



IARA BATISTA DA CUNHA

**A INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE REFORÇO SONORO NA QUALIDADE  
ACÚSTICA DE IGREJAS CATÓLICAS**

CAMPINAS  
2014





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

IARA BATISTA DA CUNHA

## **A INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE REFORÇO SONORO NA QUALIDADE ACÚSTICA DE IGREJAS CATÓLICAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Mestra em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Orientadora: PROF<sup>ª</sup> DR<sup>ª</sup> STELAMARIS ROLLA BERTOLI

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA IARA BATISTA DA CUNHA E ORIENTADA PELA PROF<sup>ª</sup>. DR<sup>ª</sup>. STELAMARIS ROLLA BERTOLI.

---

Campinas,  
2014

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C914i Cunha, Iara Batista, 1987-  
A influência dos sistemas de reforço sonoro na qualidade acústica de igrejas católicas / Iara Batista da Cunha. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Stelamaris Rolla Bertoli.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Acústica arquitetônica. 2. Igrejas. 3. Fala - Inteligibilidade. 4. Eletroacústica.  
I. Bertoli, Stelamaris Rolla, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Influence of sound reinforcement systems on the acoustical quality of catholic churches

**Palavras-chave em inglês:**

Architectural acoustics

Churches

Speaks - Intelligibility

Electroacoustic

**Área de concentração:** Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**Titulação:** Mestra em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**Banca examinadora:**

Stelamaris Rolla Bertoli [Orientador]

Maria Lucia Gondim da Rosa Oiticica

Silvia Aparecida Mikami Gonçalves Pina

**Data de defesa:** 02-07-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Arquitetura, Tecnologia e Cidade

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**A INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE REFORÇO SONORO NA  
QUALIDADE ACÚSTICA DE IGREJAS CATÓLICAS**

**Iara Batista da Cunha**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



**Profa. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli  
Presidente e Orientadora/UNICAMP**



**Profa. Dra. Maria Lucia Gondim da Rosa Oiticica  
UFAL**



**Profa. Dra. Silvia Aparecida Mikami Gonçalves Pina  
UNICAMP**

Campinas, 02 de julho de 2014



## RESUMO

Nas práticas litúrgicas da Igreja Católica, fala e música compõem as principais atividades, portanto, a qualidade acústica nas igrejas é essencial. Atualmente, do ponto de vista acústico, a compreensão da palavra é a necessidade mais relevante dos ritos católicos. Os sistemas de reforço sonoro (SRS) são utilizados como auxílio na resolução de alguns problemas recorrentes nestes espaços que atingem a qualidade da compreensão da fala, como a dificuldade do alcance da voz humana a grandes distâncias ou a interferência de ruídos urbanos no ambiente interno. Esta pesquisa se propõe a investigar o uso destes sistemas e sua influência na resposta acústica das igrejas, com ênfase na inteligibilidade da palavra. Para isso, três igrejas católicas de diferentes volumes situadas na cidade de Campinas, SP foram avaliadas segundo os parâmetros acústicos Tempo de Reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT) e Definição (D50), em bandas de oitava entre 125Hz e 4kHz, além do Índice de Transmissão da Fala (STI) e da Perda de Articulação de Consoantes (ALcons). As medições foram feitas pelo método de resposta impulsiva, em duas situações: com o sinal ligado no SRS e com o sinal ligado na fonte padrão omnidirecional. Desta forma, caracteriza-se cada ambiente nas condições com e sem o sistema de sonorização, permitindo a comparação de dados entre estas duas situações. Em todos os casos sem o uso do SRS, os edifícios apresentaram condições acústicas desfavoráveis para a compreensão da fala. O SRS mostrou diferenças favoráveis para inteligibilidade na maior parte dos resultados. No entanto, quando a resposta acústica do edifício não proporciona uma qualidade positiva, o SRS não foi suficiente para elevar a avaliação qualitativa da inteligibilidade para resultados ideais.

Palavras-chave: acústica arquitetônica, igrejas, inteligibilidade, sistemas de reforço sonoro.



## ABSTRACT

During Catholic services, speech and music are the main activities, thus, acoustical quality in the churches is essential. Currently, from the acoustic view, the understanding of words is the most important need of Catholic rites. The sound reinforcement systems (SRS) are used as a support in solving some recurring problems in these buildings, such as the difficulty for human voice to reach great distances or due to interference from urban noise in the indoor environment. This research intends to investigate the use of these systems and their influence on the acoustic response of the churches, with emphasis on speech intelligibility. For this, three Catholic churches of different volumes, located in the city of Campinas, SP, were evaluated according to the acoustic parameters Reverberation Time (RT), Early Decay Time (EDT) and Definition (D50), in octave bands between 125 Hz and 4 kHz, and the Speech Transmission Index (STI) and Articulation Loss of Consonants (ALcons). Measurements were made by the impulse response method, through two different situations: with the test signal injected directly on the sound system and using the omnidirectional sound source. In all cases, without the use of SRS, the buildings showed unfavorable conditions for the acoustic speech understanding. The SRS revealed positive differences for intelligibility in most of the results. However, when the acoustic response of the building itself does not provide a good quality for speech understanding, the SRS was not sufficient to raise the quality of intelligibility for optimal results.

Keywords: architectural acoustics, churches, intelligibility, PA systems.



# SUMÁRIO

Resumo .....	vii
Abstract .....	ix
Dedicatória .....	xv
Agradecimentos.....	xvii
Lista de Figuras .....	xxi
Lista de Tabelas .....	xxvii
Lista de Parâmetros Acústicos.....	xxix
1. Introdução .....	1
1.1 Objetivo geral .....	3
1.2 Objetivos Específicos .....	3
1.3 Estrutura do trabalho .....	3
2. Fundamentação .....	5
2.1 Acústica de salas e parâmetros de avaliação .....	5
2.1.1 Ruído de Fundo.....	7
2.1.2 Tempo de Reverberação (TR) .....	10
2.1.3 Tempo de Decaimento Inicial (EDT) .....	13
2.1.4 Definição (D50) .....	14

2.1.5 Índice de Transmissão da Fala (STI).....	15
2.1.6 Perda de articulação de consoantes (ALcons).....	18
2.1.7 Diferença mínima perceptível (JND).....	20
2.2 Normatização.....	22
2.2.1 ISO 3382-1 .....	22
2.2.2 IEC 60268-16.....	24
2.3 Sistemas de reforço sonoro.....	27
2.3.1 Componentes do sistema de reforço sonoro.....	28
2.3.2 Posicionamento das caixas de som .....	34
2.3.3 Avaliação da inteligibilidade do sistema .....	37
3. Acústica em Igrejas.....	39
3.1 Acústica e edifícios católicos .....	39
3.2 Pesquisas sobre acústica de igrejas.....	44
4. Materiais e Métodos .....	49
4.1 Edifícios selecionados.....	50
4.1.1 Igreja de Sant'Ana.....	51
4.1.2 Basílica Nossa Senhora do Carmo .....	53
4.1.3 Igreja Santa Rita de Cássia.....	57
4.1.4 Dados gerais .....	60
4.2 Parâmetros Acústicos .....	60
4.3 Medições .....	61
5. Resultados e Discussões .....	65
5.1 Igreja de Sant'Ana.....	65
5.1.1 Ruído de Fundo.....	68

5.1.2 Tempo de Reverberação (TR) .....	69
5.1.3 Tempo de Decaimento Inicial (EDT) .....	73
5.1.4 Definição (D50) .....	76
5.1.5 Índice de Transmissão da Fala (STI) e Perda de Articulação de Consoantes (ALcons). 79	
5.2 Basílica de Nossa Senhora do Carmo .....	81
5.2.1 Ruído de Fundo.....	82
5.2.2 Tempo de Reverberação (TR) .....	84
5.2.3 Tempo de Decaimento Inicial (EDT) .....	88
5.2.4 Definição (D50) .....	92
5.2.5 Índice de Transmissão da Fala (STI) e Perda de Articulação de Consoantes (ALcons). 98	
5.3 Igreja de Santa Rita de Cássia.....	101
5.3.1 Ruído de Fundo.....	103
5.3.2 Tempo de Reverberação (TR) .....	105
5.3.3 Tempo de Decaimento Inicial (EDT) .....	108
5.3.4 Definição (D50) .....	112
5.3.5 Índice de Transmissão da Fala (STI) e Perda de Articulação de Consoantes (ALcons)116	
5.4 Discussões gerais .....	119
6. Conclusões .....	127
Referências .....	131
Apêndice A.....	137
Apêndice B.....	143
Apêndice C.....	151
Apêndice D.....	153



## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, **Carlos** e **Tânia**. Porque todas as minhas conquistas também são deles.



## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa, de acordo com o processo nº 2012/11570-0.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro inicial concedido, com bolsa de caráter emergencial pertencente ao Programa de Demanda Social.

À Professora Dra. Stelamaris R. Bertoli, mais que uma orientadora, um exemplo de mestre, pela sabedoria, alegria e carinho com que me ajudou a conduzir este trabalho.

À administração das Igrejas de Sant'Ana, Santa Rita de Cássia e Basílica de N. S. do Carmo, que gentilmente cederam seus espaços, permitindo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos de som, Adelson Ruffi e Dimas D'Amico, pelo gentil suporte na utilização de seus sistemas de sonorização.

Aos professores do Departamento de Arquitetura e Construção da FEC, pela nobre tarefa de compartilhar conhecimento.

À minha irmã, Aline, pela cumplicidade fraternal, que apenas quem compartilha uma família pode compreender.

A Renato Cot e Olivia Cot, meus padrinhos adotados, pelo amor de pais.

A Claudia Cot e Daniel Cot, por uma vida de amizade.

A Roberta Smiderle, Alexandre Maiorino e Obadias Silva Jr., mais que amigos, anjos da guarda. Vocês foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos amigos Maria Clara Cavalini, Daniel Celente, Aline Lisot, Rodolfo Thomazelli, João Carlos Leite, Tiago Mattos e Roberto Mojolla, pela amizade, companheirismo e cumplicidade.

Por fim, agradeço a todos os familiares, amigos ou colegas, que de alguma forma estiveram comigo e fizeram parte deste caminho, nos momentos de alegria ou desânimo, de tranquilidade ou angústia. A todos vocês, de coração, MUITO OBRIGADA!



*"A alegria que se tem em pensar e aprender faz-nos pensar e aprender ainda mais."*

*Aristóteles*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico de resposta impulsiva .....	7
Figura 2: Curvas de classificação NC.....	9
Figura 3: Gráfico dos tempos ótimos de reverberação para os diferentes usos e dimensões do ambiente.....	12
Figura 4: Tempo de Reverberação Ótimo (500 – 1000 Hz) para auditórios e instalações similares. ....	12
Figura 5: Relação simplificada entre inteligibilidade da fala e modulação.....	16
Figura 6: Valores para avaliação da inteligibilidade da fala. ....	20
Figura 7: Principais componentes do sistema de reforço sonoro.....	29
Figura 8: Exemplo de gráficos de direcionalidade de microfones: omnidirecional (a), direcional ou cardioide (b), bidirecional ou figura de oito (c).....	30
Figura 9: Exemplo de componentes de um sistema de reforço sonoro. ....	32
Figura 10: Desenho esquemático mostrando os princípios operacionais de um alto-falante tipo cone pelos movimentos de repulsão (a) e atração (b) proporcionados pela relação do campo magnético dos componentes do sistema.....	33
Figura 11: Devido à radiação direcional das altas frequências, o ouvinte deverá sentar-se o mais próximo possível do eixo do alto-falante para escutar bem tanto as baixas quanto as altas frequências. ....	34
Figura 12: Ilustração do posicionamento de um sistema de cluster centralizado.....	35
Figura 13: Ilustração de um auditório com um sistema “split” formado por duas caixas laterais. ....	36

Figura 14: Sistema de alto-falantes distribuídos, utilizado no teto da sala. ....	37
Figura 15: Basílica romana de Maxenitus.....	40
Figura 16: Antiga Basílica de São Pedro (330 d.C.) – Roma, Itália.....	41
Figura 17: Croqui de seção transversal e imagem interna de uma típica catedral gótica – Catedral de Amiens, França. ....	42
Figura 18: Localização da Igreja de Sant’Ana. ....	52
Figura 19: Vista externa (a) e interna (b) da Igreja de Sant’Ana .....	52
Figura 20: Planta-baixa principal da Igreja de Sant’Ana.....	53
Figura 21: Corte longitudinal da Igreja de Sant’Ana.....	53
Figura 22: Igreja que abrigou a antiga Matriz do Carmo.....	54
Figura 23: Localização da Basílica do Carmo. ....	56
Figura 24: Vista externa (a) e interna (b) da Basílica de Nossa Senhora do Carmo. ....	56
Figura 25: Planta-baixa principal da Basílica de Nossa Senhora do Carmo.....	57
Figura 26: Corte longitudinal da Basílica de Nossa Senhora do Carmo. ....	57
Figura 27: Localização da Igreja de Santa Rita. ....	58
Figura 28: Vista externa (a) e interna (b) da Igreja de Santa Rita de Cássia. ....	59
Figura 29: Planta-baixa principal da Igreja Santa Rita de Cássia. ....	59
Figura 30: Corte longitudinal da Igreja Santa Rita de Cássia.....	60
Figura 31: Configuração de medição através de injeção direta do sinal em um sistema de som.62	
Figura 32: Planta baixa com localização dos pontos receptores e fontes sonoras – Igreja de Sant’Ana.....	66
Figura 33: (a) Imagem da caixa de som de retorno PA(R1), localizada no altar, e (b) imagem da caixa de som PA(L4), localizada na parte traseira da nave. ( ) .....	67
Figura 34: Vista a partir do centro da nave, em direção ao altar, da Igreja de Sant’Ana .....	67
Figura 35: Localização da Igreja de Sant’Ana (azul) e seu entorno, com indicação de áreas de comércio e serviços (amarelo) e da Rua Cel. Alfredo Augusto do Nascimento(1). ....	69
Figura 36 – Valores de TR, em função de frequência para o sistema PA (a) e fonte S1 (b), com curva de valores médios (Med) e curvas de desvio padrão (s) – Igreja de Sant’Ana.....	70
Figura 37 – Valores de TR, em função de frequência, das médias espaciais entre receptores –	

Igreja de Sant’Ana.....	70
Figura 38: Gráfico de tempos ótimos de reverberação (500Hz) em função do volume, apresentado pela norma NBR 12179, com indicação de $TR_{500Hz}$ relativo ao volume da Igreja de Sant’Ana.....	72
Figura 39 – Valores de EDT, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Sant’Ana.....	74
Figura 40: Comparação entre valores de $TR_{med}$ e $EDT_{med}$ , em função dos pontos receptores, para as fontes do sistema PA (a) e fonte S1 (b).....	75
Figura 41: Valores de D50, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Sant’Ana.....	77
Figura 42: Valores de $D50_{med}$ , em função dos pontos receptores, para cada situação de fonte (PA e S1). .....	78
Figura 43: Valores de STI em função dos pontos receptores – Igreja de Sant’Ana .....	79
Figura 44: Planta baixa com localização dos pontos receptores e fontes sonoras – Basílica do Carmo .....	82
Figura 45: Vistas de uma das caixas de som localizadas nas paredes das naves laterais – Basílica N. S. do Carmo. ....	82
Figura 46: Localização da Basílica de N. S. do Carmo (azul) e entorno. Com indicação da Av. Benjamin Constant (1), Rua Barreto Leme (2), Rua Barão de Jaguará (3) e Rua Sacramento (4). 84	
Figura 47: Valores de TR, em função de frequência para o sistema PA (a) e fonte S1 (b), com curva de valores médios (Med) e curvas de desvio padrão (s) – Basílica do Carmo. ....	85
Figura 48: Valores de TR, em função de frequência, das médias espaciais entre receptores – Basílica do Carmo. ....	86
Figura 49: Gráfico de tempos ótimos de reverberação (500Hz) em função do volume, apresentado pela norma NBR 12179, com indicação de $TR_{500Hz}$ relativo ao volume da Basílica do Carmo. ....	87
Figura 50: Valores de EDT, em função de frequência, para cada ponto receptor – Basílica do Carmo. ....	89
Figura 51: Comparação entre valores de $TR_{med}$ e $EDT_{med}$ , em função dos pontos receptores, para	

as fontes PA e S1 – Basílica do Carmo .....	92
Figura 52: Valores de D50, em função de frequência, para cada ponto receptor – Basílica do Carmo. ....	93
Figura 53: Representação do som direto da fonte S1 para os receptores da audiência – Basílica do Carmo. ....	95
Figura 54: Representação do som direto das fontes PA(L3) e PA(L4) para os receptores ao fundo da audiência – Basílica do Carmo .....	96
Figura 55: Valores de $D50_{med}$ , em função dos pontos receptores, para cada situação de fonte (PA e S1) – Basílica do Carmo.....	97
Figura 56: Valores de STI (a) e ALcons (b) em função dos pontos receptores – Basílica do Carmo. ....	99
Figura 57: Planta baixa com localização dos pontos receptores e fontes sonoras – Igreja de Santa Rita.....	102
Figura 58: Exemplos das caixas de som posicionadas na nave principal (a), setores laterais (b) e caixas de retorno do altar (c).....	102
Figura 59: Localização da Igreja de Sta. Rita (azul) e entorno. Com destaque para áreas de uso comercial (amarelo), prestação de serviços (roxo), Av. Dr. Jesuíno Marcondes Machado (1).e Rua Eng. Carlos Stevenson. ....	104
Figura 60: Fachada sudoeste da Igreja de Santa Rita. ....	104
Figura 61: Valores de TR, em função de frequência para o sistema PA (a) e fonte S1 (b), com curva de valores médios (Med) e curvas de desvio padrão (s) – Igreja de Santa Rita.....	106
Figura 62: Valores de TR, em função de frequência, das médias espaciais entre receptores – Igreja de Santa Rita.....	106
Figura 63: Gráfico de tempos ótimos de reverberação (500Hz) em função do volume, apresentado pela norma NBR 12179 (1992), com indicação de $TR_{500Hz}$ relativo ao volume da Igreja de Santa Rita.....	107
Figura 64: Valores de EDT, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Santa Rita.....	109
Figura 65: Comparação entre valores de $TR_{med}$ e $EDT_{med}$ , em função dos pontos receptores, para	

as fontes do sistema PA (a) e fonte S1 (b) – Igreja de Santa Rita. ....	110
Figura 66: Valores de D50, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Santa Rita.....	112
Figura 67: Representação do som direto que parte das fontes PA(L1), PA(L2) e PA(L3), em direção ao receptor R05 – Igreja de Santa Rita.....	115
Figura 68: Valores de $D50_{med}$ , em função dos pontos receptores, para cada situação de fonte (PA e S1) – Ig. Sta. Rita. ....	116
Figura 69: Valores de STI (a) e ALcons (b) em função dos pontos receptores – Igreja de Santa Rita.....	117
Figura 70: Médias espaciais (entre receptores) para cada situação de fonte (PA e S1) dos parâmetros TR (a – c), EDT (d – f) e D50 (g – i), nas três igrejas avaliadas. ....	120
Figura 71: Representação som direto das caixas de som. PA(L1) e PA(L2) que contribuem para a energia inicial dos pontos R03, R04, R05 e R06. As caixas PA(L3) a PA(6) contribuem para a energia reverberante, em relação aos receptores citados. ....	122



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis de pressão sonora correspondentes às curvas NC (NBR 10152, 1987).....	10
Tabela 2. Escala de avaliação para os valores de STI (GADE, 2007).....	18
Tabela 3: Avaliação para valores de ALcons (AHNERT; TENHARDT, 2002).....	19
Tabela 4: Escala de avaliação qualitativa do parâmetro ALcons, de acordo com STI.....	20
Tabela 5: Parâmetros acústicos analisados e seus respectivos valores de “diferença mínima perceptível” (JND).....	21
Tabela 6: Parâmetros acústicos agrupados de acordo com indicações subjetivas (ISO 3382-1:2009).....	23
Tabela 7: Aplicabilidade dos testes de inteligibilidade da fala (IEC 60268-16, 2011).....	26
Tabela 8: Resumo das principais referências, indicando o foco da pesquisa e os parâmetros considerados.....	48
Tabela 9: Principais parâmetros arquitetônicos das igrejas selecionadas.....	60
Tabela 10: Níveis de ruído de fundo em função de frequência, com a respectiva classificação NC, e nível global – Igreja de Sant’Ana .....	68
Tabela 11: Comparação de tempos de reverberação médios entre a Igreja de Sant’Ana e igrejas de volumes semelhantes.....	72
Tabela 12: Distâncias entre pontos de fonte sonora e receptores .....	75
Tabela 13: Tempos de atraso do som direto dos pontos de fonte sonora até os receptores.....	78
Tabela 14: Valores de STI para cada ponto receptor e fontes sonoras – Igreja de Sant’Ana .....	80
Tabela 15: Valores de ALcons para cada ponto receptor e fontes sonoras – Igreja de Sant’Ana ..	80
Tabela 16: Escala de avaliação qualitativa dos parâmetros STI e ALcons.....	80

Tabela 17: Níveis de ruído de fundo em função de frequência, com a respectiva classificação NC, e nível global – Basílica do Carmo .....	83
Tabela 18: Comparação de tempos de reverberação médios entre a Basílica do Carmo e igrejas de volumes semelhantes .....	87
Tabela 19: Distâncias entre pontos de fonte sonora e receptores – Basílica do Carmo. ....	91
Tabela 20: Tempos de atraso do som direto, a partir dos pontos de fonte sonora até os receptores.....	97
Tabela 21: Valores de STI para cada ponto receptor e fontes sonoras – Basílica do Carmo.....	99
Tabela 22: Valores de ALcons para cada ponto receptor e fontes sonoras – Basílica do Carmo.	99
Tabela 23: Escala de avaliação qualitativa dos parâmetros STI e ALcons .....	100
Tabela 24: Níveis de ruído de fundo em função de frequência, com a respectiva classificação NC, e nível global – Igreja de Santa Rita.....	103
Tabela 25: Comparação de tempos de reverberação médios entre a Igreja de Santa Rita e igrejas de volumes semelhantes .....	108
Tabela 26: Distâncias entre pontos de fonte sonora e receptores – Igreja de Santa Rita.....	111
Tabela 27: Tempos de atraso do som direto a partir das fontes sonoras até os receptores. ....	114
Tabela 28: Valores de STI para cada ponto receptor e fontes sonoras – Igreja de Santa Rita. ...	117
Tabela 29: Valores de ALcons para cada ponto receptor e fontes sonoras – Igreja de Santa Rita. ....	117
Tabela 30: Escala de avaliação qualitativa dos parâmetros STI e ALcons.....	118
Tabela 31: Resumo dos parâmetros arquitetônicos e acústicos.....	121
Tabela 32: Médias espaciais (entre receptores) dos parâmetros STI e ALcons para as três igrejas avaliadas. ....	124

## LISTA DE PARÂMETROS ACÚSTICOS

ALcons	Perda de articulação de consoantes
BR	Razão de graves
C50	Clareza (fala)
C80	Clareza (música)
D	Diferença de nível
D50	Definição
EDT	Tempo de decaimento inicial
G	Força sonora
IACC	Coefficiente de correlação cruzada interaural
ITDG	Tempo de atraso inicial
$J_{LF}$	Fração de energia lateral
L	Sonoridade
$L_{Aeq}$	Nível de pressão sonora equivalente, ponderado em A
LF	Fração lateral
LG	Nível relativo de energia lateral tardia
$L_j$	Energia sonora lateral tardia
$L_p$	Nível sonoro
RASTI	Índice de transmissão da fala para ambientes
SII	Índice de inteligibilidade da fala
SIL	Nível de interferência da fala
SNR	Razão sinal-ruído

ST	Suporte
STI	Índice de transmissão da fala
STIPA	Índice de transmissão da fala para sistemas PA
STITEL	Índice de transmissão da fala para sistemas de telecomunicações
TR	Tempo de reverberação
Tr	Razão de agudos
T <sub>s</sub>	Tempo central

# 1. INTRODUÇÃO

A maior parte das atividades humanas, atualmente, está ligada a espaços fechados. Diariamente experimentamos manifestações sonoras, sejam em ambientes comuns do cotidiano, como residências e escritórios, ou ainda espaços mais complexos como igrejas, museus, escolas, ou teatros. Com isso, mesmo que de forma inconsciente, podemos perceber se estes espaços são acusticamente satisfatórios ou não (KUTTRUFF, 2009).

Segundo Rossing (2007), o discurso é o nosso principal instrumento de comunicação, além da voz humana ser o nosso mais antigo instrumento musical. A fala e a música, portanto, são nossos principais meios de comunicação e expressão. No entanto, as atividades que envolvem estas manifestações sonoras possuem necessidades acústicas divergentes. Gade (2007) afirma que, quando se tem uma sala muito reverberante, a inteligibilidade da fala é prejudicada, pois alguns elementos sonoros tendem a sobrepor-se a outros. No entanto, para a música, a reverberação pode adicionar uma plenitude atraente ao som ligando notas adjacentes e misturando sons de diferentes instrumentos e vozes em um conjunto. Desta forma, os espaços destinados a usos múltiplos são acusticamente complexos, pois abrigam manifestações sonoras com diferentes necessidades.

As transformações da sociedade, ao longo da história, estiveram fortemente ligadas à religião, aos ritos e às diferentes formas de adoração a uma entidade superior. As igrejas sempre tiveram importância fundamental para a sociedade, por serem espaços especificamente destinados à oração, mas frequentemente usados para diferentes propósitos como discurso, música instrumental e música de coro (CIRILLO; MARTELLOTTA, 2006). Na Igreja Católica a maior parte das atividades religiosas é constituída de fala ou música, portanto, a qualidade

acústica desses espaços é essencial para o seu bom uso.

A religião cristã sofreu diversas transformações na sua liturgia ao longo do tempo, assim como na forma de construção das suas igrejas. Dentre essas mudanças litúrgicas ressaltase a alteração do uso do idioma Latim para a língua nacional de cada país durante as celebrações, ocorrida após a constituição do Concílio Vaticano II, em 1965. Cirillo e Martellotta (2006) mostram que do ponto de vista acústico, a reforma litúrgica trouxe uma questão significativa relacionada à inteligibilidade da palavra falada. O uso da linguagem vernácula permitiu que a comunidade realmente entendesse o que estava sendo dito, depois de anos de discursos incompreensíveis em Latim.

Atualmente, a preocupação com a inteligibilidade da palavra nas igrejas é crescente. Enquanto no período medieval a música era a atividade que tinha mais ênfase para a Igreja, hoje o discurso tomou seu lugar e a compreensão do que está sendo dito, ou mesmo cantado, é fundamental. A acústica de uma igreja deve então proporcionar ao ouvinte, independente de sua localização, a boa percepção da palavra. Além disso, ainda deve-se buscar um ambiente musical tão bom quanto a inteligibilidade permitir (CARVALHO; NASCIMENTO, 2010).

Com o crescente aumento do ruído urbano, torna-se cada vez mais difícil para a voz humana competir com estes sons indesejados, principalmente quando não há uma boa concepção de isolamento acústico do edifício. Além disso, as atividades que envolvem a compreensão da fala se deparam com o problema do alcance da voz humana ao ouvinte mais distante, bastante recorrente nas igrejas devido às suas dimensões elevadas. As dificuldades na compreensão da fala podem ainda ser agravadas pelo ruído interno no ambiente, gerado pela movimentação da própria audiência. Neste aspecto, o uso dos equipamentos eletroacústicos nas igrejas é visto como uma forma de auxílio na resolução destes problemas, diretamente ligados à inteligibilidade da palavra seja cantada ou falada.

Neste contexto, o presente trabalho se propõe a investigar a influência dos equipamentos eletroacústicos, utilizados como auxílio no reforço sonoro das celebrações litúrgicas, na inteligibilidade da palavra de um grupo de igrejas católicas da cidade de Campinas (SP).

Pretende-se avaliar o uso dos sistemas de sonorização buscando respostas a respeito

de sua aplicação no edifício e a relação com sua acústica arquitetônica. Questiona-se a eficiência dos sistemas de sonorização na solução dos problemas que afetam a inteligibilidade da palavra; como se dá a relação entre fonte sonora e receptor ao se alterar o tipo e o posicionamento da fonte e quais as consequências das características acústicas do edifício no uso dos sistemas eletroacústicos.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a influência dos sistemas de reforço sonoro (SRS) na inteligibilidade da palavra em igrejas católicas com diferentes características arquitetônicas.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar quais parâmetros acústicos são influenciados pelo uso dos SRS.
- Identificar, dentre os parâmetros acústicos avaliados, as alterações devido à distribuição das fontes sonoras.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos principais. Este primeiro se refere à introdução, onde tivemos uma apresentação geral sobre o tema a ser desenvolvido, sua relevância e os objetivos da pesquisa.

No capítulo dois estão os principais fundamentos a respeito da avaliação acústica de salas, os parâmetros acústicos mais utilizados para a avaliação da inteligibilidade da palavra, a apresentação das normas atuais voltadas à avaliação acústica de salas, além de uma breve descrição dos sistemas de reforço sonoro e seus principais componentes, aplicações em ambientes fechados e os parâmetros de avaliação da inteligibilidade dos sistemas.

No terceiro capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica que trata de uma visão histórica dos edifícios religiosos católicos e a relação da acústica destes edifícios com a

arquitetura e os ritos de cada época descrita. Este capítulo também mostra as principais pesquisas recentemente desenvolvidas sobre acústica de igrejas e quais são os parâmetros utilizados para as avaliações.

No capítulo quatro estão apresentados os edifícios selecionados como objetos de estudo e a descrição do equipamento e a metodologia da pesquisa.

No quinto capítulo está a apresentação dos resultados obtidos a partir dos dados coletados, bem como as discussões e interpretação dos dados. E o sexto capítulo é dedicado às conclusões a respeito do exposto.

Neste trabalho há ainda quatro apêndices. No Apêndice A estão os desenhos arquitetônicos (plantas e cortes) das igrejas avaliadas. No Apêndice B encontram-se as tabelas com os resultados das medições acústicas. No Apêndice C há os dados de temperatura e umidade do ar, registrados durante as medições acústicas. E no Apêndice D estão as definições dos parâmetros acústicos citados ao longo do texto de revisão bibliográfica, mas que não foram descritos no capítulo de fundamentação.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

Neste capítulo encontram-se os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho. A fundamentação teórica baseia-se em três pontos principais: i) avaliação acústica de salas e os parâmetros adotados; ii) as normas que especificam os processos de medições acústicas e iii) os sistemas de reforço sonoro utilizados em ambientes fechados e os aspectos principais de sua avaliação.

### 2.1 ACÚSTICA DE SALAS E PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

Durante uma atividade em um ambiente, que esteja relacionada ao discurso ou música, podemos perceber diferenças no comportamento sonoro entre uma sala ou outra. Essas diferenças podem ser traduzidas por sonoridades agradáveis ou incômodas, permitindo até mesmo a um leigo identificar preferências auditivas entre salas.

A partir destas percepções, estudiosos acústicos começaram a investigar que tipo de propriedades acústicas diferenciam os ambientes. No final do século XIX, Sabine desenvolveu a equação do tempo de reverberação, que durante alguns anos foi o único parâmetro considerado na avaliação acústica de salas. Com o passar do tempo, novos parâmetros foram desenvolvidos para dar suporte à avaliação acústica de ambientes. Neste sentido, a revolução digital contribuiu para a aquisição de conhecimento sobre o comportamento do som em espaços fechados à medida que simplifica e agiliza a coleta e processamento de informações (MARSHALL, 2010).

Ainda é consenso que o tempo de reverberação é um parâmetro de extrema

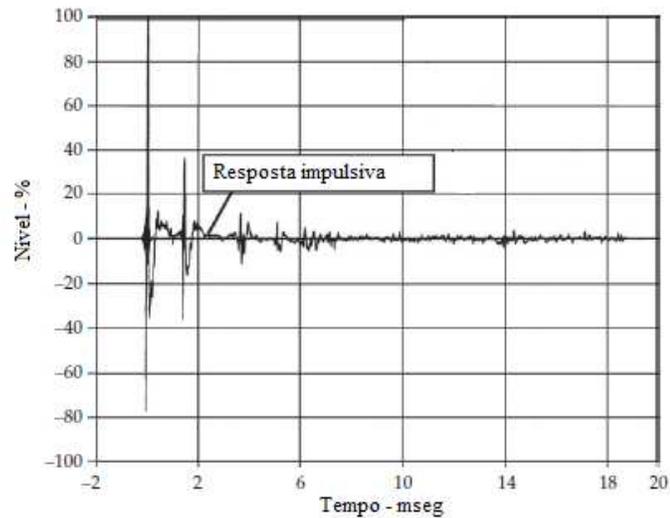
importância, sendo fundamental na avaliação acústica de ambientes fechados. Porém não é mais o único a ser considerado. Atualmente, diversos outros parâmetros acústicos são utilizados para complementar ou aprofundar estes estudos.

O estudo do comportamento acústico de recintos fechados pode ser feito por critérios subjetivos ou objetivos. O primeiro grupo refere-se a aspectos que indicam a qualidade da sensação sonora que os usuários têm de um determinado espaço. Para cada um destes atributos subjetivos, é possível associar um ou mais parâmetros equivalentes que são objetivamente mensuráveis. Os parâmetros objetivos podem ser ainda divididos entre os critérios de tempo e de energia.

Atualmente, para se calcular os parâmetros objetivos, uma das técnicas mais utilizadas é a de “resposta impulsiva”. Esta técnica é reconhecida pela Organização Internacional para Normatização (*International Organization for Standardization – ISO*) como um dos métodos para se medir tempo de reverberação, além de outros parâmetros acústicos, em uma sala e indicada pela norma ISO 3382-1 (2009). Gade (2007) defende que a resposta ao impulso é a fonte básica que carrega as informações sobre as propriedades acústicas de uma sala.

Barron (2010) apresenta o conceito de resposta impulsiva como o registro da pressão sonora em um ponto de interesse do ambiente, quando um pulso de curta duração é produzido em uma posição relevante de fonte. Grande parte dos parâmetros acústicos utilizados para avaliação de salas pode ser obtida a partir da análise deste registro. De acordo com a ISO 3382-1 (2009), a resposta impulsiva pode ser medida diretamente utilizando fontes de pulso sonoro, como um tiro de pistola, por exemplo, ou ainda a partir do processamento de sinais sonoros especiais, como varreduras de seno e ruídos pseudoaleatórios. A Figura 1 apresenta um exemplo do registro de uma resposta impulsiva.

**Figura 1:** Gráfico de resposta impulsiva



Fonte: EVEREST; POHLMAN, 2009, p. 411 (Tradução da autora).

Neste capítulo são descritos, nos itens de 2.1 a 2.5, alguns parâmetros acústicos que estão dentre os mais utilizados atualmente para a avaliação acústica de salas, com foco na avaliação da inteligibilidade da fala, os quais podem ser obtidos através da resposta impulsiva do ambiente. Descrevem-se também os parâmetros utilizados para avaliação do ruído de fundo, fator de grande interferência na compreensão da palavra.

### 2.1.1 RUÍDO DE FUNDO

Ruído é definido por qualquer tipo de som indesejado, que perturba as atividades desenvolvidas em um determinado ambiente. O nível de ruído em um ambiente é gerado por dois tipos principais de fontes: internas e externas. As fontes internas são aquelas geradas por equipamentos internos, como os de ventilação, ou pela atividade desenvolvida em um ambiente. Em um auditório ou igreja, por exemplo, a própria audiência gera ruído de fundo. As fontes externas, por sua vez, são das mais variadas. O ruído de tráfego é uma das principais fontes de sons perturbadores em um ambiente urbano, que afetam as atividades internas dos edifícios.

Existem vários parâmetros disponíveis para avaliar o ruído de fundo, baseados em medições de níveis de pressão sonoras (BARRON, 2010). A norma brasileira NBR 10152 (1987),

que indica níveis de ruído para conforto acústico, baseia-se em dois parâmetros: o nível de pressão sonora global ponderado pela curva A e a curva de avaliação NC (*Noise Criterion*). Os procedimentos de medição para a avaliação do ruído de fundo são descritos pela NBR 10151 (2000).

Para medir o nível de pressão sonora em ambientes internos, a norma NBR 10151 (2000) descreve a utilização do nível de pressão sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ) dado em decibel ponderado pela curva A (dB(A)). Por definição contida no texto da referida norma, o  $L_{Aeq}$  trata-se do nível obtido a partir do valor médio quadrático da pressão sonora referente ao intervalo de medição. Atualmente os medidores de nível de pressão sonora calculam automaticamente o parâmetro  $L_{Aeq}$  em um dado tempo de medição. Caso o medidor não tenha a função de cálculo do  $L_{Aeq}$ , a norma apresenta um método alternativo de cálculo, segundo a Equação 1 (NBR 10151, 2000, p.4).

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

$L_i$  é o nível de pressão sonora, em dB(A), lido em resposta rápida (*fast*) a cada 5 s, durante o tempo de medição do ruído;

$n$  é o número total de leituras.

A norma NBR 10151 (2000) recomenda que os níveis utilizados para avaliação do ruído interno de um ambiente seja o resultado da média aritmética dos valores de  $L_{Aeq}$  obtidos em pelo menos três posições distintas.

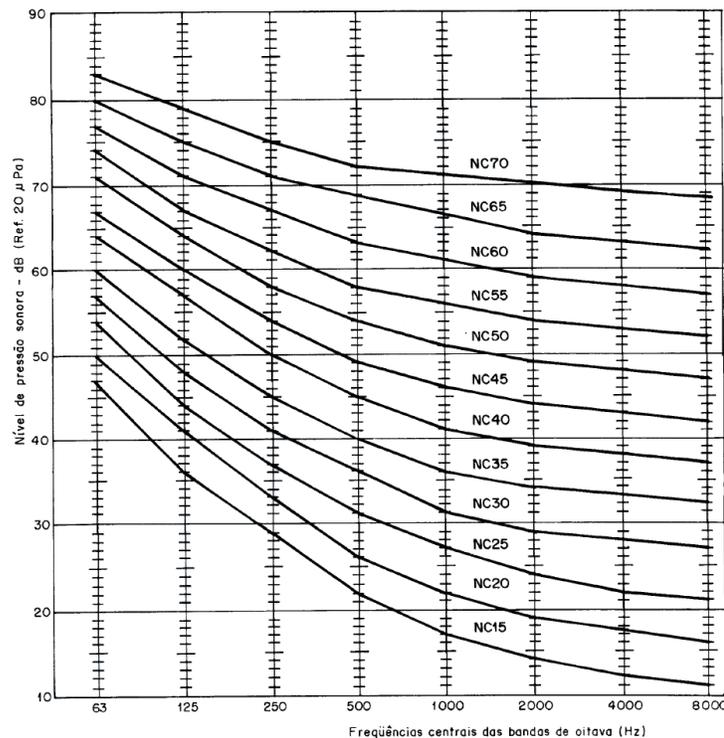
Além das medições de nível sonoro equivalente, a norma NBR 10152 (1987) reconhece a importância da análise de frequências de um ruído. Para isto, o documento indica a avaliação do espectro sonoro pela comparação com as curvas NC (*Noise Criterion*). Este critério foi baseado em estudos subjetivos gerando uma família de curvas de níveis de pressão sonora em bandas de oitava de modo a especificar níveis de ruído de fundo aceitáveis (MEHTA et. al,

1999). Para a avaliação do ruído pelo critério NC as medições dos níveis de pressão sonora, em dB, são feitas em bandas de oitava entre 63 Hz e 8000 Hz.

Segundo Mehta et. al (1999, p. 164), para determinar se um ambiente está de acordo com a classificação NC recomendada por uma determinada norma, compara-se o espectro medido do ruído de fundo com as curvas NC, representadas na Figura 2 (NBR 10152, 1987). A curva NC mais próxima que está completamente acima da curva do ruído em questão é movida para baixo, a cada 1 dB, de modo a tangenciar a curva do ruído. Assim, o valor indicado pela curva NC utilizada, menos o valor em dB movido até tangenciar a curva de ruído, resulta a classificação NC do ruído avaliado. Os níveis de pressão sonora que correspondem às curvas NC estão apresentados na Tabela 1 (NBR 10152, 1987, p. 4).

A norma brasileira NBR 10152 (1987) indica em uma tabela os níveis de ruído para conforto acústico em uma série de ambientes, como hospitais, escolas, residências, dentre outros. Para ambientes classificados como Igrejas ou Templos, a norma indica os intervalos de 40 – 50 dB(A) e NC 35 – 45, sendo o primeiro valor referente ao nível sonoro de conforto e o segundo valor o nível sonoro máximo aceitável para a atividade.

**Figura 2:** Curvas de classificação NC.



Fonte: NBR 10152, 1987, p. 3.

**Tabella 1:** Níveis de pressão sonora correspondentes às curvas NC (NBR 10152, 1987).

Curva NC	63 Hz (dB)	125 Hz (dB)	250 Hz (dB)	500 Hz (dB)	1 kHz (dB)	2 kHz (dB)	4 kHz (dB)	8 kHz (dB)
15	47	36	29	22	17	14	12	11
20	50	41	33	26	22	19	17	16
25	54	44	37	31	27	24	22	21
30	57	48	41	36	31	29	28	27
35	60	52	45	40	36	34	33	32
40	64	57	50	45	41	39	38	37
45	67	60	54	49	46	44	43	42
50	71	64	58	54	51	49	48	47
55	74	67	62	58	56	54	53	52
60	77	71	67	63	61	59	58	57
65	80	75	71	68	66	64	63	62
70	83	79	75	72	71	70	69	68

### 2.1.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO (TR)

O Tempo de Reverberação (TR), traduzido de *Reverberation Time (RT)*, é o parâmetro acústico mais tradicional para se caracterizar acusticamente um ambiente. Seu conceito e procedimento de cálculo datam do final do século XIX, estudado por Wallace C. Sabine. De acordo com Marshall (2010), o surgimento do TR é visto como o início da Acústica Arquitetônica como ciência, e até hoje permanece como um parâmetro fundamental no comportamento sonoro de interiores. Por definição, diz-se que o TR é o tempo gasto para que o nível sonoro na sala decaia 60 dB após o sinal de uma fonte sonora ser interrompido (GADE, 2007).

Sabine considera que o volume do ambiente e sua área de absorção de superfícies são os dois fatores que influenciam na quantificação do tempo de reverberação de uma sala vazia, podendo ser calculado de acordo com a Equação 2.

$$TR = \frac{0,16 \cdot V}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

TR é o tempo de reverberação em segundos,

V é o volume da sala em metros cúbicos,

A é a absorção total do ambiente dada por:

$$A = \sum_n S_n \cdot \alpha_n \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

$S_n$ = Área de absorção de um dado material

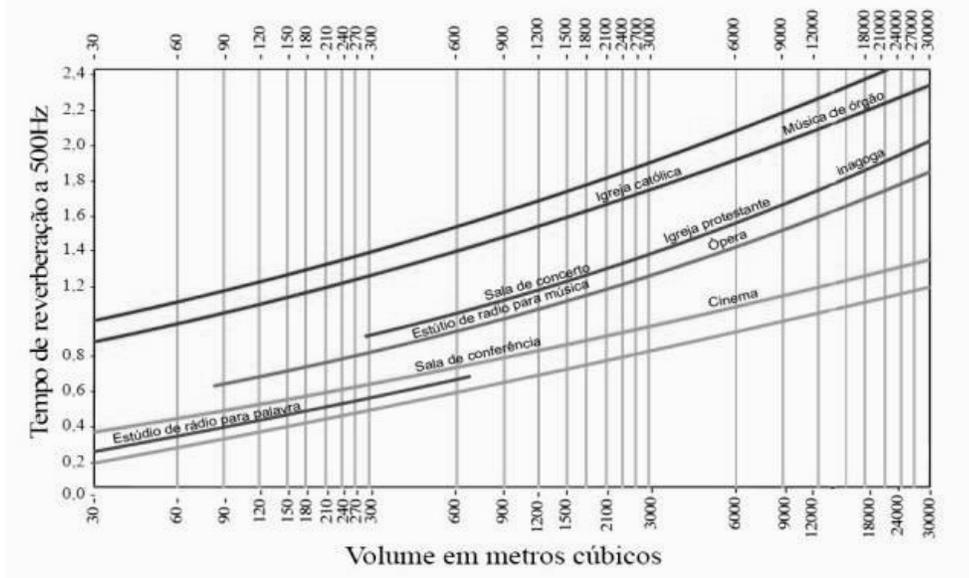
$\alpha_n$ = coeficiente de absorção deste material

Os valores de TR são dados em função de frequência já que os materiais que compõem as superfícies de uma sala têm absorção variada para diferentes frequências e normalmente é avaliado em bandas de oitava. A norma ISO 3382-1 (2009) indica que este parâmetro seja avaliado nas bandas de oitava de 125Hz a 4000Hz. A norma também aponta que para um estudo mais específico ou aprofundado o TR pode ser avaliado em bandas de 1/3 de oitava de 100Hz a 5000Hz. Alguns autores mostram um indicador único, que pode ser utilizado para uma caracterização geral do ambiente. Neste caso usa-se um valor médio do TR entre as bandas de oitava de 500Hz e 1000Hz, chamado de tempo médio de reverberação ou  $TR_{med}$ . É comum também encontrarmos na literatura a menção a um valor único de TR referente apenas à banda de 500Hz.

Long (2006) afirma que a reverberação pode ser a benção ou a maldição do desempenho acústico de um ambiente. Em geral quanto mais conteúdo da fala há em um som menor é o TR ideal, também chamado de TR ótimo, porém um tempo de reverberação mais longo é desejável para música. Desta forma, o TR influencia diretamente na inteligibilidade da fala ou na clareza da música e deve ser adequado para a atividade a ser desenvolvida em um determinado ambiente. Diversos autores fizeram estudos e recomendações sobre o Tempo de Reverberação indicado para diferentes tipos de salas, alguns deles incluem recomendações para igrejas ou espaços de adoração.

A norma brasileira NBR 12179 (1992) apresenta recomendações para o tempo de reverberação, em função do volume, para espaços de diferentes usos (Figura 3). Neste gráfico, observa-se que o TR (em 500 Hz) recomendado para Igrejas Católicas varia de 0,9 s a 2,3 s, dependendo do volume.

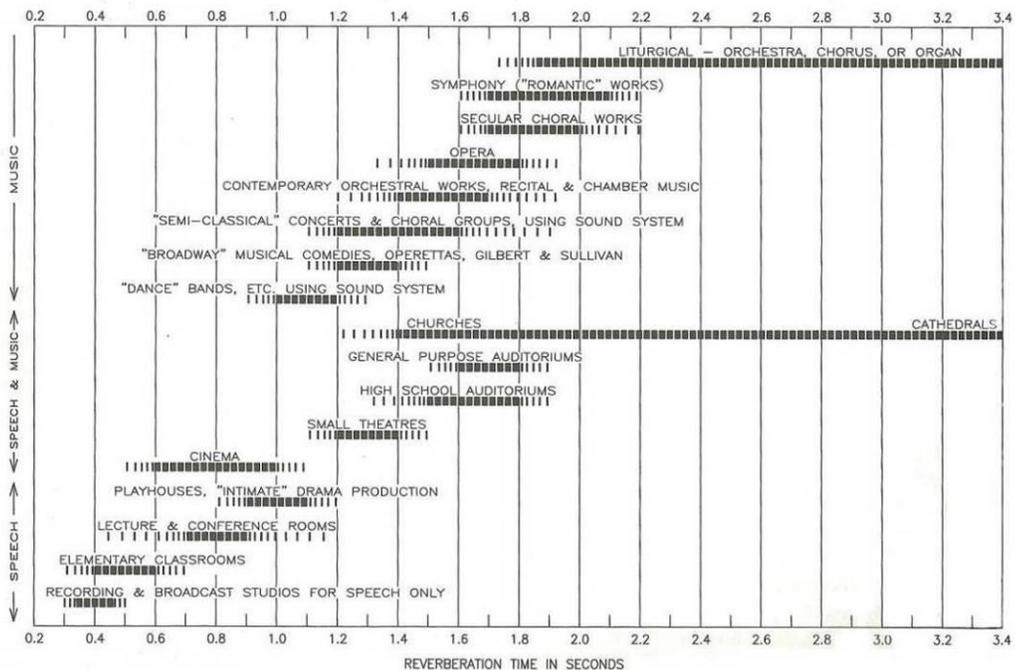
**Figura 3:** Gráfico dos tempos ótimos de reverberação para os diferentes usos e dimensões do ambiente.



Fonte: ABNT NBR 12179, 1992, p. 9.

Marshall (2010) também apresenta um gráfico (Figura 4) para o Tempo Ótimo de Reverberação em auditórios e usos similares. O TR indicado para igrejas neste gráfico ultrapassa o valor de 3,4 s, se considerarmos as catedrais. Observa-se ainda que os espaços destinados à fala estão concentrados na faixa dos menores valores de TR.

**Figura 4:** Tempo de Reverberação Ótimo (500 – 1000 Hz) para auditórios e instalações similares.



Fonte: MARSHALL, 2010, p. 136

Cirillo e Martellotta (2006) também afirmam que, para uma celebração litúrgica diferentes tipos de sons coexistem e cada um requer, idealmente, diferentes tempos de reverberação. Leituras e sermões requerem um TR curto, em geral abaixo de 1 s, para possibilitar uma boa inteligibilidade da palavra. Já para cânticos congregacionais, um TR maior, com cerca de 2 s, é importante para encorajar o senso de participação da comunidade. Os autores também mencionam que música de órgão requer um tempo de reverberação longo, maior que 3 s. Para os autores, a música instrumental, que atualmente substitui os órgãos nas igrejas, necessita de um TR em torno de 1,5 s.

Cirillo e Martellotta (2006) discutem ainda a questão da variação de recomendações de TR para as igrejas, apresentando uma série de autores que indicam tempos de reverberação para esses ambientes religiosos e mostram como são diferentes as opiniões e estudos sobre o assunto. Por fim, apresentam o TR médio típico para ambientes de concerto e uso múltiplo, que variam entre 1 s e 3 s.

Desta forma, observa-se a variação de estudos e recomendações de valores de TR não só para as diferentes atividades, mas também para um mesmo tipo de ambiente, como é o caso das igrejas. Para a presente pesquisa, a principal recomendação adotada para a avaliação dos edifícios será a norma brasileira NBR 12179 (1992).

### 2.1.3 TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT)

A reverberação, quando caracterizada pelos valores medidos de TR, indica um parâmetro característico do ambiente, com pouca significância quanto à localização do receptor. Porém, ao avaliar subjetivamente a sensação de reverberação, sua percepção pode variar de acordo com a localização do ouvinte.

Durante um discurso ou música a parte tardia do decaimento sonoro é mascarada pela próxima sílaba ou nota musical. O ouvinte então percebe apenas a porção inicial da reverberação, fortemente relacionada com o som direto e suas primeiras reflexões que, por sua vez, estão diretamente relacionados à posição da fonte ou do receptor. Desta forma, a porção inicial do decaimento está relacionada com a percepção subjetiva da reverberação.

O tempo de decaimento inicial ou *early decay time* (EDT), é um parâmetro que, assim

como o tempo de reverberação, trata do decaimento sonoro. Porém, o EDT avalia a parte inicial do decaimento, considerando apenas os primeiros 10dB em relação ao som inicial (GADE, 2007).

Geralmente comparam-se os valores de EDT com os de TR. Valores de EDT baixos, em relação aos TR, significam que o receptor percebe menos a reverberância da sala em comparação àqueles que estão em pontos que possuem valores de EDT mais altos.

Uma das formas de relacionar os parâmetros EDT e TR é pela razão EDT/TR. De acordo com Barron (2010), quando o som inicial é refletido diretamente para a audiência, esta razão tende a ser mais baixa. Ou seja, quanto mais energia sonora inicial em relação à reverberante, menor será o valor de EDT em comparação ao TR. Para ambientes de uso múltiplo onde a percepção da música não deve se sobrepor à qualidade da fala, a percepção de “clareza” do som, proporcionada por esta energia sonora inicial, é mais importante que a vivacidade proporcionada pela reverberação. Conclui-se que, neste caso, valores de EDT menores que valores de TR são vantajosos, indicando uma menor sensação de reverberância para o ouvinte.

#### 2.1.4 DEFINIÇÃO (D50)

Um dos aspectos subjetivos de grande importância para a acústica de salas é a “definição” do som, que também influencia na inteligibilidade da fala. Esta percepção está associada à quantidade e distribuição de energia sonora que chega ao ouvinte. Se as primeiras reflexões são desejáveis para a compreensão do discurso, as reflexões tardias poderão prejudicar a inteligibilidade da fala. Em uma catedral, por exemplo, com um longo tempo de reverberação, as reflexões tardias tendem a mascarar as primeiras, tornando o discurso incompreensível a não ser a curtas distâncias entre orador e ouvinte (BARRON, 2010).

Assim, o parâmetro Definição (D50), também conhecido como *Definition* ou *Early-to-total energy ratio*, trata da razão entre a porção inicial da energia sonora recebida nos primeiros 50ms e a energia total do sinal, como indica a Equação 4 (KUTTRUFF, 2009). Nesta equação, entende-se por  $E_{50}$  a energia sonora que chega a até 50ms do som direto, e  $E_{\infty}$  representa a energia total do sinal.

$$D_{50} = \frac{E_{50}}{E_{\infty}} \quad \text{Equação 4}$$

Desta forma, o D50 será igual a um (ou 100%) se toda a energia da resposta impulsiva atingir o receptor dentro do intervalo de 50ms. Barron (2010) afirma que valores de D50 maiores que 0,50 são considerados satisfatórios para a inteligibilidade da palavra. Isso quer dizer que mais de 50% da energia sonora deve estar dentro deste intervalo de tempo, logo, um excesso de reflexões tardias é prejudicial para a inteligibilidade da palavra.

### 2.1.5 ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)

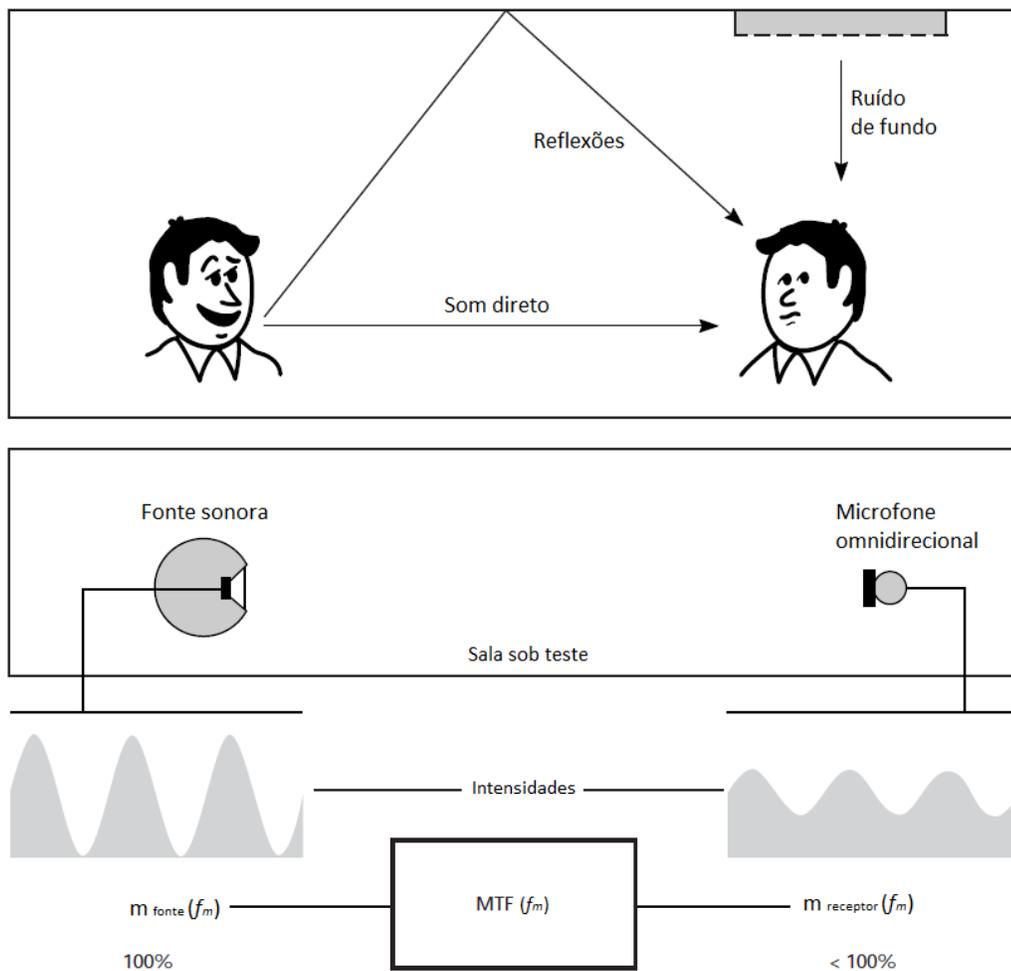
Para se avaliar a qualidade de transmissão da fala, além do comportamento da energia sonora, o ruído presente no ambiente também é um fator de grande interferência. Nesse sentido, o parâmetro STI (índice de transmissão da fala, ou *speech transmission index*) considera, além da reverberação, a relação sinal-ruído, ou SNR (*signal-to-noise ratio*), como aspectos que afetam a inteligibilidade.

O índice de transmissão da fala (STI) é uma medida objetiva para prever a inteligibilidade do discurso transmitido de orador para ouvinte. O método baseia-se na função de transferência modulada e quantifica os efeitos externos ao sinal, como a reverberação ou ruído, em seus componentes espectrais. Qualquer deterioração do espectro modulado resulta em uma redução da inteligibilidade. O STI é então um parâmetro objetivo válido para medir a qualidade da transmissão da fala sob uma ampla gama de distorções acústicas e eletroacústicas que influenciam na inteligibilidade (IEC 60268-16, 2011).

A nota de aplicação do *software* Dirac, da Brüel&Kjær (2003b), sobre medidas de inteligibilidade da fala, explica que quando uma fonte sonora produz um som de intensidade modulada  $m$ , a modulação na posição do receptor será reduzida devido a reflexões provenientes da sala e também ao ruído de fundo. Desta forma, a função de transferência modulada (MTF) descreve até que ponto esta modulação  $m$  é transferida da fonte ao receptor, em função de frequências moduladas  $f_m$ , que variam de 0,63Hz a 12,5Hz, em bandas de 1/3 de oitava. Desta forma, uma matriz deriva os valores da razão de transferência modulada,  $m_{k,fm}$ ,

que indica a relação da transferência modulada por banda de oitava  $k$  (entre 125Hz e 8kHz) e cada modulação de frequência  $f_m$ . A Figura 5 ilustra de forma simplificada o princípio da função de transferência modulada.

**Figura 5:** Relação simplificada entre inteligibilidade da fala e modulação.



Fonte: BRÜEL&KJÆR, 2003b, p. 2 (Tradução da autora).

De acordo com a IEC 60268-16 (2011, p.44), estes valores de razão de transferência modulada ( $m_{k,f_m}$ ) são corrigidos matematicamente devido aos efeitos de mascaramento auditivo e então transformados na razão sinal ruído efetiva ( $SNR_{\text{eff } k,f_m}$ ) de acordo com a Equação 5 (IEC 60268-16, 2011, p.45). Os resultados de  $SNR_{\text{eff } k,f_m}$  derivam, por sua vez, o índice de transmissão (TI) para cada banda de oitava ( $k$ ) e frequência modulada ( $f_m$ ) conforme a Equação 6 (IEC 60268-16, 2011, p. 45).

$$SNR_{eff.k, fm} = 10 \log \frac{m'_{k, fm}}{1 - m'_{k, fm}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde,

$m'_{k, fm}$  é a razão de transferência modulada corrigida

$$TI_{k, fm} = \frac{SNR_{eff.k, fm} + 15}{30} \quad \text{Equação 6}$$

Os índices de transmissão (TI) são calculados sobre as frequências moduladas, de modo a obter o índice de transferência modulada ( $MTI_k$ ) por banda de oitava ( $k$ ), utilizando a Equação 7 (IEC 60268-16, 2011, p. 46).

$$MTI_k = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n TI_{k, fm} \quad \text{Equação 7}$$

Por fim, com os índices de transferência modulada ( $MTI_k$ ) para cada banda de oitava  $k$ , o valor único de STI é calculado seguindo a Equação 8 (IEC 60268-16, 2011, p. 46).

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot MTI_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \cdot \sqrt{MTI_k \cdot MTI_{k+1}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde,

$MTI_k$  é o índice de frequência modulada por banda de oitava  $k$ ,

$\alpha_k$  é o fator de ponderação por banda de oitava  $k$ ,

$\beta_k$  é o fator de redundância entre a banda de oitava  $k$  e a banda de oitava  $k+1$ .

Os fatores  $\alpha$  e  $\beta$  tratam-se de fatores relacionados a gênero (masculino ou feminino) indicados pela norma IEC 60268-16 (2011, p.41), uma vez que o método STI pode discriminar entre sinais de voz masculina e feminina. Como a voz feminina é geralmente considerada mais

inteligível que a voz masculina, o sinal de voz masculina é comumente utilizado para avaliar canais de transmissão de fala (IEC 60268-16, 2011). O parâmetro STI pode ser obtido pelo “método direto”, que utiliza sinais modulados para medir diretamente a função de transferência modulada. Ou ainda, pode ser obtido pelo “método indireto”, que deriva a função de transferência modulada a partir de uma resposta impulsiva.

O índice de transmissão da fala (STI) é dado por um valor único, que varia de 0 a 1, e classificado por conceitos subjetivos de “ruim” a “excelente” como mostra a Tabela 2. Kuttruf (2009) afirma que, genericamente, para garantir uma inteligibilidade da fala suficiente, o STI deve ser no mínimo 0,5.

**Tabela 2.** Escala de avaliação para os valores de STI (GADE, 2007)

Valor de STI	< 0,30	0,30 - 0,45	0,45 - 0,60	0,60 - 0,75	> 0,75
Inteligibilidade	Ruim	Pobre	Razoável	Bom	Excelente

O método STI tem sido objeto de contínuo desenvolvimento e refinamento desde a sua introdução na década de 1970. As principais melhorias do STI foram consolidadas, incorporando-as em sucessivas revisões da norma IEC 60268-16 (2011).

### 2.1.6 PERDA DE ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (ALCONS)

Durante algum tempo, a inteligibilidade da fala era prevista considerando análise de fatores relacionados à reverberação ou razão sinal-ruído, porém, não havia uma maneira prática de prever a inteligibilidade da palavra (DAVIS, 2006). Peutz (1971 apud DAVIS, 2006) então publicou a equação do índice de Perda de Articulação de Consoantes (*Articulation Loss of Consonants – ALcons*), como uma ferramenta para prever a inteligibilidade da fala no ambiente. Mesmo após o desenvolvimento do STI, pela adaptação da função de transferência modulada (MTF), o parâmetro ALcons ainda é utilizado por permitir maior facilidade de cálculo ainda na fase de projeto de um sistema.

A partir de uma resposta impulsiva, o ALcons pode ser determinado relacionando a energia do som reverberante após 35ms e o som direto neste mesmo intervalo de tempo, de acordo com a Equação 9 (AHNERT; TENNHARDT, 2002). Assim, um longo tempo de

reverberação leva a um aumento na perda de articulação. Na Equação 9, a expressão “ $E_{\infty} - E_{35}$ ” refere-se à energia sonora que atinge o receptor após 35 ms, e  $E_{35}$  representa a energia sonora que chega ao receptor a até 35 ms do som direto.

$$ALcons = 0,652 \cdot \left( \frac{E_{\infty} - E_{35}}{E_{35}} \right) \cdot RT \quad \text{Equação 9}$$

O parâmetro ALcons também pode ser derivado do STI, por meio da fórmula de Farrel Becker (Bruel&Kjaer, 2003a), conforme a Equação 10.

$$ALcons = 170.5405 \cdot e^{-5.419(STI)} \quad \text{Equação 10}$$

O *software* Dirac usa a Equação 10 para a obtenção deste parâmetro. Desta forma, para a presente pesquisa, os resultados de ALcons estão diretamente relacionados aos resultados de STI, uma vez que o primeiro é derivado do segundo. A relevância de apresentar seus resultados está na tradução do parâmetro STI em termos de perda de articulação de consoantes, já que estas são fundamentais para a compreensão da fala. Além disso, há o registro numérico destes dados para permitir futuras comparações com resultados de outras pesquisas.

Os valores do parâmetro ALcons variam de 0 a 100%. A literatura indica que 15% é o valor limite para se obter um grau de inteligibilidade aceitável (AHNERT; TENHARDT, 2002). A escala de avaliação deste parâmetro, como apresentada por Ahnert e Tenhardt (2002), está exposta na Tabela 3.

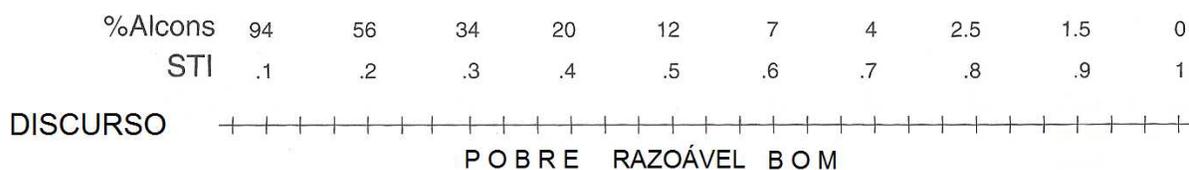
**Tabela 3:** Avaliação para valores de ALcons (AHNERT; TENHARDT, 2002)

ALcons (%)	≤ 3	3 – 8	8 – 11	> 11	> 20 (limite prático: 15)
Avaliação da inteligibilidade	Ideal	Muito boa	Boa	Razoável	Pobre

A Figura 6 mostra a comparação de valores entre ALcons e STI e a indicação da escala de qualidade da fala. Observa-se que alguns autores referenciam-se a este parâmetro como

“Porcentagem de Perda de Articulação de Consoantes” e utilizam sua abreviação como “%ALcons”.

**Figura 6:** Valores para avaliação da inteligibilidade da fala.



Fonte: MARSHALL, 2010, p. 139 (Tradução da autora)

Ao observar relação entre valores de ALcons e STI da Figura 6, constatou-se que esta escala é resultado aproximado da relação exposta pela Equação 10. Uma vez que para esta pesquisa utiliza-se resultados de ALcons derivados de STI, elaborou-se uma escala de avaliação, apresentada na Tabela 4, derivada da escala de STI (Tabela 2) e de acordo com a Equação 10, para referência na avaliação do parâmetro ALcons.

**Tabela 4:** Escala de avaliação qualitativa do parâmetro ALcons, de acordo com STI.

STI	0,75 – 1,00	0,60 – 0,75	0,45 – 0,60	0,30 – 0,45	0,00 – 0,30
ALcons (%)	≤ 3	3 – 7	7 – 15	15 – 34	34 ≤
Qualidade	Excelente	Bom	Razoável	Pobre	Ruim

### 2.1.7 DIFERENÇA MÍNIMA PERCEPTÍVEL (JND)

Uma questão relevante para o estudo dos parâmetros acústicos, especialmente quando se trata de comparação entre situações, é a diferença mínima perceptível, ou JND (*Just Noticeable Difference*). Trata-se da diferença mínima entre dois valores de um mesmo parâmetro, considerada para que o ouvinte possa percebê-los como variações distintas. Estes valores são baseados em testes subjetivos de avaliação por um determinado público e seus resultados representam os valores que a maioria dos seres humanos pode perceber.

Segundo Bradley (2011), apenas com uma boa compreensão dos JNDs para cada parâmetro podemos compreender o real significado das diferenças de seus valores. O autor afirma que embora haja informações a respeito do JND de alguns parâmetros, os resultados são

discutíveis, pois, em sua maioria, são obtidos em condições em que apenas um aspecto particular do campo sonoro foi variado e os demais foram mantidos constantes. Desta forma, pesquisas na área ainda são necessárias para aprofundar o conhecimento destas diferenças perceptíveis em condições reais, onde diversas características do campo sonoro podem se alterar ao mesmo tempo.

No que diz respeito aos valores de JND considerados atualmente, dentre os parâmetros acústicos relevantes para esta pesquisa, a norma ISO 3382-1 (2009) apresenta valores de JND para EDT e D50 de 5% e 0,05, respectivamente. Embora esta norma referencie o valor de JND de 5% apenas para o parâmetro EDT, diversos autores também utilizam este mesmo valor de 5% como um JND aceitável para o parâmetro TR (BORK, 2000; GARRIDO, et al, 2012; GIL-REYES, et al, 2011; MARTELLOTTA, 2001; SOETA, et al., 2012; VIGEANT, et al, 2011).

Quanto ao parâmetro STI, Gil-Reyes, et al (2011) utilizam em sua pesquisa um valor JND de 0,05. Já Bradley, et al (1999) indicam um valor 0,03 como JND para o STI, com base em seus estudos sobre o parâmetro C50.

A partir das referências utilizadas, os valores de JND adotados para este trabalho estão dispostos na Tabela 5.

**Tabela 5:** Parâmetros acústicos analisados e seus respectivos valores de “diferença mínima perceptível” (JND)

Parâmetro	JND	Referência
TR	5%	Bork (2000); Garrido, et al (2012); Gil-Reyes, et al (2011); Martellotta (2001); Soeta, et al (2012) e Vigeant, et al (2011)
EDT	5%	ISO 3382-1 (2009)
D50	0,05	ISO 3382-1 (2009)
STI	0,03	Bradley, et al (1999)

## 2.2 NORMATIZAÇÃO

Atualmente a medição de alguns parâmetros acústicos objetivos é apoiada por normas internacionais. Estas normas visam padronizar as medições acústicas de modo a permitir maior confiabilidade nos resultados, bem como facilitar a comparação entre diferentes estudos. Dentre as normas atualmente em vigor que tratam da medição de parâmetros acústicos, destacam-se a ISO 3382-1 (2009) e a IEC 60268-16 (2011).

### 2.2.1 ISO 3382-1

A *International Organization for Standardization* (Organização Internacional para Normalização) publicou a norma ISO 3382 (2009) que trata da medição de parâmetros acústicos. Sua versão anterior, datada de 1997, era de aplicação geral para qualquer tipo de ambiente interno. Esta nova versão é dividida em três partes: a primeira dedica-se a espaços de performance, a segunda trata do tempo de reverberação em espaços comuns e a terceira parte dedica-se a escritórios abertos (*open plan offices*). A parte 1 da ISO 3382 (2009) é o documento de interesse para esta pesquisa.

A norma ISO 3382-1 (2009) especifica métodos de medição para o tempo de reverberação e outros parâmetros em espaços de performance. Além disso, descreve os procedimentos necessários, especifica equipamentos e dá diretrizes para o método de avaliação e apresentação dos dados.

A ISO 3382-1 (2009) aceita medições acústicas em espaços totalmente desocupados, ocupados ou ainda o *studio state*, que se refere à sala ocupada apenas pelos artistas ou palestrantes, sem considerar a presença da audiência. Determina também a precisão nas medições de temperatura e umidade relativa do ar no ambiente, que devem ser de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 5\%$ , respectivamente. Especifica ainda as características dos equipamentos a serem utilizados, como fonte sonora e microfones omnidirecionais, bem como limites de distâncias que estes equipamentos devem obedecer para seu posicionamento.

A ISO 3382-1 (2009) indica a aplicação de dois métodos de medição para o tempo de reverberação: o método de resposta impulsiva ou o método de ruído interrompido. Os

resultados, para qualquer um dos métodos de obtenção dos parâmetros, devem ser apresentados em função de frequência em bandas de oitava de 125 Hz a 4000 Hz, ou em bandas de 1/3 de oitava de 100 Hz a 5000 Hz. Este último caso se refere aos métodos de engenharia e de precisão.

Em seu corpo principal a norma ISO 3382-1 (2009) trata da obtenção de valores referentes ao tempo de reverberação. Porém, dá indicações para a obtenção de alguns outros parâmetros objetivos complementares, que podem ser obtidos pelo método de resposta impulsiva. Estes parâmetros são descritos nos anexos A, B e C dessa norma.

O Anexo A da ISO 3382-1 (2009) trata de parâmetros complementares ao TR que foram selecionados por serem considerados subjetivamente importantes para a descrição acústica de espaços de audição. Neste anexo são indicados sete parâmetros, divididos em cinco grupos relacionados a aspectos subjetivos. Apresenta também uma tabela com as indicações para se obter um número único de cada parâmetro, valores de diferença mínima perceptível (JND), bem como os valores típicos para salas de concerto e uso múltiplo. A tabela apresentada pelo Anexo A da ISO 3382-1 está reproduzida na Tabela 6.

**Tabela 6:** Parâmetros acústicos agrupados de acordo com indicações subjetivas (ISO 3382-1:2009)

Aspecto Subjetivo	Parâmetro Acústico	Faixa de Frequência para obtenção de média (Hz)	JND (Diferença perceptível)	Valores típicos
Nível Subjetivo de Som	Força Sonora, G	500 a 1000	1 dB	-2 dB; +10 dB
Reverberância Percebida	Tempo de Decaimento Inicial, EDT	500 a 1000	5%	1,0 s; 3,0 s
Clareza percebida do som	Clareza, $C_{80}$	500 a 1000	1 dB	-5 dB; +5 dB
	Definição $D_{50}$	500 a 1000	0,05	0,3; 0,7
	Tempo central $T_5$	500 a 1000	10 ms	60 ms; 260 ms
Largura aparente da fonte (ASW)	Fração de energia lateral Inicial, $J_{LF}$ e $J_{LFC}$	125 a 1000	0,05	0,05; 0,35
Envolvimento do ouvinte (LEV)	Energia Sonora Lateral Tardia, $L_j$	125 a 1000	Desconhecido	-14 dB; +1 dB

O Anexo B desta norma se dedica à avaliação de espacialidade no ambiente por meio de medições binaurais, indicada pelo parâmetro de Correlação Cruzada Interaural (IACC).

Estabelece o aparato de medição e indica também o valor de JND para este parâmetro.

No anexo C, a norma traz os procedimentos de medição do parâmetro Suporte (ST) para caracterizar as condições de palco. Divide este parâmetro em dois tipos,  $ST_{\text{Early}}$  e  $ST_{\text{Late}}$  de acordo com a relação de energia considerada. Também indica as condições de medição e forma de apresentação dos resultados.

### 2.2.2 IEC 60268-16

A *International Electrotechnical Commission* (Comissão Internacional Eletrotécnica) publicou um conjunto de normas que formam a IEC 60268, para tratar especificamente de equipamentos de sistemas de som. Atualmente dividida em dezoito partes, a parte 16 trata da avaliação objetiva da inteligibilidade da palavra pelo índice de transmissão da fala.

A IEC 60268-16 (2011) indica o parâmetro STI (*Speech Transmission Index*) para a avaliação da inteligibilidade da fala transmitida por diferentes canais de transmissão. Com a evolução do estudo deste parâmetro, a IEC 60268-16 já sofreu várias revisões. Em 2003 a norma implementa a derivação do parâmetro STIPA, desenvolvido como um método rápido de medição para tratar com efeitos acústicos ou eletroacústicos na determinação da qualidade de transmissão da fala em sistemas de som. Na última revisão, do ano de 2011, dentre as mudanças significativas apresentadas pelo texto da norma pode-se destacar a indicação de que o parâmetro RASTI (*room acoustical speech transmission index*) se tornou obsoleto, não sendo recomendado o seu uso.

Desta forma, a IEC 60268-16 (2011) especifica métodos para a avaliação da transmissão da qualidade do discurso, no que diz respeito à inteligibilidade, tanto como forma de predição quanto para medição. Apresenta três parâmetros principais para a avaliação da fala, o STI e suas duas derivações: STIPA (*speech transmission index for public address systems*) e STITEL (*speech transmission index for telecommunication systems*). Os STI e o STIPA são indicados para a avaliação da transmissão da fala com ou sem um sistema de som. O STITEL possui uso mais restrito, sendo indicado para a avaliação de sistemas de telecomunicações. A norma aponta então os métodos de obtenção dos parâmetros, que são divididos em dois grupos:

- Os métodos diretos – são aqueles que utilizam testes de sinal modulado
- Os métodos indiretos – são baseados na resposta impulsiva do sistema.

Ambos podem ser aplicados para a obtenção do STI e suas formas simplificadas (STIPA e STITEL). No entanto, ao utilizar o método indireto (pela resposta impulsiva), devido ao tempo de processamento mais curto desta técnica, a norma recomenda o cálculo do parâmetro STI completo, chamado também de FULL STI.

Os métodos podem ser aplicados a quase todos os canais de transmissão da fala, como digitais, eletroacústicos ou acústicos. Assim, a norma prevê a avaliação da inteligibilidade da fala em diversas situações, tais como em um ambiente puro (sem sonorização), em um ambiente com sistema de som, em alarmes de voz para emergências, em canais de comunicação em que o locutor e o receptor estão em ambientes distintos, dentre outros. Nesse aspecto a Tabela 7, transcrita a partir da referida norma, traz recomendações de aplicação do STI, STIPA ou STITEL.

**Tabela 7: Aplicabilidade dos testes de inteligibilidade da fala (IEC 60268-16, 2011).**

<b>Aplicação</b>	<b>Teste recomendado</b>	<b>FULL STI</b>	<b>STIPA</b>	<b>STITEL</b>	<b>Limitações</b>	<b>Soluções alternativas</b>
Avaliar a adequação da acústica da sala para comunicação de voz (sem amplificação eletrônica)	STIPA	++	++	+/-	Adequação do STITEL depende da reverberação	
Avaliação de sistemas PA e VA (áudio e vídeo)	STIPA	+	++	+/-	Adequação do STITEL depende da reverberação e eco	
Avaliação de canais de telecomunicações (telefone, rádio)	STITEL	+	+	++	STITEL tem mais poder de diagnóstico	
Canal que apresenta compressão de amplitude	STIPA	+	+	+		
Diferença entre vozes masculinas e femininas necessita de atenção específica	FULL STI	++	-	+	STIPA não é adequado para voz feminina (apenas espectro masculino)	
Forte distorção de origem	Nenhum	-	-	-		
Forte ruído flutuante	STIPA	+/-	+/-	+/-		Requer várias medições de STI
Fala e ruído claramente separadas espacialmente ou um componente de campo direto forte existe em um ambiente altamente reverberante	STI	+	+/-	+/-	Para ser usado com cautela. Métodos padronizados atuais são imprecisos.	Ver item 7.10 da norma
Canais que não permitem teste artificiais de sinais, tais como vocoders	Nenhum	+/-	+/-	+/-	Métodos padronizados atuais são imprecisos.	Use um sinal de teste STI baseado em discurso ou teste de ouvinte

++ método muito bem adequado, + método bem adequado, +/- método adequado, - método não adequado

A IEC 60268-16 (2011) descreve e define as aplicações de cada um dos métodos citados, bem como os procedimentos de medição. As medições dos sistemas podem ser feitas com entradas e saídas de sinais tanto de forma acústica quanto elétrica, ou combinações delas.

Nos anexos normativos de A a C, a IEC 60268-16 (2011) descreve os métodos de cálculo dos parâmetros STI, STIPA e STITEL. No anexo D mostra o método do parâmetro RASTI, ainda que indique que é um parâmetro obsoleto. Os demais anexos informativos de E a I dão informações complementares a respeito do parâmetro STI, como por exemplo, sua relação com alguns testes de inteligibilidade no anexo E, ou ajustes para testes relacionados a ouvintes não nativos, no anexo H.

Os anexos normativos J, K e L tratam da calibração de sinal, exemplo da folha de relatório para os testes de STI e da predição do STI usando métodos estatísticos. Por fim o anexo informativo M traz ajustes aos resultados de STI e STIPA para a simulação do ruído de ocupação e o anexo informativo N cita outros métodos para a determinação da inteligibilidade da palavra como o SII (*Speech Inteligibility Index*) ou SIL (*Speech Interference Level*) e suas limitações em relação ao STI.

## 2.3 SISTEMAS DE REFORÇO SONORO

Os sistemas de amplificação ou reforço sonoro têm a função de amplificar eletronicamente um sinal sonoro. Alguns autores nomeiam ainda estes sistemas de *Public Address*, ou apenas sistemas PA, quando sua função principal é para a projeção de voz (BORGERSON, 2003). De um modo geral, os sistemas de reforço sonoro (SRS) são utilizados em espaços abertos ou fechados e diferem dos sistemas de reprodução sonora por reforçarem um sinal que está sendo gerado ao mesmo tempo em que é amplificado, fazendo com que o ouvinte receba uma combinação entre estes dois sons: o som direto da fonte e o som amplificado (MOORE, 2010). Atualmente a maior parte dos sistemas de som realizam ambas as funções de reproduzir e amplificar o sinal sonoro.

Estes sistemas estão presentes hoje na maioria dos espaços de audição como teatros, auditórios ou igrejas. Embora todas as formas de utilização e aplicação dos sistemas de som devam ser cuidadosamente projetadas, a operação destes sistemas em recintos fechados é naturalmente mais complexa do que em espaços abertos (MEHTA, 1999). No caso de ambientes fechados, devem-se considerar todos os aspectos do comportamento sonoro em salas,

envolvendo as características acústicas do ambiente.

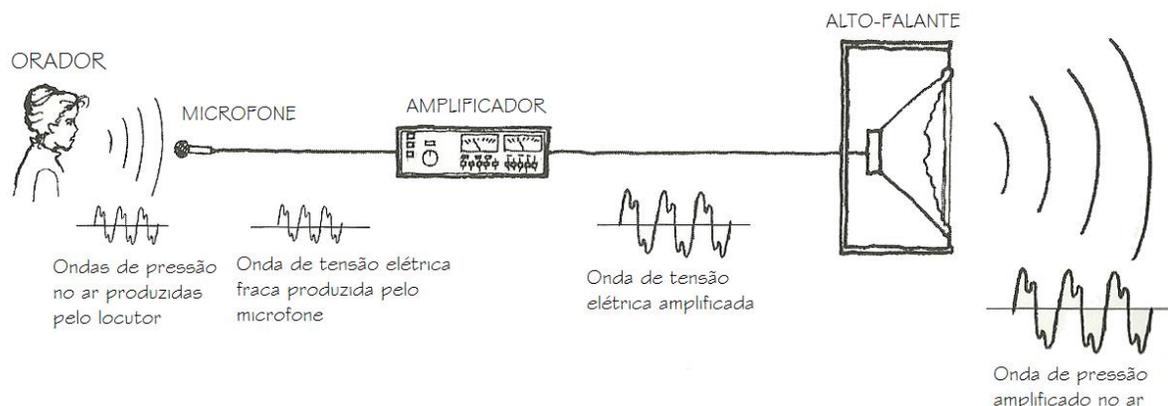
Kuttruff (2009) alerta que seja qual for o tipo e finalidade de um sistema eletroacústico, há uma estreita interação entre o sistema e o ambiente em que se insere. A qualidade do som amplificado dependerá diretamente das qualidades acústicas do espaço onde se insere. Mehta (1999) afirma que um sistema de reforço sonoro não pode corrigir, ou compensar, as deficiências acústicas de uma sala. Por outro lado, um sistema bem concebido pode proporcionar flexibilidade ao espaço, potencializando o som em um ambiente multiuso, por exemplo, quando este não pode ser otimizado para uma atividade específica.

### 2.3.1 COMPONENTES DO SISTEMA DE REFORÇO SONORO

Os sistemas de som abrangem os transdutores eletroacústicos, compondo os microfones e alto-falantes. Transdutores são dispositivos que transformam diferentes tipos de energia. No caso dos sistemas de reforço sonoro, os microfones convertem a energia de uma onda sonora em energia elétrica e, por sua vez, os alto-falantes convertem o sinal elétrico em energia acústica. Enquanto o sinal está no domínio elétrico, ele pode ser amplificado, filtrado, gravado ou processado de diversas maneiras que não poderiam ser feitas acusticamente (MEHTA, 1999).

Um sistema de som é basicamente composto por microfone, amplificador e caixas de som, ou alto-falantes (Figura 7), podendo existir ainda outros dispositivos para tratar o sinal como filtros de frequência, por exemplo. Estes elementos serão brevemente apresentados nos próximos itens deste capítulo, porém sem aprofundar nos detalhes de seu funcionamento uma vez que o estudo dos componentes do sistema de reforço sonoro não é o foco deste trabalho.

**Figura 7:** Principais componentes do sistema de reforço sonoro.



Fonte: MEHTA, 1999, p. 342 (Tradução da autora)

### 2.3.1.1 Microfones

Os microfones são os dispositivos de captação de som de um sistema eletroacústico. Eles convertem energia acústica em energia elétrica, transformando a onda de pressão sonora em uma onda elétrica que pode ser então amplificada, transmitida ou processada. Existem vários tipos de microfones, com características diferentes, utilizados para diversas funções. Um microfone usado para medição acústica, por exemplo, difere de um utilizado para captação de áudio em estúdio de gravação.

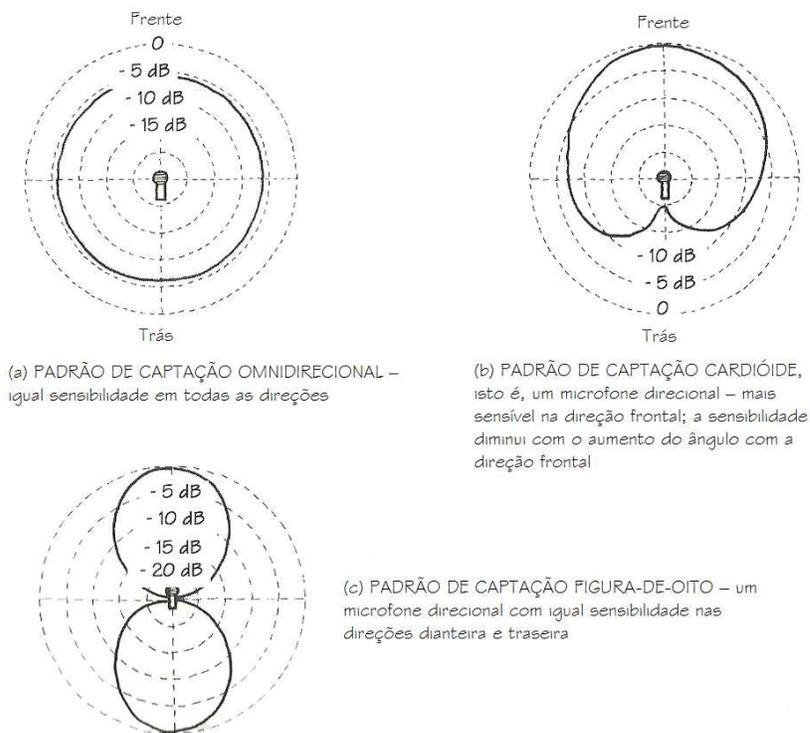
Além de qualidades estéticas como aparência visual ou tátil, as especificações técnicas são de grande importância na hora de selecionar um microfone para compor o sistema de som. Dentre os parâmetros mais importantes considerados pelos engenheiros de som estão: sensibilidade, impedância, polaridade, resposta de fase, nível máximo de entrada acústica, propriedades de distorção e características especiais, como cancelamento de ruído ou filtros internos (PATRONIS, 2006a).

O padrão de diretividade, ou padrão de captação, também é um importante fator de desempenho e classificação dos microfones. Entende-se por diretividade, a sensibilidade do microfone em captar o som que chega de diversas direções (MEHTA, 1999). Logo, esta resposta a diferentes direções varia de acordo com o *design* do microfone. Neste aspecto o microfone mais utilizado para as medições acústicas de salas é o "omnidirecional". Isso significa que este

microfone é sensível para captar de forma semelhante o som proveniente de todas as direções. Outro tipo de microfone bastante utilizado em avaliações acústicas de sala são os chamados “figura de oito” ou “bidirecional”. Estes microfones possuem padrão de sensibilidade análogo para a captação do som frontal e traseiro. Este tipo de microfone é utilizado para a avaliação de parâmetros relacionados à espacialidade da sala, pois captam os diferentes comportamentos das reflexões laterais.

Os microfones mais utilizados para captação de som nos sistemas de reforço sonoro são os direcionais, ou cardioídes. Este tipo de microfone é mais sensível à captação do som frontal do que qualquer outra direção. Esta característica ajuda a reduzir o efeito de *feedback* (causado pela realimentação do microfone pelo som que sai dos alto-falantes) ou ainda interferências causadas pela reverberação ou ruído de fundo (MOORE, 2010). Exemplos de gráficos de diretividade de microfones podem ser visualizados na Figura 8.

**Figura 8:** Exemplo de gráficos de direcionalidade de microfone: omnidirecional (a), direcional ou cardioide (b), bidirecional ou figura de oito (c).



Fonte: MEHTA, 1999, p. 349 (Tradução da autora)

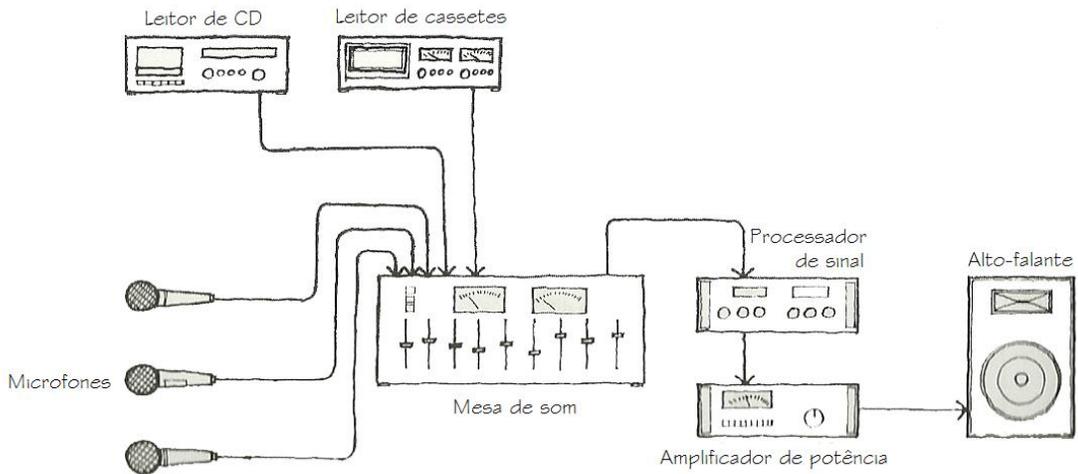
### *2.3.1.2 Amplificadores de potência e outros dispositivos*

O sinal elétrico gerado por um microfone é muito pequeno para os alto-falantes poderem produzir um sinal acústico suficientemente audível. Assim, os amplificadores de potência têm a função de converter o sinal elétrico gerado pelo microfone em um sinal equivalente de maior potência, suficiente para alimentar os alto-falantes conectados ao sistema (MOORE, 2010).

Na sua forma elétrica o sinal sonoro pode ser facilmente modificado, como por exemplo, a equalização do espectro sonoro que tem particular importância para os sistemas de reforço sonoro. Neste caso, todo o processamento de sinais ocorre antes de chegar ao amplificador, sendo este sempre o último elemento antes dos alto-falantes (Ver Figura 9). É necessário ainda um pré-amplificador nestes casos. Trata-se de um circuito que realiza uma amplificação inicial a um sinal mais fraco para um nível que seja adequado à mixagem ou processamento. Quase todas as mesas de som ou consoles de mixagem que tem entradas para microfone possuem também pré-amplificadores.

Uma mesa de som é um aparelho de utilização comum em sistemas de reforço sonoro. São úteis quando existem várias fontes para serem ligadas ao amplificador. Ela combina sinais diversos provenientes de múltiplos microfones e reprodutores de áudio, por exemplo, fornecendo um ou mais canais que por sua vez alimentam os amplificadores.

**Figura 9:** Exemplo de componentes de um sistema de reforço sonoro.



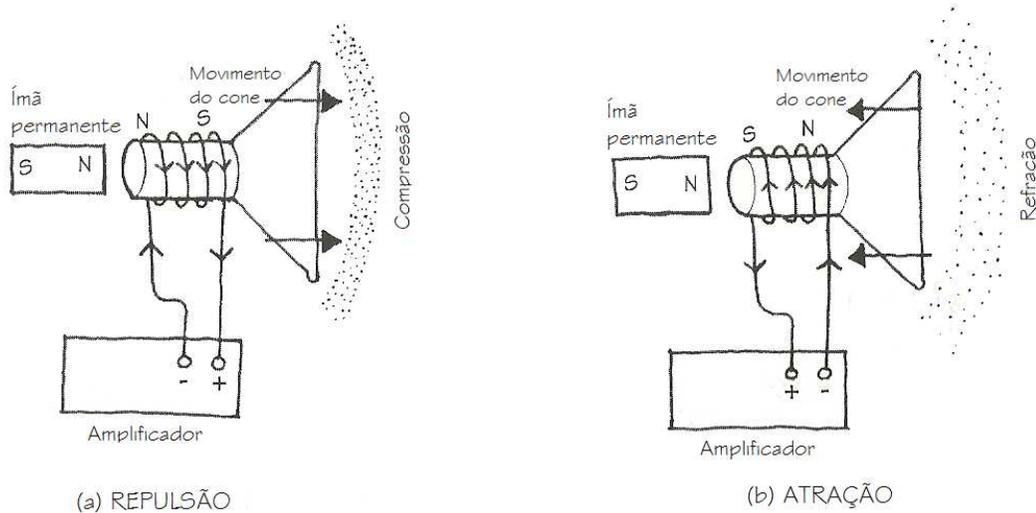
Fonte: METHA, 1999, p. 350 (Tradução da autora)

### 2.3.1.3 Alto-falantes e caixas de som

Os alto-falantes são os equipamentos finais de um sistema de sonorização, responsáveis por transmitir o sinal sonoro elétrico, já reforçado pelo amplificador, transformando-o em ondas acústicas que, por sua vez, são direcionadas ao público ouvinte.

Mehta (1999) descreve que os alto-falantes são compostos por materiais flexíveis, capazes de vibrar para produzir ondas sonoras. Chamados de diafragma, este material é conectado a uma bobina (*voice coil*) que por sua vez é conectada diretamente ao amplificador e pode se movimentar livremente dentro do ímã permanente que também compõe o alto-falante. Com as mudanças de corrente na bobina, devido às flutuações elétricas provenientes do amplificador, a bobina móvel funciona como um eletroímã, que interage com o campo magnético do ímã permanente. Assim, ela se movimenta de acordo com a corrente em reações de atração ou repulsão, fazendo com que o diafragma movimente-se com ela. Como o diafragma vibra, gera ondas de pressão no ar que, por sua vez, formam as ondas de som irradiadas pelo alto-falante (Figura 10).

**Figura 10:** Desenho esquemático mostrando os princípios operacionais de um alto-falante tipo cone pelos movimentos de repulsão (a) e atração (b) proporcionados pela relação do campo magnético dos componentes do sistema.



Fonte: MEHTA, 1999, p. 344 (Tradução da autora).

Para a utilização de um ou mais alto-falantes em um sistema de som, eles devem ser protegidos por um invólucro. São as chamadas caixas de som. Sua principal função é evitar o cancelamento de ondas criado pelo movimento de atração e repulsão do diafragma.

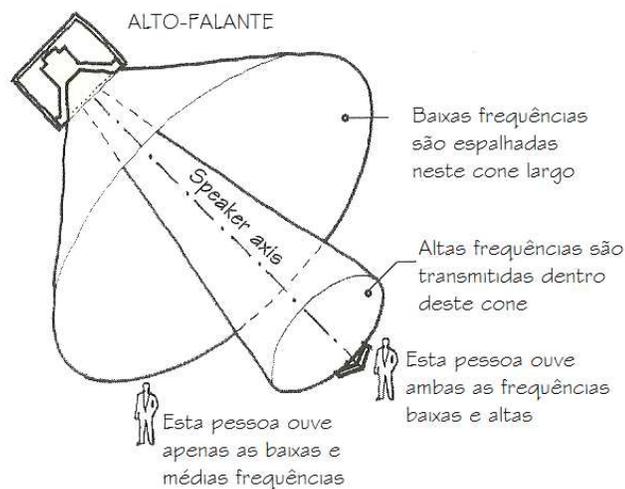
Outro aspecto importante dos alto-falantes são as respostas de frequência. Como as baixas frequências representam ondas de grandes comprimentos, é fundamental que, para produzi-las em intensidade adequada, um alto falante deva ser suficientemente grande. Por outro lado um alto-falante de dimensões elevadas é desvantajoso para produzir sons de alta frequência, já que o cone deverá movimentar-se em uma velocidade muito elevada para isso.

Este problema é normalmente resolvido utilizando alto-falantes múltiplos projetados para diferentes bandas de frequências. Um exemplo desses sistemas são as caixas de som compostas por dois alto-falantes. O sinal vindo do amplificador, neste caso, é dividido em altas frequências e baixas frequências e por sua vez alimentam dois alto-falantes distintos. As unidades que reproduzem frequências graves são chamadas de *woofer*, enquanto as unidades pequenas, que reproduzem os sons agudos, são chamadas de *tweeters*.

Assim como para os microfones, a diretividade dos alto-falantes também é uma característica importante, seja ele um sistema simples ou de múltiplos alto-falantes compondo uma caixa de som. Quanto mais alta a faixa de frequência produzida, mais direcional é sua

radiação. Porém, a energia acústica deve ser orientada de tal forma que a pressão acústica experimentada por todos os ouvintes seja razoavelmente uniforme. Um único dispositivo raramente poderá cumprir essa função (PATRONIS, 2006b), como mostra o exemplo da Figura 11. Desta forma, um sistema deve possuir uma disposição de alto-falantes suficiente para proporcionar aos ouvintes uma distribuição adequada da energia sonora.

**Figura 11:** Devido à radiação direcional das altas frequências, o ouvinte deverá sentar-se o mais próximo possível do eixo do alto-falante para escutar bem tanto as baixas quanto as altas frequências.



Fonte: MEHTA, 1999, p. 345 (Tradução da autora)

### 2.3.2 POSICIONAMENTO DAS CAIXAS DE SOM

O direcionamento e o posicionamento das caixas de som que compõem um sistema de reforço sonoro são essenciais para a eficiência deste sistema. Moore (2010) indica que a maior contribuição para a inteligibilidade da palavra irá ocorrer se a maior parte do som proveniente dos alto-falantes for projetada em direção à audiência, evitando assim reflexões de superfícies da sala como paredes, piso ou teto. Neste sentido, Kuttruff (2009) explica que em princípio qualquer reverberação é prejudicial para a inteligibilidade da fala, pois tende a misturar as características espectrais de fonemas ou sílabas sucessivas. Desta forma, se as caixas de som direcionarem boa parte da energia sonora para superfícies estarão contribuindo para o aumento de reflexões tardias e, conseqüentemente, o aumento da energia reverberante,

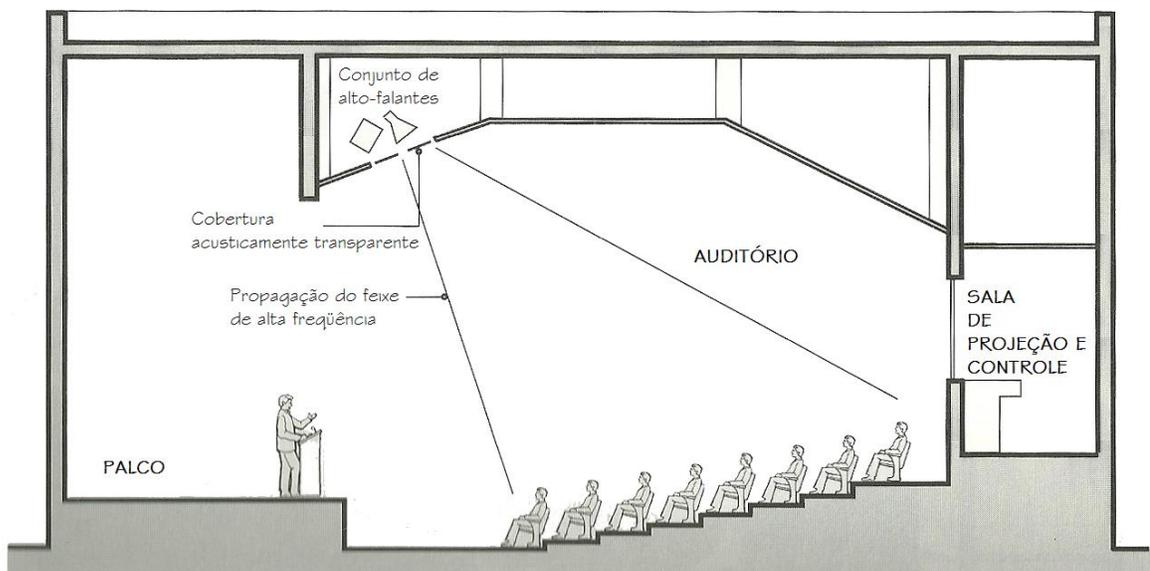
consideradas prejudiciais do ponto de vista da transmissão da palavra.

Diferentes tipos de disposições para os alto-falantes, ou caixas de som, de um sistema de sonorização são utilizados. Os mais comuns são conjuntos de alto-falantes (também chamados de *cluster*) centralizados, divididos (*split*) e distribuídos.

O sistema de *cluster* central trata-se, como o nome indica, de centralizar o conjunto de alto-falantes acima da fonte sonora principal (Ver Figura 12). Os alto-falantes devem ser direcionados para a audiência, evitando as superfícies da sala. Um som incidindo sobre superfícies torna-se parte do campo reverberante, que geralmente funciona como um ruído, reduzindo inteligibilidade (MEHTA, 1999). O sistema centralizado é o que proporciona mais realismo em termos de direcionalidade da fonte, uma vez que o ouvido humano é menos sensível ao deslocamento vertical da fonte sonora do que ao deslocamento horizontal. Desta forma, ele pode fornecer níveis sonoros suficientes para o público e ao mesmo tempo manter a relação de localização da fonte e receptor.

No entanto, Long (2006) alerta que em salas grandes se torna difícil projetar um sistema de cluster central, que proporcione uma cobertura uniforme por todo o ambiente e cubra toda a gama de frequências necessárias.

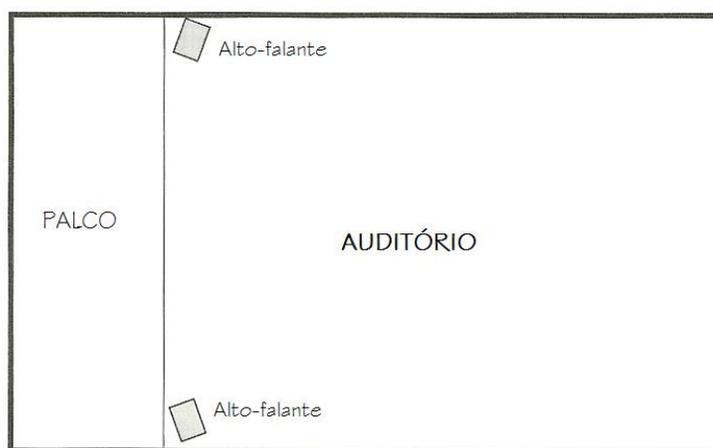
**Figura 12:** Ilustração do posicionamento de um sistema de cluster centralizado.



Fonte: MEHTA, 1999, p. 355 (Tradução da autora).

Um sistema *split* é utilizado quando o sistema central não pode ser aplicado, por exemplo, em caso de pé-direito baixo, ou ainda no caso de performances musicais, para dar mais realismo na localização sonora quando há várias fontes espalhadas em um palco. Um exemplo desse sistema dividido é o conhecido como *stereo*, quando diferentes canais são distribuídos entre as caixas. Um sistema *dual-mono* (mesmo sinal dividido entre dois grupos de fontes separados) também é utilizado quando o sistema central não pode ser instalado ou por questões estéticas. Mas neste caso o realismo, se tratando de direcionalidade, fica prejudicado. Ao utilizar o sistema *split dual-mono*, deve-se ter cautela, pois duas fontes separadas lateralmente emitindo o mesmo sinal podem gerar efeitos de interferências construtivas ou destrutivas na área da audiência. Um esquema do sistema *split* é ilustrado pela Figura 13.

**Figura 13:** Ilustração de um auditório com um sistema “split” formado por duas caixas laterais.

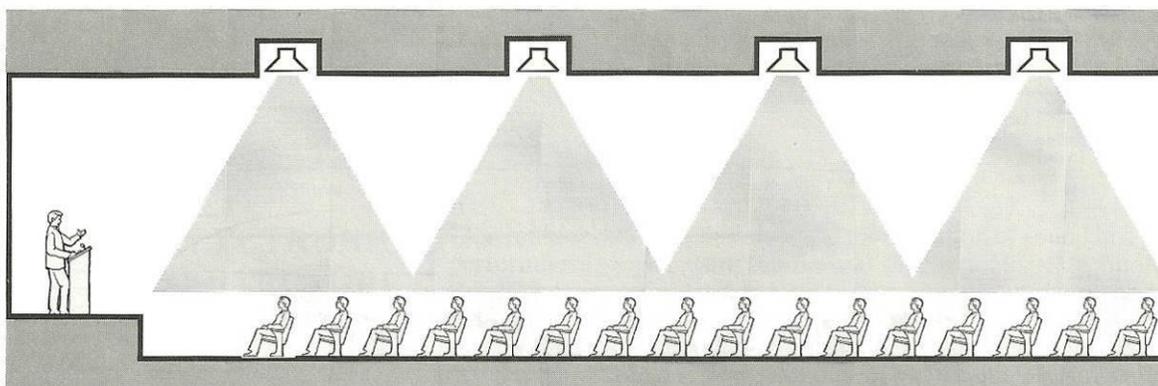


Fonte: MEHTA, 1999, p. 359 (Tradução da autora).

Outro arranjo básico de alto-falantes é o sistema distribuído. Este sistema utiliza alto-falantes uniformemente espaçados ao longo da audiência, geralmente localizados no teto da sala (Figura 14). Deve-se projetar este sistema com cuidado para evitar zonas de transição na cobertura sonora dos alto-falantes, buscando sempre uma cobertura uniforme ao longo dos ouvintes. Em ambientes onde há mobiliário fixo, é possível sua instalação na parte traseira dos assentos. Este tipo de arranjo é o que proporciona maior proximidade entre cada ouvinte e uma fonte sonora. Neste caso, cada alto-falante possuirá uma potencia sonora reduzida, uma vez

que cada unidade cobrirá uma área reduzida da audiência. Embora o realismo em relação à direcionalidade da fonte seja prejudicado, a clareza e inteligibilidade são beneficiadas neste tipo de configuração (MOORE, 2010).

**Figura 14:** Sistema de alto-falantes distribuídos, utilizado no teto da sala.



Fonte: MEHTA, 1999, p. 359 (Tradução da autora).

### 2.3.3 AVALIAÇÃO DA INTELIGIBILIDADE DO SISTEMA

É unânime a afirmação de que as propriedades acústicas de uma sala é o fator primordial para o desempenho dos sistemas de som. O ruído ambiente, as relações entre o som direto e reverberante bem como a própria reverberação da sala, são fatores que irão afetar diretamente a inteligibilidade da palavra. Na verdade, todo projeto de sistema de som deve começar com a análise do ambiente acústico no qual este sistema irá operar (DAVIS, 2006). Assim, para o projeto de um sistema de reforço sonoro, deve-se entender as qualidades e defeitos presentes no ambiente, bem como suas interferências na inteligibilidade do som.

Os principais parâmetros acústicos utilizados para avaliar a inteligibilidade de um sistema de sonorização são o Índice de Transmissão da Fala (STI) e a Perda de Articulação de Consoantes (ALcons). Davis (2006) defende o uso do ALcons para a avaliação dos sistemas pela sua possibilidade de cálculo ainda na fase de projeto. O autor apresenta uma equação de cálculo do ALcons que envolve parâmetros previsíveis durante o projeto como tempo de reverberação, volume da sala, distância entre fonte e receptor e características da fonte sonora.

Porém, para a avaliação de um sistema já instalado no ambiente, o parâmetro mais utilizado atualmente é o STI, cuja medição é orientada pela norma IEC 60268 (2011).

Segundo Davis (2006), dentre as principais causas de uma inteligibilidade reduzida estão: uma baixa razão sinal-ruído (SNR), reverberação excessiva, reflexões tardias com nível sonoro elevado, falta de sincronização entre fontes sonoras, falta de equalização, baixa qualidade dos equipamentos e grandes distâncias entre fonte e receptor. Sobre estes aspectos o autor destaca algumas recomendações a serem consideradas para um bom desempenho do sistema de som. A respeito daqueles que tratam da relação acústica entre sistema de som e ambiente pode-se destacar:

- SNR e TR: Deve-se considerar valores adequados de TR e isolamento acústico, especialmente para as bandas de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz.
- Reflexões: Deve-se evitar concentração de energia por reflexões tardias, prestando atenção no posicionamento das caixas de som que compõem o sistema e evitando que elas direcionem o som para superfícies próximas.
- Distâncias: longas distâncias entre o ouvinte e fontes sonoras são prejudiciais para a inteligibilidade. Muitas vezes a solução para uma inteligibilidade baixa está apenas em reduzir estas distancias.

## 3. ACÚSTICA EM IGREJAS

Os espaços destinados a ritos de adoração possuem diferentes necessidades acústicas e, por isso, devem receber uma atenção especial ao se projetar ou avaliar a qualidade destes ambientes. Os edifícios religiosos católicos possuem ainda formas e volumes variados. É comum encontrarmos desde pequenas igrejas retangulares até formas arquitetônicas mais complexas, com dimensões elevadas e subdivisões do ambiente. Além disso, a fala e a música são atividades que fazem parte de uma mesma cerimônia, exigindo dos edifícios um comportamento acústico que considere a interação destes dois tipos de manifestações sonoras.

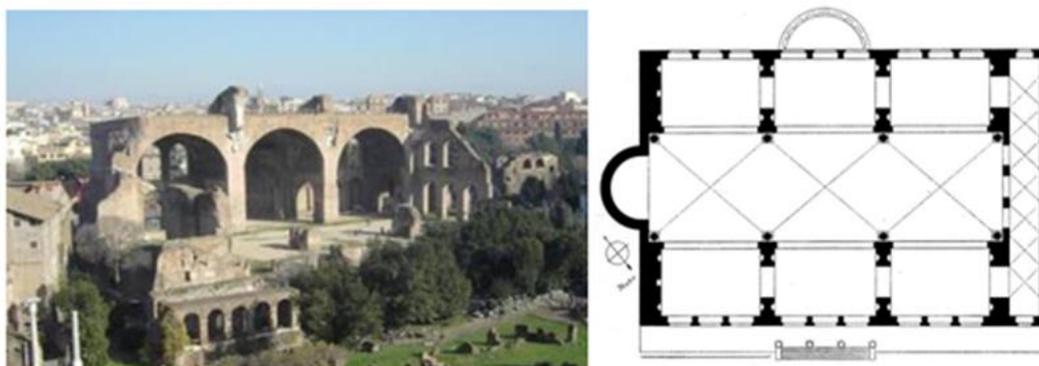
De acordo com Carvalho (2000), o comportamento acústico de igrejas católicas deve ser analisado em relação a três aspectos principais: qualidade da fala (inteligibilidade), qualidade da música e qualidade da distribuição sonora no ambiente.

### 3.1 ACÚSTICA E EDIFÍCIOS CATÓLICOS

A origem dos rituais cristãos está fortemente ligada aos ritos judeus, dos quais herdaram a forma litúrgica, ou seja, uma ordem prescrita das cerimônias a serem praticadas. Por influência judaica, também herdaram a relação simultânea entre a valorização da música como forma de louvor e do discurso através da leitura e explicação da “palavra de Deus” (CIRILLO; MARTELLOTTA, 2006). Após o Édito de Milão (313 d.C.), que pôs fim à perseguição aos cristãos e oficializou sua religião, a Igreja Cristã se tornou livre para realizar seus cultos e adquirir propriedades. A partir de então se desenvolveu o longo processo de construção e transformação da arquitetura religiosa cristã.

Os primeiros edifícios religiosos católicos tiveram como influência a basílica romana, edifício originalmente civil utilizado para realização de assembleias e negociações mercantis (exemplo na Figura 15). As basílicas eram caracterizadas por plantas retangulares, com um alto corredor central e dois corredores paralelos de cada lado. Estes corredores eram separados por colunas, que suportavam as paredes superiores e o telhado inclinado. Normalmente uma das extremidades formava uma abside e a outra extremidade era precedida por um átrio. O estilo de basílica se tornou um modelo para a construção das igrejas católicas em toda a Europa Ocidental, influenciando suas construções por vários anos, levando até às catedrais góticas (LONG, 2006).

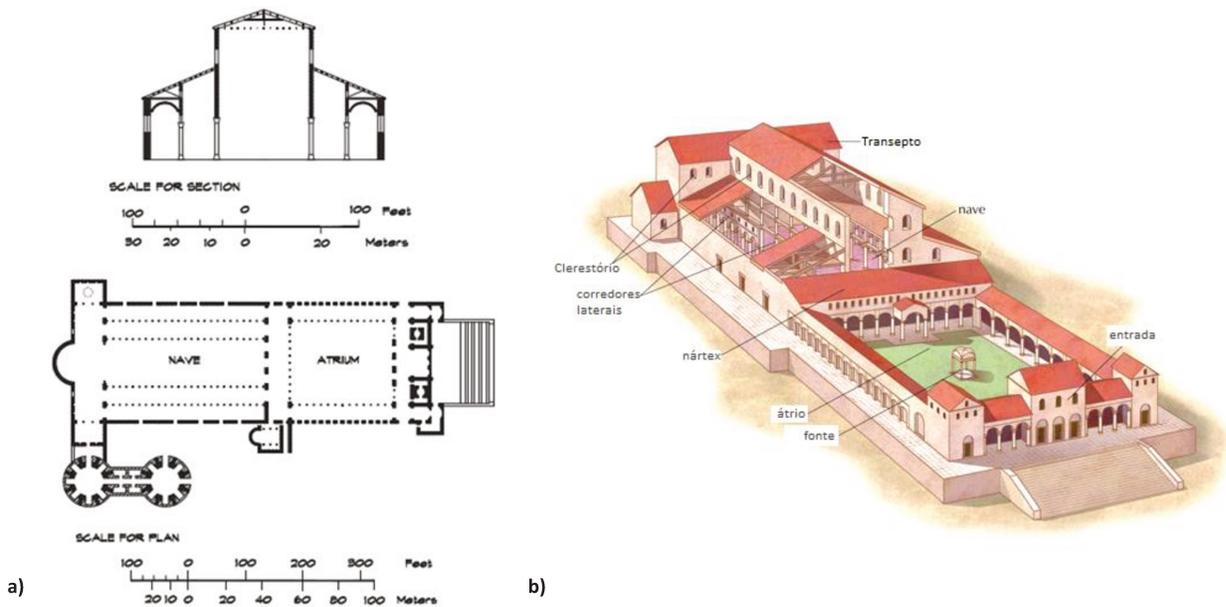
**Figura 15:** *Basílica romana de Maxenitus.*



Fonte: Wikimedia Commons. Disponível em: <[http://commons.wikimedia.org/wiki/Basilica\\_of\\_Maxentius](http://commons.wikimedia.org/wiki/Basilica_of_Maxentius)> Acesso em: 05 fev. 2014.

Cirillo e Martellotta (2006) mostram que esses edifícios eram espaços mais apropriados para a música do que para a fala. A geometria retangular permitia consideráveis reflexões laterais, que são favoráveis para a percepção musical, além das colunas e nichos auxiliarem a difusão do som. Por outro lado, as grandes distâncias entre o orador e o ouvinte eram prejudiciais para a inteligibilidade da fala. Um exemplo de uma das primeiras igrejas católicas inspiradas neste modelo é a Antiga Basílica de São Pedro, em Roma (Figura 16), construída por volta de 330 d.C. pelo imperador Constantino após o reconhecimento oficial do cristianismo (LONG, 2006). Mais tarde este edifício foi substituído pela construção que conhecemos hoje.

**Figura 16:** Antiga Basílica de São Pedro (330 d.C.) – Roma, Itália.



Fontes: (a) LONG, 2006, p. 8. (b) Studyblue Flashcards – art history. Disponível em: <http://www.studyblue.com/notes/note/n/art-history-exam-3/deck/3241721> Acesso em: 04 ago. 2014.

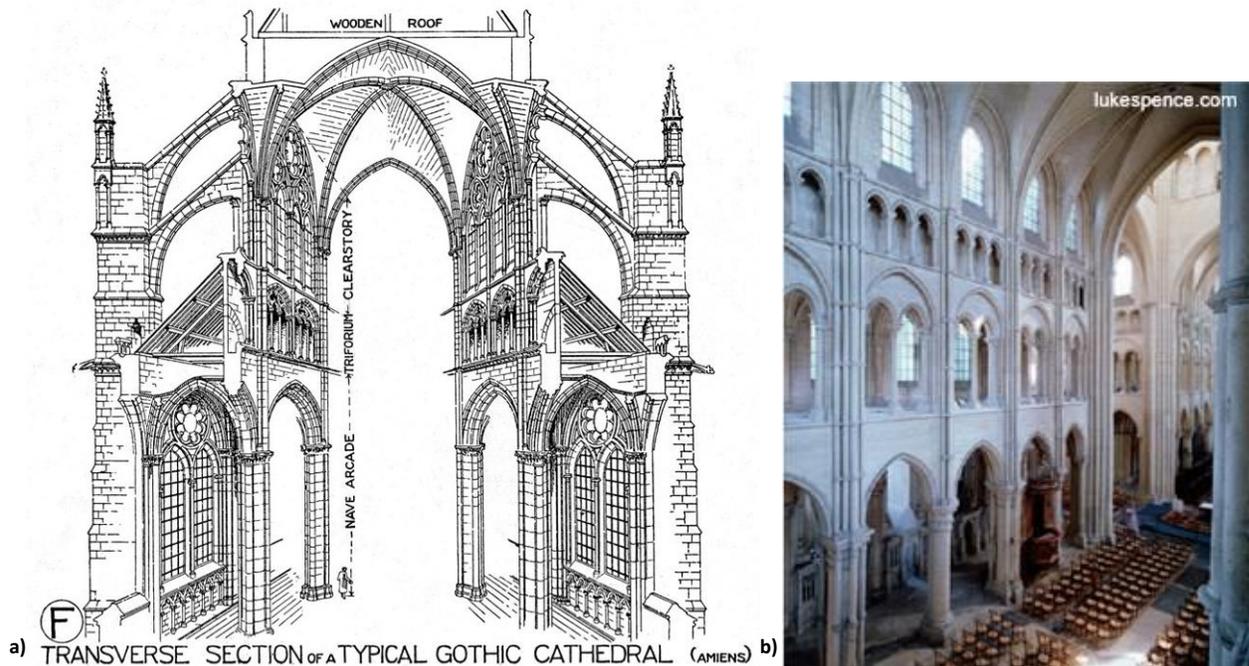
Posteriormente, como herança bizantina, alguns edifícios cristãos passaram a adotar planta de forma quadrada. Essa forma apresentava vantagens em relação à compreensão do discurso proferido pelo sacerdote. A posição central do orador rodeado pela congregação, sem obstáculos entre eles, favorecia a percepção da fala. Essa forma foi a base da maioria das igrejas ortodoxas orientais (CIRILLO; MARTELLOTTA, 2006). No ocidente, porém, a planta central era associada ao paganismo e, apesar de suas vantagens práticas, seu uso não foi tão difundido nas principais igrejas, se limitando aos batistérios e pequenos templos.

Marcado pelas suntuosas igrejas Românicas e principalmente as Góticas, o período medieval, para a Igreja Católica, teve características bastante singulares. Para a maior parte da população o latim não era a língua nativa, por isso compreendiam cada vez menos o que era falado durante os ritos. Ao mesmo tempo, os hinos litúrgicos foram se tornando cada vez mais complexos, exigindo grupos mais treinados de cantores (em sua maioria monges). O surgimento do canto gregoriano veio neste período como principal resultado dessas mudanças. Long (2006) ressalta que tais composições eram apropriadas para as catedrais amplamente reverberantes.

As igrejas medievais ainda mantinham a estrutura básica da basílica romana, no

entanto as plantas começaram a adotar formato de cruz (LONG, 2006). As construções eram marcadas por grandes volumes e materiais construtivos com pouca absorção sonora, como pedras e vitrais, o que contribuía para os elevados tempos de reverberação (Figura 17).

**Figura 17:** Croqui de seção transversal e imagem interna de uma típica catedral gótica – Catedral de Amiens, França.



Fonte: (a) Penn State Libraries Pictures Collection. Disponível em: <<http://www.picssr.com/photos/psulibscollections/popular-interesting/page1>> Acesso em: 18 mai. 2014. (b) The Concept Art Blog. Disponível em: <<http://theconceptartblog.com/2010/05/09/mais-sobre-a-arquitetura-gotica/>> Acesso em: 18 mai. 2014.

Segundo Cirillo e Martellotta (2006), como consequência dessas modificações, a separação entre o clero (que agora eram os únicos atores da celebração) e os leigos (que passaram a ser meros espectadores) se tornou marcante. Estes últimos participavam cada vez menos das celebrações. A dificuldade na compreensão do idioma e a fraca inteligibilidade da fala causada pela longa reverberação das catedrais prejudicavam ainda mais a compreensão do discurso, restando ao público apenas apreciar a música e a celebração realizada pelos sacerdotes. A congregação não participava diretamente das missas e a presença das naves e altares laterais atraía parte do público a utilizar estes espaços para meditações particulares.

A partir do Renascimento e, posteriormente o período Barroco, percebe-se uma

redução nos volumes e tempos de reverberação das igrejas, comparadas às aquelas de estilo Gótico. No período Barroco, as talhas de madeira eram características decorativas marcantes. Bottazzini (2007) afirma que valores reduzidos do Tempo de Reverberação em baixas e altas frequências, obtidos na sua pesquisa, estão relacionados à presença destas superfícies de madeira distribuídas ao longo da igreja. Ainda assim, não é possível afirmar que houve uma melhoria na inteligibilidade da palavra desses ambientes. O mesmo autor, ao estudar as igrejas barrocas mineiras, mostra que mesmo com valores baixos de ruído de fundo, os resultados para a inteligibilidade da fala ficaram aquém do esperado.

Apesar da forte relação entre as igrejas e a música, muitas vezes privilegiada durante os ritos em detrimento da fala, esses edifícios não eram, de fato, lugares projetados especificamente para sua execução. Mesmo assim, durante muito tempo a música religiosa foi o tipo de composição predominante. Até por volta do século XVII, quando os teatros e salas de concerto se tornaram mais comuns, as igrejas ocupavam uma posição privilegiada dentre as demais construções como o lugar onde a música era criada e executada (CIRILLO; MARTELLOTTA, 2006; NAVARRO et al, 2009). Quando a música adquiriu autonomia, a sua relação com as igrejas mudou e a visível sintonia existente entre as igrejas góticas e o canto gregoriano, por exemplo, desapareceu (NAVARRO, et al, 2009).

Carvalho (1999) aponta que ao longo do tempo as igrejas se desenvolveram e se adaptaram às necessidades acústicas de cada época. Cirillo e Martellotta (2006) confirmam esta visão ao mostrar que as mudanças arquitetônicas e acústicas dos edifícios religiosos cristãos estiveram sempre ligadas às mudanças das características do próprio rito.

A mudança significativa mais recente veio com o Concílio Vaticano II, em 1965, que introduziu alterações na liturgia Católica, as quais tiveram forte influência na acústica das igrejas. Dentre elas está a alteração do idioma dos ritos em latim para o idioma próprio de cada congregação, dando ênfase à necessidade de compreensão da palavra. Deste modo, essas mudanças na forma das cerimônias demandam novas condições acústicas adequadas de seus edifícios (CARVALHO, 1999). Cirillo e Martellotta (2006) ressaltam que o papel renovado da palavra implica na necessidade de uma boa inteligibilidade da fala. Atualmente, a compreensão da palavra é o foco principal para o desempenho acústico de uma igreja católica, mesmo sem

deixar de considerar a qualidade da música, ainda presente nos ritos.

A própria execução musical tem uma nova relação com estes ritos. Os cânticos também são em idioma local e a instituição incentiva a participação da congregação durante as músicas. A presença do coro é cada vez menor nas celebrações comuns, cabendo aos próprios fiéis serem as vozes que acompanham a execução musical principal. Mais uma vez dá-se ênfase na compreensão da palavra, neste caso cantada.

### 3.2 PESQUISAS SOBRE ACÚSTICA DE IGREJAS

Até meados do século XX a acústica de igrejas não era um tema recorrente dentre as publicações científicas. Carvalho (1994) afirma que existiam poucas pesquisas abordando o tema da acústica especificamente em igrejas. Os poucos estudos até então, tratavam de medições apenas do tempo de reverberação e outros parâmetros acústicos eram aplicados quase que exclusivamente na análise de auditórios e salas de concerto. Martelotta (2001) também mostra em sua revisão bibliográfica alguns trabalhos sobre acústica de igrejas, publicados já na segunda metade do século XX, que tratam apenas do tempo de reverberação. A partir da década de 90, após a consolidação das mudanças nos ritos católicos e aliadas ao constante desenvolvimento da própria acústica como ciência, as pesquisas sobre este tema têm ganhado cada vez mais espaço e abrangência.

Um destaque especial pode ser dado ao trabalho de Carvalho (1994), que realizou uma pesquisa acústica detalhada em 41 igrejas católicas portuguesas considerando outros parâmetros além do TR, como EDT, C80, D50, T<sub>s</sub>, G, BR e RASTI. O autor analisa a relação entre as variações de estilo arquitetônico dos edifícios e os parâmetros acústicos. Após este trabalho, uma ampla pesquisa<sup>1</sup> foi liderada pelo Laboratório de Acústica da Universidade do Porto que, dentre dissertações, artigos e teses já estudaram 67 igrejas portuguesas.

Martelotta (2001) também faz um estudo de diversos parâmetros em nove igrejas católicas na região de Puglia, na Itália. Neste trabalho o autor dá ênfase aos parâmetros relacionados à música, como TR, EDT, G, C80, T<sub>s</sub>, BR e IACC, mas sem excluir a avaliação da fala,

---

<sup>1</sup> <http://www.fe.up.pt/~carvalho/igrejase.htm>

observando também resultados do parâmetro RASTI.

O estudo das igrejas italianas foi estendido além da região de Puglia por Cirillo e Martellotta (2006), em uma publicação que apresenta resultados da avaliação acústica de 34 igrejas católicas italianas, incluindo edifícios que foram construídos depois do Concílio Vaticano II (1965).

Mais recentemente, Kosala e Engel (2013) publicaram uma avaliação acústica de oito Igrejas Católicas Polonesas utilizando os parâmetros objetivos tempo de reverberação (TR), índice de clareza (C80), índice de inteligibilidade da fala (RASTI) e níveis sonoros  $L_p$  e  $L_{Aeq}$ . Além disso, os autores ainda propõem um novo índice de avaliação das propriedades acústicas de igrejas Católicas, como uma síntese dos parâmetros principais em um único número chamado GAP (*Global Index of Acoustic Properties*). Os autores explicam que este índice é baseado em quatro índices parciais que fornecem informações mais precisas sobre a relação entre parâmetros acústicos e seus valores preferenciais. Dentre eles, os índices parciais propostos reverberação ( $R$ ), som musical ( $M$ ), e inteligibilidade da fala ( $S$ ), estão relacionados aos parâmetros acústicos TR, C80 e RASTI, respectivamente. O quarto índice parcial proposto é o índice de distúrbio ( $D$ ), relacionado com níveis de ruído,  $L_{Aeq}$ .

Álvares-Morales, et al (2014) apresentam a aplicação de uma metodologia de estudos para a avaliação de amplas catedrais. Para isto medem alguns parâmetros acústicos objetivos utilizando resposta impulsiva, tais quais, TR, EDT, G, C80,  $J_{LF}$  e STI. Os resultados são comparados com valores simulados obtidos a partir de um modelo 3D. A simulação determina zonas de visibilidade para cada posição de fonte sonora, em conjunto com a distribuição estatística dos valores dos parâmetros acústicos nas áreas de influência selecionados na catedral.

No Brasil, os trabalhos que abordam o tema da acústica em igrejas começaram a ser desenvolvidos há menos tempo, em alguns casos são pouco aprofundados. Dentre os trabalhos mais relevantes pode-se destacar o de Bottazzini (2007), que estudou nove igrejas do século XVIII no estado de Minas Gerais. O autor realiza uma avaliação objetiva dos edifícios religiosos, avaliando os parâmetros relacionados tanto à fala quanto à música: TR, EDT, C80, D50, e STI. Bottazzini (2007) considera também a influência das características arquitetônicas nos

resultados.

Como exemplo de estudo de caso de um único edifício, pode-se destacar o trabalho de Barbo (2009). A autora analisa uma basílica de arquitetura contemporânea no Rio Grande do Sul e considera a resposta acústica do ambiente avaliando os parâmetros TR, EDT, C80 e D50. Este trabalho trata também do uso de um instrumento alternativo para produzir o impulso necessário para a obtenção da resposta impulsiva.

Na cidade de Campinas/SP, Smiderle (2013) realizou uma avaliação acústica em seis igrejas católicas da cidade de Campinas por meio de medições dos parâmetros acústicos TR, EDT, C80, D50 e STI, além de um levantamento métrico-arquitetônico dos espaços. A autora relaciona os parâmetros acústicos e as características arquitetônicas dos espaços estudados, bem como tece uma avaliação da qualidade da resposta acústica dos ambientes.

Atualmente, a compreensão do discurso é a parte mais importante das atividades religiosas embora Carvalho (1999) nos alerte que os problemas na inteligibilidade da palavra aparentam ser regra geral nas igrejas. Assim, existe uma dificuldade em encontrar harmonia entre as necessidades acústicas atuais dos ritos católicos e a arquitetura religiosa. Os estudos que tratam das igrejas de construção recente ilustram bem esta situação. Se por um lado vemos no trabalho de Sant'Ana e Zannin (2011) uma igreja de arquitetura contemporânea que proporciona aos seus usuários uma boa inteligibilidade da palavra, por outro, Carvalho e Cruz (2011) apontam graves problemas acústicos em um mesmo tipo de edifício. Martins (2010) compara duas igrejas de uma mesma paróquia, porém de períodos construtivos diferentes. A autora indica que houve uma melhoria nos valores dos parâmetros acústicos da igreja nova, se comparados com os da antiga. Mas mostra como é visível a dificuldade em se atingir um tempo de reverberação que seja ideal tanto para a fala quanto para a prática musical.

Outra questão ainda pouco discutida na atualidade é o uso dos equipamentos eletroacústicos durante as celebrações litúrgicas. Alguns trabalhos como os de Carvalho e Nascimento (2010), Carvalho e Silva (2010), Lencastre (1998), Martins (2010) e Zamarreño, et al (2008), fazem a avaliação acústica de igrejas considerando o uso dos sistemas de reforço sonoro (SRS) pelo parâmetro RASTI. Esta avaliação do SRS, porém, não é o foco principal destes trabalhos, se tratando de uma complementação à caracterização acústica dos ambientes. Soeta

et al. (2012) também tratam dos SRS em sua avaliação acústica de igrejas, mas ampliam o estudo medindo vários parâmetros acústicos nas situações com e sem o uso dos sistemas em duas das quatro igrejas avaliadas.

No que diz respeito a uma avaliação mais aprofundada dos SRS, destaca-se a publicação de Carvalho e Lencastre (2000), que trata da influência dos sistemas de reforço sonoro no parâmetro RASTI, relacionado à inteligibilidade da palavra falada, em igrejas católicas. Em seus resultados indicam que o uso destes sistemas apenas se torna útil para distâncias maiores que 11 m da fonte sonora principal. De modo geral, os autores concluem que o uso do SRS nas igrejas avaliadas aumenta pequenas porcentagens no RASTI. Na maioria dos casos, mesmo com o pequeno aumento do valor de RASTI com o uso dos SRS, ainda não foi suficiente para atingir o valor mínimo de 0,50, requerido para espaços destinados à percepção da fala. Apenas 23% dos edifícios estudados alcançaram este valor.

Observa-se que, sobre a avaliação acústica de igrejas, podemos encontrar trabalhos com diferentes focos no que diz respeito atividade principal a ser considerada. Há trabalhos que avaliam acusticamente o ambiente observando a relação mútua entre fala e música existente no espaço, ou ainda aqueles que dão ênfase a algum dos tipos de atividades. Isto depende do contexto a que o estudo se refere ou em que o próprio edifício se insere como, por exemplo, Martellotta (2001) que deu ênfase à percepção musical na avaliação das igrejas de Puglia. Sant'Ana e Zannin (2011), por outro lado, avaliaram apenas a inteligibilidade da fala em uma igreja contemporânea da cidade de Curitiba.

O tema principal de cada pesquisa irá influenciar na seleção dos parâmetros acústicos a serem avaliados nas igrejas. De uma forma geral, observa-se que alguns parâmetros são bastante comuns nas avaliações acústicas destes edifícios, como o TR e EDT. Quando se considera a percepção musical os parâmetros mais encontrados são o C80 e o G e quando se considera a inteligibilidade do discurso, o STI (ou RASTI) e o D50 estão quase sempre presentes. Para uma visão geral, a Tabela 8 mostra a atividade foco e os parâmetros acústicos considerados pelos principais autores estudados.

**Tabela 8:** Resumo das principais referências, indicando o foco da pesquisa e os parâmetros considerados.

Referência	Tipo	Foco principal da caracterização acústica	Parâmetros objetivos	Parâmetros considerando SRS
Álvares-Morales, et al (2014)	Artigo (periódico)	Música e fala	TR, EDT, G, C80, J <sub>LF</sub> , STI	-
Barbo (2009)	Dissertação	Música e fala	TR, C80, D50, STI	-
Bottazzini (2007)	Tese	Música e fala	TR, EDT, C80, D50, STI	-
Carvalho (1994)	Tese	Música e fala	TR, EDT, C80, D50, Ts, L, BR, RASTI	-
Carvalho (2000)	Artigo (congresso)	Música e fala	TR, EDT, C80, D50, Ts, L, BR, RASTI	-
Carvalho e Lencastre (2000)	Artigo (periódico)	Fala	RASTI	RASTI
Carvalho e Nascimento (2010)	Artigo (congresso)	Fala	TR, RASTI, L <sub>p</sub> (ruído de fundo), D (isolamento)	RASTI
Carvalho e Silva (2010)	Artigo (periódico)	Fala	TR, RASTI, NC (ruído)	RASTI
Cirillo e Martellotta (2003)	Artigo (periódico)	Música e fala	TR, EDT, C80, D50, G, T <sub>s</sub> , RASTI, IACC	-
Cirillo e Martellotta (2006)	Livro	Música e fala	TR, EDT, G, C80, LF, IACC, BR, Tr	-
Kosala e Engel (2013)	Artigo (periódico)	Música e fala	TR, C80, RASTI, L <sub>p</sub> , L <sub>Aeq</sub> . Parâmetros propostos: GAP, R, M, S, D	-
Lencastre (1998)	Dissertação	Fala	RASTI	RASTI
Martellotta (2001)	Tese	Música	TR, EDT, C80, G, Ts, RASTI, IACC	-
Martins (2010)	Dissertação	Fala	TR, RASTI, L <sub>p</sub> (ruído de fundo)	RASTI
Sant'Ana e Zannin (2011)	Artigo (periódico)	Fala	TR, D50, STI	-
Simões et al (2005)	Artigo (congresso)	Fala	TR, EDT, ALcons	-
Smiderle (2013)	Dissertação	Música e Fala	TR, EDT, C80, D50, STI	-
Soeta et al. (2012)	Artigo (periódico)	Música e fala	G, ITDG, RT, EDT, C80, TS, STI, IACC, LF, LG	G, ITDG, RT, EDT, C80, TS, STI, IACC, LF, LG
Zamarreño, Girón e Galindo (2008)	Artigo (periódico)	Fala	RASTI, C50, D50	RASTI

Os parâmetros acústicos citados na Tabela 8, mas que não foram abordados na seção 2.1 têm sua definição indicada no Apêndice D.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O intuito desta pesquisa é avaliar o uso dos sistemas de reforço sonoro (SRS) em igrejas católicas da cidade de Campinas, SP e sua influência na resposta acústica registrada nas posições de ouvintes. De acordo com a abordagem do tema, indica-se a realização de estudo de caso, de forma a descrever as características encontradas e formular hipóteses para as questões identificadas. O principal objeto de estudo deste trabalho são os sistemas de reforço sonoro, que por sua vez devem estar inseridos em um edifício. Desta forma, os templos Católicos e suas características arquitetônicas compõem o recorte temático deste trabalho. Um estudo de caso foi então elaborado direcionado a exemplares de edifícios que apresentam diferentes características arquitetônicas, com foco na diferença de volumetria. Foram selecionadas três igrejas católicas, pertencentes à cidade de Campinas, que, quando comparadas proporcionalmente entre si segundo o critério de volume podem ser caracterizadas como pequena, média e grande.

Sabe-se que uma boa relação entre os sistemas de sonorização e as características acústicas dos ambientes em que estão inseridos é fundamental para seu bom funcionamento. Assim, primeiramente deve-se conhecer as características acústicas do edifício para então definir a melhor aplicação de um sistema de sonorização no ambiente. De uma forma geral, a metodologia deste trabalho consiste na comparação de resultados referentes às respostas impulsivas obtidas nas igrejas em duas situações distintas: com e sem o uso dos sistemas de reforço sonoro. As medições acústicas do ambiente, independente do SRS, são necessárias para conhecer as características acústicas da sala e identificar suas qualidades e defeitos. Posteriormente, a avaliação acústica da sala considerando o uso do sistema de reforço sonoro

poderá indicar que tipo de mudança ocorreu em algumas localizações do ambiente e, do mesmo modo, avaliar seus pontos positivos e negativos.

Esta pesquisa tem como uma de suas principais referências o trabalho feito por Smiderle (2013), que avaliou a acústica de um grupo de igrejas católicas da cidade de Campinas, SP por meio de parâmetros objetivos. Para o presente trabalho, houve o interesse em coincidir os edifícios selecionados com aqueles avaliados por esta autora. Desta forma, uma vez que para a presente pesquisa aplica-se apenas um posicionamento de fonte, ao utilizar as mesmas posições de receptores de Smiderle (2013), pode-se apoiar a avaliação acústica do edifício sem o uso dos sistemas de reforço sonoro no diagnóstico feito pela autora. Neste caso, o interesse acadêmico de relacionar estes dois trabalhos de forma paralela está na complementação de resultados, uma vez que seguem a mesma temática de pesquisa.

Os edifícios selecionados, equipamentos utilizados e a forma de medição adotada são descritos nas próximas seções deste capítulo.

## 4.1 EDIFÍCIOS SELECIONADOS

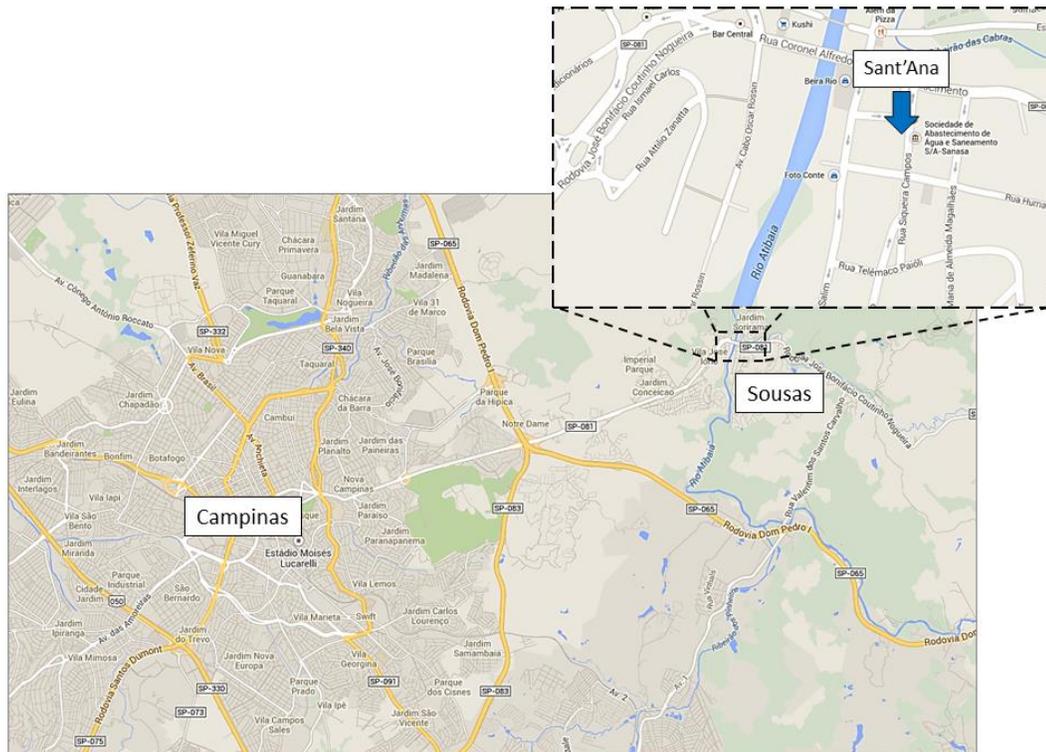
A amostra de estudo deste trabalho engloba três templos católicos pertencentes à Arquidiocese de Campinas, a qual abrange cerca de noventa paróquias. São elas: Igreja de Sant'Ana, Basílica de Nossa Senhora do Carmo e Igreja de Santa Rita de Cássia, consideradas respectivamente como igrejas de volume pequeno, médio e grande. Trata-se de edifícios representativos para a cidade e Igrejas Matrizes de suas respectivas paróquias. Fazem parte da história da cidade de Campinas, além de estarem intimamente ligadas à população local.

#### 4.1.1 IGREJA DE SANT'ANA

A Igreja de Sant'Ana está localizada no distrito de Sousas, pertencente à cidade de Campinas, SP. Este distrito teve seu povoamento iniciado por volta de 1830, como “Arraial dos Sousas”, quando sertanistas construíram uma ponte sobre o Rio Atibaia e ali se estabeleceram com suas famílias (ARQUIDIOCESE DE CAMPINAS, 2014). Neste arraial, segundo a Paróquia de Sant'Ana (2013), as primeiras celebrações religiosas católicas eram realizadas em casas de famílias, até que uma primeira capela foi erguida. Com o crescimento deste arraial, que mais tarde passou a distrito, tornou-se conveniente a criação de uma paróquia. Em 1894 tem-se então o início da construção de sua Igreja Matriz em um terreno doado pelo casal da família Salgado e contando com contribuições da população local. No ano de 1897 o edifício é inaugurado, tendo como Padroeira Nossa Senhora do Bom Conselho. Mais tarde, em maio de 1903, a autoridade eclesiástica autoriza a mudança de denominação para Sant'Ana, atual padroeira da Matriz (PARÓQUIA DE SANT'ANA, 2013). A Figura 18 apresenta localização da Igreja de Sant'Ana, em relação ao Distrito de Souza e cidade de Campinas. A Figura 19a mostra a imagem da vista externa atual do edifício e a Figura 19b apresenta a imagem interna desta igreja.

A Igreja Matriz de Sant'Ana abriga um volume de aproximadamente  $1.380 \text{ m}^3$ , é considerada como pequena dentre os edifícios avaliados. Possui geometria simples, com planta retangular (Figura 20) e arquitetura sem grandes ornamentações. Sua construção é em alvenaria com reboco, piso em granilite e forro de madeira. Possui apenas um altar, posicionado em nível elevado em relação à área da audiência. Em localização oposta ao altar há ainda um mezanino destinado ao coro. Destaca-se a cobertura da área do altar, que forma uma cúpula a partir de um recorte octogonal no forro, a qual pode ser identificada na Figura 21. A planta principal e corte longitudinal deste edifício, com suas principais dimensões encontram-se nas Figuras A.1 e A.2 do Apêndice A.

**Figura 18: Localização da Igreja de Sant'Ana.**



Fonte: Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/@-22.88375,-46.9651085,16z>> Acesso em: 18 mai. 2014.

**Figura 19: Vista externa (a) e interna (b) da Igreja de Sant'Ana**



Fonte: (a) Paróquia de Sant'Ana. Disponível em: <<http://www.santanasousas.com/>> Acesso em 18 mai. 2014. (b) Acervo SMIDERLE, 2013



resultado do desmembramento da paróquia da Conceição, recebendo a denominação de Santa Cruz e mais tarde, de paróquia de Nossa Senhora do Carmo. Cipolini (2013) conta que quando a sede da paróquia de Nossa Senhora da Conceição foi transferida para a Igreja do Rosário (e posteriormente para a Matriz Nova), a cidade foi dividida em duas paróquias e aquela primeira igreja de Campinas passou a ser denominada Matriz Velha, abrigando a sede da paróquia de Nossa Senhora do Carmo (Figura 22).

**Figura 22:** Igreja que abrigou a antiga Matriz do Carmo.



Fonte: *Basílica Nossa Senhora do Carmo*. Disponível em: [http://www.basilicadocarmocampinas.org.br/basilica\\_dados\\_gerais.htm](http://www.basilicadocarmocampinas.org.br/basilica_dados_gerais.htm) Acesso em: 18 mai. 2014.

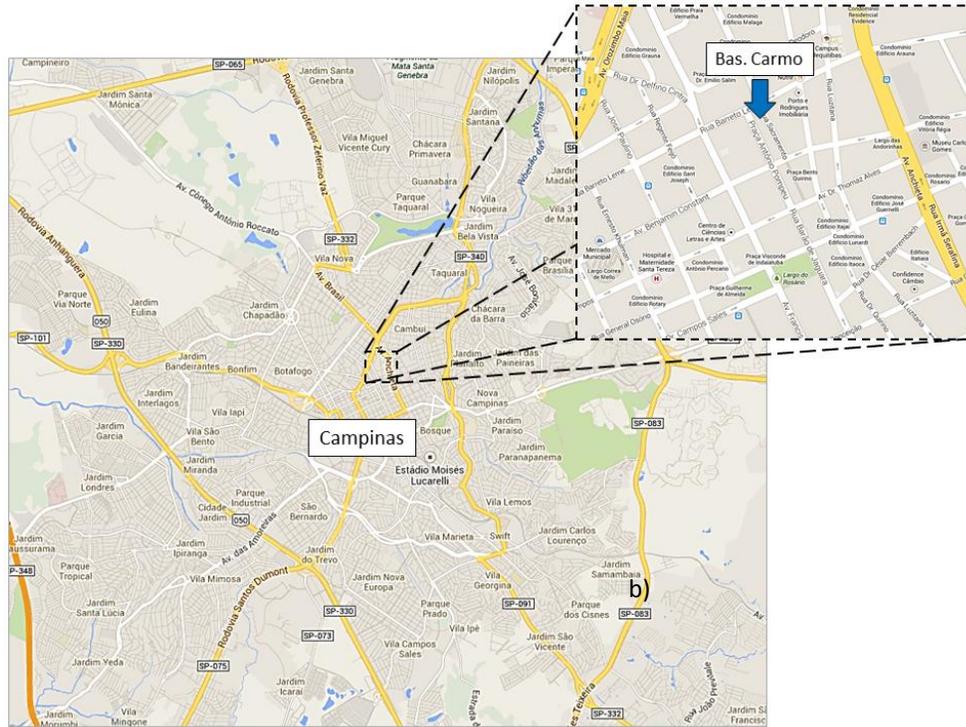
Na década de 1920 a Matriz do Carmo foi demolida e deu lugar ao edifício que conhecemos hoje como Basílica do Carmo. Naquele período, o projeto da nova igreja era financiado pelos Barões do Café, que na época queriam uma Basílica semelhante às europeias. Tratava-se de um projeto grandioso que cobriria toda a extensão do Mausoléu de Carlos Gomes até a atual igreja (CAMPINAS VIRTUAL, 2008). No entanto, com a crise do café as obras foram paralisadas, os recursos foram reduzidos e o templo foi construído com proporções menores que aquelas almejadas. Neste contexto, o edifício que abriga a Basílica do Carmo foi erguido em estilo neogótico e inaugurado no ano de 1940. Mais tarde, no ano de 1975, a igreja recebeu o título de “basílica menor”.

No ano de 2003, a Basílica de Nossa Senhora do Carmo junto com a Praça Bento Quirino foram tombados pelo Conselho de Defesa do Patrimônio Cultural de Campinas (Condepacc). Sua localização pode ser observada na Figura 23 e as imagens externa e interna da igreja encontram-se na Figura 24 (a) e (b).

“É inegável o valor histórico da Basílica do Carmo para Campinas: ali está enterrado o fundador da cidade, Francisco Barreto Leme; ali exerceu seu ministério o primeiro pároco da cidade de Campinas, frei Antônio de Pádua Teixeira que, para muitos, foi co-fundador da cidade; em seus altares, celebrou muitas vezes o padre Diogo Feijó, regente do Império; nela foram batizados Carlos Gomes, Moraes Sales e Francisco Glicério” (BASÍLICA DO CARMO, 2014b).

O edifício da Basílica de N. S. do Carmo possui um volume de aproximadamente 5.483m<sup>3</sup>. A planta segue o estilo tradicional das basílicas romanas, com duas fileiras de pilares que dividem a planta em uma nave central e duas naves laterais (Figura 25). O edifício é composto por alvenaria e reboco, com piso revestido por ladrilhos hidráulicos nas naves e granito polido no altar principal. Seus altares são esculpidos em mármore, mobiliário em madeira e o forro é revestido por reboco. A ornamentação segue o estilo neogótico com a presença marcante dos arcos ogivais, que podem ser observados na planta de corte da Figura 26. A planta principal e corte longitudinal deste edifício, com suas principais dimensões encontram-se nas Figuras A.3 e A.4 do Apêndice A.

**Figura 23: Localização da Basílica do Carmo.**



Fonte: Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/@-22.9014321,-47.0588678,17z>> Acesso em: 18 mai. 2014.

**Figura 24: Vista externa (a) e interna (b) da Basílica de Nossa Senhora do Carmo.**

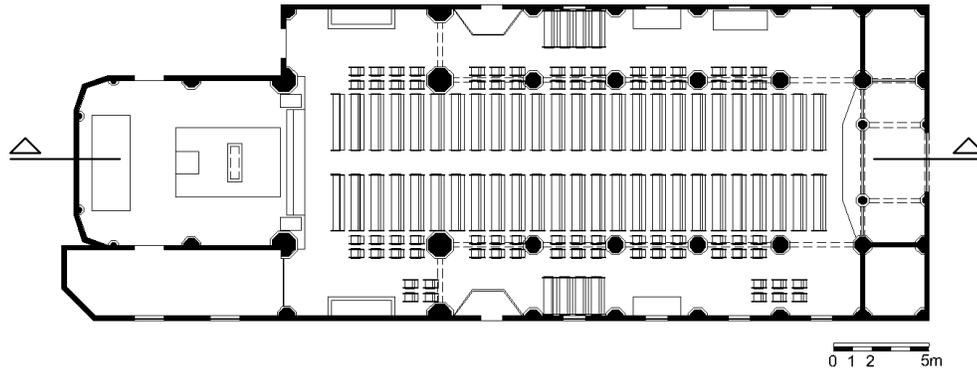


a)

b)

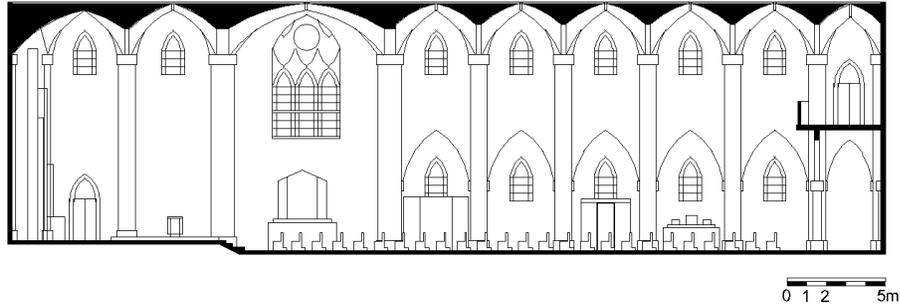
Fonte: (a) Wikipedia Enciclopédia Livre. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Bas%C3%ADlica\\_de\\_Nossa\\_Senhora\\_do\\_Carmo\\_%28Campinas%29](http://pt.wikipedia.org/wiki/Bas%C3%ADlica_de_Nossa_Senhora_do_Carmo_%28Campinas%29)> Acesso em: 18 mai. 2014. (b) Acervo SMIDERLE, 2013

**Figura 25:** Planta-baixa principal da Basílica de Nossa Senhora do Carmo.



Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora)

**Figura 26:** Corte longitudinal da Basílica de Nossa Senhora do Carmo.



Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora)

#### 4.1.3 IGREJA SANTA RITA DE CÁSSIA

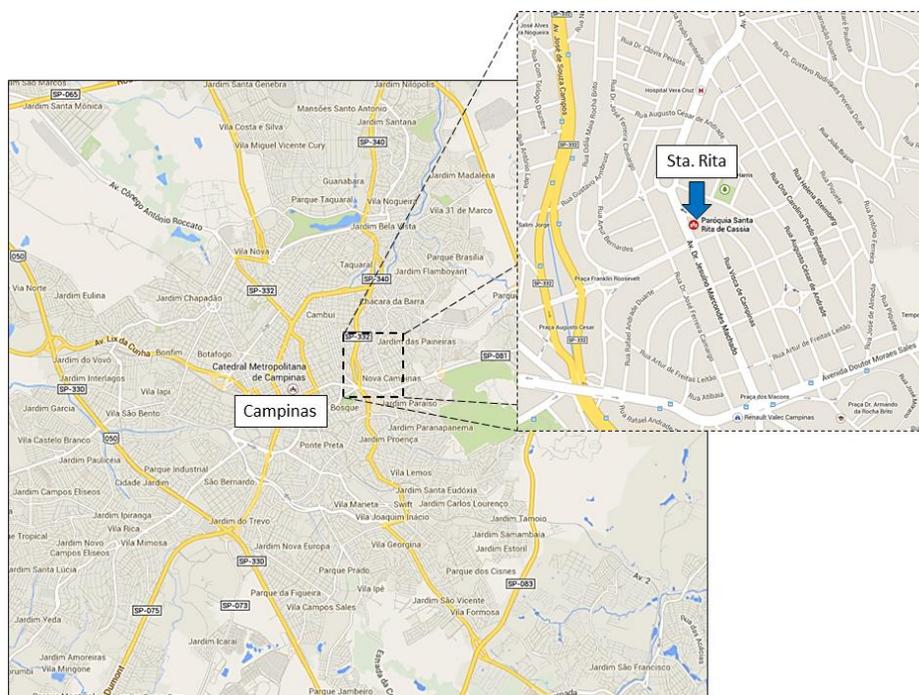
A Igreja Santa Rita de Cássia é a construção mais recente dentre este grupo de igrejas avaliadas e está localizada no bairro de Nova Campinas, na cidade de Campinas, SP (Figura 27). A história da Paróquia de Santa Rita de Cássia está fortemente ligada à participação direta da comunidade. Em sua origem, no ano de 1956, as primeiras missas eram celebradas na residência de um dos fiéis, no bairro de Nova Campinas. Em 1957, deu-se o início das construções do edifício que abriga a Igreja de Santa Rita, a qual também teve participação direta dos devotos, através de doações, rifas e outras iniciativas (COMUNIDADE RELIGIOSA, 2014). A primeira inauguração ocorreu no ano de 1964, embora o edifício ainda não estivesse totalmente concluído.

Mais tarde, no ano de 2004, com o objetivo de concluir o projeto original, além de

preservar a construção existente, a Igreja Santa Rita de Cássia passou por uma ampla obra de reforma das suas instalações (COMUNIDADE RELIGIOSA, 2014). As obras incluíram, dentre outras execuções, a instalação de uma cúpula com estrutura metálica na cobertura da nave central, tratamento acústico por todo o forro da igreja e instalação do sistema de sonorização. A “nova” igreja teve sua inauguração oficial em 5 de novembro de 2006, e recebe a população local para missas diárias. O edifício atual pode ser visto na Figura 28 (a) e (b).

A Igreja de Santa Rita conta com um volume de aproximadamente 13.313m<sup>3</sup>. Com planta em cruz grega (Figura 29) essa igreja possui paredes em alvenaria sem grandes ornamentações e conta com amplas aberturas de vitrais. O granito polido foi utilizado para revestir todo o piso e compor o altar e púlpitos. A Figura 30 mostra o desenho técnico em corte. A planta principal e corte longitudinal deste edifício, com suas principais dimensões encontram-se nas Figuras A.5 e A.6 do Apêndice A.

**Figura 27:** Localização da Igreja de Santa Rita.



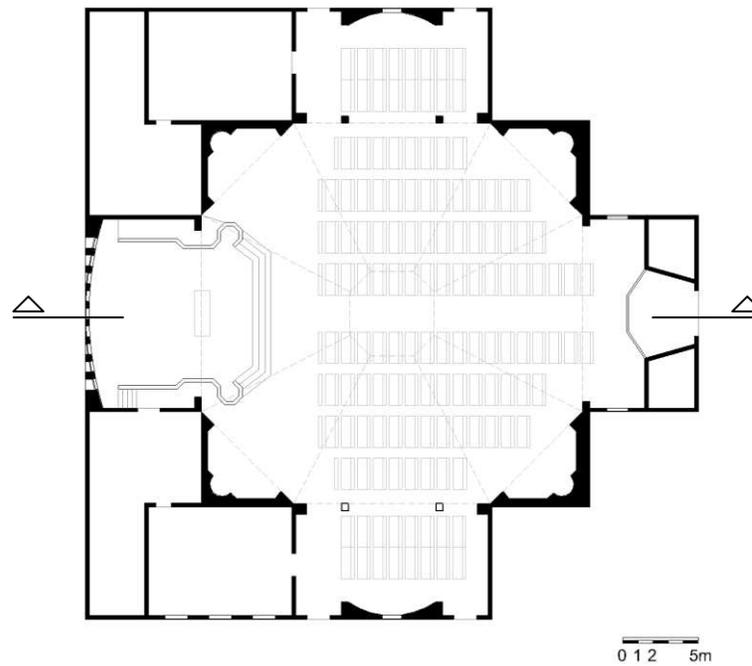
Fonte: Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/@-22.9093483,-47.0569688,14z>> Acesso em: 18 mai. 2014.

**Figura 28:** Vista externa (a) e interna (b) da Igreja de Santa Rita de Cássia.



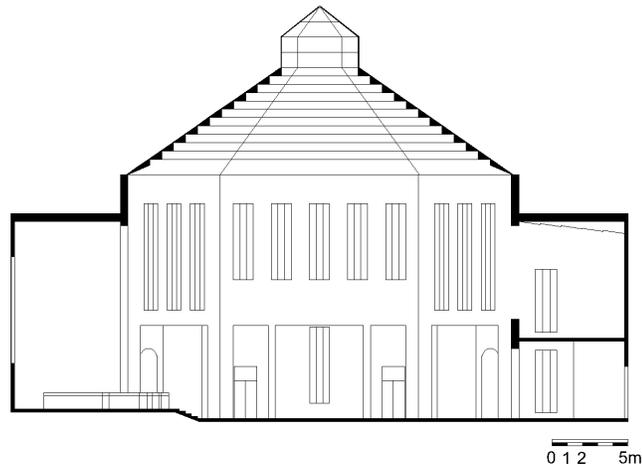
Fonte: Comunidade Santa Rita. Disponível em: <<http://www.comunidadesantarita.com.br>>, Acesso em: 18 mai. 2014

**Figura 29:** Planta-baixa principal da Igreja Santa Rita de Cássia.



Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora)

**Figura 30:** Corte longitudinal da Igreja Santa Rita de Cássia.



Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora).

#### 4.1.4 DADOS GERAIS

Os dados arquitetônicos de cada ambiente também foram coletados e calculados, a partir do levantamento de Smiderle (2013), para apoiar a avaliação da qualidade acústica destes edifícios. Na Tabela 9 encontram-se os dados relativos ao volume, área de superfícies e capacidade de audiência de cada uma das igrejas selecionadas.

**Tabela 9:** Principais parâmetros arquitetônicos das igrejas selecionadas

Igreja	Volume (m <sup>3</sup> )	Área de piso (em planta) (m <sup>2</sup> )	Área de paredes (em vista) (m <sup>2</sup> )	Área forro (m <sup>2</sup> )	Audiência (n)
Sant'Ana	1.378,7	221,05	445,54	258,96	120
N. S. do Carmo	5.482,87	640,87	1.273,04	918,40	324
Santa Rita	13.312,67	947,67	1.643,99	1.083,13	560

## 4.2 PARÂMETROS ACÚSTICOS

A metodologia deste trabalho se baseia na avaliação dos parâmetros acústicos obtidos a partir do sinal sonoro emitido pelos sistemas de reforço sonoro (SRS), considerando sua relação com as características acústicas do ambiente em que o SRS está inserido. Com ênfase na

inteligibilidade da palavra, serão avaliados os principais parâmetros acústicos que descrevem a qualidade da fala. Pondera-se também, em segundo plano, a necessidade de uma ambiência favorável para a música que, em algumas situações, é reforçada pelos sistemas de som das igrejas avaliadas.

Desta forma, os ambientes serão avaliados em duas situações: com e sem o uso dos SRS. Serão considerados os seguintes parâmetros acústicos: TR, EDT, D50 (medidos em função de frequência, em bandas de oitava entre 125 Hz e 4 kHz), STI e ALcons.

### 4.3 MEDIÇÕES

Para as medições acústicas indica-se a aplicação da técnica de resposta impulsiva. Trata-se do registro da pressão sonora em um ponto do ambiente, quando um pulso intenso e de curta duração é produzido. No caso desta pesquisa, o método utilizado é a de resposta impulsiva integrada, no qual se utiliza um sinal sonoro específico, neste caso uma varredura de senos, que depois de processado produz a resposta impulsiva do ambiente.

Para este procedimento, serão utilizados os seguintes instrumentos e ferramentas:

- *Software* de avaliação acústica de salas DIRAC<sup>2</sup>, da empresa Bruel&Kjaer, que gera o sinal sonoro para a medição e, após sua captação, calcula os parâmetros acústicos indicados.
- Microcomputador, com placa de som Scarlett 8i6, da marca Focusrite, capaz de processar os sinais que serão emitidos e captados para análise do *software*.
- Amplificador de potência sonora – Type 2716, da marca Bruel&Kjaer
- Fonte sonora omnidirecional OmniPower – Type 4296, Bruel&Kjaer
- Microfone omnidirecional modelo 4188 da Brüel&Kjaer, que pertence ao medidor de nível de pressão sonora tipo 2238 Brüel&Kjaer, para captar no ambiente o sinal emitido pela fonte sonora.
- Registrador de temperatura e umidade – modelo 175-H2 (TESTO)

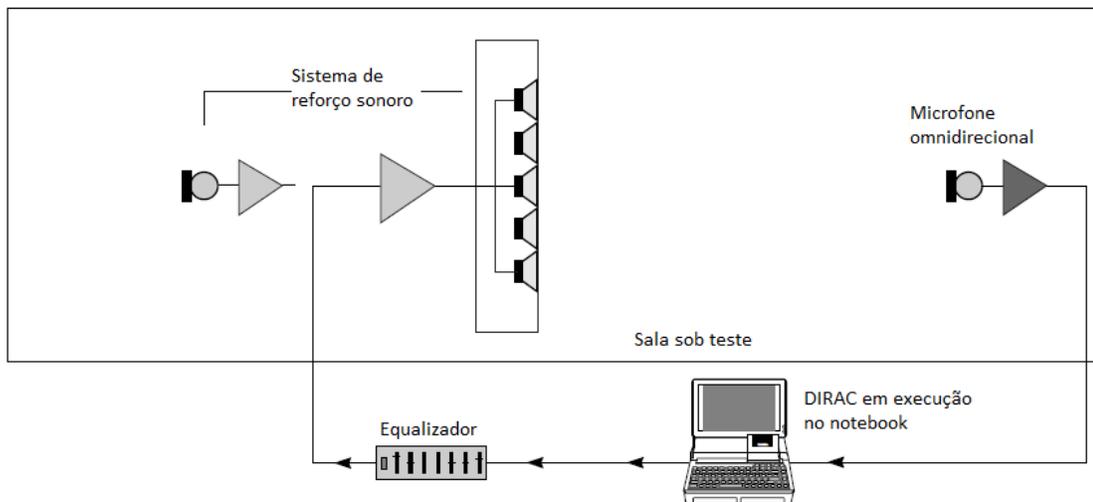
---

<sup>2</sup> DIRAC 3.1® - Room Acoustics Software – Type 7841

A fim de considerar o uso do sistema de reforço sonoro de cada ambiente nos parâmetros acústicos, o sinal da resposta impulsiva foi ligado diretamente ao sistema de sonorização, utilizando como fonte sonora o mesmo sistema de reforço sonoro, também chamado de sistema PA (*Public Address*), usado durante as missas.

A norma IEC 60268-16 (2011) prevê este tipo de medição para o parâmetro STI nos procedimentos de medida, quando indica no item 7.4 a forma de entrada do sinal como “*electrical input*”. Mostra ainda como exemplo de combinação de entrada e saída de sinal o item 7.6.4 “*Electrical input – Acoustical output (e.g. assessment of PA systems)*”, ou seja, entrada de sinal de forma elétrica e saída de sinal de forma acústica, indicando este método como um exemplo usado para avaliação de sistemas PA. A Figura 31 mostra um esquema dessa forma de ligação, retirada de uma nota de aplicação do *software* DIRAC. Os demais parâmetros também serão medidos da mesma forma, buscando testar seus resultados sob a influência dos sistemas e suas implicações para a inteligibilidade da palavra nos ambientes avaliados.

**Figura 31:** Configuração de medição através de injeção direta do sinal em um sistema de som.



Fonte: BRUEL&KJAER, 2003b, p. 13.

Para a caracterização acústica sem o sistema de reforço sonoro, registrou-se o sinal gerado utilizando a fonte padrão omnidirecional. Esta fonte foi posicionada no altar principal, representando a posição ocupada pelo orador principal durante uma celebração.

De modo a permitir a comparação de resultados entre estas duas condições de fonte

sonora, os sinais foram registrados utilizando as mesmas localizações de receptores para as duas situações. O posicionamento adotado para dos microfones coincide com as configurações espaciais utilizadas por Smiderle (2013). Assim, o diagnóstico realizado por esta autora pode servir de suporte para a avaliação feita por esta pesquisa. Os microfones foram posicionados na área dos ouvintes, seguindo recomendações de Martellotta et. al (2009). Foram distribuídos seis, quatorze e oito pontos receptores nas igrejas de Sant'Ana, N. S. do Carmo e Santa Rita, respectivamente. Os mapas de localização dos microfones nos ambientes estão apresentados no capítulo 5 deste trabalho, nas seções referentes a cada uma das igrejas avaliadas.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados e análises dos parâmetros acústicos TR, EDT, D50, STI e ALcons, a partir das medições acústicas nas três igrejas avaliadas por este trabalho, bem como os registros das condições de ruído de fundo dos ambientes.

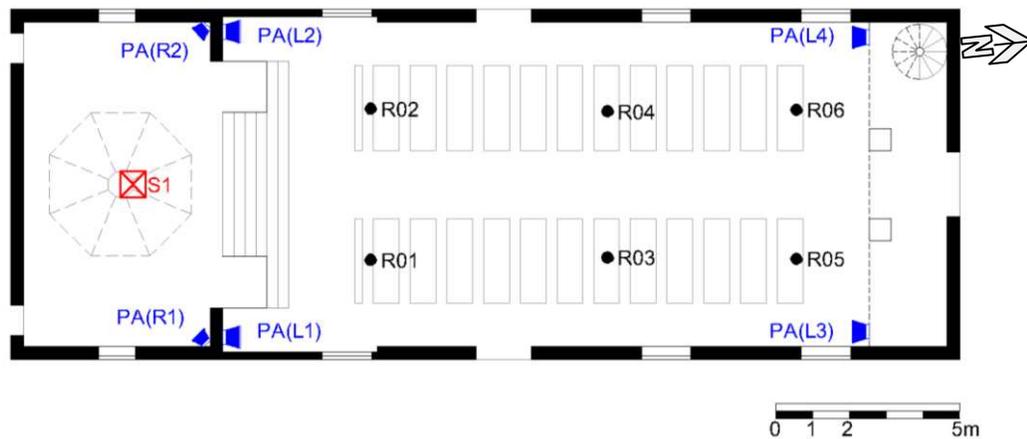
As igrejas avaliadas foram a Igreja de Sant'Ana, Basílica de N. S. do Carmo e Igreja de Santa Rita. Os resultados das medições estão descritos e discutidos para cada um dos edifícios nas próximas sessões.

### 5.1 IGREJA DE SANT'ANA

Para as medições dos parâmetros acústicos na igreja de Sant'Ana, seis pontos receptores foram distribuídos ao longo da nave, nomeados de R01 a R06, como mostra a Figura 32. A análise acústica foi realizada em duas condições: com e sem o sistema de sonorização. Na caracterização da primeira situação, o sinal foi ligado diretamente ao sistema de reforço sonoro da igreja. As fontes sonoras que compõem este sistema são caixas de som da marca JBL modelo SCP12X e estão distribuídas nos quatro cantos da nave. O sistema possui também duas caixas de retorno no altar do fabricante JBL Selenium, modelo C521. As posições das caixas de som estão indicadas na planta da Figura 32, representadas pela nomenclatura PA(L1) a PA(L6) para as caixas direcionadas ao público, e a nomenclatura PA(R1) e PA(R2) indicando as caixas de retorno. Na Figura 33 (a) e (b) estão as imagens das caixas de som PA(R2) e PA(L4), respectivamente. A Figura 34 apresenta a vista interna da igreja a partir do centro da nave, em direção ao altar, onde podem ser observadas as caixas de som PA(L1) e PA(L2). Para as

medições acústicas considerando o sistema de sonorização, as caixas emitiram o sinal simultaneamente, pois o objetivo é avaliar o sistema como um todo e não as fontes isoladas. Por isso, os resultados das medições deste sistema são indicados como “PA” nos gráficos e tabelas. Para a caracterização acústica do ambiente sem o sistema de reforço sonoro, a fonte omnidirecional foi posicionada no altar representando a posição ocupada pelo orador principal e está indicada como fonte S1 na planta baixa (Figura 32), bem como nos gráficos e tabelas que apresentam os resultados.

**Figura 32:** Planta baixa com localização dos pontos receptores e fontes sonoras – Igreja de Sant’Ana



Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora).

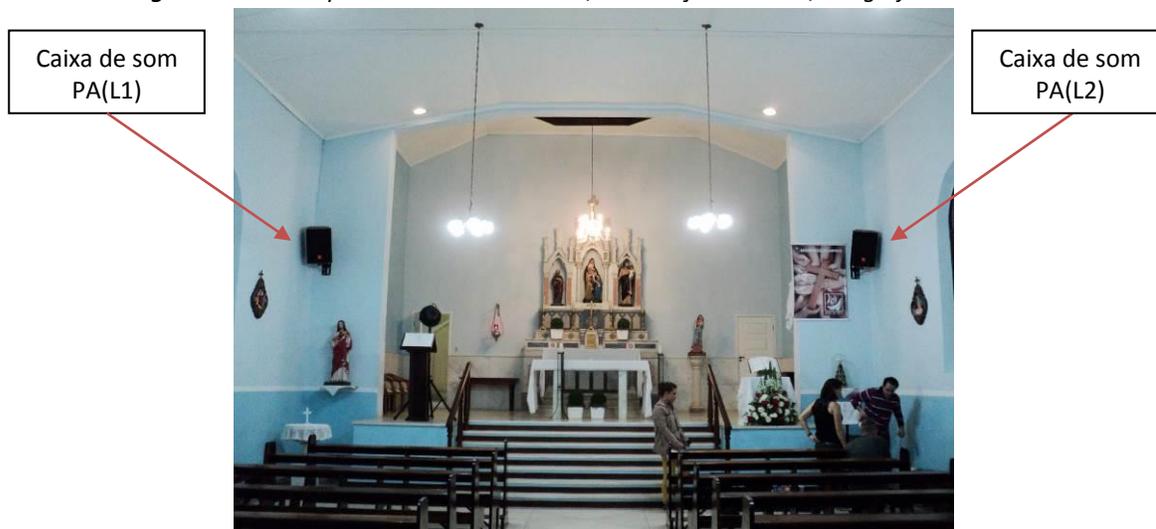
Nota: os desenhos das caixas de som são representativos, não se trata de seu formato e proporções reais.

**Figura 33:** (a) Imagem da caixa de som de retorno PA(R1), localizada no altar, e (b) imagem da caixa de som PA(L4), localizada na parte traseira da nave. ( )



Fonte: (a) Acervo SMIDERLE, 2013. (b) Acervo da autora

**Figura 34:** Vista a partir do centro da nave, em direção ao altar, da Igreja de Sant'Ana



Fonte: Acervo da autora

### 5.1.1 RUÍDO DE FUNDO

Para apoiar a avaliação dos parâmetros acústicos de uma sala, é importante observar as condições de ruído deste ambiente. A Tabela 10 apresenta os dados relativos ao ruído de fundo, indicando o nível de pressão sonora em função de frequência, sua classificação NC conforme NBR 10152 (1987, p. 3) e o nível global em dB(A), registrados na Igreja de Sant'Ana no período em que as medições acústicas foram realizadas.

**Tabela 10:** Níveis de ruído de fundo em função de frequência, com a respectiva classificação NC, e nível global – Igreja de Sant'Ana

Ruído								
Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lp (dB)	53,3	47,6	42,0	39,7	39,1	31,4	26,8	26,9
NC	40							
Lp (dB(A))	44,0							

A norma brasileira NBR 10152 (1987) estabelece níveis de ruído para conforto acústico em diversos tipos de ambiente. Esta norma indica que para Igrejas e Templos os níveis de ruído devem estar em torno de 40 dB(A), sendo aceitável até 50 dB(A). Indica ainda que a curva NC relativa ao espectro desse ruído deve ser classificada até a curva NC 35, com classificação máxima aceitável referente à NC 45. Observando estas condições, a Igreja de Sant'Ana é considerada um lugar aceitável para as atividades litúrgicas, de acordo com os níveis de ruído registrados.

É importante observar que as medições acústicas deste local foram realizadas em um dia de semana comum, porém após o horário comercial. A Figura 35 apresenta a localização da Igreja de Sant'Ana e seu entorno, com a marcação, em amarelo, de algumas áreas que têm o uso de comércio ou serviços. Foram identificados alguns edifícios comerciais ou de prestação de serviços que atraem maior movimento diurno, como mercados, padarias, bancos, lojas diversas e pequenas empresas. Além disso, próximo ao edifício se encontra uma das principais ruas do bairro, a Rua Cel. Alfredo Augusto do Nascimento (1), contando com grande fluxo de veículos. Isto significa que, para as missas diurnas, devido à localização desta igreja, é possível que os níveis de ruído sejam maiores que os medidos.

**Figura 35:** Localização da Igreja de Sant’Ana (azul) e seu entorno, com indicação de áreas de comércio e serviços (amarelo) e da Rua Cel. Alfredo Augusto do Nascimento(1).



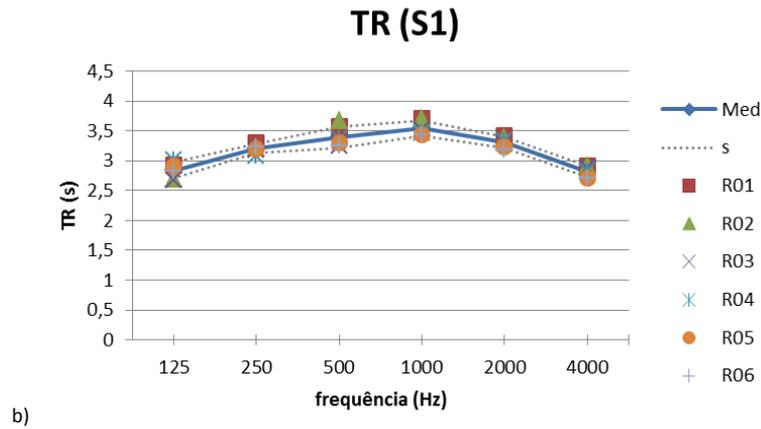
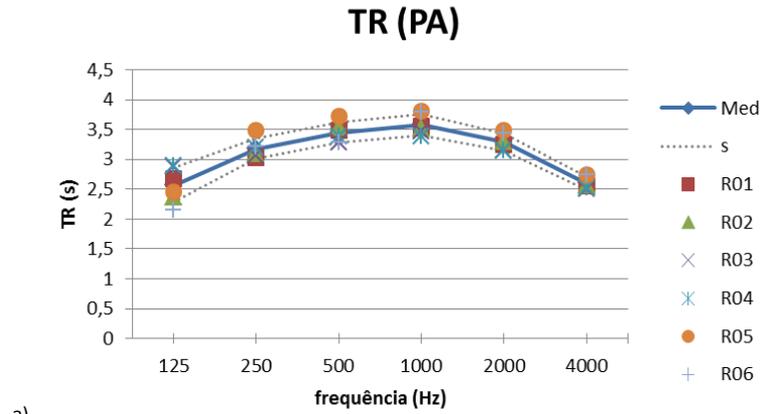
Fonte: Google Maps. Disponível em: <<https://maps.google.com/>> Acesso em: 17 mai. 2014 (Editado pela autora)

Também foram acompanhadas as condições de temperatura e umidade relativa do ar durante as medições. Os valores estão apresentados na Tabela C.1 do Apêndice C.

### 5.1.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO (TR)

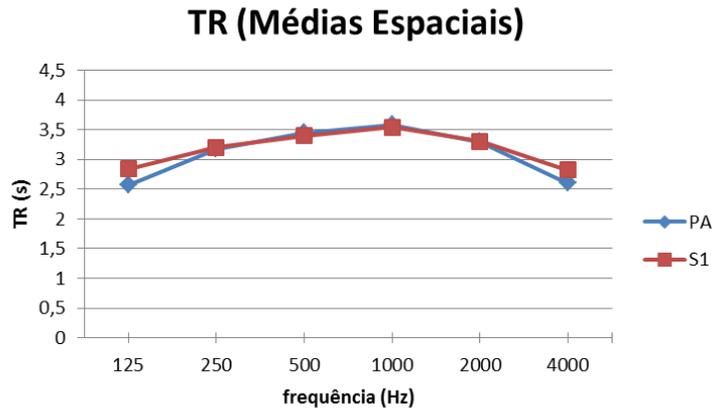
Dentre as igrejas avaliadas, a Igreja de Sant’Ana é a que possui menor volume, com aproximadamente  $1.380 \text{ m}^3$ . Os valores obtidos de tempo de reverberação deste edifício, apresentados em função de frequência em bandas de oitava entre 125Hz e 4000Hz, para os diferentes receptores e nas duas situações de fonte, encontram-se na Figura 36. Nestes gráficos, a linha tracejada indicada como “s” representa a variação do desvio padrão. O gráfico da Figura 37 mostra a comparação das médias espaciais de TR entre receptores, nas duas situações de fontes (PA e S1). Os dados de TR, resultado das medições na Igreja de Sant’Ana, encontram-se na Tabela B.1, no Apêndice B.

**Figura 36** – Valores de TR, em função de frequência para o sistema PA (a) e fonte S1 (b), com curva de valores médios (Med) e curvas de desvio padrão (s) – Igreja de Sant’Ana.



*Fonte: Elaborado pela autora*

**Figura 37** – Valores de TR, em função de frequência, das médias espaciais entre receptores – Igreja de Sant’Ana.



Esta igreja apresenta curvas de TR com comportamento semelhante para todos os receptores, há um aumento nos valores de médias frequências, em relação às baixas e altas frequências. Este comportamento se compara às igrejas setecentistas mineiras de formato retangular, avaliadas por Bottazzini (2007). O autor afirma que este comportamento é raro em outros estilos arquitetônicos. Além da forma retangular semelhante ao daquelas igrejas setecentistas, o forro de madeira que recobre a Igreja de Sant'Ana, tanto nave quanto altar, contribui para a absorção das altas frequências além de funcionar como painéis vibrantes, absorvendo também baixas frequências. Aliado a isso, esta igreja não apresenta materiais com absorção sonora significativa para as médias frequências, como por exemplo, as paredes de alvenaria e reboco, que possui os coeficientes de absorção  $\alpha_{500\text{Hz}} = 0,03$  e  $\alpha_{1\text{kHz}} = 0,04$  (MEHTA et. al, 1999).

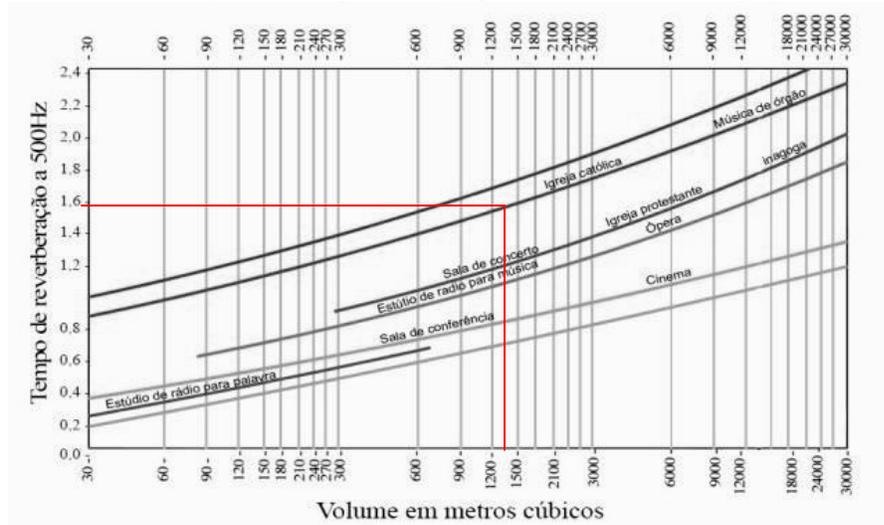
Observa-se que os resultados do TR deste ambiente indicaram valores em 500Hz em torno de 3,45 s (PA) e 3,4 s (S1) e em 1000 Hz os valores foram próximos a 3,59 s (PA) e 3,54 s (S1). Estes valores representam um tempo de reverberação médio entre as bandas de frequência de 500 Hz e 1000 Hz ( $TR_{\text{med}}$ ) de 3,52 s (PA) e 3,47 s (S1). Adotando um valor de JND de 5% para este parâmetro, o que se traduz em uma variação de 0,17 s para o  $TR_{\text{med}}$ , considera-se que a variação de resultados entre o sistema PA e a fonte omnidirecional (S1) é imperceptível para o ouvinte.

Considerando as principais atividades desenvolvidas durante as missas, as leituras e cânticos têm diferentes necessidades de TR. Para a palavra falada, um valor curto de TR, em torno de 1 s, é recomendável para garantir uma boa inteligibilidade. Já os cânticos requerem um TR mais alto, em torno de 2 s, para encorajar o senso de participação da congregação (CIRILLO; MARTELOTTA, 2006). Desta forma, a Igreja de Sant'Ana, excede os valores indicados, tanto para o discurso quanto para as canções.

A norma brasileira NBR 12179 (1992) apresenta recomendações para o tempo de reverberação (em 500 Hz), em função do volume, para espaços de diferentes usos. Na curva referente a Igrejas Católicas, em edifícios com volume semelhante ao da Igreja de Sant'Ana a recomendação é que o  $TR_{500\text{Hz}}$  seja próximo a 1,6 s (Figura 38). Mais uma vez avalia-se o comportamento acústico desta igreja, em relação às recomendações da literatura, com um

valor de TR excessivo.

**Figura 38:** Gráfico de tempos ótimos de reverberação (500Hz) em função do volume, apresentado pela norma NBR 12179, com indicação de  $TR_{500Hz}$  relativo ao volume da Igreja de Sant’Ana.



Fonte: ABNT NBR 12179, 1992, p. 9 (Editado pela autora)

A Tabela 11 apresenta os valores médios de tempo de reverberação ( $TR_{med}$ ) de algumas igrejas com volumes próximos ao intervalo de  $1000m^3$  a  $2000m^3$ , em comparação ao valor obtido na Igreja de Sant’Ana.

**Tabela 11:** Comparação de tempos de reverberação médios entre a Igreja de Sant’Ana e igrejas de volumes semelhantes

Igreja	País	Volume ( $m^3$ )	Estilo arquitetônico ou ano de construção	$TR_{med}$ (s)	Referência
Igreja de Sant’Ana	Brasil	1380	1894	3,47	
Igreja Messiânica	Brasil	933	Moderno/Contemporâneo	1,2	Sant’Ana e Zannin (2011)
Church A <sup>1</sup>	Japão	1000	1882-1909	1,4	Soeta, et. al (2012)
Vallisa Church	Italia	1520	Românico	2,1	Cirillo e Martellotta (2003)
Ognissanti Church	Italia	1800	Românico	5,4	Cirillo e Martellotta (2003)
Igreja de São Carlos Borromeu	Brasil	2100	1970	1,35	Sant’Ana e Zannin (2011)

<sup>1</sup>O autor não apresentou os nomes das igrejas avaliadas em seu artigo.

Dentre as igrejas apontadas pela Tabela 11, a Igreja de Sant’Ana apresenta o segundo maior  $TR_{med}$ . Apesar de este edifício ter sido projetado em uma época em que a compreensão da fala não era o foco principal das construções católicas, considerando seu uso atual esta igreja

apresenta valores excessivos de TR nas médias frequências. Como as frequências de 500 Hz e 1000 Hz são importantes para a fala, valores altos de TR nestas bandas centrais podem prejudicar sua inteligibilidade, independente se for considerado o uso do sistema de reforço sonoro ou não.

Como o parâmetro TR sofre influência direta das características físicas da sala, como volume e materiais de revestimento, não há diferenças significativas nos resultados de TR com e sem o uso do sistema de sonorização.

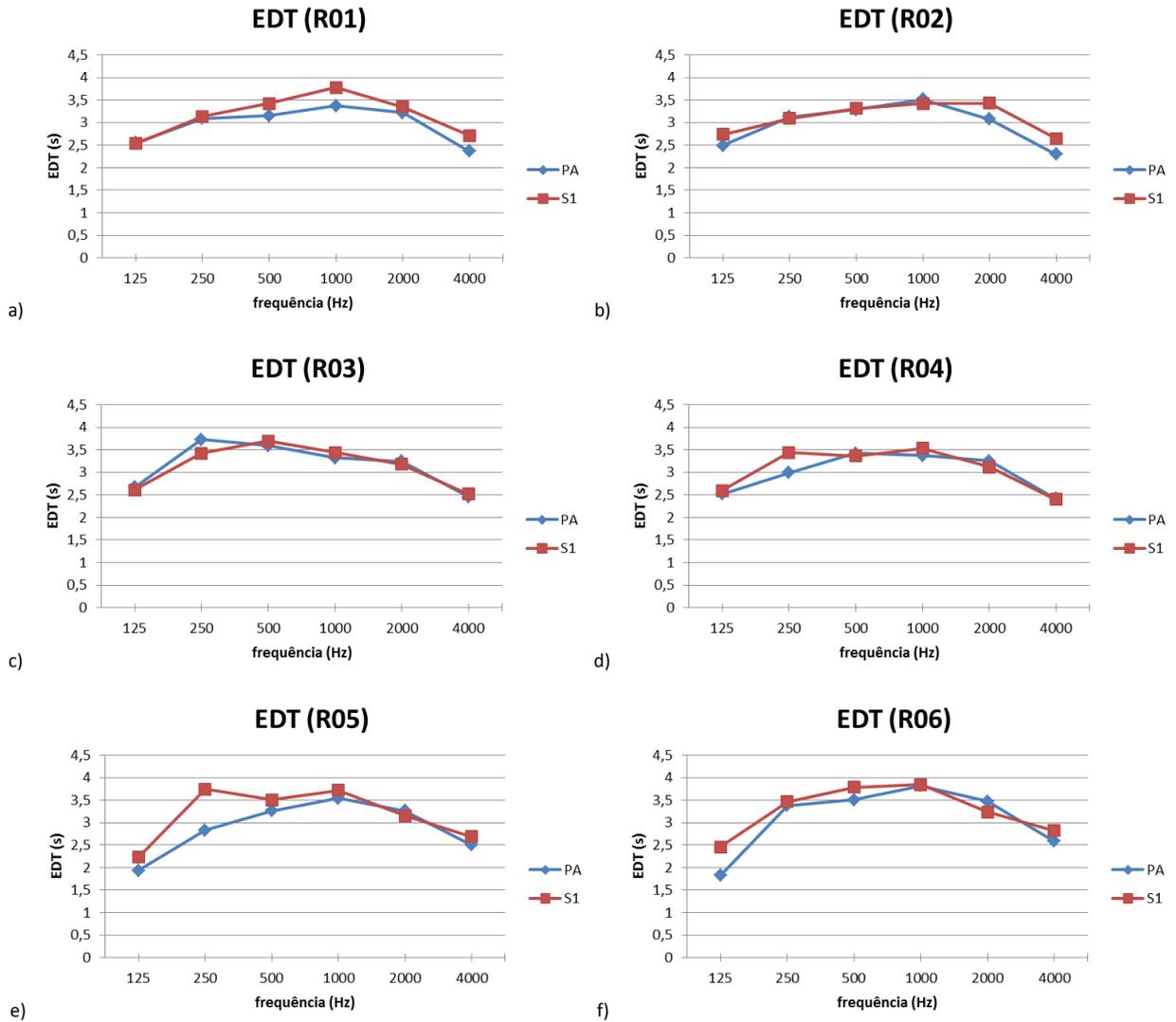
### 5.1.3 TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT)

Os resultados do parâmetro EDT, em função de frequência nas bandas de oitava entre 125 Hz e 4000 Hz, mostrados pela Figura 39, estão organizados para cada ponto receptor, separadamente, mostrando as curvas referentes a cada situação de fonte sonora (PA e S1). Os dados de EDT, resultante das medições na igreja de Sant'Ana, encontra-se na Tabela B.2, do Apêndice B.

Observa-se na Igreja de Sant'Ana que as curvas de EDT para as diferentes fontes têm comportamento semelhante entre si e também semelhantes às curvas de TR. De maneira geral, as curvas de EDT têm valores menores em baixas e altas frequências, comparados às médias frequências.

O parâmetro EDT está diretamente associado à sensação de reverberância e sofre maior influência da localização do receptor no ambiente. Valores baixos de EDT significam que o receptor percebe menos a reverberância da sala do que aqueles que estão em posições que possuem valores de EDT mais altos. Uma das formas de se avaliar o EDT é compará-lo com a curva de TR do mesmo ambiente. Quanto menor o valor de EDT, comparado ao valor de TR, há mais energia inicial atingindo o ponto em questão em oposição à energia reverberante.

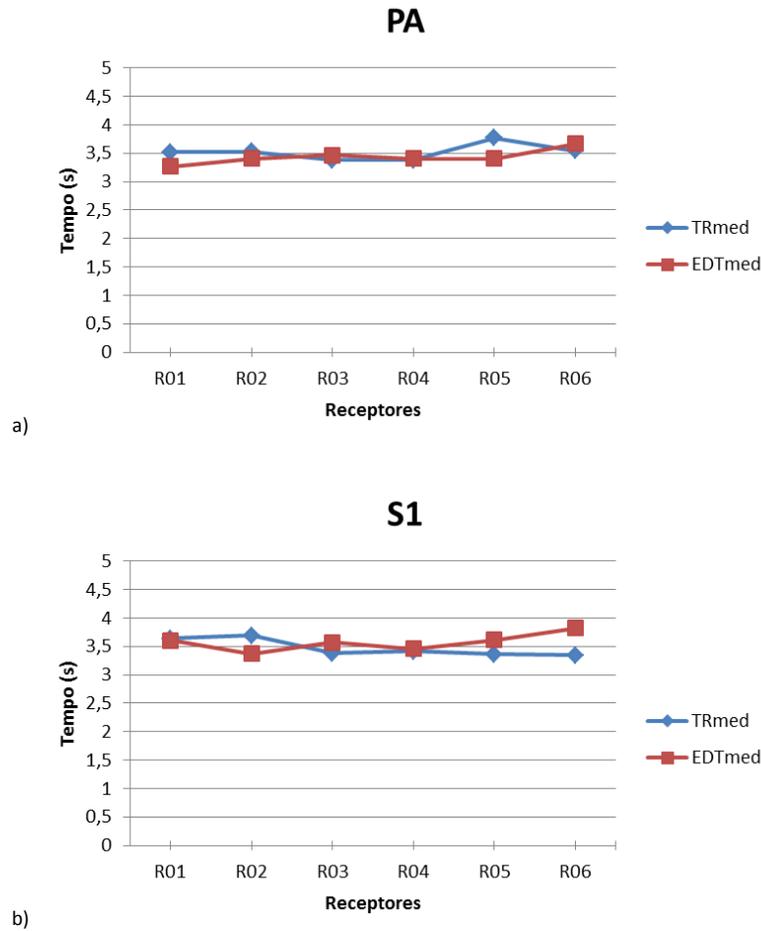
**Figura 39 – Valores de EDT, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Sant’Ana**



Fonte: Elaborado pela autora

Os gráficos (a) e (b) da Figura 40 mostram a comparação entre curvas de  $TR_{med}$  e  $EDT_{med}$  do sistema PA, em função dos pontos receptores, e curvas de  $TR_{med}$  e  $EDT_{med}$  da fonte S1, organizadas da mesma forma. A Tabela 12 apresenta as distâncias, em planta, entre os receptores e cada uma das fontes sonoras do sistema PA, bem como da fonte S1.

**Figura 40:** Comparação entre valores de  $TR_{med}$  e  $EDT_{med}$ , em função dos pontos receptores, para as fontes do sistema PA (a) e fonte S1 (b).



Fonte: Elaborado pela autora

**Tabela 12:** Distâncias entre pontos de fonte sonora e receptores

Fonte	Distância (m)					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
PA(L1)	4,53	7,37	10,69	12,12	15,76	16,79
PA(L2)	7,37	4,53	12,12	10,69	16,79	15,76
PA(L3)	13,74	14,92	7,45	9,39	2,90	6,46
PA(L4)	14,92	13,74	9,39	7,45	6,46	2,90
S1	6,79	6,79	13,07	13,07	18,18	18,18

Para o sistema PA, a maioria dos receptores apresentam valores de  $TR_{med}$  e  $EDT_{med}$  próximos entre si, sendo o  $EDT_{med}$  em alguns pontos inferior ao  $TR_{med}$ . Para a fonte S1, posicionada no altar, a relação de valores entre  $TR_{med}$  e  $EDT_{med}$  tem comportamentos diferentes

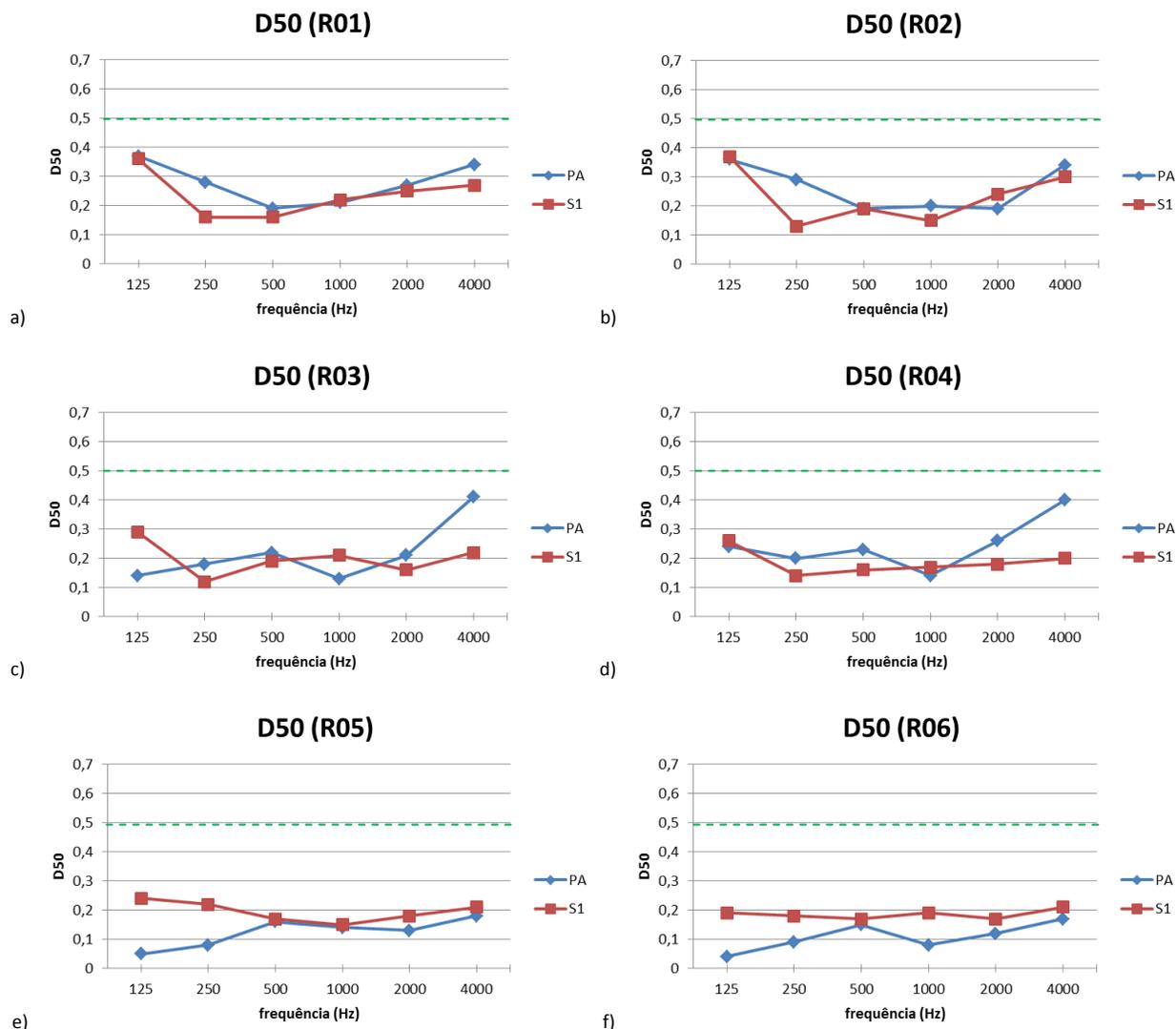
do que as curvas das fontes PA. Para a fonte S1, os receptores R05 e R06 apresentam valores de  $EDT_{med}$  maiores que os valores de  $TR_{med}$ . Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que estes receptores são os mais distantes do altar e, por isto, quando recebem o som proveniente da fonte S1, sofrem mais influência do campo reverberante do que do som inicial. A sensação de reverberância nos receptores R05 e R06 para a fonte S1 é então maior que a sensação de reverberância dos mesmos receptores para a fonte PA. Neste último caso, a presença das caixas de som mais próximas a estes pontos contribui com mais energia sonora inicial nesta região.

#### 5.1.4 DEFINIÇÃO (D50)

Os resultados do parâmetro D50, nas bandas de frequências de 125 Hz a 4000 Hz, mostrados pela Figura 41, estão organizados para cada ponto receptor, separadamente, mostrando as curvas referentes aos resultados de cada fonte sonora (PA e S1). Os dados de D50, referentes à igreja de Sant'Ana, encontram-se na Tabela B.3 do Apêndice B.

De forma geral, para ambas as situações de fontes sonoras, constata-se que todos os resultados são considerados insatisfatórios, pois estão abaixo do valor mínimo de 0,5, recomendado por Barron (2010). Ao observar os resultados do parâmetro D50 para os diferentes pontos receptores, percebe-se que a relação entre as curvas de cada fonte sonora apresenta comportamentos que variam fortemente entre as posições. Nos receptores mais próximos do altar a contribuição do sistema PA para o D50 se dá basicamente nas frequências de 250 Hz e 4000 Hz em R01 e nas frequências de 250 Hz, 1000 Hz e 4000 Hz em R02. Para os pontos centrais, R03 e R04, os valores de D50, para fonte PA, em 250 Hz e 500 Hz são maiores que os da fonte S1, porém perdem qualidade em 1000 Hz, e voltam a melhorar a partir de 2000Hz. Esta redução em 1000 Hz pode prejudicar uma boa compreensão do discurso nestes locais, já que se trata de uma banda de frequência relevante para a fala. Nos receptores mais distantes do altar, R05 e R06, mesmo com os valores baixos de D50 para a fonte S1, os resultados do sistema PA voltam a perder qualidade para todas as frequências e não contribui para melhoria deste parâmetro. Observa-se que a curva de resultados do sistema PA para estes últimos receptores mantém-se abaixo da curva de resultados da fonte S1.

**Figura 41:** Valores de D50, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Sant’Ana

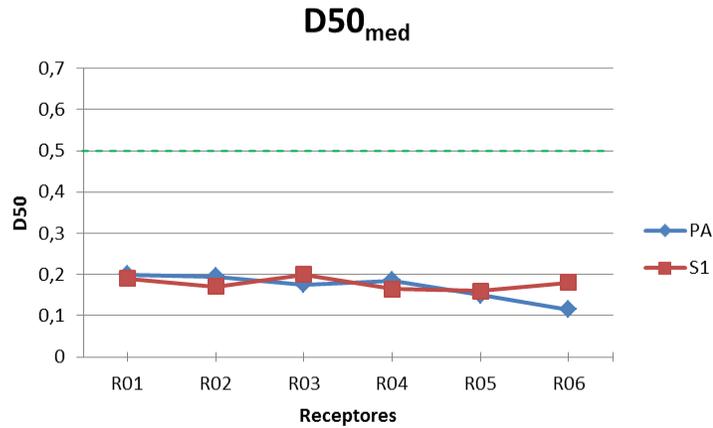


Fonte: Elaborado pela autora

Nota: linha tracejada destaca o valor mínimo recomendado por Barron (2010).

Ao avaliar os valores de  $D50_{med}$  (média entre 500 Hz e 1000 Hz) em função dos pontos receptores (Figura 42), percebe-se que não há contribuição significativa do sistema de reforço sonoro da Igreja de Sant’Ana para este parâmetro. A maior parte dos receptores apresenta valores de  $D50_{med}$  próximos entre si, considerando as duas situações de fonte. Destaca-se o receptor R06, onde o resultado do sistema PA é inferior à fonte S1.

**Figura 42:** Valores de  $D50_{med}$  em função dos pontos receptores, para cada situação de fonte (PA e S1).



Fonte: Elaborado pela autora

Nota: linha tracejada destaca o valor mínimo recomendado por Barron (2010).

A Tabela 13 apresenta os intervalos de tempo do som direto de cada fonte sonora até os receptores, baseados nas distâncias apresentadas pela Tabela 12. Observa-se que a relação entre o som direto das caixas de som do sistema PA e os receptores resultou em intervalos de tempo de atraso, para o som direto, dentro do intervalo útil de 50 ms. Os baixos valores de  $D50_{med}$  podem ser justificados então pelo TR elevado nestas frequências, o que aumenta a energia tardia que atinge o receptor após os 50 ms.

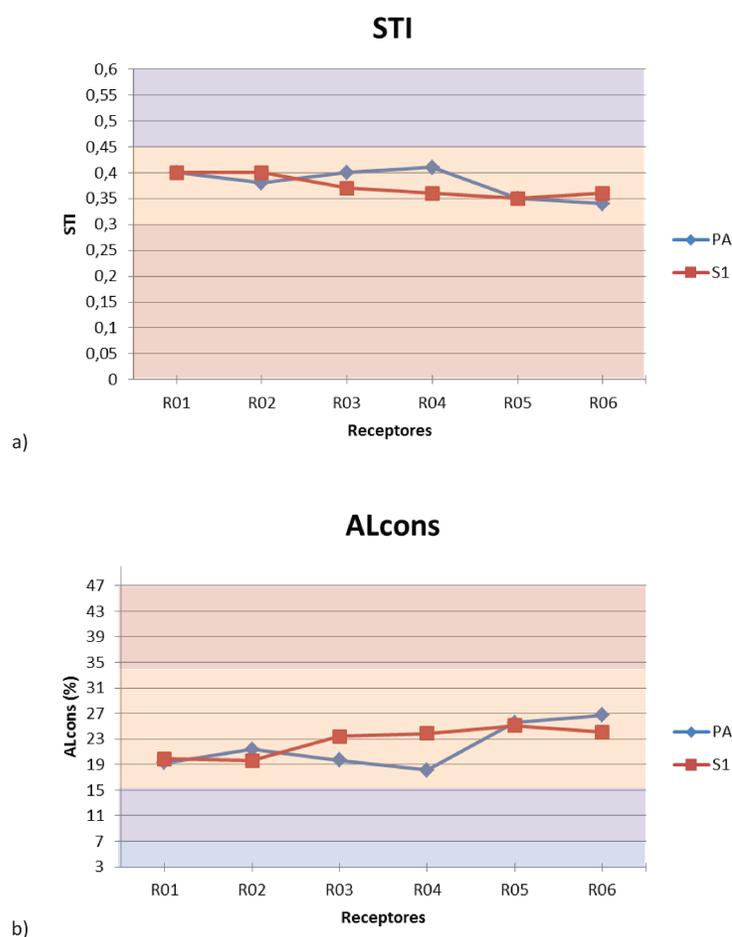
**Tabela 13:** Tempos de atraso do som direto dos pontos de fonte sonora até os receptores.

Fonte	Tempo de atraso do som direto (ms)					
	Receptores					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
PA(1)	13	21	31	35	46	49
PA(2)	21	13	35	31	49	46
PA(3)	40	43	22	27	8	19
PA(4)	43	40	27	22	19	8
S1	20	20	38	38	53	53

### 5.1.5 ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI) E PERDA DE ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (ALCONS)

Para os dois parâmetros que tratam da qualidade de transmissão da fala, STI e ALcons, os resultados são apresentados em forma de gráficos e tabelas. Os gráficos da Figura 43, apresentam os valores destes parâmetros, nas duas situações de fonte sonora, em função dos pontos receptores e as Tabelas 14 e 15 apresentam os valores registrados. Os resultados são apresentados com suas respectivas indicações de qualidade, de acordo com a Tabela 16.

**Figura 43:** Valores de STI em função dos pontos receptores – Igreja de Sant’Ana



Fonte: Elaborado pela autora

Nota: as marcações em cor nos gráficos correspondem à escala de avaliação indicada na Tabela 16.

**Tabela 14:** Valores de STI para cada ponto receptor e fontes sonoras – Igreja de Sant’Ana

STI						
Fonte	Receptores					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
PA	0,40	0,38	0,40	0,41	0,35	0,34
S1	0,40	0,40	0,37	0,36	0,35	0,36

**Tabela 15:** Valores de ALcons para cada ponto receptor e fontes sonoras – Igreja de Sant’Ana

ALcons (%)						
Fonte	Receptores					
	R01	R02	R03	R04	R05	R06
PA	19,3	21,4	19,7	18,1	25,6	26,7
S1	19,9	19,6	23,4	23,9	25,1	24,1

**Tabela 16:** Escala de avaliação qualitativa dos parâmetros STI e ALcons.

Qualidade	Ruim	Pobre	Razoável	Bom	Excelente
STI	0,00 – 0,30	0,30 – 0,45	0,45 – 0,60	0,60 – 0,75	0,75 – 1,00
ALcons	> 34	34 – 15	15 – 7	7 – 3	3 ≥

Para a Igreja de Sant’Ana, os parâmetros STI e ALcons também apresentaram resultados insatisfatórios para uma boa inteligibilidade da palavra nas duas situações de fonte sonora. Para o parâmetro STI, o valor mínimo para ser qualificado como “razoável” é de 0,45. Além disso, Kuttruff (2009) indica que para garantir uma inteligibilidade suficiente para a fala, o valor mínimo de STI deve ser de 0,5. Já para o parâmetro ALcons, que é inversamente proporcional ao STI, o limite máximo para que a perda de articulação de consoantes seja considerada aceitável é de 15%, como indica a literatura (AHNERT; TENHARDT, 2002). Neste caso, todos os resultados excederam os limites indicados para garantir uma compreensão razoável do discurso.

No parâmetro STI, assim como no seu derivado ALcons, o sistema de sonorização apresenta resultados melhores que a fonte S1 apenas nos receptores R03 e R04 (Figura 43), os quais estão localizados na parte central da nave. Porém, mesmo com essa melhoria, estes valores referentes ao sistema PA não foram suficientes para que a avaliação de qualidade da inteligibilidade fosse considerada superior à fonte S1 (Tabelas 14 e 15).

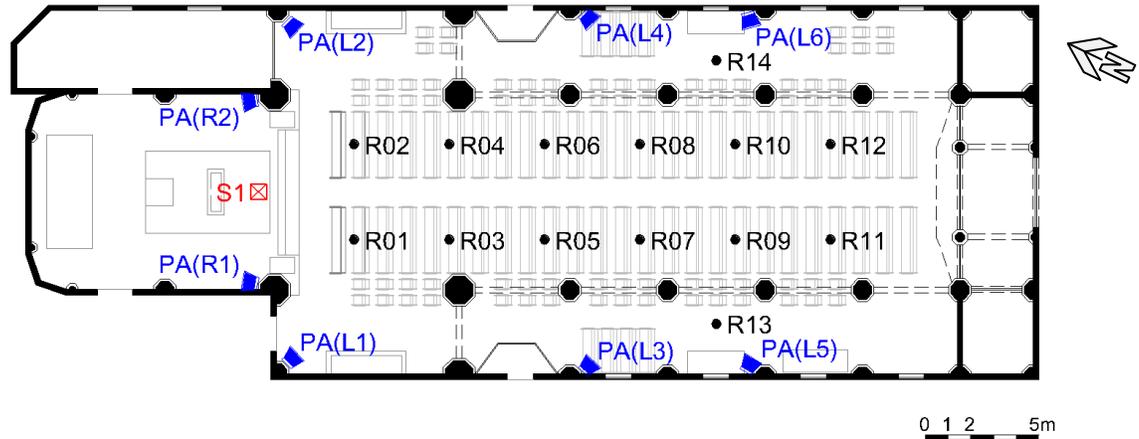
No cálculo do parâmetro STI pelo software de medição e, conseqüentemente, seu derivado ALcons, é considerada a relação entre o sinal sonoro e o ruído, dentre outros fatores.

Desta forma, como já alertado, é possível que durante as missas diurnas a interferência do ruído urbano seja maior que os registros feitos nestas medições. Neste caso, os valores de STI podem ser ainda menores do que os medidos para esta pesquisa.

## 5.2 BASÍLICA DE NOSSA SENHORA DO CARMO

Para as medições dos parâmetros acústicos da Basílica de Nossa Senhora do Carmo, o total de pontos receptores distribuídos ao longo das naves foi catorze, nomeados de R01 a R14 e distribuídos como mostra a Figura 44. A avaliação acústica considerou duas situações: com e sem o sistema de reforço sonoro. Para a caracterização com a participação do sistema de reforço sonoro o sinal sonoro foi ligado diretamente no sistema de sonorização desta igreja. As fontes que compõem este sistema são caixas de som do tipo *vertical line array* customizadas, não possuindo marca específica (Figura 45). Estas caixas estão distribuídas em seis pontos ao longo das paredes laterais da nave, nomeadas de PA(L1) a PA(L6), além de duas caixas de retorno alocadas no altar, nomeadas PA(R1) e PA(R2). Os resultados referentes às medições com o sistema de reforço sonoro são indicados com o nome PA nas tabelas e gráficos apresentados. Para a caracterização acústica do ambiente sem o sistema de sonorização, a fonte omnidirecional foi posicionada no altar, representando a posição ocupada pelo orador principal, conforme representado na Figura 44. Os resultados referentes a estas medições recebem a nomenclatura S1 nas tabelas e gráficos apresentados.

**Figura 44:** Planta baixa com localização dos pontos receptores e fontes sonoras – Basílica do Carmo



Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora).

Nota: os desenhos das caixas de som são representativos, não se trata de seu formato e proporções reais.

**Figura 45:** Vistas de uma das caixas de som localizadas nas paredes das naves laterais – Basílica N. S. do Carmo.



Fonte: Acervo da autora

### 5.2.1 RÚIDO DE FUNDO

Antes de avaliar os parâmetros acústicos selecionados (TR, EDT, D50, STI e ALcons), apresentam-se as condições de ruído ambiente (Tabela 17), indicando o nível de pressão sonora em função de frequência, classificação NC conforme NBR 10152 (1987, p. 3) e o nível global em dB(A), registradas durante as medições acústicas. Desta forma, pode-se observar a possível

interferência do entorno na avaliação dos parâmetros.

**Tabela 17:** Níveis de ruído de fundo em função de frequência, com a respectiva classificação NC, e nível global – Basílica do Carmo

Ruído								
Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lp (dB)	54,4	46,5	43,6	38,1	36,5	34,8	33,8	23,2
NC	40							
Lp (dB(A))	44,3							

Segundo a norma da ABNT, NBR 10152 (1987), para os ambientes de igrejas ou templos, o nível de ruído de fundo indicado é de até 40 dB(A), sendo aceitável um limite máximo de 50 dB(A). A norma também indica a classificação NC, referente ao espectro deste ruído, que deve ser até NC 35, com um limite aceitável até NC 45.

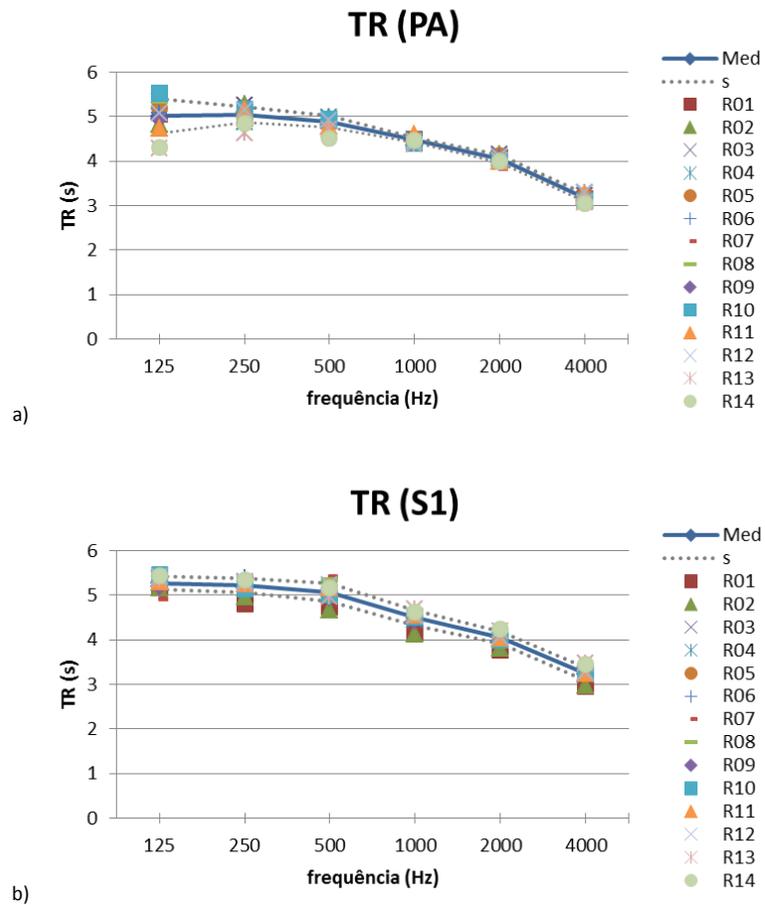
Ao avaliar a Basílica do Carmo segundo estas considerações, percebe-se que a igreja apresentou valores de ruído acima dos 40 dB(A) indicados, porém dentro do limite aceitável. A classificação NC do espectro também ultrapassou a indicação da norma, mas sua classificação está de acordo com o limite máximo aceitável pela norma brasileira.

A Basílica do Carmo está localizada no centro da cidade de Campinas, como mostra a Figura 46, e situa-se próximo a algumas ruas de grande fluxo de veículos. A Basílica está situada junto à Av. Benjamin Constant (1), uma das principais avenidas de circulação dessa região, onde transitam diversas linhas de transporte coletivo, compostas por veículos pesados. Aos fundos do edifício passa a Rua Barreto Leme (2), a qual apresenta um fluxo considerável de veículos, pois faz a ligação entre duas grandes avenidas do centro da cidade (Av. Francisco Glicério em direção à Av. Anchieta). As Ruas Barão de Jaguará (3) e Sacramento (4), são ruas menores que contornam as laterais do edifício da Basílica do Carmo, nelas também há um fluxo relevante de veículos, pois fazem a ligação da Av. Benjamin Constant com a Rua Barreto Leme. Quanto ao uso dos edifícios, o entorno da Basílica do Carmo é caracterizado pelo uso misto entre residencial, comércio e serviços. É comum observar prédios residenciais ou de escritórios que possuem a área térrea destinada ao comércio.



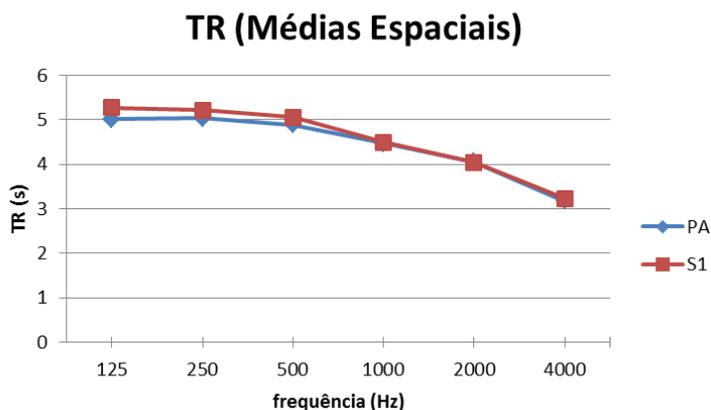
oitava entre 125 Hz e 4000 Hz. Os resultados de cada receptor para as duas situações de fonte sonora (PA e S1) encontram-se na Figura 47. Nestes gráficos, a linha tracejada, indicada como “s”, representa a variação do desvio padrão. O gráfico da Figura 48 apresenta a comparação das médias espaciais, entre receptores, do parâmetro TR para as fontes PA e S1. Os dados de TR, referentes à Basílica do Carmo, encontram-se na Tabela B.4 do Apêndice B.

**Figura 47:** Valores de TR, em função de frequência para o sistema PA (a) e fonte S1 (b), com curva de valores médios (Med) e curvas de desvio padrão (s) – Basílica do Carmo.



Fonte: Elaborado pela autora

**Figura 48:** Valores de TR, em função de frequência, das médias espaciais entre receptores – Basílica do Carmo.



Fonte: Elaborado pela autora

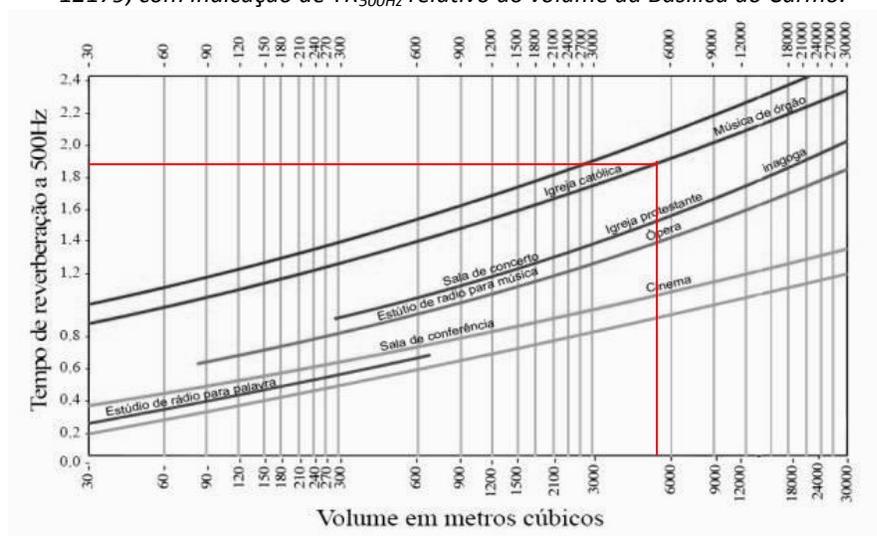
Ao observar os resultados de TR na Figura 47, nota-se que o comportamento das curvas é semelhante para a maioria dos receptores. Os valores mais altos são para as baixas frequências e tendem a decair à medida que as bandas de frequências aumentam. Há exceções neste comportamento para os resultados do sistema PA, nos quais os receptores R02, R06, R11, R12, R13 e R14 apresentam resultados em 125 Hz abaixo da banda de 250 Hz. A partir de 500Hz, os valores decrescem com o aumento da frequência para todas as situações de fontes e receptores.

Registraram-se para a Basílica do Carmo valores de TR, em 500 Hz, em torno de 4,9 s (PA) e 5,07 s (S1). Na banda de 1000 Hz, os valores de TR foram em torno de 4,47 s (PA) e 4,50 s (S1). Estes valores representam um TR médio entre as bandas de 500 Hz e 1000 Hz ( $TR_{med}$ ) de 4,69 s para PA e 4,79 s para S1. Considerando um JND de 5% para o TR, o que representa uma variação de 0,25 s para 500 Hz, 0,23 s para 1000 Hz e 0,24 s para o  $TR_{med}$ , as variações obtidas entre o sistema PA e da fonte S1 não são percebidas pelo ouvinte.

De acordo com Cirillo e Martellotta (2006), a inteligibilidade do discurso, necessária durante as leituras e sermões, requer um TR curto, menor que 1 segundo. Já para os cantos congregacionais, um TR em torno de 2 s é recomendável para estimular o senso de participação da comunidade. Considerando estes valores, a Basílica do Carmo é avaliada com resultados de TR excessivos tanto para a compreensão da palavra, quanto para a execução de cânticos congregacionais.

A norma NBR 12179 (1992) recomenda para igrejas com volume semelhante ao da Basílica do Carmo um TR, em 500 Hz, de aproximadamente 1,9 s (Figura 49). Com um TR<sub>500Hz</sub> próximo a 5 segundos, este edifício ultrapassa também o valor indicado pela norma brasileira.

**Figura 49:** Gráfico de tempos ótimos de reverberação (500Hz) em função do volume, apresentado pela norma NBR 12179, com indicação de TR<sub>500Hz</sub> relativo ao volume da Basílica do Carmo.



Fonte: ABNT NBR 12179, 1992, p. 9 (Editado pela autora)

A Tabela 18 apresenta algumas igrejas com volumes semelhantes ao da Basílica do Carmo, e seus respectivos tempos de reverberação médios (TR<sub>med</sub>), para comparação.

**Tabela 18:** Comparação de tempos de reverberação médios entre a Basílica do Carmo e igrejas de volumes semelhantes

Igreja	País	Volume (m <sup>3</sup> )	Estilo arquitetônico ou ano de construção	TR <sub>med</sub> (s)	Referência
Basílica do Carmo	Brasil	5.480	Neogótico (1940)	4,79	
Church B <sup>1</sup>	Japão	4.100	1929	2,2	Soeta, et. al (2012)
Porto's Clerigos Church	Portugal	5.130	1748	3,35	Carvalho (2000)
Bom Jesus dos Perdões	Brasil	5.500	Neogótico	4,61	Sant'Ana e Zannin (2011)
Igreja Nova de Santo Ovídio	Portugal	5.897	2002	3,2	Martins (2010)
Church of Santa Maria Assunta	Itália	6.300	Moderno/Contemporâneo	6,3	Cirillo e Martellotta (2006)
Ruvo Cathedral	Italia	6.400	Românico	3,7	Cirillo e Martellotta (2003)

<sup>1</sup>O autor não apresentou os nomes das igrejas avaliadas em seu artigo.

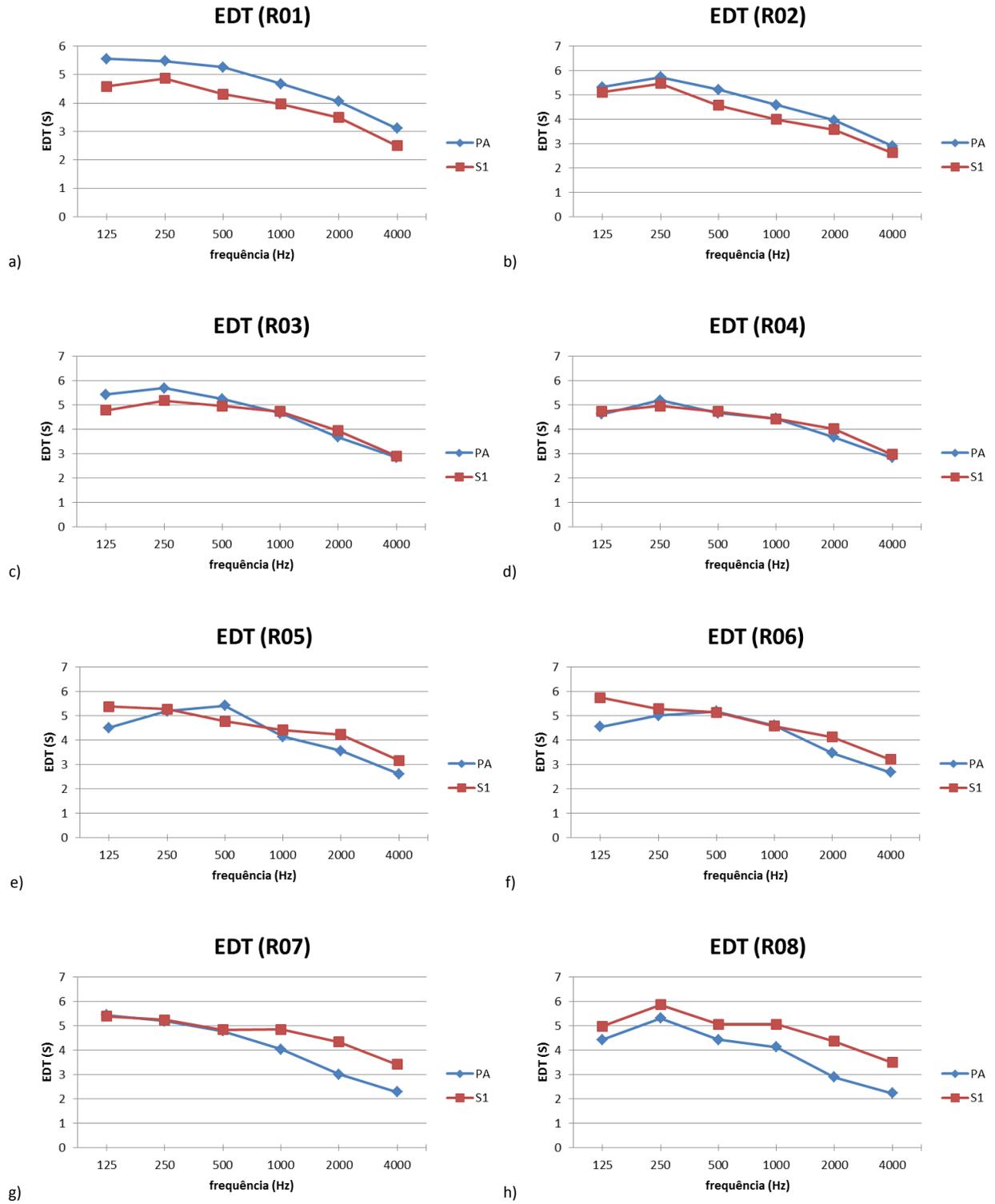
Observa-se, na Tabela 18, que a igreja brasileira que possui o mesmo estilo arquitetônico que a Basílica do Carmo, o estilo Neogótico, também possui um valor de  $TR_{med}$  próximo. Considerando o JND de 5%, a diferença mínima perceptível entre a Igreja de Bom Jesus dos Perdões e a Basílica do Carmo seria de 0,32 segundos. Com uma diferença entre os respectivos  $TR_{med}$  de 0,18 s, pode-se afirmar que, para o ouvinte, estas duas igrejas possuem  $TR_{med}$  iguais.

A similaridade de valores de tempo de reverberação entre igrejas do mesmo estilo arquitetônico indicam que as construções seguiam características construtivas semelhantes, de acordo com as necessidades litúrgicas da época. Porém, salienta-se que estas necessidades mudaram desde a época em que as estas igrejas foram construídas. Embora seu edifício tenha sido concebido antes do Concílio Vaticano II, ou seja, antes que a instituição enfatizasse a necessidade de compreensão da palavra durante os ritos, a Basílica do Carmo ainda é utilizada atualmente para missas diárias. Assim, de acordo com as necessidades atuais dos ritos católicos, os valores de TR desta igreja ultrapassam aqueles recomendados.

### 5.2.3 TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT)

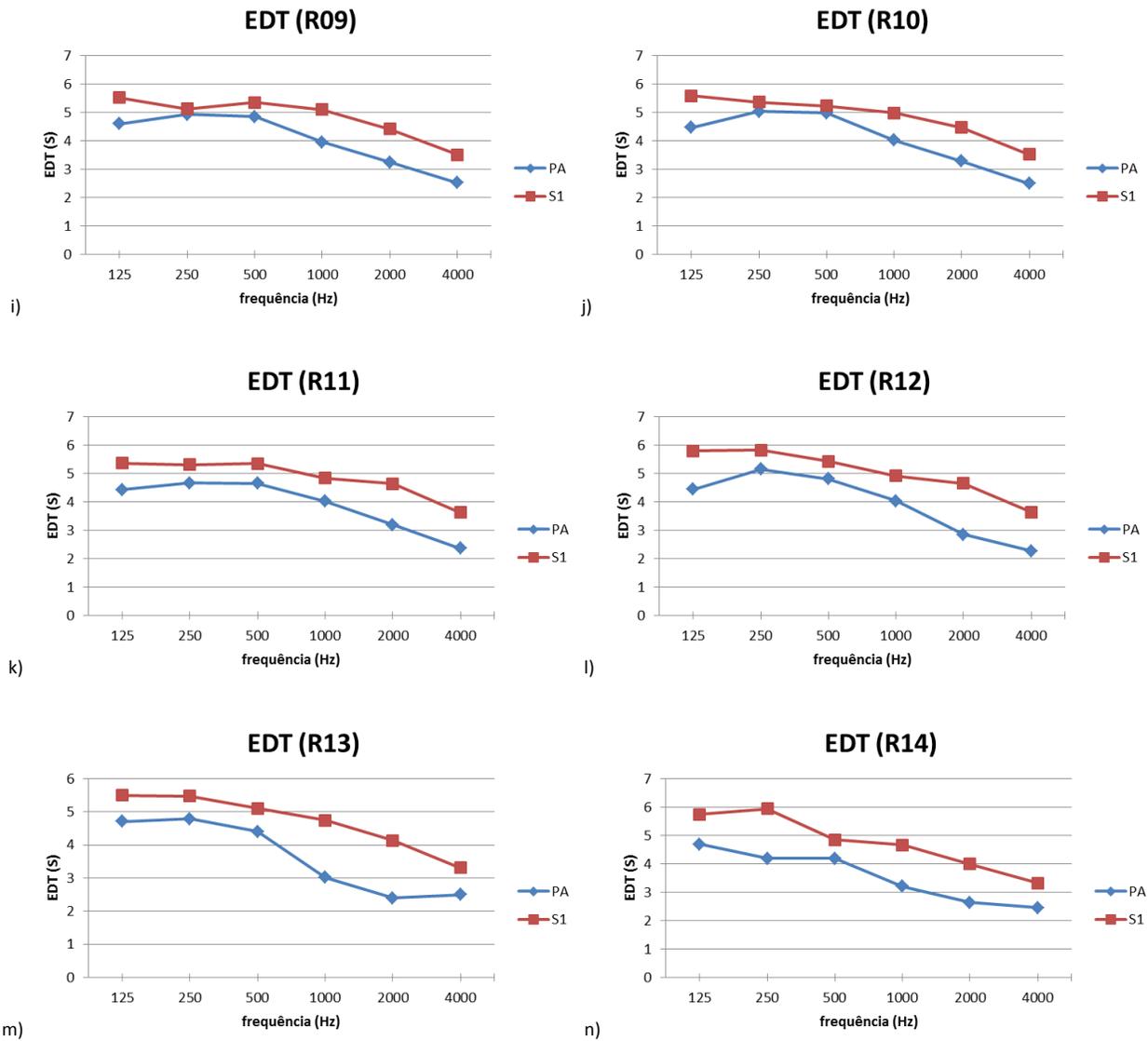
Os resultados do parâmetro EDT, em função de frequência nas bandas de oitava entre 125 Hz e 4000 Hz, encontram-se na Figura 50. Apresenta-se cada ponto receptor, separadamente, com a comparação entre as curvas de resultados das duas situações de fonte sonora, PA e S1. Os dados de EDT, referentes à Basílica do Carmo, encontram-se na Tabela B.5 do Apêndice B.

**Figura 50:** Valores de EDT, em função de frequência, para cada ponto receptor – Basílica do Carmo.



Fonte: Elaborado pela autora

**Figura 50 (cont.):** Valores de EDT, em função de frequência, para cada ponto receptor – Basílica do Carmo.



Fonte: Elaborado pela autora

Para os receptores mais próximos do altar (R01 e R02), a curva de EDT tem valores mais altos para o sistema PA do que para a fonte S1. A partir do receptor R08, a curva de resultados do sistema de sonorização (PA) se mantém sempre abaixo da curva de resultados da fonte S1. No ponto R07, simétrico ao R08, a curva PA é menor que a curva S1 apenas a partir de 1000 Hz.

Valores baixos de EDT indicam uma maior influência da energia sonora inicial em oposição à reverberante e referem-se a uma menor sensação da reverberação para o ouvinte. Para os pontos mais afastados do altar, a relação de distância entre os receptores e algumas

fontes sonoras do sistema PA (observadas na Tabela 19) é menor que as distâncias entre esses mesmos receptores e a fonte S1. Os receptores R07 e R08, por exemplo, estão a 16,93 m da fonte S1. Mas o receptor R07 está mais próximo das caixas de som PA(L3) e PA(L5), com 6,40 m e 7,65 m de distância, respectivamente. O receptor R08 está próximo, nas mesmas proporções, das caixas PA(L4) e PA(L6), situadas na lateral oposta da nave. Desta forma, a proximidade das caixas de som do sistema PA contribui para o incremento da energia sonora inicial e, conseqüentemente, a diminuição do seu tempo de decaimento inicial em relação ao EDT para a fonte S1.

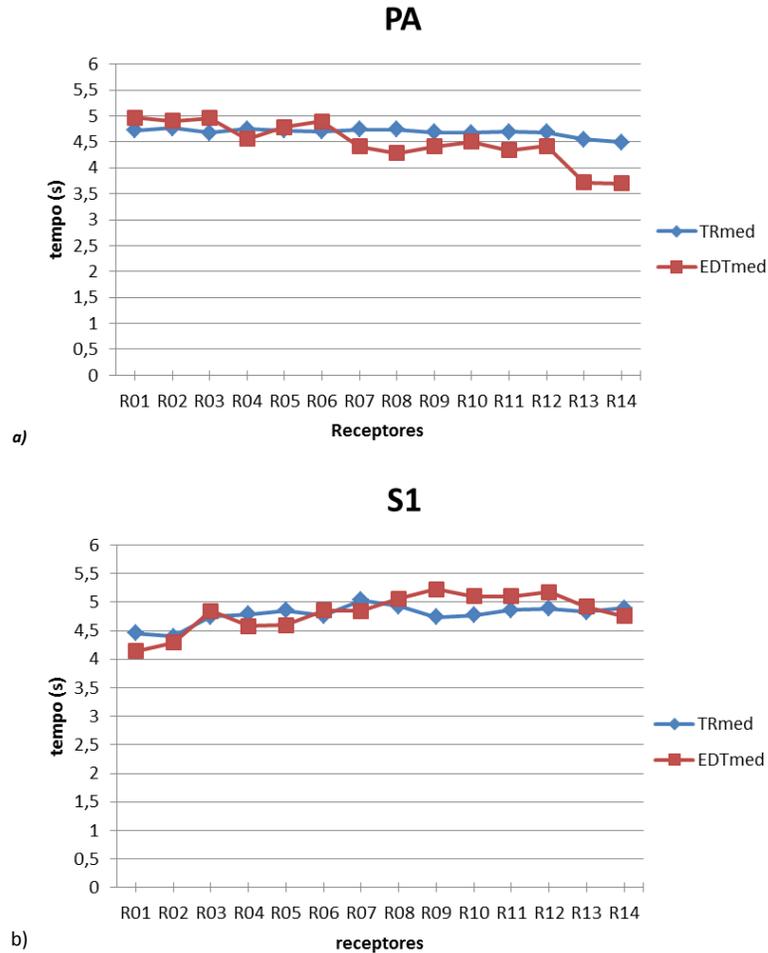
**Tabela 19:** Distâncias entre pontos de fonte sonora e receptores – Basílica do Carmo.

Fonte	Distância (m)													
	Receptores													
	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	R13	R14
PA(L1)	6,26	10,15	9,06	12,07	12,65	14,96	16,54	18,36	20,55	22,04	24,62	25,88	19,06	23,23
PA(L2)	10,15	6,26	12,08	9,06	14,96	12,65	18,37	16,54	22,04	20,55	25,88	24,62	23,23	19,06
PA(L3)	11,72	14,30	8,36	11,71	6,15	10,25	6,40	10,40	8,91	12,10	12,37	14,84	6,25	14,99
PA(L4)	14,30	11,72	11,71	8,36	10,25	6,15	10,40	6,40	12,10	8,91	14,84	12,37	14,99	6,25
PA(L5)	18,44	20,18	14,53	16,68	10,82	13,58	7,65	11,21	5,94	10,12	6,87	10,70	2,66	13,88
PA(L6)	20,18	18,44	16,68	14,53	13,58	10,82	11,21	7,65	10,12	5,94	10,70	6,87	13,88	2,66
S1	4,70	4,70	8,66	8,66	12,78	12,78	16,93	16,93	21,11	21,11	25,29	25,29	21,00	21,00

No que diz respeito à comparação entre  $EDT_{med}$  e  $TR_{med}$  (Figura 51), para o sistema PA, a partir do receptor R07 os valores de  $EDT_{med}$  são sempre inferiores aos valores de  $TR_{med}$ . A maior diferença entre estes dois parâmetros na situação do sistema PA se dá para os receptores R13 e R14, situados nas naves laterais. Já para a fonte S1, os menores valores de  $EDT_{med}$  são para os receptores R01 e R02. Ao contrário do sistema PA, para a fonte S1 os resultados de  $EDT_{med}$  para os receptores R09 a R12 são maiores que os de  $TR_{med}$ .

Para os receptores mais afastados do altar, a relação entre as posições dos pontos receptores e a distribuição das fontes sonoras do sistema de sonorização apresenta distancias menores do que àquelas entre os receptores e a fonte S1. O incremento de energia sonora inicial, proporcionada por estas relações de proximidade, contribui para a diminuição dos valores de EDT na curva PA. Nestes casos, valores de EDT menores que os de TR são favoráveis para ambientes onde a fala tem prioridade sobre a música.

**Figura 51:** Comparação entre valores de  $TR_{med}$  e  $EDT_{med}$ , em função dos pontos receptores, para as fontes PA e S1 – Basílica do Carmo

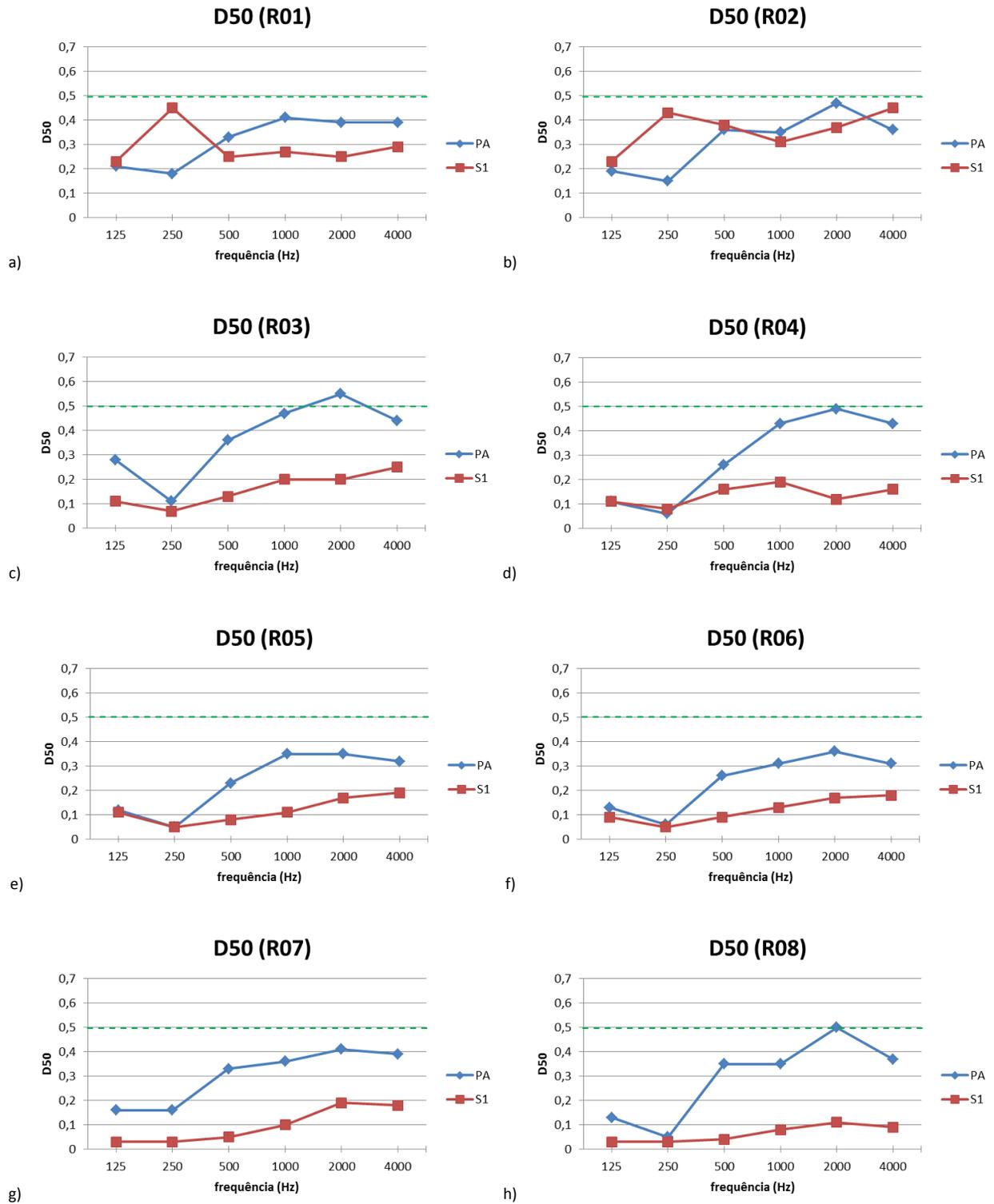


Fonte: Elaborado pela autora

#### 5.2.4 DEFINIÇÃO (D50)

Os resultados do parâmetro D50, apresentados em função de frequência entre as bandas de oitava entre 125 Hz e 4000 Hz, encontram-se na Figura 52. São organizados para cada ponto receptor, separadamente, com a comparação entre as curvas das duas situações de fonte (PA e S1). Os dados de D50, referentes à Basílica do Carmo, encontram-se na Tabela B.6 do Apêndice B.

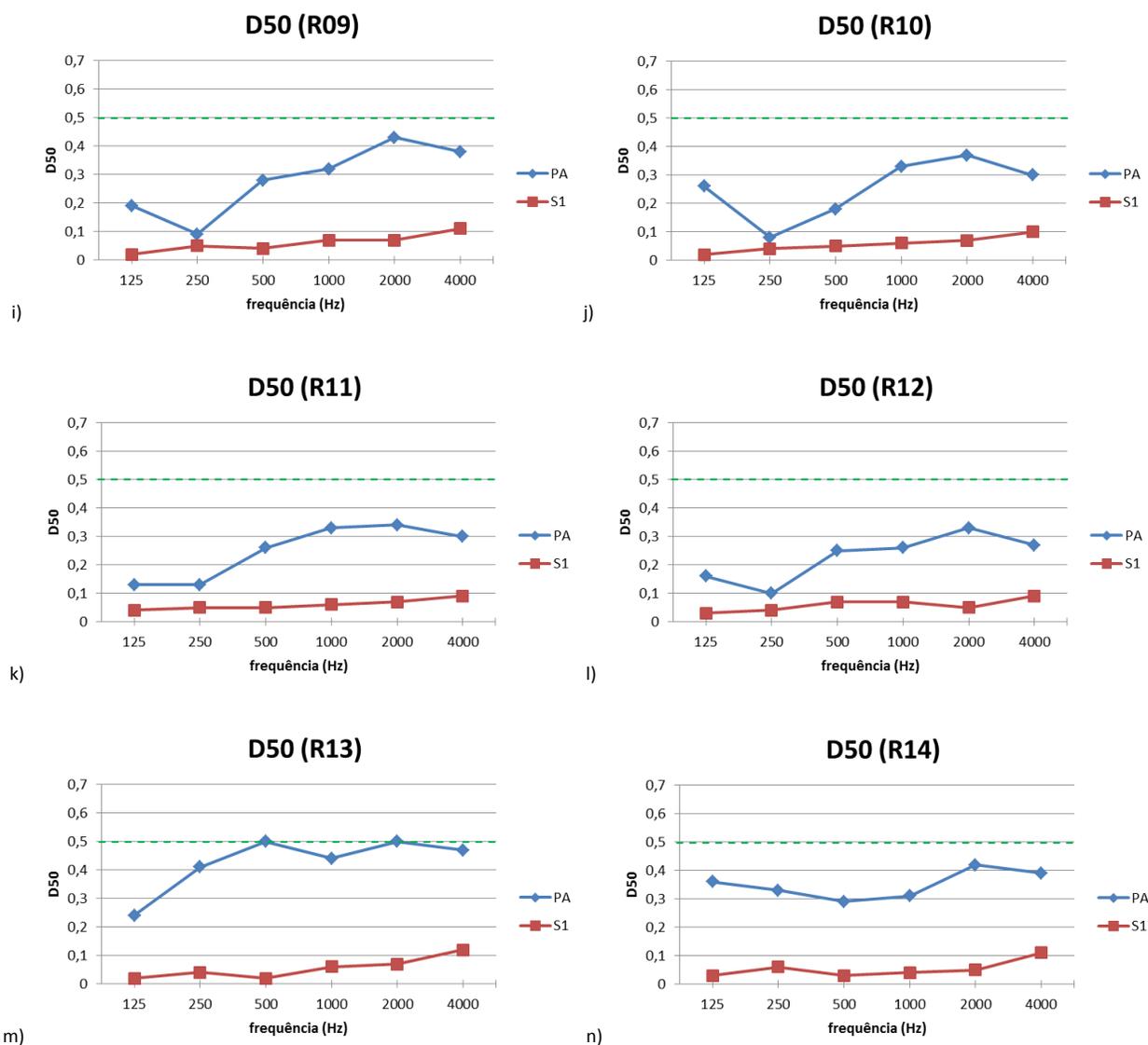
**Figura 52:** Valores de D50, em função de frequência, para cada ponto receptor – Basílica do Carmo.



Fonte: Elaborado pela autora

Nota: linha tracejada destaca o valor mínimo recomendado por Barron (2010).

**Figura 52 (cont.):** Valores de D50, em função de frequência, para cada ponto receptor – Basílica do Carmo.



Fonte: Elaborado pela autora

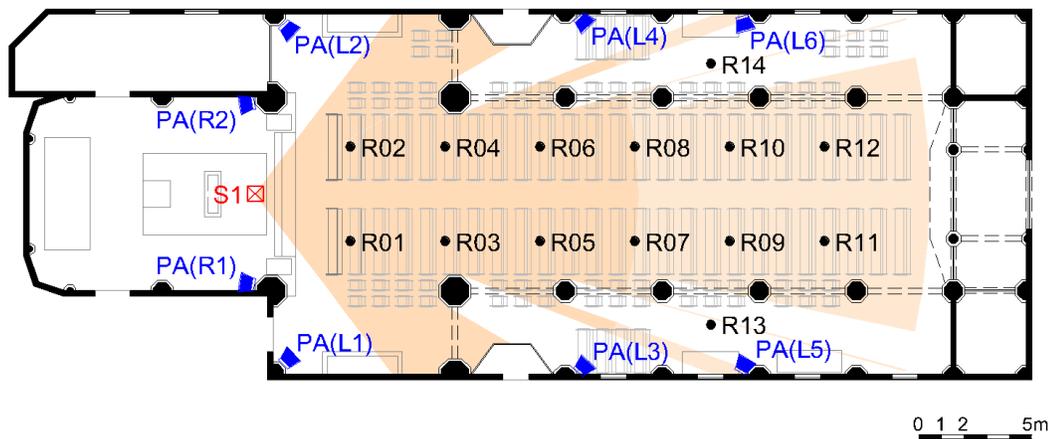
Nota: linha tracejada destaca o valor mínimo recomendado por Barron (2010).

À primeira vista, observa-se que, independente da fonte sonora considerada, todos os resultados ficaram abaixo da recomendação mínima de 0,5 proposta por Barron (2010). Há apenas uma exceção para o receptor R03, na resposta ao PA, que obteve resultado acima deste valor para a banda de 2000 Hz. Outros poucos receptores tiveram alguns resultados que alcançaram este valor de 0,5, mas apenas para a banda de 2000 Hz nos pontos R04 e R08 e nas bandas de 500 Hz e 2000 Hz no receptor R13. Para a fonte S1 os melhores resultados foram

para os receptores mais próximos do altar, R01 e R02. A partir dos pontos R03 e R04, as curvas desta fonte tendem a ter valores menores à medida que o receptor se afasta do altar.

O sistema de sonorização mostra melhorias nos valores de D50 em relação à fonte S1, a partir do receptor R03. As maiores diferenças entre os valores de D50 para as duas situações de fonte são observadas nos pontos R13 e R14. Estes são os receptores localizados nas naves laterais, os quais não possuem uma linha direta até o altar. Desta forma, para a situação da fonte sonora S1, não recebem som direto desta fonte, como pode ser observado na Figura 53, apenas energia sonora proveniente de reflexões. Observa-se ainda que os receptores mais afastados do altar, a partir do R09, mesmo quando recebem som direto da fonte S1 este som os atinge após o tempo útil de 50 ms.

**Figura 53:** Representação do som direto da fonte S1 para os receptores da audiência – Basílica do Carmo.

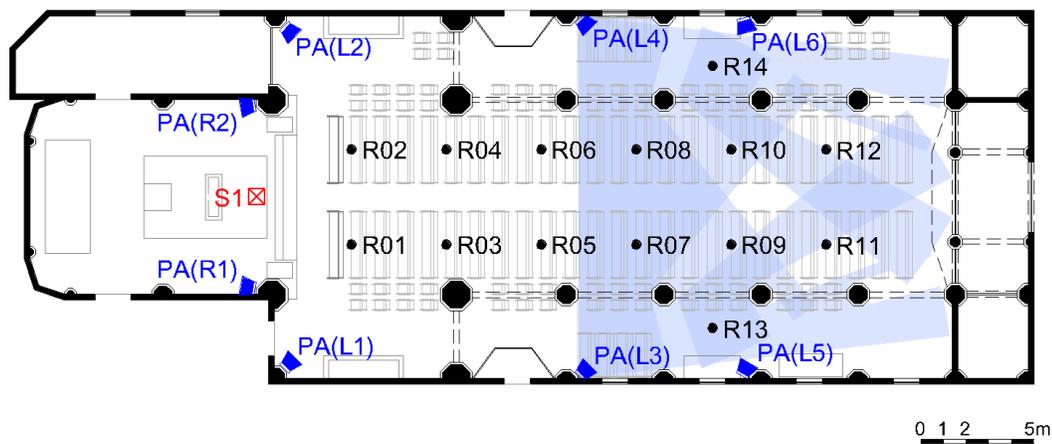


Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora).

Nota: As manchas em cor laranja representam o som direto que parte da fonte S1 em direção aos receptores. Trata-se de um desenho representativo. Não foram considerados efeitos de difração sonora. A cor mais escura indica o som que atinge os receptores dentro de 50 ms e a cor mais clara indica o som que atinge os receptores após 50 ms.

Por sua vez, as fontes sonoras do sistema PA, localizadas nas paredes laterais da igreja, proporcionam uma parcela de som direto para a região desprivilegiada em relação à fonte S1. Isso aumenta a energia sonora inicial que atinge estes receptores no intervalo útil à inteligibilidade da palavra, 50 ms, como pode ser observado na Figura 54.

**Figura 54:** Representação do som direto das fontes PA(L3) e PA(L4) para os receptores ao fundo da audiência – Basílica do Carmo

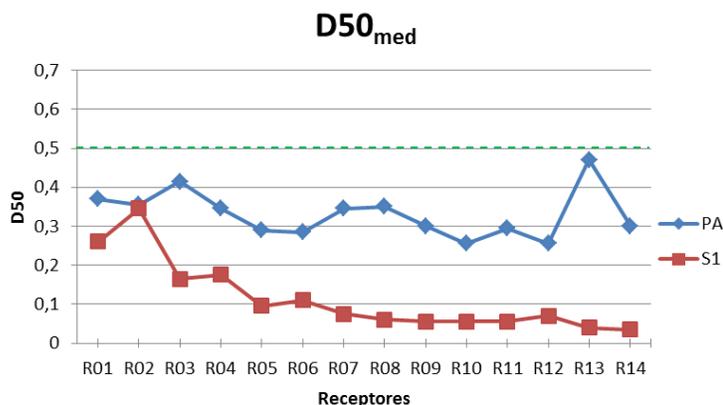


Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora).

Nota: As manchas em cor azul representam o som direto que parte das fontes PA(L3) e PA(L4) em direção aos receptores de interesse. Trata-se de um desenho representativo. Não foram considerados efeitos de difração sonora. A cor mais clara indica as áreas que recebem som de apenas uma das caixas de som, a cor mais escura indica as regiões que recebem som direto das duas caixas em questão.

A Figura 55 apresenta os valores  $D50_{med}$  (média entre 500 Hz e 1000 Hz) relativos às duas situações de fonte. Neste gráfico, percebe-se a perda de qualidade nos valores da curva S1, à medida que estes receptores se afastam da fonte. Nos pontos mais distantes, a partir do receptor R07, estes valores chegam a ser menores do que 0,1. Isso indica que menos de 10% da energia sonora que chega aos receptores está dentro do intervalo útil de 50 ms. Também fica clara a melhoria proporcionada pelo sistema de sonorização nos valores de D50. Porém, todos os resultados ficam abaixo da recomendação mínima de 0,5, o que indica pouca energia inicial no intervalo de tempo útil para a inteligibilidade da palavra.

**Figura 55:** Valores de  $D50_{med}$  em função dos pontos receptores, para cada situação de fonte (PA e S1) – Basílica do Carmo.



Fonte: Elaborado pela autora

Nota: linha tracejada destaca o valor mínimo recomendado por Barron (2010).

A Tabela 20 apresenta os tempos de atraso entre o som inicial de cada fonte sonora até os receptores, baseados nas distâncias apresentadas pela Tabela 19.

**Tabela 20:** Tempos de atraso do som direto, a partir dos pontos de fonte sonora até os receptores.

Fonte	Tempo (ms)													
	Receptores													
	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	R13	R14
PA(L1)	18	29	26	35	37	43	48	53	60	64	71	75	55	67
PA(L2)	29	18	35	26	43	37	53	48	64	60	75	71	67	55
PA(L3)	34	41	24	34	18	30	19	30	26	35	36	43	18	43
PA(L4)	41	34	34	24	30	18	30	19	35	26	43	36	43	18
PA(L5)	53	58	42	48	31	39	22	32	17	29	20	31	8	40
PA(L6)	58	53	48	42	39	31	32	22	29	17	31	20	40	8
S1	14	14	25	25	37	37	49	49	61	61	73	73	61	61

Observa-se pela Tabela 20 que, para a fonte S1, a partir do ponto R09 nem mesmo o som direto da fonte alcança os receptores dentro do intervalo útil de 50 ms. Isto justifica os baixos valores de  $D50$  para esta fonte nos pontos mais distantes do altar. No caso do sistema PA, mesmo que a relação entre fontes sonoras e receptores apresente alguns intervalos de tempo abaixo de 50 ms, a contribuição das demais fontes, cujo som direto ultrapassa esse intervalo de tempo, aliado ao elevado tempo de reverberação, proporciona um aumento na energia tardia, que atinge os receptores após 50 ms. Desta forma, todos os resultados do sistema PA apresentam valores abaixo de 0,5, ou seja, menos de 50% da energia sonora atingiu

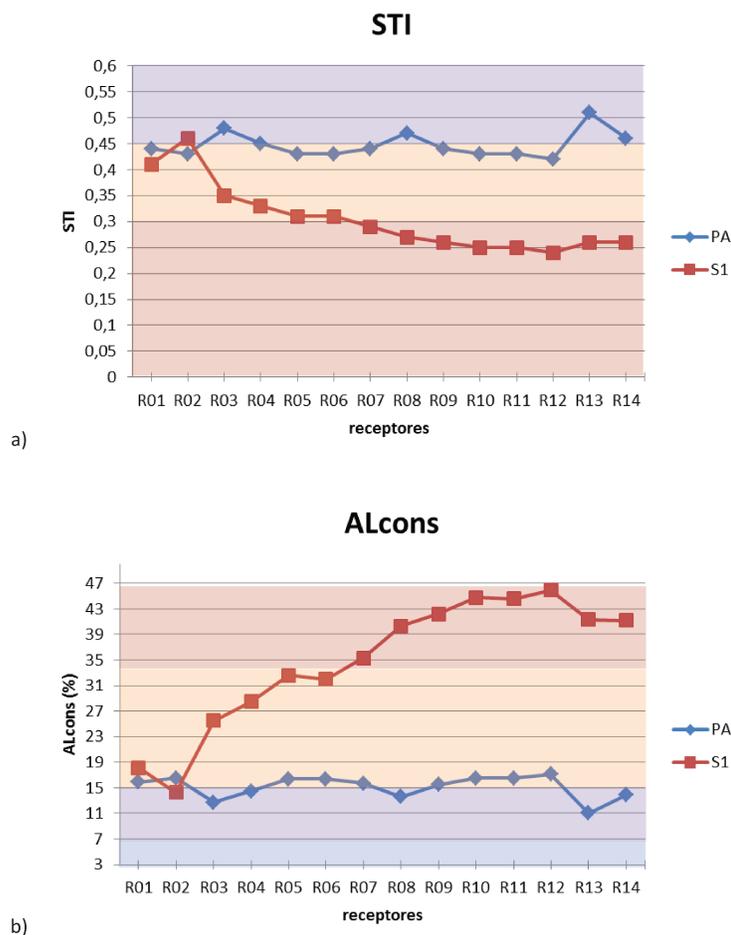
o receptor no intervalo de tempo útil de 50 ms.

### 5.2.5 ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI) E PERDA DE ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (ALCONS)

Os parâmetros STI e ALcons avaliam a inteligibilidade da fala e são relacionados entre si de forma inversamente proporcional. O STI, por tratar-se de transmissão da fala, quanto maior for o valor, melhor a avaliação de inteligibilidade. Já o ALcons trata-se de perda de articulação de consoantes, então quanto menor o valor, menor a “perda” e melhor a avaliação do parâmetro. Como também o cálculo do parâmetro ALcons é derivado do valor de STI, quanto maior o resultado de STI, menor será o resultado de ALcons.

Os resultados de STI e ALcons obtidos para a Basílica do Carmo são apresentados na Figura 56 em função dos pontos receptores. Também apresentam-se, nas Tabelas 21 e 22, os valores medidos desses dois parâmetros. Os resultados são apresentados com suas respectivas avaliações de qualidade, de acordo com a Tabela 23.

**Figura 56:** Valores de STI (a) e ALcons (b) em função dos pontos receptores – Basílica do Carmo.



Fonte: Elaborado pela autora

Nota: as marcações em cor nos gráficos correspondem à escala de avaliação indicada na Tabela 22.

**Tabela 21:** Valores de STI para cada ponto receptor e fontes sonoras – Basílica do Carmo.

Fonte	Receptores													
	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	R13	R14
PA	0,44	0,43	0,48	0,45	0,43	0,43	0,44	0,47	0,44	0,43	0,43	0,42	0,51	0,46
S1	0,41	0,46	0,35	0,33	0,31	0,31	0,29	0,27	0,26	0,25	0,25	0,24	0,26	0,26

**Tabela 22:** Valores de ALcons para cada ponto receptor e fontes sonoras – Basílica do Carmo.

Fonte	Receptores													
	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10	R11	R12	R13	R14
PA	15,9	16,5	12,7	14,5	16,4	16,4	15,7	13,6	15,5	16,5	16,5	17,1	11,0	13,9
S1	18,1	14,3	25,5	28,5	32,6	32,0	35,3	40,3	42,2	44,8	44,6	45,9	41,3	41,2

**Tabela 23:** Escala de avaliação qualitativa dos parâmetros STI e ALcons

Qualidade	Ruim	Pobre	Razoável	Bom	Excelente
STI	0,00 – 0,30	0,30 – 0,45	0,45 – 0,60	0,60 – 0,75	0,75 – 1,00
ALcons	> 34	34 – 15	15 – 7	7 – 3	3 ≥

Assim como na análise do parâmetro D50, ao avaliar os parâmetros STI e ALcons, pela Figura 56, observa-se que há uma melhoria nos resultados do sistema PA em relação à fonte S1, que está localizada no altar. Para ambos os parâmetros, a partir do receptor R03, a diferença entre a curva do sistema de sonorização e das demais fontes tende a aumentar à medida que o receptor se afasta do altar. Mesmo assim, observa-se que o parâmetro ALcons para o sistema de sonorização apresenta poucos resultados abaixo do limite máximo de 15% indicado por Ahnert e Tenhardt (2002). Para o parâmetro STI, apenas o ponto R13 atingiu o valor mínimo de 0,5 indicado por Kuttruff (2009) para garantir uma inteligibilidade suficiente.

Quanto à avaliação de qualidade, segundo os intervalos de valores da Tabela 23, observa-se que a maior diferença de classificação de resultados é para os pontos R13 e R14 (Tabelas 21 e 22). Nestes receptores, os resultados da fonte S1 são classificados com uma qualidade de inteligibilidade ruim. Já com o uso do sistema de sonorização, os valores de STI e ALcons para estes receptores são classificados como razoável. Por serem pontos bastante prejudicados em relação à linha de visão do altar, as regiões das naves laterais possuem uma fonte sonora PA próxima, proporcionando mais energia sonora inicial e, por sua vez, contribuindo para a melhoria da inteligibilidade.

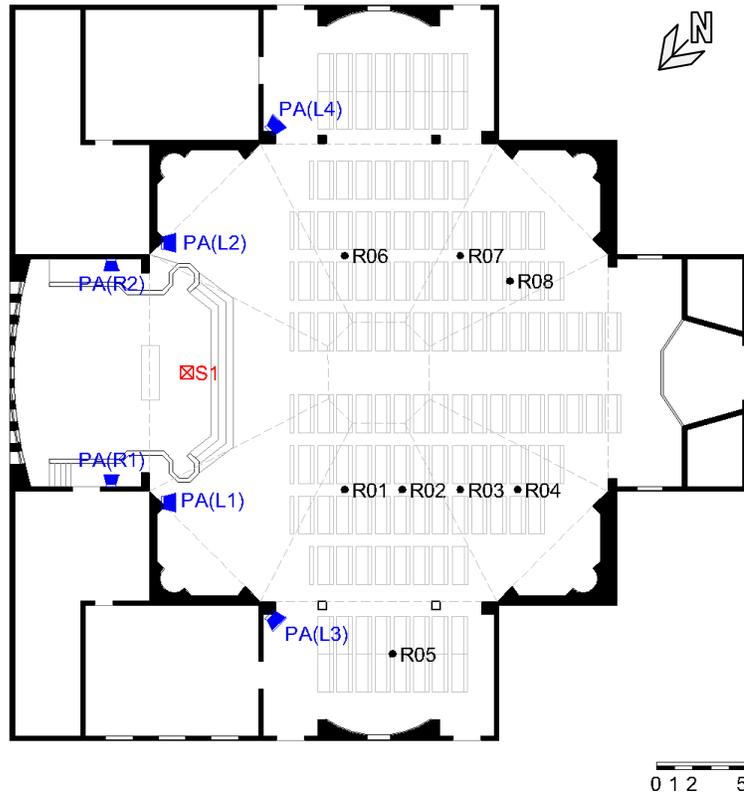
Mesmo com algum incremento nos valores de STI e ALcons em relação ao sistema de reforço sonoro, de modo geral, a avaliação da inteligibilidade da palavra neste ambiente é considerada insatisfatória. Os resultados são classificados como “pobre” ou “ruim” para a maior parte dos receptores, independente da situação de fonte considerada.

É importante ressaltar que a interferência do ruído no sinal sonoro é importante para avaliar a qualidade de transmissão deste sinal, além de ser considerada pelo parâmetro STI durante seu cálculo. Desta forma, é possível que o ruído urbano durante as atividades semanais alcance níveis acima dos registrados e prejudique as missas diárias, diminuindo ainda mais qualidade de transmissão da fala.

### 5.3 IGREJA DE SANTA RITA DE CÁSSIA

Para as medições acústicas na igreja de Santa Rita, foram distribuídos oito pontos receptores ao longo da nave, nomeados de R01 a R08. A análise acústica foi realizada em duas situações: com e sem o sistema de sonorização. Na caracterização do ambiente sem o sistema de sonorização, a fonte omnidirecional foi posicionada no altar, representando a posição ocupada pelo orador principal, o padre. Sua localização está indicada como fonte S1 na planta baixa da Figura 57 e os resultados destas medições recebem a mesma nomenclatura (S1). Na caracterização acústica com o sistema de som, o sinal sonoro foi ligado diretamente ao sistema sonorização desta igreja. As fontes que compõe este sistema são quatro caixas de som do tipo *line array* da marca Bose, modelo Panaray MA12, distribuídas duas caixas na nave principal, PA(L1) e PA(L2) (Exemplo na Figura 58a), e outras duas, PA(L3) e PA(L4), uma em cada nave lateral (Figura 58b). A Figura 57 indica a localização destas caixas de som. Há também duas caixas de retorno, Bose Panaray 302, indicadas como PA(R1) e PA(R2), localizadas no altar (Exemplo na Figura 58c). Os resultados referentes às medições com o sistema de som são indicados com o nome PA nos gráficos e tabelas.

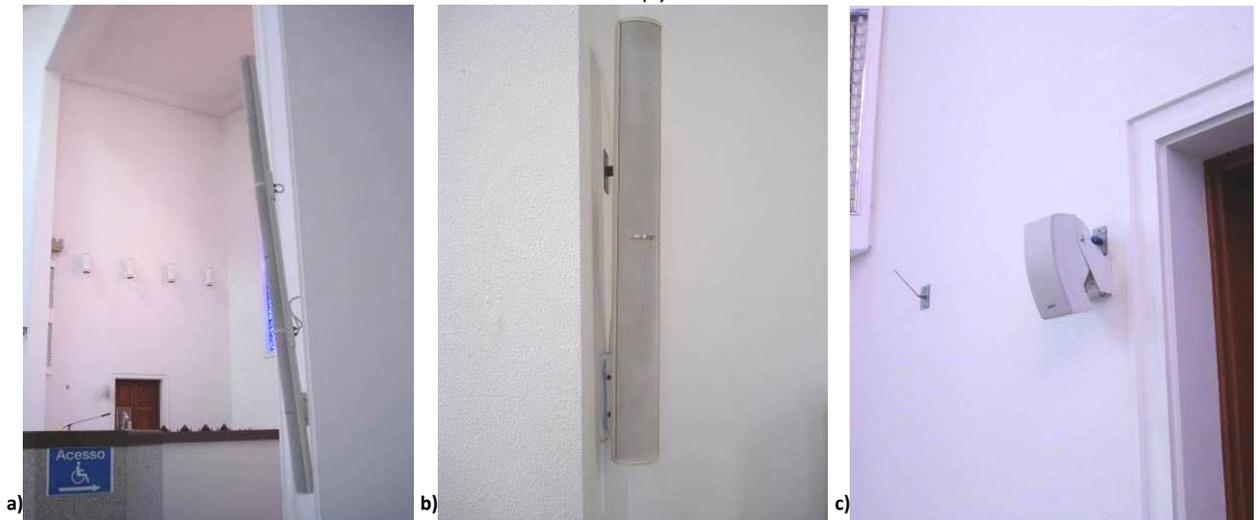
**Figura 57:** Planta baixa com localização dos pontos receptores e fontes sonoras – Igreja de Santa Rita.



Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora).

Nota: os desenhos das caixas de som são representativos, não se trata de seu formato e proporções reais.

**Figura 58:** Exemplos das caixas de som posicionadas na nave principal (a), setores laterais (b) e caixas de retorno do altar (c).



Fonte: Acervo da autora

### 5.3.1 RUÍDO DE FUNDO

Para apoiar a avaliação dos parâmetros acústicos da Igreja de Santa Rita, apresentam-se as condições de ruído ambiente, ou ruído de fundo, registradas no local durante as medições. Os dados registrados deste ruído, indicando o nível de pressão sonora em função de frequência, o nível global em dB(A) e classificação NC, conforme NBR 10152 (1987, p. 3), encontram-se na Tabela 24.

**Tabela 24:** Níveis de ruído de fundo em função de frequência, com a respectiva classificação NC, e nível global – Igreja de Santa Rita

Ruído								
Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lp (dB)	49,9	44,7	35,4	33,4	31,5	26,6	22,4	24,3
NC	35							
Lp (dB(A))	38,7							

De acordo com a norma brasileira NBR 10152 (1987), para ambientes caracterizados com o uso “Igrejas e Templos” os níveis de ruído registrados devem ser até 40 dB(A), com um limite aceitável de até 50 dB(A). A curva NC indicada, relativa ao espectro desse ruído, é NC 35, sendo aceitável até a classificação NC 40. De acordo com estas condições, a Igreja de Santa Rita apresentou valores de ruído de fundo adequados para realização de suas atividades, segundo as recomendações nacionais.

As medições de níveis de pressão sonora, junto aos parâmetros acústicos da Igreja de Santa Rita, foram realizadas em um dia de semana comum, no período da manhã, após a realização de uma das missas diárias. Desta forma, pode-se adotar o registro de ruído para este ambiente como uma amostra das condições usuais da Igreja de Santa Rita. Assim, o edifício apresentou níveis de ruído abaixo dos limites propostos pela norma brasileira. Ao observar o entorno em que a Igreja de Santa Rita está inserida, Figura 59, destaca-se a predominância de lotes residenciais nos quarteirões mais próximos à igreja. Embora se identifique o uso de algumas edificações comerciais e de prestação de serviços, junto à Av. Dr. Jesuíno Marcondes Machado (1), estes usos se caracterizam por serem pouco ruidosos, devido a um menor adensamento e pela característica própria do uso destas edificações, que abrangem lojas de

decoreção, agências de turismo, clínicas, escolas de idiomas, dentre outros. A principal fonte de ruído desta região pode ser atribuída ao trânsito da Av. Dr. Jesuíno Marcondes Machado (1) e da Rua Eng. Carlos Stevenson (2). No entanto, a Igreja de Santa Rita possui recuos da edificação em relação aos limites do lote, que ajudam a se distanciar das fontes de ruído, além das características da fachada do edifício que possui poucas aberturas voltadas para a região do cruzamento das ruas mencionadas (Figura 60).

**Figura 59:** Localização da Igreja de Sta. Rita (azul) e entorno. Com destaque para áreas de uso comercial (amarelo), prestação de serviços (roxo), Av. Dr. Jesuíno Marcondes Machado (1) e Rua Eng. Carlos Stevenson.



Fonte: Google Maps. Disponível em: <<https://maps.google.com/>> Acesso em: 17 mai. 2014 (Editado pela autora)

**Figura 60:** Fachada sudoeste da Igreja de Santa Rita.



Fonte: Comunidade Santa Rita. Disponível em: <<http://www.comunidadesantarita.com.br>>, Acesso em: 04 fev. 2014

Também foram monitoradas as condições de temperatura e umidade relativa do ar durante as medições. Os valores estão apresentados na Tabela C.3 do Apêndice C.

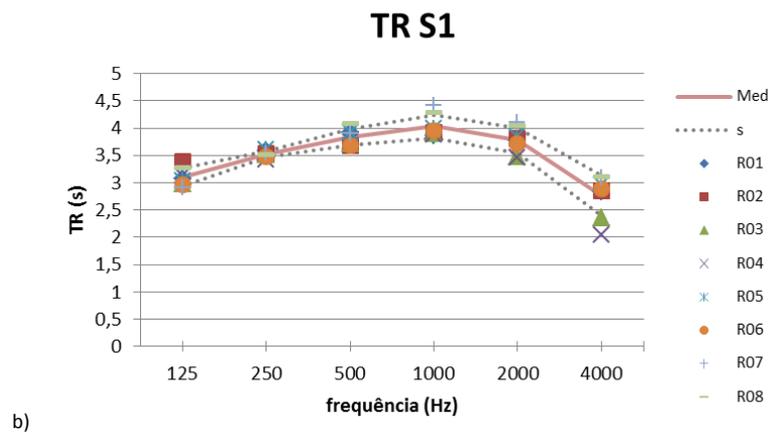
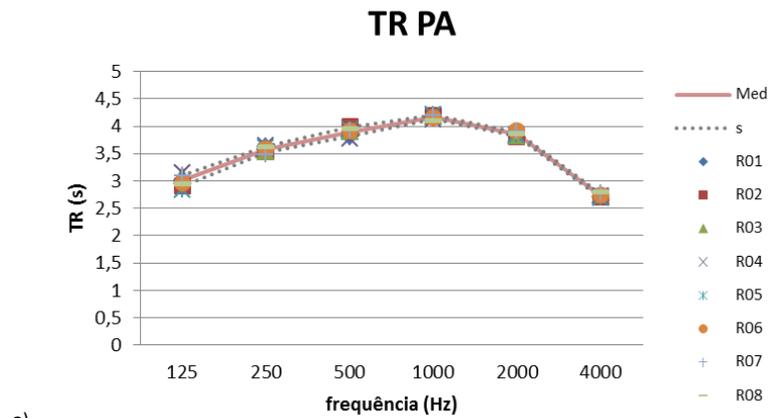
### 5.3.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO (TR)

A Igreja de Santa Rita de Cássia é a maior igreja do grupo avaliado, em termos de volume, com aproximadamente  $13.310 \text{ m}^3$ . Os valores obtidos de tempo de reverberação deste edifício são apresentados em função de frequência em bandas de oitava entre 125 Hz e 4000Hz. Os resultados para os diferentes receptores, nas duas situações de fonte sonora, encontram-se na Figura 61. Nestes gráficos, a linha tracejada indicada como “s” representa a variação do desvio padrão. O gráfico da Figura 62 mostra a comparação das médias espaciais de TR entre receptores nas duas situações de fonte (PA e S1). Os dados de TR, referentes à Igreja de Santa Rita, encontram-se na Tabela B.7 do Apêndice B.

Ao observar os gráficos apresentados na Figura 61, nota-se que o comportamento das curvas de TR é semelhante para todos os receptores. Os valores tendem a aumentar gradativamente, à medida que as bandas de frequência crescem, até 1000 Hz. A partir dessa frequência os valores de TR voltam a diminuir, com uma queda maior na banda de 4000 Hz. Destaca-se ainda a diferença entre as curvas de desvio padrão para os resultados das duas situações de fonte (Figura 61). O intervalo de desvio padrão de TR para os resultados do sistema PA é menor que o intervalo do desvio para S1.

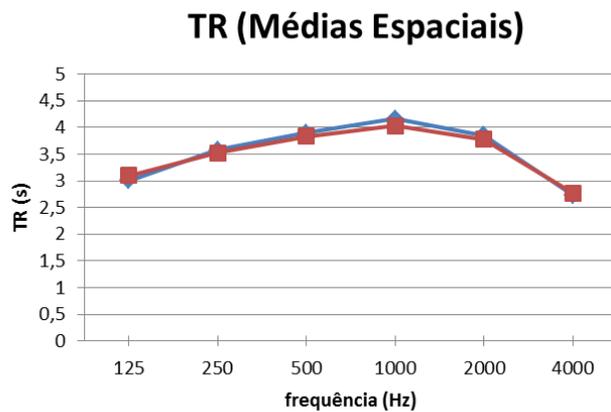
A Igreja de Santa Rita apresenta valores de TR, em 500 Hz, em torno de 3,9 s (PA) e 3,83 s (S1). Em 1000 Hz, os valores de TR ficaram em torno de 4,17 s (PA) e 4,03 s (S1). Isto representa um tempo de reverberação médio entre as bandas de frequência de 500 Hz e 1000Hz ( $TR_{med}$ ) de 4,03 s (PA) e 3,93s (S1). Embora se perceba que os resultados de TR para o sistema PA sejam maiores que os resultados para a fonte S1, considera-se que a variação apresentada é imperceptível para o ouvinte, pois está abaixo do valor JND de 5%, que corresponde a 0,19 s em 500 Hz e 0,2 s em 1000 Hz . Na Figura 62 é possível observar esta proximidade de valores entre as curvas médias de PA e S1.

**Figura 61:** Valores de TR, em função de frequência para o sistema PA (a) e fonte S1 (b), com curva de valores médios (Med) e curvas de desvio padrão (s) – Igreja de Santa Rita.



Fonte: Elaborado pela autora

**Figura 62:** Valores de TR, em função de frequência, das médias espaciais entre receptores – Igreja de Santa Rita.

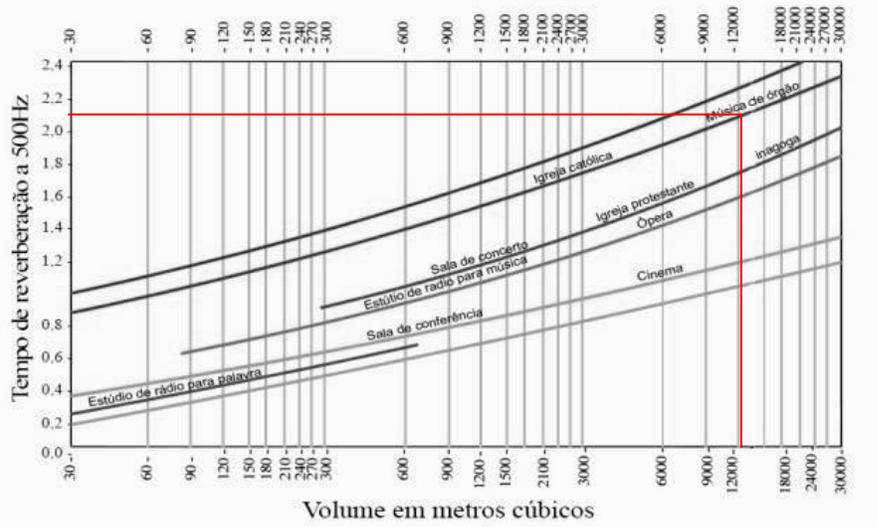


Fonte: Elaborado pela autora

Segundo Cirillo e Martellotta (2006), leituras e sermões requerem um tempo de reverberação curto, menor que 1 segundo, para garantir uma boa inteligibilidade do discurso. Por outro lado, os mesmos autores também afirmam que cantos congregacionais requerem um TR em torno de 2 s, para que o senso de participação da comunidade seja encorajado. Considerando estas recomendações, os valores de TR da Igreja de Santa Rita são elevados, pois a compreensão da palavra, seja falada ou cantada, é a necessidade principal das atividades ali desenvolvidas.

Em comparação com as recomendações da norma NBR 12179 (1992), o tempo de reverberação (em 500 Hz) de uma igreja com volume semelhante ao da Igreja Santa Rita estaria próximo de 2,1 s (Figura 63). Com um  $TR_{500Hz}$  de 3,8 s, este edifício também ultrapassa as recomendações da norma brasileira.

**Figura 63:** Gráfico de tempos ótimos de reverberação (500Hz) em função do volume, apresentado pela norma NBR 12179 (1992), com indicação de  $TR_{500Hz}$  relativo ao volume da Igreja de Santa Rita.



Fonte: ABNT NBR 12179, 1992, p. 9 (Editado pela autora)

A Tabela 25 apresenta os valores de tempos de reverberação médios ( $TR_{med}$ ) de algumas igrejas com volumes próximos ao da Igreja de Santa Rita. Observa-se que apesar de ser uma igreja de arquitetura contemporânea, o valor de  $TR_{med}$  da Igreja de Santa Rita (3,93 s) é mais próximo aos valores das igrejas de estilo Barroco e Românico (4,1 s e 4,3 s) do que ao da igreja japonesa. Esta última, com construção do ano de 2008, possui  $TR_{med}$  1,5 segundos mais

baixo que o da Igreja de Santa Rita. A diferença mínima perceptível (JND) para os  $TR_{med}$  destas duas igrejas é de 0,12 s.

Como a Igreja de Santa Rita se trata de um edifício construído após a implementação das mudanças propostas pelo Concílio Vaticano II, espera-se um espaço projetado com ênfase para a compreensão da palavra. Desta forma, considera-se que este ambiente possui um valor de  $TR_{med}$  alto para as principais atividades litúrgicas da Igreja Católica.

**Tabela 25:** Comparação de tempos de reverberação médios entre a Igreja de Santa Rita e igrejas de volumes semelhantes

Igreja	País	Volume (m <sup>3</sup> )	Estilo arquitetônico ou ano de construção	$TR_{med}$ (s)	Referência
Igreja de Santa Rita	Brasil	13.310	1964/2006 <sup>1</sup>	3,93	
San Lorenzo	Italia	12.000	Barroco	4,1	Sant'Ana e Zannin (2011)
Church of San Giacomo degli Incurabili	Italia	12.500	Renascimento	5,2	Cirillo e Martellotta (2006)
Abbey Church of Chiaravalle della Colomba	Italia	12.500	Gótico	6,0	Cirillo e Martellotta (2006)
Igreja de N <sup>a</sup> Sra. da Conceição	Portugal	12.530	1947	6,5	Carvalho e Cruz (2011)
Church C <sup>2</sup>	Japão	12.600	2008	2,43	Soeta, et. al (2012)
Basilica of San Fedele	Italia	13.000	Românico	4,3	Cirillo e Martellotta (2006)

<sup>1</sup>A igreja passou por uma reforma em seu edifício.

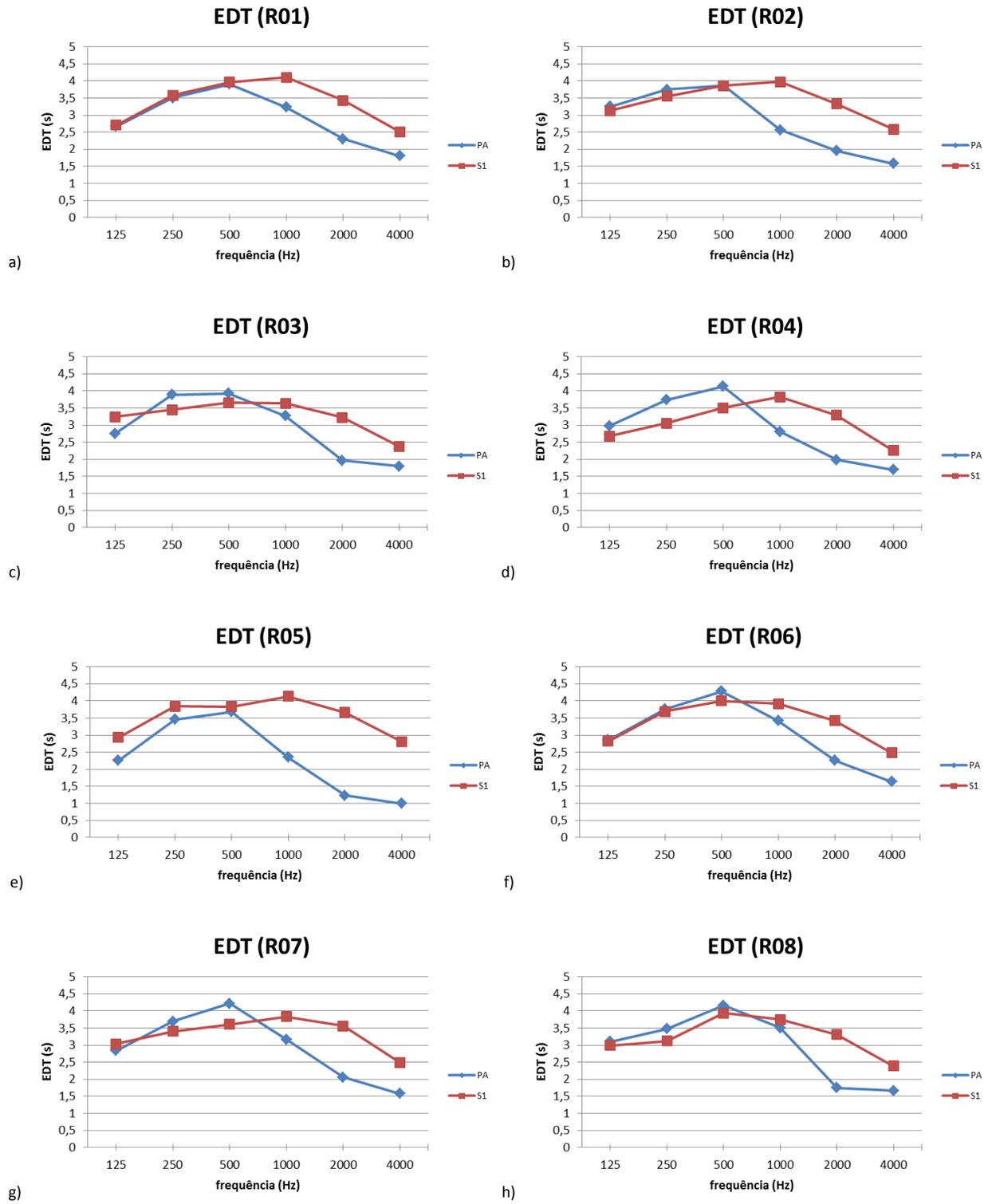
<sup>2</sup>O autor não apresentou os nomes das igrejas avaliadas em seu artigo.

O tempo de reverberação é um parâmetro que sofre influência das características físicas da sala, como volume e materiais de revestimento das superfícies. Por isso, não há diferenças significativas nos resultados de TR com e sem o uso do sistema de reforço sonoro.

### 5.3.3 TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT)

Os valores obtidos para o parâmetro EDT, em função de frequência nas bandas de oitavas de 125 Hz a 4000 Hz, estão apresentados na Figura 64, organizados para cada ponto receptor, separadamente, com as curvas referentes a cada situação de fonte sonora (PA e S1). Os dados de EDT, referentes à Igreja de Santa Rita, encontram-se na Tabela B.8 do Apêndice B.

**Figura 64:** Valores de EDT, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Santa Rita.

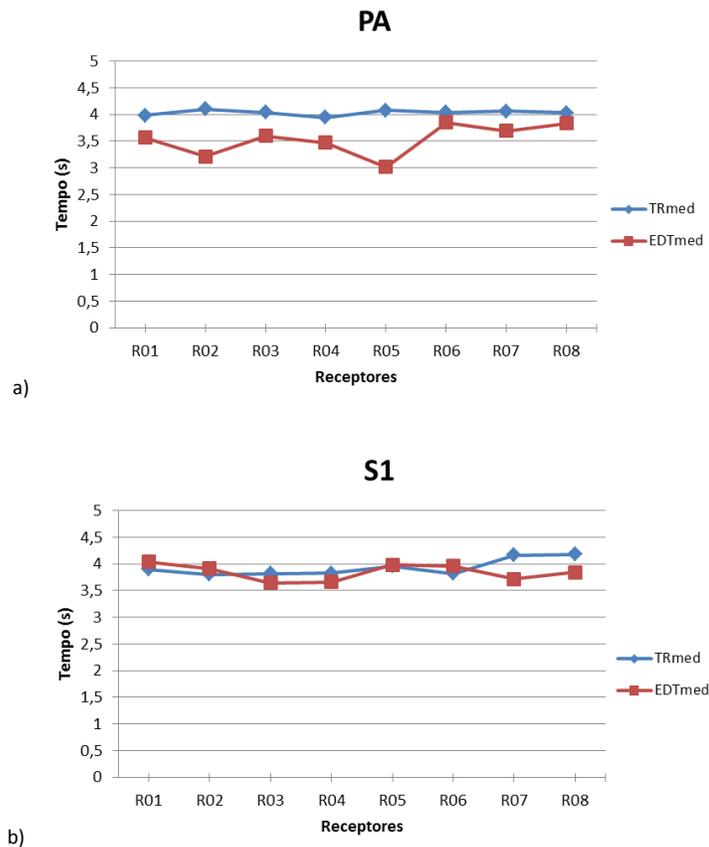


Fonte: Elaborado pela atuora

Para a fonte S1 na Igreja de Santa Rita, observa-se que o comportamento da curva de EDT é semelhante à curva do TR. Os valores tendem a aumentar gradativamente das baixas frequências até a banda de 1000 Hz e depois decaem, mostrando os valores mais baixos em 4000 Hz. Este comportamento tem exceção apenas no receptor R05, que mantém valores semelhantes entre as frequências de 250 Hz e 500 Hz. Já o comportamento das curvas de EDT relativas ao sistema PA, mostra uma queda bem maior nos valores a partir de 1000 Hz, em comparação aos valores das frequências mais baixas. Observa-se ainda que a partir da banda de 1000 Hz, os valores de EDT do sistema PA são sempre menores que os valores da fonte S1.

A Figura 65 mostra a comparação entre  $EDT_{med}$  e  $TR_{med}$  (médias entre 500 Hz e 1000Hz), em função dos receptores, para as duas situações de fonte, PA e S1, e a Tabela 26 apresenta as distâncias entre as fontes sonoras e os receptores.

**Figura 65:** Comparação entre valores de  $TR_{med}$  e  $EDT_{med}$ , em função dos pontos receptores, para as fontes do sistema PA (a) e fonte S1 (b) – Igreja de Santa Rita.



Fonte: Elaborado pela autora

**Tabela 26:** Distâncias entre pontos de fonte sonora e receptores – Igreja de Santa Rita.

Fonte	Distância (m)							
	Receptores							
	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08
PA(L1)	10,10	13,24	16,44	19,59	15,19	16,90	21,31	22,69
PA(L2)	16,90	18,95	21,31	23,82	25,93	10,10	16,44	19,26
PA(L3)	8,00	10,00	12,52	15,25	7,10	20,14	22,33	22,59
PA(L4)	20,14	21,02	22,33	23,97	29,54	8,00	12,52	15,56
S1	10,80	13,46	16,34	19,28	19,16	10,80	16,34	18,44

Observa-se que para o sistema PA, os valores de  $EDT_{med}$  são sempre menores que os valores de  $TR_{med}$ . Nesta situação, os valores mais próximos entre estes dois parâmetros foram nos receptores R06 e R08. Esta relação é diferente quando se considera os resultados da fonte S1. Neste caso, para os receptores mais próximos do altar, R01, R02 e R06, os valores de  $EDT_{med}$  são maiores que os valores de  $TR_{med}$ . Para os pontos da nave principal que estão mais afastados do altar, R03, R04, R07 e R08, esta relação se inverte e os valores de  $EDT_{med}$  são menores que os de  $TR_{med}$ . O receptor R05, localizado na nave lateral, apresentou valores próximos entre si destes dois parâmetros observados.

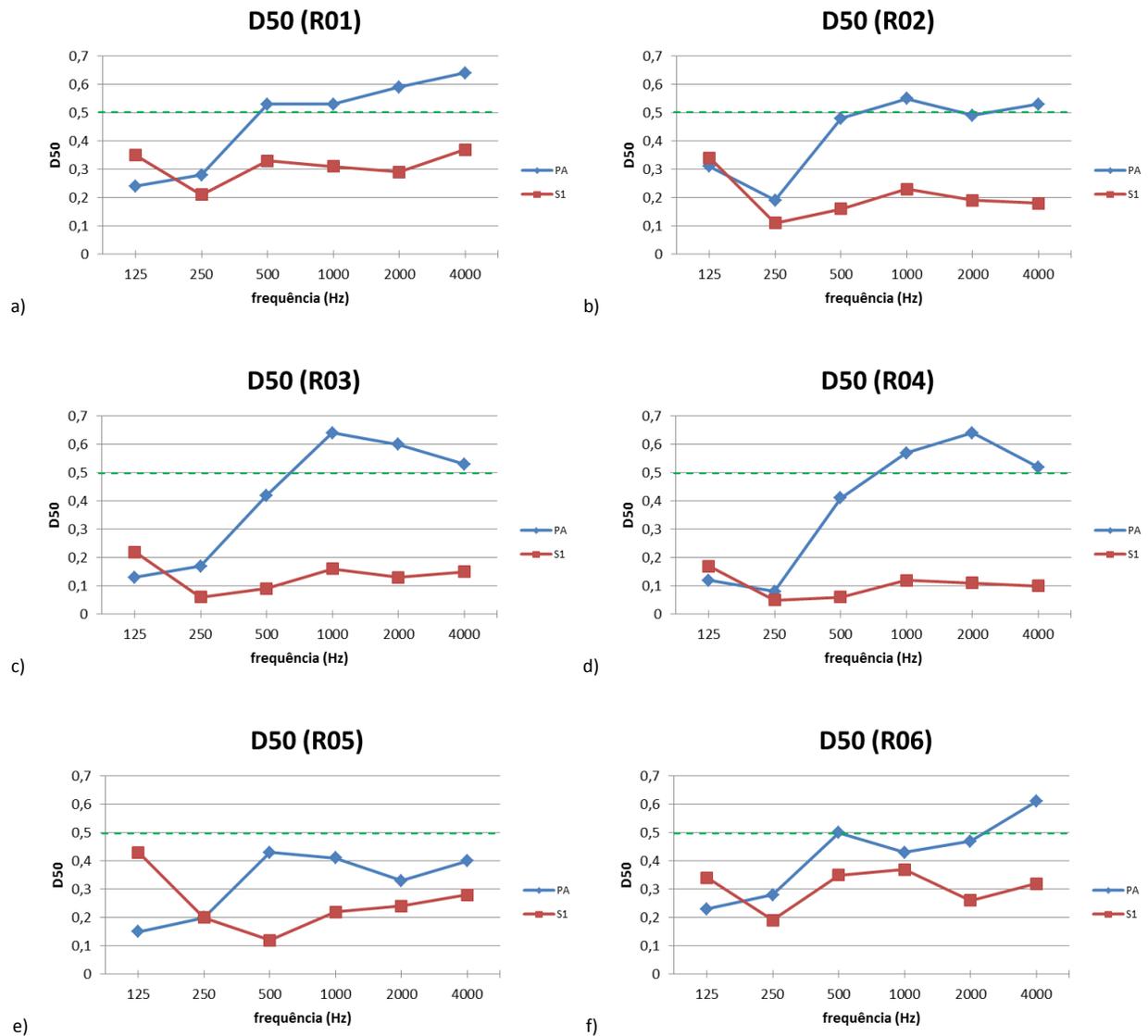
Valores mais baixos de EDT do que de TR indicam uma menor percepção de reverberância. Ou seja, nestes casos, há mais influência da energia sonora inicial do que da energia sonora reverberante. O sistema de reforço sonoro, por ter mais fontes sonoras espalhadas pelo ambiente, proporciona à maioria dos receptores uma diminuição das distâncias até a fonte e, portanto, um incremento na energia inicial. Por consequência, há um decaimento inicial mais curto devido a esta proximidade, isto justifica os valores reduzidos de  $EDT_{med}$  em comparação ao  $TR_{med}$ . Para ambientes onde a fala tem prioridade em relação à música, valores de EDT mais baixos que os de TR são vistos de forma positiva, pois a energia inicial, proporcionando “clareza” ao som, deve ser mais marcante que a energia reverberante, que dá sensação de vivacidade à música, mas pode ser prejudicial à fala.

Portanto, no caso do decaimento inicial, a distribuição das caixas de som do sistema PA encontrada na Igreja de Santa Rita indica uma melhoria em relação à fonte sonora posicionada no altar, pois reduz os valores de  $EDT_{med}$  em relação aos valores de  $TR_{med}$ . Do contrário, a fonte S1 mostra resultados mais próximos de  $EDT_{med}$  e  $TR_{med}$  entre os receptores.

### 5.3.4 DEFINIÇÃO (D50)

Para o parâmetro D50, os valores também são apresentados em função de frequência nas bandas de oitava de 125 Hz a 4000 Hz e organizados para cada ponto receptor, separadamente, com a comparação de curvas de resultados de cada situação de fonte sonora, PA e S1 (Figura 66). Os dados de D50, referentes à Igreja de Santa Rita, encontram-se na Tabela B.9 do Apêndice B.

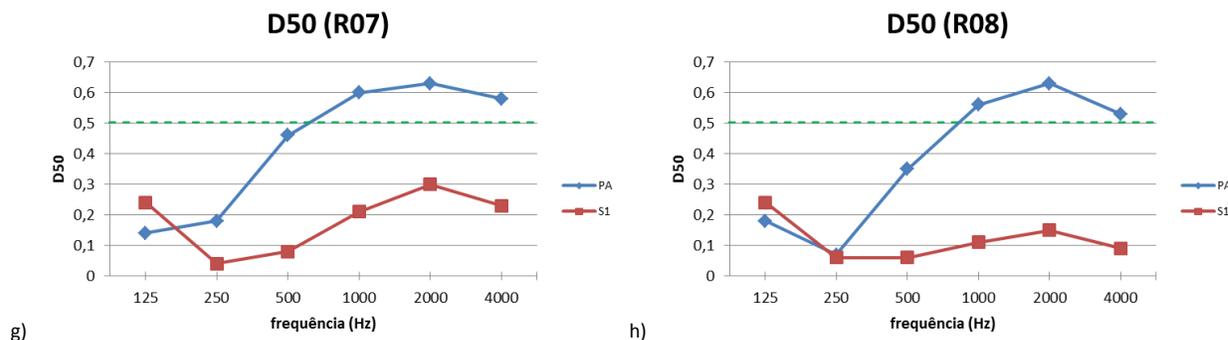
**Figura 66:** Valores de D50, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Santa Rita.



Fonte: Elaborado pela atuora

Nota: linha tracejada destaca o valor mínimo recomendado por Barron (2010).

**Figura 66 (cont.):** Valores de D50, em função de frequência, para cada ponto receptor – Igreja de Santa Rita.



Fonte: Elaborado pela autora

Nota: linha tracejada destaca o valor mínimo recomendado por Barron (2010).

Para os receptores localizados na nave central, observa-se que a diferença entre os resultados de PA e S1 aumenta à medida que o receptor se afasta do altar. A partir da banda de 250 Hz todos os resultados referentes ao sistema PA são maiores que os resultados da fonte S1, com exceção apenas dos receptores R05 e R08, que apresentam esse comportamento a partir da banda de 500 Hz.

Na situação da fonte S1, todos os resultados ficaram abaixo da recomendação mínima de 0,5 (BARRON, 2010). Além disso, à medida que o receptor se afasta da fonte estes valores diminuem, mostrando uma proporção de energia inicial (até 50 ms), que atinge o receptor, cada vez mais fraca em relação à energia posterior. Observa-se que nos pontos mais distantes do altar, R04 e R08, os valores de D50 não chegam a 0,2. Isto indica que menos de 20% da energia sonora chega nestes receptores até os primeiros 50 ms.

Ao considerar o sistema de reforço sonoro (curva PA) grande parte dos resultados ficou próxima, ou acima de 0,5. Ao contrario dos resultados da fonte S1, os resultados do sistema PA indicam que não houve perda de energia sonora à medida que os receptores se afastaram do altar, encontrando nos receptores R04 e R08 as maiores diferenças entre valores de PA e S1, a partir de 1000 Hz.

Para o receptor localizado na nave lateral, R05, tanto os resultados da fonte S1 quanto do sistema PA ficaram abaixo da recomendação mínima proposta por Barron (2010), de 0,5. Neste receptor, os resultados da curva PA foram superiores aos da curva S1 a partir de 500 Hz. Porém, nas altas frequências (2000 Hz e 4000 Hz) as diferenças entre estas duas situações de

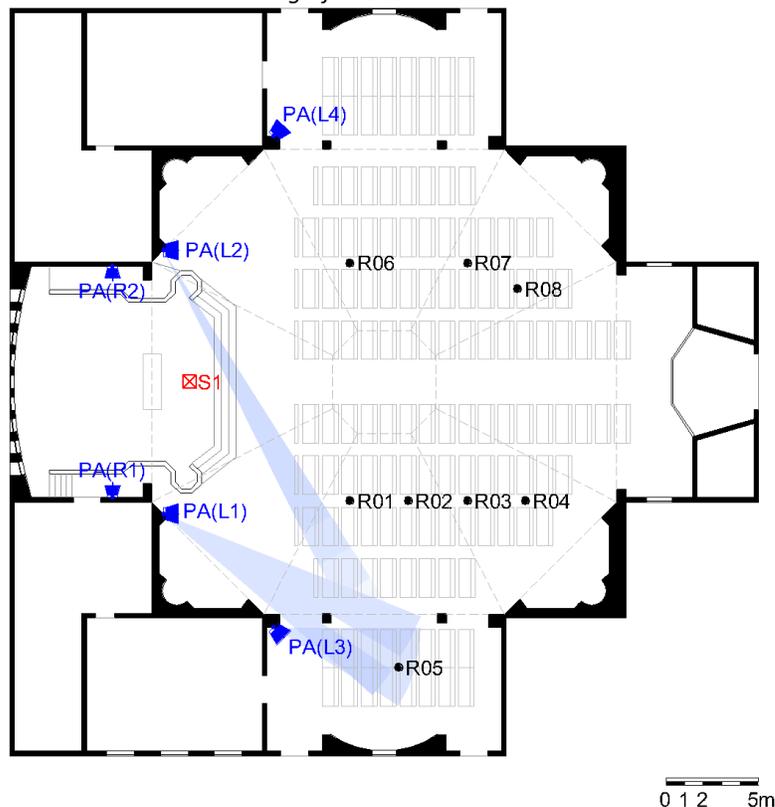
fonte decaem, sendo menores neste ponto que para as demais localizações de receptores. Ao mesmo tempo em que este receptor se encontra bem próximo a uma fonte sonora do sistema PA, sua localização está na nave lateral, longe das demais fontes que se encontram na nave principal. A Tabela 27 apresenta os valores de tempo de atraso do som direto de cada ponto de fonte até os receptores.

**Tabela 27:** Tempos de atraso do som direto a partir das fontes sonoras até os receptores.

Fonte	Tempo (ms)							
	Receptores							
	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08
PA(L1)	29	38	48	57	44	49	62	66
PA(L2)	49	55	62	69	75	29	48	56
PA(L3)	23	29	36	44	21	58	65	65
PA(L4)	58	61	65	69	86	23	36	45
S1	31	39	47	56	56	31	47	53

Conforme observa-se na Figura 67, o receptor R05 recebe som direto das fontes PA(L2) e PA(L3). Ao observar a relação de distâncias entre estas duas fontes e o ponto receptor na Tabela 26, nota-se uma diferença de mais de três vezes entre a fonte mais distante e a mais próxima. Desta forma, apesar da contribuição da proximidade com a fonte L3 do PA, a energia sonora direta que atinge este receptor proveniente da fonte PA(L2) chega ao receptor após 50 milissegundos, como indicado na Tabela 27. Com isto, a qualidade do parâmetro definição é prejudicada, mostrando valores inferiores ao recomendado.

**Figura 67:** Representação do som direto que parte das fontes PA(L1), PA(L2) e PA(L3), em direção ao receptor R05 – Igreja de Santa Rita.

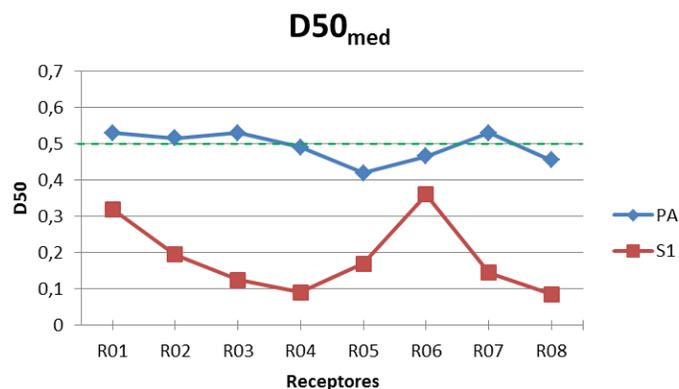


Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora).

Nota: As manchas em cor azul representam o som direto que parte das fontes PA(L1), PA(L2) e PA(L3) em direção ao receptor de interesse. Trata-se de um desenho representativo. Não foram considerados efeitos de difração sonora.

Ao avaliar os valores de  $D50_{med}$  (média entre 500 Hz e 1000 Hz), apresentados na Figura 68, observa-se de forma geral uma contribuição positiva do sistema de reforço sonoro. Todos os receptores deste sistema apresentaram resultados maiores que aqueles da fonte S1. Para a curva PA, os receptores R01, R02, R03 e R07 tiveram valores de  $D50_{med}$  superiores a 0,5. O receptor R05 foi o que apresentou o menor resultado da curva PA e o receptor R06 foi o que apresentou menor diferença entre resultados das duas situações de fonte.

**Figura 68:** Valores de  $D50_{med}$  em função dos pontos receptores, para cada situação de fonte (PA e S1) – Ig. Sta. Rita.



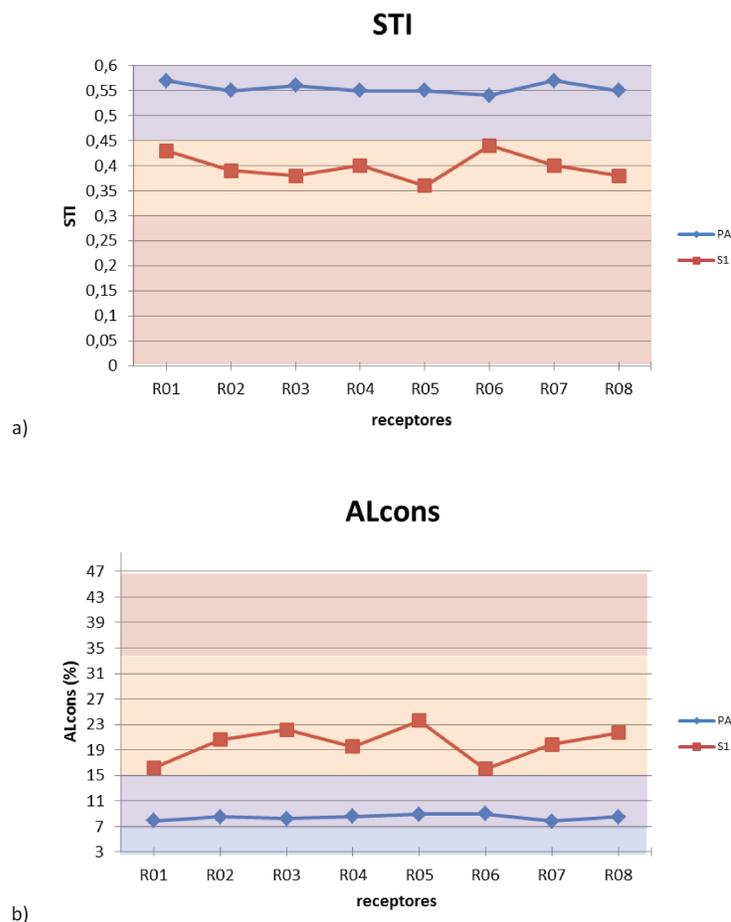
Fonte: Elaborado pela autora

Nota: linha tracejada destaca o valor mínimo recomendado por Barron (2010).

### 5.3.5 ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI) E PERDA DE ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (ALCONS)

Os parâmetros STI e ALcons estão relacionados entre si de forma inversamente proporcional e avaliam a qualidade de inteligibilidade da fala. São apresentados em gráficos pela Figura 69, com valores em função de pontos receptores, e em tabelas (Tabela 28 e Tabela 29). Os resultados são destacados com suas respectivas indicações de qualidade, de acordo com a Tabela 30.

**Figura 69:** Valores de STI (a) e ALcons (b) em função dos pontos receptores – Igreja de Santa Rita.



Fonte: Elaborado pela autora  
 Nota: as marcações em cor nos gráficos correspondem à escala de avaliação indicada na Tabela 29.

**Tabela 28:** Valores de STI para cada ponto receptor e fontes sonoras – Igreja de Santa Rita.

		STI							
		Receptores							
Fonte		R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08
PA		0,57	0,55	0,56	0,55	0,55	0,54	0,57	0,55
S1		0,43	0,39	0,38	0,4	0,36	0,44	0,4	0,38

**Tabela 29:** Valores de ALcons para cada ponto receptor e fontes sonoras – Igreja de Santa Rita.

		ALcons (%)							
		Receptores							
Fonte		R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08
PA		7,9	8,5	8,2	8,6	8,9	9	7,8	8,5
S1		16,2	20,6	22,2	19,5	23,6	16	19,9	21,7

**Tabela 30:** Escala de avaliação qualitativa dos parâmetros STI e ALcons.

Qualidade	Ruim	Pobre	Razoável	Bom	Excelente
STI	0,00 – 0,30	0,30 – 0,45	0,45 – 0,60	0,60 – 0,75	0,75 – 1,00
ALcons	> 34	34 – 15	15 – 7	7 – 3	3 ≥

Ao observar a Figura 69, é visível que, para ambos os parâmetros, o sistema de reforço sonoro apresentou contribuições positivas para a inteligibilidade da fala, em relação à fonte S1. Na curva relativa à fonte S1 do parâmetro ALcons, todos os receptores registraram valores acima de 15%, que é o limite máximo recomendado por Ahnert e Tenhardt (2002), o que indica perdas excessivas na articulação de consoantes, prejudicando a compreensão do discurso. No parâmetro STI, para a fonte S1 apenas os pontos R01 e R06, menos distantes do altar, mostraram resultados mais próximos ao valor limite de 0,45 para uma avaliação razoável da palavra, segundo a Tabela 30. Para a fonte PA, todos os resultados satisfazem as recomendações da literatura. No parâmetro STI, os valores da curva PA ficaram acima de 0,5, recomendação de Kuttruff (2009) para garantir uma inteligibilidade suficiente da fala. E para o ALcons, a curva PA ficou abaixo do limite máximo de perda, de 15%, indicado por Ahnert e Tenhardt (2002).

Ao verificar a Tabela 28 e Tabela 29, percebe-se que todos os resultados para a fonte localizada no altar foram classificados como pobre. Os valores do sistema PA, por sua vez, foram avaliados como razoável. Estes resultados indicam que o sistema de reforço sonoro nesta igreja contribui para uma melhoria na inteligibilidade da palavra. A distribuição das caixas de som também é avaliada de forma positiva, estão localizadas à frente da audiência, mantendo certa relação de orientação da fonte em relação ao receptor. Ao mesmo tempo em que distribuem melhor a energia sonora inicial ao longo dos pontos receptores.

Por outro lado, é importante observar que esta melhoria proporcionada pelo sistema de reforço sonoro não eleva a avaliação de qualidade da inteligibilidade para mais do que uma categoria. O sistema é considerado razoável pela escala de avaliação da Tabela 30, mas nenhum receptor atingiu a classificação boa de inteligibilidade. Isto ocorre, pois as características próprias da sala, como a relação de distâncias, ou TR elevado, por exemplo, ainda influenciam na distribuição sonora e, por sua vez, reduzem a inteligibilidade da palavra.

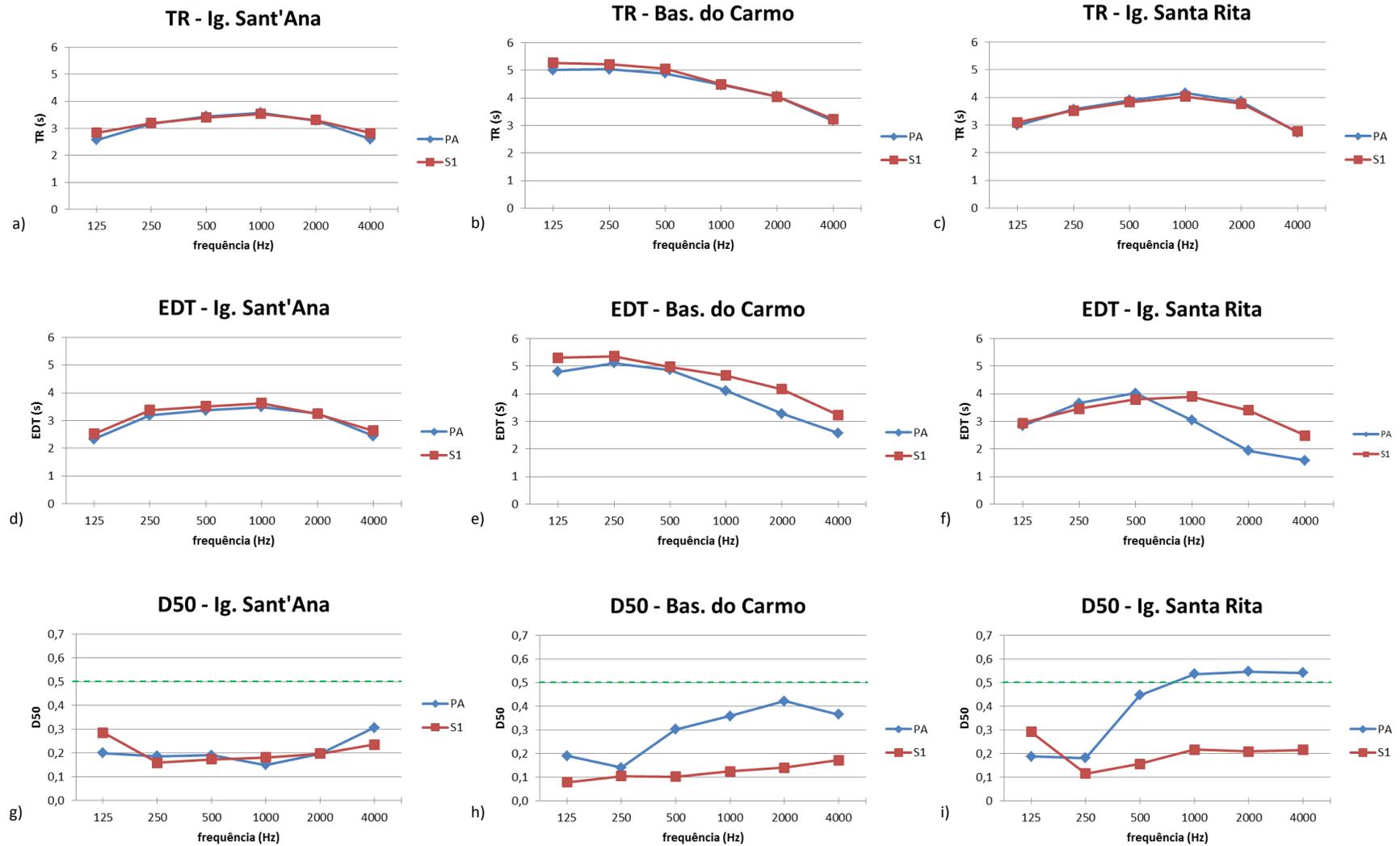
## 5.4 DISCUSSÕES GERAIS

Para uma visão geral e comparação dos parâmetros acústicos entre as três igrejas, a Figura 70 apresenta gráficos relativos às médias espaciais entre receptores, em função de frequência, dos parâmetros acústicos para cada situação de fonte sonora e cada edifício avaliado. Além disso, a Tabela 31 apresenta um resumo dos parâmetros arquitetônicos e acústicos visando apoiar comparação dos dados.

Nas três igrejas avaliadas, a curva de TR entre as duas situações de fonte sonora (PA e S1) ficaram bem próximas entre si. De acordo com a equação básica do tempo de reverberação, o volume é diretamente proporcional ao resultado de TR. Esta relação é observada entre a Igreja de Sant'Ana (Figura 70a) e a Basílica do Carmo (Figura 70b), cuja igreja de menor volume, Sant'Ana, apresenta valores de TR inferiores àqueles da Basílica do Carmo, que possui maior volume, como mostra a Tabela 31. Entretanto esta relação não é observada na Igreja de Santa Rita, que constitui a igreja de maior volume do grupo estudado, mas possui curvas de TR (Figura 70c) não muito superiores à Igreja de Sant'Ana, igreja de menor volume. Isso ocorre, pois a absorção sonora também é um fator de importante influência nos resultados de tempo de reverberação. Apesar do volume elevado, a Igreja de Santa Rita possui tratamento acústico em todo o forro das naves e altar, com materiais absorvedores sonoros, o que contribui para a redução nos valores de TR. As outras duas igrejas não possuem materiais construtivos, ou de revestimento, aplicados com uma preocupação específica para o desempenho acústico do edifício. Desta forma, os valores de TR são diretamente proporcionais ao volume destes edifícios. Os valores de tempo de reverberação das três igrejas, de uma forma geral, foram considerados excessivos segundo as recomendações da literatura, o que pode prejudicar a inteligibilidade da palavra. Da mesma forma, Smiderle (2013) também avalia estas igrejas com valores de TR elevados, e por consequência disso, indica baixo desempenho dos parâmetros D50 e STI.

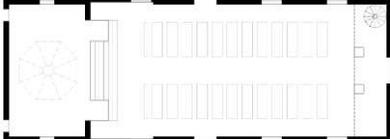
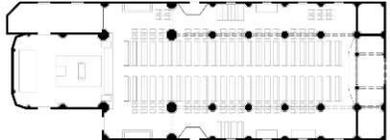
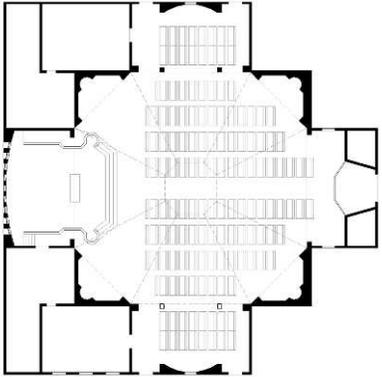
No que diz respeito ao parâmetro EDT, foi apresentado que quanto maior o valor de EDT, em relação ao TR, maior a sensação de reverberância para o ouvinte. Ou seja, se o EDT apresenta um valor alto, próximo ou maior que o valor de TR, significa que a influência do campo reverberante no receptor é maior que a do campo sonoro inicial.

**Figura 70:** Médias espaciais (entre receptores) para cada situação de fonte (PA e S1) dos parâmetros TR (a – c), EDT (d – f) e D50 (g – i), nas três igrejas avaliadas.



Fonte: Elaborado pela autora

**Tabela 31:** Resumo dos parâmetros arquitetônicos e acústicos.

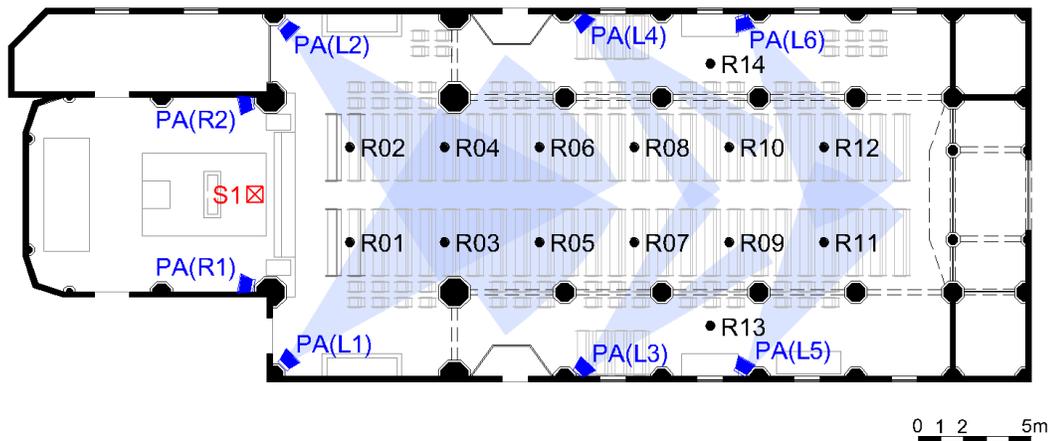
Igreja	Planta	Volume (m <sup>3</sup> )	Área piso (em planta) (m <sup>2</sup> )	Área de paredes (em vista) (m <sup>2</sup> )	Área forro (m <sup>2</sup> )	Audiência (n)	Parâmetros médios <sup>1</sup>	PA	S1	JND
Sant'Ana		1.378,7	221,1	445,5	259,0	120	TR <sub>med</sub> (s)	3,52	3,47	0,17 (5%)
							EDT <sub>med</sub> (s)	3,43	3,57	0,17 (5%)
							D50 <sub>med</sub>	0,17	0,18	0,05
							STI	0,38	0,37	0,03
							ALcons (%)	21,8	22,7	-
N. S. do Carmo		5.482,9	640,9	1.273,04	918,4	324	TR <sub>med</sub> (s)	4,68	4,78	0,23 (5%)
							EDT <sub>med</sub> (s)	4,49	4,82	0,23 (5%)
							D50 <sub>med</sub>	0,33	0,11	0,05
							STI	0,45	0,30	0,03
							ALcons (%)	15,2	34,8	-
Santa Rita		13.312,7	947,7	1.643,99	1.083,1	560	TR <sub>med</sub> (s)	4,03	3,93	0,20 (5%)
							EDT <sub>med</sub> (s)	3,53	3,84	0,18 (5%)
							D50 <sub>med</sub>	0,49	0,19	0,05
							STI	0,56	0,40	0,03
							ALcons (%)	8,4	20,0	-

<sup>1</sup> TR<sub>med</sub>, EDT<sub>med</sub> e D50<sub>med</sub> referem-se às médias entre os valores de 500Hz e 1000Hz. Para STI e ALcons foram calculadas as médias espaciais entre receptores.

Comparando as curvas de EDT entre PA e S1, observa-se que para a Basílica do Carmo (Figura 70e) e para a Igreja de Santa Rita (Figura 70f), a curva PA é mais baixa que a curva de S1. No caso da Igreja de Santa Rita, este comportamento se dá a partir de 1000 Hz. Ao apresentar valores de EDT mais baixos, o que acontece para o sistema PA é que a distribuição de fontes sonoras deste sistema aproxima o campo sonoro direto dos receptores. Assim, a influência do campo sonoro direto no receptor se torna maior do que a influência do campo reverberante e, conseqüentemente, o decaimento desta porção inicial do som é mais rápido.

Ao comparar a distribuição de caixas de som do sistema de sonorização da Basílica do Carmo e da Igreja de Santa Rita, observa-se que, para esta última, todas as caixas de som estão à frente de qualquer posição de ouvinte da área da congregação. No caso da Basílica do Carmo, as caixas foram distribuídas ao longo das paredes laterais e o edifício possui proporções retangulares. Desta forma, em alguns pontos como, por exemplo, R03, R04, R05 e R06, que embora recebam som direto das fontes PA(L1) e PA(L2), há fontes sonoras do sistema PA situadas atrás da linha desses receptores, direcionando boa parte da energia sonora para a região posterior da nave. A Figura 71 mostra este exemplo, com a representação da projeção de energia do som direto em relação aos receptores citados.

**Figura 71:** Representação som direto das caixas de som. PA(L1) e PA(L2) que contribuem para a energia inicial dos pontos R03, R04, R05 e R06. As caixas PA(L3) a PA(6) contribuem para a energia reverberante, em relação aos receptores citados.



Fonte: SMIDERLE, 2013 (Editado pela autora)

Nota: As manchas em cor azul representam o som direto que parte das fontes sonoras do sistema PA em relação aos receptores de interesse (R03, R04, R05 e R06). Trata-se de um desenho representativo. Não foram considerados efeitos de difração sonora.

Observa-se a partir da Figura 71 que os receptores R03, R04, R05 e R06 recebem contribuição de energia inicial das caixas PA(L1) e PA(L2). As caixas de som situadas mais atrás da linha destes receptores, PA(L3), PA(L4), PA(L5) e PA(L6), projetam grande parte da energia sonora inicial para a região posterior aos receptores em questão. Nestes casos, estas caixas estarão contribuindo também para o aumento da energia reverberante que irá atingir estes receptores, mais do que para a energia inicial em si. Desta forma, ao comparar as médias espaciais de EDT para o sistema PA, observa-se que a curva de EDT da Basílica do Carmo (Figura 70e) possui valores mais altos do que a curva de EDT da Igreja de Santa Rita (Figura 70f). Assim, de uma forma geral, os receptores da Basílica do Carmo são mais influenciados pelo campo reverberante do que aqueles da Igreja de Santa Rita, que recebem maior parcela de energia sonora inicial em oposição à reverberante.

Esta mesma relação pode ser observada nos resultados do parâmetro D50. De uma forma geral, constatou-se que o sistema PA das igrejas N. S. do Carmo e Santa Rita aproximou os receptores do campo sonoro inicial, em comparação à fonte S1. Logo, a energia sonora que atinge o receptor dentro dos primeiros 50 ms também foi maior para o sistema PA de ambas as igrejas do que para a fonte S1. Ao comparar as proporções de energia entre as duas igrejas, inferidas a partir dos resultados de EDT, concluiu-se que o sistema PA da igreja de Santa Rita proporcionou mais energia inicial aos seus receptores do que o sistema PA da Basílica do Carmo. Com mais influência desta energia inicial, além de menores tempos de reverberação neste edifício, uma maior porção de energia sonora ficou dentro do intervalo útil de 50 ms em relação à energia tardia. Desta forma, a curva de D50 para a igreja de Santa Rita (Figura 70i) foi melhor do que para a Basílica do Carmo (Figura 70h).

No caso da Igreja de Sant'Ana, ao analisar o gráfico da média espacial de EDT (Figura 70d), observa-se que as curvas PA e S1 tem valores próximos entre si. Isto quer dizer que a distribuição das fontes sonoras do sistema PA pouco mudou a relação entre energia sonora inicial e energia reverberante nas posições de receptores. Isto se reflete nos resultados de D50 (Figura 70g), especialmente nas bandas de frequência entre 250 Hz e 2000 Hz. Como o sistema PA não mostrou diferenças relevantes na proporção de energia inicial, os valores de D50 entre PA e S1 estão próximos entre si, indicando que também na proporção de energia que atinge os

receptores dentro dos primeiros 50 ms não houve alterações significativas. A ISO 3382-1 (2009) aponta que a diferença mínima perceptível (JND) para este parâmetro é de 0,05. Nas frequências de 250 Hz a 2000 Hz, a diferença de valores médios de D50 entre PA e S1 da Igreja de Sant'Ana ficaram entre 0,02 e 0,03, abaixo do JND indicado. Desta forma, como a reverberação do ambiente foi considerada alta e não há melhoria na distribuição da energia inicial com as fontes do sistema PA, o D50 é baixo, pois a maior parte da energia sonora estará concentrada na parcela tardia.

Dentre as igrejas avaliadas, a Igreja de Santa Rita é o ambiente de maior volume e, ao mesmo tempo, o único edifício que apresentou considerações acústicas em seu projeto, com revestimento aplicado em toda a extensão do forro. Por consequência, trata-se do edifício que apresentou melhor resultado de TR, o que traduz melhores resultados de inteligibilidade da palavra, tanto para a fonte posicionada no altar, quanto para o sistema de sonorização.

Ao observar as médias espaciais dos parâmetros STI e ALcons, apresentadas na Tabela 32 com a marcação da avaliação de qualidade dos resultados, destaca-se que para a Igreja de Sant'Ana o sistema PA apresentou variações imperceptíveis para o ouvinte. Bradley e Norcross (1999) indicam um JND de 0,03 para o STI, enquanto a diferença de resultados das médias espaciais de STI, na Igreja de Sant'Ana, entre PA e S1 é de 0,01.

**Tabela 32:** Médias espaciais (entre receptores) dos parâmetros STI e ALcons para as três igrejas avaliadas.

		Médias Espaciais		
Parâmetro	Fonte	Igrejas		
		Sant'Ana	N. S. do Carmo	Santa Rita
STI	PA	0,38	0,45	0,56
	S1	0,37	0,30	0,40
ALcons	PA	21,8	15,2	8,4
	S1	22,7	34,8	20,0

Legenda:   Pobre   Razoável

Ainda na Tabela 32, para a Basílica do Carmo e Igreja de Santa Rita, observa-se que a diferença das médias espaciais entre os resultados de PA e S1 foram semelhantes para as duas igrejas. Para a Basílica do Carmo, a diferença das médias de STI entre PA e S1 foi de 0,15, e para a Igreja de Santa Rita, 0,16. O que se destaca nos resultados destas duas igrejas é que o valor médio de STI para a fonte S1 da Igreja de Santa Rita é maior que o valor para a fonte S1 da

Basílica do Carmo. Comparando o valor de STI para a fonte S1 da Igreja de Santa Rita com os valores da Basílica do Carmo, observa-se que o resultado da fonte omnidirecional da Igreja de Santa Rita é mais próximo do valor de STI para PA da Basílica do Carmo, do que o valor de S1 deste edifício. Ou seja, sem o uso do sistema de reforço sonoro, apenas com a resposta acústica do ambiente à fonte omnidirecional, a Igreja de Santa Rita apresentou um resultado mais próximo ao da Basílica do Carmo já com o uso do sistema de reforço sonoro. Desta forma, ao considerar o sistema de sonorização na Igreja de Santa Rita, este valor ainda obteve um incremento, resultando no valor mais alto de STI (média espacial) dentre as três igrejas avaliadas e alcançando o valor mínimo recomendado por Kuttruff (2009) de 0,5. Porém, é importante destacar que mesmo com um acréscimo do valor numérico, a avaliação de qualidade deste resultado não foi superior à avaliação de STI para a Basílica do Carmo. Ambas as igrejas tiveram as médias espaciais de STI para o sistema PA qualificadas como razoável.



## 6. CONCLUSÕES

Os edifícios religiosos católicos abrigam ambientes complexos, no que diz respeito à sua configuração espacial e necessidades acústicas. Ao longo deste trabalho, foi visto que no decorrer dos anos a arquitetura das igrejas sofreu alterações consideráveis, e com elas também se alteraram as características acústicas. Aparentemente há uma ligação entre as mudanças arquitetônicas, e conseqüentemente acústicas, e as mudanças ocorridas nos ritos católicos. O desenvolvimento do canto gregoriano e sua relação com as reverberantes catedrais góticas é o exemplo mais claro.

Com o Concílio Vaticano II, em 1965, a instituição promoveu a valorização do discurso e a participação dos fiéis durante os ritos. Com isso, as necessidades acústicas de seus espaços, no que se refere à compreensão da palavra, se tornaram uma questão ainda mais relevante. A partir destas necessidades, o uso dos sistemas eletroacústicos de reforço sonoro se tornou crescente nas igrejas.

Com o desenvolvimento desta pesquisa, foi possível observar como se dá a interação entre os sistemas de reforço sonoro (SRS) e as características arquitetônicas dos ambientes em que estão inseridos. Por meio dos parâmetros acústicos objetivos, Tempo de Reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Definição (D50), Índice de inteligibilidade da Fala (STI) e Perda de Articulação de Consoantes (ALcons), avaliou-se a influência desses sistemas na resposta acústica do ambiente, registrada por receptores localizados em pontos estratégicos da audiência. Buscou-se identificar, ainda, quais destes parâmetros sofrem influência direta da relação de posicionamento entre fonte e receptor.

Das três igrejas avaliadas, todas foram diagnosticadas com valores de TR maiores que o

recomendado. O parâmetro TR, no entanto, não sofreu mudanças significativas com a alteração da distribuição de fontes sonoras e relações de distâncias entre fonte e receptor. Este é um parâmetro que está diretamente relacionado com as características arquitetônicas do ambiente, como volume e materiais de revestimento. Desta forma, os prejuízos causados pelo TR na inteligibilidade da palavra, não podem ser remediados com o uso de um sistema de reforço sonoro. Um projeto arquitetônico adequado deve ser considerado e os equipamentos eletroacústicos devem ser utilizados apenas como suporte à melhoria da compreensão do discurso.

De um modo geral, constatou-se que todos os parâmetros acústicos avaliados se relacionam principalmente com as características acústicas da sala, independente da aplicação do sistema de som. O desempenho dos sistemas de reforço sonoro é consequência do desempenho acústico do próprio ambiente, gerando alguma melhoria nos resultados dos parâmetros acústicos dependendo da sua aplicação e distribuição de fontes sonoras.

Os parâmetros EDT, D50, STI e ALcons sofreram influência direta da relação de localização entre fonte sonora e receptor, que é definida principalmente pela geometria da sala. Nas situações em que as fontes sonoras do sistema eletroacústico aproximaram os receptores do campo sonoro direto, houve uma redução nos valores de EDT em relação aos resultados de TR e consideráveis melhorias no parâmetro D50. Porém, quando a distribuição de caixas de som fez com que as fontes direcionassem energia sonora para superfícies distantes do receptor, estas incrementaram a energia sonora reverberante e, conseqüentemente, aumentaram os valores de EDT e também apresentaram menores resultados de D50.

Os resultados de STI demonstraram que este parâmetro está diretamente ligado à reverberação do ambiente e ao ruído de fundo. Dentre as igrejas que apresentaram valores de ruído de fundo próximos entre si, o edifício que possui maior valor de TR obteve menor resultado nos parâmetros de inteligibilidade. Já a igreja que apresentou menor ruído de fundo e TR reduzido em relação às demais, mostrou melhores valores nos parâmetros STI e ALcons.

Grande parte dos resultados referentes aos sistemas de reforço sonoro foi melhor que os resultados relativos à fonte única, posicionada nos altares das igrejas avaliadas. Porém, algumas destas melhorias não foram suficientes para elevar a avaliação de qualidade da

inteligibilidade da palavra. O edifício que apresentou melhores resultados nos parâmetros acústicos do ambiente puro (sem considerar o sistema de sonorização) foi também o que apresentou melhor desempenho de seu sistema de reforço sonoro.

Portanto, os resultados mostram que os sistemas por si apresentam uma tendência a influenciar de forma positiva a inteligibilidade da palavra, porém, não podem ser utilizados de forma indiscriminada. Dependem da distribuição dos equipamentos, no que diz respeito às fontes sonoras, em relação às características acústicas e arquitetônicas de cada ambiente, como reverberação e geometria.

A análise dos dados da presente pesquisa confirma que, independente do tipo e qualidade de um sistema de reforço sonoro, seu desempenho depende diretamente das propriedades acústicas do próprio ambiente. Desta forma, a instalação e utilização dos sistemas de reforço sonoro não dispensam um cuidadoso planejamento acústico do edifício.



## REFERÊNCIAS

AHNERT, Wolfgang; TENNHARDT, Hans-Peter. Acoustics for Auditoriums and Concert Halls. In: BALLOU, Glen M. (Ed.) **Handbook for Sound Engineers**. Burlington: Focal Press, 2002.

ÁLVARES-MORALES, Lidia; et al. A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga. **Building and Environment**. v. 72, p. 102-115, 2014.

ARQUIDIOCESE DE CAMPINAS. **Paróquia Sant'Ana**. Disponível em: <<http://arquiocesecampinas.com/local/paroquia-santana-2>> Acesso em: 04 jan. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10152**: Níveis de Ruído para Conforto Acústico. ABNT: Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12179**: Tratamento Acústico em Recintos Fechados. ABNT: Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10151**: Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. ABNT: Rio de Janeiro, 2000.

BALLOU, Glen M. (Ed.) **Handbook for Sound Engineers**. Burlington: Focal Press, 2002.

BARBO, Marselle N. **Avaliação acústica de um templo católico de grandes dimensões submetivo à excitação impulsiva**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria: 2009.

BARRON, Michael. **Auditorium Acoustics and Architectural Design**. Oxon: Spon Press, 2010.

BASÍLICA DO CARMO. Basílica do Carmo: Dados Gerais. In: **Basilica Nossa Senhora do Carmo**, Disponível em: <[http://www.basilicadocarmocampinas.org.br/basilica\\_dados\\_gerais.htm](http://www.basilicadocarmocampinas.org.br/basilica_dados_gerais.htm)> Acesso em: 04 jan. 2014a.

BASÍLICA DO CARMO. Basílica do Carmo: Dados Históricos. In: **Basílica Nossa Senhora do Carmo**, Disponível em: <<http://www.basilicadocarmocampinas.org.br/historico.htm>> Acesso em: 04 jan. 2014b.

BORGERSON, Bruce. Is it P.A. or S.R.? In: **Sound & Video Contractor**. 2003. Disponível em: <[http://svconline.com/mag/avinstall\\_pa\\_sr/index.html](http://svconline.com/mag/avinstall_pa_sr/index.html)>. Acesso em: 11 ago. 2013.

BOTTAZZINI, Marcelo C. **Igrejas setecentistas mineiras: a influência das características arquitetônicas na qualidade acústica**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas: 2007.

BORK, Ingolf. Comparison of Room Simulation Software – The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. **Acustica. Acta Acustica**. v.86, p. 943-956, 2000.

BRADLEY, J.S. et al. A just noticeable difference in C50 for speech. **Applied Acoustics**, v. 58, p. 99 – 108, 1999. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X\(98\)00075-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00075-9)> Acesso em: 25 fev. 2014.

BRADLEY, J.S. Review of objective room acoustics measures and future needs. **Applied Acoustics**, v.72, p. 713-720, 2011.

BRUEL&KJAER. **Dirac Room Acoustics Software Type 7841 Instruction Manual**. Naerum: Bruel&Kjaer, 2003a.

BRUEL&KJAER. **Application Note**. Measuring Speech Intelligibility Using Dirac – Type 7841. Copenhagen, 2003b.

CAMPINAS VIRTUAL. **Basílica de Nossa Senhora do Carmo**. 2008. Disponível em: <[http://www.campinasvirtual.com.br/galeria\\_basilica\\_do\\_carmo.html](http://www.campinasvirtual.com.br/galeria_basilica_do_carmo.html)> Acesso em: 04 jan. 2014.

CARVALHO, António P. O. **Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches**. 1994. Tese. University of Florida, Gainesville, 1994.

CARVALHO, António P. O. Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches. **Applied Acoustics**, v. 58, p. 33 – 49, 1999.

CARVALHO, António P. O. Acoustical measures in churches Porto's Clérigos Church, a comprehensive example. In: **Proceedings of the Seventh International Congress on Sound and Vibration**, v. 3, p. 1645-1652. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2000.

CARVALHO, Antonio P. O.; CRUZ, Marlene T. Igrejas modernas com problemas acústicos, o caso da Igreja Nossa Senhora da Conceição (Porto). **42º Congreso Español de Acústica**, Cáceres,

2011. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/56839>> Acesso em: 20 nov. 2011.

CARVALHO, Antonio P. O.; LENCASTRE, Margarida M. F. Catholic Churches, Sound-Reinforcement Systems and RASTI. **International Journal of Acoustics and Vibration**, v. 5, n.1, 2000. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/433>> Acesso em: 20 nov. 2011.

CARVALHO, Antonio P. O. NASCIMENTO, Bruno F. O. **A acústica das capelas subterrâneas da nova Igreja da Santíssima Trindade, Fátima**. 41º Congresso Nacional de Acústica, León, 2010. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/25636>> Acesso em: 20 jan. 2013.

CARVALHO, Antonio P. O.; SILVA, Pedro M. A. Sound, Noise and Speech at the 9000-Seat Holy Trinity Church in Fatima, Portugal. **Archives of Acoustics**, v. 35, n. 2, p. 145-156, 2010.

CAVANAUGH, William J. TOCCI, Gregory C. WILKES, Joseph A. (editors) **Architectural acoustics: principles and practice**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

CIPOLINI, Pedro Carlos. Basilica Tombada. In: **Basilica Nossa Senhora do Carmo**, disponível em: <[http://www.basilicadocarmocampinas.org.br/basilica\\_tombada.htm](http://www.basilicadocarmocampinas.org.br/basilica_tombada.htm)>. Acesso em: 20 jun. 2013.

CIRILLO, Ettore; MARTELOTTA, Francesco. Acoustics of Apulian-Romanesque Churches: Correlations Between Architectural and Acoustic Parameters. **Building Acoustics**, v. 10, n.1, p. 55–76, 2003.

CIRILLO, Ettore. MARTELOTTA, Francesco. **Worship, Acoustics and Architecture**. Brentwood: Multi-Science Publishing Co. Ltd., 2006.

COMUNIDADE RELIGIOSA Santa Rita de Cássia. **A Paróquia**. Disponível em: <<http://comunidadesantarita.web969.uni5.net/a-paroquia>>. Acesso em: 04 jan. 2014.

DAVIS, Don. Designing for Speech Intelligibility. In: DAVIS, Don; PATRONIS, Eugene. **Sound System Engineering**. Burlington: Focal Press, 2006. cap. 10, p. 205-219.

DAVIS, Don; PATRONIS, Eugene. **Sound System Engineering**. Burlington: Focal Press, 2006.

EVEREST, F. A.; POHLMAN, K. C. **Master Handbook of Acoustics**. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 2009.

GADE, Anders Christian. Acoustics in Halls for Speech and Music. In: ROSSING, Thomas D. (Ed.). **Springer Handbook of Acoustics**. New York: Springer Science+Business Media, 2007. cap. 9, p. 301-350.

GARRIDO, Jose A. et al. Virtual models for the prediction of acoustic fields of Manuel de Falla Auditorium in Granada, Spain. **Applied Acoustics**. n. 76, p. 921-935, 2012.

GIL-REYES, Beri, et al. Room acoustic investigation of actors' positions and orientations for various theatre configurations in a moderate-sized drama theatre. **Applied Acoustics**, v. 72, p. 48 – 58, 2011. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.08.001> > Acesso em: 23 abr. 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60268-16** Sound System Equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Brussels, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-4**. Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. Genève, 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382-1**. Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance Spaces. Geneva, 2009.

KOSALA, Krzysztof; ENGEL, Zbigniew W. Assessing the acoustic properties of Roman Catholic churches: A new approach. **Applied Acoustics**. v. 74, p. 1144-1152, 2013.

KUTTRUFF, Henrich. **Room Acoustics**. 5th ed. Oxon: Spon Press, 2009.

LENCASTRE, Margarida M. M. F. Q. **A inteligibilidade da palavra em igrejas católicas, através de análise de carácter objetivo e subjectivo**. 1998. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto: 1998.

LONG, Marshall. **Architectural Acoustics**. Burlington: Elsevier Academic Press, 2006.

MARSHALL, L. G. Acoustical Design: Places for Listening. In: CAVANAUGH, William J. TOCCI, Gregory C. WILKES, Joseph A. (editors) **Architectural acoustics: principles and practice**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2010. cap. 4, p. 133-159.

MARTELLOTTA, Francesco. **Caratteristiche acustiche delle chiese romaniche in Puglia**. 2001. Tesi (Dottorato di Ricerca in Fisica Tecnica), Università degli Studi Ancona, Politecnico di Bari, Ancona, 2001.

MARTELLOTTA, F. et. al. Guidelines for acoustical measurements in churches. **Applied Acoustics**. v. 70, p. 378-388, 2009.

MARTINS, Cátia D. F. **Caracterização acústica das duas igrejas de Santo Ovídio, Mafamude**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto, 2010.

MEHTA, M. et al. **Architectural acoustics principles and design**. Columbus, 1999.

MOORE, Matthew J. Sound Systems. In: CAVANAUGH, William J. TOCCI, Gregory C. WILKES, Joseph A. (editors) **Architectural acoustics: principles and practice**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2010. cap. 5, p. 175-191.

NAVARRO, J. et al. The Western Latin church as a place for music and preaching: An acoustic assessment. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 6, p. 781–789, 2009.

PARÓQUIA DE SANT'ANA, Sousas. **Histórico**. 2013. Disponível em:  
<<http://www.santanasousas.com/#!historico/c226e>> Acesso em: 04 jan. 2014.

PATRONIS, Eugene. Microphones. In: DAVIS, Don. PATRONIS, Eugene. **Sound System Engineering**. Burlington: Focal Press, 2006a. cap. 11, p. 221-252

PATRONIS, Eugene. Loudspeakers and Loudspeaker Arrays. In: DAVIS, Don. PATRONIS, Eugene. **Sound System Engineering**. Burlington: Focal Press, 2006b. cap. 12, p. 253-328

PEUTZ, V. M. A. Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room. *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 19, 1971. apud DAVIS, Don. *Designing for Speech Intelligibility*. In: DAVIS, Don. PATRONIS, Eugene. **Sound System Engineering**. Burlington: Focal Press, 2006.

ROSSING, Thomas. D. Introduction to Acoustics. In: ROSSING, Thomas D. (Ed.). **Springer Handbook of Acoustics**. New York: Springer, 2007. cap. 1, p. 1-6.

ROSSING, Thomas D. (Ed.). **Springer Handbook of Acoustics**. New York: Springer Science+Business Media, 2007

SANT'ANA, David Q.; ZANNIN, Paulo H. T. Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 511–517, 2011.

SIMÕES, F. M. et al. Análise do Comportamento Acústico das Igrejas do Século XIX em Porto Alegre. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 2005. **Anais...** Maceió, 2005.

SMIDERLE, Roberta. **Diagnóstico das características acústicas de seis igrejas católicas de Campinas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas: 2013.

SOETA, Yoshiharu et al. Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in Japanese churches. **Journal of Acoustical Society of America**, n. 131, v. 2, p. 1206-1220, 2012.

VIGEANT, Michelle C. et al. Objective and subjective evaluations of the multi-channel auralization technique as applied to solo instruments. **Applied Acoustics**. n. 72, p. 311-323, 2011.

ZAMARREÑO, T. et al. Assessing the intelligibility of speech and singing in Mudéjar-Gothic churches. **Applied Acoustics**, n. 69, p. 242-254, 2008.



Figura A.2: Corte longitudinal – Igreja de Sant'Ana

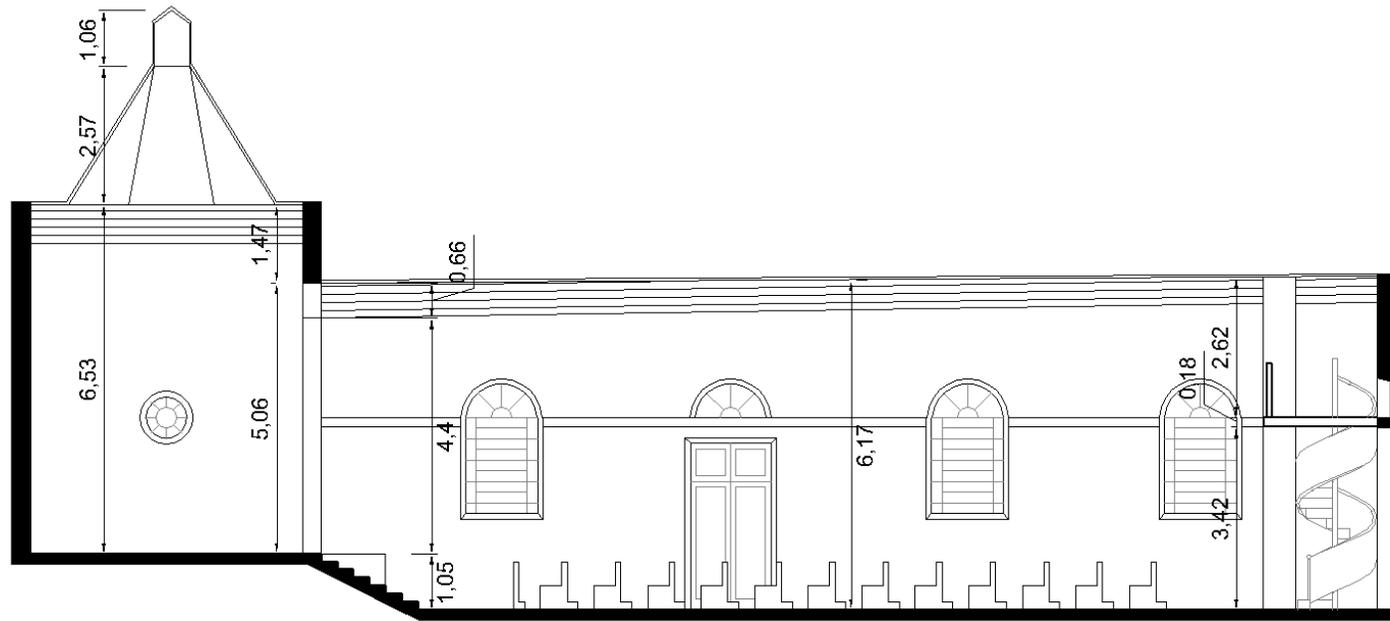


Figura A.3: Planta-baixa: piso principal – Basílica de Nossa Senhora do Carmo

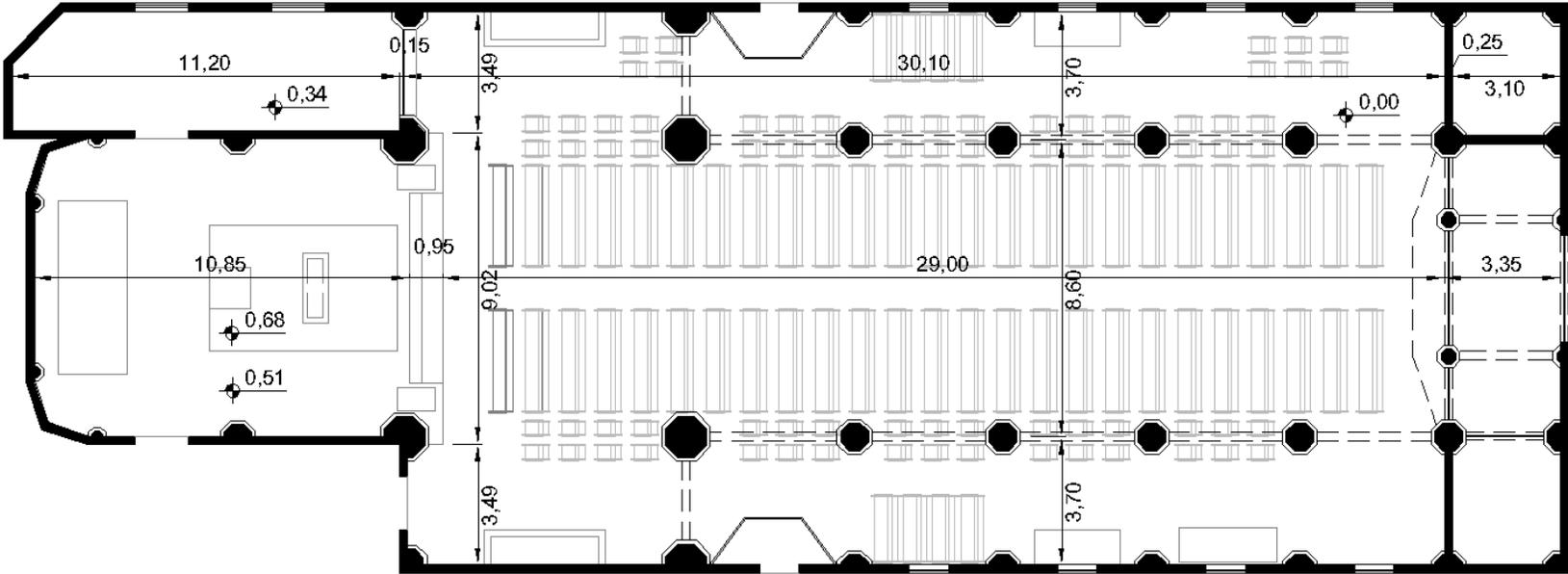


Figura A.4: Corte longitudinal – Basílica de Nossa Senhora do Carmo

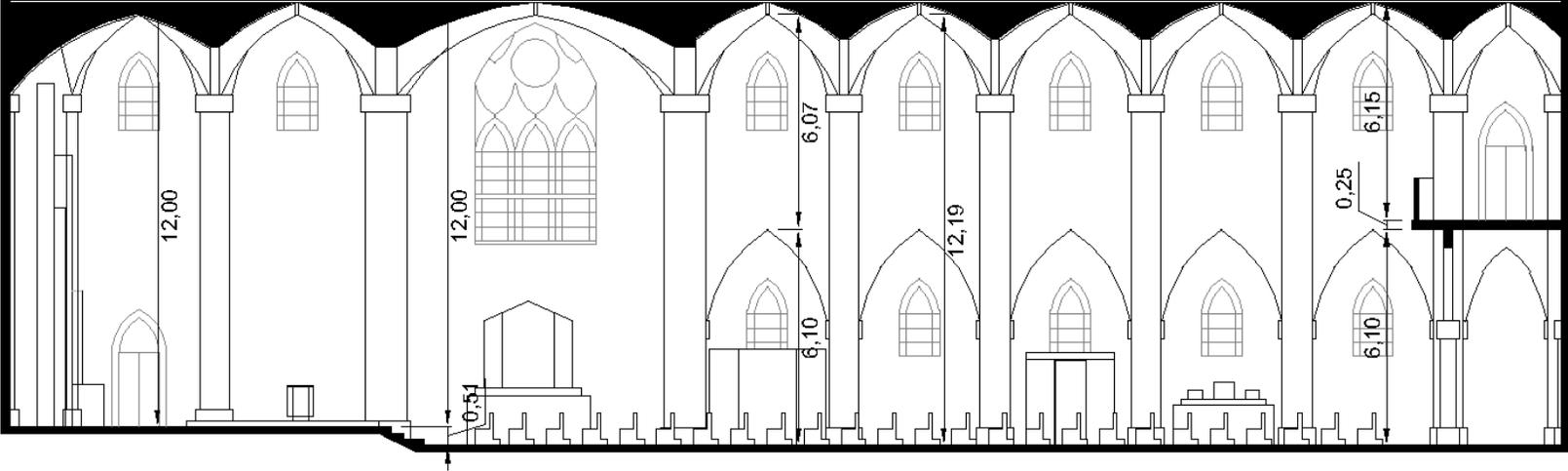
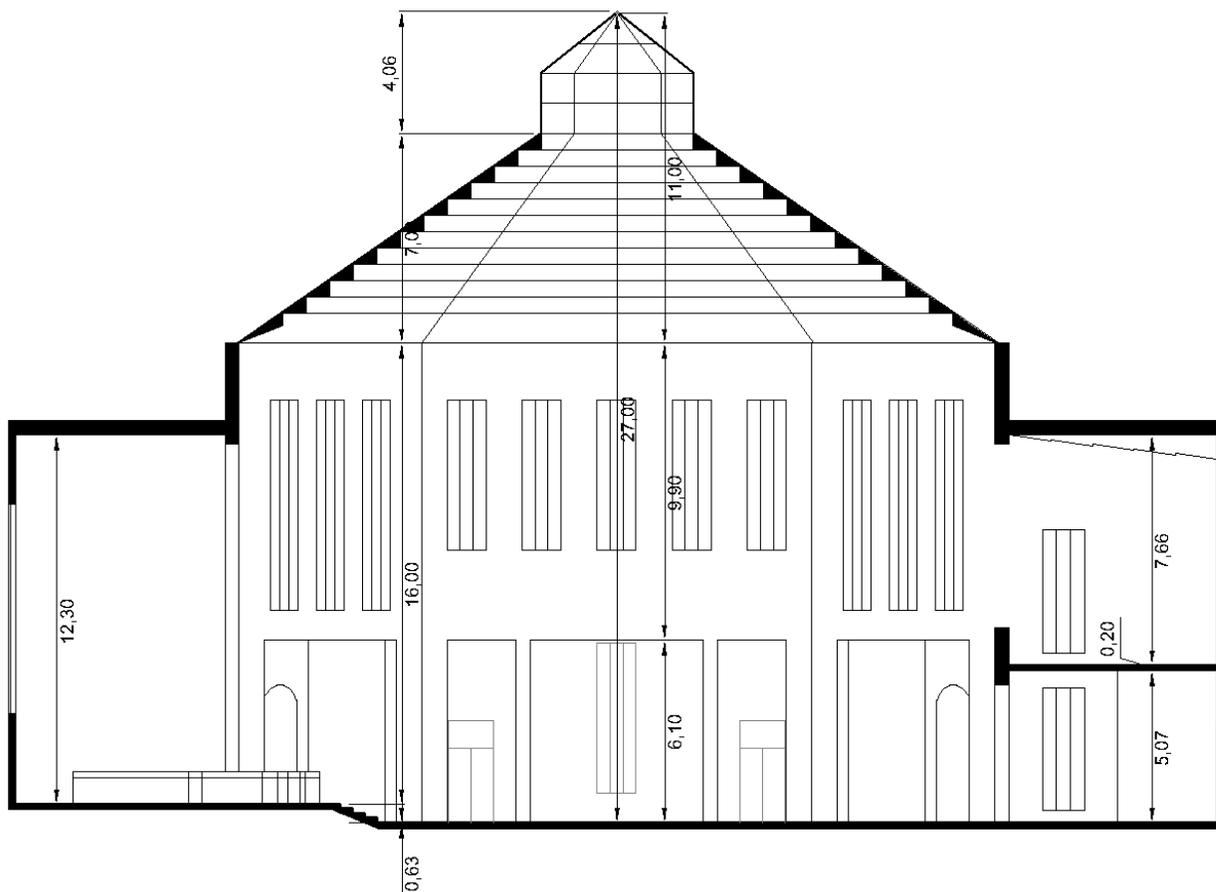




Figura A.6: Corte longitudinal – Igreja de Santa Rita de Cássia



## APÊNDICE B

Resultados obtidos após as medições acústicas nas igrejas avaliadas.

**Tabela B.1:** Dados do parâmetro TR, em função de frequência, obtidos na Igreja de Sant'Ana

Igreja de Sant'Ana									
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)						Média 500Hz-1000Hz
			125	250	500	1000	2000	4000	
TR (s)	PA	R01	2,68	3,03	3,49	3,55	3,26	2,55	3,52
		R02	2,37	3,10	3,53	3,52	3,30	2,57	3,53
		R03	2,88	3,06	3,29	3,47	3,15	2,50	3,38
		R04	2,89	3,21	3,38	3,38	3,15	2,52	3,38
		R05	2,46	3,48	3,72	3,82	3,49	2,75	3,77
		R06	2,16	3,21	3,29	3,79	3,43	2,74	3,54
		Média	2,57	3,18	3,45	3,59	3,30	2,61	3,52
	Desvio Pad.	0,29	0,16	0,17	0,18	0,14	0,11	0,14	
	S1	R01	2,93	3,30	3,57	3,70	3,42	2,91	3,64
		R02	2,69	3,22	3,67	3,71	3,39	2,91	3,69
		R03	2,67	3,19	3,24	3,52	3,30	2,87	3,38
		R04	3,02	3,08	3,36	3,46	3,34	2,83	3,41
		R05	2,91	3,20	3,30	3,43	3,23	2,72	3,36
		R06	2,83	3,24	3,25	3,43	3,18	2,71	3,34
Média		2,84	3,20	3,40	3,54	3,31	2,83	3,47	
Desvio Pad.	0,14	0,07	0,18	0,13	0,09	0,09	0,15		

**Tabela B.2:** Dados do parâmetro EDT, em função de frequência, obtidos na Igreja de Sant'Ana

		Igreja de Sant'Ana							
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)						Média 500Hz-1000Hz
			125	250	500	1000	2000	4000	
EDT (s)	PA	R01	2,55	3,10	3,16	3,37	3,22	2,37	3,26
		R02	2,50	3,13	3,29	3,52	3,08	2,30	3,41
		R03	2,67	3,73	3,59	3,33	3,25	2,46	3,46
		R04	2,52	3,00	3,43	3,37	3,26	2,42	3,40
		R05	1,94	2,84	3,27	3,54	3,27	2,50	3,40
		R06	1,83	3,38	3,51	3,82	3,48	2,59	3,66
		Média	2,33	3,19	3,37	3,49	3,26	2,44	3,43
	Desvio Pad.	0,36	0,32	0,16	0,18	0,13	0,10	0,13	
	S1	R01	2,53	3,14	3,42	3,78	3,35	2,71	3,60
		R02	2,74	3,10	3,31	3,42	3,44	2,65	3,37
		R03	2,61	3,42	3,70	3,44	3,18	2,52	3,57
		R04	2,60	3,44	3,37	3,54	3,12	2,40	3,45
		R05	2,23	3,75	3,51	3,72	3,16	2,69	3,61
		R06	2,46	3,46	3,79	3,85	3,24	2,82	3,82
Média		2,53	3,39	3,52	3,62	3,25	2,63	3,57	
Desvio Pad.	0,17	0,24	0,19	0,18	0,12	0,15	0,15		

**Tabela B.3:** Dados do parâmetro D50, em função de frequência, obtidos na Igreja de Sant'Ana

		Igreja de Sant'Ana							
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)						Média 500Hz-1000Hz
			125	250	500	1000	2000	4000	
D50	PA	R01	0,37	0,28	0,19	0,21	0,27	0,34	0,20
		R02	0,36	0,29	0,19	0,2	0,19	0,34	0,20
		R03	0,14	0,18	0,22	0,13	0,21	0,41	0,18
		R04	0,24	0,2	0,23	0,14	0,26	0,4	0,19
		R05	0,05	0,08	0,16	0,14	0,13	0,18	0,15
		R06	0,04	0,09	0,15	0,08	0,12	0,17	0,12
		Média	0,20	0,19	0,19	0,15	0,20	0,31	0,17
	Desvio Pad.	0,15	0,09	0,03	0,05	0,06	0,11	0,03	
	S1	R01	0,36	0,16	0,16	0,22	0,25	0,27	0,19
		R02	0,37	0,13	0,19	0,15	0,24	0,3	0,17
		R03	0,29	0,12	0,19	0,21	0,16	0,22	0,20
		R04	0,26	0,14	0,16	0,17	0,18	0,2	0,17
		R05	0,24	0,22	0,17	0,15	0,18	0,21	0,16
		R06	0,19	0,18	0,17	0,19	0,17	0,21	0,18
Média		0,29	0,16	0,17	0,18	0,20	0,24	0,18	
Desvio Pad.	0,07	0,04	0,01	0,03	0,04	0,04	0,02		

**Tabela B.4:** Dados do parâmetro TR, em função de frequência, obtidos na Basílica do Carmo

Basílica de Nossa Senhora do Carmo									
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)					Média 500Hz-1000Hz	
			125	250	500	1000	2000		4000
TR (s)	PA	R01	5,52	4,97	4,94	4,50	4,10	3,15	4,72
		R02	4,83	5,27	4,99	4,54	4,15	3,21	4,77
		R03	5,14	5,27	4,91	4,44	4,15	3,24	4,67
		R04	5,34	4,88	4,99	4,50	4,07	3,29	4,75
		R05	5,20	4,99	4,92	4,52	4,14	3,22	4,72
		R06	5,08	5,19	4,93	4,47	4,09	3,17	4,70
		R07	4,93	5,08	5,01	4,47	3,85	3,10	4,74
		R08	5,35	4,95	5,03	4,45	4,09	3,10	4,74
		R09	4,95	5,05	4,92	4,45	4,03	3,12	4,69
		R10	5,52	5,16	4,95	4,40	4,02	3,12	4,67
		R11	4,75	5,16	4,79	4,61	4,00	3,27	4,70
		R12	5,07	5,15	4,93	4,44	4,10	3,30	4,69
		R13	4,29	4,63	4,72	4,38	4,02	3,07	4,55
		R14	4,31	4,85	4,52	4,46	3,99	3,06	4,49
	Média	5,02	5,04	4,89	4,47	4,06	3,17	4,68	
	Desvio Pad.	0,39	0,18	0,14	0,06	0,08	0,08	0,08	
	S1	R01	5,17	4,81	4,73	4,17	3,77	2,95	4,45
		R02	5,16	4,97	4,67	4,13	3,81	2,97	4,40
		R03	5,38	5,15	4,98	4,52	4,09	3,22	4,75
		R04	5,27	5,31	5,13	4,45	4,00	3,20	4,79
		R05	5,24	5,34	5,17	4,54	4,03	3,23	4,85
		R06	5,42	5,39	4,91	4,61	4,14	3,26	4,76
		R07	4,91	5,40	5,41	4,66	4,10	3,22	5,03
		R08	5,21	5,28	5,35	4,51	4,10	3,23	4,93
		R09	5,19	5,17	5,06	4,43	4,10	3,31	4,74
		R10	5,47	5,15	5,01	4,53	3,99	3,29	4,77
R11		5,30	5,27	5,17	4,56	4,05	3,25	4,86	
R12		5,41	5,31	5,24	4,54	4,06	3,27	4,89	
R13	5,35	5,25	4,97	4,70	4,19	3,48	4,83		
R14	5,44	5,36	5,16	4,63	4,25	3,46	4,90		
Média	5,28	5,22	5,07	4,50	4,05	3,24	4,78		
Desvio Pad.	0,15	0,17	0,21	0,17	0,13	0,14	0,17		

**Tabela B.5:** Dados do parâmetro EDT, em função de frequência, obtidos na Basílica do Carmo

Basílica de Nossa Senhora do Carmo									
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)						Média 500Hz-1000Hz
			125	250	500	1000	2000	4000	
PA		R01	5,56	5,48	5,26	4,68	4,06	3,11	4,97
		R02	5,33	5,74	5,23	4,58	3,95	2,91	4,91
		R03	5,43	5,69	5,25	4,67	3,68	2,85	4,96
		R04	4,63	5,20	4,67	4,44	3,68	2,84	4,55
		R05	4,51	5,19	5,42	4,15	3,56	2,61	4,78
		R06	4,54	5,01	5,19	4,61	3,47	2,69	4,90
		R07	5,45	5,20	4,79	4,03	3,01	2,29	4,41
		R08	4,43	5,31	4,43	4,13	2,89	2,23	4,28
		R09	4,60	4,94	4,85	3,96	3,25	2,52	4,41
		R10	4,47	5,03	4,98	4,03	3,28	2,50	4,50
		R11	4,44	4,67	4,66	4,03	3,19	2,36	4,34
		R12	4,45	5,16	4,81	4,04	2,86	2,27	4,42
		R13	4,72	4,79	4,41	3,02	2,40	2,50	3,72
		R14	4,69	4,19	4,19	3,21	2,64	2,46	3,70
		Média			4,80	5,11	4,87	4,11	3,28
EDT (s)		Desvio Pad.	0,43	0,40	0,37	0,50	0,49	0,27	0,41
		R01	4,59	4,87	4,32	3,97	3,49	2,50	4,15
		R02	5,12	5,48	4,58	4,00	3,57	2,63	4,29
		R03	4,79	5,18	4,96	4,73	3,95	2,90	4,85
		R04	4,74	4,96	4,74	4,43	4,03	2,97	4,59
		R05	5,38	5,28	4,78	4,42	4,23	3,17	4,60
		R06	5,75	5,29	5,14	4,57	4,13	3,20	4,85
		R07	5,39	5,24	4,84	4,85	4,34	3,42	4,84
		R08	4,98	5,87	5,06	5,06	4,37	3,49	5,06
		R09	5,53	5,13	5,36	5,11	4,42	3,51	5,23
		R10	5,58	5,36	5,23	4,98	4,47	3,52	5,10
		R11	5,37	5,31	5,36	4,84	4,64	3,62	5,10
		R12	5,81	5,82	5,43	4,92	4,65	3,64	5,18
		R13	5,50	5,48	5,11	4,74	4,14	3,31	4,93
		R14	5,75	5,94	4,85	4,66	4,00	3,33	4,76
Média			5,30	5,37	4,98	4,66	4,17	3,23	4,82
Desvio Pad.			0,40	0,32	0,32	0,36	0,35	0,36	0,32

**Tabela B.6:** Dados do parâmetro D50, em função de frequência, obtidos na Basílica do Carmo

Basílica de Nossa Senhora do Carmo									
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)					Média 500Hz-1000Hz	
			125	250	500	1000	2000		4000
D50	PA	R01	0,21	0,18	0,33	0,41	0,39	0,39	0,37
		R02	0,19	0,15	0,36	0,35	0,47	0,36	0,36
		R03	0,28	0,11	0,36	0,47	0,55	0,44	0,42
		R04	0,11	0,06	0,26	0,43	0,49	0,43	0,35
		R05	0,12	0,05	0,23	0,35	0,35	0,32	0,29
		R06	0,13	0,06	0,26	0,31	0,36	0,31	0,29
		R07	0,16	0,16	0,33	0,36	0,41	0,39	0,35
		R08	0,13	0,05	0,35	0,35	0,50	0,37	0,35
		R09	0,19	0,09	0,28	0,32	0,43	0,38	0,30
		R10	0,26	0,08	0,18	0,33	0,37	0,30	0,26
		R11	0,13	0,13	0,26	0,33	0,34	0,30	0,30
		R12	0,16	0,10	0,25	0,26	0,33	0,27	0,26
		R13	0,24	0,41	0,50	0,44	0,50	0,47	0,47
		R14	0,36	0,33	0,29	0,31	0,42	0,39	0,30
	Média	0,19	0,14	0,30	0,36	0,42	0,37	0,33	
	Desvio Pad.	0,07	0,11	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06	
	S1	R01	0,23	0,45	0,25	0,27	0,25	0,29	0,26
		R02	0,23	0,43	0,38	0,31	0,37	0,45	0,35
		R03	0,11	0,07	0,13	0,2	0,2	0,25	0,17
		R04	0,11	0,08	0,16	0,19	0,12	0,16	0,18
		R05	0,11	0,05	0,08	0,11	0,17	0,19	0,10
		R06	0,09	0,05	0,09	0,13	0,17	0,18	0,11
		R07	0,03	0,03	0,05	0,1	0,19	0,18	0,08
		R08	0,03	0,03	0,04	0,08	0,11	0,09	0,06
		R09	0,02	0,05	0,04	0,07	0,07	0,11	0,06
		R10	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,06
		R11	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,06
		R12	0,03	0,04	0,07	0,07	0,05	0,09	0,07
R13		0,02	0,04	0,02	0,06	0,07	0,12	0,04	
R14		0,03	0,06	0,03	0,04	0,05	0,11	0,04	
Média	0,08	0,11	0,10	0,13	0,14	0,17	0,11		
Desvio Pad.	0,07	0,14	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09		

**Tabela B.7:** Dados do parâmetro TR, em função de frequência, obtidos na Igreja de Santa Rita

Igreja de Santa Rita de Cássia									
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)					Média 500Hz-1000Hz	
			125	250	500	1000	2000		4000
TR (s)	PA	R01	3,00	3,62	3,81	4,16	3,83	2,70	3,98
		R02	2,92	3,53	4,00	4,20	3,81	2,71	4,10
		R03	3,09	3,54	3,89	4,18	3,82	2,75	4,04
		R04	3,15	3,64	3,77	4,12	3,85	2,72	3,94
		R05	2,83	3,61	3,94	4,21	3,85	2,69	4,07
		R06	2,97	3,58	3,91	4,16	3,92	2,74	4,04
		R07	3,10	3,47	3,92	4,19	3,90	2,77	4,06
		R08	2,95	3,62	3,96	4,10	3,87	2,79	4,03
		Média	3,00	3,58	3,90	4,17	3,85	2,73	4,03
	Desvio Pad.	0,11	0,06	0,08	0,04	0,04	0,04	0,05	
	S1	R01	3,07	3,59	3,92	3,87	3,76	2,84	3,90
		R02	3,39	3,54	3,68	3,93	3,81	2,86	3,80
		R03	2,99	3,52	3,72	3,91	3,48	2,36	3,81
		R04	3,13	3,42	3,76	3,88	3,46	2,05	3,82
		R05	3,04	3,61	3,92	4,00	3,84	2,96	3,96
		R06	2,97	3,47	3,67	3,96	3,72	2,88	3,81
		R07	2,90	3,53	3,91	4,42	4,09	3,08	4,17
		R08	3,27	3,52	4,08	4,28	4,05	3,12	4,18
Média		3,10	3,52	3,83	4,03	3,78	2,77	3,93	
Desvio Pad.	0,16	0,06	0,14	0,21	0,23	0,37	0,16		

**Tabela B.8:** Dados do parâmetro EDT, em função de frequência, obtidos na Igreja de Santa Rita

Igreja de Santa Rita de Cássia									
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)					Média 500Hz-1000Hz	
			125	250	500	1000	2000		4000
EDT (s)	PA	R01	2,67	3,51	3,91	3,23	2,30	1,81	3,57
		R02	3,25	3,75	3,86	2,57	1,95	1,58	3,21
		R03	2,75	3,89	3,93	3,27	1,96	1,79	3,60
		R04	2,98	3,74	4,14	2,81	1,98	1,69	3,47
		R05	2,25	3,46	3,68	2,35	1,23	0,99	3,01
		R06	2,86	3,75	4,28	3,42	2,25	1,63	3,85
		R07	2,84	3,70	4,22	3,16	2,06	1,58	3,69
		R08	3,10	3,48	4,16	3,50	1,75	1,66	3,83
		Média	2,84	3,66	4,02	3,04	1,93	1,59	3,53
	Desvio Pad.	0,30	0,16	0,21	0,42	0,33	0,26	0,29	
	S1	R01	2,70	3,58	3,97	4,11	3,43	2,51	4,04
		R02	3,12	3,55	3,86	3,97	3,33	2,58	3,91
		R03	3,24	3,45	3,65	3,63	3,22	2,38	3,64
		R04	2,68	3,05	3,51	3,82	3,29	2,25	3,66
		R05	2,93	3,84	3,83	4,14	3,66	2,80	3,98
		R06	2,82	3,69	4,00	3,92	3,42	2,48	3,96
		R07	3,03	3,40	3,60	3,83	3,56	2,49	3,72
R08		2,99	3,12	3,93	3,74	3,30	2,39	3,84	
Média		2,94	3,46	3,79	3,90	3,40	2,49	3,84	
Desvio Pad.	0,20	0,27	0,18	0,17	0,15	0,16	0,15		

**Tabela B.9:** Dados do parâmetro D50, em função de frequência, obtidos na Igreja de Santa Rita

Igreja de Santa Rita de Cássia									
Parâmetro	Fonte	Receptor	Frequência (Hz)					Média 500Hz-1000Hz	
			125	250	500	1000	2000		4000
D50	PA	R01	0,24	0,28	0,53	0,53	0,59	0,64	0,53
		R02	0,31	0,19	0,48	0,55	0,49	0,53	0,52
		R03	0,13	0,17	0,42	0,64	0,6	0,53	0,53
		R04	0,12	0,08	0,41	0,57	0,64	0,52	0,49
		R05	0,15	0,2	0,43	0,41	0,33	0,4	0,42
		R06	0,23	0,28	0,5	0,43	0,47	0,61	0,47
		R07	0,14	0,18	0,46	0,6	0,63	0,58	0,53
		R08	0,18	0,07	0,35	0,56	0,63	0,53	0,46
		Média	0,19	0,18	0,45	0,54	0,55	0,54	0,49
	Desvio Pad.	0,07	0,08	0,06	0,08	0,11	0,07	0,04	
	S1	R01	0,35	0,21	0,33	0,31	0,29	0,37	0,32
		R02	0,34	0,11	0,16	0,23	0,19	0,18	0,20
		R03	0,22	0,06	0,09	0,16	0,13	0,15	0,13
		R04	0,17	0,05	0,06	0,12	0,11	0,1	0,09
		R05	0,43	0,2	0,12	0,22	0,24	0,28	0,17
		R06	0,34	0,19	0,35	0,37	0,26	0,32	0,36
		R07	0,24	0,04	0,08	0,21	0,3	0,23	0,15
		R08	0,24	0,06	0,06	0,11	0,15	0,09	0,09
Média		0,29	0,12	0,16	0,22	0,21	0,22	0,19	
Desvio Pad.	0,09	0,07	0,12	0,09	0,07	0,10	0,10		

## APÊNDICE C

Dados de temperatura e umidade relativa do ar, registrados junto às medições acústicas.

**Tabela C.1:** Valores de temperatura e umidade registrados durante as medições – Igreja de Sant’Ana.

<b>hh:mm</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade Rel. (%)</b>
00:00	22,7	81,1
00:10	22,6	74,5
00:20	22,3	75,5
00:30	22,2	76,2
00:40	22,2	76,6
00:50	22,1	77,4
00:60	22,1	77,0
01:00	22,1	77,4
01:10	22,2	77,5
01:20	22,4	79,5
<b>Média</b>	<b>22,3</b>	<b>77,3</b>

**Tabela C.2:** Valores de temperatura e umidade registrados

durante as medições – Basílica de N. S. do Carmo.

<b>hh:mm</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade Rel. (%)</b>
00:00	22,4	78,1
00:10	22,5	64,7
00:20	22,5	66,1
00:30	23,0	65,8
00:40	22,9	65,7
00:50	22,7	65,9
00:60	22,7	66,1
01:00	22,6	66,0
01:10	22,6	66,4
01:20	22,7	66,1
01:30	22,6	65,9
01:40	22,6	67,3
01:50	22,6	66,1
02:00	22,6	66,0
02:10	22,7	65,9
02:20	22,7	65,7
02:30	22,9	65,5
02:40	23,5	64,6
02:50	23,6	62,7
<b>Média</b>	<b>22,8</b>	<b>66,3</b>

**Tabela C.3:** Valores de temperatura e umidade registrados durante as medições – Igreja de Santa Rita.

<b>hh:mm</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Umidade Rel. (%)</b>
00:00	22,9	52,2
00:10	22,5	52,9
00:20	22,3	53,4
00:30	22,2	53,5
00:40	22,1	53,6
00:50	22,1	53,6
00:60	22,1	53,1
01:00	22,2	53,1
01:10	22,2	53,0
01:20	22,2	53,0
01:30	22,2	52,8
01:40	22,2	52,8
01:50	22,5	52,4
02:00	22,3	52,6
02:10	26,9	42,4
02:20	30,7	38,5
<b>Média</b>	<b>23,1</b>	<b>51,4</b>

## APÊNDICE D

Definição dos parâmetros acústicos citados ao longo do texto de revisão bibliográfica.

- BR Razão de graves (*Bass Ratio*). Definição mostrada em Mehta et. al (1999, p. 275).
- C80 Clareza (*Clarity Index*) ou ainda chamado de *Early-to-late energy ratio*. Definido no Anexo A da norma ISO 3382-1 (2009, p. 15).
- D Diferença de nível (*Level Difference*), definido pela norma ISO 140-4 (1998, p. 1).
- G Força Sonora (*Sound Strenght*). Definido no Anexo A da norma ISO 3382-1 (2009, p. 13).
- IACC Coeficiente de Correlação Cruzada Inter-aural (*Inter-aural Cross Correlation Coefficients*). Definido no Anexo B da norma ISO 3382-1 (2009, p. 21).
- ITDG Tempo de Atraso Inicial (*Initial Time Delay Gap*). Definição mostrada em Barron (2010).
- J<sub>LF</sub> Fração de Energia Lateral (*Early Lateral Energ Fraction*). Definido no Anexo A da norma ISO 3382-1 (2009, p. 16).
- L Sonoridade (*Loudness*). De acordo com Carvalho (1994), mesma definição do parâmetro G.
- LF Fração Lateral (*Lateral Fraction*). Segundo Barron (2010, p. 46 e p. 462), o LF é outro nome dado ao parâmetro J<sub>LF</sub>.
- LG Nível relativo de energia laterai tardia (*relative level of the late lateral energy*). Apresentado por Soeta et. al (2012, p. 1220).
- RASTI Índice de Transmissão da Fala para ambientes (*Room Acoustical Speech Transmission Index*). Definido no Anexo D da norma IEC 60268-16 (2011, p. 49).
- Tr Razão de agudos (Treble Ratio). Definição pode ser encontrada em Cirillo e Martellotta (2006, p. 44).
- Ts Tempo Central (*Center Time*). Definido no Anexo A da norma ISO 3382-1 (2009, p. 16).