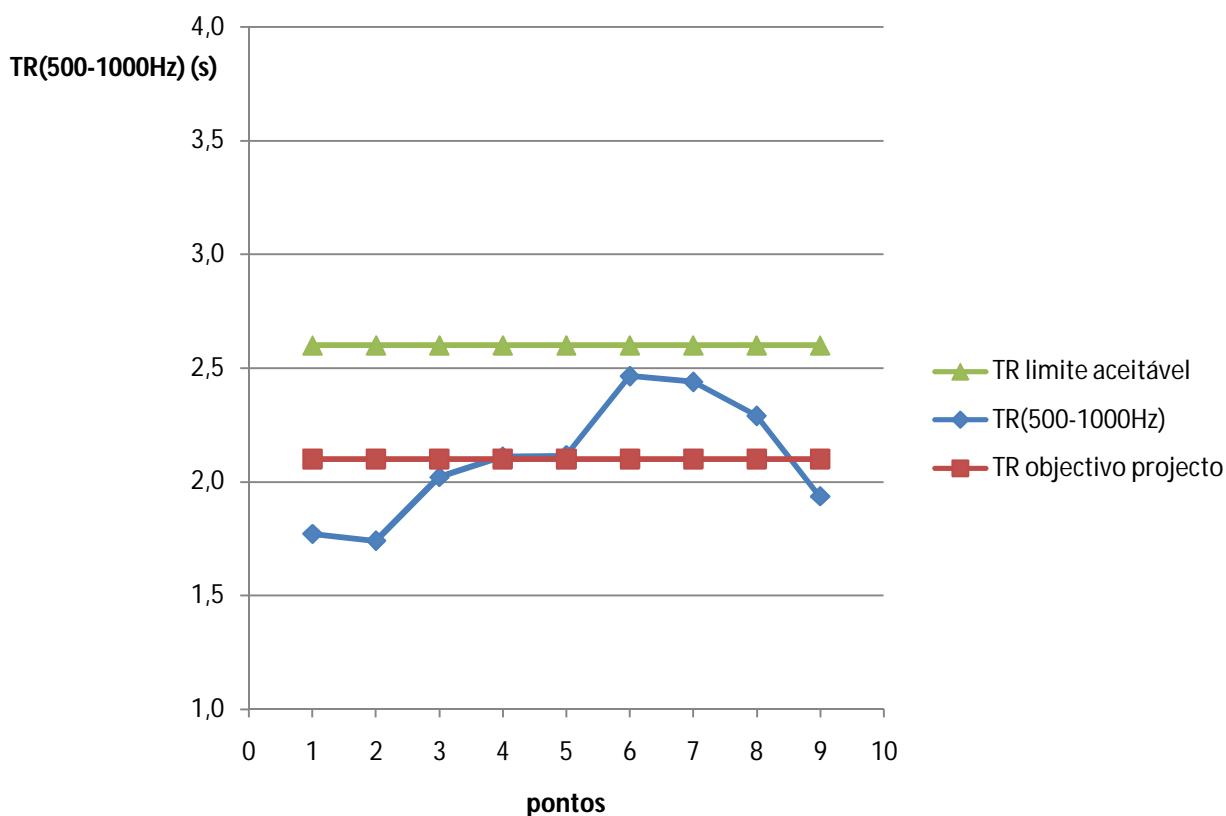


Figura 6.13. – Comparação dos valores medidos de TR (500-1000Hz) com valores impostos para projecto.

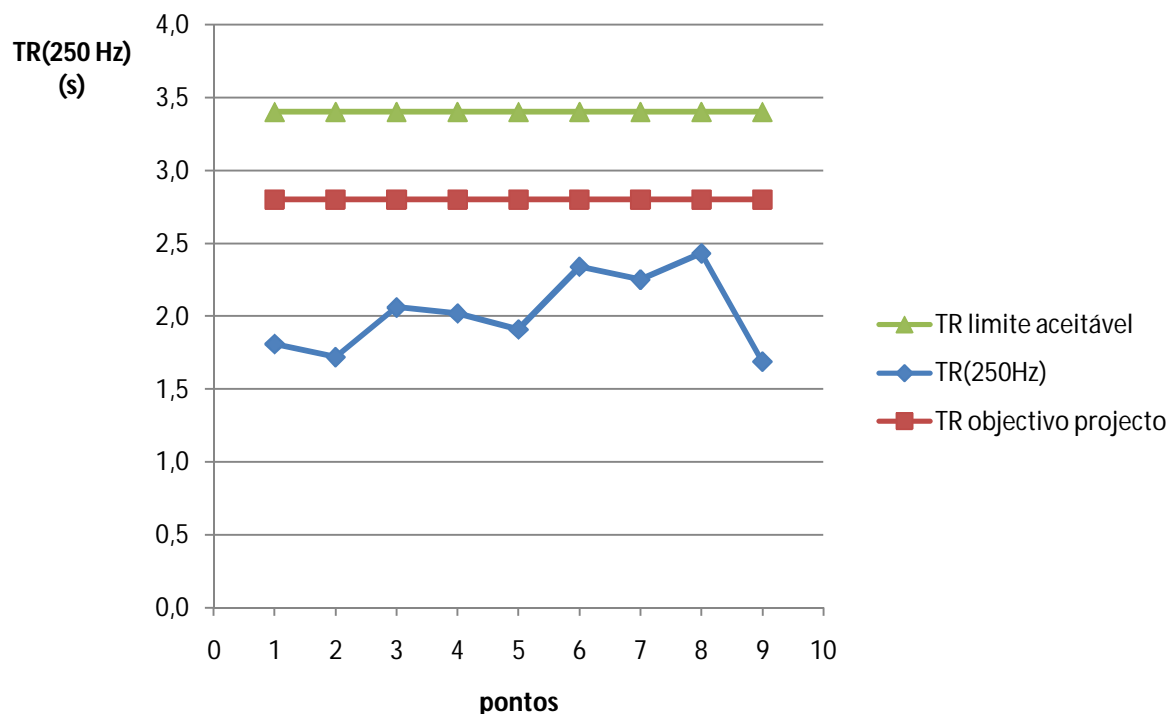


Figura 6.14. – Comparação dos valores medidos de TR (250Hz) com valores mpostos para projecto

Através da análise da Figura 6.13. verifica-se que para os pontos 6,7 e 8 (33% dos testados) os valores de TR(500-1000Hz) excedem o valor ideal de projecto. No entanto em nenhum dos pontos testados se verificam valores de TR superiores ao “limite aceitável”.

Da análise da Figura 6.14. conclui-se que em nenhum dos pontos ensaiados se atinge ou excede o valor ideal de projecto para a banda de frequência dos 250 Hz.

Para quantificar o TR médio da Igreja, calculou-se a média aritmética de todos os pontos e compararam-se com os valores de projecto (Quadro 6.4.).

Quadro 6.4. – TR dos valores médios dos ensaios vs TR do projecto

Parâmetro	Valores nos pontos	Média dos valores	Objectivos de projecto *	Valor limite aceitável *
TR(500-1000Hz) (s)	1,74 a 2,47	2,10	≤ 2,1	≤ 2,6
TR(250Hz) (s)	1,72 a 2,43	2,03	≤ 2,8	≤ 3,4

* Para cada ponto na igreja

Como se pode ver no Quadro 6.4. os valores de TR nos pontos cumprem com os requisitos exigidos para cada ponto da igreja para os dois índices estudados, TR(500-1.000 Hz) e TR(250 Hz) embora a níveis distintos. Os valores nos 500-1.000 Hz não respeitam todos os objectivos de projecto, nomeadamente os pontos 4, 5, 6, 7 e 8 (56 % dos pontos estudados), ficando no entanto abaixo do “valor limite aceitável”.

Nos 250 Hz todos os pontos cumprem os “objectivos de projecto”.

6.2. COMPARAÇÃO DA IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE COM IGREJAS DO MESMO TIPO

Neste subcapítulo procede-se a uma breve comparação da Igreja da Santíssima Trindade com igrejas do mesmo tipo, ou seja, Mega-Igrejas.

Uma Mega-Igreja é uma igreja que funcione com mais de 2000 lugares numa celebração pelo menos semanal [38].

No Quadro 6.5. apresenta-se uma listagem de algumas mega-igrejas espalhadas pelo mundo, e seus respectivos volumes e tempos de reverberação (TR(500-1000Hz)).

Quadro 6.5. – Referências de Mega-Igrejas [1], [39], [40], [41], [42] e [43].

Nº	Nome da Igreja	Cidade	País	Lugares sentados	Volume (m³)	TR(500-1000Hz)(s)
1	Basilica de S. Pedro	Roma	Vaticano	58.000	700.000	7,0
2	I. de Jesus Cristo dos Santos dos Últimos Dias, 2000	Salt Lake City	EUA	21.000	226.000	2,0
3	S. Paulo For a de Portas	Roma	Itália	38.000	181.000	8,6
4	Catedral de S. Paulo	Londres	Reino Unido	31.000	152.000	10,7
5	S. João Luterano	Roma	Itália	23.000	150.000	6,2
6	Klosterkirche	Ottobeuren	Alemanha	n.d.	130.000	6,5
7	Santíssima Trindade, 2007 Primeira Igreja Baptista,	Fátima	Portugal	9.000	130.000	2,1
8	1985	Orlando, FL	EUA	6.000	115.000	2,9
9	Mosteiro Santo Domingos	Silos	Espanha	n.d.	113.000	6,5
10	Igreja de Maria	Lübeck	Alemanha	n.d.	100.000	5,5
11	Basílica Mariacka	Gdansk	Polónia	25.000	97.000	11,4
12	Klosterkirche	Weingarten	Alemanha	n.d.	90.000	7,2
13	Catedral	Dresden	Alemanha	2.000	50.000	7,9
14	Catedral	Drezno	Polónia	n.d.	50.000	7,6
15	Münster	Weingarten	Alemanha	n.d.	44.000	6,7
16	Assembleia de Deus, 1985	Auckland	Nova Zelândia	4.000	31.000	2,1

n.d. – não disponível

As igrejas que não têm a data junto com o seu nome é porque a sua construção foi antes do séc. XX.

Como se pode verificar no Quadro 6.5. a Igreja da Santíssima Trindade (numerada com o nº 7 na tabela) não só é uma das maiores em volume e número de lugares sentados, como é a que tem o segundo TR mais baixo a par de Assembly of God em Auckland (nº 14) construída em 1985 e atrás de Saints em Salt Lake City (nº 2), esta última construída em 2000.

Facilmente se conclui que as igrejas com menores tempos de reverberação foram construídas no séc. XX ou séc. XXI, o que vem demonstrar a crescente preocupação com as características acústicas das igrejas. Actualmente a atenção não é totalmente virada para a arquitectura e monumentalidade, na construção de um espaço religioso, como acontecia nos séculos passados. Hoje em dia, dá-se atenção

também à função do espaço, e como as igrejas são espaços destinados sobretudo à palavra e música, procuram-se satisfazer essas necessidades na construção de um espaço novo.

Das Figuras 6.15. e 6.16. podem-se confirmar as conclusões atrás referidas.

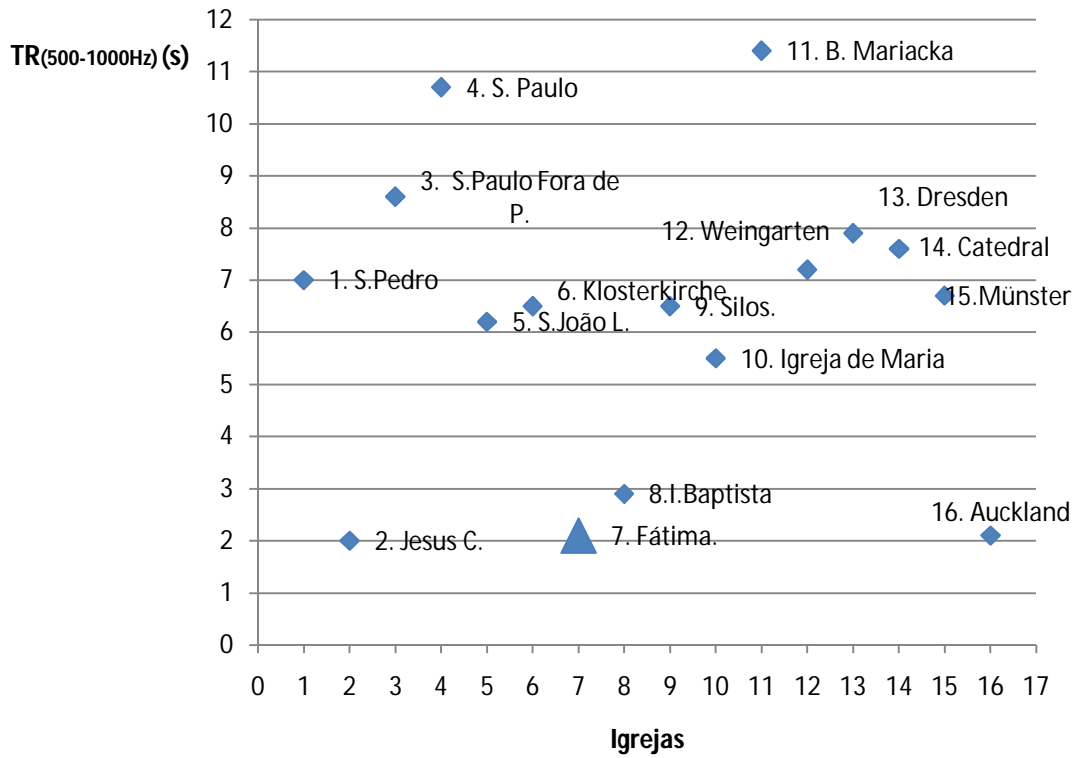


Figura 6.15. – Comparação dos valores médios de TR (500-1000Hz) em Mega-Igrejas.

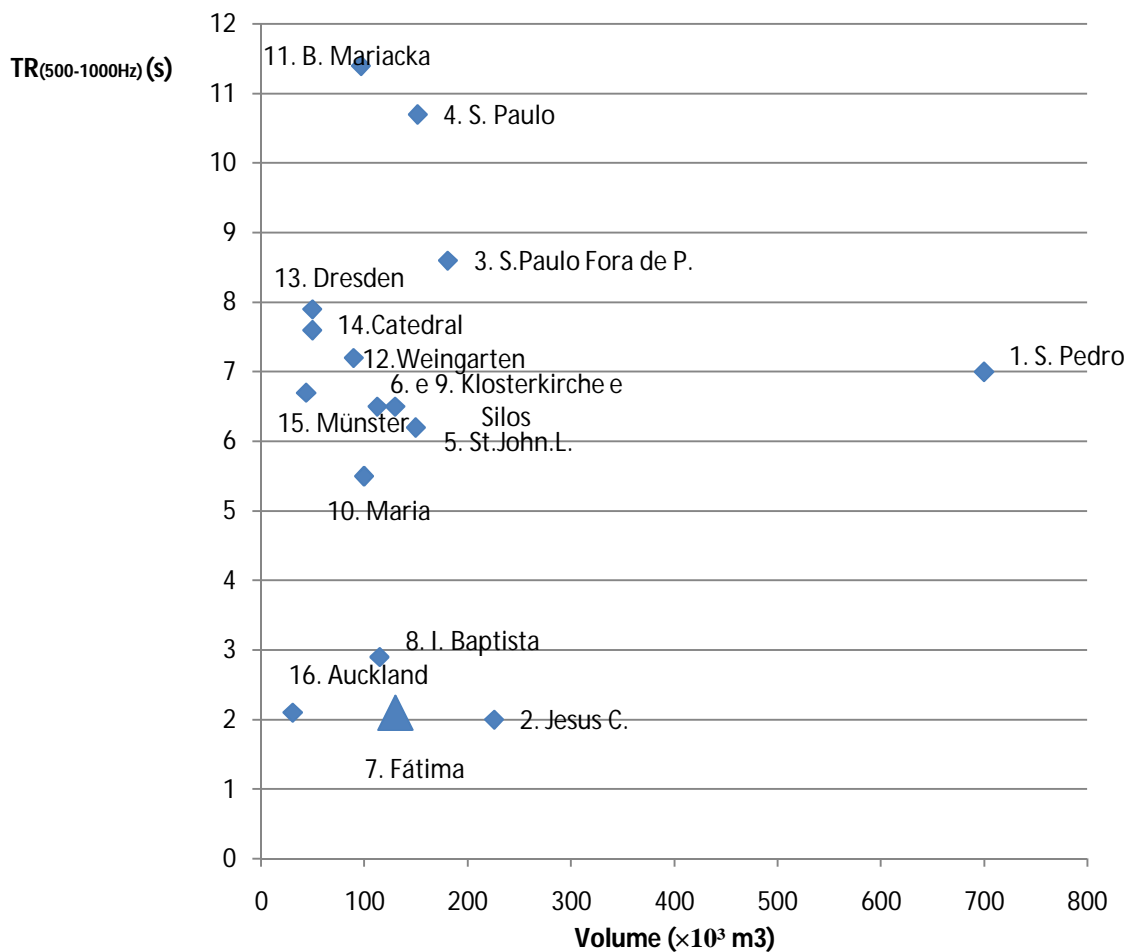


Figura 6.16. – Comparação dos valores médios do TR (500-1000Hz) Mega-Igrejas em função do volume (m³) .

6.3. COMPARAÇÃO DA IGREJA DA SANTÍSSIMA TRINDADE COM SALAS DESTINADAS A ESPECTÁCULOS MUSICAIS.

No subcapítulo anterior comparou-se a Igreja em estudo com igrejas do mesmo tipo, de grande volume. Neste subcapítulo comparam-se os valores médios de TR da Igreja da Santíssima Trindade com outro tipo de salas mais destinadas à música, em vez de destinadas à palavra (Quadro 6.6. e Figura 6.17.). Isto para verificar quais as diferenças, e se há aptidão da Igreja da Santíssima Trindade também para a propagação da música.

Os valores apresentados (Quadro 6.6.) são para uma amostra de 40 salas conceituadas, testadas sem público, tal como foi ensaiada a igreja em estudo, e o tempo de reverberação é o TR (500-1000Hz) médio para haver concordância na comparação [3].

Quadro 6.6. – Referência de salas de espectáculo [11]

Nº	Países e Salas	TR (500-1000 Hz) (s)
1	Sala de Concertos Musikhochschule, Berlin, Alemanha	2,0
2	Grosser Sendesaal Sender Freies Berlin, Alemanha	2,5
3	Sala de Beethoven, Bonn, Alemanha	2,0
4	Neues Gewandhaus, Leipzig, Alemanha	1,8
5	Herkulesaal, Munich, Alemanha	2,3
6	Liederhalle Grosser Saal, Stuttgart, Alemanha	2,2
7	Neues Fiestpielhaus, Salzburg, Áustria	2,2
8	Grosser Musikvereinsaal, Viena, Áustria	3,6
9	Palacio Belas Artes, Bruxelas, Bélgica	2,0
10	Auditório Jubileo Alberto, Edmonton, e Calgary, Canadá	1,8
11	Teatro Rainha Isabel, Vancouver, Canadá	1,9
12	Estudio 1 Casa de la Radio, Copenhaga, Dinamarca	2,0
13	Sala de Concertos Tivoli, Copenhaga, Dinamarca	2,3
14	Teatro Lírico, Baltimore, EUA	2,0
15	Sala Sinfónica, Boston, EUA	2,8
16	Sala de Musica Wainhans, Buffalo, EUA	1,7
17	Auditório Kresge, Cambridge, EUA	1,7
18	Teatro Arie Crown, Chicago, EUA	2,5
19	Sala Severance, Cleveland, EUA	1,9
20	Auditório Henry e Edsel Ford, Detroit, EUA	2,0
21	Sala Música Tanglewold, Lenox, Massachussets, EUA	3,5
22	Sala Carnegie, Nova Iorque, EUA	2,2
23	Auditório R.G. Rainey, Nova Iorque, EUA	1,6
24	Academia de Música de Filadélfia, Nova Iorque, EUA	1,6
25	Konserttitali, Turku, Finlândia	2,0
26	Concertgebouw, Amsterdão, Holanda	2,4
27	Sala Colston, Bristol, Reino Unido	2,2
28	Sala Usher, Edimburgo, Reino Unido	2,5
29	Sala Filarmónica, Liverpool, Reino Unido	1,7
30	Sala de San Andrés, Glasgow, Reino Unido	2,7
31	Sala Real Alberto, Londres, Reino Unido	3,7
32	Sala Real Festival, Londres, Reino Unido	1,8
33	Sala Free Trade, Manchester, Reino Unido	2,2
34	Binyanei Há Oowan, Jerusalém, Israel	2,3
35	Auditório F.R.Mann, Tel Aviv, Israel	2,0
36	Konsrthus, Gothenburg, Suécia	2,0
37	Stad Casino, Baset, Suíça	2,4
38	La Chaus-de-Fonds, Baset, Suíça	2,1
39	Grosser Tomhalessaal, Zurique, Suíça	3,8
40	Aula Magna, Caracas, Venezuela	1,8

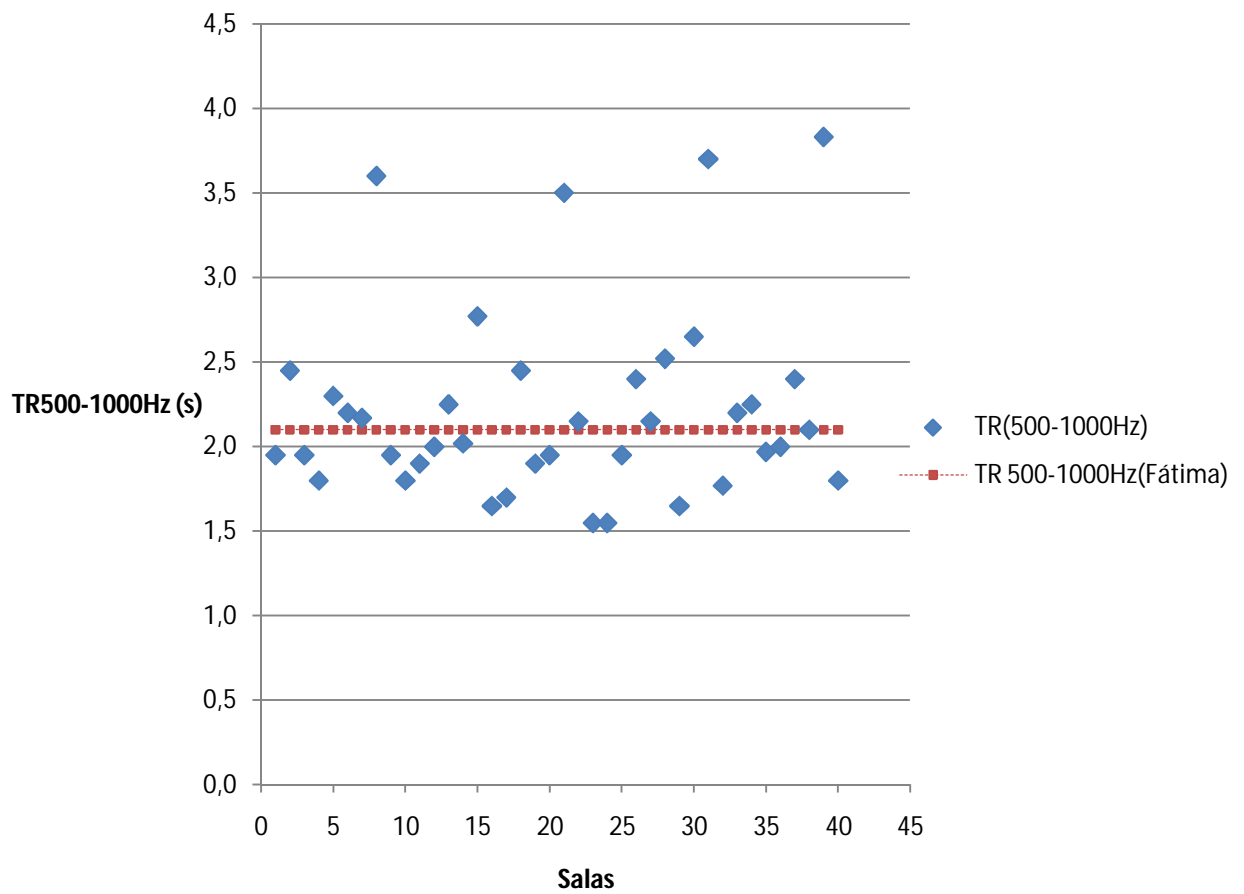


Figura 6.17. – Valores médios de TR (500-1000Hz) de salas para concerto desocupadas sob a forma gráfica.

Das 40 salas contabilizadas, metade têm TR médio (500-1000Hz) igual ou superior ao da Igreja da Santíssima Trindade (2,1 s), pelo que se pode concluir que esta poderia também ser facilmente adaptável a sala de concertos, visto ter um valor médio de TR próximo da maioria das salas de concerto.

7

CLASSIFICAÇÃO DA IGREJA SEGUNDO MÉTODOS MULTI- CRITÉRIO

7.1. OBJECTIVOS

Apresenta-se neste capítulo a caracterização global da acústica interior da Igreja da Santíssima Trindade através de dois métodos multi-critério [31] e [44], de forma a obter uma classificação final quantitativa e qualitativa da igreja estudada de forma a completar a análise dos parâmetros isolados ensaiados *in situ* efectuada ao longo do estudo.

7.2. INDEX METHOD OF THE ACOUSTIC QUALITY ASSESSMENT OF SACRAL BUILDINGS

7.2.1. INTRODUÇÃO

Este método foi desenvolvido pelos autores polacos Zbigniew Engel e Krzysztof Kosala e foi publicado na revista “*Archives of Acoustics*” nº 29 em 2004 [38].

O método proposto desenvolve-se utilizando factores considerados decisivos na caracterização acústica interior de uma igreja.

O índice global WAQS é obtido a partir de diversos índices segundo a fórmula:

$$W_{AQS} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n \eta_i}$$

Em que W_i são os índices parciais e η_i são os pesos dos índices parciais.

Os pesos são os seguintes:

- $\eta_1 = 1,0$
- $\eta_2 = 0,5$
- $\eta_3 = 0,3$
- $\eta_4 = 0,3$
- $\eta_5 = 0,2$

Os índices parciais (1 a 5) são:

- W_r (*Reverberation index*) – Índice de reverberação;
- W_{is} (*Intelligibility of speech index*) – Índice de inteligibilidade da palavra;
- W_{ed} (*External disturbance index*) – Índice de distúrbio externo;
- W_{ul} (*Uniformity of loudness index*) – Índice de uniformidade da pressão sonora;
- W_m (*Music sound quality index*) – Índice de qualidade musical.

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

7.2.2. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REVERBERAÇÃO

O índice W_r é o índice de reverberação e é obtido da seguinte forma:

$$W_r = W_{r1}\beta_1 + W_{r2}\beta_2 + W_{r3}\beta_3$$

Em que W_{r1} é o índice de reverberação-volume, W_{r2} é o índice de reverberação para música de órgão e W_{r3} é o índice de reverberação para a palavra.

$$W_{r1} = 1 - \frac{|T_{zs} - T_p|}{5}, T_p = 0,24 \ln(V) - 0,24 = 2,6 \text{ s}$$

Em que T_{zs} é o tempo de reverberação medido com a presença de público na igreja e V é o volume da igreja. Para a igreja totalmente desocupada obtém-se um valor médio de 2,1 s no capítulo 5.3.3. Para a igreja ocupada, o TR seria ainda menor, porque a superfície de absorção aumentaria com a presença de pessoas no espaço. Assim sendo, e respeitando o limite aceitável imposto em [1] de 2,0 s para a igreja ocupada, optou-se por escolher para T_{zs} o valor de 1,9 s. Segundo o método, para valores de $T_{zs} \leq T_p + 5$, o índice W_{r1} assume valores entre 0 e 1 dados pela equação acima apresentada. Para $T_{zs} \geq T_p + 5$, a equação resulta em números negativos e assume-se que $W_{r1} = 0$, para casos em que $T_{zs} = T_p$, o índice assume a classificação máxima, ou seja, tem as melhores propriedades acústicas possíveis para este índice ($W_{r1} = 1,0$). Neste caso, $T_{zs} = 1,9 \text{ s}$ que é ainda mais pequeno que T_p , pelo que se assumiu que a Igreja da Santíssima Trindade tinha a melhor classificação possível para este índice ($W_{r1} = 1,0$).

Para a determinação de W_{r2} usou-se a seguinte fórmula:

$$W_{r2} = 1 - \frac{|T_{zs500} - T_{p0}|}{5}; T_{p0} = 0,73V^{0,15} = 4,3 \text{ s}$$

Em que T_{zs500} usou-se também 1,9 s, porque o TR (500 Hz) obtido no capítulo 5.3.3 tem o valor 2,05 s para igreja desocupada, e como T_{zs500} refere-se à igreja ocupada, certamente o valor seria inferior, pelo que optou-se por usar o mesmo valor utilizado para T_{zs} . Tal como no índice anterior, para valores de $T_{zs500} \leq T_{p0} + 5$, utiliza-se a equação acima escrita para W_{r2} . Para $T_{zs500} \geq T_{p0} + 5$, $W_{r2} = 0$ e para $T_{zs500} = T_{p0}$, $W_{r2} = 1,0$. Logo, sendo $T_{zs500} < T_{p0}$ atribui-se também o valor máximo ($W_{r2} = 1,0$) como foi feito para o índice W_{r1} .

Para o índice W_{r3} :

$$W_{r3} = 1 - \frac{|T_{zs} - T_{pm}|}{5} = 0,694 \cong 0,7; T_{pm} = 0,17 \ln(V) - 0,43 = 1,57 \text{ s}$$

Para o volume da Igreja da Santíssima Trindade assumiram-se os coeficientes β_1 , β_2 e β_3 semelhantes aos mencionados no método para igrejas de volume até 40.000 m³, visto ser o maior valor disponível no método. Esta suposição, não garante a exequibilidade do método para o caso da Igreja da Santíssima Trindade. O método foi desenvolvido com base em dados recolhidos de igrejas com volume variável entre os 600 m³ e os 40.000 m³. A Igreja da Santíssima Trindade tem um volume de 130.000 m³, ou seja, 3,25 vezes superior ao máximo deste método. No entanto, assumiu-se os valores dos coeficientes β para um volume de 40.000 m³, para poder obter a classificação do índice de reverberação. Tomaram-se então como válidos os seguintes coeficientes: $\beta_1 = 0,6$; $\beta_2 = 0,3$; $\beta_3 = 0,1$.

Assim sendo o valor obtido para o índice de reverberação foi de $W_r = 0,97$.

7.2.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DISTÚRPIO EXTERNO

O índice Wed é o índice de distúrbio externo e é obtido da seguinte forma:

$$Wed = \frac{3}{L_A - 27}$$

Em que L_A é o nível de pressão sonora no interior da igreja causado pelo ruído proveniente do exterior. Para isso utilizou-se o valor médio dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo sem AVAC (Quadro 5.1) obtidos nos pontos 1 a 5. Fez-se a correcção para o filtro A referido no subcapítulo 2.2.6. (Figura 2.4.). Os resultados obtidos estão presentes no Quadro 7.1. De seguida calculou-se o L_{Aeq} através da expressão:

$$L_A = 10 \log \left(\sum_{f=63}^{f=8000} 10^{\frac{L(f)}{10}} \right) = 23,3 \text{ dB}$$

Quadro 7.1. – L_A para ruído de fundo sem AVAC

	f (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L médio (dB)	31,7	23,6	17,4	17,3	18,8	16,3	13,8	11,1
filtro A (dB)	-26,0	-15,5	-8,5	-3,0	0,0	1,0	1,0	-1,0
L_A (dB)	5,7	8,1	8,9	14,3	18,8	17,3	14,8	10,1

Como $L_A < 30$ dB, pelo método, $Wed = 1,0$.

7.2.4. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE MUSICAL

O índice W_m é obtido da seguinte forma:

$$W_m = \sqrt{\frac{W_{m1}^2 + W_{m2}^2 + W_{m3}^2 + W_{m4}^2}{4}}$$

Para obter W_{m1} é necessário o T_{mid} que é precisamente o TR (500-1000Hz) atrás calculado, logo, $T_{mid} = 1,9$ s. De seguida com o auxílio do gráfico presente na figura 7.1. obtém-se $W_{m1} = 0,63$.

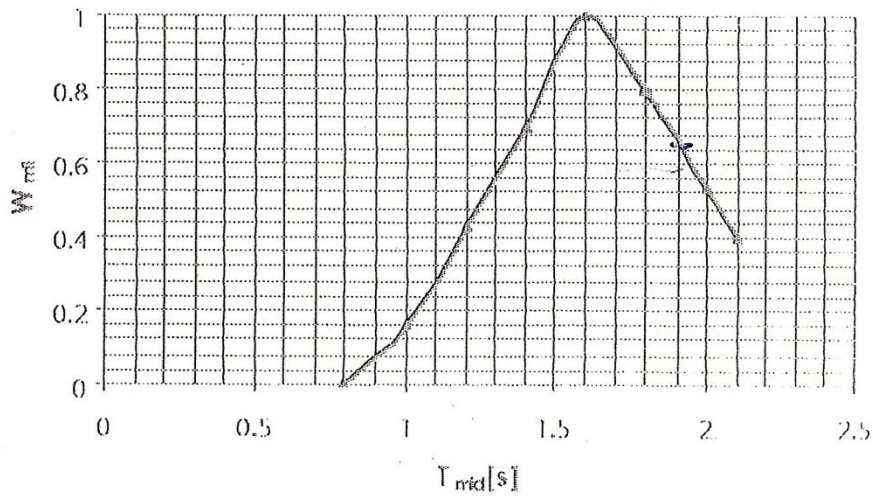


Figura 7.1. – Gráfico que relaciona T_{mid} com W_{m1} . [38]

Para calcular W_{m2} calcula-se o parâmetro BR (*Bass Ratio*), tirando também duas décimas aos valores médios TR_{125} e TR_{250} obtidos no subcapítulo 5.4.3., tal como foi feito para T_{mid} , devido ao decréscimo de TR para uma sala ocupada. Então $TR_{125} = 2,0$ e $TR_{250} = 1,8$. Então, $BR = \frac{TR_{125} + TR_{250}}{TR_{500} + TR_{1000}} = 1,0$ e com o auxílio do gráfico da figura 7.2., $W_{m2} = 0,46$.

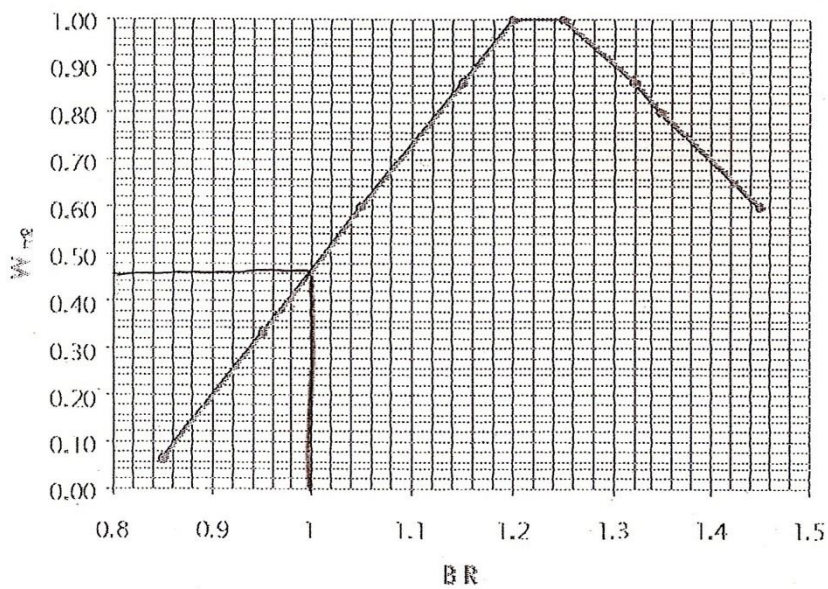


Figura 7.2. – Gráfico que relaciona BR com W_{m2} . [38]

Para os índices W_{m3} e W_{m4} assumiram-se valores médios dos impostos em projecto [1] para os parâmetros Claridade (C_{80}) e Tempo Central (T_s), visto não terem sido ensaiados no decorrente estudo. Assim sendo, $C_{80} = + 2,5$ dB e $T_s = 110$ ms.

Então de acordo com as figuras 7.3. e 7.4. $Wm_3 = 1,0$ e $Wm_4 = 1,0$.

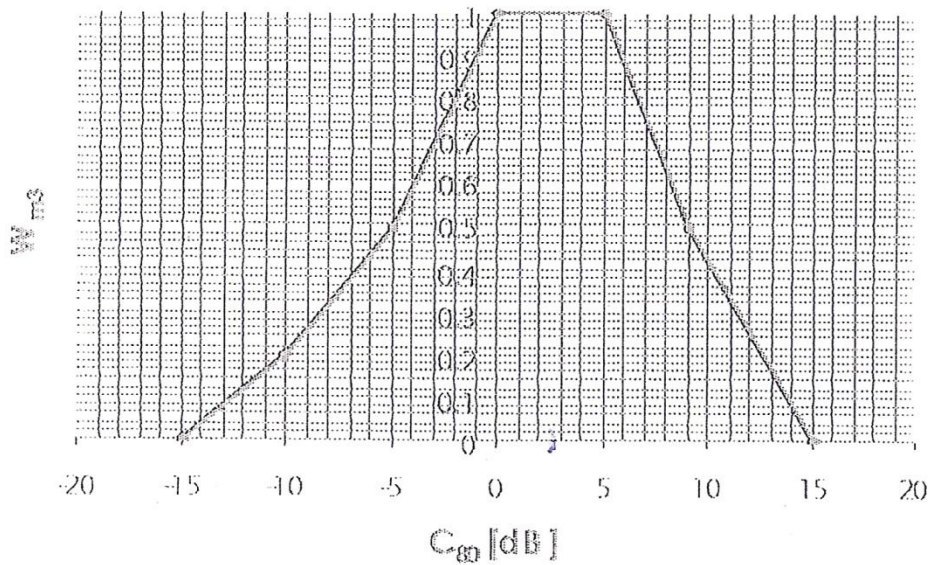


Figura 7.3. – Gráfico que relaciona C_{80} com Wm_3 . [38]

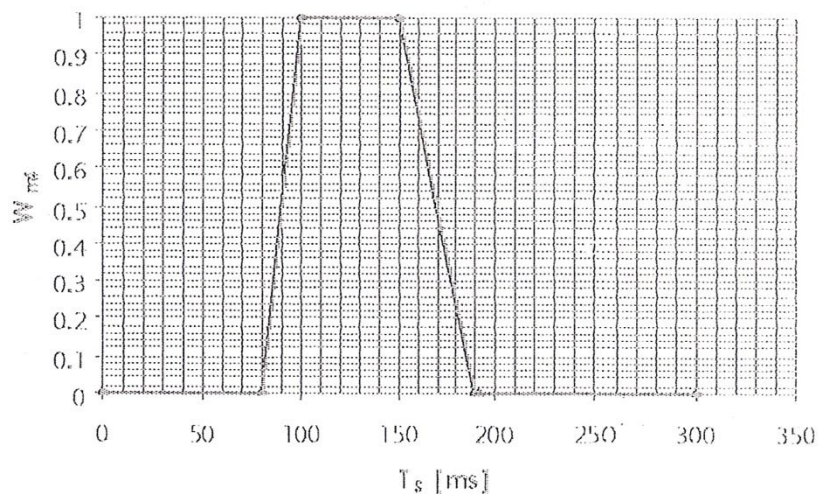


Figura 7.4. – Gráfico que relaciona T_s com Wm_4 . [38]

$$\text{Assim sendo, } Wm = \sqrt{\frac{0,63^2 + 0,46^2 + 1^2 + 1^2}{4}} = 0,81$$

7.2.5. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

O índice de inteligibilidade da palavra Wis depende dos parâmetros ALCONS (*Percentage Articulation Loss of Consoants*) para Wis_1 , C_{50} (*Clarity*) para Wis_3 e RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) para Wis_2 . Para Wis_1 e Wis_3 assumiram-se valores médios de 0,5 tal como no cálculo em 7.1.3 por não haver informação relativa a estes parâmetros.

O RASTI obtido no capítulo 5.3.3 foi de 0,57. Através do gráfico da figura 7.5, $Wis_2 = 0,58$.

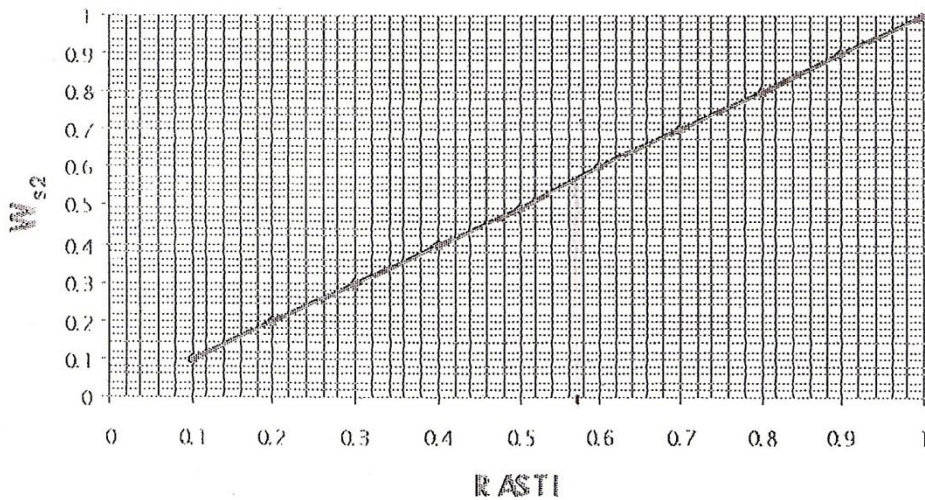


Figura 7.5. – Gráfico que relaciona RASTI com Wis_2 . [38]

$$\text{Logo, } Wis = \sqrt{\frac{0,5^2 + 0,58^2 + 0,5^2}{3}} \cong 0,53$$

7.2.6. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE UNIFORMIDADE DA PRESSÃO SONORA

Para a determinação deste índice Wul são necessários parâmetros não disponíveis, como o coeficiente de decaimento do nível da pressão sonora, e a área de superfície em que este decaimento é estudado. Desta forma optou-se por atribuir também a este índice uma classificação média de 0,5.

7.2.7. CLASSIFICAÇÃO FINAL

A classificação final do método é então a seguinte:

$$WAQS = \frac{0,97 * 1,00 + 0,53 * 0,50 + 1,00 * 0,30 + 0,50 * 0,30 + 0,81 * 0,20}{1,00 + 0,50 + 0,30 + 0,30 + 0,20} = 0,803 \cong 0,80$$

O valor obtido encontra-se na fronteira dos intervalos de 0,65 a 0,80 e de 0,80 a 1 que correspondem respectivamente aos intervalos de *Boa* e *Muito Boa* Qualidade Acústica Interior segundo o método. Sendo que o valor exacto sem arredondamentos de $WAQS$ é de 0,803 que já pertence ao intervalo de *Muito Boa* Qualidade Acústica Interior.

O valor obtido pode ter sido minorado pela atribuição artificial de classificação de 0,5 aos índices Ws_1 , Ws_3 e Wul , visto a classificação obtida para os índices Wis e Wul ter sido bastante inferior à dos restantes índices.

Se se atribuisse a Wis1 e a Wis3 uma classificação de 0,75, por exemplo viria:

$$Wis = \sqrt{\frac{0,75^2 + 0,58^2 + 0,75^2}{3}} = 0,6979 \cong 0,7$$

Atribuindo uma classificação de 0,75 a Wul também, virá como classificação final:

$$WAQS = \frac{0,97 * 1,00 + 0,70 * 0,50 + 1,00 * 0,30 + 0,75 * 0,30 + 0,81 * 0,20}{1,00 + 0,50 + 0,30 + 0,30 + 0,20} \cong 0,87$$

Valor este que que se traduz na classificação da Igreja da Santíssima Trindade com uma *Muito Boa* Qualidade Acústica Interior.

7.3. METODOLOGIA MULTI-CRITÉRIO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE ACÚSTICA EM IGREJAS

7.3.1. INTRODUÇÃO

Este método foi desenvolvido por José Loureiro no âmbito do seu projecto de mestrado integrado [31] e tem como objectivo atribuir uma classificação, a *Qualidade Acústica em Igrejas* (QAI) através do uso de parâmetros subjectivos, objectivos e arquitectónicos.

Este método usa como critérios da avaliação a qualidade da palavra (critério 1: – c1) e a qualidade da música (critério 2: – c2).

A classificação do critério c1 é feita somente através do parâmetro a1) *P80* desenvolvido na tese de mestrado de Margarida Lencastre “*A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de análise de carácter Subjectivo e Objectivo*” [4].

O critério c2 tem como parâmetros a avaliar:

- *a2* (CLA) – Clareza do discurso musical;
- *a3* (REV) – Reverberância;
- *a4* (INTM) – Intimidade;
- *a5* (DIR) – Direccionalidade;
- *a6* (EQT) – Equilíbrio Tímbrico.

Os pesos a cada parâmetro foram atribuídos tendo em conta que a igreja é um espaço destinado sobretudo à palavra. Loureiro atribuiu então um peso maior ao critério 1 (0,65) do que ao critério 2 (0,35 distribuído por cinco parâmetros).

Então a classificação QAI é obtida da seguinte forma:

$$QAI = 0,65 P80 + 0,1295 CLA + 0,0805 REV + 0,0560 INTM + 0,0735 DIR + 0,0105 EQT$$

A classificação QAI varia de 0 a 1 conforme o Quadro 7.2.

Quadro 7.2. – Classificação QAI [24]

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

7.3.2. RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS SUBJECTIVOS E OBJECTIVOS

Existem dois tipos de relações, com os parâmetros arquitectónicos, e com os parâmetros acústicos objectivos. Nesta avaliação usou-se a segunda hipótese, porque a Igreja da Santíssima Trindade tem as dimensões muito maiores que as igrejas estudadas para este método de avaliação. Como tal, os parâmetros arquitectónicos relativos à Igreja da Santíssima Trindade, a introduzir nas fórmulas fornecidas pelo método, revelaram-se completamente desajustados ao método, obtendo-se valores para os parâmetros subjectivos, fora do intervalo de validade [de 0 a 7].

As classificações obtidas para cada parâmetro subjectivo (*a1* a *a6*) de 0 a 7 são depois normalizadas para valores de 0 a 1 conforme o Quadro 7.3.

Quadro 7.3. – Escala de conversão para a normalização [24]

Classificação	Classificação Normalizada	Classificação	Classificação Normalizada	Classificação	Classificação Normalizada
CLA	CLA_N	REV	REV_N	INTM	INTM_N
1	0,0	1	0,0	1	0,0
2	0,1	2	0,1	2	0,1
3	0,3	3	0,4	3	0,3
4	0,5	4	0,7	4	0,6
5	0,7	5	1,0	5	0,8
6	0,9	6	0,7	6	0,9
7	1,0	7	0,2	7	1,0

Classificação	Classificação Normalizada	Classificação	Classificação Normalizada
DIR	DIR_N	EQT	EQT_N
1	0,0	1	0,00
2	0,1	2	0,17
3	0,4	3	0,33
4	0,5	4	0,50
5	0,7	5	0,67
6	0,9	6	0,83
7	1,0	7	1,00

Os parâmetros objectivos acústicos a utilizar são:

- Tempo de Reverberação (TR) – utilizou-se o valor de TR (500-1000 Hz) = 2,1 s que corresponde ao valor médio para igreja desocupada (TRmédio) obtido no subcapítulo 5.4.3.;
- Claridade (C80) – utilizou-se o valor utilizado no método anterior de + 2,5 dB;
- Factor de Força (G) – utilizou-se o valor médio dos impostos em projecto [1], ou seja, -7,5 dB.

Segundo o método utilizado, os parâmetros subjectivos podem ser relacionados com os objectivos, a partir das expressões presentes no Quadro 7.4.

Quadro 7.4. – Modelos de previsão de relação entre parâmetros acústicos subjectivos e objectivos, resultados da conversão e resultados da conversão normalizados. [24]

Modelo de previsão	Resultado	Resultado Normalizado
CLA = 6,336 - 0,692 TR + 0,052 G	4,63	0,625
VER = 2,678 + 0,409 TR - 0,140 C80 - 0,014 G	3,29	0,488
INTM = 3,474 - 0,313 TR - 0,0085 C80 + 0,151 G	1,66	0,100
DIR = 5,328 - 0,397 TR + 0,055 G	4,08	0,500
EQT = 5,971 - 0,329 TR + 0,050 G	4,91	0,654

Para a determinação do parâmetro P80, utilizou-se a fórmula que o relaciona também com parâmetros acústicos objectivos:

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

Utilizando para valor de RASTI o valor médio obtido no capítulo 5.3.3 de 0,67 (com sistema de som em funcionamento), obtém-se:

$$P80 = 79,554$$

Normalizando, segundo uma escala linear, em que 80 corresponde a 1, obtém-se $P80_N = 0,994$

7.3.3. CLASSIFICAÇÃO FINAL

Utilizando a fórmula para QAI atrás apresentada e substituindo os parâmetros subjectivos pelos valores correspondentes normalizados determinados atrás (Quadro 7.4)

$$QAI = 0,65 \times 0,994 + 0,1295 \times 0,6250 + 0,0805 \times 0,4876 + 0,0560 \times 0,1000 + 0,0735 \times 0,5000 + 0,0105 \times 0,6539 = 0,82$$

Relacionando o valor obtido para QAI com o Quadro 7.2. conclui-se que a Igreja da Santíssima Trindade tem “Boa Qualidade Acústica de Igreja”.

CONCLUSÕES DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

8.1. CONCLUSÕES

Este estudo tinha como principal objectivo, caracterizar acusticamente, através de parâmetros objectivos, o interior da nova Igreja da Santíssima Trindade do Santuário de Fátima. Pretendia-se ensaiar *in situ esse* espaço em três parâmetros acústicos. Esses parâmetros foram escolhidos por serem vitais para caracterizar objectivamente o interior da igreja. Além da caracterização, o estudo teve também como objectivo, comparar os valores obtidos com os limites previamente definidos pelo dono-de-obra na fase de ante-projecto. Esta igreja foi a única no país, desta envergadura, a merecer um intensivo estudo acústico.

Dos parâmetros exigidos no estudo feito em ante-projecto, três foram escolhidos para análise no presente trabalho: Ruído de Fundo, analisado com o parâmetro NC; Inteligibilidade da Palavra, analisada com o RASTI; Reverberação, avaliada com o TR (500-1000 Hz) e TR (250 Hz).

Os resultados obtidos estão presentes no Quadro 8.1. que serve como resumo dos ensaios efectuados e verificações efectuadas ao longo deste estudo.

Quadro 8.1. – Quadro-Resumo dos valores medidos e comparações

	Valores Obtidos	Exigências para projecto		OK/KO	OK/KO
		Ideais	Aceitáveis	Ideais	Aceitáveis
NC (dB)	30 a 35	≤ 25	≤ 30	KO	KO
RASTI c/sistema som	0,62 a 0,73	$\geq 0,50$	$\geq 0,45$	OK	OK
TR (500-1000 Hz) (s)	1,7 a 2,5	$\leq 2,1$	$\leq 2,6$	KO	OK
TR (250 Hz) (s)	1,7 a 2,4	$\leq 2,8$	$\leq 3,4$	OK	OK

Relativamente ao Ruído de Fundo, verifica-se um não cumprimento dos exigentes limites exigidos para projecto. Analisando o espectro sonoro para cada ponto, verifica-se que todos os pontos analisados com o funcionamento dos dispositivos de AVAC, em pelo menos uma banda de frequência (2000 Hz) excedem a curva NC30, que é o limite aceitável. Os pontos 4 e 5 excedem também para as bandas de 250, 500, 1000 e 4000 Hz.

Analisando a classificação NC de cada ponto, verifica-se que apenas o ponto 2 obtém classificação NC ≤ 30 dB. O valor obtido para este ponto é de 30 dB. Para os restantes pontos a curva NC correspondente varia entre 30 e 35 dB, excedendo portanto, o valor limite aceitável de 30 dB.

A ventilação mecânica da igreja faz com que o nível sonoro da sala aumente em cerca de 16 dB(A), criando um ambiente de cerca de 39 dB(A), o que não é exagerado.

No entanto, para minimizar estes valores de forma a cumprir os objectivos para o parâmetro NC, sugere-se pelo menos, a reparação de alguns ventiladores que emitem ruído anormal tal como foi referido no capítulo 6.1.1.

A avaliação do RASTI cumpriu com os requisitos impostos, tendo sido obtido valores de 0,62 a 0,73 para RASTI (c/sistema de som), ou seja, superam os valores ideais mínimos de projecto (0,50).

Estes resultados reflectem o bom trabalho que foi feito no espaço e no dimensionamento e instalação do sistema de som, permitindo haver boa percepção da palavra em toda a audiência.

A Igreja da Santíssima Trindade pode então classificar-se, segundo a escala subjectiva de inteligibilidade da palavra normalizada (Quadro 6.2.) com “Boa Inteligibilidade da Palavra.”

Relativamente ao parâmetro Tempo de Reverberação (TR), os pontos ensaiados, obtiveram para TR (500-1000 Hz) valores entre 1,7 s e 2,5 s, cumprindo assim os valores limites aceitáveis em todos os pontos. Contudo, para os pontos 4, 5, 6, 7 e 8 (56 % dos pontos estudados) o exigente “valor ideal” de projecto é excedido, e portanto desrespeitado. Quanto ao TR (250 Hz) variou entre 1,7 s e 2,4 s cumprindo assim, tanto os valores ideais como os de limite aceitável.

Da análise do TR conclui-se que os materiais usados e dispositivos acústicos montados, referidos no capítulo 4.2.2.2 foram suficientes para contrariar as iniciais características arquitectónicas muito desfavoráveis a um bom desempenho acústico deste espaço.

Em comparação com 15 outras mega-igrejas mundiais (capítulo 6.2.), a Igreja da Santíssima Trindade tem o segundo TR mais baixo, a par de Assembleia de Deus em Auckland e atrás de Igreja de Jesus Cristo dos Santos dos Últimos Dias em Salt Lake City.

No capítulo 6.3. estudou-se a versatilidade da Igreja da Santíssima Trindade e chegou-se à conclusão que seria viável o seu uso como sala de concertos, visto ter um TR comparável com algumas das melhores salas de concertos do mundo (Figura 6.15. e Quadro 6.4.).

Após a verificação dos requisitos acústicos impostos na fase de ante-projecto e a comparação com outras igrejas do mesmo tipo, que eram os objectivos principais deste trabalho, procedeu-se também à caracterização através de dois métodos multi-critério. Os métodos escolhidos foram os dos autores polacos Engel e Kosala [44] e o de José Loureiro [31].

No primeiro obteve-se o índice global WAQS entre 0,80 e 0,87 que corresponde a “Muito Boa Qualidade Acústica Interior”, o que vem de encontro aos resultados obtidos da análise efectuada em todo o estudo.

Usando o segundo método, QAI [31] obteve uma classificação de 0,82 que corresponde, na sua escala qualitativa a “Boa Qualidade Acústica” da Igreja da Santíssima Trindade.

De acordo com o que está acima exposto, pode-se concluir que o comportamento acústico interior da nova Igreja da Santíssima Trindade é Bom/Muito Bom de acordo com os dois diferentes métodos de classificação utilizados. Relativamente aos exigentes valores para os parâmetros acústicos impostos pelo dono-de-obra, o NC foi o único dos analisados, a não ser cumprido. No entanto, uma simples reparação dos ventiladores do espaço poderá ser o suficiente para baixar os valores de NC até aos limites exigidos.

8.2. PISTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De modo a completar este estudo, poderiam ser ensaiados no futuro, outros parâmetros como a Claridade (C_{80} e C_{50}), a percentagem de perda de consoantes (ALCONS) e o TR com auditores dentro da Igreja de modo a poder entrar com todos os parâmetros nos métodos multi-critério utilizados para a classificação da igreja, de modo a otimizar a sua classificação e provavelmente melhorá-la. Poderia ainda ser ensaiado o RASTI com o sistema de AVAC ligado para perceber se há interferência do AVAC na inteligibilidade da palavra.

Poderia ser desenvolvido um método multi-critério para mega-igrejas, pois os disponíveis, como o desenvolvido por José Loureiro em 2008 [31], não obtêm valores muito plausíveis de usar, quando se utilizam os parâmetros arquitectónicos desta igreja devido às suas dimensões. O método dos autores polacos [44] também não prevê igrejas com este volume na determinação de alguns dos seus índices.

Outra solução para a utilização deste tipo de métodos, seria efectuar testes subjectivos, com grupos de auditores.

Após o término deste estudo fica a ideia que é possível obter bons resultados a nível de conforto acústico mesmo num espaço tão vasto, desde que seja feito um adequado estudo prévio na fase de ante-projecto. Deve-se procurar num futuro próximo realçar o papel da acústica de edifícios e incluir sempre um projecto de acústica aos projectos habituais de outras especialidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A. P. Oliveira de e Freitas, Diamantino. *The new megachurch for the Sanctuary of Fátima*. Tenth International Congress on Sound and Vibration. Estocolmo, Suécia. 7 a 10 de Julho de 2003.
- [2] Carvalho, A. P. Oliveira de. *Acústica Ambiental de Edifícios*. FEUP. 2008.
- [3] Lopez, M. Recuero e Gonzalez, C. Gil. *Acustica Arquitectonica*. Benzal. 1993.
- [4] Beranek, L. L. *Revised Criteria for Noise in Buildings*. Noise Control 3, 19-27 Janeiro de 1957.
- [5] http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_517.html acessado em Junho de 2009.
- [6] Lopez, M. Recuero. *Acustica Arquitectonica Aplicada*. Editorial Paraninfo. 1999.
- [7] Morgado, A. E. Jorge. *Estudo Acústico de Igrejas Portuguesas por Parâmetros Subjectivos - Dissertação de Mestrado – FEUP*. Setembro de 1996.
- [8] Lencastre, Margarida M. M. de Freitas de Queiroz e. *A Inteligibilidade da Palavra em Igrejas Católicas, através de análises de carácter Objectivo e Subjectivo*. 1998.
- [9] ANSI S3.2 – *American National Standard Method for Measurement of Speech Intelligibility*. American National Standards Institute. Nova Iorque. 1990.
- [10] ISO TR 4870, Technical Report “ Acoustics – *The construction and calibration of speech intelligibility tests* “. 1991.
- [11] Mapp, Peter. *Practical Limitations of Objective Speech Intelligibility Measurements of Sound Reinforcement Systems*. 102nd Convention, Audio Engineering Society, Munique. Alemanha. Março de 1997.
- [12] Houtgast, T. e Steeneken, H. J. M. *Evaluation of Speech Transmission Channels by using Artificial Signals*. Acustica, vol. 25 pp 355-367. 1971.
- [13] Cremer, L. e Müller, H. *Principles and Applications of Room Acoustics*. Applied Science. 1978.
- [14] Thiele, R. *Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen*. Acustica vol. 3, 291. 1953.
- [15] Reichardt, W., Alim A. e Schmidt, W. *Definition und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze Zwischen Brauchbarer und Unbrauchbarer dirchischtigkeit bei Musikdarbietung*. Acustica vol. 32, 126-132. 1975.
- [16] http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Santiago_de_Compostela_plan_vertical.jpg acessado em Junho de 2009.
- [17] <http://images.google.pt/imghp?hl=pt-PT&tab=wi>, acessado em Maio de 2009.
- [18] Knudsen and Harris, *Acoustical Designing in Architecture*, (John Wiley & Sons, 1958, reprinted by the Acoustical Society of America, 1978).
- [19] Parkin, P. H. e Taylor, J. H. *Speech Reinforcement in St. Paul’s Cathedral – Details of the Equipment and Results of Tests*. Março de 1952.

- [20] Raes, Auguste C. e Sacerdote, Gino G. *Measurements of the Acoustics Properties of Two Roman Basilicas*. The journal of the Acoustical Society of America, vol. 25, nº 5. Setembro de 1953.
- [21] McCandless, D. e Lane, R. N. *Acoustics of St. Luke's Episcopal Church*. 65th Meeting of the Acoustical Society of America, Maio 1963.
- [22] Shankland, R. S. e Shankland, H. K. *Acoustical of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome*. The journal of the Acoustical Society of America, vol. 50, nº 2 (Part 1). Abril de 1971.
- [23] Fitzroy, D. *The sounds of St. Mary's*. The journal of the Acoustical Society of America, vol. 54, nº 2. 1973.
- [24] Tzekakis, E. G. *Reverberation time of the Rotunda of Thessaloniki*. Aristotle University of Thessaloniki, Greece. The journal of the Acoustical Society of America, vol. 57, nº 5. Maio de 1975.
- [25] Meeks, G. E. *The Church that Rock and Rolls*. 72nd Convention of the Audio Engineering Society. Anaheim, California, EUA. Outubro de 1982.
- [26] Lewers, T. H. e Anderson, J. S. *Some Acoustical Properties of St. Paul's Cathedral, London*. Journal of Sound and Vibration 92 (2), 285 – 297. 1984.
- [27] Lopez, M. C. e Gonzalez, C. G. *Experimental Study of the Acoustic in the Church of Monastery of Santo Domingo de Silos*. *Acustica*, 62. 1987.
- [28] Carvalho, A. P. Oliveira de. *Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*. (Doctoral Dissertation) University of Florida. Dezembro de 1994.
- [29] www.fe.up.pt/~Carvalho/igrejas.htm acedido em Junho de 2009.
- [30] Monteiro, Cândido. *Comparação entre a Acústica de Igrejas Católicas e em Mesquitas* – Dissertação de Mestrado – FEUP. 2008.
- [31] Loureiro, J. P. Gomes. *Metodologia Multi-Critério para Análise da Qualidade Acústica em Igrejas*. – Dissertação de Mestrado – FEUP. 2008.
- [32] <http://www.santuario-fatima.pt/portal/index.php?id=1126> acedido em Abril de 2009.
- [33] http://images.google.pt/imgres?imgurl=http://4.bp.blogspot.com/_1GFHO4FKgqQ/RjsLk5hvxii/AAAAAAG0/cKxGtoKIf1M/s320/fatima5_big.jpg&imgrefurl=http://artesspiritualidade.blogspot.com/2007/05/igreja-da-santissima-trindade-em-fatima.html&usq=__gWqZQAQzgsfTGJlaUftYUOdUXPo=&h=320&w=320&sz=28&hl=pt-PT&start=53&um=1&tbnid=kxFXEJcCeC-vM:&tbnh=118&tbnw=118&prev=/images%3Fq%3Digreja%2Bsant%25C3%25ADssima%2Btrindade%26ndsp%3D18%26hl%3Dpt-PT%26sa%3DN%26start%3D36%26um%3D1 acedido em Maio de 2009.
- [34] *Prémio Secil 2007-Engenharia Civil*. Ordem dos Engenheiros e Secil. Lisboa, Abril de 2008.

- [35] <http://www.dacoustie.com/fichestechniques/ftakustaplan.pdf> acessido em Junho de 2009.
- [36] http://images.google.pt/imgres?imgurl=http://www.bkpt.com/Modelos_SLM_Pacotes_files/2238_80x80novo.jpg&imgrefurl=http://www.bkpt.com/Modelos_SLM_Pacotes.htm&usg=__4OejC0ctj_ILTf0BPfA8fiuRvbY=&h=80&w=80&sz=12&hl=pt-PT&start=11&tbnid=enxdYYDxGDK-3M:&tbnh=74&tbnw=74&prev=/images%3Fq%3Dson%25C3%25B3metro%2BB%2526K%2B2260%26gbv%3D2%26hl%3Dpt-PT acessido em Maio de 2009.
- [37] CEI IEC 268-16, Rapport de la Commission Electrotechnique Internationale. *Equipments pour systèmes électroacoustiques – seizième partie : Evaluation objective de l’intelligibilité de la parole dans les salles de conférence par le méthode RASTI* “. 1988.
- [38] <http://en.wikipedia.org/wiki/Megachurch> acessido em Abril de 2009.
- [39] <http://chestofbooks.com/reference/Bepler-Handy-Manual-Of-Knowledge/Capacity-Seating-Of-Noted-Public-Buildings.html> acessido em Junho de 2009.
- [40] <http://www.angkor.com/2bangkok/2bangkok/forum/archive/index.php/t-226.html> acessido em Junho de 2009.
- [41] <http://www.timesonline.co.uk/tol/comment/faith/article2641435.ece> acessido em Junho de 2009.
- [42] <http://www.flickr.com/photos/eustaquio/3196668166/> acessido em Junho de 2009.
- [43] <http://www.chopintours.com/poland.html> acessido em Junho de 2009.
- [44] Engel, Z. e Kosala, K. *Index Method of The Acoustic Quality Assessment of sacral Buildings*. Archives of Acoustics vol. 29. 2004.
- [45] [9] ANSI S3.5 – *American National Standard Method for Measurement of Speech Intelligibility*. American National Standards Institute. Nova Iorque. 1997.

