

DAVID QUEIROZ DE SANT'ANA

AVALIAÇÃO ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS RELIGIOSOS

CURITIBA

2008

DAVID QUEIROZ DE SANT'ANA

AVALIAÇÃO ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS RELIGIOSOS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração Mecânica dos Sólidos, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Trombetta Zannin

CURITIBA

2008

TERMO DE APROVAÇÃO

DAVID QUEIROZ DE SANT'ANA

AVALIAÇÃO ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS RELIGIOSOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de mestre no curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Paulo Henrique Tombetta Zannin
Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR.

Prof.Dr. Eduardo Márcio de Oliveira Lopes
Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR

Prof. Dr. Eduardo Scremim
Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR

Prof. Dr. Andre Luiz Felix Rodacki
Departamento de Educação Física, UFPR

AGRADECIMENTO

Meus agradecimentos a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a feitura deste trabalho. Meus especiais agradecimentos ao meu orientador, que sempre procurou acompanhar meu trabalho com entusiasmo e fé, estando sempre presente nos primeiros levantamentos.

Aos meus amigos que me apoiaram diretamente em especial à Carolina e Gustavo cujo o apoio logístico permitiu que as medições fossem feitas nos horários menos confortáveis.

À minha família cujos ouvidos amorosos se prestavam a escutar pacientemente minhas dificuldades.

RESUMO

Este trabalho investiga parâmetros acústicos de reverberação e clareza em três edifícios de uso religioso da cidade de Curitiba, através de medições *in situ* e predições auxiliadas por programa de computador. Os resultados calculados foram comparados com os medidos nas salas existentes. As igrejas analisadas variam quanto ao estilo arquitetônico e tamanho. O levantamento utilizou a técnica de integração de resposta impulsiva para a medição de quatro parâmetros: 1) Tempo de Reverberação (T_{30}), 2) Tempo de Decaimento Inicial (EDT), 3) Clareza (C_{80}) e 4) Definição (D_{50}) conforme recomendações da norma internacional ISO/3382-1:2006. As predições foram realizadas com o auxílio do programa Odeon 7.01. Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) e demais tratamentos estatísticos para aferição da precisão dos modelos. O efeito da ocupação total dos assentos foi então predito e os resultados comparados com valores ótimos de referência para caracterização da qualidade acústica destes espaços. Observa-se na amostra analisada a relação entre os valores de tempo de reverberação e dos parâmetros de Clareza C_{80} e Definição D_{50} . A condição de ocupação implicou em uma redução da reverberação (T_{30}) de 1 a 2 segundos em comparação com os tempos medidos para a sala vazia. A Clareza e a Definição apresentaram aumentos significativos de 3 JND (3 dB para o C_{80} e 15% para o D_{50}) com as salas totalmente ocupadas. Dentre os dois descritores de clareza, os valores calculados favoreceram a utilização destas salas para as execuções musicais, mas caracterizaram condições insatisfatórias para a palavra falada, resultados compatíveis com os usos para os quais esses edifícios foram construídos no passado.

Palavras-chave: Acústica. Acústica de salas. Acústica arquitetônica. Acústica em Igrejas.

ABSTRACT

This acoustic survey was carried out of three churches in Curitiba, southern Brazil. The investigation use measured and calculated methods to assess the acoustic quality of the naves. The calculated and measured results were compared for the three halls. The churches show differences in architectural style and size. The measures of the integrated impulse responses were carried out for four acoustic objective parameters: 1) Reverberation Time (T_{30}), 2) Early decay Time (EDT), 3) Clarity (C_{80}), and 4) Definition (D_{50}) according to ISO/3382-1:2006 International Standard. The computer model calculations were made with the Odeon 7.01 room acoustic software. The accuracy of the models were checked by statistics tests (ANOVA). The effect of total occupancy were calculated and compared with the reference values to characterize the acoustic quality of these worship places. In the studied sample the interaction between T_{30} and the clarity descriptors (C_{80} e D_{50}) were analysed for the empty room and the totally occupied situations. In this last case, reverberation times were reduced about 2 seconds, Clarity and Definition show an increment of 3 Just Noticeable Difference on average values for the occupied state. The values obtained in the calculations agreed with those proposed for the music halls but for the speech auditorium use they were not satisfactory.

Keywords: Acoustics. Room acoustics. Architectural acoustics. Acoustics in churches.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1.2.A – CURVA DE DECAIMENTO.	24
FIGURA 2.1.2.B – GRÁFICO DA RESPOSTA IMPULSIVA DE UMA SALA.....	25
FIGURA 2.4.1.A: MÉTODO DOS TRONCOS DE CONE E TRAÇADO DE RAIOS NO MODELO PIRAMIDAL.....	41
FIGURA 2.4.2.A: CONSTRUÇÃO GEOMÉTRICA DA FONTE IMAGEM.....	41
FIGURA 2.4.3.A CONSTRUÇÃO DA FONTE SECUNDÁRIA.....	43
FIGURA 2.4.4.A: ILUSTRAÇÃO DA REFLEXÃO SONORA COM DIFUSÃO ALEATÓRIA DE PARTE DA ENERGIA.	45
FIGURA 3.4.1.A: IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS – EXTERIOR DO EDIFÍCIO.	56
FIGURA 3.4.1.B: IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS – DETALHES DA NAVE PAREDES SIMPLES E FORRO DECORADO.	56
FIGURA 3.4.1.C: IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS – CROQUI: PLANTA DA NAVE E PRESBITÉRIO.	57
FIGURA 3.4.1.D: IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS – CROQUI: CORTE TRANSVERSAL DA NAVE EM DIREÇÃO AO CORO.	58
FIGURA 3.4.1.E: IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS – CROQUI: CORTE LONGITUDINAL NAVE E PRESBITÉRIO.	58
FIGURA 3.4.1.F: IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS – DETALHES DA NAVE – CORO.....	59
FIGURA 3.4.2.A: IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO – EXTERIOR DO EDIFÍCIO.	60
FIGURA 3.4.2.B: IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO – EXTERIOR DO EDIFÍCIO.	61
FIGURA 3.4.2.C: IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO – DETALHES DA NAVE – PISO, FORRO, BANCOS E ALTAR.	61
FIGURA 3.4.2.D: IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO – DETALHES DA NAVE – ÓRGÃO DE TUBOS.	62
FIGURA 3.4.2.E: IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO – CROQUI: PLANTA DA NAVE E PRESBITÉRIO.	63
FIGURA 3.4.2.F: IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO – CROQUI: CORTE TRANSVERSAL DA NAVE EM DIREÇÃO AO ALTAR.	63
FIGURA 3.4.2.G: IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO – CROQUI: CORTE LONGITUDINAL DA NAVE E CAMPANÁRIO.	64
FIGURA 3.4.3.A: IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES – EXTERIOR DO EDIFÍCIO.	65

FIGURA 3.4.3.B: IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES – DETALHE DA ABÓBADA DE ARESTA.....	66
FIGURA 3.4.3.C: IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES – DETALHE DO CORO DE MADEIRA COM ÓRGÃO DE TUBOS.	66
FIGURA 3.4.3.D: IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES – INTERIOR DE COMPOSIÇÃO NEOGÓTICA.	67
FIGURA 3.4.3.E: IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES – CROQUI: PLANTA DA NAVE E PRESBITÉRIO.	68
FIGURA 3.4.3.F: IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES – CROQUI: CORTE TRANSVERSAL DA NAVE EM DIREÇÃO AO ALTAR.....	68
FIGURA 3.4.3.G: IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES – CROQUI: CORTE LONGITUDINAL DO EDIFÍCIO.....	69
FIGURA 4.1.1.A: POSIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	70
FIGURA 4.1.1.B: VARIAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (TR) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	72
FIGURA 4.1.1.C: VARIAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) E DO TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	74
FIGURA 4.1.1.D – VARIAÇÃO DA CLAREZA (C_{80}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	76
FIGURA 4.1.1.E – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	77
FIGURA 4.1.2.A: POSIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	78
FIGURA 4.1.2.B: VARIAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	81
FIGURA 4.1.2.C: VARIAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) E TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	82
FIGURA 4.1.2.D – VARIAÇÃO DA CLAREZA (C_{80}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	84
FIGURA 4.1.1.E – VARIAÇÃO DA DEFINIÇÃO (D_{50}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	85

FIGURA 4.1.3.A: POSIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	86
FIGURA 4.1.3.B: VARIAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	88
FIGURA 4.1.3.C: VARIAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) E DO TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	90
FIGURA 4.1.3.D – VARIAÇÃO DA CLAREZA (C_{80}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	92
FIGURA 4.1.3.E – VARIAÇÃO DA DEFINIÇÃO (D_{50}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	94
FIGURA 4.2.1.1.A: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	98
FIGURA 4.2.1.2.A: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	101
FIGURA 4.2.1.2.B: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	101
FIGURA 4.2.2.1.A: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	106
FIGURA 4.2.2.1.B: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	107
FIGURA 4.2.2.1.C: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA CLAREZA (C_{80}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	108
FIGURA 4.2.2.1.D: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA CLAREZA (C_{80}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	109

FIGURA 4.2.2.1.E: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA DEFINIÇÃO (D_{50}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	110
FIGURA 4.2.2.1.F: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA DEFINIÇÃO (D_{50}) EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	111
FIGURA 4.2.2.2.A: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	114
FIGURA 4.2.2.2.B: COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	114
FIGURA 4.2.2.2.C: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA CLAREZA (C_{80}), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	116
FIGURA 4.2.2.2.D: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA CLAREZA (C_{80}), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	117
FIGURA 4.2.2.2.E: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA DEFINIÇÃO (D_{50}), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	118
FIGURA 4.2.2.2.F: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA DEFINIÇÃO (D_{50}), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	119
FIGURA 4.2.2.3.A: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES. ...	121
FIGURA 4.2.2.3.B: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DO TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES. ...	122
FIGURA 4.2.2.3.C: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA CLAREZA (C_{80}), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.	123
FIGURA 4.2.2.3.D: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA CLAREZA (C_{80}), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.	124

FIGURA 4.2.2.3.E: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA DEFINIÇÃO (D_{50}), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	125
FIGURA 4.2.2.3.F: VALORES MEDIDOS E PREDITOS DA DEFINIÇÃO (D_{50}), EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE A FONTE E O RECEPTOR PARA A FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	126
FIGURA 4.3.1.A – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDOS COM A SALA VAZIA E PREDITOS PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	129
FIGURA 4.3.1.B – TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	130
FIGURA 4.3.1.C – CLAREZA (C_{80}), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS, FONTE F1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	131
FIGURA 4.3.1.D – DEFINIÇÃO (D_{50}), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS, FONTE F1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	132
FIGURA 4.3.2.A – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDOS COM A SALA VAZIA E PREDITOS PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	134
FIGURA 4.3.2.B – TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	135
FIGURA 4.3.2.C – CLAREZA (C_{80}), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS, FONTE F1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	136
FIGURA 4.3.2.D – DEFINIÇÃO (D_{50}), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS, FONTE F1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	137
FIGURA 4.3.3.A – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDOS COM A SALA VAZIA E PREDITOS PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	138
FIGURA 4.3.3.B – TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	139
FIGURA 4.3.3.C – CLAREZA (C_{80}), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS, FONTE F1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	140

FIGURA 4.3.3.D – DEFINIÇÃO (D_{50}), MEDIDO COM A SALA VAZIA E PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS, FONTE F1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.142

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.3.A – VALORES ÓTIMOS PROPOSTOS CONFORME IMPRESSÃO SUBJETIVA DO ESPECTADOR.....	38
TABELA 3.2.A – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DOS MATERIAIS DE ACABAMENTO EMPREGADOS NAS IGREJAS.	51
TABELA 3.2.B – CRITÉRIOS PRÁTICOS PARA A APLICAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO SONORA - CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES.....	52
TABELA 3.4.1.A – DIMENSÕES DA IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	59
TABELA 3.4.2.A – DIMENSÕES IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	64
TABELA 3.4.3.A – DIMENSÕES IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES.	67
TABELA 4.1.1.A – VALORES PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	71
TABELA 4.1.1.B – VALORES PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	71
TABELA 4.1.1.C – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	73
TABELA 4.1.1.D – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	73
TABELA 4.1.1.E – VALORES PARA CLAREZA (C_{80}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	75
TABELA 4.1.1.F – VALORES PARA CLAREZA (C_{80}), MEDIDOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	75
TABELA 4.1.1.G – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}), MEDIDOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	76
TABELA 4.1.1.H – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	77
TABELA 4.1.2.A – VALORES PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	79

TABELA 4.1.2.B – VALORES PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	79
TABELA 4.1.2.C – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	81
TABELA 4.1.2.D – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	81
TABELA 4.1.2.E – VALORES PARA CLAREZA (C_{80}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	83
TABELA 4.1.2.F – VALORES PARA CLAREZA (C_{80}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	83
TABELA 4.1.2.G – VALORES PARA DEFINIÇÃO (D_{50}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	84
TABELA 4.1.2.H – VALORES PARA DEFINIÇÃO (D_{50}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	85
TABELA 4.1.3.A – VALORES PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	87
TABELA 4.1.3.B – VALORES PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	87
TABELA 4.1.3.C – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	89
TABELA 4.1.3.D – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	89
TABELA 4.1.3.E – VALORES PARA CLAREZA (C_{80}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	91
TABELA 4.1.3.F – VALORES PARA CLAREZA (C_{80}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	91
TABELA 4.1.3.G – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}), MEDIDOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	93

TABELA 4.1.3.H – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}) MEDIDO EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	93
TABELA 4.2.1.A – GRUPOS DE PREDIÇÃO ACÚSTICA ESTATISTICAMENTE TESTADOS.....	95
TABELA 4.2.1.1.A – TESTE DE HOMOGENEIDADE DA VARIÂNCIA – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	96
TABELA 4.2.1.1.B – TESTE ANOVA – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	96
TABELA 4.2.1.1.C – TESTE DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA ENTRE OS GRUPOS – PREDIÇÃO X MEDIÇÃO – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	97
TABELA 4.2.1.2.A – TESTE DE HOMOGENEIDADE DA VARIÂNCIA – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO.....	99
TABELA 4.2.1.2.B – TESTE ANOVA – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO.....	99
TABELA 4.2.1.2.C – TESTE DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	100
TABELA 4.2.1.3.A – TESTE DE HOMOGENEIDADE DA VARIÂNCIA – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	102
TABELA 4.2.1.3.B – TESTE ANOVA – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	102
TABELA 4.2.1.3.C – TESTE DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	103
TABELA 4.2.2.1.A – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	105
QUADRO 4.2.2.1.B – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	106
TABELA 4.2.2.1.C – VALORES PARA A CLAREZA (C_{80}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	108
TABELA 4.2.2.1.D – VALORES PARA A CLAREZA (C_{80}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	109
TABELA 4.2.2.1.E – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	110
TABELA 4.2.2.1.F – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.....	111

TABELA 4.2.2.2.A – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	112
TABELA 4.2.2.2.B – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	113
TABELA 4.2.2.2.C – VALORES PARA A CLAREZA (C_{80}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	115
TABELA 4.2.2.2.D – VALORES PARA A CLAREZA (C_{80}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	116
TABELA 4.2.2.2.E – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	117
TABELA 4.2.2.2.F – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.....	118
TABELA 4.2.2.3.A – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.	120
TABELA 4.2.2.3.B – VALORES PARA O TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.	120
TABELA 4.2.2.3.C – VALORES PARA A CLAREZA (C_{80}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	123
TABELA 4.2.2.3.D – VALORES PARA A CLAREZA (C_{80}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	124
TABELA 4.2.2.3.E – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	125
TABELA 4.2.2.3.F – VALORES PARA A DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA A POSIÇÃO DA FONTE 2 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.....	126
TABELA 4.3.1.A – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO (T_{30}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	128
TABELA 4.3.1.B – TEMPOS DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	129

TABELA 4.3.1.C – CLAREZA (C_{80}), PREDITO EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	131
TABELA 4.3.1.D – DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITO PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS, FONTE F1 – IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS.	132
TABELA 4.3.2.A – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO (T_{30}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	133
TABELA 4.3.2.B – TEMPOS DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	134
TABELA 4.3.2.C – CLAREZA (C_{80}), PREDITO EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	135
TABELA 4.3.2.D – DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITO EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO.	136
TABELA 4.3.3.A – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO (T_{30}), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.	138
TABELA 4.3.3.B – TEMPOS DE DECAIMENTO INICIAL (EDT), PREDITOS EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.	139
TABELA 4.3.3.C – CLAREZA (C_{80}), PREDITO EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.	140
TABELA 4.3.3.D – DEFINIÇÃO (D_{50}), PREDITO EM BANDAS DE OITAVA, PARA CONDIÇÃO DE OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS FONTE F1 – IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES.	141

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 CONCEITOS SOBRE ACÚSTICA DE SALAS	21
2.1.1 ATRIBUTOS SUBJETIVOS DO CAMPO SONORO DE RECINTOS FECHADOS	22
2.1.2 PARÂMETROS OBJETIVOS – MÉTRICAS PARA ACÚSTICA DE SALAS.....	23
2.1.2.1 PARÂMETROS OBJETIVOS – REVERBERAÇÃO.....	26
2.1.2.2 PARÂMETROS OBJETIVOS – VOLUME	27
2.1.2.3 PARÂMETROS OBJETIVOS – BALANÇO TONAL.....	28
2.1.2.4 PARÂMETROS OBJETIVOS – CLAREZA E DEFINIÇÃO	28
2.1.2.5 PARÂMETROS OBJETIVOS – IMPRESSÃO ESPACIAL.....	30
2.2 ACÚSTICA DE IGREJAS	31
2.3 DAS NORMAS E VALORES ÓTIMOS RECOMENDADOS	36
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	39
2.4.1 O MÉTODO TRAÇADO DE RAIOS (RAY-TRACING).....	39
2.4.2 O MÉTODO FONTE IMAGEM	41
2.4.3 OS MÉTODOS HÍBRIDOS	43
2.4.4 DIFUSÃO SONORA EM MODELOS DE COMPUTADOR	44
2.4.5 PRECISÃO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO ACÚSTICA DE SALAS	46
3. MATERIAIS E MÉTODO	47

3.1 AS MEDIÇÕES.....	47
3.2 SIMULAÇÃO EM MODELO DE COMPUTADOR.....	49
3.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO	53
3.4 IGREJAS AVALIADAS	54
3.4.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS	55
3.4.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO	60
3.4.3 IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
4.1 MEDIÇÕES	69
4.1.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS	70
4.1.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO	78
4.1.3 IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES	86
4.2 PREDIÇÕES	94
4.2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO	95
4.2.1.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS	96
4.2.1.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO	98
4.2.1.3 IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES	102
4.2.2 PREDIÇÕES PARA O EDT E MÉTRICAS DE CLAREZA C_{80} E D_{50}	104
4.2.2.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS	105
4.2.2.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO	112
4.2.2.3 IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES	119
4.3 PROJEÇÕES ACÚSTICAS PARA A OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS.....	127

4.3.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS	128
4.3.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO	133
4.3.3 IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES	137
5. CONCLUSÃO.....	143
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

1. INTRODUÇÃO

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

Além das variações construtivas e artísticas, esses edifícios sofrem adaptações de seus usos, conforme as necessidades impostas por modificações tecnológicas ou dos costumes. O Concílio Vaticano II (1965), no que se refere as reformas litúrgicas, introduziu o uso das línguas vernáculas em substituição do Latim e passou a incentivar a participação da congregação. Em virtude do uso dos idiomas nacionais, o novo serviço significou do ponto de vista da acústica das salas, uma maior demanda por boa inteligibilidade da palavra falada.

A acústica em edifícios religiosos tem tomado a atenção de grupos de pesquisa em Portugal (CARVALHO, 1995; 1999), Espanha (GALINDO; ZAMARREÑO; GIRON, 1999; 2000), Suíça (DESARNAULDS, 2002) e Itália (CIRILLO; MARTELLOTTA, 2002; 2003; 2005; 2006). Mas a quantidade de informação sobre este tipo de sala ainda é pequena quando comparada às salas de concerto e auditórios.

A manifestação arquitetônica nacional também tem sido investigada (SANTOS; OLIVICICA, 2005; SIMÕES et al. 2005; BOTTAZZINI, 2007). Num país continental como o Brasil, a arquitetura possui características regionais que estimulam ainda mais o interesse na pesquisa do ambiente acústico das igrejas brasileiras.

Neste trabalho, as edificações estudadas são bens tombados do patrimônio cultural da cidade de Curitiba e suas construções antecedem quaisquer regulamentações sobre a qualidade acústica de recintos fechados ou de técnicas de predição acústica para salas. Os edifícios também antecedem as modificações litúrgicas da década de 1960.

A investigação concentrou-se nas características inerentes às salas e todos os sistemas de sonorização ambiente das naves foram desligados. O diagnóstico acústico

das igrejas, procurou identificar se as salas atendem satisfatoriamente às atividades da fala, música e os cantos corais da congregação.

De acordo com estas premissas, este trabalho se propôs a identificar as características acústicas, quanto aos parâmetros de reverberação (T_{30} e EDT) e clareza (C_{80} e D_{50}), para três igrejas da Cidade de Curitiba, a saber, a Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas, Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito e Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica se dividiu em quatro seções. A primeira trata dos conceitos fundamentais da acústica de salas e apresenta os parâmetros objetivamente medidos nos levantamentos. A segunda seção explora os trabalhos em acústica de igrejas realizados por pesquisadores em diversos países. A terceira seção aborda as normas sobre o assunto e as recomendações sobre os valores ótimos. A quarta seção expõe alguns tópicos sobre os métodos computacionais e sobre os recursos dos programas de computador aplicadas à acústica.

2.1 CONCEITOS SOBRE ACÚSTICA DE SALAS

Quando um som é emitido em campo aberto, parte da sua energia percorre um caminho sem obstáculos até atingir um receptor. Esta parte é chamada som direto. Sem reflexões, cessada a emissão, o decaimento da energia sonora é imediato. Por sua vez, quando um som é emitido em um recinto fechado, a energia que atinge um receptor se divide em duas partes, a primeira correspondente ao som direto e a segunda, a energia refletida por suas superfícies. As reflexões produzem um prolongamento do tempo de decaimento energético, o qual depende das propriedades acústicas dos materiais que compõem as superfícies da sala, especialmente, de suas propriedades de absorção e difusão.

A percepção dos sons em salas é fortemente influenciada pelo comportamento das reflexões e da distribuição energética do som pelo ambiente. A avaliação acústica de uma sala busca a correta descrição dessas percepções. Pesquisas com diferentes abordagens sobre as impressões subjetivas têm sido utilizadas para a caracterização acústica de salas (SCHROEDER; GOTTLOB; SIEBRASSE, 1974; HOJAN;

PÖSSELT, 1990; SOULODRE; BRADLEY, 1995; 1995), contudo exigem grande esforço logístico.

Por outro lado, para cada sensação subjetiva um grupo de parâmetros objetivamente mensuráveis pode ser correlacionado e aplicado segundo um método científico padronizado (ISO 3382-1, 2006).

2.1.1 ATRIBUTOS SUBJETIVOS DO CAMPO SONORO DE RECINTOS FECHADOS

Um espectador, mesmo que não treinado, pode reconhecer e quantificar muitos atributos do campo sonoro de uma sala fornecendo dados importantes para sua avaliação (YAMAGUCHI, 1972; JEONG; FRICKE, 2000; SATO; SAKAI, 2002).

Dentre os atributos subjetivos, o mais facilmente percebido é a reverberação. A reverberação pode ser entendida como a sensação de persistência do som após uma interrupção repentina da fonte sonora, seguida de uma pausa suficientemente longa. A reverberação é inversamente proporcional à absorção da energia sonora pelas superfícies. Uma sala reverberante é comumente qualificada como uma sala viva. Por outro lado, uma alta absorção da energia sonora pelas superfícies, corresponde subjetivamente, a uma sala dita morta (EYRING, 1930). Nestas salas, o campo sonoro tem predominância do som direto, pouco reforçado por reflexões.

O ouvido humano é sensível a uma faixa de frequência que varia de, aproximadamente, 20 Hz a 20.000 Hz. Esta sensibilidade não é homogênea para todas as faixas de frequência. Da mesma forma se comportam as propriedades de absorção e difusão sonora dos materiais que constituem as superfícies das salas. A predominância de determinadas frequências sobre as demais é responsável pela sensação subjetiva de balanço tonal e o som é dito brilhante quando da predominância das altas frequências (BOSTWICK, 1930) e quente quando das baixas. Neste último caso, a inteligibilidade pode ser comprometida devido a menor sensibilidade do ouvido aos sons graves (EVEREST, F. A., 2001).

Um outro atributo facilmente identificável é o volume, comumente referido por sua denominação em inglês *loudness*. Conforme Fletcher e Munson (1933 p. 82, tradução nossa), “volume é um termo associado a sensação psicológica da magnitude com que um som é percebido.” O volume ou nível sonoro é um atributo dependente das características da fonte sonora, do volume da sala e de sua absorção sonora.

Uma orquestra, quando comparada a um solista tem nível sonoro maior. Em salas vivas, isto é, bastante reverberantes, o nível sonoro parece mais intenso do que em salas mortas ou em campo livre. Da mesma forma, em salas menores o volume sonoro parece maior quando comparadas a salas maiores.

Também importante é o atributo subjetivo que é denominado clareza. A clareza pode ser compreendida como o grau em que distintos sons (notas musicais ou fonemas da fala) são percebidos separadamente. Este atributo depende fortemente das características da música e da habilidade do orador, mas também, está intrinsecamente atrelada às características acústicas das salas (BERANEK, 1996; BRADLEY; REICH; NORCROSS, 1999; GALINDO; ZAMARREÑO; GIRÓN, 1999), especialmente, ao tempo de reverberação e ao balanço entre a energia inicial – som direto e primeiras reflexões – e a energia contida no campo reverberante.

As interações entre as primeiras reflexões e a cauda reverberante podem provocar no espectador duas sensações relacionadas à percepção espacial do som. Estes dois atributos subjetivos, recentemente incorporados à avaliação acústica de salas, denominam-se Largura Aparente da Fonte (ASW – Apparent Source Width) e Envolvimento do Ouvinte (LEV – Listener Envelopment).

A Largura Aparente da Fonte (ASW – Apparent Source Width) é fortemente influenciada pelas primeiras reflexões e correlaciona as impressões visual e auditiva do tamanho da fonte (CIRILLO; MARTELOTTA, 2006). O Envolvimento do Ouvinte (LEV – Listener Envelopment) é descrito como a sensação de envolvimento ou imersão no ambiente sonoro. O LEV é produzido pela parte reverberante do som, quando o ouvinte recebe reflexões de todas as direções (BERANEK, 1996).

2.1.2 PARÂMETROS OBJETIVOS – MÉTRICAS PARA ACÚSTICA DE SALAS

As abordagens subjetivas são ferramentas importantes para a descrição dos campos sonoros de salas. Mencione-se novamente que às sensações subjetivas são correlacionáveis alguns parâmetros objetivamente mensuráveis.

As medições dos parâmetros objetivos são efetuadas a partir do registro do decaimento de energia sonora da sala. Após um sinal sonoro de excitação do volume de ar do recinto, as reflexões aumentam em número e diminuem em intensidade. Quando registradas em um gráfico da energia em função do tempo, o som apresen-

ta na primeira porção, um decaimento, com comportamento semelhante ao de uma função linear (ver figura 2.1.2.a).

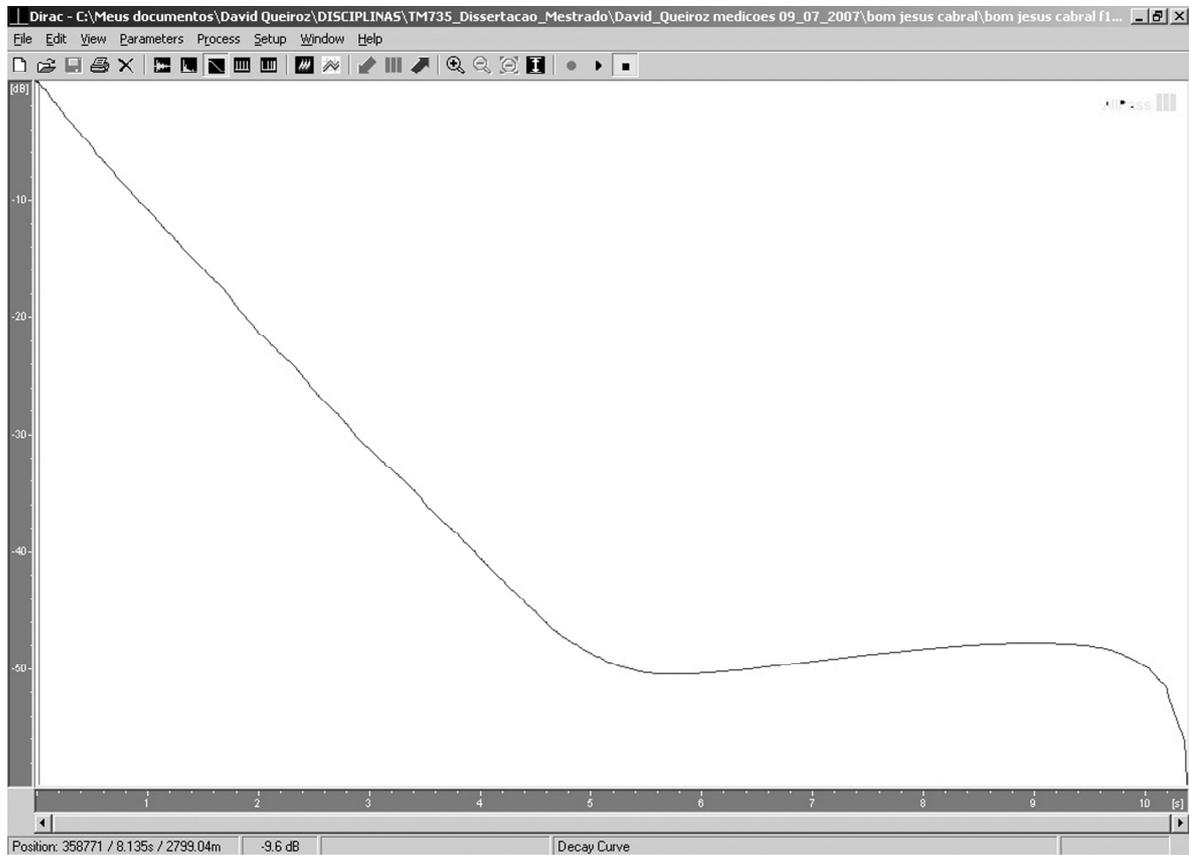


Figura 2.1.2.a – Curva de decaimento.

A curva de decaimento pode ser analisada como se fosse dividida em três partes, som direto, som inicial e som reverberante. O som direto é o primeiro som, a parte da energia que atinge o ouvinte diretamente e que aparece como uma linha vertical na porção esquerda da figura.

O **som inicial** se refere a energia do som direto em conjunto com a energia contida nas reflexões que atingem os ouvidos de um espectador nos primeiros 80 mili-segundos (ms) após a incidência do som direto. O som reverberante inclui a energia sonora de todas as reflexões que atingem o receptor após os 80 mili-segundos do som direto (BERANEK, 2004, p. 23, tradução nossa, grifo nosso).

As curvas de decaimento são obtidas segundo dois métodos: 1) registro direto dos níveis de pressão imediatamente subsequentes à interrupção de uma excitação contínua do volume de ar da sala por um sinal sonoro de banda larga de frequência, conhecido como Método do Ruído Interrompido (*Interrupted Noise Method*), ou, 2) através da integração quadrática reversa de um sinal impulsivo (estouro de balão,

tiro de pistola), conhecido como Método de Integração da Resposta Impulsiva (*Integrated Impulse Response Method*).

Uma resposta impulsiva é registrada como um gráfico do nível de pressão sonora – em um determinado ponto de medição – em função do tempo, resultante da excitação de uma sala por uma função delta de Dirac (ver figura 2.1.2.b).

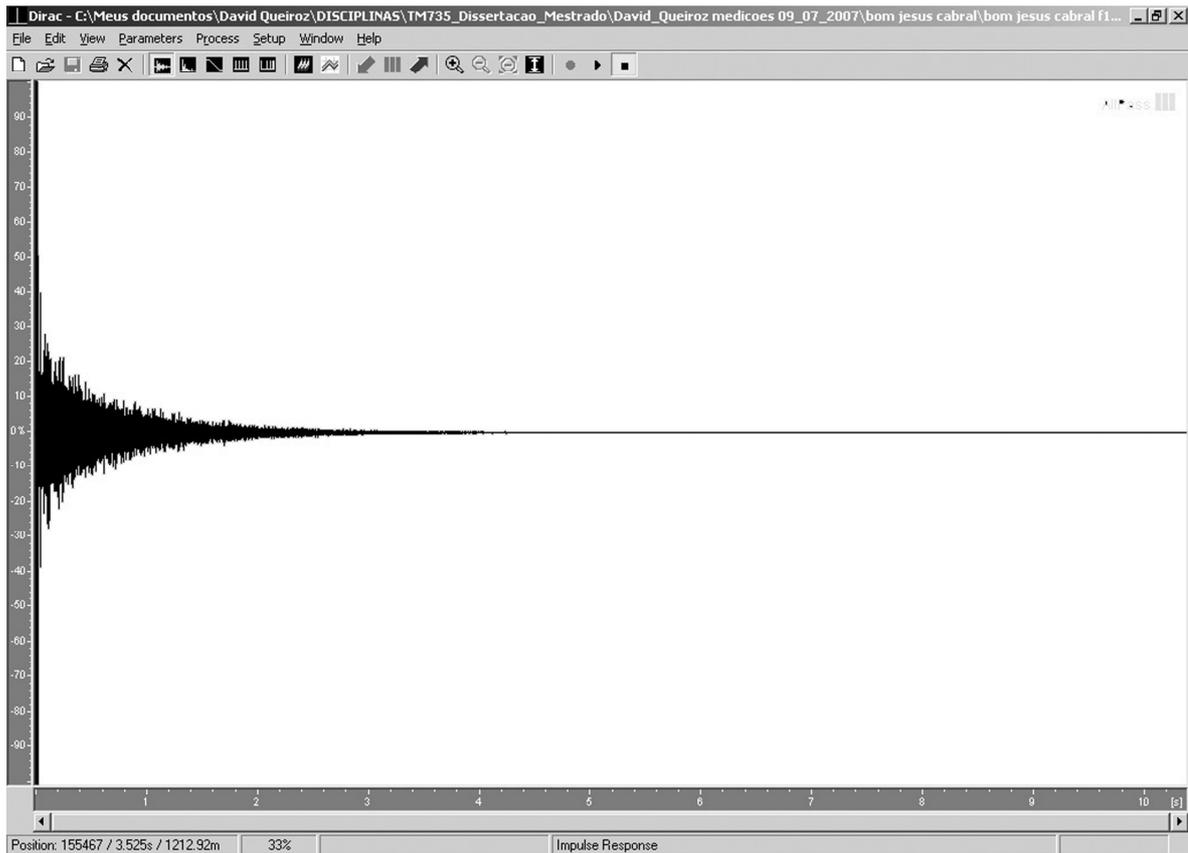


Figura 2.1.2.b – Gráfico da resposta impulsiva de uma sala.

Embora não se consiga na prática criar e irradiar uma função delta de Dirac verdadeira, aproximações suficientemente eficientes podem ser utilizadas, como sinais de varredura de frequência (*sweep-signals*), seqüências de máximo comprimento (*MLS*) ou sinais sonoros que permitam posterior processamento matemático (ISO 3382-1, 2006).

A representação da seqüência – som direto, primeiras reflexões e reflexões tardias – cada qual com sua intensidade, após um estímulo impulsivo (como um bater de palmas, um tiro de pistola ou algo similar), é conhecido como ecograma ou resposta impulsiva e é o ponto de partida para qualquer avaliação objetiva das propriedades acústicas de uma sala. (CIRILLO; MARTELLOTTA, 2006, p. 42, tradução nossa).

2.1.2.1 PARÂMETROS OBJETIVOS – REVERBERAÇÃO

Como dito anteriormente, a sensação subjetiva de reverberação está relacionada à quantidade de reflexões do som em uma sala. O parâmetro objetivo para a descrição da reverberação é denominado Tempo de Reverberação (TR). Este conceito foi introduzido pelo pioneiro em acústica de salas, Wallace Clement Sabine, da universidade de Harvard e é definido como o tempo em segundos necessário para que o nível sonoro em uma sala decaia 60 dB a partir da interrupção de um som contínuo. Visto que o registro de um decaimento de 60 dB é muitas vezes de difícil execução, em função da influência do ruído ambiente sobre a cauda reverberante, utiliza-se como extrapolação para o cálculo do Tempo de Reverberação, os primeiros 20 dB de decaimento medidos a partir da redução de 5 dB abaixo do nível de pressão sonora inicial até 25 dB abaixo do nível de pressão sonora inicial. Representa-se esta métrica pela letra T seguida do índice referente ao intervalo tomado T_{20} . Da mesma forma, é calculado o T_{30} com o registro de um intervalo maior (-5 dB até -35 dB), sendo este, mais comumente utilizado nas avaliações (ISO 3382-1, 2006).

O Tempo de Reverberação é determinado para as faixas de frequência usualmente utilizadas em acústica de salas, em bandas de oitava, de 125 Hz até 4000 Hz. Pode-se, entretanto, expressar o TR de uma sala através de um único valor, tomando-se a média aritmética das bandas de 500 Hz e 1000 Hz.

Em salas vivas, em que prevalecem condições de difusão sonora, o tempo de reverberação pode ser estimado pela teoria de Sabine na qual observa-se a relação inversa entre o tempo de reverberação e a absorção sonora das superfícies, conforme a equação:

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{A}$$

Onde:

V é o volume da sala em metros cúbicos;

A é a absorção sonora total da sala em Sabines;

$A = (A_1 \cdot \alpha_1 + A_2 \cdot \alpha_2 + A_3 \cdot \alpha_3 + \dots + A_n \cdot \alpha_n)$;

A_n é a área de uma superfície da sala

α_n é o coeficiente de absorção sonora dos materiais que compõem a sala.

Outro parâmetro adotado para avaliação objetiva de reverberação é o EDT (Early Decay Time) ou Tempo de Decaimento Inicial. O EDT designa o tempo necessário para que o nível sonoro decaia 10 dB após a interrupção do sinal de excitação da sala. Este tempo é então multiplicado por um fator de correção igual a 6. O tempo estimado para a queda de 10 dB é de aproximadamente um sexto do Tempo de Reverberação (60 dB), “a adoção desse fator de correção permite a comparação direta entre esses dois descritores de reverberação” (BERANEK, 2004, p. 23, tradução nossa).

Os valores do Tempo de Decaimento Inicial são particularmente afetados por mudanças na geometria das salas. O intervalo de 10 dB é extremamente influenciado pelas primeiras reflexões, o que torna o EDT muito mais sensível às posições relativas entre a fonte e o receptor, quando comparado ao Tempo de Reverberação (CIRILLO; MARTELOTTA, 2006).

O EDT indica a influência do som direto na percepção da reverberação e por essa razão, parece ser um descritor de reverberação mais eficiente que o Tempo de Reverberação para diagnósticos mais detalhados (BERANEK, 2004). Além disso, sua medição é simples e não requer equipamentos adicionais.

É desejável que os valores medidos (EDT) em cada posição individual de uma sala estejam próximos da média espacial do Tempo de Reverberação (T_{30}). Valores de EDT maiores que os medidos para o TR são bons indicadores de suas condições acústicas (JORDAN, 1970).

2.1.2.2 PARÂMETROS OBJETIVOS – VOLUME

O nível sonoro total corresponde à soma das contribuições energéticas do som direto e das reflexões em um determinado ponto da sala. Ao nível sonoro total correlaciona-se a sensação subjetiva de volume ou audibilidade (BERANEK, 2004). Este parâmetro é intrinsecamente dependente de uma característica inerente às fontes sonoras – a potência.

O parâmetro objetivo relacionado ao nível sonoro é a Força Sonora (G). Força Sonora é um nível relativo, independente da potência da fonte. É definida como a razão expressa em decibels, do nível sonoro medido em uma determinada posição de uma

sala, em relação ao nível medido em campo livre, a uma distância de 10 metros para uma mesma fonte não direcional (CIRILLO; MARTELOTTA, 2006).

A Força Sonora (G) é medida nas bandas de oitava de 125 até 4000 Hz e a média das faixas de 500 Hz e 1000 Hz é considerada a mais bem relacionada à sensação subjetiva de volume (ISO 3382-1, 2006).

2.1.2.3 PARÂMETROS OBJETIVOS – BALANÇO TONAL

O Tempo de Reverberação deve ser aproximadamente constante em todo o espectro de frequência. Nas salas de música, as reflexões nas baixas frequências – nas quais a resposta do aparelho auditivo é menos sensível – são bastante desejáveis. Isto confere “calor” à sala. “Nas salas para fala, um aumento de 30% no Tempo de Reverberação na banda de 125 Hz e de 15% em 250 Hz é recomendado” (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999, p. 219, tradução nossa).

O parâmetro utilizado para avaliação do Balanço Tonal denomina-se Razão de Baixos (BR – *Bass Ratio*). Razão de Baixos é a razão entre a média dos Tempos de Reverberação nas frequências de 125 e 250 Hz e os Tempos de Reverberação nas frequências de 500 e 1000 Hz.

Atenção especial deve ser dada ao cálculo deste parâmetro, pois, ao contrário do Tempo de Reverberação, comumente medido com a sala vazia, a razão de baixos deve considerar o estado de total ocupação da sala, devido a forte influência da audiência na absorção das altas frequências.

2.1.2.4 PARÂMETROS OBJETIVOS – CLAREZA E DEFINIÇÃO

Subjetivamente, “a clareza pode ser entendida como a intensidade com a qual sons distintos são separadamente percebidos” (BERANEK, 1996, p. 2647, tradução nossa). A clareza é tanto maior, quanto maior for a influência do som direto sobre o receptor. Em campo aberto atinge seu máximo valor e em recintos fechados, diminui à medida que a cauda reverberante aumenta.

Combinadas ao som direto, as primeiras reflexões impressionam o aparelho auditivo de maneira desejável, produzem um efeito de reforço natural do som. “O intervalo de tempo, no qual as primeiras reflexões são reflexões úteis, varia de acordo com a natureza do som. Assume-se para música 80 ms e para fala 50 ms. Fora deste in-

tervalo a energia é desfavorável para a clareza embora construa uma percepção de envolvimento do ouvinte.” (CIRILLO; MARTELOTTA, 2006, p. 44, tradução nossa). São dois os critérios objetivos para a clareza. São calculados tomando-se razões entre a energia sonora inicial e tardia. Para fala, *Deutlichkeit* (D_{50}), do idioma alemão, clareza, é a razão de energia sonora, direta e refletida, contida nos primeiros 50 ms da curva de decaimento e a energia total do impulso sonoro. “As reflexões que atingem o receptor até os primeiros 50 ms da curva de decaimento contribuem de maneira positiva para a clareza da fala” (CAVANAUGH, W. J.; WILKES, J. A. 1999 p. 159, tradução nossa).

O D_{50} é expresso como uma porcentagem e calculado separadamente para cada banda de frequência de 125 Hz até 4000 Hz. Convencionou-se o valor obtido pela média das bandas 500 e 1000 Hz para a expressão de um valor único (CREMER; MÜLLER, 1978). Este parâmetro de clareza é também conhecido como Definição.

A Definição é expressa conforme equação abaixo:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Onde:

p é o nível de pressão sonora.

$p^2(t)$ é a resposta quadrática do pulso sonoro.

Para música, a clareza é calculada tomando-se o intervalo dos primeiros 80 ms da curva de decaimento. O termo *Clarity* (C_{80}) do inglês, clareza, é uma razão expressa em decibels (dB), “entre a energia sonora dos primeiros 80 ms da resposta impulsiva em relação à energia restante contida no pulso sonoro após esses 80 ms iniciais” (BRADLEY, J. S., 1986 p. 199, tradução nossa). É calculada para cada banda de oitava, de 125 Hz até 4000 Hz, descrita na equação abaixo.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt} dB$$

Onde:

p é o nível de pressão sonora.

$p^2(t)$ é a resposta quadrática do pulso sonoro.

A média dos valores das bandas de frequência 500 Hz e 1000 Hz é tomada como a melhor relação entre este parâmetro e a sensação subjetiva. (BRADLEY; SOULODRE, 1995).

2.1.2.5 PARÂMETROS OBJETIVOS – IMPRESSÃO ESPACIAL

Como mencionado anteriormente, por impressão espacial pode-se entender a impressão de dimensão aparente da fonte (ASW) ou a sensação de envolvimento do ouvinte (LEV).

A relação entre a quantidade de energia provinda das reflexões laterais e a impressão subjetiva de Largura Aparente da Fonte (ASW – Apparent Source Width) tem sido investigada em salas de concerto (HIDAKA; BERANEK; OKANO, 1998; MARSHALL; BARRON, 2001).

Objetivamente, a ASW é descrita pela fração inicial de energia lateral (LF), definida como a razão entre a energia sonora fornecida lateralmente durante os primeiros 80 ms da curva de decaimento em relação à energia total incidente no receptor neste mesmo intervalo de tempo.

$$LF = \frac{\int_{0.005}^{0.08} p_l^2(t) dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt} dB$$

Onde:

$p_l(t)$ é a pressão sonora instantânea medida em um auditório com um microfone bidirecional (ISO 3382-1:2006).

A LF é medida nas seis bandas de oitava mais usuais (125 Hz a 4000 Hz) tendo-se adotado a média das bandas de 125, 250, 500 e 1000Hz como a melhor correlação entre esta métrica e a sensação subjetiva de envolvimento do ouvinte.

Existem ainda outras maneiras de correlacionar a impressão espacial às medições objetivas. Dentre elas, cite-se como descritor da ASW, o coeficiente de correlação cruzada inter-aural (IACC), que avalia de que forma os dois ouvidos são diferentemente excitados por um impulso sonoro em um recinto fechado e o Nível Sonoro Lateral Tardio (LG) (CIRILLO; MARTELOTTA, 2006).

O LG é uma razão, expressa em decibels, da energia sonora lateral tardia (incidente após os 80ms) de uma fonte não direcional em relação à energia total desta mesma fonte quando medida em campo aberto a uma distância de 10 metros. Este parâmetro tem sido correlacionado à sensação de envolvimento do ouvinte – LEV (BERANEK, 2004).

2.2 ACÚSTICA DE IGREJAS

O julgamento da qualidade acústica de uma sala tem comumente tomado o paradigma da arquitetura moderna de Sullivan, para o qual “a forma deve sempre seguir a função” (SULLIVAN, 1896 apud GÖSSEL; LEUHÄUSER, 2001). A qualidade acústica de uma sala é sempre avaliada em função de seu uso, de sua finalidade. Desta forma se desenvolveram soluções exclusivas para as diferentes demandas da fala e da música e é comum a construção de salas específicas para filarmônicas, orquestras de câmara, ópera, teatro e conferências.

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

Nas igrejas, as exigências litúrgicas são múltiplas e dificultam as soluções e o diagnóstico acústico, uma vez que devem atender satisfatoriamente às atividades de fala, música, música de órgão e os cantos da congregação.

Cirillo e Martellotta (2006, p. 39) adotam uma simplificação acústica do serviço religioso para o diagnóstico das salas. Consideram apenas duas exigências a serem contempladas, tomando em conjunto a música e o canto da congregação como uma única demanda e a fala como outra.

Os requisitos acústicos no que diz respeito à inteligibilidade da fala só foram mais atenciosamente considerados após a edição do Concílio Vaticano II (1965) quando da substituição do Latim pelas línguas vernáculas.

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

Em se tratando de grandes igrejas, usualmente construídos com materiais de baixa absorção sonora, a literatura mostra que a aplicação das equações tradicionais para obtenção de estimativas do tempo de reverberação geralmente superestima os valores preditos.

Em um dos primeiros estudos publicados sobre acústica em basílicas romanas, Rares e Sacerdote (1953, p. 925-961) observaram em duas das mais famosas igrejas de Roma (Basílica Lateranensis e Basílica de São Paulo Extra Muros) que, embora semelhantes em tamanho e nos materiais construtivos e por não apresentarem bancos nem quaisquer outros materiais absorventes, como quadros, cortinas ou estofamentos, as diferenças geométricas do espaço interno interferiram bastante nos tempos de reverberação.

Na Basílica Lateranensis ($\sim 135.000 \text{ m}^3$ e $TR_{1600\text{Hz}} \sim 4,8\text{s}$) a construção é barroca, composta de 5 naves separadas por pilares com grandes estátuas e capelas por toda a parede lateral. Exceto o piso plano, as demais superfícies desta igreja não são ornamentadas e possuem painéis e nichos.

Já na Basílica São Paulo Extra Muros ($\sim 162.000 \text{ m}^3$ e $TR_{1600\text{Hz}} \sim 7\text{s}$), apesar de também ser dividida em 5 naves, estas são separadas por 4 fileiras de 19 colunas cada. A infinidade de capelas e ornamentos vista na igreja anterior sedem lugar a um espaço bastante despojado com paredes planas, colunas cilíndricas e nenhuma capela. Conforme os autores, as medições nas duas igrejas demonstraram que os tempos de reverberação obtidos foram menores que os esperados para grandes salas com pouco material absorvedor.

A Basílica São Paulo Extra Muros, com um volume apenas 18% maior, tem um tempo de reverberação aproximadamente 80% maior que a Basílica Lateranensis. Os resultados obtidos derrubaram a hipótese de que os elementos decorativos, mesmo em mármore polido (baixo coeficiente de absorção) não influenciam o tempo de re-

reverberação.

Shankland e Shankland (1971, p. 389-395) chegaram a resultados semelhantes quanto aos baixos tempos de reverberação. A análise acústica da Basílica de São Pedro (~ 600.000 m³ e TR_{1000Hz} ~ 7s) e de outras 3 basílicas romanas (dentre elas as duas estudadas anteriormente por Raes e Sacerdote), conjuntamente com os estudos de outras igrejas italianas e americanas, também revelaram tempos de reverberação menores que os esperados por simples extrapolação dos valores encontrados em igrejas de menor porte.

Observaram que a redução da reverberação, além de ser em grande medida influenciada pela difusão sonora – promovida pelos detalhes arquitetônicos e ornamentos – também depende do grau de conexão dos volumes de ar dos espaços acoplados (capelas, naves laterais e nichos). Pouco acoplamento, isto é, pequenas aberturas de comunicação entre os volumes tendem a aumentar a difusão no interior do espaço e reduzir o TR no volume principal.

Uma ampla difusão sonora não apenas previne ecos, mas também, aumenta o número de múltiplas reflexões do som nas superfícies do interior dos espaços acoplados promovendo uma maior degradação da energia em regiões que possuem baixa absorção.

Os espaços acoplados possuem características semelhantes a janelas, têm um determinado coeficiente de absorção que depende das suas dimensões. Os espaços nas igrejas foram divididos em três tipos: área do altar principal, capelas e naves laterais. Existem duas razões predominantes para esta divisão de tipos. A primeira razão é a posição relativa entre a fonte sonora e o espaço acoplado, isto é, em relação a direção com a qual o som entra no espaço acoplado. A segunda é o volume do espaço acoplado relativo ao volume da sala principal. Observou-se que estas alcovas se comportam como espaços acoplados se a relação comprimento da alcova/largura da abertura > 0,6 ou se a largura da nave lateral/altura da abertura > 0,4. (CARVALHO, 1995, p. 10, tradução nossa. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~carvalho/asa129.pdf>. Acesso em 04 de agosto de 2006 as 12:43:00.

Quanto à reverberação, a tipologia arquitetônica de grandes igrejas tende a favorecer os usos para fala e música quando o volume de ar é dividido em volumes menores (volumes dos espaços acoplados) e o edifício possui grande ornamentação, capelas e abóbadas. Entretanto, como o campo acústico varia conforme a posição, é necessária a observação de outros descritores objetivos, especialmente, os que en-

volvam a porção inicial da energia (som direto e primeiras reflexões), como o descritor de reverberação Tempo de Decaimento Inicial (EDT) e os de clareza (C_{80}) e (D_{50}).

Uma investigação destes dois parâmetros objetivos de clareza foi conduzida em 8 igrejas espanholas da cidade de Sevilha (GALINDO; ZAMARREÑO; GIRÓN, 1999). Essas igrejas de estilo gótico têm características específicas que remontam ao período da arte Mudéjar – estilo artístico que se desenvolveu nos reinos cristãos da Península Ibérica entre os séculos XII e XVI e que incorpora influências, elementos e materiais hispano-muçulmanos.

São construídas em alvenaria de tijolos, com 3 naves, estilo mourisco no teto e presbitério em abóbada de aresta e possuem boa acústica, ao menos no que tange ao Tempo de Reverberação.

As medições realizadas pelos autores com a igreja vazia e nenhuma correção para quaisquer estados de ocupação, demonstram que os dois índices, C_{80} e D_{50} , são bem correlacionados (índice de correlação 0,82) e os valores de C_{80} , são especialmente bons para uma sala construída sem preocupações acústicas.

O estudo mostra que os valores de C_{80} e D_{50} variam com a distância. Têm suas intensidades diminuídas a medida que aumenta o afastamento entre o receptor e a fonte.

Em contraste à boa qualidade acústica encontrada nos estudos anteriores, Cirillo e Martellotta (2002; 2003) observam resultados para reverberação, clareza, impressão espacial e inteligibilidade (TR, EDT, t_s , C_{80} , D_{50} , G, IACC e RASTI) menos satisfatórios para um grupo de nove igrejas românicas da Apúlia (região da Itália meridional, cuja capital é Bari).

As igrejas romanescas da Apúlia têm o mesmo estilo arquitetônico, mas apresentam características individuais diferentes e volumes variando de 1500 m^3 a 32000 m^3 . As igrejas apresentam as seguintes características comuns: 1) planta de basílica com nave principal e naves laterais; 2) forro em madeira sustentado por treliças; 3) piso de mármore; 4) bancos de madeira; 5) paredes de alvenaria rebocadas e pintadas e 6) colunas delimitando a nave central.

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

O levantamento mostrou que, nas médias, os valores do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) eram coincidentes com os valores do Tempo de Reverberação (T_{30}). Tomando-se as posições individuais, nos pontos em que os valores do EDT foram menores que os do T_{30} , assumiu-se a predominância do som direto.

Como conseqüência dos longos tempos de reverberação, a maioria das igrejas investigada teve baixa clareza e uma inteligibilidade da fala pobre. A análise dos resultados das posições individuais mostrou que EDT, G, C_{80} , D_{50} , t_s e RASTI estavam relacionados a distância relativa entre a fonte e o receptor. Este comportamento foi relacionado à atenuação do som direto e das primeiras reflexões com o aumento da distância.

As correlações entre C_{80} , D_{50} , t_s e RASTI foram observadas, mesmo quando os valores individuais foram considerados, demonstrando que estes parâmetros forneceram aproximadamente a mesma informação.

Ainda segundo os mesmos autores (CIRILLO; MARTELOTTA, 2005), em estudo de um grupo maior de igrejas de diferentes estilos (dos princípios do cristianismo até o período moderno), tipos arquitetônicos (basílica, central, cruciforme, etc.) e tamanho (de 5.500 a 160.000 m³), a análise das medições, tomando-se a igreja vazia, demonstrou que o som nas igrejas se propaga segundo caminhos complexos.

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

Pode-se dizer que diferentes elementos arquitetônicos (como colunas, capelas, abóbadas, tetos etc.) afetam as primeiras reflexões, de forma que suas intensidade e densidade são reduzidas, tornando o decaimento sonoro exponencial significativamente atrasado após a incidência do som direto. Capelas laterais profundas parecem refletir o som de maneira complexa, enquanto naves laterais e paredes decoradas reduzem as reflexões laterais, fazendo-as mais fracas e difusas. Os forros suspensos por treliças demonstram comportamento similar, enquanto abóbadas, especialmente as de berço produzem fortes reflexões. (CIRILLO; MARTELOTTA, 2005, p. 247-248, tradução nossa.)

2.3 DAS NORMAS E VALORES ÓTIMOS RECOMENDADOS

A utilização da norma internacional ISO 3382-1:2006 para medições acústicas de salas produz um imenso volume de informação. Estes dados dizem respeito a um conjunto de parâmetros objetivos de avaliação, obtidos para seis bandas de oitava (de 125 Hz até 4000 Hz) e segundo uma combinação de pontos de posicionamento do conjunto de fonte sonora e receptor, tomando-se em consideração o tamanho da sala, sua capacidade (número de assentos) e estado de ocupação.

Uma sala com 1000 assentos, por exemplo, deve ter uma combinação de pelo menos 3 posições para a fonte sonora e 8 para o microfone. Um volume de dados tão grande deve ser condensado, pois, por muitas vezes, informações importantes não são imediatamente percebidas. A utilização de médias para o diagnóstico da sala como um todo parece ser a forma mais simples de tratamento desses dados.

Os valores médios podem ser obtidos através de médias aritméticas. As médias podem ser calculadas para cada banda de frequência em um mesmo ponto, ou, entre pontos distribuídos pela sala, para descrever toda a sala ou porções dela, como possuindo características semelhantes.

A utilização de valores médios no entanto requer alguma atenção. Para Bradley (2005, p. 177, tradução nossa) apesar dos valores médios fornecerem uma imagem da sala como um todo, “uma melhor compreensão das suas características acústicas se dá com o exame das variações espaciais de um único parâmetro por vez. A forma mais recomendada para este tipo de avaliação é a elaboração de gráficos dos valores medidos versus a distância entre a fonte e o receptor.”

As médias em frequência podem ser feitas tomando-se os valores em bandas de oitava aos pares (125 e 250 Hz; 500 e 1000 Hz; 2000 e 4000 Hz), em três grupos, para a apresentação de valores referentes às baixas, médias e altas frequências.

Duas complicações neste procedimento ocorrem a 4000 Hz, como explica Barron (2005, p. 164, tradução nossa). A primeira se refere à “sensibilidade à absorção do ar que os parâmetros apresentam nesta frequência. A segunda, é inerente ao alto-falantes dodecaédricos de 400 mm de diâmetro, [utilizados como fonte sonora onidirecional], que a 4000 Hz se tornam direcionais.”

Quanto às médias espaciais, sua representatividade é questionável para algumas métricas objetivas. Quando uma métrica varia pouco espacialmente, é apropriado utilizar-se os valores médios. Quando a variação é significativa ao longo da sala, o

valor médio só pode ser tomado para uma pequena porção da audiência, vizinha ao ponto medido. A média diz pouco ou quase nada sobre a dispersão dos valores obtidos.

“O cálculo da média dos valores medidos sobre a freqüência é apropriado, mas sobre todas as posições de medição com o propósito de se obter um valor único para a sala é, geralmente, tarefa pouco útil, exceto para o tempo de reverberação” (BARRON, 2005, p 168, tradução nossa).

Nas medições, a excitação sonora do volume de ar da sala deve ser feita com a fonte preferencialmente colocada na mesma posição em que o som é emitido na condição de funcionamento real. A distribuição dos pontos de recepção deve ser a mais uniforme possível sobre a audiência, de modo a cobrir todas as áreas de interesse. “Em salas simétricas, se a posição da fonte for sobre o eixo de simetria, os microfones podem ser posicionados de um só lado” (ISO 3382-1, 2006, p. 19). Nesse caso, “devem estar a pelo menos 1 metro de distância da linha de simetria para evitar situações não conformes com esta extrapolação” (BARRON, 2005, p. 164).

A fonte deve ser o mais onidirecional possível e deve ser posicionada a 1,5 m de altura do piso, os microfones, a 1,2 m, medida correspondente à altura média do ouvido para um expectador sentado.

Os sinais sonoros para o registro da curva de decaimento devem ser sinais de banda larga de freqüência ou de varredura, que garantam a cobertura do intervalo de 125 Hz a 4000 Hz em bandas de oitava ou de 100 Hz a 5000 Hz em bandas de terço de oitava.

Quando obtidas as medições, a comparação destas com valores ótimos de referência é necessária para o julgamento da qualidade acústica da sala. Estes valores são obtidos em ensaios de laboratório ou extensa pesquisa de campo sobre um determinado tipo de espaço arquitetônico. Bradley (2005, p. 176, tradução nossa), recomenda a “comparação das medições com valores obtidos em salas similares bem conhecidas, [além dos valores normalizados], uma vez que os valores ótimos normalizados ainda não são bem estabelecidos.”

Os valores ótimos referenciais sugeridos pela norma estão dispostos no quadro a seguir (ver quadro 2.3.A).

Tabela 2.3.A – Valores ótimos propostos conforme impressão subjetiva do espectador

Impressão subjetivo campo sonoro	Descritor objetivo	Média sobre as bandas de oitava	Diferença perceptível	Intervalo típico
Nível sonoro subjetivo	Força sonora, G, em dB	500 a 1000	1 dB	-2 dB; +10dB
Reverberância	Tempo de Decaimento Inicial	500 a 1000	Rel. 5%	1,0 s; 3,0 s
Percepção da clareza sonora	Clareza, C80, em dB	500 a 1000	1 dB	-5 dB; +5 dB
	Definição, D50	500 a 1000	0,05	0,3; 0,7
	Tempo central, Ts, em ms	500 a 1000	10 ms	60 ms; 260 ms
Largura aparente da fonte ASW	Fração de Energia Lateral Inicial	125 a 1000	0,05	0,05; 0,35
Envolvimento do ouvinte	Nível Sonoro Lateral Tardio	125 a 1000	Não conhecido	-14 dB; +1dB

¹ Intervalo típico é para valores médios sobre a frequência em uma única posição em salas de concerto e auditórios multiuso com volumes acima de 25.000 m³

Adaptado de ISO/DIS 3382-1: 2006, revisão da ISO 3382: 1997.

No Brasil, a acústica de salas é objeto de normalização. A NBR 12179/ABR. 1992 fixa critérios para a execução de tratamentos acústicos em recintos fechados. A norma brasileira aborda o condicionamento acústico somente sob os critérios do Tempo de Reverberação.

Recomenda a utilização das equações clássicas, Sabine e Eyring, considerando como conformes, predições que apresentem desvios de até 10% aos valores medidos nas salas reais.

O estabelecimento de valores ótimos em segundos para o TR é determinado em função do tipo de uso e do volume da sala para a frequência de 500 Hz. Para o caso de igrejas católicas, os valores encontram-se entre ~0,8 s até ~2,4 s para salas com volumes variando de 30 m³ até 30.000 m³.

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Em acústica de salas, o desenvolvimento de técnicas de predição é bastante recente. Os primeiros esforços nesta área surgiram no início do século XX com os trabalhos de Wallace Clement Sabine. Até então, a qualidade acústica de uma sala era obtida por um processo de tentativa e erro e de um pouco de sorte ou da reprodução de casos de sucesso (CIRILLO; MARTELLOTA, 2006; LONG, 2006).

Nas décadas seguintes, várias técnicas de investigação de soluções acústicas foram desenvolvidas, dentre elas, a utilização de modelos físicos em escala. As maquetes foram largamente utilizadas para os testes de projeto de salas de concerto.

Embora muito eficientes, os modelos em escala têm sido preteridos, à medida que os programas de computador se tornam mais confiáveis. As vantagens no uso de modelos digitais vão muito além da flexibilidade de teste de materiais e das reduções dos custos financeiros como veremos adiante. Ainda assim, os modelos de computador estão longe de uma resolução fiel da realidade.

“As simplificações necessárias para que se viabilizem os cálculos em um intervalo de tempo razoável, ainda os deixam [os modelos digitais] diante de uma visão imprecisa [da realidade], mas, com a sofisticação técnica e a habilidade computacional em desenvolvimento, os modelos melhorarão” (LONG, 2006, p. 781, tradução nossa).

Os programas de computador para a simulação acústica de salas utilizam, em sua grande maioria, os métodos geométricos clássicos de traçado de raios (ray-tracing) e de imagem especular da fonte. Combinações destes dois métodos, os chamados métodos híbridos, são a base dos modelos mais bem sucedidos utilizados atualmente.

2.4.1 O MÉTODO TRAÇADO DE RAIOS (RAY-TRACING)

O método de traçado de raios (Ray-tracing) utiliza um grande número de partículas que são emitidas a partir de uma fonte, em todas as direções, descrevendo um raio de energia. Em seu percurso, atingem as superfícies da sala e são refletidas especularmente (lei de Snell).

A cada reflexão, parte da energia é absorvida de acordo com o coeficiente de absorção da superfície atingida. O cálculo dos parâmetros acústicos é realizado quando

um determinado raio atinge um ponto receptor ou por ele passa a um determinado raio.

Então, qual será a quantidade mínima de raios para que os cálculos possam ser efetuados? Para Rindel, (2000, p. 219, tradução nossa) “a probabilidade de um raio atingir uma superfície de área A após um intervalo de tempo t será maior, se a área da frente de onda não for maior que a metade da área da superfície em questão”. O número mínimo de raios é calculado pela expressão abaixo:

$$N \geq \frac{8\pi c^3}{A} t^2$$

Onde:

N é o número de raios;

c é a velocidade do som no ar (340m/s);

t é o tempo;

A é a área de uma superfície da sala.

Uma grande quantidade de raios é necessária para uma sala comum. Para uma superfície de 10 m² por exemplo e um tempo de 600 ms, aproximadamente 100.000 raios deverão ser utilizados. Uma quantidade desta ordem implica em um aumento indesejável do tempo de processamento.

Recentemente, desenvolvimentos dos modelos de traçado de raios produziram bons resultados em aumento de precisão e redução dos tempos de cálculo. O modelo piramidal de Farina (1995) – substitui o traçado de raios por cones – permite perfeita cobertura da superfície esférica da fonte evitando a verificação de superposição de superfícies (figura 2.4.1.a). No traçado de raios, a reflexão especular produz bons resultados para as baixas frequências.

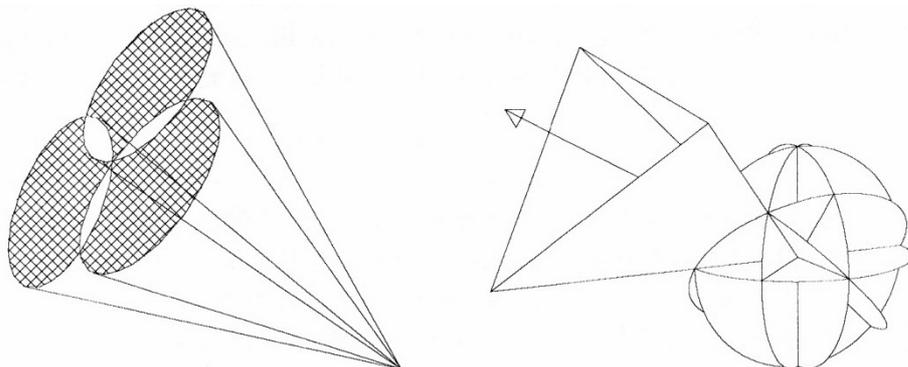


Figura 2.4.1.a: Método dos troncos de cone e traçado de raios no modelo piramidal

“O método de traçado de raios permite, além do coeficiente de absorção sonora, a inclusão da difusão sonora para melhor reprodução das superfícies rugosas” (VORLÄNDER, 1995 p. 173, tradução nossa).

2.4.2 O MÉTODO FONTE IMAGEM

O método de fonte imagem (image source method) é baseado na construção de uma imagem da fonte sonora, através do espelhamento, por um plano normal ao raio incidente, posicionado no ponto de incidência deste raio em uma superfície da sala (figura 2.4.2.a)

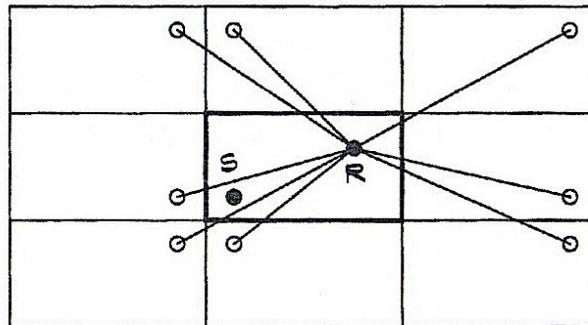


Figura 2.4.2.a: Construção geométrica da fonte imagem.

O método de espelhamento é para Allen e Berkeley (1978, p. 943, tradução nossa) “especialmente eficiente para salas simples e pequenas [em forma de paralelepípedo], em que o interesse da avaliação recaia sobre posições específicas, ou seja, sobre um par definido de pontos [fonte e receptor]”.

A obtenção de imagens numa sala desse tipo é bastante simples e o cálculo muito veloz quando comparado ao método de traçado de raios. O cálculo dos parâmetros é realizado toda vez que um raio direto ou refletido intercepte um receptor.

Em função do volume de uma sala simples, Rindel (2000, p. 220) calcula o número aproximado de reflexões que interceptam um receptor e que são estatisticamente aplicáveis às geometrias mais complexas, através da expressão matemática descrita abaixo.

$$N_{refl} = \frac{4\pi c^3}{3V} t^3$$

Onde:

N_{refl} é o número de reflexões;

c é a velocidade do som no ar (340m/s);

t é o tempo e

V é o volume da sala.

Uma vez que a sala tenha uma geometria mais complexa, a quantidade possível de imagens cresce a cada reflexão de maneira exponencial, inviabilizando o processamento computacional. O número possível de imagens em função do número de superfícies e da ordem de reflexão é proposto por Rindel (2000, p. 220) conforme a equação abaixo.

$$N_{sou} = 1 + \left(\frac{n}{n-2}\right) \left[(n-1)^i - 1 \right] \approx (n-1)^i$$

Onde:

N_{sou} é o numero de fontes imagem

n é a numero de superfícies

i é a ordem de reflexão.

2.4.3 OS MÉTODOS HÍBRIDOS

Os métodos híbridos foram desenvolvidos combinando as potencialidades dos dois métodos geométricos clássicos. A velocidade do método de fonte imagem e as possibilidades de tratamento de difusão sonora do traçado de raios.

O método geométrico de fonte imagem apresenta a desvantagem de produzir uma imensa quantidade de imagens possíveis das quais somente uma pequena parte será efetivamente utilizada.

Vorländer (1989) apresenta um método híbrido para aplicações restritas à reflexão puramente especular. A idéia principal deste método é a realização de um teste de visibilidade da fonte através de um traçado de raios em ordem inversa – a partir do receptor – para determinar quais imagens, entre as possíveis, são úteis. Esta verificação promove redução no tempo de cálculo, quando vários receptores são processados simultaneamente.

Naylor (1992 apud RINDEL, 2000 p. 220) desenvolve um método bastante eficiente denominado de fonte secundária que tem sido satisfatoriamente utilizado no programa de computador ODEON. Neste método, uma fonte secundária é gerada no ponto de colisão a cada vez que um raio é refletido por uma superfície (figura 2.4.3.a).

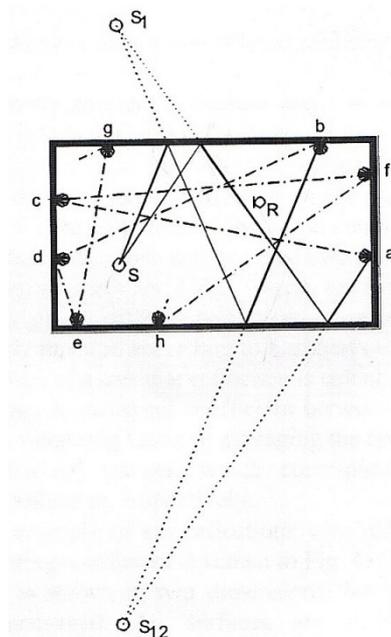


Figura 2.4.3.a Construção da fonte secundária.

Esta nova fonte irradia a energia, equivalente à refletida, em um hemisfério à sua frente com intensidade proporcional ao co-seno do ângulo obtido entre a superfície normal e o vetor que parte da fonte secundária em direção ao receptor.

As primeiras reflexões são asseguradas por um teste de visibilidade o que permite um conveniente tratamento de salas maiores e mais complexas e um pequeno número de raios.

2.4.4 DIFUSÃO SONORA EM MODELOS DE COMPUTADOR

As propriedades acústicas dos materiais utilizados na construção civil têm sua caracterização baseada apenas no coeficiente de absorção sonora α , medido em câmara reverberante (ASTM C423-07a, 2007).

Segundo Mommertz, (2000, p. 201, tradução nossa) “as predições acústicas calculadas de acordo com a teoria de Sabine têm, neste único dado de entrada, informação necessária e suficiente. Em simulações que utilizem métodos geométricos todavia, bons resultados dependem do conhecimento sobre a direcionalidade da reflexão”. As propriedades de distribuição direcional dos materiais serão de agora em diante denominadas de propriedades de difusão sonora.

A difusão sonora varia de acordo com o ângulo de incidência do som na superfície. Lidar com um conjunto grande de dados pode ser pouco produtivo. A redução desse conjunto de valores em um único coeficiente pode ser de grande utilidade para as tarefas de predição acústica. Desta forma, assim como o coeficiente de absorção sonora, a difusão foi quantificada em um valor único, chamado coeficiente de difusão (ver figura 2.4.4.a)

“O coeficiente de difusão δ pode ser simplesmente definido como a razão entre a energia sonora refletida de forma não especular em relação a energia refletida total e não inclui nenhuma informação sobre a direcionalidade da energia difundida. Contudo, embora não seja fisicamente exata, nos métodos de predição acústica de salas, a distribuição direcional da energia pode ser expressa através da lei dos co-senos de Lambert se o coeficiente de difusão for conhecido”. (VORLANDER; MOMMERTZ, 2000, p. 188, tradução nossa).

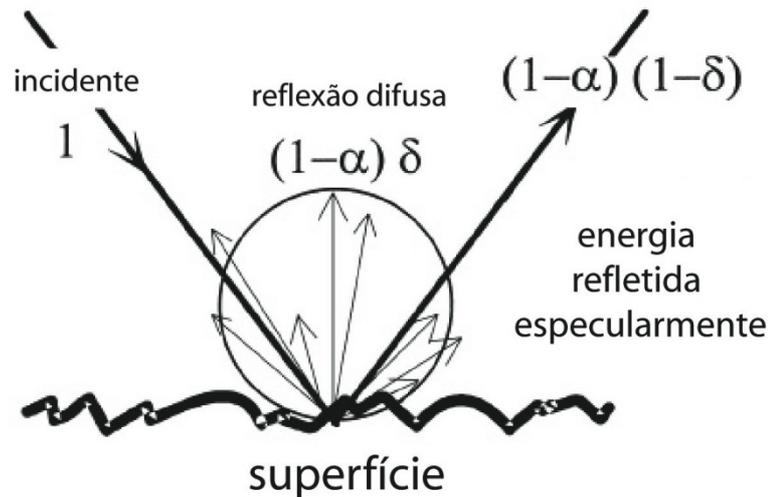


Figura 2.4.4.a: Ilustração da reflexão sonora com difusão aleatória de parte da energia.

A determinação de coeficientes de difusão sonora e sua aplicação têm sido objeto de recentes estudos (MOMMERTZ, 2000; VORLÄNDER;MOMMERTZ, 2000; JEON; LEE; VORLÄNDER, 2004; ZENG; CHRISTENSEN; RINDEL, 2006). Um comitê técnico da Organização Internacional para Normalização (ISO), iniciou trabalhos no ano de 2000 com o propósito de estabelecer um padrão para obtenção de coeficientes de difusão. A primeira normalização sobre o assunto data de 2004 com a edição da ISO 17497-1:2004 *Acoustics — Sound-scattering properties of surfaces — Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room* (Acústica — Propriedades de difusão sonora das superfícies — Parte 1: Medições do coeficiente de difusão de incidência aleatória em câmara reverberante). Um consenso por sua vez, ainda não foi alcançado entre os especialistas e pesquisadores. A utilização de coeficientes de difusão para a caracterização de superfícies em modelos de predição acústica é fundamental para a obtenção de melhores resultados (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000). Para Zeng, Cristensen e Rindel (2006, p. 772, tradução nossa), “os coeficientes de difusão são obtidos ou através de medições diretas ou baseados na experiência – o que limita a utilização dos programas a um público especializado – uma vez que os dados cientificamente obtidos são escassos e a medição de todas as superfícies embora possível é impraticável”.

2.4.5 PRECISÃO DOS MODELOS DE PREDIÇÃO ACÚSTICA DE SALAS

Os resultados obtidos com a utilização de modelos de computador têm sido objeto de avaliações periódicas e demonstrado ser bastante confiáveis (VORLÄNDER, 1995; BORK, 2000; BORK, 2005; BRADLEY;WANG, 2007). Entretanto, para que se possa compreender os fatores que determinam o quão próximo da realidade um modelo pode chegar, devemos tomar conhecimento de alguns princípios.

É sabido que as métricas objetivas são obtidas em medição para uma dada combinação de pontos de fonte e receptor. Além disso, sabe-se que, com exceção do Tempo de Reverberação, os demais parâmetros são bastante sensíveis às mudanças de posição.

Mas, quanto dessa variação é significativa? Em função dessa variação de valores, foi adotado um intervalo para o qual não são percebidas as flutuações. A estes limites da percepção, padronizou-se margens de tolerância denominadas Diferença Mínima Perceptível ou Identificável, do inglês *Just Noticeable Difference* de onde se adota a sigla JND.

Estes dados constituem importantes ferramentas para a averiguação da qualidade de valores calculados. Os valores estão normalizados, para a frequência de 1000 Hz conforme ISO/DIS 3382:2006 – ver quadro 2.3.a – Valores ótimos propostos conforme impressão subjetiva do espectador.

Vorländer (1995) e Bork (2000; 2005) conduziram rodadas internacionais para averiguação da precisão de diferentes programas de computador para simulação acústica de salas. Entre os autores, há concordância de que a geometria da sala e a correta caracterização das superfícies têm efeito significativo na predição do campo sonoro.

Concordam também na observação de que, para todos os softwares avaliados, os pontos fracos concentram-se no cálculo dos parâmetros nas baixas frequências e no tratamento dos efeitos de difração sonora em arestas, especialmente na área de assentos (platéia). O estudo também indica que os programas que utilizam métodos híbridos levam vantagem sobre aqueles baseados nos modelos geométricos tradicionais.

Quanto à precisão, Naylor e Rindel (1992) demonstram um alto grau de correlação dos modelos de computador para a banda de 1000 Hz. O mesmo é verificado por Bradley e Wang (2007) que ao comparar os valores preditos com os medidos, de-

monstram que as diferenças são menores que 1JND para o Tempo de Reverberação. Porém, para as baixas frequências, o modelo torna-se menos preciso, particularmente, para o parâmetro de clareza (C_{80}) com diferenças superiores a 8JND.

A comparação dos valores calculados com os dados obtidos por medição direta é fundamental para a verificação da qualidade do modelo. Este procedimento é também denominado calibração. O processo de calibração, geralmente, lança mão de técnicas estatísticas como a análise de variância das amostras.

Segundo Bradley e Wang (2007, p. 85, tradução nossa), “o Tempo de Reverberação tem sido o parâmetro mais utilizado entre os acadêmicos e a indústria para a calibração dos modelos”. Dentre os motivos, enumere-se a facilidade de medição, sua pouca sensibilidade em relação à posição o que aumenta a repetibilidade da amostra e a consistência com que programas calculam este parâmetro, fato que simplifica o tratamento estatístico.

3. MATERIAIS E MÉTODO

A avaliação objetiva da qualidade acústica de uma sala consiste na realização de medições de parâmetros objetivos correlacionados à sensação subjetiva do ouvinte. Este trabalho concentrou-se na avaliação dos parâmetros descritores de reverberação e clareza, a saber: 1) Tempo de Reverberação, 2) Tempo de Decaimento Inicial (EDT), 3) Clareza em 80ms (C_{80}) e 4) Definição em 50ms (D_{50}).

3.1 AS MEDIÇÕES

Os métodos e equipamentos para medição destes parâmetros atendem aos requisitos especificados pela norma internacional ISO 3382-1 de 2006, revisão da edição de 1997 e são listados abaixo.

- Uma fonte onidirecional modelo BK 4296 Brüel & Kjaer – conjunto de 12 altofalantes montados em um dodecaedro – com resposta plana para a faixa de frequência de 100Hz a 16KHz conectada a um amplificador de se som modelo Lab 300 Labgruppen de 500 Watts de potência RMS.

- Microfone onidirecional, modelo BK 4188 Brüel & Kjaer com especificações de filtros e polarização originais do fabricante conectado ao medidor de nível sonoro modelo BK 2238 Brüel & Kjaer.
- Software de geração de sinal e registro da curva de decaimento DIRAC 3.1, instalado em um microcomputador portátil Toshiba com processador Intel Pentium 4 de 1.4 MHz de frequência.
- Placa de áudio de interface *fire-wire* modelo Fireface 800 da fabricante RME, utilizada para a conexão dos equipamentos ao microcomputador.
- Tripés para montagem da fonte e do medidor e trena.

As medições foram realizadas tomando-se duas posições para a fonte sonora. As duas no presbitério ou altar-mor. Uma sobre o eixo de simetria da nave, na posição em que costumeiramente o padre conduz a missa e outra ao lado, na posição do púlpito de leitura, no qual os textos do dia são lidos por um membro da congregação (CRILLO; MARTELLOTTA, 2002; 2003). A fonte foi posicionada e instalada em um tripé mantendo uma distância relativa ao piso de 1,5m.

Em função das características do serviço litúrgico, poder-se-ia indagar sobre a ausência de posições da fonte que representassem o coro da congregação durante sua participação. Algumas dificuldades devem ser salientadas quanto a este ponto.

A área que a congregação ocupa nestes edifícios quando totalmente ocupados é de aproximadamente 150m² na menor das salas e a norma recomenda o uso de uma fonte onidirecional que usualmente tem 400 mm de diâmetro.

Barron (2005), em estudo de salas de concerto, relata as dificuldades na obtenção de resultados confiáveis quando a fonte é posicionada no palco da orquestra. Uma orquestra ocupa uma área de aproximadamente 200 m² e as dificuldades de representação de uma fonte em área são agravadas pela condição de ocupação. A lotação modifica o padrão de reflexões da sala. Em sendo a fonte sonora indissociável da ocupação, a representação é questão de difícil gerenciamento. Estes fatores determinaram a não utilização de uma posição da fonte em meio a área de permanência da congregação.

O próximo passo é a localização dos receptores. O posicionamento do microfone foi efetuado de forma a garantir uma distribuição uniforme do espaço. Com o auxílio de software CAD (VectorWorks 11.5) malhas retangulares foram ajustadas sobre as plantas arquitetônicas dos edifícios (ver figuras 4.1.1.a, 4.1.2.a e 4.1.3.a).

O espaçamento entre os pontos varia conforme as dimensões das salas, o número de pontos varia de 8 a 11 e são distribuídos em malhas de 3 e 5 metros. Os microfones foram posicionados nas áreas de assentos, entre os bancos, com altura relativa ao piso de 1,2m o que reproduz a condição de audiência sentada (ISO 3382-1, 2006, p. 5).

Os levantamentos arquitetônicos utilizados neste trabalho foram gentilmente cedidos pela arquidiocese de Curitiba e equipe do escritório Albatroz Arquitetura, Construção & Restauo, responsável pelos projetos e execução das obras de restauração das igrejas.

Quanto aos sinais utilizáveis para a excitação do volume de ar das naves, optou-se pela utilização de um sinal de varredura logarítmica de frequência recomendado pelos fabricantes do programa (BRÜEL & KJAER SOUND & VIBRATION MEASUREMENT, 2003) e por apresentar conveniente aplicação em salas de médio e grande volumes, especialmente nestas igrejas, cuja tecnologia de isolamento da fachada (portas e janelas) não garante boa performance, acarretando níveis de pressão sonora ambiente elevados.

A adoção do sinal de varredura logarítmica economiza tempo por reduzir a quantidade de médias necessárias para melhorar relação sinal/ruído deve estar acima de 45 dB para que a medição seja validada (ISO 3382-1, 2006).

O software DIRAC 3.1 se encarrega da geração do sinal e do registro do decaimento de energia. A resposta impulsiva da sala pode então ser calculada para todos os parâmetros monoaurais de interesse. Três médias foram utilizadas para cada ponto medido.

As medições foram realizadas dentro das condições meteorológicas recomendadas, temperatura do ar entre 18 e 25 °C e umidade relativa do ar entre 79 e 86% nos dias das medições.

3.2 SIMULAÇÃO EM MODELO DE COMPUTADOR

As características do processo de construção de modelos em programas de computador, bem como seus métodos de cálculo, foram anteriormente explorados. Os modelos de simulação acústica calculam o campo sonoro sobre estruturas tridimensionais, geralmente construídas com auxílio de softwares CAD (Computer Aided Design). Este foi o procedimento adotado neste trabalho.

Para a construção dos modelos tridimensionais das igrejas, as informações a respeito de suas dimensões e características geométricas deveriam ser as mais confiáveis possível. Erros no tamanho e forma das salas acarretam grandes imprecisões nos cálculos (BORK, 2000; 2005).

Os levantamentos arquitetônicos utilizados como base neste trabalho foram gentilmente cedidos pelos autores dos projetos de restauração e são de sua responsabilidade. A execução de levantamentos arquitetônicos precisos é tarefa por demais trabalhosa e exige além de uma equipe de pessoas treinadas.

Os desenhos tridimensionais foram elaborados a partir da documentação arquitetônica digitalizada (plantas, cortes e elevações – projeções ortogonais bidimensionais) em arquivos com formato de extensão DXF (Drawing Extended Format).

Estes arquivos foram então importados e os modelos tridimensionais desenhados com o auxílio do software VectorWorks 11.5 (Nemetschek North America, 2005) e então exportados para o software de simulação acústica de salas Odeon 7.01 (ODEON A/S, 2005).

A construção do modelo no software Odeon 7.01 é composta por sucessivas etapas ordenadas hierarquicamente. Primeiro, a geometria do modelo teve de ser testada para a identificação de erros como a superposição de superfícies e objetos tridimensionais não suportados pelo programa (objetos 2D, agrupados (blocos) e sólidos tridimensionais).

Os sólidos tridimensionais são poderosas ferramentas de modelagem tridimensional e a forma mais rápida de se obter modelos em programas CAD. A conversão destas estruturas em entidades reconhecíveis pelo programa Odeon é tarefa incorporada às rotinas de intercâmbio de desenhos (*exportar / salvar como*) disponíveis nos programas.

Em segundo lugar, posicionou-se fonte e microfones com características similares aos utilizados no levantamento, nas mesmas posições dos pontos medidos.

Em seguida e a mais importante etapa, a caracterização das superfícies (VORLÄNDER, 1995; BORK, 2000; 2005; NAYLOR; RINDEL, 1992; BRADLEY; WANG, 2007). Aqui, se atribuiu para cada superfície, os coeficientes de absorção e difusão sonora dos materiais encontrados na sala. Os coeficientes de absorção sonora, utilizados, foram em sua grande maioria, os disponíveis na biblioteca do programa, contudo, novos materiais foram acrescentados (KNUDSEN; HARRIS, 1978, p. 375; NBR 12179, 1992, p. 5-8) à biblioteca do sistema quando necessário.

A técnica em alvenaria de tijolos ou pedra é comum em todos os edifícios pesquisados e o conjunto de materiais de acabamento empregados na construção é muito semelhante. A mobília encontrada em todas as igrejas se resume aos bancos de madeira sem forrações ou qualquer aplicação de materiais absorventes. O que torna a caracterização dos materiais muito semelhante (ver quadro 3.2.A)

Tabela 3.2.A – Coeficientes de absorção dos materiais de acabamento empregados nas igrejas.

Materiais	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Wood sheathing, pine (KNUDSEN; HARRIS,1978)	0,100	0,110	0,100	0,080	0,080	0,110
Chairs, lightly upholstered concert hall chairs, average	0,350	0,450	0,570	0,610	0,590	0,550
Lime cement plaster	0,020	0,020	0,030	0,040	0,050	0,050
Single pane of glass, 3mm	0,080	0,040	0,030	0,030	0,020	0,020
Solid wooden door	0,140	0,100	0,060	0,080	0,100	0,100
Ceilings, plasterbord ceiling on battens with large air-space above	0,200	0,150	0,100	0,080	0,040	0,020
Floors, 10 mm soft carpet on concret	0,090	0,080	0,210	0,260	0,270	0,370
Floors, wood parquet on concret	0,040	0,040	0,070	0,060	0,060	0,070
Windows, window glass	0,350	0,250	0,180	0,120	0,070	0,040

Em virtude da escassez de dados sobre os coeficientes de difusão e de sua aplicabilidade ser baseada em grande parte na experiência de técnicos e pesquisadores (ZENG, 2006; NAYLOR; RINDEL, 1992), os coeficientes de difusão sonora utilizados nos modelos deste trabalho são aqueles sugeridos pelos fabricantes do programa (CRISTENSEN, 2003, p. 55) e a regra prática para sua aplicação está descrita no quadro 3.2.B adiante.

No caso das igrejas avaliadas, as características dos materiais construtivos utilizados e o tipo das superfícies conduziram à escolha da opção constante da primeira linha do quadro 3.2.B - superfícies grandes, rígidas ou macias - coeficiente de difusão 0,1 em todas as superfícies para a sala vazia e 0,3 na área de assentos para a simulação com a ocupação total.

Tabela 3.2.B – Critérios práticos para a aplicação do coeficiente de difusão sonora - caracterização das superfícies.

Características da superfície	Coeficiente de Difusão Sonora
Grandes superfícies rígidas ou macias.	0.1
Superfícies muito difusoras como audiência em uma sala de concertos.	0,7
Salas com muitos itens de pequeno porte que são ignorados no processo de modelagem em salas de aula e escritórios por exemplo.	0.3

Adaptado de CRISTENSEN, 2003, p. 55.

Posicionada a fonte, receptores e caracterizadas as superfícies, parte-se então para o cálculo do campo sonoro das salas. O programa Odeon como já explicado é um modelador que utiliza método híbrido e possui três tipos de cálculo a saber: 1) Investigação (*Survey*), 2) Engenharia (*Engineering*) e 3) Precisão (*Precision*).

Estes tipos de cálculo variam em relação à quantidade de raios empregadas na predição. Acrescentam-se aos tipos opções de como tratar a difusão sonora. As opções também são em número de três. A primeira delas não considera a difusão (*None*), a segunda trata a difusão pela lei dos cossenos de Lambert (*Lambert*) e a terceira considera as superfícies como totalmente difusoras (*Full Scattering*).

Duas variações referentes à difusão sonora são ainda oferecidas pelo programa para a caracterização das superfícies. Uma para aplicação da difusão somente em materiais leves ou macios (*Soft Materials Only*) e outra que atribui a todas as superfícies o tipo de difusão sonora escolhida (*All Materials*).

As múltiplas alternativas possíveis para a obtenção de uma predição e os poucos exemplos de aplicação deste programa em edifícios religiosos (EL-KHATEEB; ISMAIL, 2007, p. 109-132) fizeram com que, neste trabalho, as combinações entre os ajustes de cálculo fossem testadas e os resultados comparados estatisticamente entre si e em relação aos valores medidos.

Das combinações possíveis para a predição mencionados acima, foram excluídas da amostra as simulações que não consideram os efeitos da difusão, resultando em 12 conjuntos de dados.

A comparação estatística entre os resultados preditos e os valores da medição informa sobre a existência ou não de diferenças significativas entre os grupos. Esta informação interessa à confiabilidade do processo e permite o estudo de soluções

de projeto acústico e projeção de cenários, dificilmente viáveis, como a obtenção de medições com ocupação total das igrejas.

3.3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Tratamentos estatísticos foram aplicados como ferramenta auxiliar no processo de calibração dos modelos. Somente os valores referentes ao Tempo de Reverberação foram analisados.

A análise estatística do tempo de reverberação por banda de oitava é prática comum entre os pesquisadores pois facilita a aplicação dos testes de análise de variância, pois, os valores variam muito pouco com a posição e sua distribuição ao longo da sala tende à normalidade (gaussianidade da amostra).

Neste trabalho, para cada igreja, os valores do Tempo de Reverberação, de todos os pontos medidos e calculados, foram agrupados por banda de oitava. Dentro de cada banda, os valores obtidos nas medições e em cada predição foram discriminados em grupos de acordo com sua forma de obtenção e aí então submetidos aos testes estatísticos. A análise é realizada para cada banda de oitava tomando-se os grupos para comparação.

Os dados foram submetidos a análise de variância, ANOVA (Analysis of Variance). “Uma análise de variância só deve ser aplicada a um conjunto de observações se estiverem satisfeitas as condições de independência, homocedasticidade e normalidade da amostra. Na prática, porém, dificilmente essas pressuposições estão, todas, satisfeitas.” (VIEIRA, 2006 p. 64)

Um dos testes mais conhecidos para a verificação da normalidade das amostras é o teste de Kolmogorov-Smirnov. Este teste avalia a concordância entre a distribuição observada da amostra e uma determinada distribuição teórica. Se a hipótese de normalidade dos dados é aceita, pode-se conduzir a análise de variância (ANOVA). A análise de variância é utilizada para comparar as médias de mais de dois grupos simultaneamente. É uma generalização do teste t de Student.

“A hipótese nula pode ser expressa assim: **não existem diferenças significativas entre as médias observadas** ou seja as diferenças observadas são frutos do acaso e portanto, pode-se considerar que as diferentes amostras pertencem à mesma população” (BISQUERRA; SARRIERA; MARTÍNEZ, 2004, p. 74, grifo nosso).

Com o teste ANOVA, chega-se à conclusão de aceitar ou não a hipótese de diferença entre as médias de um par de grupos. Mas não se sabe ao certo, entre quais pares de grupos encontram-se as diferenças. Esta identificação só é possível conduzindo-se testes de comparação múltipla também conhecidos como testes *post hoc*. O programa de computador SPSS inclui entre outros, os testes de comparação múltipla de Tamhane e LSD.

O teste de Tamhane se aplica às amostras não homocedásticas (isto é, as que possuem variância não homogênea) e compara os grupos entre si, a fim de identificar em quais grupos os resultados têm diferenças significativas. Com o mesmo objetivo, as amostras com variância homogênea ou homocedásticas foram tratadas com o teste LSD.

As predições mais robustas, aquelas que obtiverem resultados com nível de significância de 95% ou maior ($p\text{valor} > 0,05$) serão selecionadas para elaboração e de uma predição do campo acústico das salas em suas condições normais de funcionamento, com ocupação máxima dos assentos disponíveis.

O uso de técnicas de correção do tempo de reverberação para contemplar a ocupação das salas é recomendado pela literatura (HIDAKA; NISHIHARA; BERANEK, 2001; BRADLEY, 1991,) para salas de espetáculo. Analogamente, as igrejas, embora não sejam assim entendidas, têm sua acústica fortemente influenciada pela densa ocupação.

3.4 IGREJAS AVALIADAS

A arquidiocese de Curitiba e Região Metropolitana tinha em seus arquivos, até 06 de fevereiro de 2006, 107 paróquias cadastradas na capital. A seleção das igrejas para o estudo tomou como primeiro critério a idade dos edifícios.

A antigüidade era um requisito importante pois se desejava avaliar igrejas construídas antes da edição do Concílio Vaticano II (1965), cujas modificações do serviço religioso implicaram numa maior demanda por uma boa inteligibilidade da fala.

Após selecionadas as igrejas de interesse, uma segunda etapa de triagem foi realizada. A segunda triagem estabeleceu como critério de escolha, a existência ou a acessibilidade, aos documentos de projeto ou levantamentos arquitetônicos. Em virtude da escassez de documentação nos arquivos, três igrejas foram selecionadas.

Neste pequeno grupo, duas são igrejas setecentistas, bens tombados do centro histórico de Curitiba, a Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas (1737), primeira igreja construída na cidade e a Igreja Nossa Senhora do Rosário de São Benedito (1737), construída inicialmente para que os trabalhadores escravos pudessem frequentar as missas.

O terceiro edifício pesquisado foi a Igreja Bom Jesus dos Perdões, construída com a chegada dos frades franciscanos a Curitiba em 1899, tendo suas obras iniciadas em 1907 e concluídas em julho de 1909.

3.4.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS

A igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas foi construída em 1737, a mais antiga da cidade de Curitiba. Originalmente, seu nome era Igreja de Nossa Senhora do Terço. A igreja abrigou um convento franciscano e foi paróquia dos imigrantes poloneses. Na ocasião da vinda do Imperador D. Pedro II passou por um processo de restauração. Em 1951, se tornou Templo Votivo de Adoração Perpétua ao Santíssimo Sacramento. O edifício já passou por outras restaurações e foi tombado pelo Patrimônio Histórico do Paraná, em 1966, quando passou a abrigar em anexo o museu Arquidiocesano de Arte Sacra (ver figura 3.4.1.a).



Figura 3.4.1.a: Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas – exterior do edifício.



Figura 3.4.1.b: Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas – detalhes da nave paredes simples e forro decorado.

O interior é caracterizado por uma única nave, com pequenas aberturas, o que lhe confere pouca luz. As paredes de alvenaria de pedras têm grande espessura são

acabadas internamente com reboco e tinta à base de água (figura 3.4.1.b). As paredes não possuem decoração, os trabalhos de arte concentram-se no altar, nos entalhes e estatuária e nas pinturas do forro.

A nave principal é separada da capela mor ou presbitério por uma passagem medindo 3,6 m de largura por 5,7 m de altura. Esta passagem divide a igreja em duas partes, aproximadamente ao meio de seu eixo longitudinal. A capela mor é mais estreita, medindo 6 m de largura e área de 84m². A nave mede 8,3 m de largura por 17,6 m de comprimento, tem área de 146,3 m² (ver figura 3.4.1.c).

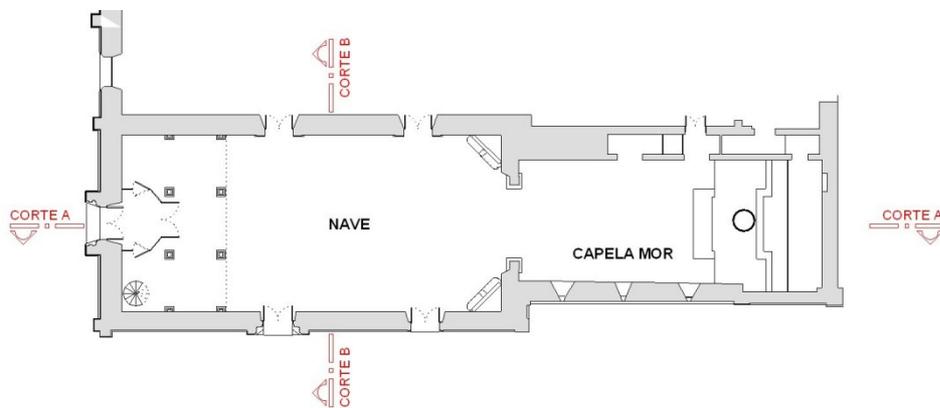


Figura 3.4.1.c: Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas – croqui: planta da nave e presbitério.

Na nave, a mobília existente na igreja se reduz aos bancos em madeira, sem revestimento, enquanto na capela mor os bancos dão lugar a cadeiras individuais de madeira estofadas com espuma e revestidas com veludo (ver figura 3.4.1.d e 3.4.1.e).

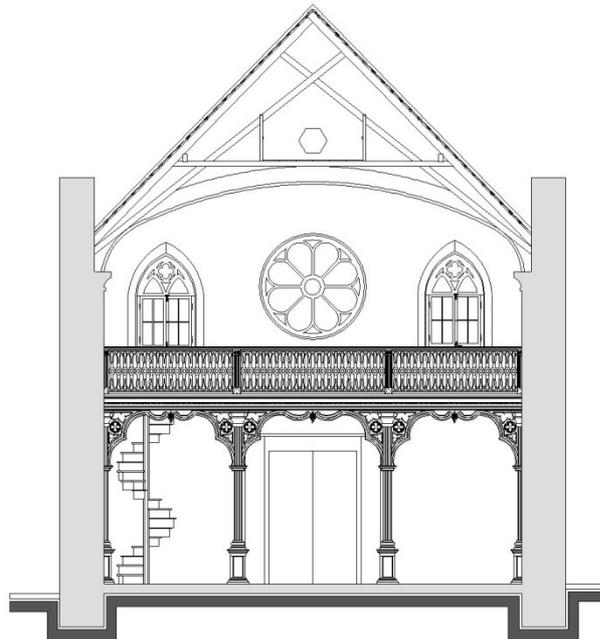


Figura 3.4.1.d: Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas – croqui: corte transversal da nave em direção ao coro.

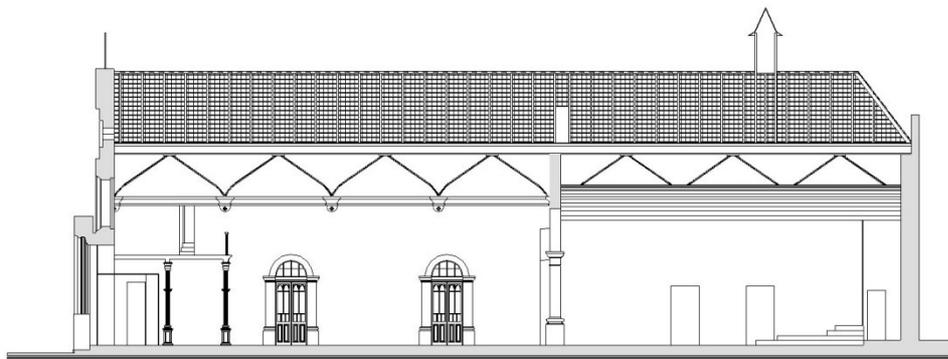


Figura 3.4.1.e: Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas – croqui: corte longitudinal nave e presbitério.

O forro é de madeira em arco abatido sobre estrutura treliçada de madeira e o piso em madeira sobre contra-piso de concreto. A igreja possui coro com guarda corpo finamente entalhado em madeira (ver figura 3.4.1.f).



Figura 3.4.1.f: Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas – detalhes da nave – coro.

Os detalhes técnicos sobre o projeto arquitetônico e as dimensões da igreja são demonstrados abaixo através de croquis e em um quadro que resume as principais informações sobre o edifício. Este procedimento será repetido para as demais igrejas (ver quadro 3.4.1.A).

Tabela 3.4.1.A – Dimensões da Igreja da Ordem III de São Francisco da Chagas.

Característica arquitetônica	Valor medido Unidades SI
Largura máxima – incluindo capelas laterais	8,3
Comprimento máximo – medido da entrada até o altar	32,6
Altura máxima – medida do piso até o forro ponto mais alto do arco, abobada ou de forro plano.	8,0
Altura no altar – medida do piso do altar até o ponto mais alto do forro.	7,6
Volume total	1658,2
Área total do piso	232,2

3.4.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO

A atual Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito é uma construção do séc. XVIII em estilo barroco. Foi construída no lugar de uma capelinha em estilo colonial, erigida para uso dos trabalhadores escravos e tinha o nome de Igreja do Rosário dos Pretos de São Benedito. Inaugurada em 1737, serviu de matriz de 1875 até 1893 durante a construção da Catedral.

O frontispício é decorado em azulejos representando o orago de N. S. Do Rosário e nas paredes do interior, azulejos portugueses retratam os Passos da Paixão. O edifício guarda o túmulo do Monsenhor Celso, antigo pároco, falecido em 1931 (ver figura 3.4.2.a). Desde 1951, está sob a guarda dos padres jesuítas, funcionando como Igreja reitoral.



Figura 3.4.2.a: Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – exterior do edifício.

O edifício é construído em alvenaria de pedra, as paredes no interior são rebocadas e pintadas com tinta à base de água. Vitrais coloridos iluminam o interior da igreja (ver figura 3.4.2.b).

O piso é de tacos de madeira assentados sobre contra-piso de concreto e o forro de madeira, pintado em tinta com base oleosa, sem gravuras ou decorações. Altar elevado 20cm, revestido em madeira e decorado com entalhes em madeira e imagens sacras (ver figura 3.4.2.c).



Figura 3.4.2.b: Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – exterior do edifício.



Figura 3.4.2.c: Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – detalhes da nave – piso, forro, bancos e altar.

Os bancos são de madeira sem revestimento e totalizam aproximadamente 310 lugares. Acima da entrada, um órgão de tubos foi instalado no coro (ver figura 3.4.2.d) Os detalhes técnicos sobre o projeto arquitetônico e as dimensões da igreja são demonstrados através de croquis e um resumo das principais dimensões em um quadro (ver figuras 3.4.2.e, 3.4.2.f e 3.4.2.g e quadro 3.4.2.A, adiante).



Figura 3.4.2.d: Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – detalhes da nave – órgão de tubos.

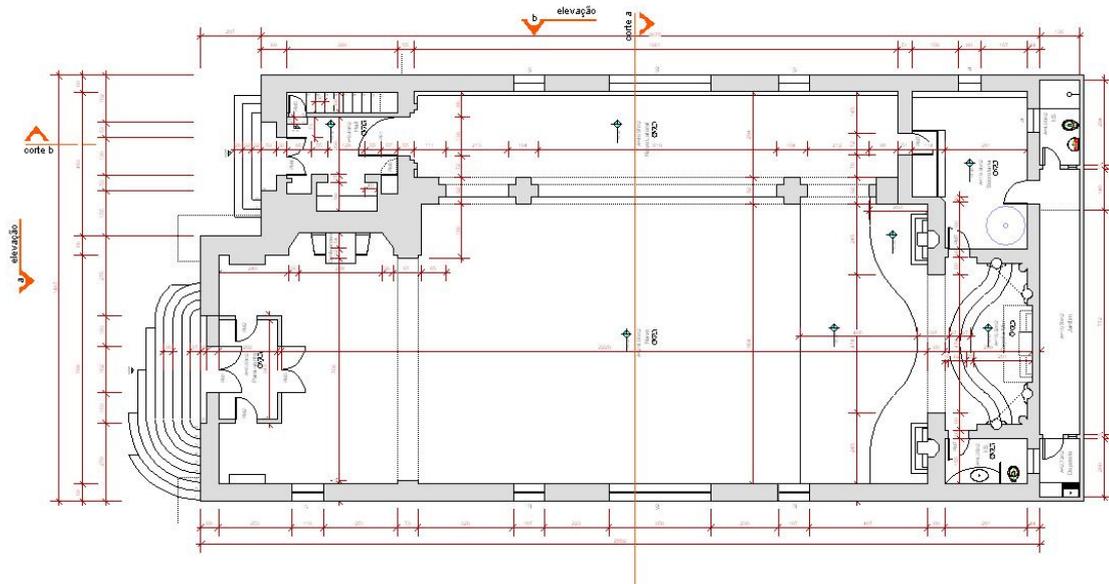


Figura 3.4.2.e: Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – croqui: planta da nave e presbitério.

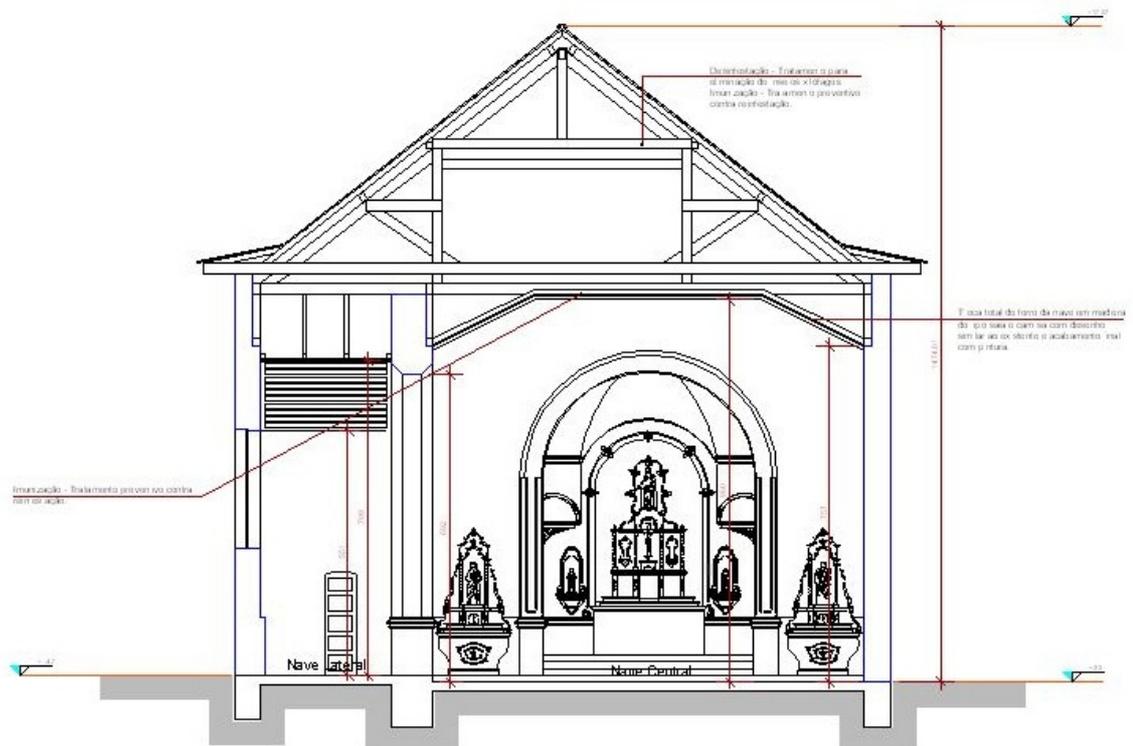


Figura 3.4.2.f: Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – croqui: corte transversal da nave em direção ao altar.

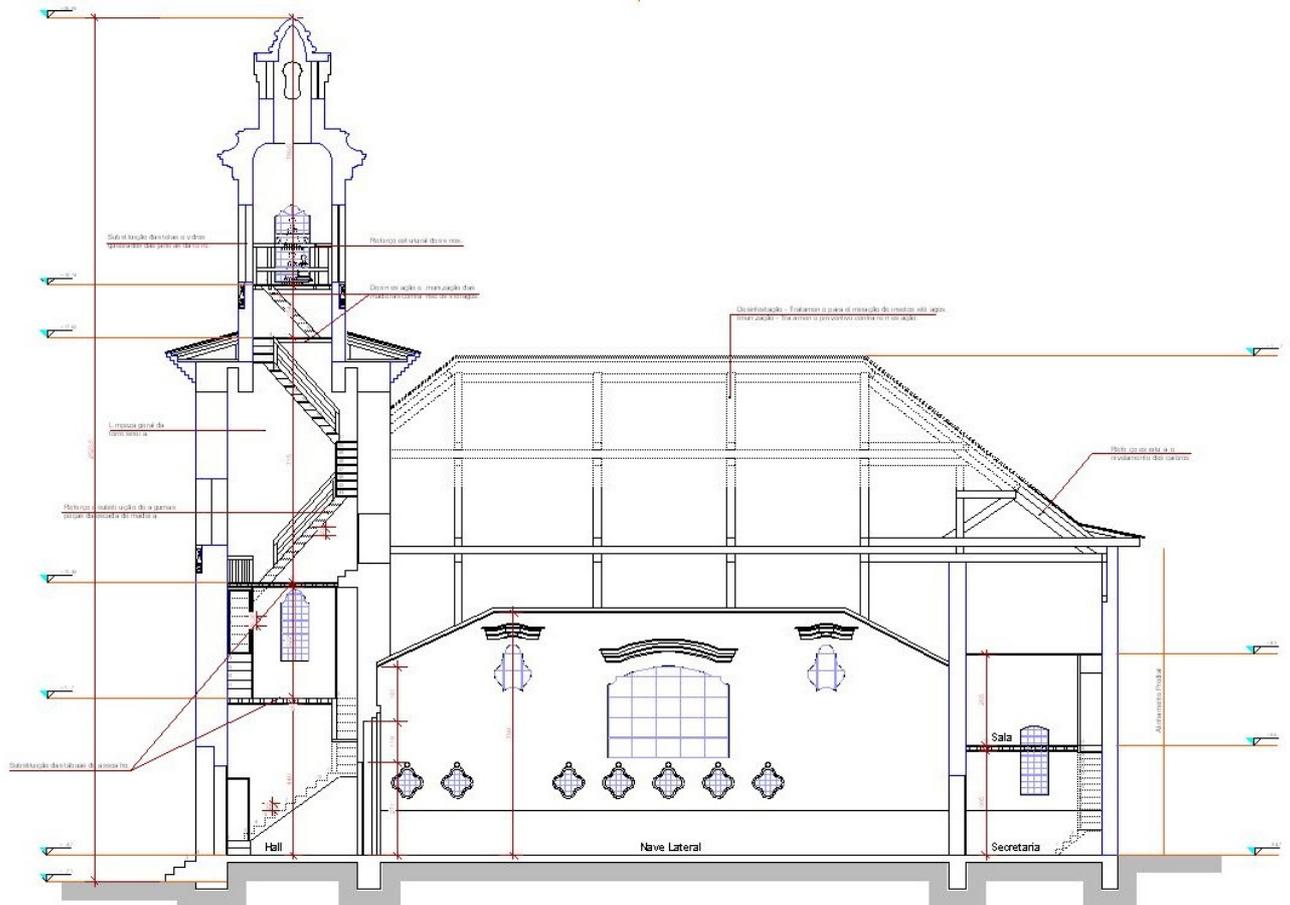


Figura 3.4.2.g: Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito – croqui: corte longitudinal da nave e campanário.

Tabela 3.4.2.A – Dimensões Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Característica arquitetônica	Valor medido Unidades SI
Largura máxima – incluindo capelas laterais	13,5
Comprimento máximo – medido da entrada até o altar	28
Altura máxima – medida do piso até o forro ponto mais alto do arco, abobada ou de forro plano.	8,6
Altura do altar – medida do piso do altar até o ponto mais alto do forro.	8,5
Volume total	2488,6
Área total do piso	305,4

3.4.3 IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES

Os frades franciscanos, pertencentes à Província Franciscana da Imaculada Conceição do Brasil, chegaram a Curitiba em 1899 e se instalaram próximo a atual praça Rui Barbosa.

As obras da Igreja do Bom Jesus dos Perdões tiveram início no dia 19 de maio de 1908 e foram concluídas em julho de 1909 (ver figura 3.4.3.a). A confecção e montagem dos altares tiveram início em 1918 e se estendeu até 1922.



Figura 3.4.3.a: Igreja do Senhor Bom Jesus dos Perdões – exterior do edifício.

A igreja foi executada em alvenaria de tijolos, coberta com telhado cerâmico. Abriga o forro com abóbadas de aresta, com estrutura de madeira e vedação em estuque, fina camada de argamassa (ver figura 3.4.3.b).

Em maio de 1924 chegava ao Brasil o órgão encomendado à Alemanha. Por ocasião da sua instalação foi necessário modificar o coro do órgão. Suas vigas foram reforçadas, ampliou-se sua extensão na parte central e foram inseridos os atuais suportes de ferro para sua sustentação (ver figura 3.4.3.c). Em 1933 foram instalados os sinos e o relógio na torre, importado da Alemanha (Frei Anselmo München, disponível em <http://franciscanos.org.br/fraternidades/casas/curitiba/historia.php>. Acesso 14 de janeiro de 2006 as 09:33:05).



Figura 3.4.3.b: Igreja do Senhor Bom Jesus dos Perdões – detalhe da abóbada de aresta.



Figura 3.4.3.c: Igreja do Senhor Bom Jesus dos Perdões – detalhe do coro de madeira com órgão de tubos.

Os vitrais coloridos permitem farta iluminação do interior decorado por entalhes e estátuas nos nichos ao longo das paredes laterais e pintura decorativa das paredes e teto.

A composição arquitetônica da igreja é neogótica, característica da revivescência do estilo eclético do final do séc XIX. No neogótico, as características mais marcantes do estilo gótico são: a tendência vertical da construção, o uso de abóbadas de aresta e o emprego do arco ogival (ver figura 3.4.3.d).



Figura 3.4.3.d: Igreja do Senhor Bom Jesus dos Perdões – interior de composição neogótica.

Dentre as igrejas, esta é a maior, e com geometria mais complexa. As dimensões da igreja estão descritas no quadro abaixo (ver quadro 3.4.3.A) e os croquis do projeto arquitetônico nas figuras 3.4.3.e, 3.4.3.f e 3.4.3.g.

Tabela 3.4.3.A – Dimensões Igreja do Senhor Bom Jesus dos Perdões.

Característica arquitetônica	Valor medido Unidades SI
Largura máxima – incluindo capelas laterais	14,9
Comprimento máximo – medido da entrada até o altar	44,8
Altura máxima – medida do piso até o forro ponto mais alto do arco, abobada ou de forro plano.	12,3
Altura do altar – medida do piso do altar até o ponto mais alto do forro.	9,8
Volume total	5501,6
Área total do piso	482,3

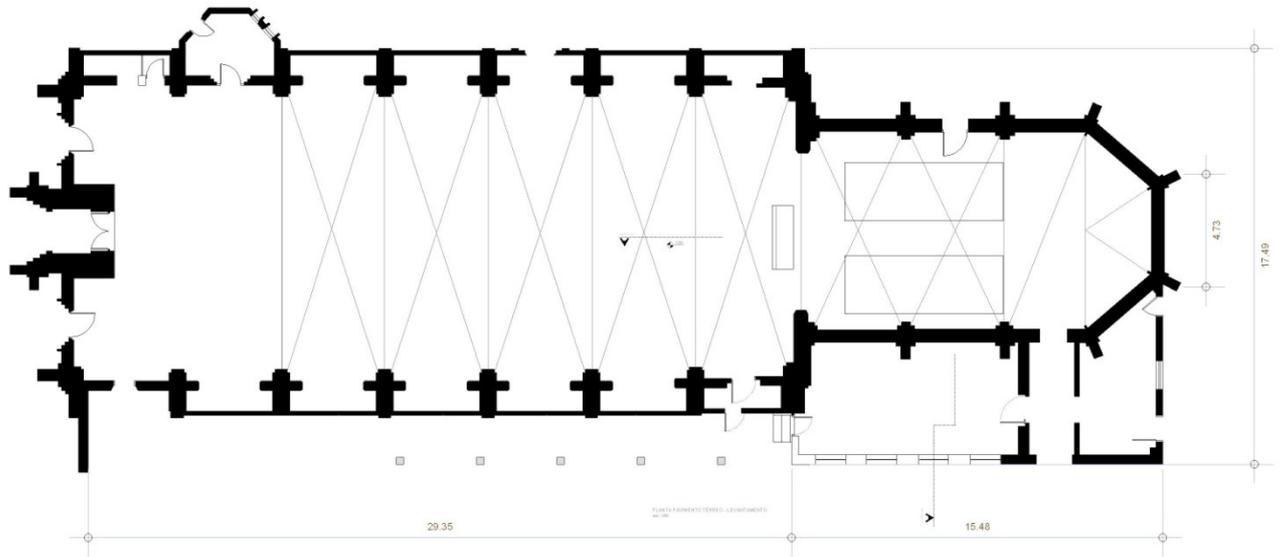


Figura 3.4.3.e: Igreja do Senhor Bom Jesus dos Perdões – croqui: planta da nave e presbitério.

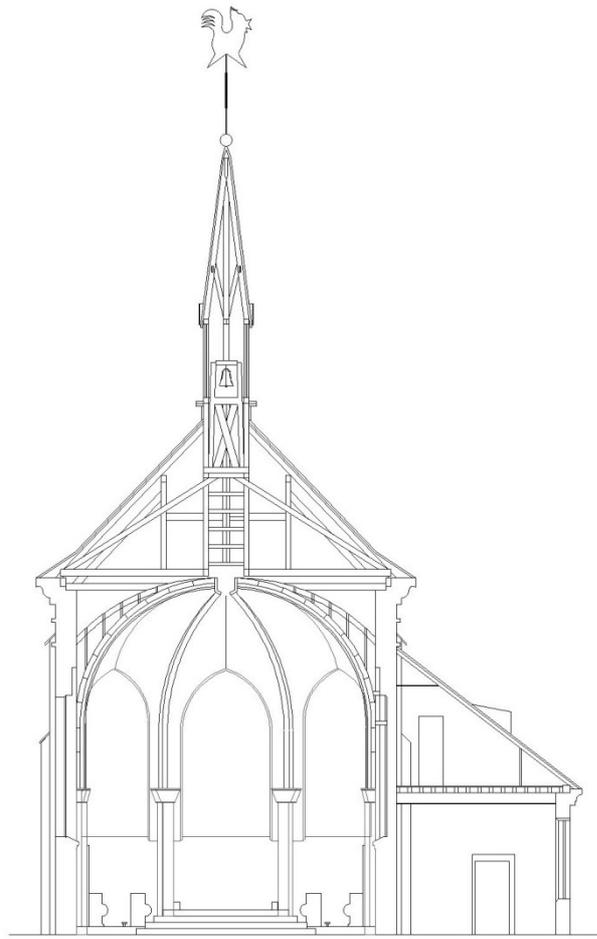


Figura 3.4.3.f: Igreja do Senhor Bom Jesus dos Perdões – croqui: corte transversal da nave em direção ao altar.



Figura 3.4.3.g: Igreja do Senhor Bom Jesus dos Perdões – croqui: corte longitudinal do edifício.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados para cada igreja, em duas seções a saber: 1) as medições e 2) as predições auxiliadas por programa de computador. Na seção de predições, os resultados ainda serão divididos em subseções conforme o tratamento dos dados e esse procedimentos serão explicados adiante.

4.1 MEDIÇÕES

Os resultados das medições nas igrejas serão apresentados nas seções seguintes e seus valores comparados aos valores ótimos, recomendados nas normas nacional (NBR 12179, 1992) e internacional (ISO 3382-1, 2006).

Em virtude da antiguidade desses edifícios os dados também serão confrontados com os obtidos por outros pesquisadores em estudos semelhantes. E por fim, os campos acústicos de cada sala serão analisados segundo suas características arquitetônicas.

4.1.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS

Na igreja da Ordem, foram realizadas 20 medições. Dez pontos para o microfone foram distribuídos pela igreja, dois no presbitério e oito na nave. Os pontos medidos no presbitério foram posicionados a 3 metros e a 6 metros de distância da fonte, sobre um eixo eqüidistante das paredes laterais. Observe que a capela mor não é exatamente simétrica, uma das paredes é levemente inclinada em relação à linha média, que vai da entrada da nave ao altar e possui diferentes aberturas.

A cada medição, o microfone foi afastado 3 metros em relação à sua posição anterior. Os pontos próximos à abertura entre a capela mor e a nave, foram evitados, pois não atendiam à distância mínima exigida em relação às paredes – “aproximadamente 2 metros de distância de qualquer superfícies refletiva” (ISO 3382-1, 2006, p. 5).

Na nave, existem duas fileiras de bancos dispostos simetricamente em relação à entrada da igreja. Quatro pontos foram distribuídos ao meio de cada fileira, totalizando oito pontos de medição. Na nave, o microfone também foi afastado, de três em três metros a cada medição (ver figura 4.1.1.a).

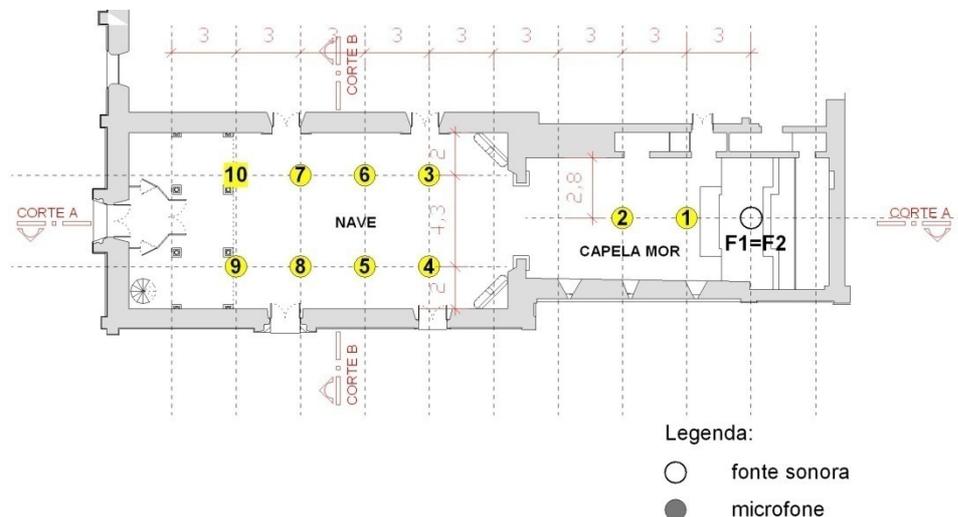


Figura 4.1.1.a: Posição dos pontos de medição – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

O Tempo de Reverberação foi medido para as seis bandas de oitava, de 125 Hz até 4000 Hz, para o conjunto de dez pontos em relação a duas posições da fonte. No caso específico desta igreja, a posição da fonte foi repetida em virtude da pequena largura da capela mor. Neste caso, mesmo com a repetição da posição da fonte, a

segunda medição foi considerada como um novo par combinado de fonte e receptor para o tratamento estatístico. Os resultados das medições para as duas posições de fonte estão descritos nos quadros 4.1.1.A e 4.1.1.B abaixo.

Tabela 4.1.1.A – Valores para o Tempo de Reverberação (T_{30}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto medido para o par, Fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	2,15	2,18	2,25	2,29	2,03	1,64
F1-P2	2,23	2,10	2,24	2,33	2,07	1,62
F1-P3	2,21	2,37	2,50	2,38	2,23	1,87
F1-P4	2,08	2,34	2,40	2,43	2,30	1,93
F1-P5	2,19	2,29	2,42	2,46	2,23	1,93
F1-P6	2,22	2,18	2,43	2,44	2,25	1,90
F1-P7	2,20	2,35	2,50	2,53	2,27	1,96
F1-P8	2,04	2,34	2,50	2,53	2,30	1,94
F1-P9	2,23	2,30	2,45	2,54	2,28	1,96
F1-P10	2,20	2,22	2,50	2,52	2,28	1,92
VALOR MÉDIO		2,22		2,43		2,05

Tabela 4.1.1.B – Valores para o Tempo de Reverberação (T_{30}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto medido para o par, Fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	2,15	2,17	2,21	2,24	2,02	1,68
F2-P2	2,17	2,11	2,22	2,33	2,05	1,61
F2-P3	2,20	2,40	2,49	2,43	2,23	1,89
F2-P4	2,05	2,38	2,45	2,45	2,32	1,95
F2-P5	2,27	2,31	2,40	2,51	2,31	1,91
F2-P6	2,26	2,16	2,45	2,43	2,30	1,93
F2-P7	2,20	2,31	2,48	2,51	2,27	1,94
F2-P8	2,11	2,32	2,52	2,53	2,30	1,95
F2-P9	2,23	2,27	2,43	2,55	2,26	1,96
F2-P10	2,21	2,23	2,47	2,47	2,23	1,92
VALOR MÉDIO		2,23		2,43		2,05

Uma média espacial (entre os pontos) foi calculada para cada par de bandas de oitava de forma a se obter um valor para as baixas, as médias e as altas frequências. A igreja apresenta uma resposta quase uniforme para as altas e as baixas frequências quando as médias são consideradas, apresentando uma diferença de 1 JND. Ainda em relação à média das frequências de 125 Hz e 250 Hz observa-se pequena diferença em relação às frequências médias (500 Hz e 1000 Hz), com uma diferença de apenas 2 JND. Este comportamento das baixas frequências pode ser explicado pela boa absorção do teto de madeira nestas bandas de oitava.

A resposta quase uniforme desta sala facilita sobremaneira a aplicação de sistemas elétrico-eletrônicos de reforço – sistemas de amplificação do som (SHANKLAND; SHANKLAND, 1971, p. 392).

Os valores medidos indicam um ligeiro aumento do Tempo de Reverberação com o aumento da distância relativa, entre a fonte e o receptor. Este aumento é da ordem de 2 JND (ver figura 4.1.1.b).

Quando comparados à teoria de Sabine, os resultados calculados reproduzem excepcionalmente bem os valores das baixas freqüências (valor calculado igual a 2,1 s), mas subestimam ligeiramente os valores medidos para as médias e altas freqüências (valores calculados de 2,0 s e 1,8 s, respectivamente), a predição de Sabine se mostra de excelente qualidade para esta sala com um erro aproximado de 3 JND para as altas freqüências

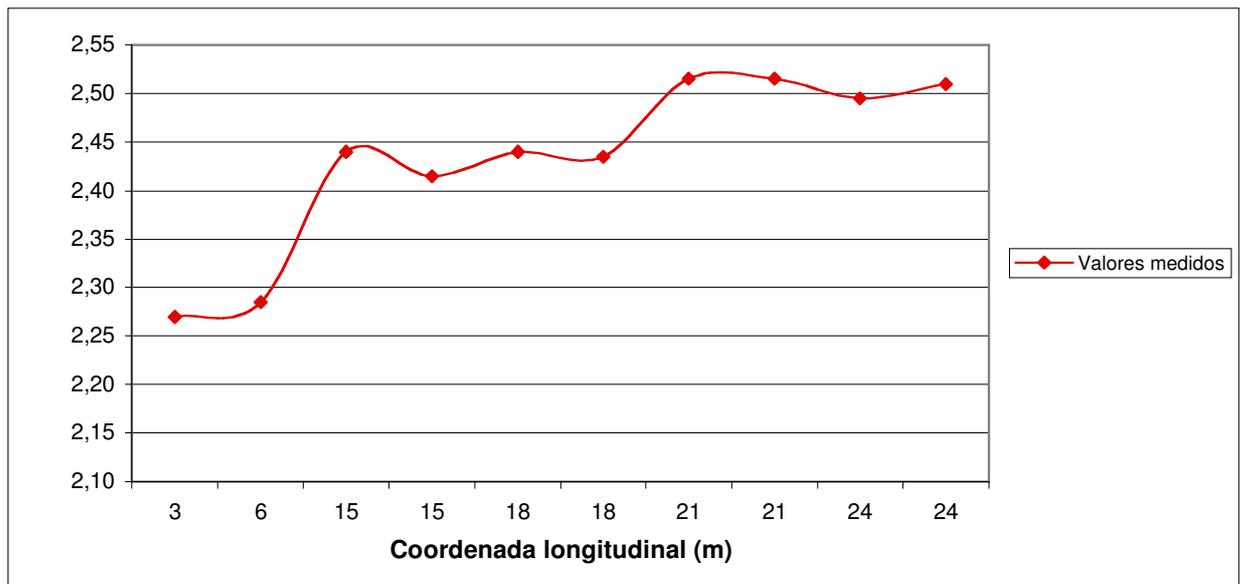


Figura 4.1.1.b: Variação do Tempo de Reverberação (TR) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), o tratamento dos dados foi similar ao dado para o Tempo de Reverberação. Os valores médios do EDT são coincidentes com as médias calculadas para o TR (ver quadros 4.1.1.C e 4.1.1.D).

Tabela 4.1.1.C – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto medido para o par, Fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,82	1,06	1,37	1,31	1,28	1,02
F1-P2	1,14	1,38	1,26	1,38	1,31	1,20
F1-P3	2,09	2,12	2,56	2,69	2,43	1,98
F1-P4	2,09	2,43	2,68	2,76	2,45	2,08
F1-P5	2,74	2,77	2,75	2,66	2,53	2,12
F1-P6	2,16	2,66	2,62	2,64	2,51	2,16
F1-P7	2,19	2,37	2,74	2,82	2,45	2,17
F1-P8	2,72	2,34	2,72	2,85	2,55	2,16
F1-P9	2,29	2,43	2,68	2,62	2,56	2,08
F1-P10	2,42	2,61	2,47	2,53	2,66	2,12
VALOR MÉDIO		2,14		2,41		2,09

Tabela 4.1.1.D – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto medido para o par, Fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	0,81	1,02	1,49	1,37	1,27	1,03
F2-P2	1,20	1,30	1,29	1,33	1,30	1,19
F2-P3	2,04	2,16	2,58	2,65	2,48	1,95
F2-P4	2,16	2,40	2,69	2,76	2,48	2,06
F2-P5	2,78	2,73	2,74	2,61	2,48	2,14
F2-P6	2,18	2,77	2,63	2,73	2,62	2,21
F2-P7	2,17	2,43	2,75	2,73	2,47	2,14
F2-P8	2,74	2,34	2,69	2,82	2,54	2,15
F2-P9	2,28	2,50	2,70	2,58	2,52	2,08
F2-P10	2,38	2,61	2,48	2,51	2,66	2,13
VALOR MÉDIO		2,15		2,41		2,10

Quando os valores individuais são comparados, os pontos 1 e 2, na capela mor, têm valores menores para o EDT, indicação da predominância do som direto nestes pontos (ver figura 4.1.1.c). Nos demais pontos, os valores de EDT são maiores, o que indica uma maior participação do som reverberante no decaimento inicial e revela boas condições acústicas (JORDAN, 1970).

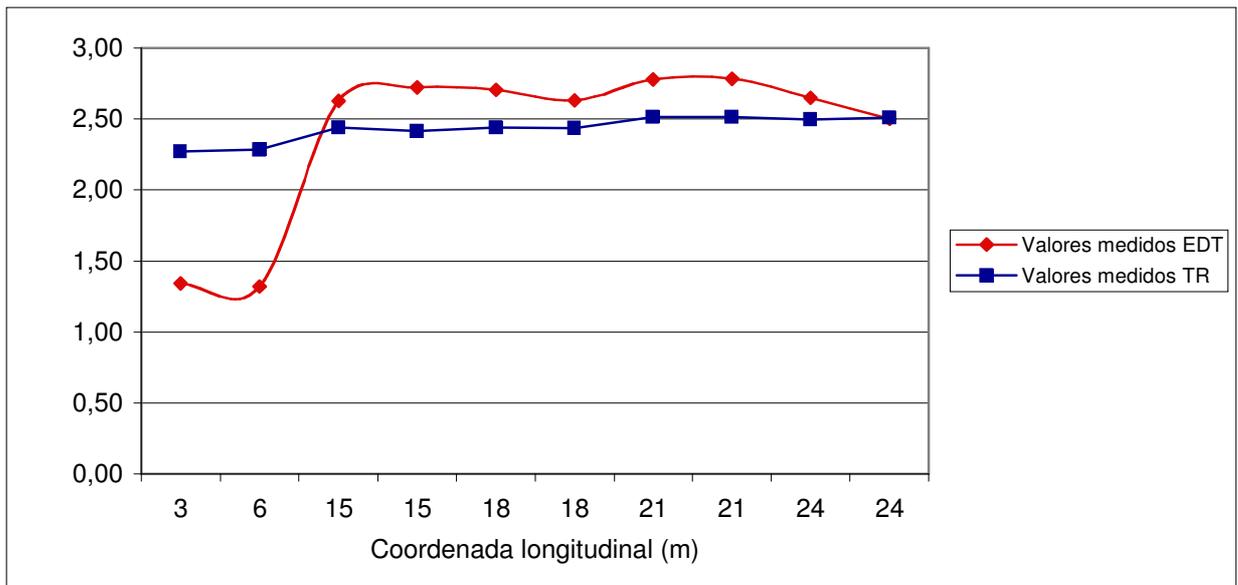


Figura 4.1.1.c: Variação do Tempo de Reverberação (T_{30}) e do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Os valores médios obtidos para os descritores objetivos de reverberação para a Igreja da Ordem de São Francisco das Chagas, são similares aos obtidos por Cirillo e Martellotta (2002) para a Igreja Vallisa. Uma pequena igreja romanesca da região da Apúlia cujo volume de 1520m^3 é muito similar ao da Igreja da Ordem.

Confrontando os dados medidos com os valores de referência normalizados no Brasil e internacionalmente, constata-se que, para a reverberação, os valores estão acima das recomendações para fala e bastante adequados à música, podendo-se dizer que a Igreja da Ordem tem excepcional qualidade acústica.

A julgar pelos baixos Tempos de Reverberação, é de se esperar que os indicadores de clareza (C_{80} e D_{50}) apresentem também valores que caracterizem, para esta sala, uma boa condição de clareza.

O valor médio obtido para o Índice de Clareza (C_{80}) é de quatro decibels negativos (-4,0 dB). Quando confrontado aos valores ótimos recomendados pela norma internacional (ver quadro 2.3.a), nota-se a adequação da média ao intervalo normalizado (ver quadros 4.1.1.E e 4.1.1.F).

Tabela 4.1.1.E – Valores para Clareza (C_{80}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	4,33	2,70	3,15	2,73	2,96	3,72
F1-P2	2,90	3,92	2,34	2,84	1,17	3,65
F1-P3	-3,15	-2,56	-6,13	-4,79	-3,25	-1,23
F1-P4	-4,84	-3,28	-4,24	-3,86	-2,88	-0,91
F1-P5	-3,18	-3,89	-6,68	-5,37	-6,05	-2,21
F1-P6	-4,98	-5,98	-6,59	-5,41	-3,01	-1,26
F1-P7	-5,28	-5,02	-5,46	-6,31	-5,33	-3,46
F1-P8	-7,60	-6,67	-7,26	-5,55	-3,34	-1,88
F1-P9	-7,11	-6,56	-6,04	-5,56	-5,16	-3,36
F1-P10	-6,92	-5,79	-5,33	-6,42	-4,28	-2,52
VALOR MÉDIO	-3,45		-4,00		-1,93	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	-7,60		-6,41		-6,05	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	4,33		2,94		3,72	

Tabela 4.1.1.F – Valores para Clareza (C_{80}), medidos em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	4,33	2,37	2,96	2,69	2,87	3,78
F2-P2	2,86	4,42	2,35	2,69	1,17	3,72
F2-P3	-3,21	-2,53	-5,48	-4,65	-3,31	-1,31
F2-P4	-4,85	-3,56	-4,17	-3,93	-2,39	-0,22
F2-P5	-3,22	-3,92	-6,50	-5,46	-5,40	-2,50
F2-P6	-5,17	-5,94	-6,86	-5,82	-3,28	-1,60
F2-P7	-5,25	-5,28	-5,25	-6,38	-5,49	-3,37
F2-P8	-7,62	-6,60	-7,08	-5,55	-3,46	-2,11
F2-P9	-6,91	-6,46	-5,90	-5,43	-5,28	-3,45
F2-P10	-6,91	-5,90	-5,71	-6,76	-4,09	-2,32
VALOR MÉDIO	-3,47		-4,01		-1,90	
VALOR MÍNIMO	-7,62		-7,08		-5,49	
VALOR MÁXIMO	4,42		2,96		3,78	

A clareza é, no entanto, um atributo muito sensível à posição e sua variação bastante significativa ao longo da sala. Os valores medidos para o Índice de Clareza (C_{80}) têm uma variação de 9 JND em função do distanciamento entre o receptor e a fonte sonora.

A clareza tende a diminuir com o aumento da distância em função da diminuição da influência do som direto na composição dos níveis energéticos nos primeiros 80 milissegundos da curva de decaimento (ver figura 4.1.1.d).

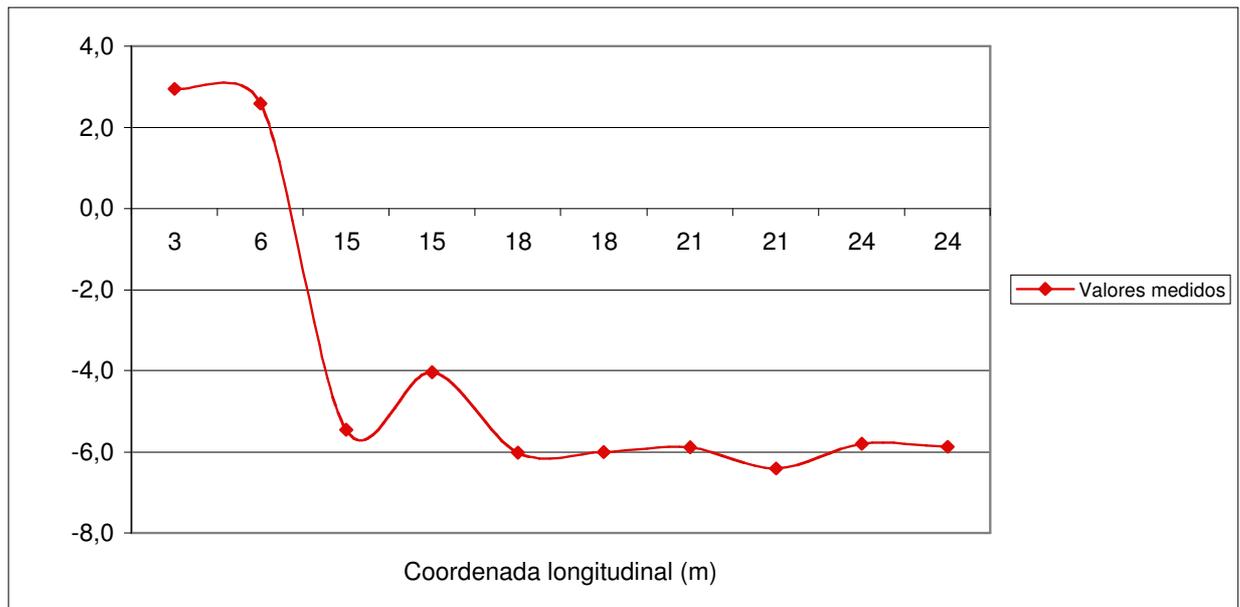


Figura 4.1.1.d – Variação da Clareza (C_{80}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

A Definição se assemelha à Clareza. O intervalo considerado para o cálculo contudo é mais curto, 50 ms e por isso, de uma reverberação pequena é necessária para que se atinja bons resultados. Os resultados medidos são descritos nos quadros 4.1.1.G e 4.1.1.H abaixo.

Tabela 4.1.1.G – Valores para a Definição (D_{50}), medidos em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,59	0,48	0,56	0,49	0,49	0,54
F1-P2	0,50	0,54	0,52	0,52	0,43	0,58
F1-P3	0,20	0,15	0,12	0,14	0,21	0,31
F1-P4	0,09	0,18	0,15	0,23	0,25	0,35
F1-P5	0,21	0,09	0,08	0,10	0,12	0,25
F1-P6	0,16	0,10	0,12	0,15	0,25	0,32
F1-P7	0,06	0,10	0,11	0,11	0,14	0,20
F1-P8	0,10	0,09	0,09	0,14	0,21	0,29
F1-P9	0,10	0,09	0,10	0,11	0,14	0,21
F1-P10	0,08	0,08	0,16	0,10	0,19	0,24
VALOR MÉDIO	0,20		0,21		0,29	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	0,08		0,09		0,17	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	0,54		0,53		0,52	

Tabela 4.1.1.H – Valores para a Definição (D_{50}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	0,58	0,47	0,56	0,50	0,48	0,56
F2-P2	0,50	0,55	0,52	0,51	0,43	0,57
F2-P3	0,20	0,16	0,13	0,15	0,21	0,31
F2-P4	0,10	0,17	0,15	0,23	0,28	0,40
F2-P5	0,20	0,09	0,10	0,11	0,14	0,26
F2-P6	0,15	0,10	0,10	0,14	0,23	0,30
F2-P7	0,06	0,10	0,12	0,11	0,13	0,20
F2-P8	0,10	0,09	0,09	0,14	0,21	0,28
F2-P9	0,11	0,09	0,10	0,12	0,14	0,20
F2-P10	0,09	0,08	0,13	0,09	0,19	0,26
VALOR MÉDIO	0,20		0,21		0,29	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	0,08		0,11		0,17	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	0,53		0,53		0,52	

Os valores das médias estão 2 JND ou 10% abaixo das recomendações da norma internacional para as baixas e médias frequências e cumpre os requisitos mínimos para as altas frequências.

Os valores dos pontos, tomados individualmente, demonstram excelentes resultados para as posições mais próximas da fonte, localizadas na capela mor. Na nave, os valores diminuem cerca de 8 JND para a maioria dos pontos (ver figura 4.1.1.e).

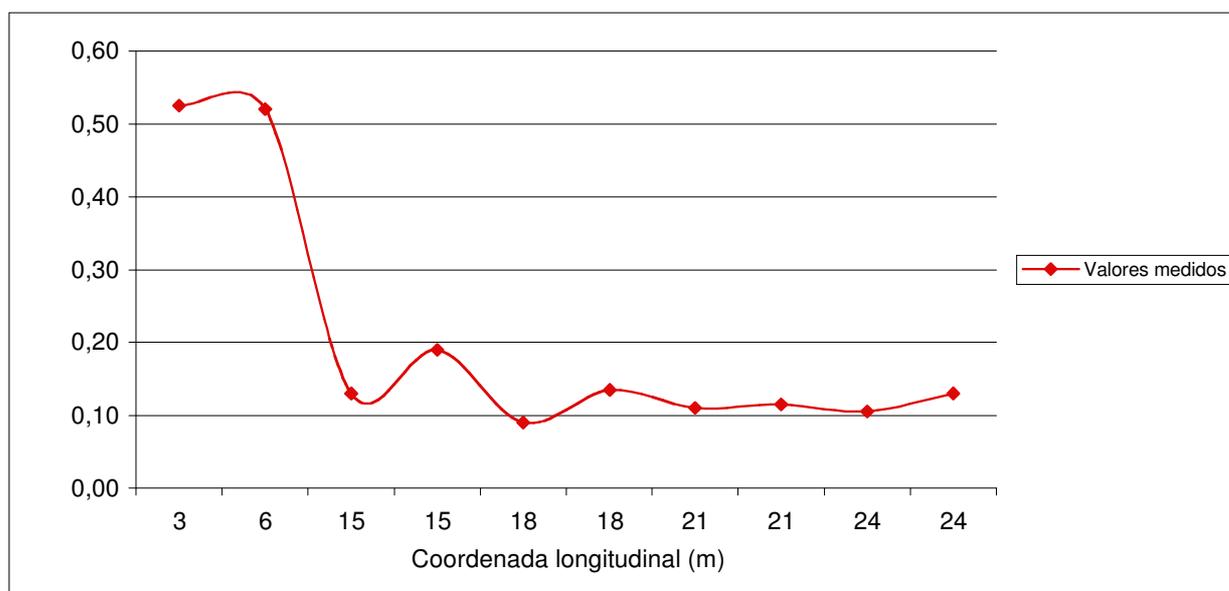


Figura 4.1.1.e – Valores para a Definição (D_{50}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Pode-se dizer que os descritores de clareza indicam duas condições acústicas diferentes para a sala. A capela mor apresenta resultados indicadores de boa clareza

tanto para a fala quanto para a música. Por sua vez, na nave, os resultados sugerem Clareza e Definição pobres.

Esta diferença pode ser explicada pelo fato de ser a capela mor, um espaço acoplado em relação à nave. A relação entre a largura da abertura de comunicação entre as salas e a profundidade da capela mor é 3,8 (maior que 0,6) e caracteriza o acoplamento (CARVALHO, 1995). Os espaços acoplados retêm parte da energia, retardando sua dispersão pelo outro espaço, influenciando assim os parâmetros dependentes das primeiras reflexões.

4.1.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO

As medições na Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito foram realizadas para 16 combinações de pontos, oito posições para o microfone, repetidas para duas posições da fonte.

Os pontos de recepção foram distribuídos pelas naves por uma malha regular de 5x5 metros, totalizando seis pontos na nave principal e dois pontos na nave lateral. Os pontos foram posicionados somente nas áreas dos assentos, o que excluiu as posições embaixo do coro junto à entrada principal da nave (ver figura 4.1.2.a).

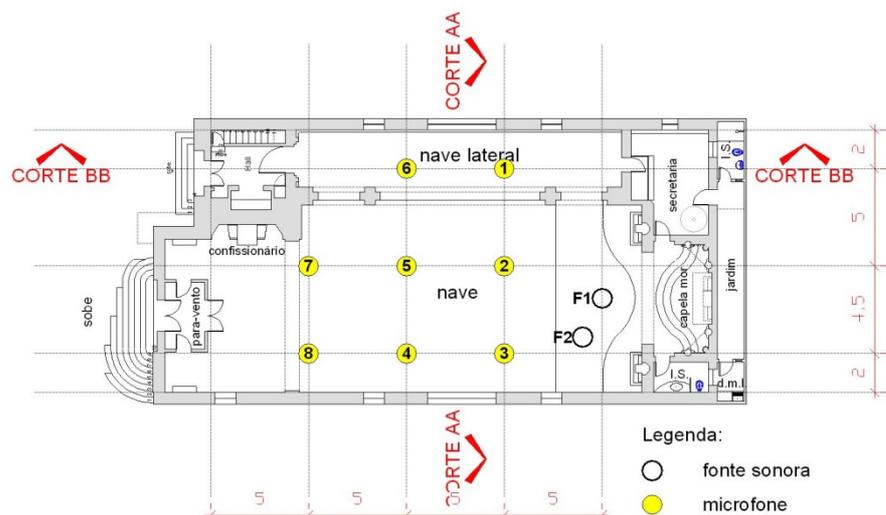


Figura 4.1.2.a: Posição dos pontos de medição – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

A igreja possui três fileiras de bancos, duas dispostas na nave principal e uma na nave lateral. As posições na área de assento da nave lateral têm algumas linhas de visão até o presbitério, obstruídas pelas colunas. Tanto o presbitério, quanto a nave

lateral caracterizam espaços acoplados. Na nave lateral a relação tem valor de 0,43 e para a capela mor 0,64.

O Tempo de Reverberação e demais descritores objetivos foram medidos para as seis bandas de oitava, de 125 Hz até 4000 Hz, e os resultados comentados separadamente, para cada posição da fonte. Os dados para o T_{30} estão descritos nos quadros 4.1.2.A e 4.1.2.B adiante.

Tabela 4.1.2.A – Valores para o Tempo de Reverberação (T_{30}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	3,05	2,99	3,29	3,18	2,94	2,44
F1-P2	2,83	3,05	3,32	3,16	2,89	2,40
F1-P3	3,00	3,17	3,35	3,12	2,91	2,32
F1-P4	2,86	3,05	3,37	3,21	2,96	2,48
F1-P5	2,92	3,15	3,32	3,17	2,96	2,46
F1-P6	3,04	2,98	3,27	3,23	2,96	2,43
F1-P7	2,97	3,15	3,28	3,20	3,01	2,48
F1-P8	2,93	3,03	3,36	3,26	3,03	2,39
VALOR MÉDIO	3,01		3,26		2,69	

Tabela 4.1.2.B – Valores para o Tempo de Reverberação (T_{30}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	3,06	3,02	3,23	3,21	2,94	2,38
F2-P2	3,17	3,04	3,23	3,14	3,00	2,43
F2-P3	2,94	2,93	3,31	3,21	2,96	2,48
F2-P4	3,03	3,05	3,28	3,21	3,02	2,50
F2-P5	2,64	3,01	3,31	3,32	3,00	2,45
F2-P6	2,98	2,99	3,34	3,14	2,97	2,41
F2-P7	2,84	3,11	3,39	3,21	2,98	2,42
F2-P8	2,87	3,07	3,31	3,20	2,97	2,48
VALOR MÉDIO	2,98		3,25		2,71	

A média espacial calculada para as baixas, as médias e as altas frequências são idênticas para as duas posições da fonte investigadas.

Em relação ao tempo obtido para as médias das bandas de 500 Hz e 1000 Hz, esta igreja apresenta uma resposta para as altas frequências (2000 e 4000 Hz) menos uniforme que as observadas na Igreja da Ordem. As diferenças encontradas aqui são de 4 JND para as bandas de 2000 Hz e 4000 Hz.

O piso e o forro de madeira exercem forte influência na absorção das faixas de 125 Hz e 250 Hz, tornando seus valores próximos aos das médias frequências com diferença de 2 JND.

Os tempos de reverberação foram apresentados (nas figuras 4.1.2.b, 4.1.2.c, 4.1.2.d e 4.1.2.e) para os pontos conforme a distância da fonte, ordenados de maneira crescente. Os pontos no eixo X dos gráficos correspondem, em ordem, aos pontos: **3,2,4,5,1,6,7, e 8** respectivamente.

Uma tendência de aumento do Tempo de Reverberação, em função do aumento da distância relativa entre a fonte e o receptor, não parece facilmente identificável. Observa-se que os pontos 1 e 6 (o quinto e o sexto pontos do gráfico), medidos na nave lateral, o comportamento parece contradizer a tendência de aumento do Tempo de Reverberação com o afastamento do receptor.

Para estes dois pontos, a redução no T_{30} pode ser explicada pelos efeitos de acoplamento espacial da nave lateral e do altar mor, além do sombreamento acústico sobre o ponto de número 1, produzido pelo pilar que divide os espaços (ver figura 4.1.2.b).

Novamente, a equação de Sabine reproduz melhor o valor das baixas e médias frequências, 2,8 e 2,9 segundos, valores subestimados em 1 e 2 JND respectivamente. Para altas frequências, a predição se mostra menos eficiente e alcança um resultado com 5 JND de diferença para menos.

Quanto ao Tempo de Decaimento Inicial (EDT), os valores médios são coincidentes com as médias calculadas para o TR (ver quadros 4.1.2.C e 4.1.2.D).

A comparação dos valores individuais demonstrou valores do EDT maiores que os medidos para o Tempo de Reverberação em todos os pontos com exceção do ponto 6. Isto caracteriza menor influência do som direto no decaimento inicial.

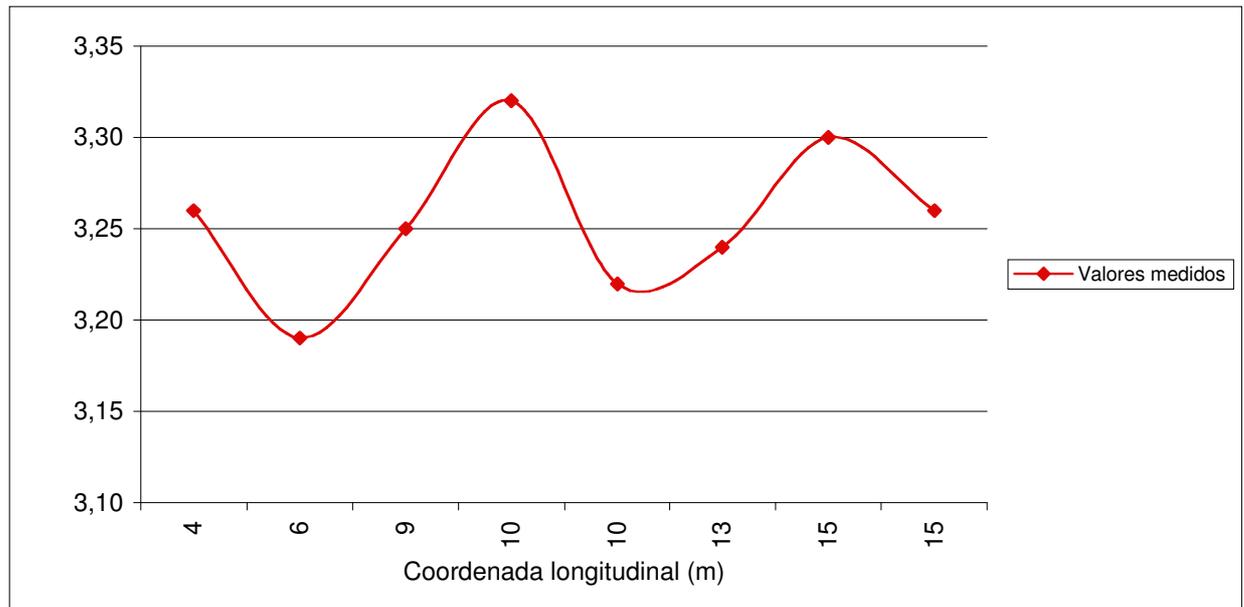


Figura 4.1.2.b: Variação do Tempo de Reverberação (T_{30}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Tabela 4.1.2.C – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	3,12	3,24	3,59	3,14	3,05	2,40
F1-P2	3,38	3,36	3,21	3,39	2,94	2,27
F1-P3	3,18	2,71	3,34	3,22	2,98	2,29
F1-P4	2,84	3,12	3,10	3,23	3,02	2,35
F1-P5	2,93	2,90	3,23	3,34	2,91	2,34
F1-P6	3,23	3,14	3,31	3,28	3,12	2,38
F1-P7	3,20	2,79	3,30	3,20	2,98	2,50
F1-P8	2,31	3,04	3,10	3,24	2,95	2,43
VALOR MÉDIO	3,03		3,26		2,68	

Tabela 4.1.2.D – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	2,75	3,05	3,50	3,11	3,17	2,48
F2-P2	2,57	3,05	3,48	3,37	2,86	2,20
F2-P3	2,37	2,88	3,28	3,38	2,96	2,25
F2-P4	2,81	2,94	3,36	3,24	2,97	2,33
F2-P5	3,48	3,31	3,45	3,18	2,95	2,34
F2-P6	3,12	3,21	3,10	2,93	3,02	2,31
F2-P7	2,85	3,01	3,03	3,61	3,28	2,47
F2-P8	2,95	3,03	3,42	3,36	3,22	2,55
VALOR MÉDIO	2,96		3,30		2,71	

Os resultados levam a crer no retardamento de parte das primeiras reflexões, utilizadas no cálculo deste parâmetro, pelos efeitos de acoplamento da capela mor, especialmente de sua cúpula, e da nave lateral, que funcionam como uma represa dos raios sonoros no seu interior (ver figura 4.1.2.c).

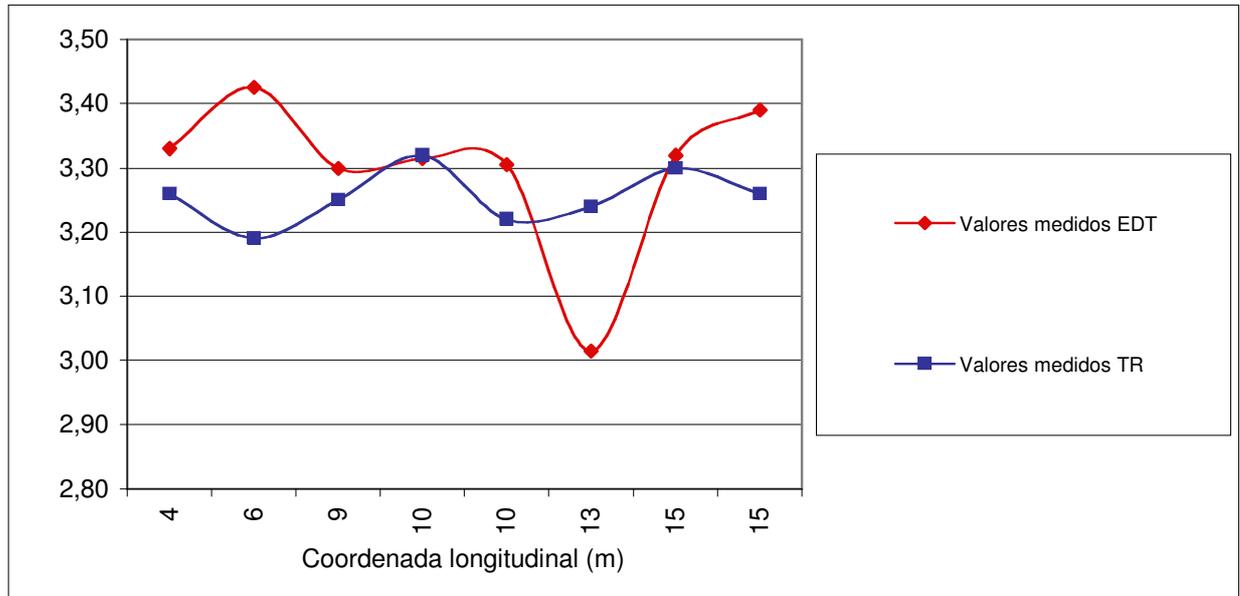


Figura 4.1.2.c: Variação do Tempo de Reverberação (T_{30}) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Observado o estado de ocupação da sala (sem audiência), os dados obtidos quando confrontados com os valores de referência, caracterizam uma sala com reverberação acima dos valores recomendados. Contudo, esta condição não deve comprometer a performance em situação normal de uso (com a sala ocupada). Estima-se (pelos métodos clássicos) que a ocupação total dos bancos, reduza o Tempo de Reverberação para valores próximos de 1 segundo, condição favorável à palavra falada em auditórios.

A respeito dos indicadores de clareza, a Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito, apresentou uma variação de 0,5 dB nas médias frequências para o Índice de Clareza C_{80} . Esta pequena variação, não observada na igreja anterior, é provocada pela mudança de posição da fonte sonora. As diferenças estão abaixo do limiar de percepção e o valor médio para as bandas de 500 Hz e 1000 Hz é de 5,4 decibels negativos para a fonte na posição 1 e de 4,9 decibels negativos para a fonte na posição 2 (ver quadros 4.1.2.E e 4.1.2.F).

Tabela 4.1.2.E – Valores para Clareza (C_{80}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	-2,81	-6,16	-5,44	-7,46	-6,85	-3,82
F1-P2	-3,00	-3,13	-4,68	-4,15	-3,25	-1,51
F1-P3	-2,44	-2,21	-3,32	-4,38	-4,20	-1,55
F1-P4	-4,92	-5,26	-6,55	-5,26	-4,25	-2,47
F1-P5	-4,72	-3,82	-5,50	-4,24	-3,69	-1,47
F1-P6	-4,77	-4,54	-5,91	-6,02	-4,84	-2,88
F1-P7	-4,95	-6,99	-5,96	-6,18	-5,49	-2,80
F1-P8	-4,35	-6,25	-6,74	-4,37	-4,97	-3,40
VALOR MÉDIO	-4,40		-5,39		-3,59	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	-6,00		-6,50		-5,30	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	-2,33		-3,85		-2,38	

Tabela 4.1.2.F – Valores para Clareza (C_{80}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	-0,86	-4,26	-4,99	-6,39	-5,06	-3,18
F2-P2	1,76	-3,11	-4,07	-3,52	-3,29	-1,20
F2-P3	-7,13	-4,16	-2,18	-2,75	-3,15	-1,66
F2-P4	-3,93	-7,64	-7,02	-5,52	-3,89	-2,75
F2-P5	0,18	-3,43	-3,21	-4,74	-4,50	-2,53
F2-P6	-1,12	-2,82	-6,11	-4,31	-3,72	-3,14
F2-P7	-8,13	-4,42	-7,02	-3,95	-4,13	-2,63
F2-P8	-6,05	-5,22	-6,25	-6,70	-5,76	-3,71
VALOR MÉDIO	-3,77		-4,92		-3,39	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	-6,30		-6,50		-4,70	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	-0,68		-2,47		-2,25	

Os valores medidos para o Índice de Clareza têm uma variação de 10 JND para fonte na posição 1 e 8 JND para a posição 2, em função do distanciamento entre o receptor e a fonte sonora.

A sensibilidade do Índice de Clareza à posição da fonte pode ser observada comparando-se os valores médios na figura 4.2.1.d abaixo, em que o deslocamento da fonte é feito para baixo e para a esquerda para a posição do púlpito de leitura (ver figura 4.1.2.d).

Os valores da clareza têm um aumento de aproximadamente 1 dB para os pontos, com exceção dos pontos 4 e 8 (no gráfico, o terceiro e o último pontos do eixo das distâncias) posicionados próximos à parede.

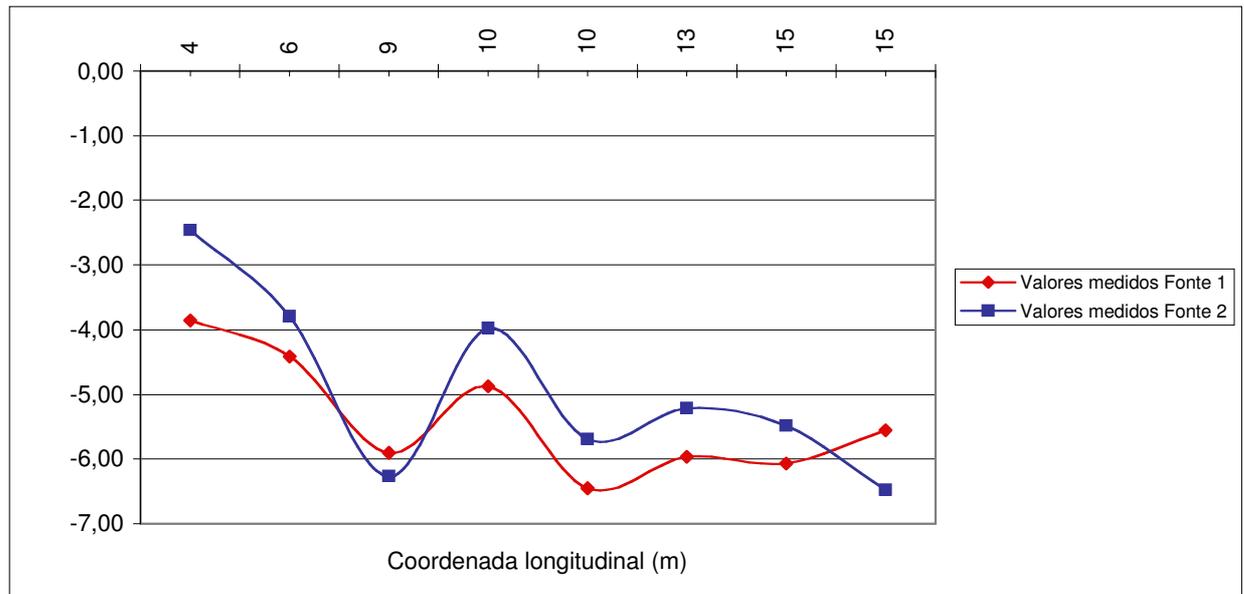


Figura 4.1.2.d – Variação da Clareza (C_{80}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Nestes dois pontos, os baixos valores da clareza podem ser causados pela redução das primeiras reflexões. A parede mais próxima (parede à direita, no sentido entrada-altar), pode funcionar como um espelho, para esta combinação de pontos, direcionando as primeiras reflexões para os receptores de número 5,1, 6 e 7 especialmente.

De forma análoga é o comportamento da Definição (D_{50}). Os valores das médias, entre as duas posições da fonte, têm diferença de 2 JND. A definição está abaixo dos valores ótimos para a média de todas as bandas de oitava. Os resultados medidos são descritos nos quadros 4.1.2.G e 4.1.2.H na página adiante.

Tabela 4.1.2.G – Valores para Definição (D_{50}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,20	0,13	0,15	0,09	0,09	0,18
F1-P2	0,21	0,24	0,21	0,19	0,23	0,30
F1-P3	0,26	0,27	0,20	0,18	0,19	0,31
F1-P4	0,17	0,16	0,12	0,15	0,17	0,23
F1-P5	0,15	0,19	0,11	0,17	0,21	0,29
F1-P6	0,20	0,19	0,09	0,13	0,17	0,22
F1-P7	0,07	0,04	0,12	0,10	0,15	0,25
F1-P8	0,19	0,14	0,12	0,16	0,13	0,22
VALOR MÉDIO	0,18		0,14		0,21	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	0,06		0,11		0,14	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	0,27		0,20		0,27	

Tabela 4.1.2.H – Valores para Definição (D_{50}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	0,42	0,18	0,17	0,11	0,14	0,23
F2-P2	0,49	0,19	0,21	0,22	0,21	0,32
F2-P3	0,10	0,19	0,33	0,28	0,23	0,31
F2-P4	0,24	0,09	0,07	0,14	0,21	0,25
F2-P5	0,34	0,15	0,17	0,14	0,16	0,24
F2-P6	0,38	0,17	0,10	0,15	0,19	0,22
F2-P7	0,07	0,11	0,09	0,22	0,20	0,24
F2-P8	0,09	0,14	0,09	0,07	0,12	0,19
VALOR MÉDIO	0,21		0,16		0,22	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	0,09		0,08		0,16	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	0,34		0,31		0,27	

Os valores dos pontos, tomados individualmente, demonstram resultados compatíveis com uma clareza pobre para todas as posições. O ponto 3 (o primeiro do gráfico), apresenta para a posição 2 da fonte sonora, o melhor valor médio (ver figura 4.1.2.e). Contudo, ao ser comparado aos valores ótimos, caracteriza-se como minimamente satisfatório. Os pontos têm uma pequena flutuação dos valores de D_{50} em relação ao distanciamento do receptor. A variação máxima na sala é de 4JND.

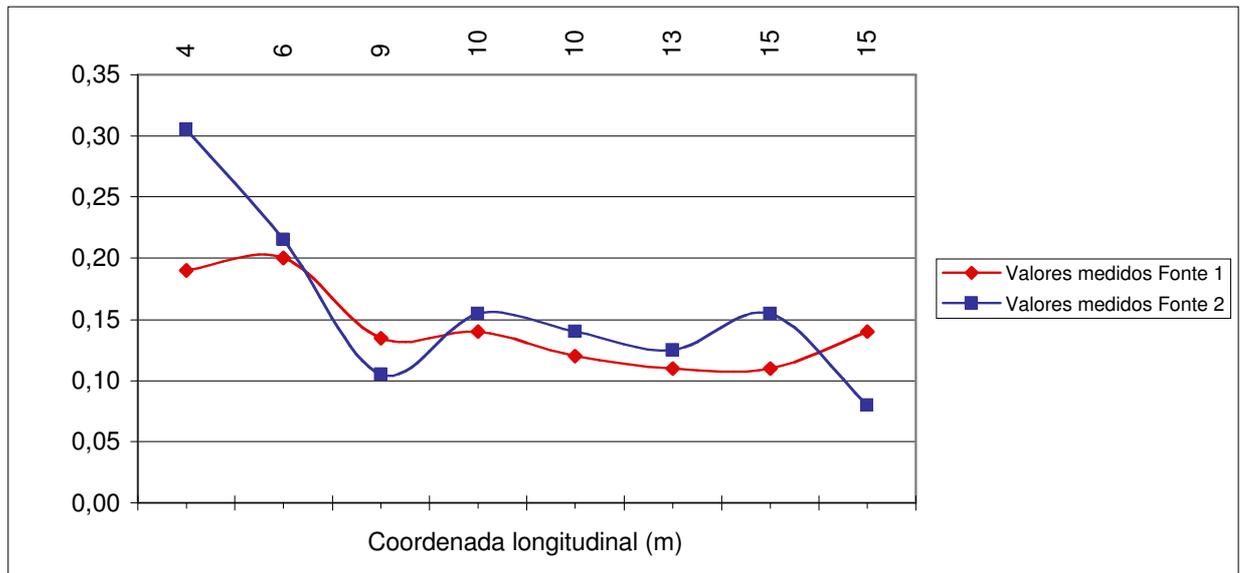


Figura 4.1.1.e – Variação da Definição (D_{50}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Os descritores de clareza indicam condições acústicas pouco satisfatórias para a sala. Tanto para a fala quanto para música, os valores obtidos nas medições indicam uma sala com clareza pobre para a maioria dos pontos.

Nos pontos com os mais altos valores para C_{80} os resultados, mesmo dentro da faixa de recomendação, concentram-se mais próximos do limite inferior do intervalo apresentado de valores típicos para salas de concerto e multiuso de até 25.000 m³. As condições para a fala são menos favoráveis dentre os pontos medidos, apenas atendem minimamente às exigências normalizadas.

4.1.3 IGREJA DO SENHOR BOM JESUS DOS PERDÕES

Foram realizadas 22 medições na Igreja do Bom Jesus dos Perdões. Dez pontos para o microfone foram distribuídos pela nave da igreja, e 1 no presbitério. A fonte sonora foi posicionada em dois pontos F1 e F2 (ver figura 4.1.3.a). O ponto medido no presbitério foi posicionado a 5 metros de distância da fonte, sobre o eixo de simetria do edifício.

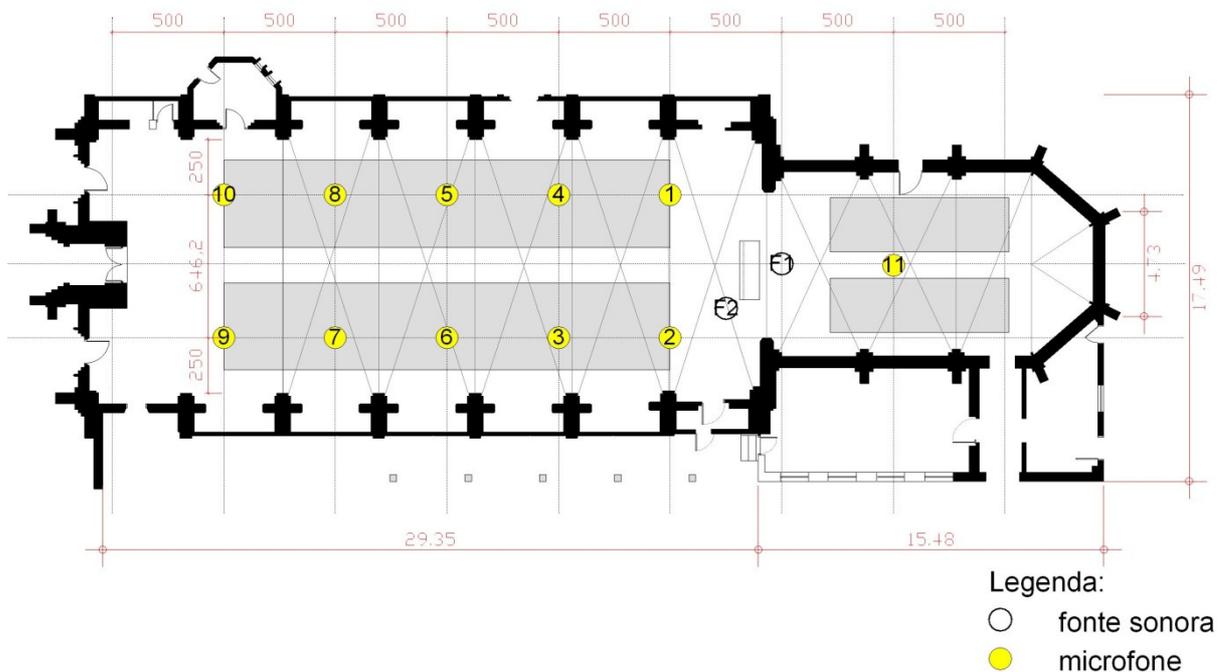


Figura 4.1.3.a: Posição dos pontos de medição – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Os pontos de recepção foram dispostos simetricamente em relação à entrada da igreja, totalizando cinco pontos distribuídos ao longo de cada fileira de bancos. Em-

bora seja uma sala simétrica, optou-se por efetuar medições nos dois lados do eixo de simetria.

Essas posições para o microfone estão a dois metros e meio das capelas laterais e foram ajustadas sobre uma malha de 5 metros para cada afastamento no sentido longitudinal (do altar para a porta de entrada).

O Tempo de Reverberação foi medido para as seis bandas de oitava, de 125 Hz até 4000 Hz, para o conjunto de onze pontos em relação a duas posições da fonte. Os resultados das medições para as duas posições de fonte estão descritos nos quadros 4.1.3.A e 4.1.3.B abaixo.

Tabela 4.1.3.A – Valores para o Tempo de Reverberação (T_{30}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	4,29	4,38	4,57	4,61	4,03	2,94
F1-P2	3,97	4,67	4,58	4,65	4,00	2,90
F1-P3	4,28	4,78	4,58	4,56	4,05	3,01
F1-P4	4,53	4,69	4,65	4,65	4,08	3,02
F1-P5	4,63	4,62	4,74	4,55	4,10	3,06
F1-P6	4,35	4,72	4,62	4,64	4,09	3,03
F1-P7	4,39	4,66	4,61	4,58	4,05	3,07
F1-P8	4,66	5,05	4,62	4,66	4,05	2,94
F1-P9	4,54	4,79	4,61	4,67	4,02	3,03
F1-P10	4,39	4,72	4,62	4,59	4,18	3,13
F1-P11	4,65	4,63	4,53	4,52	3,89	2,81
VALOR MÉDIO		4,56		4,61		3,52

Tabela 4.1.3.B – Valores para o Tempo de Reverberação (T_{30}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	4,36	4,40	4,53	4,54	4,00	2,84
F2-P2	4,00	4,43	4,45	4,62	4,00	2,81
F2-P3	4,95	5,19	4,75	4,66	4,10	2,98
F2-P4	4,77	5,21	4,81	4,59	4,08	3,01
F2-P5	4,55	5,14	4,69	4,57	4,05	2,99
F2-P6	4,44	5,37	4,75	4,70	4,12	3,02
F2-P7	5,06	5,78	4,75	4,80	4,13	3,04
F2-P8	4,52	5,26	4,84	4,69	3,99	3,03
F2-P9	4,29	5,02	4,76	4,58	4,09	3,03
F2-P10	4,68	5,00	4,57	4,61	4,14	3,10
F2-P11	4,49	4,48	4,45	4,52	4,00	2,93
VALOR MÉDIO		4,79		4,65		3,52

Uma análise dos valores médios indicou uma resposta quase uniforme para as baixas e as médias frequências cuja diferença é inferior a 1 JND. A semelhança do

Tempo de Reverberação para essas bandas de oitava pode ser explicada pela grande quantidade de madeira empregada na construção, no piso, nos bancos e nos entalhes que forram as paredes e coro.

Por sua vez, as altas freqüências (2000 Hz e 4000 Hz) têm uma diferença na média de 4 JND para menos. Levando-se em conta, as características dos materiais empregados na construção, não se deve desprezar a influência do volume de ar ($5501,6 \text{ m}^3$) na absorção de parte da energia sonora, especialmente na freqüência de 4000 Hz.

Quando comparados à teoria de Sabine, os resultados calculados são muito próximos aos medidos para as freqüências centrais. Os valores são subestimados em menos de 1 JND (menos de 0,23 segundo) Os cálculos para as baixas e altas freqüências subestimam os valores reais, sendo mais precisos para as baixas (2 JND de diferença) que para as altas freqüências (3 JND de diferença).

Os valores medidos indicam um aumento do Tempo de Reverberação com o aumento da distância relativa, entre a fonte e o receptor. A diferença entre o máximo e o mínimo é inferior a 2 JND para esta sala (ver figura 4.1.3.b).

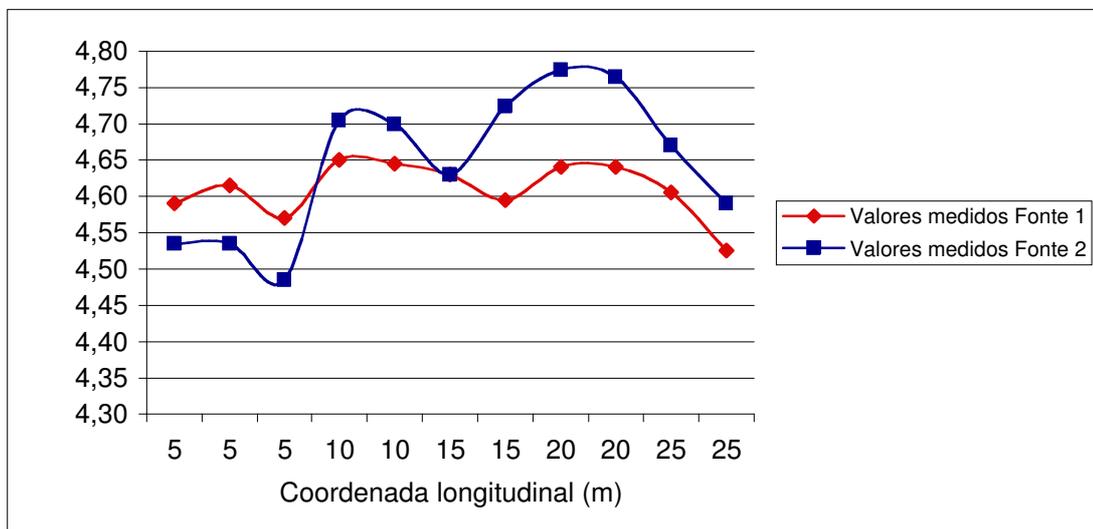


Figura 4.1.3.b: Variação do Tempo de Reverberação (T_{30}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Uma observação deve ser feita para o terceiro ponto do gráfico acima (com distância de 5 metros da fonte sonora). Trata-se do microfone posicionado na capela mor. Esta capela tem suas paredes revestidas com painéis de madeira e relação de aco-

plamento com o volume principal da nave ($c/l > 0,6$) o que explica a diferença nos valores medidos à mesma distância.

Para o outro descritor de reverberação, o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), os valores foram dispostos em dois quadros, um para cada posição da fonte e os valores comparados com os do Tempo de Reverberação (ver quadros 4.1.3.C e 4.1.3.D).

Tabela 4.1.3.C – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	4,10	4,73	4,21	4,46	3,68	2,60
F1-P2	5,17	4,17	4,68	4,30	3,89	2,53
F1-P3	4,52	4,93	4,89	4,99	4,20	2,93
F1-P4	4,27	5,04	4,83	4,71	4,13	3,00
F1-P5	5,01	5,22	4,80	4,90	4,33	3,08
F1-P6	4,17	5,04	4,84	4,81	4,20	3,13
F1-P7	4,10	5,12	5,06	5,09	4,45	3,23
F1-P8	4,53	5,08	4,89	5,17	4,54	3,25
F1-P9	4,61	5,05	5,22	5,12	4,41	3,30
F1-P10	4,78	5,66	5,28	5,30	4,42	3,25
F1-P11	2,74	3,51	2,93	3,63	2,95	2,02
VALOR MÉDIO	4,62	4,73	4,73	4,73	3,52	3,52

Tabela 4.1.3.D – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	3,91	4,15	4,35	4,06	3,60	2,21
F2-P2	3,72	4,30	4,68	4,36	3,66	2,24
F2-P3	4,90	5,37	5,02	4,55	4,06	2,61
F2-P4	4,09	5,06	4,96	4,84	3,98	2,58
F2-P5	3,74	5,47	4,82	4,79	4,22	2,95
F2-P6	4,06	5,70	4,86	4,85	4,18	2,84
F2-P7	4,15	5,31	4,94	4,71	4,24	3,02
F2-P8	4,49	4,98	5,23	4,75	4,47	3,05
F2-P9	4,41	4,94	4,79	5,06	4,40	3,07
F2-P10	4,42	5,10	4,95	4,98	4,16	3,16
F2-P11	4,08	4,07	3,95	4,19	3,51	2,27
VALOR MÉDIO	4,56	4,56	4,71	4,71	3,39	3,39

Entre as duas posições da fonte, os dados não apresentam diferenças sensíveis para as médias frequências, a diferença entre as médias é menor que 0,23 segundo, isto é menos de 1 JND para as frequências centrais.

Os valores médios do EDT também não apresentam diferenças significativas quando comparadas às médias calculadas para o Tempo de Reverberação para as altas e médias frequências.

Quando os valores individuais do EDT são comparados aos do Tempo de Reverberação, observa-se que na maioria dos pontos os dados são muito próximos. Os valores do Decaimento Inicial são menores nos pontos mais próximos à fonte sonora, em virtude da predominância do som inicial.

Nos demais pontos os valores do EDT são maiores, mas, a diferença não ultrapassa o limiar de percepção o que garante boa distribuição do som inicial (som direto e primeiras reflexões) ao longo de toda a sala. Esse é sem dúvida um bom indicador da qualidade acústica da sala pois implica numa boa distribuição energética (ver figura 4.1.3.c).

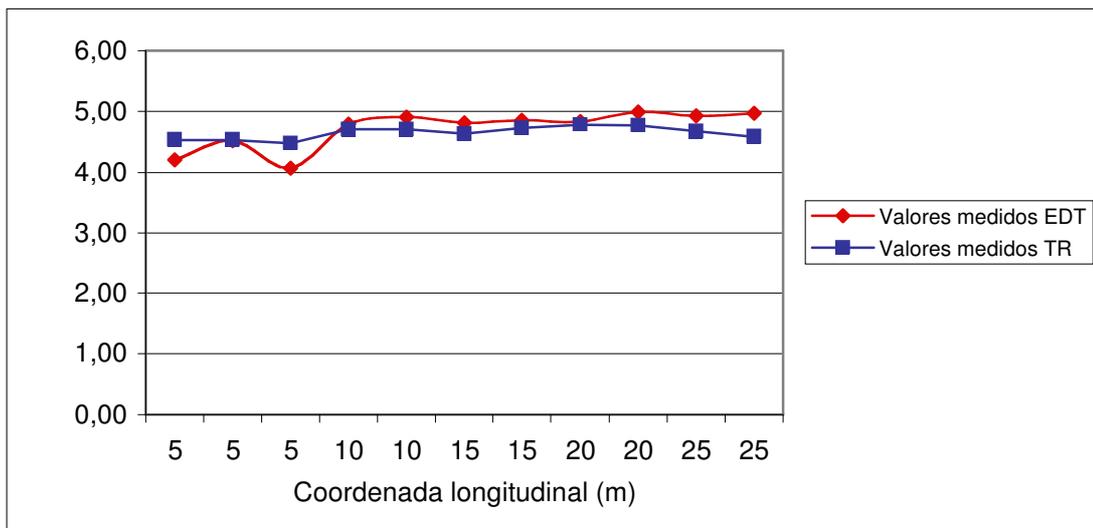


Figura 4.1.3.c: Variação do Tempo de Reverberação (T_{30}) e do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja do Bom Jesus dos Perdões

Embora os valores do Tempo de Reverberação e do Tempo de Decaimento Inicial sejam muitos altos e não sejam adequados à fala e à música segundo as recomendações da norma internacional, numa sala com este volume, o efeito da audiência (ocupação) não pode ser desprezado.

Estimativas utilizando a teoria de Sabine, indicam que o Tempo de Reverberação, com total ocupação dos bancos, passa a ser de 1,2 s, o que torna esta igreja adequada para seus usos. Neste caso a boa difusão sonora ao longo da nave deve garantir boa acústica a esta igreja.

Em decorrência dos altos Tempos de Reverberação, os indicadores de clareza (C_{80} e D_{50}) apresentaram valores baixos, que caracterizaram para esta sala, uma condição insatisfatória de clareza. Os valores médios obtidos para o Índice de Clareza (C_{80}) estão abaixo do mínimo recomendado (ver quadros 4.1.3.E e 4.1.3.F).

Tabela 4.1.3.E – Valores para Clareza (C_{80}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	-6,56	-5,71	-3,20	-4,52	-1,59	1,58
F1-P2	-7,34	-6,63	-3,83	-4,33	-5,02	-2,80
F1-P3	-6,79	-6,92	-6,46	-6,26	-5,99	-4,12
F1-P4	-6,89	-9,60	-6,81	-6,29	-5,37	-3,19
F1-P5	-8,28	-7,66	-8,15	-8,21	-8,46	-5,48
F1-P6	-7,43	-7,41	-7,98	-9,13	-7,74	-4,60
F1-P7	-6,60	-6,47	-10,34	-9,94	-8,12	-5,93
F1-P8	-7,64	-6,95	-9,01	-9,84	-8,44	-5,75
F1-P9	-8,36	-9,24	-9,31	-10,05	-9,49	-5,77
F1-P10	-7,49	-10,26	-9,70	-10,70	-9,48	-5,72
F1-P11	-2,80	-2,36	-0,50	-1,66	0,37	1,96
VALOR MÉDIO	-7,06		-7,10		-4,96	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	-8,88		-10,20		-7,63	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	-2,58		-1,08		1,17	

Tabela 4.1.3.F – Valores para Clareza (C_{80}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	-4,85	-3,19	-0,15	0,26	-0,73	1,72
F2-P2	-3,88	2,03	0,75	0,97	1,71	4,11
F2-P3	-4,14	-5,88	-5,33	-4,96	-2,84	-0,05
F2-P4	-3,01	-6,37	-4,88	-4,89	-4,25	-1,01
F2-P5	-3,24	-5,93	-7,21	-6,31	-4,39	-3,39
F2-P6	-7,11	-6,14	-6,75	-7,99	-5,21	-3,70
F2-P7	-7,76	-6,93	-8,61	-8,39	-7,33	-4,78
F2-P8	-6,05	-9,01	-8,31	-8,35	-6,93	-4,61
F2-P9	-5,53	-8,06	-8,02	-9,81	-8,05	-4,37
F2-P10	-6,31	-7,49	-9,15	-8,37	-8,21	-5,31
F2-P11	-4,91	-5,88	-3,68	-3,36	-2,48	-0,62
VALOR MÉDIO	-5,44		-5,57		-3,21	
VALOR MÉDIO MÍNIMO	-7,53		-8,92		-6,76	
VALOR MÉDIO MÁXIMO	-0,93		0,86		2,91	

As médias espaciais demonstraram valores muito próximos para as baixas e as médias frequências. Esta semelhança foi observada anteriormente para os parâmetros de reverberação. O aumento da clareza para as altas frequências é uma decorrência da diminuição da reverberação nessas bandas de oitava.

A distribuição bastante homogênea da energia sonora, responsável pela pequena variação do tempo de reverberação ao longo da sala é também responsável por uma menor variação dos descritores de clareza na Igreja do Bom Jesus. A variação de 9JND nas médias freqüências é relativamente menor para esta igreja, cujo volume é de duas a mais de três vezes maior que os volumes das Igrejas da Ordem III de São Francisco das Chagas e de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

A redução da clareza com o aumento da distância dos pontos em relação à fonte sonora está descrita na figura 4.1.3.d abaixo. Observe que o terceiro ponto do gráfico corresponde ao ponto 11 medido na capela mor. O afastamento da fonte da posição 1, dentro da capela, para a posição 2 na nave principal, implica na redução do som inicial e conseqüentemente da clareza.

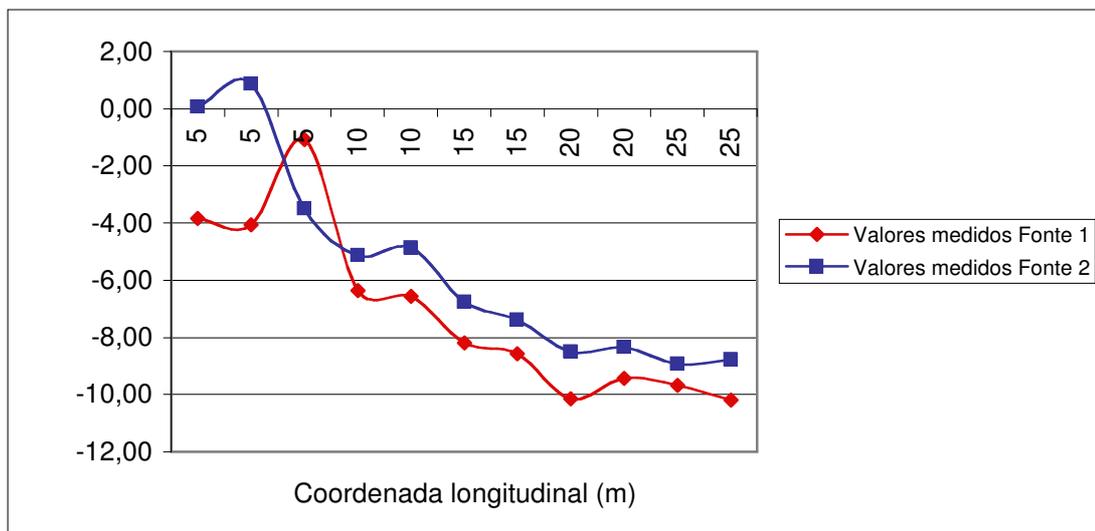


Figura 4.1.3.d – Variação da Clareza (C_{80}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja do Bom Jesus dos Perdões

Da mesma forma que a clareza, nesta sala a definição tem melhores resultados nas altas freqüências. Para a definição a diferença entre as médias foi maior. Tomando-se as freqüências centrais como parâmetro de referência, as diferenças são de 4 JND para as baixas e 12 JND para as altas freqüências. Os resultados medidos foram descritos nos quadros 4.1.3.G e 4.1.3.H.

Tabela 4.1.3.G – Valores para a Definição (D_{50}), medidos em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto medido para o par, fonte-receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,14	0,08	0,23	0,21	0,33	0,49
F1-P2	0,11	0,08	0,21	0,19	0,13	0,21
F1-P3	0,13	0,07	0,12	0,09	0,13	0,16
F1-P4	0,10	0,07	0,11	0,12	0,14	0,21
F1-P5	0,06	0,06	0,08	0,07	0,08	0,14
F1-P6	0,08	0,07	0,07	0,06	0,08	0,13
F1-P7	0,08	0,11	0,05	0,04	0,07	0,11
F1-P8	0,12	0,06	0,07	0,05	0,07	0,12
F1-P9	0,08	0,05	0,06	0,05	0,05	0,14
F1-P10	0,13	0,07	0,04	0,04	0,06	0,13
F1-P11	0,20	0,20	0,29	0,31	0,38	0,51
VALOR MÉDIO	0,10		0,12		0,18	

Tabela 4.1.3.H – Valores para a Definição (D_{50}) medido em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto medido (combinação fonte-receptor - F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	0,19	0,24	0,35	0,39	0,34	0,46
F2-P2	0,26	0,60	0,49	0,49	0,54	0,68
F2-P3	0,20	0,15	0,19	0,18	0,27	0,40
F2-P4	0,20	0,12	0,17	0,13	0,16	0,29
F2-P5	0,16	0,13	0,06	0,09	0,14	0,17
F2-P6	0,10	0,10	0,09	0,08	0,13	0,17
F2-P7	0,08	0,08	0,06	0,06	0,09	0,16
F2-P8	0,17	0,09	0,06	0,05	0,09	0,15
F2-P9	0,12	0,06	0,06	0,04	0,08	0,18
F2-P10	0,16	0,12	0,07	0,07	0,07	0,15
F2-P11	0,21	0,12	0,21	0,19	0,22	0,31
VALOR MÉDIO	0,17		0,16		0,24	

Ao comparar os resultados médios entre as duas fontes, a variação é quase imperceptível para a maioria dos pontos na nave principal, resultado da boa difusão sonora da sala. As diferenças são significativas nos pontos mais próximos da fonte sonora (até 10 metros) especialmente para o ponto 1 e 2, para os quais a aproximação da fonte (mudança da posição 1 para a 2) garante maior quantidade de som direto. (ver figura 4.1.3.e).

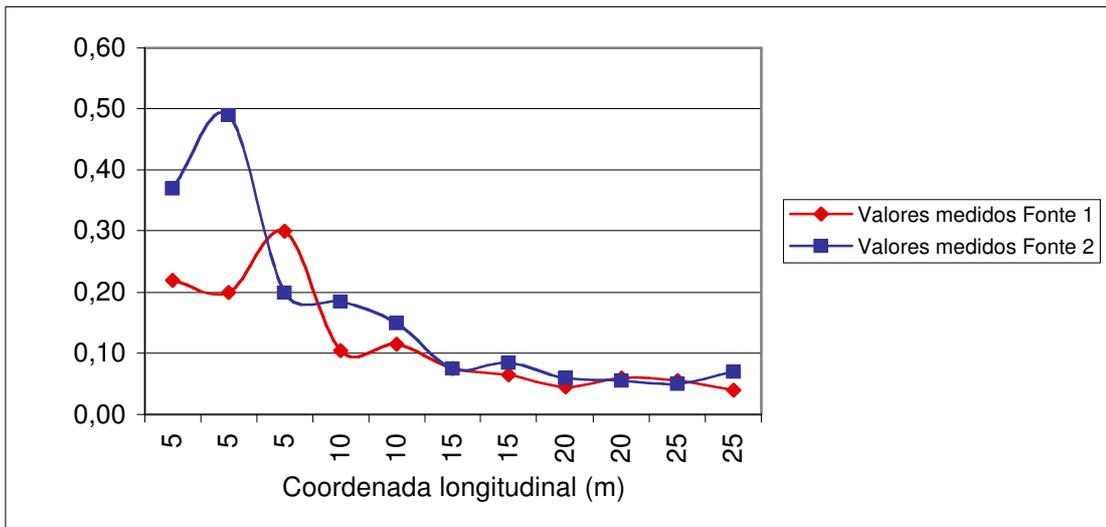


Figura 4.1.3.e – Variação da Definição (D_{50}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor – Igreja do Bom Jesus dos Perdões

A capela mor tem uma condição acústica de clareza e definição privilegiada. Isto se deve aos efeitos de acoplamento espacial do presbitério e da proximidade dos receptores à fonte sonora.

Na nave principal estas condições se repetem para as primeiras fileiras de bancos (pontos 1 e 2). Nos pontos mais afastados, a clareza e a definição são pobres e pioram com a distancia até 15 metros de afastamento, a partir do qual o campo sonoro se torna relativamente uniforme.

4.2 PREDIÇÕES

Os resultados obtidos por predições auxiliadas por programa de computador foram separados em subseções, conforme o tipo de tratamento dado às informações.

Primeiramente, as condições de medição foram reproduzidas com o programa e os resultados do T_{30} submetidos à análise estatística. Em seguida os demais parâmetros calculados foram comparados aos seus respectivos valores medidos e então, os resultados da predição acústica das igrejas com as áreas de assento totalmente ocupadas foram obtidos.

4.2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Neste capítulo os dados de medição e predição computacional do tempo de reverberação foram explorados estatisticamente quanto à normalidade na distribuição das amostras, a variância das médias e a comparação múltipla entre as médias para 13 grupos de dados. Dentre os grupos, 12 foram de dados obtidos através de predições feitas com o auxílio de um programa de computador (ODEON A/S, 2005) e 1 através de medições realizadas nas igrejas.

O grupo número 1 é o grupo de controle (dados medidos), ou seja, aquele com o qual todos os outros foram comparados para que sua precisão pudesse ser aferida. Os grupos de predição foram numerados de 2 até 13. Os grupos foram criados a partir das combinações oferecidas pelo programa, conforme explicado no capítulo 3 (e são descritos no quadro 4.2.1.A abaixo).

Tabela 4.2.1.A – Grupos de predição acústica estatisticamente testados.

Descrição do grupo	nº do grupo
Valores medidos	1
survey+lambert+soft materials only	2
survey+lambert+all materials	3
survey+full+soft materials only	4
survey+full+all materials	5
engineering+lambert+soft materials only	6
engineering+lambert+all materials	7
engineering+full+soft materials	8
engineering+full+all materials	9
precision+lambert+soft materials only	10
precision+lambert+all materials	11
precision+full+soft materials only	12
precision+full+all materials	13

Para evitar que a exposição das informações sobre os testes estatísticos se torne muito monótona, as tabelas para os testes de normalidade das amostras foram omitidas e os testes de comparação múltipla expressos em função do p-valor e não da diferença entre as médias, o que reduz, consideravelmente, o volume de informação.

4.2.1.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS

Os dados medidos e preditos para igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas têm distribuição normal para todas as frequências e posições da fonte sonora (p -valor $> 0,05$).

Simultaneamente ao teste ANOVA, um teste de homogeneidade da variância dos grupos foi executado (teste de Levene). Neste teste, os grupos associados à posição 1 da fonte sonora, mostram variância homogênea para todas as bandas de oitava.

Para a posição 2, as variâncias são homogêneas ou homocedásticas apenas para as bandas de 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz (ver quadro 4.2.1.1.A), para estes grupos um teste de comparação múltipla foi aplicado após a análise de variância.

Tabela 4.2.1.1.A – Teste de Homogeneidade da Variância – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Posição da fonte sonora	p-valor por frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,310	0,310	0,369	0,636	0,630	0,281
2	0,002	0,042	0,010	0,162	0,162	0,501

A análise de variância (ANOVA) demonstrou que a hipótese nula para diferenças significativas entre os grupos foi aceita apenas para a frequência de 4000 Hz (ver quadro 4.2.1.1.B). Entre as médias dos grupos restantes, as diferenças foram estatisticamente significativas (p -valor $< 0,05$).

Tabela 4.2.1.1.B – Teste ANOVA – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Posição da fonte sonora	p-valor por frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,000	0,000	0,000	0,010	0,010	0,524
2	0,000	0,000	0,000	0,003	0,027	0,315

Restou saber, quais são os grupos diferentes. Os testes de comparação múltipla, foram aplicados para identificar as diferenças tanto nas amostras com variância homogênea quanto nos casos de não homocedasticidade identificados para a fonte F2. Os resultados indicam que as diferenças detectadas entre as predições e os valores medidos (grupo de controle 1) se encontram nos grupos 2,3,6,7,9,10 e 11.

Observou-se também que as predições se tornam um pouco mais robustas nas médias frequências 500 Hz e 1000 Hz (menores diferenças entre os cálculos e os valores medidos) e que as altas frequências são as mais bem reproduzidas. Note que no quadro 4.2.1.1.C em que se compara se existem diferenças significativas entre os valores calculados e os valores medidos (p-valor abaixo de 0,05). Apenas o grupo 9 apresentou diferenças para a banda de 4000 Hz.

Tabela 4.2.1.1.C – Teste de Comparação Múltipla entre os grupos – predição x medição – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Descrição do grupo	nº do grupo	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
survey+lambert+soft materials only	2	Orange	Grey	Orange	Yellow	Grey	
survey+lambert+all materials	3	Grey	Grey	Orange	Grey	Grey	
survey+full+soft materials only	4						
survey+full+all materials	5						
engineering+lambert+soft materials only	6	Grey	Grey	Orange	Yellow	Grey	
engineering+lambert+all materials	7	Grey	Grey	Grey	Orange	Orange	
engineering+full+soft materials	8						
engineering+full+all materials	9						Grey
precision+lambert+soft materials only	10	Grey	Grey			Orange	
precision+lambert+all materials	11	Grey	Grey	Orange	Yellow	Grey	
precision+full+soft materials only	12						
precision+full+all materials	13						

Legenda:

Existe diferença significativa para F1 e F2

Existe diferença significativa para F1

Existe diferença significativa para F2

Não existe diferença significativa



O teste de comparação múltipla permite que se afirme não haver diferença estatística entre os valores preditos nos grupos 4,5,8,9,12 e 13 e os valores obtidos na medição. Dentre eles, as menores diferenças são verificadas para os de número 4,8 e 12, que têm em comum a caracterização das superfícies como totalmente difusoras. Os resultados obtidos apresentam diferenças em relação aos valores medidos de 0,15 segundo, aproximadamente 1 JND (0,12 s), para as frequências de 125 Hz, 250 Hz e 2000 Hz e para as demais frequências as diferenças são desprezíveis, aproximadamente 0,018 segundo.

Sabendo-se entretanto, da importância dos coeficientes de difusão para a obtenção de bons resultados (NAYLOR; RINDEL, 1992; RINDEL, 2000), aponta-se o sucesso dos métodos preditivos com difusão sonora total, a uma maior difusão no interior

desta igreja do que àquela proporcionada pelos coeficientes recomendados pela literatura (ZENG; CRISTENSEN; RINDEL, 2006). Esta difusão pode ser gerada pelo volume acoplado da capela-mor.

Com relação aos coeficientes de absorção, os resultados demonstraram poder-se crer na sua correta aplicação. Os pontos 1 e 2 entretanto subestimam os valores e podem ser produto de excessiva absorção atribuída às cadeiras estofadas (ver figura 4.2.1.1.a em que os valores dos calculados pelo grupo 12 foram comparados com os medidos).

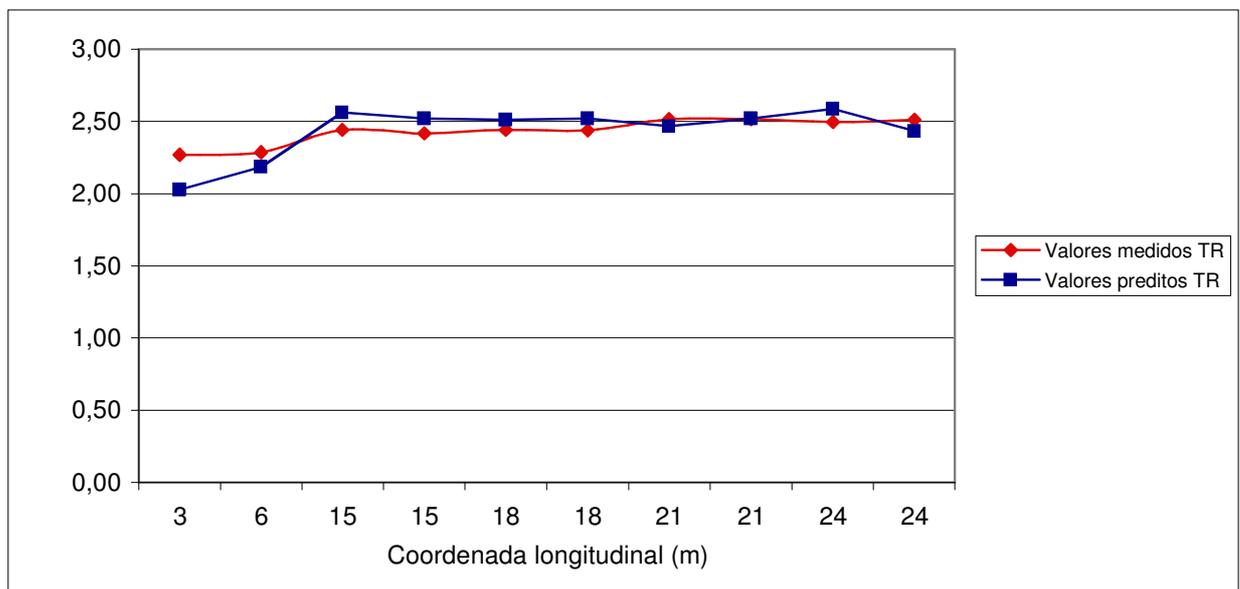


Figura 4.2.1.1.a: Valores medidos e previstos do Tempo de Reverberação (T_{30}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

4.2.1.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO

O teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) demonstrou para todos os grupos analisados na Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito p-valor maior que 0,05. A distribuição dos dados é normal em todas as freqüências e posições da fonte sonora.

Nesta igreja as diferentes posições da fonte sonora influenciaram a homogeneidade da variância nos grupos estudados. As predições com a fonte na posição 1 forneceram amostras com variância homogênea, em todas as freqüências, exceto em 125

Hz. Em contraste, para todos os grupos de predição e em todas as freqüências, as variâncias foram não homogêneas para a posição 2 da fonte (ver quadro 4.2.1.2.A).

Tabela 4.2.1.2.A – Teste de Homogeneidade da Variância – Igreja de Nossa Senhora do Rosário.

Posição da fonte sonora	p-valor por freqüência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,007	0,087	0,116	0,123	0,212	0,363
2	0,019	0,006	0,000	0,000	0,003	0,003

Além de não homogêneas, a hipótese nula para diferenças significativas entre os grupos não foi aceita para nenhuma das amostras submetidas à análise de variância - p-valor < 0,05 (ver quadro 4.2.1.2.B).

Tabela 4.2.1.2.B – Teste ANOVA – Igreja de Nossa Senhora do Rosário.

Posição da fonte sonora	p-valor por freqüência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000

Os testes de comparação múltipla, aplicados para identificar em quais grupos encontram-se diferenças detectaram, em todos os grupos de predição, diferenças significativas entre estes e os valores medidos. As diferenças se concentraram especialmente nas freqüências de 250 Hz e 4000 Hz, sendo mais uniformemente distribuída para as demais.

A comparação das médias também demonstra que a predição produziu melhores resultados para o conjunto de pontos da posição 2 da fonte (ver quadros 4.2.1.2.C).

Tabela 4.2.1.2.C – Teste de Comparação Múltipla – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Descrição do grupo	nº do grupo	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
survey+lambert+soft materials only	2						
survey+lambert+all materials	3						
survey+full+soft materials only	4						
survey+full+all materials	5						
engineering+lambert+soft materials only	6						
engineering+lambert+all materials	7						
engineering+lambert+all materials	8						
engineering+full+all materials	9						
precision+lambert+soft materials only	10						
precision+lambert+all materials	11						
precision+full+soft materials only	12						
precision+full+all materials	13						

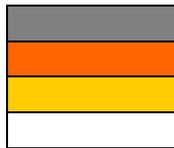
Legenda:

Existe diferença significativa para F1 e F2

Existe diferença significativa para F1

Existe diferença significativa para F2

Não existe diferença significativa



Pode-se afirmar que com exceção do grupo 5 – com melhor desempenho para as altas frequências – todas as demais são equivalentes quanto às diferenças nas médias (abaixo de 0,16 segundo ou menos de 1 JND para as médias frequências e aproximadamente 0,40 segundo para as bandas de 250 Hz e 4000 Hz, ~2,5 JND). Ver figura 4.2.1.2.a e figura 4.2.1.2.b, (em que os valores calculados pelo grupo 7 foram comparados com os medidos).

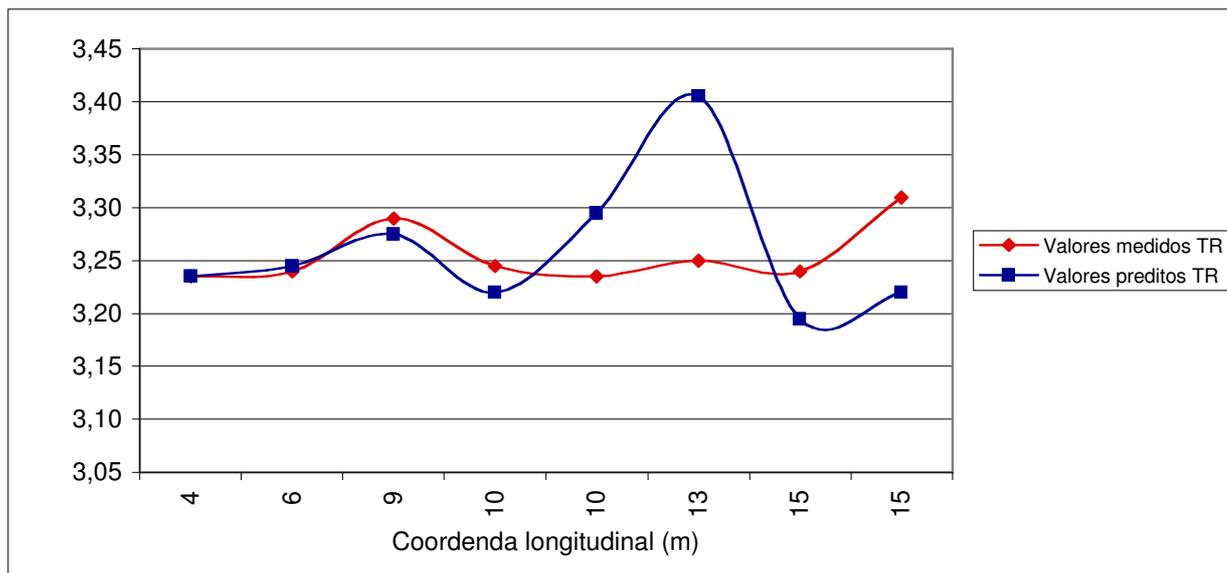


Figura 4.2.1.2.a: Valores medidos e previstos do Tempo de Reverberação (T_{30}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

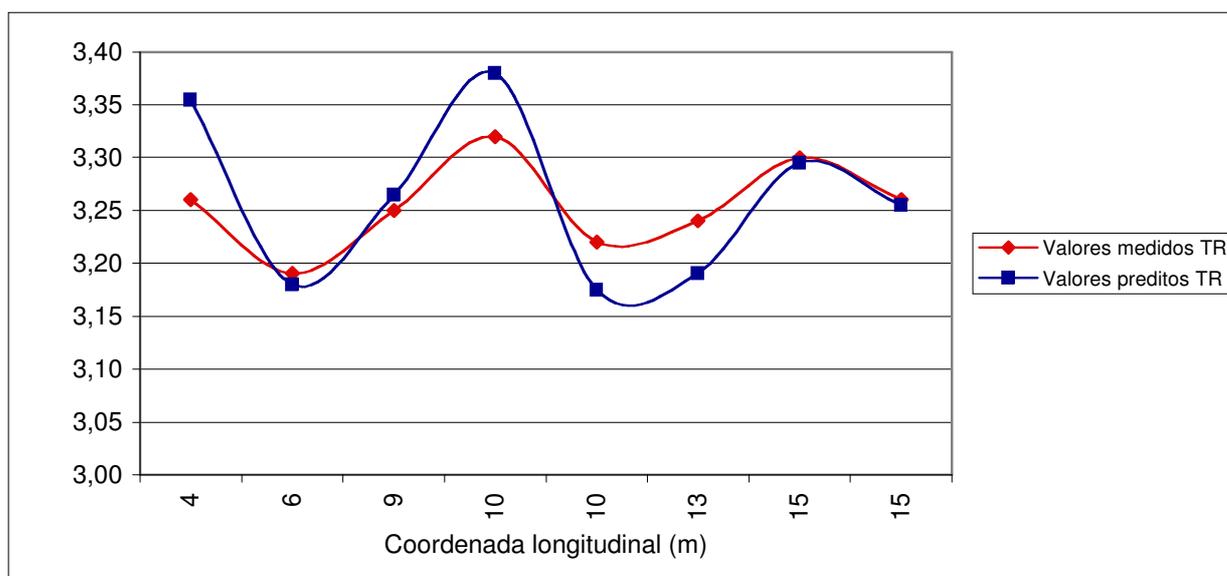


Figura 4.2.1.2.b: Valores medidos e previstos do Tempo de Reverberação (T_{30}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

4.2.1.3 IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES

Os dados medidos e preditos para igreja do Bom Jesus dos Perdões não tiveram distribuição normal para todas as frequências e posições da fonte sonora. O teste de normalidade indicou distribuição não normal para a frequência de 1000 Hz no grupo de número 5 (método *survey* com difusão total para todas as superfícies), quando a fonte sonora foi empregada na posição 1.

Para a posição 2 a não normalidade das amostras foi observada nas frequências de 125 Hz e 2000 Hz para os grupos de número 6 e 8. A normalidade da amostra é requisito necessário para a condução do testes de homogeneidade da variância e ANOVA além dos demais testes de comparação de médias. Os grupos com distribuição não-normal foram então excluídos da amostra analisada.

A homogeneidade da variância entre os grupos foi testada e verificou-se que a homocedasticidade das amostras nesta igreja, assim como na Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito, foi impactada pelas diferentes posições da fonte sonora. A variância é homogênea para todos os grupos associados à posição 1 da fonte e não homogênea para a posição 2 da fonte sonora (quadro 4.2.1.3.A).

Tabela 4.2.1.3.A – Teste de Homogeneidade da Variância – Igreja do Bom Jesus dos Perdões

Posição da fonte sonora	p-valor por frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,441	0,342	0,204	0,436	0,582	0,662
2	0,000	0,000	0,016	0,002	0,000	0,000

O teste ANOVA aponta para a rejeição da hipótese nula para diferenças significativas entre os grupos (ver quadro 4.2.1.3.B). Para todas as predições, em todas as frequências, as diferenças foram estatisticamente significativas (p-valor < 0,05).

Tabela 4.2.1.3.B – Teste ANOVA – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Posição da fonte sonora	p-valor por frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Os testes de comparação múltipla, foram aplicados para identificar as diferenças tanto nas amostras com variância homogênea quanto nos casos de não homocedasticidade.

tidade identificados para a fonte F2. Os resultados indicam diferenças significativas para todas as predições nas freqüências de 125 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz. Observou-se que as predições forneceram ótimos resultados para a freqüência de 250 Hz e 500 Hz sobretudo para a fonte na posição 2 (ver quadro 4.2.1.3.C)

Tabela 4.2.1.3.C – Teste de Comparação Múltipla – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Descrição do grupo	nº do grupo	Freqüência em bandas de oitava (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
survey+lambert+soft materials only	2						
survey+lambert+all materials	3						
survey+full+soft materials only	4						
survey+full+all materials	5				*F1		
engineering+lambert+soft materials only	6	*F2					
engineering+lambert+all materials	7						
engineering+lambert+all materials	8					*F2	
engineering+full+all materials	9						
precision+lambert+soft materials only	10						
precision+lambert+all materials	11						
precision+full+soft materials only	12						
precision+full+all materials	13						

Legenda:

- Existe diferença significativa para F1 e F2 (p-valor < 0,05)
- Existe diferença significativa para F1 (p-valor < 0,05)
- existe diferença significativa para F2 (p-valor < 0,05)
- não existe diferença significativa (p-valor > 0,05)



*F1 Excluído da amostra. Distribuição não-normal para a freqüência

*F2 Excluído da amostra. Distribuição não-normal para a freqüência

Os valores obtidos nas predições diferem dos valores medidos em 0,14 segundo nas freqüências de 250 Hz e 500 Hz para as melhores predições. Esta diferença é menor que o limite de percepção atribuído para o Tempo de Reverberação (ISO 3382-1, 2006). Nas demais bandas de oitava, os valores preditos apresentaram erros maiores.

Nesta igreja os valores são superestimados para a freqüência de 125 Hz em aproximadamente 0,5 segundo, o que excede em 2 JND o valor medido. Nas altas freqüências, a predição subestima a medição de 2 a 3 JND, isto é, de 0,5 a 0,75 segundo, o que representa um erro de 10% a 15% do valor do tempo de reverberação.

Esta margem de erro é aceitável para os métodos clássicos (Sabine e Eyring), muito mais rudimentares. Comparada à qualidade alcançada nas predições das outras igrejas, nota-se que nesta, os resultados são insatisfatórios.

A razão para a baixa qualidade preditiva deste edifício, deve ser, em primeira mão, atribuída às simplificações geométricas adotadas para o modelo tridimensional digital. Estas simplificações dizem respeito à substituição das abóbadas de aresta que compõem o teto do edifício real, por um teto em abóbada de berço no modelo digital. As abóbadas de aresta são acusticamente mais difusoras e produzem Tempos de Reverberação maiores que as abóbadas de berço em salas com mesmo volume (CIRILLO; MARTELLOTTA, 2003). Sua modelagem tridimensional só é possível, com a utilização de malhas tridimensionais *NURBS (Non Uniform Rational B-Splines)*. Os modeladores de sólidos, comuns nos aplicativos CAD, não oferecem recursos suficientes para a reprodução de geometrias complexas como estas. Tampouco o faz o modelador que acompanha o software de predição Odeon 7.01. (ODEON A/S, 2005).

As abóbadas de aresta foram construídas com o auxílio do modelador *nurbs 3d Powerpack*, disponível no pacote de aplicativos VectorWorks 11.5 (NEMETSCHEK NORTH AMERICA, 2005). Sem êxito na execução dos cálculos, foram substituídas por uma abóbada de berço, geometria mais similar.

Outro ponto importante para a obtenção de bons resultados é a caracterização das superfícies, em termos dos coeficientes de absorção e difusão. Contudo, um maior rigor neste sentido pode, entretanto, não resultar em dados mais consistentes (NAYLOR; RINDEL, 1992).

A despeito dos resultados obtidos nas predições da Igreja do Bom Jesus dos Perdões, pode-se afirmar que a caracterização das superfícies do modelo produziu resultados confiáveis para as igrejas da Ordem III de São Francisco das Chagas e de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Neste ponto, os resultados obtidos até aqui, permitiram que dois passos fossem dados adiante. O primeiro é a comparação dos demais parâmetros simulados (EDT, C_{80} e D_{50}) com os valores medidos e o segundo a projeção da acústica dessas salas com a ocupação total da audiência.

4.2.2 PREDIÇÕES PARA O EDT E MÉTRICAS DE CLAREZA C_{80} E D_{50}

Após a verificação estatística do Tempo de Reverberação calculado, um grupo de predição foi selecionado para cada igreja, a fim de comparar os resultados das outras três métricas objetivas (EDT, C_{80} e D_{50}) com seus respectivos valores medidos. A escolha do grupo de predição, levou em conta o número de bandas de oitava em que se observou não haver diferença significativa entre as médias dos valores calculados e das medições. Nos casos em que as performances tenham sido diferentes para as posições ocupadas pela fonte sonora, o grupo escolhido foi aquele que garantiu a melhor reprodução dos valores medidos (p -valor > 0,05) ao maior número de bandas de oitava para as duas posições da fonte simultaneamente. Foram selecionados os grupos 12 (*precision+full+soft materials only*), 7 (*engineering+lambert+all materials*) e 11 (*precision+lambert+all materials*) respectivamente para as igrejas da Ordem III de São Francisco das Chagas, de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito e do Bom Jesus dos Perdões.

4.2.2.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS

Na Igreja da Ordem, os valores preditos para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) foram superestimados em todos os pontos. A diferença entre as médias da predição e dos valores medidos é de cerca de 0,25 segundo para as frequências centrais (ver quadros 4.2.2.1.A e 4.2.2.1.B). A performance nas baixas frequências foi um pouco inferior, apresentou diferença de 0,38 segundo, ou aproximadamente 4 JND.

Tabela 4.2.2.1.A – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) preditos em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	1,40	1,47	1,51	1,42	1,43	1,04
F1-P2	1,40	1,57	1,62	1,56	1,56	1,23
F1-P3	2,46	2,70	2,83	2,70	2,62	2,24
F1-P4	2,45	2,74	2,88	2,77	2,71	2,12
F1-P5	2,56	2,87	3,05	2,98	2,90	2,24
F1-P6	2,71	3,03	2,93	2,83	2,76	2,24
F1-P6	2,71	3,03	2,93	2,83	2,76	2,24
F1-P7	2,62	3,02	2,98	2,90	2,89	2,40
F1-P8	2,81	3,07	3,00	2,94	3,16	2,44
F1-P9	2,65	3,07	2,89	3,13	3,03	2,19
F1-P10	2,80	3,09	2,92	3,17	3,05	2,25
VALOR MÉDIO	2,52		2,65		2,33	
DIFERENÇA (PEDITO-MEDIDO)	0,38		0,25		0,23	

Quadro 4.2.2.1.B – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) preditos em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	1,38	1,43	1,48	1,41	1,43	1,07
F2-P2	1,53	1,65	1,45	1,40	1,42	1,20
F2-P3	2,45	2,73	2,66	2,82	2,79	2,19
F2-P4	2,60	2,91	2,83	2,74	2,66	2,23
F2-P5	2,87	2,86	3,06	2,95	2,87	2,17
F2-P6	2,56	2,97	2,84	3,05	2,97	2,13
F2-P7	2,76	2,86	3,07	2,99	2,88	2,45
F2-P8	2,87	3,05	2,94	3,13	2,99	2,41
F2-P9	2,78	3,01	3,08	3,08	2,99	2,52
F2-P10	2,82	3,11	3,23	3,10	2,96	2,48
VALOR MÉDIO	2,56		2,67		2,34	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	0,41		0,26		0,25	

Pode-se afirmar que os valores calculados do EDT tornaram-se menos precisos com o aumento da distância entre a fonte e o receptor. A diferença entre os pontos chega a mais 0,5 segundo para os pontos 9 e 10 (ver figura 4.2.2.1.a e figura 4.2.2.1.b).

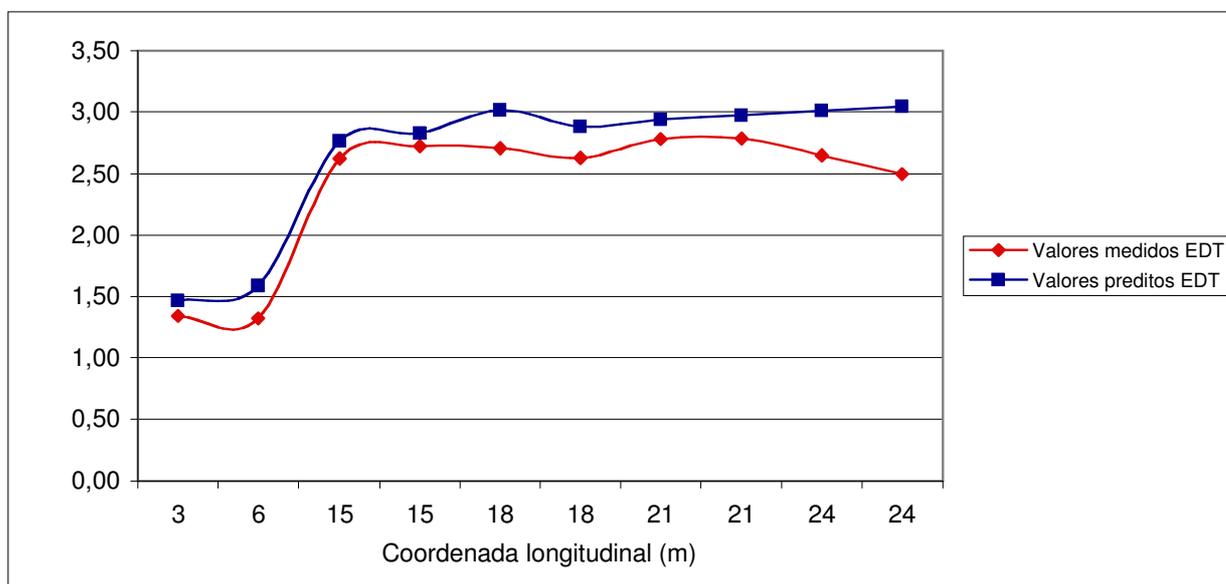


Figura 4.2.2.1.a: Comparação entre valores medidos e preditos do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

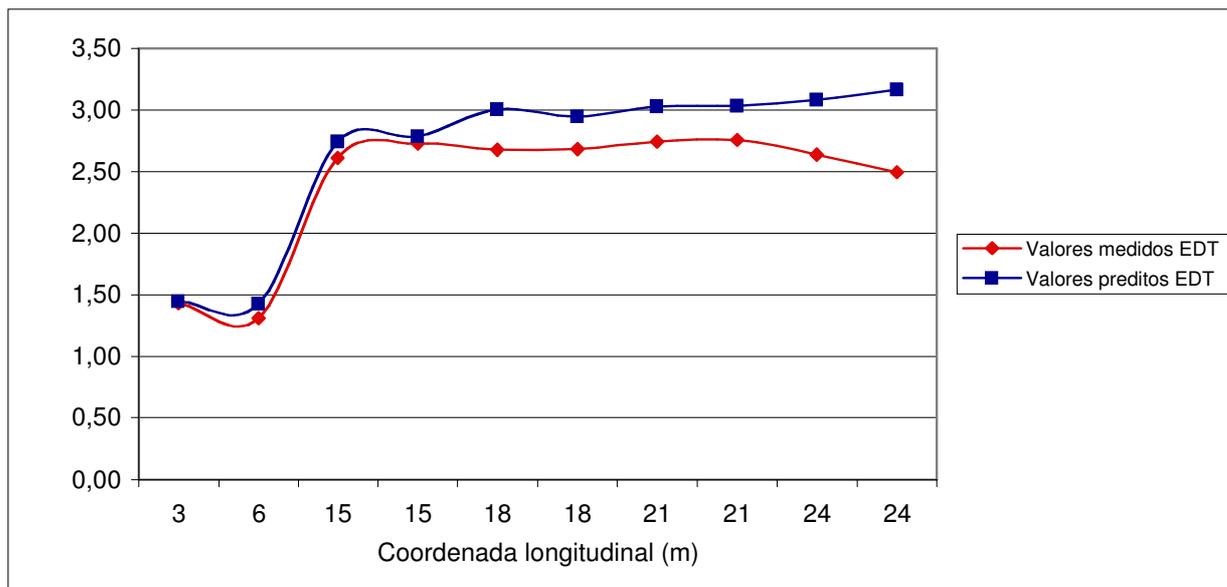


Figura 4.2.2.1.b: Comparação entre valores medidos e previstos do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

O decaimento de 10 dB para o cálculo deste parâmetro é determinado principalmente pelos níveis relativos ao som direto e às reflexões. Com o aumento da distância, a influência das reflexões implica em um aumento dos valores calculados e uma menor flutuação dos resultados (BORK, 2005). Embora superestimados, os valores calculados seguiram a tendência dos valores medidos quando a observação foi feita ponto a ponto ao longo da sala.

A Clareza também foi satisfatoriamente reproduzida nas previsões. Os dados para o C_{80} mantiveram uma diferença de menos de 1 dB em relação aos valores medidos para a média das freqüências centrais, para a qual os resultados foram mais consistentes (ver quadro 4.2.2.1.C e figura 4.2.2.1.c).

Tabela 4.2.2.1.C – Valores para a Clareza (C_{80}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	1,30	0,70	1,10	1,20	1,20	2,50
F1-P2	0,00	-0,60	-0,30	-0,20	-0,30	1,00
F1-P3	-4,40	-5,20	-5,00	-5,00	-5,00	-3,20
F1-P4	-4,20	-5,00	-4,80	-4,80	-4,70	-3,00
F1-P5	-5,50	-6,30	-6,20	-6,20	-6,20	-4,30
F1-P6	-5,70	-6,50	-6,30	-6,40	-6,30	-4,40
F1-P7	-5,80	-6,70	-6,50	-6,60	-6,50	-4,50
F1-P8	-5,80	-6,70	-6,50	-6,50	-6,40	-4,50
F1-P9	-6,30	-7,10	-6,80	-6,80	-6,70	-4,70
F1-P10	-6,60	-7,40	-7,00	-7,10	-6,90	-5,00
VALOR MÉDIO		-4,69		-4,84		-3,90
DIFERENÇA (PEDITO - MEDIDO)		-1,24		-0,84		-1,96

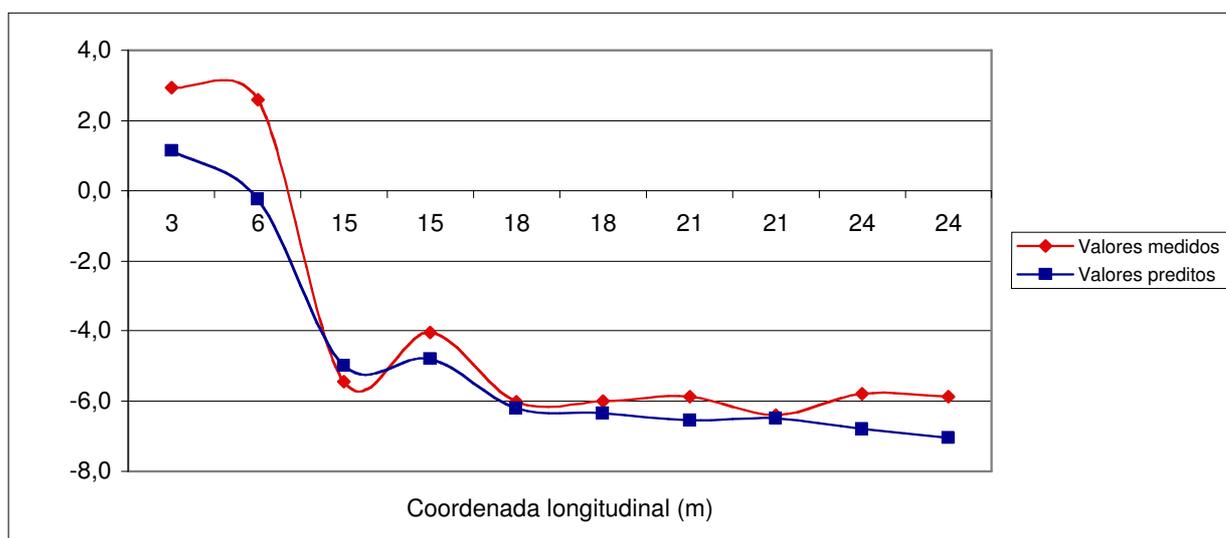


Figura 4.2.2.1.c: Comparação entre valores medidos e preditos da Clareza (C_{80}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Os valores preditos foram subestimados em relação aos medidos para a maioria dos pontos. Para a fonte na posição 2, as altas frequências tiveram a reprodução mais sofrível, foram 2 dB de diferença para as médias das bandas de 2000 Hz e 4000 Hz (ver quadro 4.2.2.1.D).

Tabela 4.2.2.1.D – Valores para a Clareza (C_{80}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par, fonte - receptor F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	1,40	0,70	1,10	1,20	1,20	2,50
F2-P2	0,10	-0,60	-0,20	-0,10	-0,20	1,00
F2-P3	-4,80	-5,60	-5,40	-5,50	-5,40	-3,60
F2-P4	-4,40	-5,10	-5,00	-5,00	-4,90	-3,20
F2-P5	-5,50	-6,30	-6,10	-6,20	-6,20	-4,30
F2-P6	-5,50	-6,30	-6,10	-6,20	-6,10	-4,30
F2-P7	-6,20	-7,00	-6,90	-7,00	-6,90	-5,00
F2-P8	-5,30	-6,20	-6,10	-6,10	-6,10	-4,20
F2-P9	-6,10	-7,00	-6,70	-6,70	-6,60	-4,50
F2-P10	-6,50	-7,30	-7,00	-7,10	-6,90	-4,90
VALOR MÉDIO		-4,68		-4,86		-3,93
DIFERENÇA (PEDITO - MEDIDO)		-1,21		-0,84		-2,03

A figura 4.2.2.1.d apresenta os valores medidos e simulados de C_{80} para os pontos avaliados na Igreja da Ordem. Observou-se a diminuição da clareza com o aumento da distância entre a fonte e o receptor.

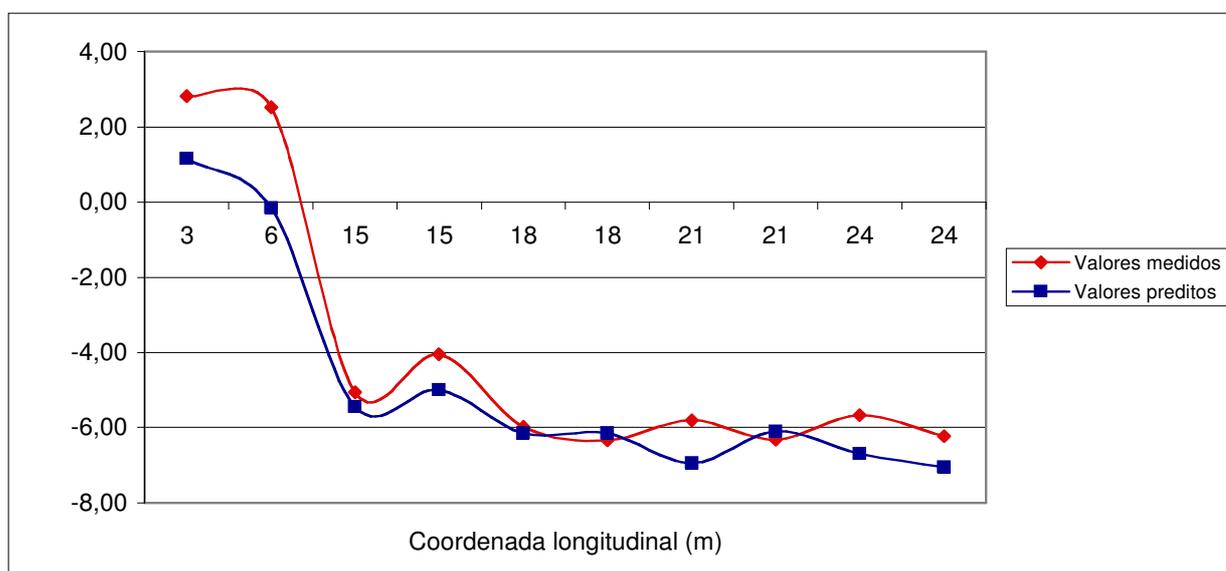


Figura 4.2.2.1.d: Comparação entre valores medidos e preditos da Clareza (C_{80}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

De forma análoga à Clareza (C_{80}) se comportou a Definição (D_{50}), resultado da forma semelhante de cálculo desses dois parâmetros. A Definição apresentou melhores resultados para comparação das médias. Foram observadas diferenças apenas para as altas frequências. Os valores das predições, tomados ponto a ponto, revela-

ram-se muito próximos aos dados medidos – diferenças menores que 1JND ou 5% para a maioria dos pontos (ver quadro 4.2.2.1.E e figura 4.2.2.1.e).

Tabela 4.2.2.1.E – Valores para a Definição (D_{50}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,42	0,39	0,41	0,41	0,41	0,48
F1-P2	0,34	0,30	0,32	0,32	0,32	0,38
F1-P3	0,16	0,14	0,15	0,15	0,15	0,21
F1-P4	0,18	0,15	0,16	0,16	0,16	0,22
F1-P5	0,13	0,11	0,12	0,11	0,12	0,17
F1-P6	0,13	0,11	0,12	0,12	0,12	0,17
F1-P7	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15
F1-P8	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,16
F1-P9	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,14
F1-P10	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,14
VALOR MÉDIO	0,17		0,17		0,20	
DIFERENÇA (PREDITO - MEDIDO)	-0,03		-0,04		-0,09	

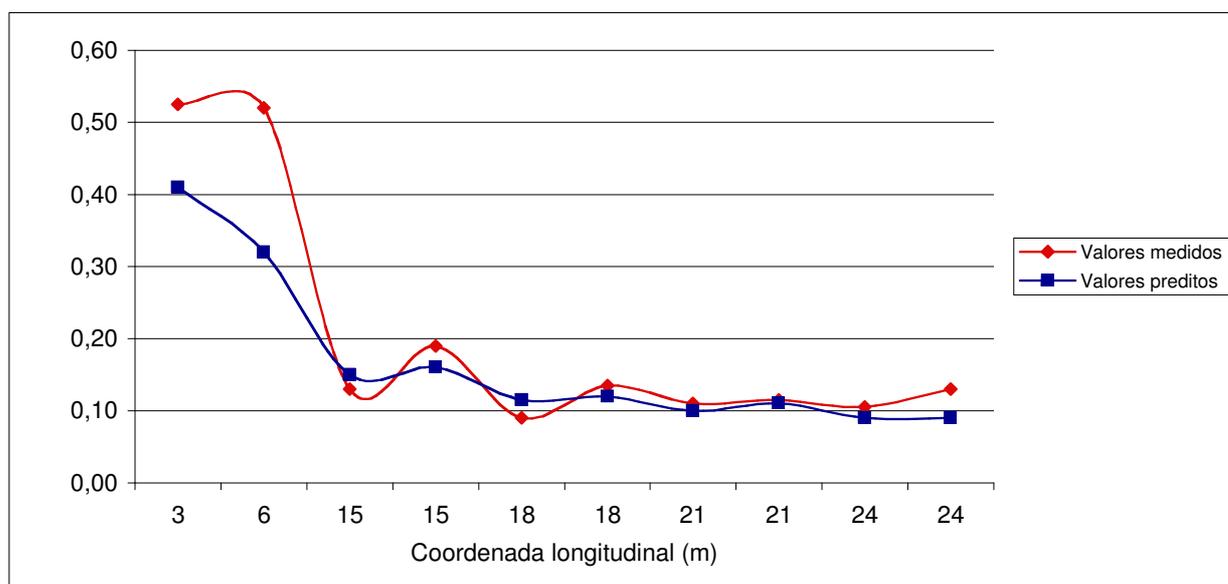


Figura 4.2.2.1.e: Comparação entre valores medidos e preditos da Definição (D_{50}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

A repetição das medições demonstrou que a maior diferença se manifestou nos pontos mais próximos da fonte. Neste caso, nos pontos 1 e 2 localizados na capela-mor. Nos demais pontos (situados na nave), a definição é mais uniforme, quer seja na diferença entre as posições, quer seja entre os resultados simulados e medidos (ver quadro 4.2.2.1.F e figura 4.2.2.1.f).

Tabela 4.2.2.1.F – Valores para a Definição (D_{50}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	0,42	0,39	0,41	0,42	0,41	0,48
F2-P2	0,34	0,31	0,32	0,33	0,32	0,38
F2-P3	0,15	0,13	0,13	0,13	0,14	0,19
F2-P4	0,17	0,14	0,15	0,15	0,15	0,21
F2-P5	0,13	0,11	0,12	0,11	0,12	0,17
F2-P6	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,16
F2-P7	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15
F2-P8	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,16
F2-P9	0,11	0,09	0,10	0,10	0,10	0,16
F2-P10	0,11	0,09	0,10	0,10	0,10	0,15
VALOR MÉDIO	0,17		0,17		0,19	
DIFERENÇA (PREDITO - MEDIDO)	-0,03		-0,04		-0,10	

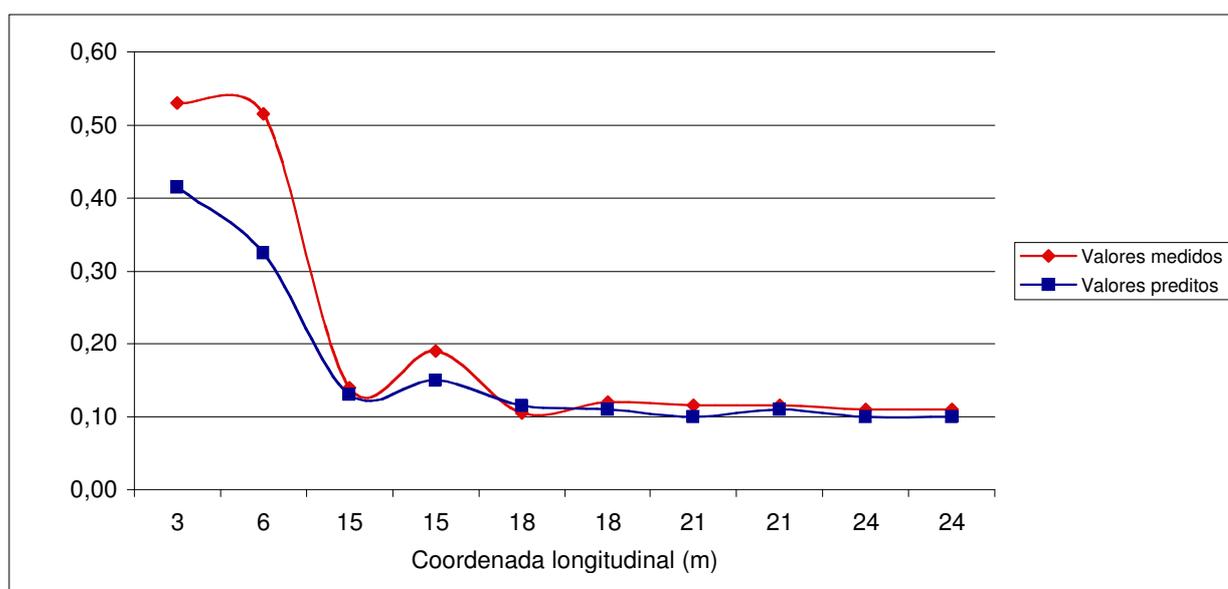


Figura 4.2.2.1.f: Comparação entre valores medidos e preditos da Definição (D_{50}) em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Nos parâmetros de clareza o som direto e as primeiras reflexões são cruciais para a determinação dos valores (BERANEK, 2004). A intensidade das primeiras reflexões é extremamente influenciada pelas propriedades acústicas das superfícies. Os valores calculados para os pontos 1 e 2 refletem um super-dimensionamento dos coeficientes de absorção atribuídos às cadeiras com estofamento presentes nesta área da igreja. Esta diferença nas predições é percebida também, mas de forma mais

atenuada na predição do Tempo de Reverberação desses pontos (ver figura 4.2.1.1.a).

4.2.2.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO

A predição do Tempo de Decaimento Inicial para a Igreja do Rosário produziu resultados com desvios em torno de 5% em relação aos valores medidos. Esse desvio aumentou para as baixas freqüências mas os valores não chegaram a 10% (ver quadro 4.2.2.2.A).

As médias foram praticamente iguais para as duas posições da fonte e os valores superestimados para as baixas e médias freqüências (ver quadro 4.2.2.2.B). As predições apresentaram bons resultados, mas os valores médios não traduziram as flutuações espaciais desta métrica.

Tabela 4.2.2.2.A – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), preditos em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto predito para o par, Fonte - receptor (F-P)	Freqüência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	3,22	3,78	3,53	3,54	3,13	2,22
F1-P2	2,62	3,40	3,10	3,34	3,04	2,06
F1-P3	2,87	3,42	3,21	3,21	2,88	2,18
F1-P4	3,01	3,53	3,39	3,38	2,93	2,04
F1-P5	2,88	3,45	3,19	3,17	2,94	2,11
F1-P6	2,75	3,38	3,27	3,19	3,03	2,24
F1-P7	3,10	3,56	3,28	3,20	3,16	2,20
F1-P8	3,20	3,97	3,77	3,60	3,12	2,20
VALOR MÉDIO	3,26		3,34		2,59	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	0,23		0,07		-0,09	

Tabela 4.2.2.2.B – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), preditos em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto predito para o par, Fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	2,93	3,44	3,27	3,28	3,00	2,07
F1-P2	2,90	3,40	3,26	3,14	3,02	2,20
F1-P3	2,48	3,15	3,09	3,01	2,83	2,05
F1-P4	2,96	3,49	3,42	3,55	3,09	2,28
F1-P5	2,77	3,60	3,45	3,33	2,98	2,07
F1-P6	2,87	3,42	3,45	3,29	2,85	2,05
F1-P7	3,00	3,58	3,33	3,39	3,20	2,10
F1-P8	2,87	3,51	3,33	3,15	3,11	2,35
VALOR MÉDIO	3,15		3,30		2,58	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	0,19		0,00		-0,13	

As predições apresentam uma dispersão dos dados aleatória em relação ao padrão das medições. Embora a diferença entre os dados seja menor que 5% para a fonte F1, os resultados calculados desenham uma imagem distorcida da realidade. Os cálculos do decaimento inicial para a fonte posicionada na posição 2 produziram um gráfico semelhante ao do Tempo de Reverberação (ver figura 4.2.1.2.b).

A dependência do som inicial desta métrica resultou em um acréscimo no valor do EDT para os pontos mais distantes da fonte e de forma inversa, os pontos mais próximos têm seus resultados subestimados para os valores calculados (ver figura 4.2.2.2.a e ver figura 4.2.2.2.b). Os resultados para o ponto 1, quinto ponto impresso nos gráficos das figuras 4.2.2.2.a e 4.2.2.2.b, apresentaram valores maiores que os medidos em virtude da posição atrás da coluna que divide a nave principal da lateral e impede que parte do som direto atinja o receptor. Os efeitos de sombreamento de raios são limitações dos algoritmos de cálculo utilizados pelo software.

Os desvios para os pontos, tomados individualmente, foram observados também por outros autores (BRADLEY; WANG, 2007; BORK, 2005). Os resultados indicam que em se tratando dos descritores de reverberação, os modelos de computador têm melhor performance para o cálculo do Tempo de Reverberação (T_{30}).

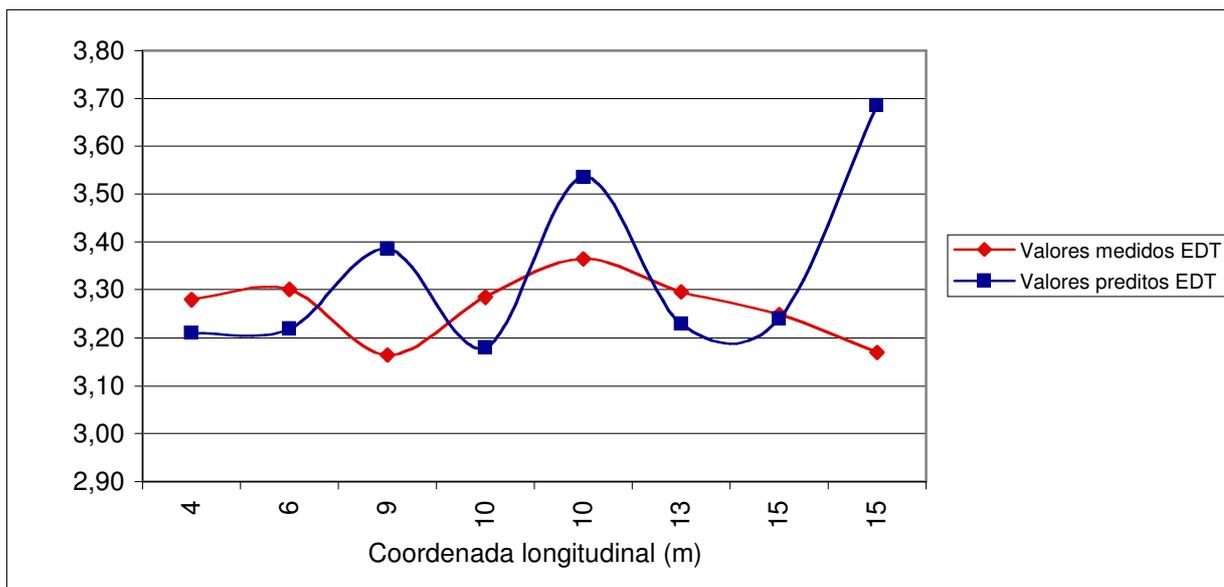


Figura 4.2.2.2.a: Comparação entre valores medidos e previstos do Tempo de Decaimento Inicial (EDT), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

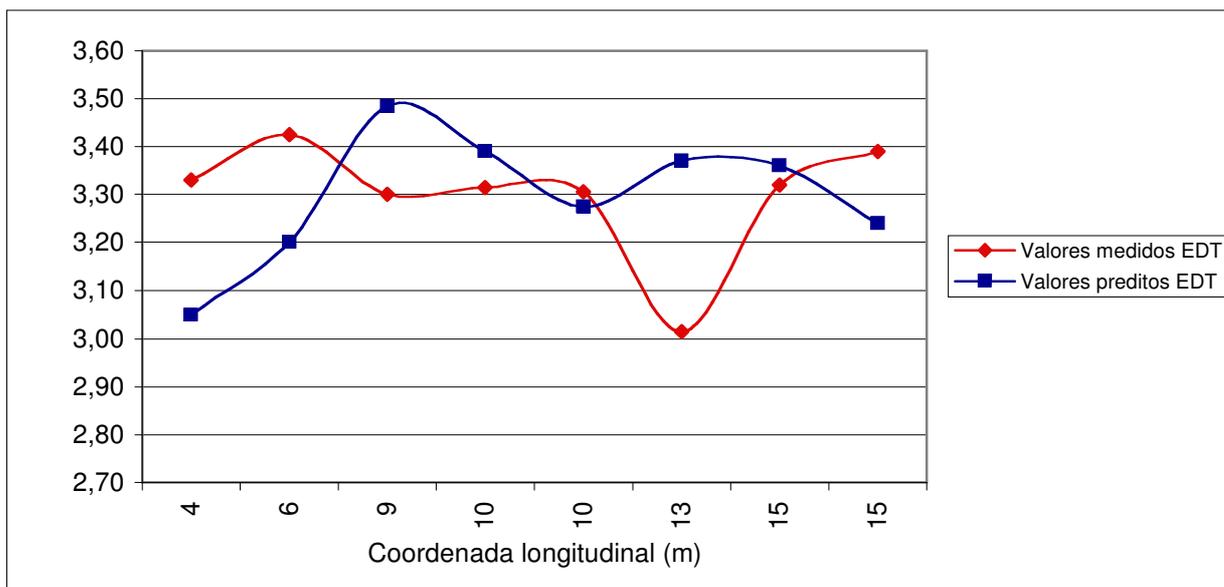


Figura 4.2.2.2.b: Comparação entre valores medidos e previstos do Tempo de Decaimento Inicial (EDT), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Em se tratando da Clareza, as diferenças entre os valores calculados de C_{80} e aqueles existentes para a sala real foram descritas nos quadros 4.2.2.2.C e 4.2.2.2.D. De acordo com os dados, os cálculos para C_{80} foram mais confiáveis para as altas (2000 – 4000 Hz) e baixas frequências (125 – 250 Hz).

Tabela 4.2.2.2.C – Valores para a Clareza (C_{80}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto predito para o par, Fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	-4,50	-5,70	-5,70	-5,60	-5,20	-3,40
F1-P2	-2,40	-3,70	-3,70	-3,60	-2,90	-1,00
F1-P3	-2,80	-4,00	-4,00	-4,00	-3,50	-1,70
F1-P4	-4,50	-5,60	-5,40	-5,40	-5,00	-3,30
F1-P5	-4,10	-5,20	-5,10	-5,10	-4,70	-2,80
F1-P6	-4,20	-5,20	-5,00	-4,90	-4,40	-2,50
F1-P7	-4,50	-5,60	-5,10	-4,90	-4,30	-2,40
F1-P8	-4,90	-6,10	-5,60	-5,40	-4,90	-2,90
VALOR MÉDIO	-4,56		-4,91		-3,43	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	-0,17		0,48		0,16	

Para a configuração da fonte F1, o modelo computacional superestimou a maioria dos pontos para a média das frequências de 500 Hz e 1000 Hz (ver figura 4.2.2.2.c). Mesmo com uma reprodução dos valores medidos superestimada, os valores calculados apresentaram uma diferença em torno de 1 dB o que caracteriza uma relativa concordância entre o modelo de cálculo e a sala existente.

Os dados para a fonte F2 contrastaram um maior desvio nas médias (ver quadro 4.2.2.2.D) com uma melhor reprodução dos pontos mais próximos à fonte sonora (ver figura 4.2.2.2.d). O desvio foi influenciado pelos pontos mais distantes da fonte que apresentaram maior diferença (> 1 dB).

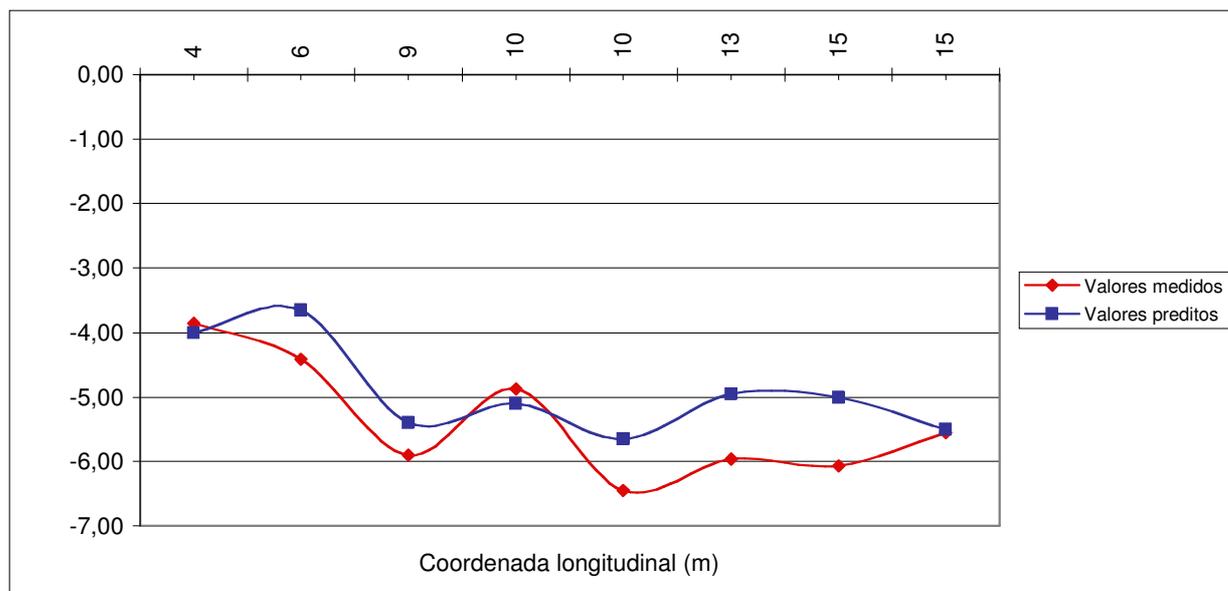


Figura 4.2.2.2.c: Valores medidos e previstos da Clareza (C_{80}), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Tabela 4.2.2.2.D – Valores para a Clareza (C_{80}), previstos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto previsto para o par, Fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	-2,70	-3,80	-3,70	-3,60	-3,20	-1,50
F2-P2	-2,10	-3,30	-3,20	-3,20	-2,80	-0,70
F2-P3	-1,00	-2,10	-2,10	-2,10	-1,60	0,30
F2-P4	-5,20	-6,30	-6,20	-6,20	-5,70	-3,60
F2-P5	-3,20	-4,30	-4,10	-4,10	-3,60	-1,60
F2-P6	-3,10	-4,20	-4,00	-3,90	-3,40	-1,30
F2-P7	-3,70	-4,80	-4,30	-4,20	-3,60	-1,60
F2-P8	-6,50	-7,70	-7,20	-7,20	-6,50	-4,50
VALOR MÉDIO	-4,00		-4,33		-2,81	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	-0,23		0,59		0,59	

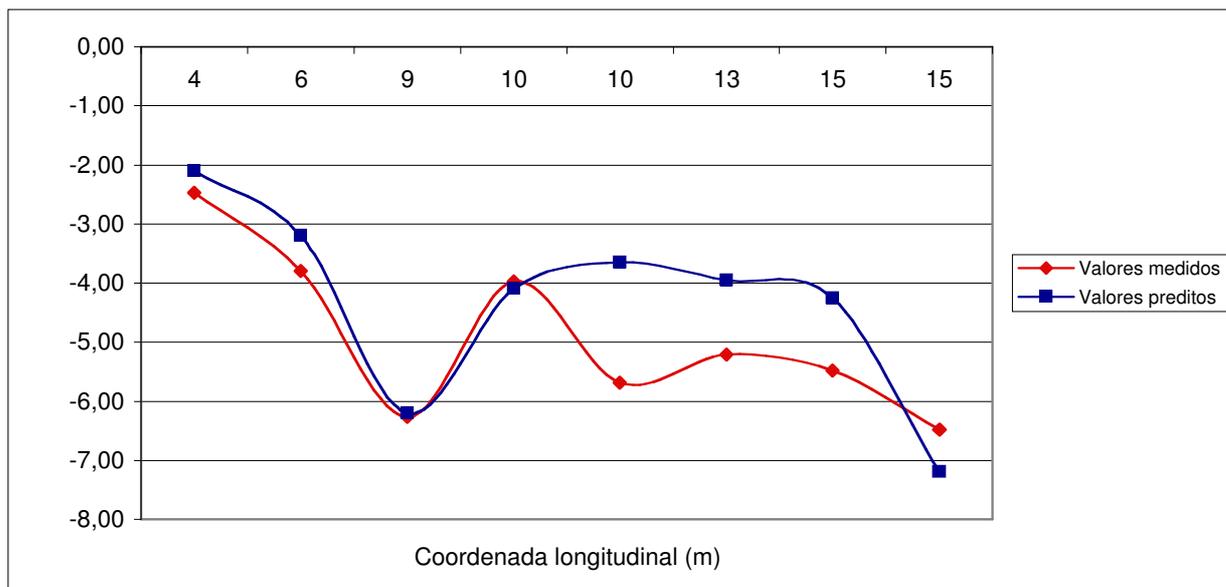


Figura 4.2.2.2.d: Valores medidos e previstos da Clareza (C_{80}), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Novamente, os valores de Definição (D_{50}) apresentaram os menores desvios nas médias (quadro 4.2.2.2.E). Os dados se assemelham aos obtidos para o C_{80} , mas são mais bem reproduzidos para a fonte F1 – diferenças menores que 0,05 segundo (figura 4.2.2.2.e).

Tabela 4.2.2.2.E – Valores para a Definição (D_{50}), previstos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto medido para o par, Fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,13	0,10	0,10	0,10	0,11	0,16
F1-P2	0,26	0,21	0,21	0,21	0,24	0,33
F1-P3	0,26	0,21	0,21	0,21	0,23	0,30
F1-P4	0,17	0,14	0,14	0,14	0,15	0,21
F1-P5	0,16	0,13	0,13	0,13	0,14	0,20
F1-P6	0,15	0,12	0,12	0,12	0,14	0,19
F1-P7	0,15	0,12	0,14	0,15	0,17	0,23
F1-P8	0,13	0,11	0,12	0,12	0,14	0,19
VALOR MÉDIO	0,16		0,15		0,20	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	-0,02		0,00		-0,01	

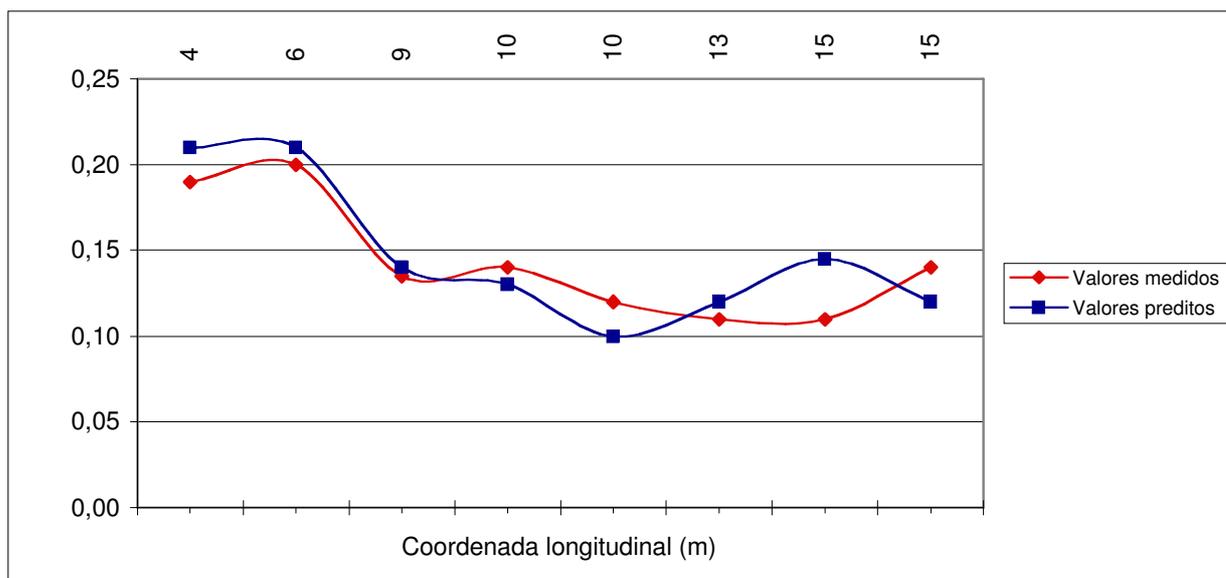


Figura 4.2.2.2.e: Valores medidos e preditos da Definição (D_{50}), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Para a configuração da fonte F2, a diferença entre as médias é inexpressível para as baixas e as médias freqüências (quadro 4.2.2.2.F). A predição para os pontos reproduz as calculadas para o C_{80} (figura 4.2.2.2.f).

Tabela 4.2.2.2.F – Valores para a Definição (D_{50}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto predito para o par, Fonte - receptor (F-P)	Freqüência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,25	0,20	0,21	0,21	0,22	0,29
F1-P2	0,30	0,25	0,25	0,25	0,28	0,38
F1-P3	0,39	0,33	0,33	0,33	0,36	0,46
F1-P4	0,15	0,12	0,12	0,12	0,14	0,20
F1-P5	0,22	0,18	0,19	0,19	0,21	0,28
F1-P6	0,23	0,19	0,20	0,20	0,22	0,31
F1-P7	0,20	0,17	0,18	0,19	0,21	0,29
F1-P8	0,11	0,08	0,09	0,09	0,10	0,15
VALOR MÉDIO	0,21		0,20		0,26	
DIFERENÇA (PEDITO-MEDIDO)	0,00		0,04		0,10	

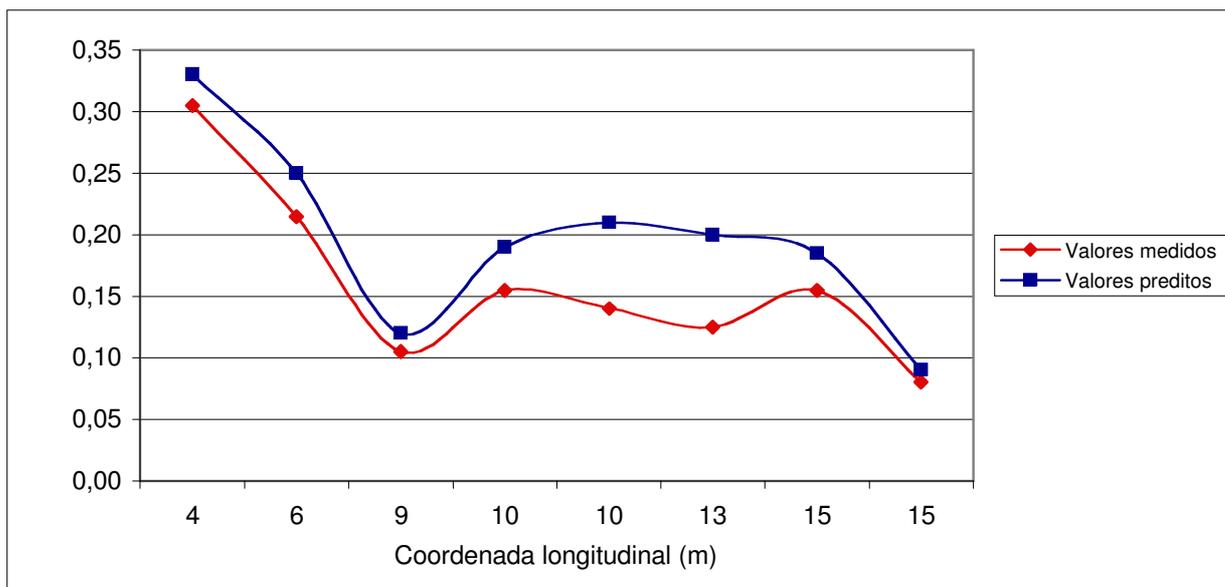


Figura 4.2.2.2.f: Valores medidos e preditos da Definição (D_{50}), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

4.2.2.3 IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES

Os quadros 4.2.2.3.A e 4.2.2.3.B exibem os resultados para o Tempo de Decaimento Inicial, respectivamente, para as duas configurações espaciais da fonte F1 e F2 (figura 4.1.3.a). Pode ser observado que a média das freqüências centrais obteve a melhor resposta do modelo computacional. As baixas freqüências apresentam os maiores desvios e os valores preditos para a fonte F2 são menores para a maioria dos pontos da nave principal em virtude do aumento do som direto.

Tabela 4.2.2.3.A – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), preditos em bandas de oitava para a posição da Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	5,23	5,46	4,39	4,38	3,35	2,18
F1-P2	5,14	5,27	4,35	4,39	3,50	2,44
F1-P3	5,61	5,88	4,89	4,53	3,71	2,57
F1-P4	5,64	5,81	4,90	4,59	3,76	2,55
F1-P5	5,74	6,13	5,11	4,91	3,87	2,73
F1-P6	5,84	6,19	5,05	4,83	3,82	2,73
F1-P7	5,92	6,13	5,02	4,80	4,16	2,58
F1-P8	5,81	6,12	5,29	5,03	3,95	2,62
F1-P9	5,97	6,14	5,05	5,07	4,09	2,79
F1-P10	5,93	6,33	5,33	4,94	4,12	2,54
F1-P11	3,66	3,61	3,10	3,05	2,57	1,62
VALOR MÉDIO	5,62		4,68		3,10	
DIFERENÇA (PEDITO - MEDIDO)	1,00		-0,05		-0,42	

Tabela 4.2.2.3.B – Valores para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), preditos em bandas de oitava para a posição da Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F2-P1	4,65	4,83	3,98	3,74	3,20	1,84
F2-P2	4,50	4,81	3,78	3,74	3,04	2,03
F2-P3	5,04	5,44	4,51	4,19	3,49	2,30
F2-P4	4,94	5,49	4,41	4,27	3,52	2,28
F2-P5	5,22	5,71	4,82	4,42	3,64	2,52
F2-P6	5,55	5,78	4,71	4,52	3,65	2,36
F2-P7	5,65	5,93	5,09	4,80	3,85	2,38
F2-P8	5,55	5,81	4,93	4,63	3,85	2,63
F2-P9	5,56	6,06	4,81	4,79	3,87	2,58
F2-P10	5,56	5,90	5,03	4,86	3,72	2,37
F2-P11	4,48	4,67	3,90	3,80	2,99	2,15
VALOR MÉDIO	5,32		4,44		2,92	
DIFERENÇA (PEDITO - MEDIDO)	0,76		-0,27		-0,46	

O êxito nos cálculos do decaimento inicial para a fonte F1 pode ser creditado à simetria da sala. A fonte F1 foi posicionada sobre o eixo de simetria da nave e a distribuição dos pontos em cada metade da sala também foi feita de maneira simétrica em relação ao eixo.

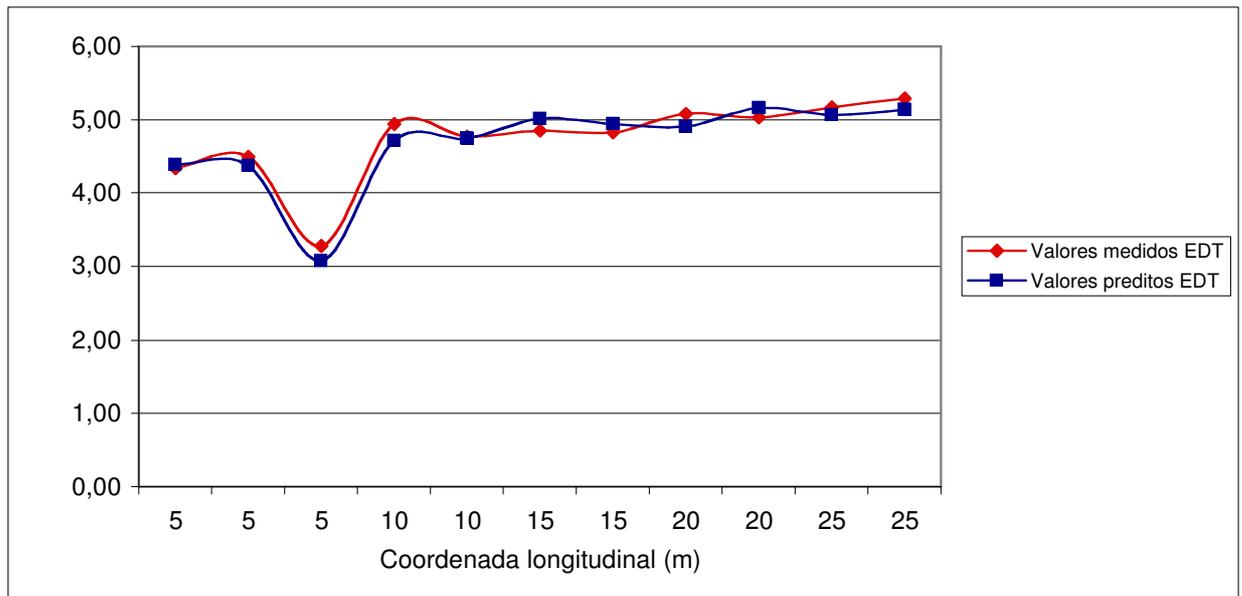


Figura 4.2.2.3.a: Valores medidos e preditos do Tempo de Decaimento Inicial (EDT), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Este arranjo faz com que o som inicial tenda a uma distribuição mais uniforme sobre os receptores, pois as distâncias percorridas pelas primeiras reflexões são equivalentes. O afastamento da fonte para um dos lados do eixo de simetria (ver posição F2 na figura 4.1.3.a) resulta numa maior concentração do som inicial sobre os receptores mais próximos da fonte.

O acréscimo na participação do som inicial sobre os receptores implica na redução do Tempo de Decaimento Inicial calculado, o que pode ser observado no ponto 2, segundo ponto impresso no gráfico da figura 4.2.2.3.b.

Apesar das dificuldades nas baixas frequências, os dados preditos e os obtidos nas medições diferiram em aproximadamente 2 JND para as médias e altas frequências. Para esta métrica, os resultados puderam ser considerados como relativamente satisfatórios.

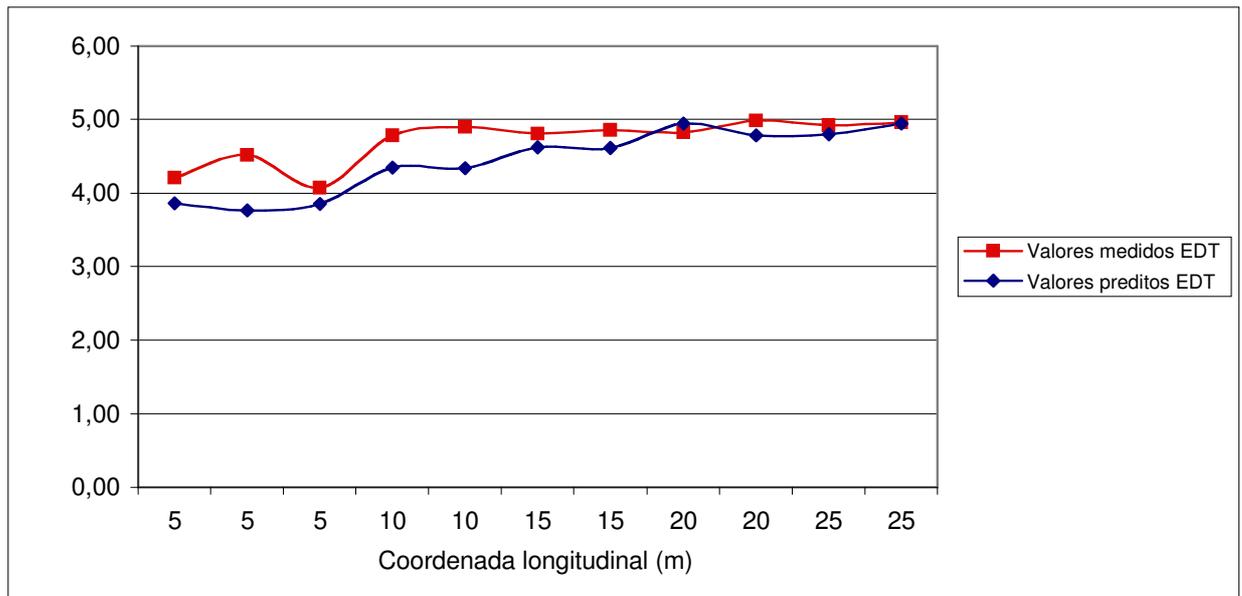


Figura 4.2.2.3.b: Valores medidos e previstos do Tempo de Decaimento Inicial (EDT), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Com relação aos parâmetros de clareza nesta igreja, a observação dos resultados calculados permitiu concluir que tanto o C_{80} quanto o D_{50} têm comportamentos semelhantes. Para a fonte F1, os valores calculados na predição computacional diferiram dos valores medidos em aproximadamente 2 JND (isto é, menos de 2 dB para o C_{80} e menos de 5% para o D_{50}). Nas médias espaciais sobre as frequências (tomadas aos pares de bandas), os valores foram mais precisos (ver quadro 4.2.2.3.C, e figuras 4.2.2.3.c).

Tabela 4.2.2.3.C – Valores para a Clareza (C_{80}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	-5,40	-5,60	-4,70	-4,60	-3,50	-0,90
F1-P2	-5,40	-5,60	-4,70	-4,50	-3,40	-0,90
F1-P3	-8,00	-8,10	-7,10	-7,00	-5,80	-3,20
F1-P4	-7,70	-7,90	-6,90	-6,80	-5,60	-3,00
F1-P5	-9,10	-9,30	-8,20	-7,90	-6,70	-4,00
F1-P6	-9,00	-9,20	-8,10	-7,90	-6,60	-3,90
F1-P7	-10,10	-10,30	-9,20	-9,00	-7,80	-5,10
F1-P8	-10,00	-10,30	-9,10	-9,00	-7,70	-5,00
F1-P9	-9,60	-9,80	-8,50	-8,30	-6,90	-4,20
F1-P10	-9,60	-9,80	-8,50	-8,30	-7,00	-4,30
F1-P11	-3,40	-3,40	-2,80	-2,70	-1,80	0,30
VALOR MÉDIO		-8,03		-6,99		-4,41
DIFERENÇA (PREDITO - MEDIDO)		-0,96		0,11		0,55

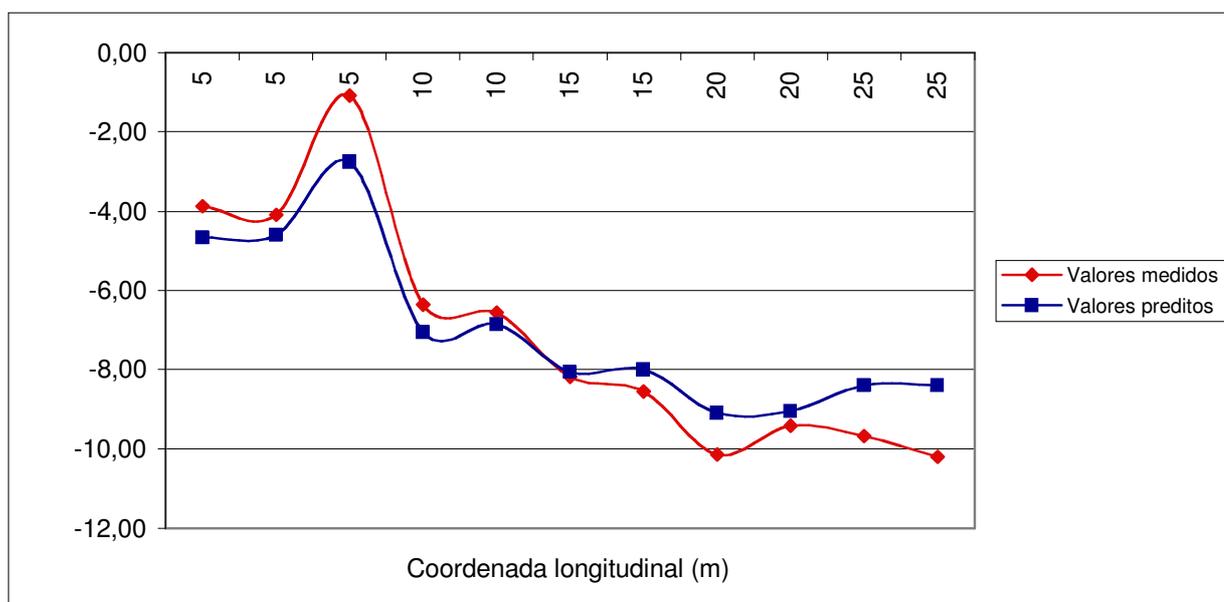


Figura 4.2.2.3.c: Valores medidos e preditos da Clareza (C_{80}), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Para a configuração F2 da fonte sonora os resultados preditos tiveram menores diferenças entre as médias, mas na distribuição espacial dos pontos as diferenças são semelhantes as verificadas para a posição F1 (ver quadro 4.2.2.3.D e figura 4.2.2.3.d).

Tabela 4.2.2.3.D – Valores para a Clareza (C_{80}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	-2,80	-2,90	-2,10	-1,90	-0,90	1,40
F1-P2	-1,30	-1,60	-0,80	-0,60	0,40	2,80
F1-P3	-6,60	-7,00	-6,10	-5,90	-4,90	-2,60
F1-P4	-5,50	-5,90	-5,00	-4,80	-3,70	-1,50
F1-P5	-7,10	-7,50	-6,60	-6,40	-5,30	-2,90
F1-P6	-7,70	-8,00	-7,10	-6,90	-5,80	-3,40
F1-P7	-8,40	-8,70	-7,70	-7,40	-6,30	-3,80
F1-P8	-8,40	-8,70	-7,60	-7,30	-6,10	-3,60
F1-P9	-9,10	-9,40	-8,20	-7,90	-6,60	-4,10
F1-P10	-8,80	-9,20	-8,00	-7,80	-6,60	-4,20
F1-P11	-4,90	-5,00	-4,10	-4,10	-3,10	-0,70
VALOR MÉDIO	-6,57		-5,65		-3,25	
DIFERENÇA (PREDITO - MEDIDO)	-1,13		-0,08		-0,04	

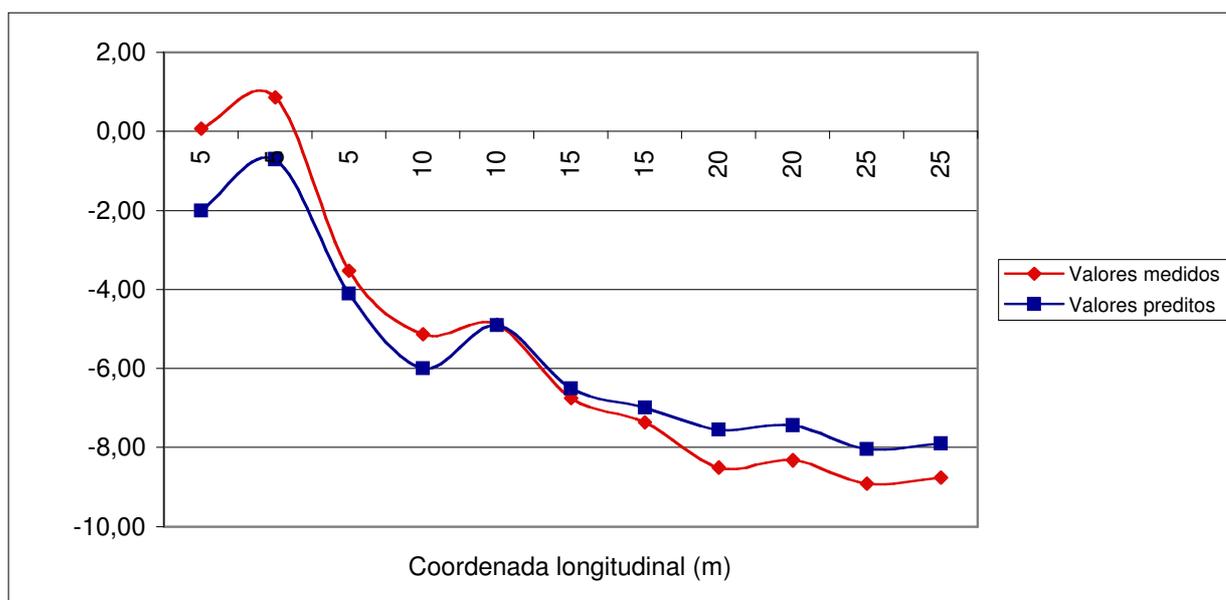


Figura 4.2.2.3.d: Valores medidos e preditos da Clareza (C_{80}), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Como dito anteriormente, a predição para a Definição (D_{50}) demonstrou resultados similares ao da Clareza (C_{80}) e os dados serão descritos adiante sem maiores explicações (ver quadro 4.2.2.3.E, quadro 4.2.2.3.F e figuras 4.2.2.3.e e 4.2.2.3.f).

Tabela 4.2.2.3.E – Valores para a Definição (D_{50}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito (combinação fonte - receptor - F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,17	0,17	0,20	0,20	0,24	0,36
F1-P2	0,17	0,16	0,19	0,20	0,24	0,35
F1-P3	0,08	0,08	0,09	0,10	0,12	0,20
F1-P4	0,08	0,08	0,10	0,10	0,12	0,20
F1-P5	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,14
F1-P6	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,14
F1-P7	0,04	0,04	0,05	0,05	0,07	0,11
F1-P8	0,04	0,04	0,05	0,05	0,07	0,12
F1-P9	0,06	0,05	0,07	0,08	0,10	0,17
F1-P10	0,06	0,06	0,07	0,08	0,10	0,17
F1-P11	0,21	0,21	0,24	0,24	0,27	0,37
VALOR MÉDIO	0,09		0,11		0,17	
DIFERENÇA (PEDITO - MEDIDO)	-0,01		-0,01		-0,01	

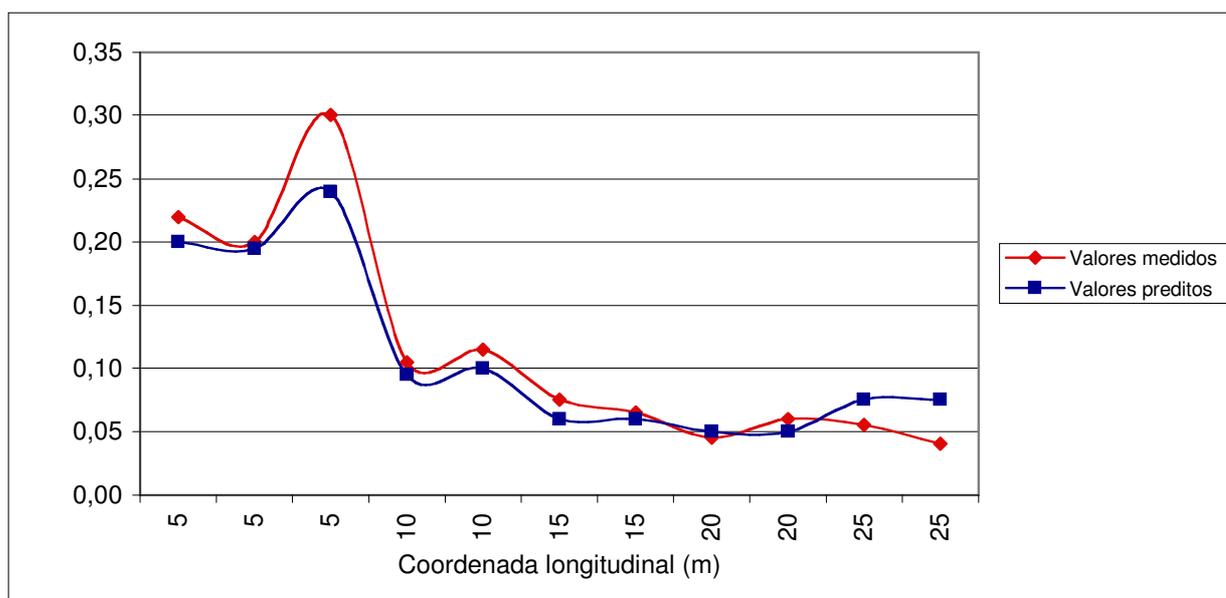


Figura 4.2.2.3.e: Valores medidos e preditos da Definição (D_{50}), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Tabela 4.2.2.3.F – Valores para a Definição (D_{50}), preditos em bandas de oitava, para a posição da Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,27	0,26	0,30	0,31	0,35	0,47
F1-P2	0,36	0,34	0,38	0,39	0,45	0,57
F1-P3	0,09	0,08	0,10	0,10	0,12	0,19
F1-P4	0,13	0,12	0,14	0,14	0,17	0,25
F1-P5	0,08	0,07	0,08	0,09	0,11	0,17
F1-P6	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,14
F1-P7	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,13
F1-P8	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,15
F1-P9	0,06	0,06	0,08	0,08	0,11	0,18
F1-P10	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,14
F1-P11	0,16	0,16	0,18	0,18	0,22	0,31
VALOR MÉDIO	0,12		0,14		0,21	
DIFERENÇA (PREDITO - MEDIDO)	-0,04		-0,02		-0,03	

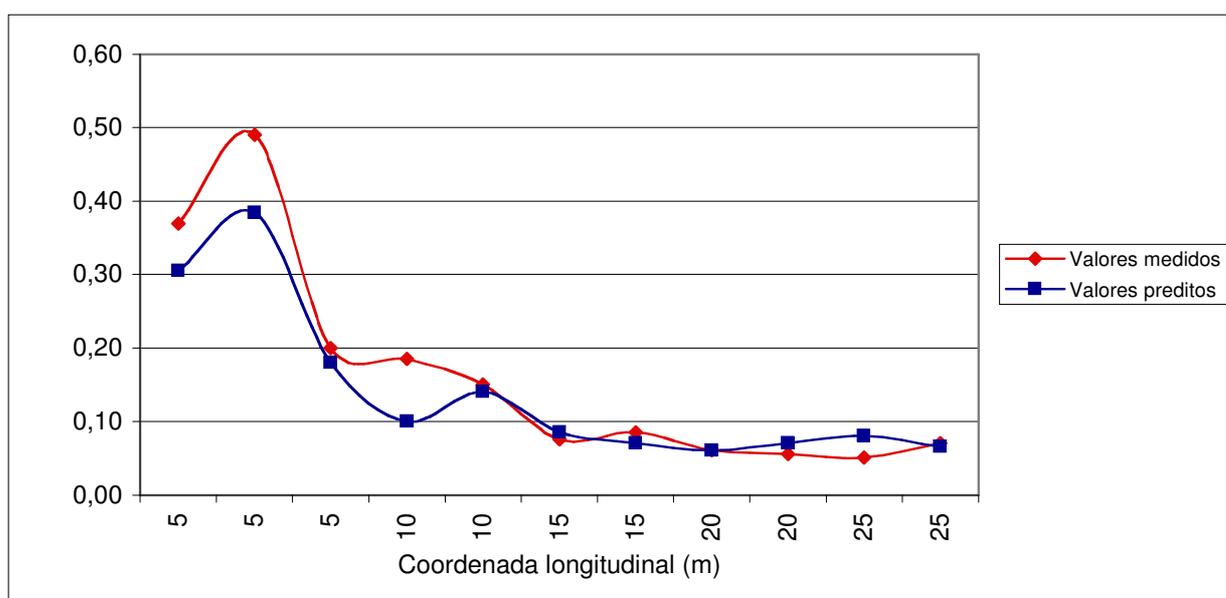


Figura 4.2.2.3.f: Valores medidos e preditos da Definição (D_{50}), em função da distância relativa entre a fonte e o receptor para a Fonte 2 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Os modelos de computador apresentaram bons resultados para os descritores de clareza. O resultado analisado ponto a ponto, ao longo das salas, indicou para a maioria das predições, valores ora estimados a mais, ora a menos, em função da posição relativa entre a fonte e o receptor. A participação das primeiras reflexões é crucial para que bons resultados sejam atingidos exigindo maior exatidão na caracterização das superfícies segundo seus coeficientes de absorção (BORK, 2000). Além da caracterização das superfícies as formas geométricas interferem de maneira decisiva para a qualidade dos resultados.

A simplificação das abóbadas de aresta na igreja do Bom Jesus dos Perdões produziu um ambiente menos difuso ao longo da nave. A adoção de uma abóbada de berço, que produz fortes reflexões, trouxe como consequência, um aumento nos valores das métricas de clareza. Esta simplificação ocultou a tendência de diminuição da clareza e da definição com o aumento da distância entre a fonte e o receptor.

Mesmo assim, a comparação dos resultados preditos com os limites de percepção, para todas as salas avaliadas, indica diferenças próximas de 2 JND (em termos percentuais 10%) para as médias e altas frequências. As bandas de 125 Hz e 250 Hz tiveram desempenhos menos satisfatórios. Ainda que, com desempenhos dependentes da frequência, os dados modelados em computador atenderam as expectativas e puderam ser considerados como bastante satisfatórios (BORK, 2000; 2005; BRADLEY; WANG, 2007).

Por sua vez, o Tempo de Decaimento Inicial calculado pelo modelo de computador demonstrou ser muito sensível à variação espacial e como observaram Bork (2005, p. 951), Bradley e Wang (2007, p. 79) menos preciso para a predição de reverberação quando comparado ao Tempo de Reverberação T_{30} .

4.3 PROJEÇÕES ACÚSTICAS PARA A OCUPAÇÃO TOTAL DOS ASSENTOS

Em edifícios destinados a recepção de um grande número de pessoas, a ocupação das áreas destinadas a audiência (usualmente 2 pessoas por m^2) produz um aumento significativo da absorção sonora dos recintos. Em condições normais de funcionamento, as condições acústicas são alteradas e observa-se a redução do Tempo de Reverberação (T_{30}) e como consequência, um aumento nos valores dos descritores de clareza (C_{80} e D_{50}).

Embora as condições de ocupação sejam determinantes dos parâmetros acústicos medidos nas salas, a maioria dos levantamentos têm sido realizados com as salas vazias, ocupadas apenas pela equipe que realiza as medições. Os levantamentos com ocupação da audiência são de difícil execução e a influência dos ocupantes sobre o campo acústico tem sido corrigida por métodos simples (HIDAKA; NISHIHARA; BERANEK, 2001).

As possibilidades de predição acústica oferecidas pelos modelos de computador se apresentam como uma alternativa de baixo custo e esforço operacional. A partir de

modelos calibrados é possível comparar dados preditos com os obtidos nas medições das salas reais.

Neste trabalho, as diferenças estatísticas observadas para as predições do tempo de reverberação, permitiram que a influência da ocupação total dos assentos, fosse avaliada, através de uma projeção computacional, com relativa confiança.

Os resultados das médias de 500 Hz e 1000 Hz serão exibidos nos gráficos das próximas seções sem a indicação das bandas. Convencionou-se como média, para esses gráficos, a média sobre as frequências centrais em cada posição individual.

4.3.1 IGREJA DA ORDEM III DE SÃO FRANCISCO DAS CHAGAS

A ocupação dos assentos na Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas produziu uma redução do Tempo de Reverberação de quase 1 segundo. A média espacial das frequências centrais (500 Hz e 1000 Hz) obteve uma redução de 0,85 segundo (quadro 4.3.1.A).

Na condição de funcionamento normal, esta igreja atende às recomendações para salas multiuso (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999, p. 218; LONG, 2006, p. 586), condição de qualidade superior a verificada na medição (figura 4.3.1.a).

Tabela 4.3.1.A – Tempos de Reverberação (T_{30}), preditos em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	1,49	1,53	1,37	1,41	1,41	1,15
F1-P2	1,67	1,55	1,52	1,30	1,29	1,07
F1-P3	1,91	1,72	1,57	1,67	1,64	1,33
F1-P4	1,89	1,80	1,62	1,57	1,41	1,25
F1-P5	1,79	1,68	1,64	1,71	1,53	1,38
F1-P6	1,76	1,66	1,68	1,60	1,65	1,26
F1-P7	1,79	1,77	1,71	1,58	1,60	1,35
F1-P8	2,03	1,81	1,57	1,48	1,55	1,25
F1-P9	1,79	1,71	1,64	1,75	1,52	1,37
F1-P10	1,82	1,78	1,64	1,54	1,60	1,40
VALOR MÉDIO	1,75		1,58		1,40	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	-0,47		-0,85		-0,65	

O Tempo de Decaimento Inicial apresentou reduções mais modestas para as médias espaciais (quadro 4.3.1.B), porém, a distribuição espacial dos pontos demons-

trou que apenas os pontos 1 e 2, situados na capela mor não tiveram seus resultados alterados, contribuindo assim para a redução do valor médio.

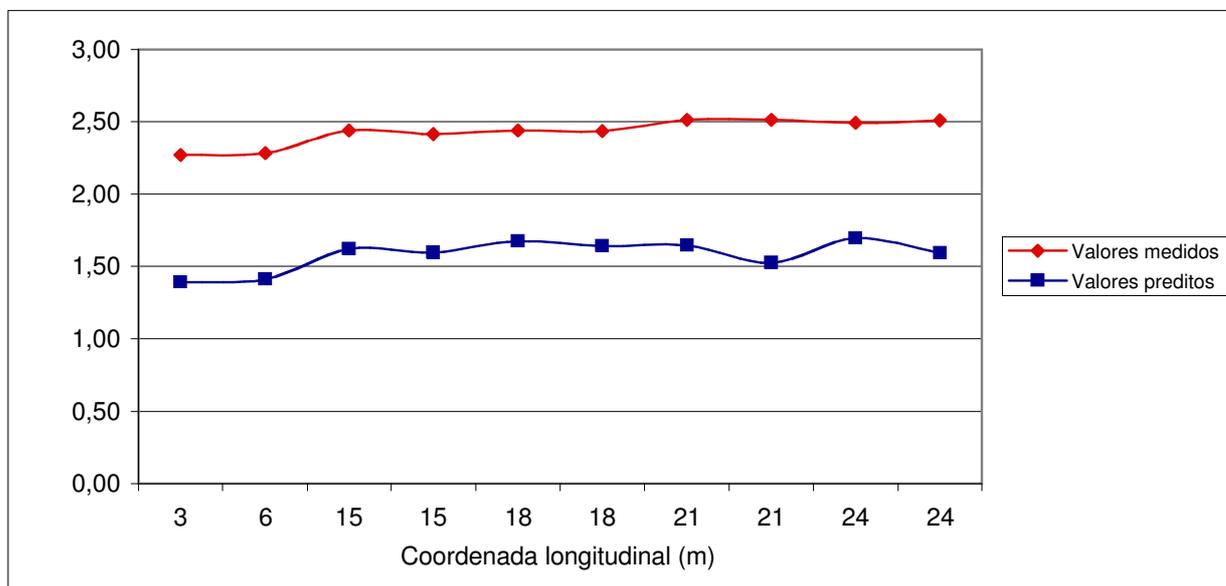


Figura 4.3.1.a – Tempos de Reverberação (T_{30}) medidos com a sala vazia e previstos para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Os pontos posicionados na nave principal indicaram redução de mais de 0,5 segundo o que reflete a diminuição do som reverberante ao longo desse espaço (figura 4.3.1.b).

Tabela 4.3.1.B – Tempos de Decaimento Inicial (EDT), previstos em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto previsto para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	1,44	1,37	1,39	1,22	1,39	1,05
F1-P2	1,54	1,38	1,37	1,43	1,36	1,27
F1-P3	2,15	2,16	2,05	1,89	1,79	1,72
F1-P4	2,25	2,19	1,77	1,91	1,83	1,45
F1-P5	2,54	2,14	2,07	1,80	2,05	1,57
F1-P6	2,40	2,28	2,11	1,86	1,77	1,68
F1-P7	2,40	2,22	1,99	2,03	1,96	1,52
F1-P8	2,58	2,13	2,03	1,81	2,10	1,60
F1-P9	2,44	2,30	1,90	2,01	1,89	1,76
F1-P10	2,38	2,35	1,95	2,00	1,85	1,87
VALOR MÉDIO	2,13	1,83	1,67			
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	-0,01	-0,58	-0,42			

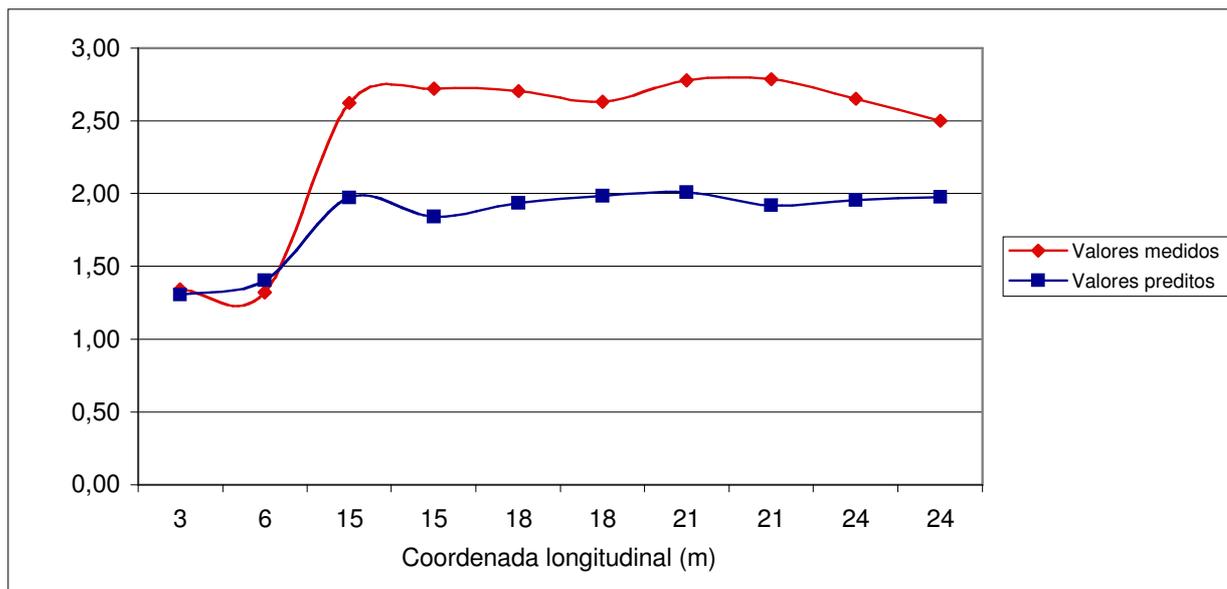


Figura 4.3.1.b – Tempo de Decaimento inicial (EDT), medido com a sala vazia e predito para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Os parâmetros de clareza tiveram seus comportamentos diferentemente afetados pelo aumento da absorção da audiência. O C_{80} aumentou em 3 dB (3 JND) para a igreja ocupada (figura 4.3.1.c). Nesta condição a Clareza atingiu os níveis ótimos recomendados (ISO 3382-1, 2006) para todos pontos, embora, os valores para os pontos mais afastados da fonte seja próximo a especificação mínima (quadro 4.3.1.C).

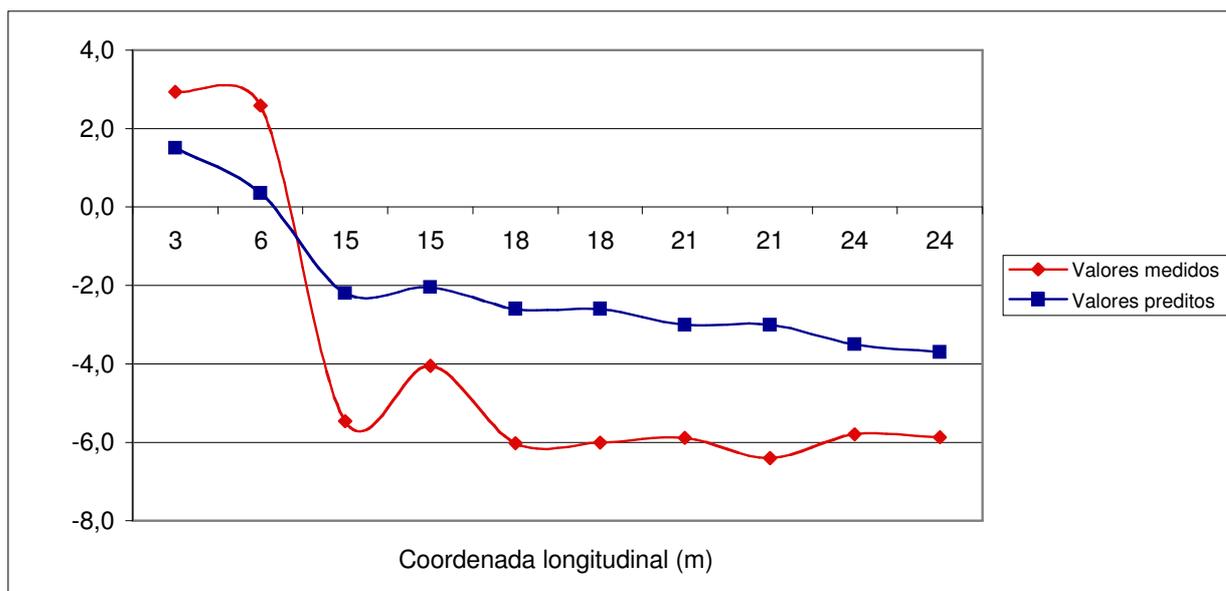


Figura 4.3.1.c – Clareza (C_{80}), medido com a sala vazia e predito para condição de ocupação total dos assentos, Fonte F1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Tabela 4.3.1.C – Clareza (C_{80}), predito em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	1,40	1,00	1,40	1,60	1,70	3,00
F1-P2	0,20	-0,20	0,30	0,40	0,50	1,70
F1-P3	-3,70	-3,20	-2,40	-2,00	-2,00	-0,80
F1-P4	-3,50	-3,00	-2,20	-1,90	-1,80	-0,60
F1-P5	-4,70	-3,90	-2,80	-2,40	-2,40	-1,30
F1-P6	-4,60	-3,80	-2,80	-2,40	-2,40	-1,30
F1-P7	-5,00	-4,20	-3,20	-2,80	-2,80	-1,60
F1-P8	-4,90	-4,20	-3,20	-2,80	-2,80	-1,60
F1-P9	-5,70	-4,90	-3,70	-3,30	-3,20	-2,10
F1-P10	-5,80	-5,00	-3,90	-3,50	-3,30	-2,10
VALOR MÉDIO	-3,39	-2,08	-1,26			
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	0,06	1,92	0,67			

Por sua vez, a definição para a fala (D_{50}), mesmo obtendo um aumento de 15% (ou 3 JND de maneira semelhante ao C_{80}), permanece abaixo de 0,30 para todos os receptores da nave, valor mínimo recomendado, para a boa performance da fala em auditórios (quadro 4.3.1.D e figura 4.3.1.d).

Tabela 4.3.1.D – Definição (D_{50}), predito para condição de ocupação total dos assentos, Fonte F1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,42	0,40	0,43	0,43	0,44	0,50
F1-P2	0,34	0,32	0,34	0,35	0,35	0,41
F1-P3	0,19	0,21	0,24	0,26	0,26	0,31
F1-P4	0,20	0,22	0,26	0,27	0,27	0,33
F1-P5	0,16	0,18	0,23	0,24	0,24	0,29
F1-P6	0,17	0,19	0,23	0,25	0,25	0,30
F1-P7	0,15	0,17	0,21	0,23	0,23	0,28
F1-P8	0,15	0,17	0,21	0,23	0,23	0,27
F1-P9	0,12	0,14	0,18	0,19	0,19	0,24
F1-P10	0,12	0,14	0,18	0,19	0,20	0,24
VALOR MÉDIO	0,21		0,26		0,29	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	0,01		0,05		0,01	

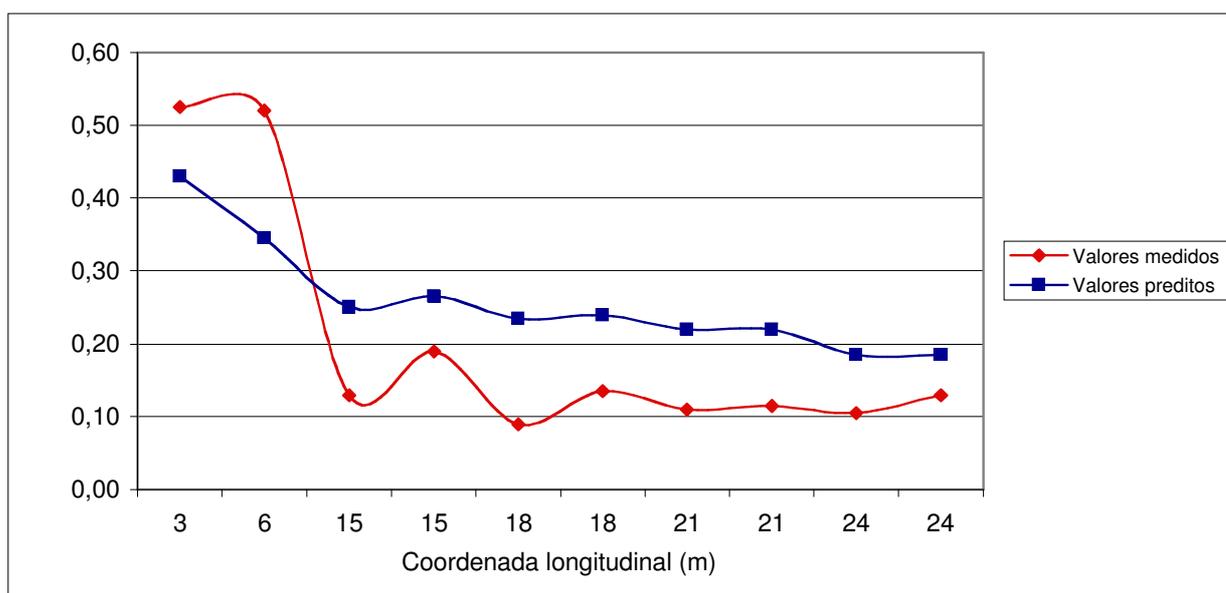


Figura 4.3.1.d – Definição (D_{50}), medido com a sala vazia e predito para condição de ocupação total dos assentos, Fonte F1 – Igreja da Ordem III de São Francisco das Chagas.

As predições para os dois pontos da capela-mor registraram valores abaixo do esperado para a Clareza e a Definição. Na condição de ocupação das cadeiras, os resultados, menores que os medidos (com a sala vazia) indicaram que, provavelmente, a especificação dos coeficientes de absorção para estes assentos (pessoa sentada em cadeira mediamente estofada – 2 pessoas por m^2 – material n.º. 908 da biblioteca do programa ODEON 7.01, 2005) forneceu menos absorção sonora que o desejado (figura 4.3.1.c e figura 4.3.1.d).

4.3.2 IGREJA DE NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO DE SÃO BENEDITO

A predição acústica da condição ocupada para a Igreja de Nossa Senhora do Rosário resultou em um tempo de reverberação de 2,1 segundos para a média espacial das freqüências de 500 Hz e 1000 Hz (quadro 4.3.2.A).

Tabela 4.3.2.A – Tempos de Reverberação (T_{30}), preditos em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto predito para o par, Fonte - receptor (F-P)	Freqüência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	2,81	2,95	2,34	2,06	2,09	1,49
F1-P2	2,64	2,41	2,12	2,02	1,91	1,46
F1-P3	2,57	2,53	2,19	2,01	1,72	1,48
F1-P4	2,71	2,56	2,11	1,85	1,80	1,42
F1-P5	2,49	2,44	2,18	2,10	1,93	1,47
F1-P6	2,77	2,55	2,15	2,15	1,96	1,65
F1-P7	2,85	2,43	2,19	1,96	1,82	1,53
F1-P8	2,69	2,25	2,07	2,06	1,74	1,44
VALOR MÉDIO	2,60		2,10		1,68	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	-0,41		-1,16		-1,01	

Entre os valores médios, a redução mais significativa ocorreu nas freqüências de 500 Hz e 1000 Hz (figura 4.3.2.a). Nestas bandas os coeficientes de absorção são maiores e este comportamento é esperado para todas as salas. Na igreja do Rosário, as altas freqüências também foram bastante impactadas nas predições e os dados demonstram uma redução média de 1 segundo no T_{30} das faixas de 2000 Hz e 4000 Hz.

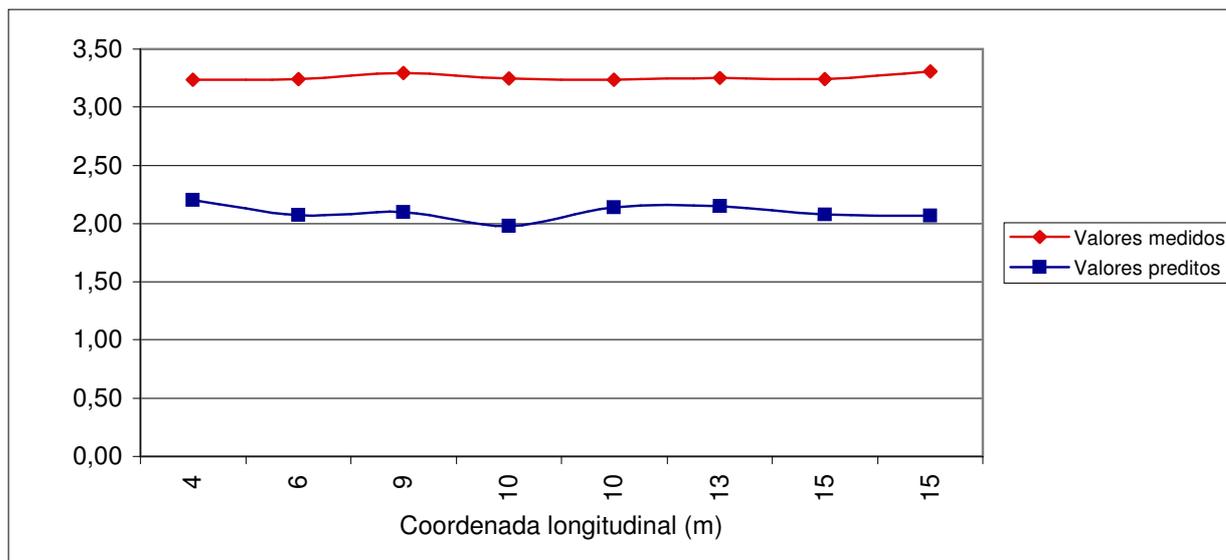


Figura 4.3.2.a – Tempos de Reverberação (T_{30}) medidos com a sala vazia e previstos para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Os decréscimos dos valores do Tempo de Reverberação também foram observados para o EDT. O incremento na absorção diminui a energia contida no som reverberante o que reduz os valores extrapolados para a curva de decaimento de 10 dB. Nos programas de computador, os cálculos do EDT tornam-se mais sensíveis às alterações dos coeficientes de absorção que o T_{30} (quadro 4.3.2.B e figura 4.3.2.b).

Tabela 4.3.2.B – Tempos de Decaimento Inicial (EDT), previstos em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto previsto para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	2,88	2,15	1,98	1,92	1,83	1,60
F1-P2	2,35	2,13	1,97	1,80	1,78	1,63
F1-P3	2,43	2,04	1,76	1,70	1,58	1,30
F1-P4	2,45	2,26	1,91	2,01	1,88	1,49
F1-P5	2,78	2,31	1,87	1,69	1,80	1,47
F1-P6	2,72	2,46	2,03	1,86	1,89	1,37
F1-P7	2,69	2,44	2,20	1,81	1,73	1,55
F1-P8	2,92	2,54	2,23	1,92	1,83	1,79
VALOR MÉDIO	2,47		1,92		1,66	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	-0,56		-1,35		-1,02	

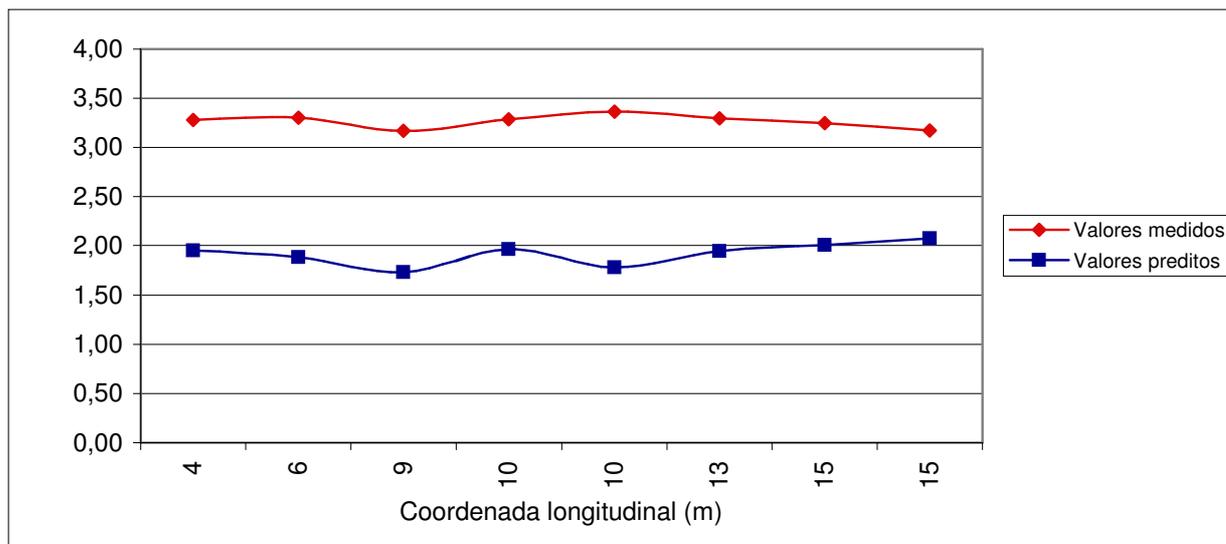


Figura 4.3.2.b – Tempo de Decaimento inicial (EDT), medido com a sala vazia e predito para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

A clareza foi benéficamente atingida pelo aumento de absorção sonora da ocupação nesta igreja. Para a maioria dos pontos de recepção estudados, o C_{80} sofreu um aumento de 4 dB para as frequências centrais. As baixas e as altas frequências também tiveram seus valores elevados substancialmente (quadro 4.3.2.C).

Tabela 4.3.2.C – Clareza (C_{80}), predito em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	-4,20	-3,00	-2,20	-1,80	-1,60	-0,70
F1-P2	-2,60	-1,30	-0,10	0,50	0,90	1,70
F1-P3	-2,20	-1,20	0,00	0,50	0,70	1,50
F1-P4	-2,00	-1,30	-0,60	-0,40	-0,30	0,60
F1-P5	-3,10	-1,90	-0,50	-0,10	0,20	1,20
F1-P6	-3,20	-2,60	-2,00	-1,70	-1,40	-0,20
F1-P7	-4,50	-3,50	-2,00	-1,30	-1,00	0,00
F1-P8	-5,10	-4,30	-3,10	-2,50	-2,20	-1,20
VALOR MÉDIO	-2,88		-1,08		-0,11	
DIFERENÇA (PEDITO-MEDIDO)	1,52		4,30		3,48	

Ao comparar os valores preditos com os medidos para a sala vazia, observa-se que o índice de clareza passa a apresentar valores compatíveis com as recomendações para que sejam alcançadas condições ótimas (figura 4.3.2.c).

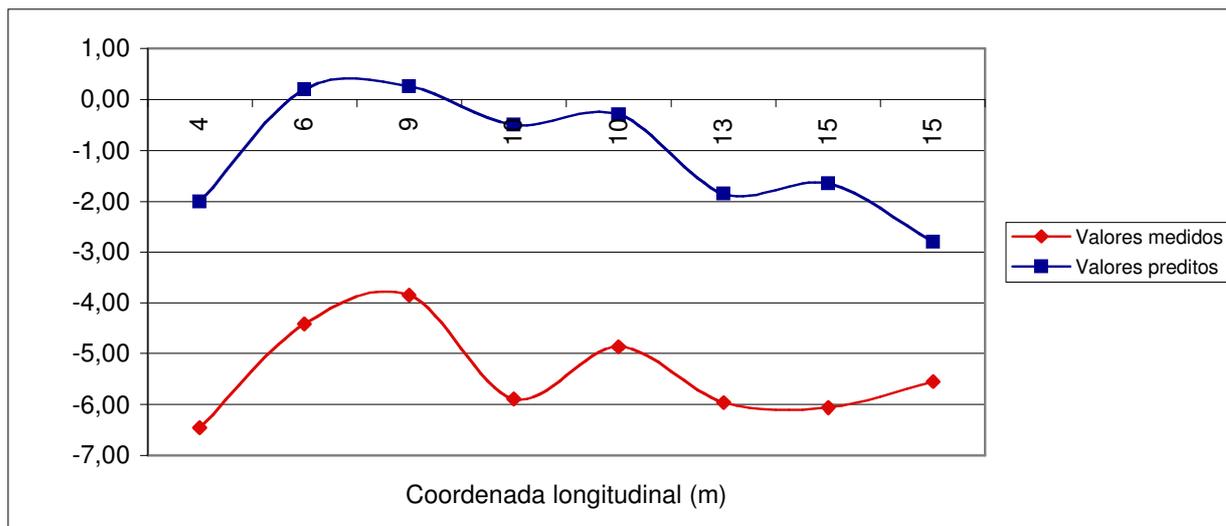


Figura 4.3.2.c – Clareza (C_{80}), medido com a sala vazia e predito para condição de ocupação total dos assentos, Fonte F1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Da mesma forma, a Definição também demonstrou aumento nas médias. Nas frequências de 500 Hz e 1000 Hz os valores foram elevados em 15% (3 JND). Esse aumento no entanto não foi suficiente para garantir boas condições para toda a sala. As posições à entrada da nave, mais afastadas do altar permaneceram com definição pobre – D_{50} abaixo de 0,30 – (quadro 4.3.2.D e figura 4.3.2.d).

Tabela 4.3.2.D – Definição (D_{50}), predito em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,16	0,19	0,21	0,22	0,23	0,27
F1-P2	0,26	0,32	0,38	0,41	0,44	0,48
F1-P3	0,28	0,32	0,37	0,39	0,40	0,44
F1-P4	0,25	0,28	0,32	0,34	0,34	0,38
F1-P5	0,20	0,25	0,30	0,31	0,32	0,37
F1-P6	0,20	0,22	0,25	0,25	0,27	0,33
F1-P7	0,14	0,18	0,24	0,27	0,29	0,33
F1-P8	0,14	0,17	0,22	0,24	0,26	0,30
VALOR MÉDIO	0,22		0,30		0,34	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	0,05		0,15		0,13	

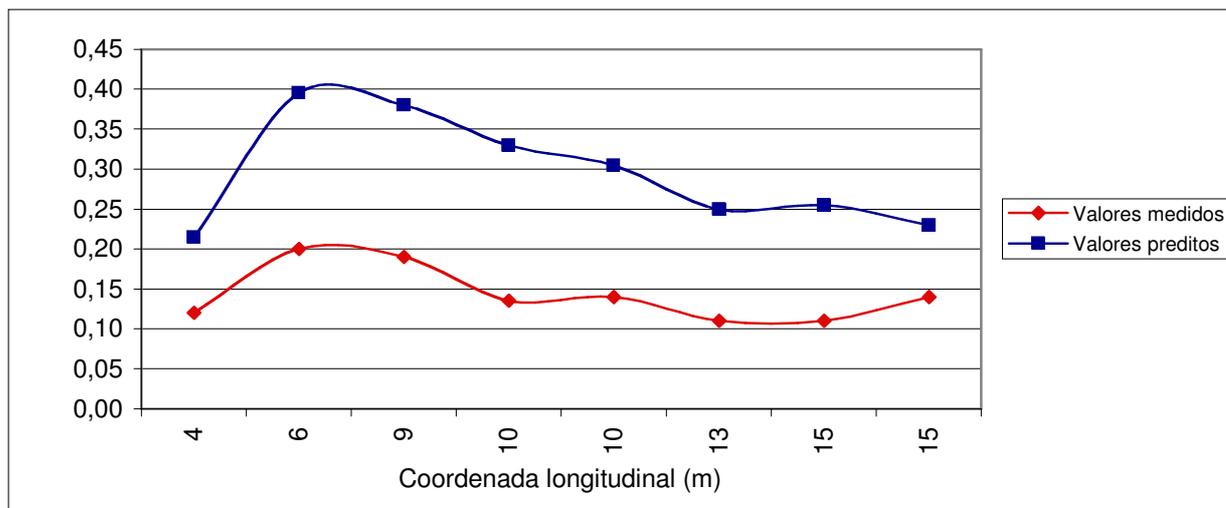


Figura 4.3.2.d – Definição (D_{50}), medido com a sala vazia e predito para condição de ocupação total dos assentos, Fonte F1 – Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito.

As medições e predições apontam para uma condição mais favorável para a execução de música na Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito. Os valores obtidos para a definição da fala tanto com igreja vazia quanto totalmente ocupada descrevem uma sala com performance insatisfatória para a palavra falada.

4.3.3 IGREJA DO BOM JESUS DOS PERDÕES

A Igreja do Bom Jesus dos Perdões foi a que, dentre as três, apresentou a maior redução nos Tempos de Reverberação devido à ocupação das áreas de audiência, foram 2 segundos a menos (frequências de 500 Hz e 1000 Hz) para todos os pontos da sala (figura 4.3.3.a).

A média espacial de 2,28 segundos (quadro 4.3.3.A) caracteriza esta sala como um espaço religioso apropriado para a execução de música de órgão (LONG, 2006, p. 586). Nestas condições, sua utilização como auditório para a oratória e leitura é claramente desfavorável.

Tabela 4.3.3.A – Tempos de Reverberação (T_{30}), preditos em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	4,15	2,80	2,32	2,17	2,00	1,43
F1-P2	4,05	2,76	2,30	2,15	1,96	1,48
F1-P3	4,20	2,72	2,26	2,19	2,05	1,51
F1-P4	4,14	2,69	2,34	2,34	2,08	1,53
F1-P5	4,09	2,84	2,39	2,28	2,03	1,63
F1-P6	4,16	2,88	2,27	2,31	2,06	1,72
F1-P7	3,98	2,82	2,42	2,34	2,14	1,64
F1-P8	4,17	2,84	2,50	2,15	2,03	1,60
F1-P9	4,20	2,92	2,51	2,31	2,00	1,68
F1-P10	4,07	2,78	2,45	2,28	2,12	1,66
F1-P11	3,69	2,48	1,98	1,89	1,59	1,26
VALOR MÉDIO		3,43		2,28		1,78
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)		-1,13		-2,33		-1,74

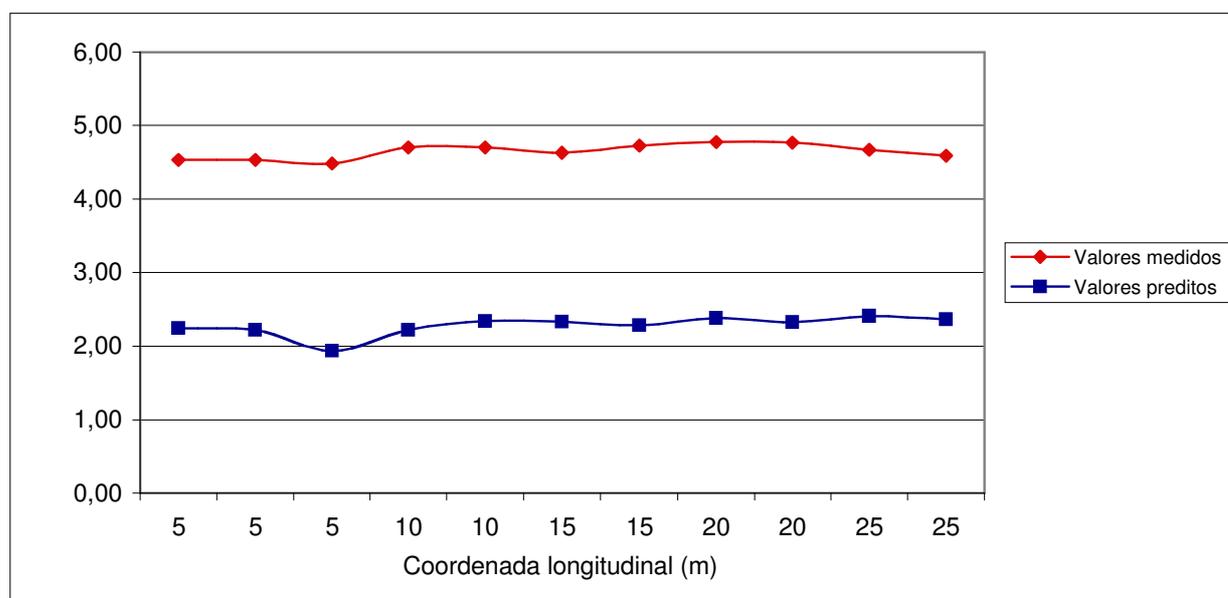


Figura 4.3.3.a – Tempos de Reverberação (T_{30}) medidos com a sala vazia e preditos para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Para o EDT, os tempos foram reduzidos em 2,44 segundos (quadro 4.3.3.B) e os pontos distribuídos ao longo da sala apresentaram a mesma tendência dos valores medidos. O terceiro ponto do gráfico, ponto F1-P11 (figura 4.3.3.b), posicionado na capela mor demonstra a influência do som direto na composição dos baixos valores.

Tabela 4.3.3.B – Tempos de Decaimento Inicial (EDT), preditos em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	3,96	2,53	2,20	2,15	1,91	1,48
F1-P2	4,08	2,49	2,13	2,09	1,83	1,78
F1-P3	4,39	2,94	2,36	2,14	2,05	1,67
F1-P4	4,45	3,00	2,22	2,32	1,91	1,85
F1-P5	4,55	3,10	2,59	2,31	2,02	1,71
F1-P6	4,52	3,00	2,41	2,13	2,28	1,71
F1-P7	4,65	3,19	2,35	2,34	2,09	1,67
F1-P8	4,87	3,13	2,38	2,44	2,10	1,82
F1-P9	4,56	3,20	2,38	2,28	1,92	1,55
F1-P10	4,61	3,03	2,31	2,35	2,17	1,62
F1-P11	2,83	1,70	1,32	1,29	1,22	1,26
VALOR MÉDIO	3,71		2,29		1,86	
DIFERENÇA (PREDITO-MEDIDO)	-0,90		-2,44		-1,67	

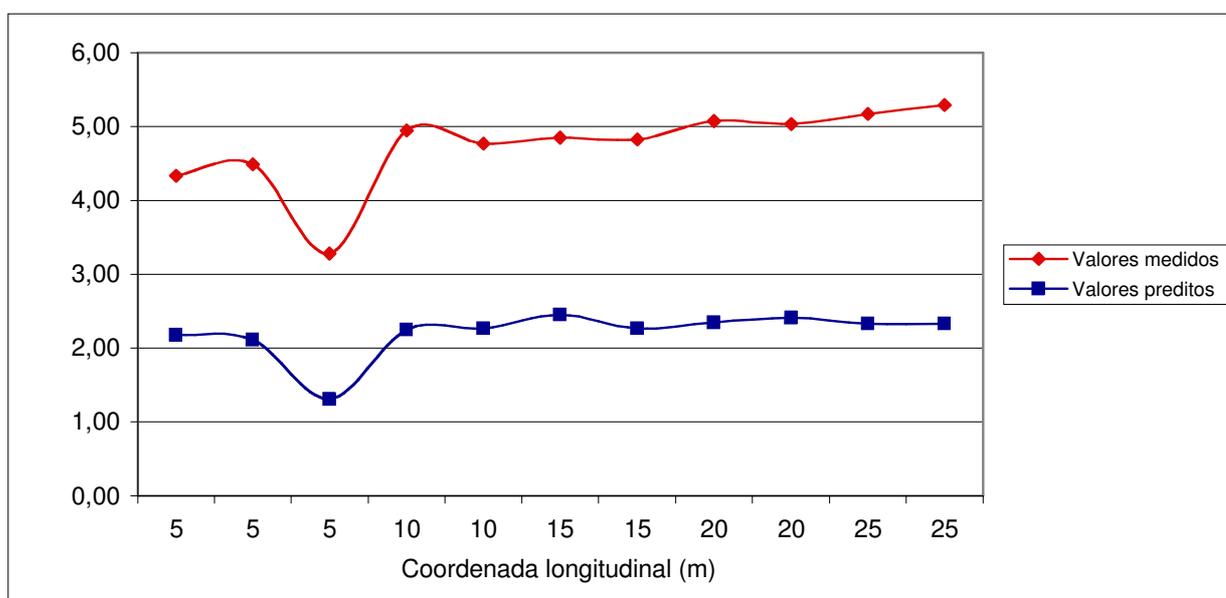


Figura 4.3.3.b – Tempo de Decaimento inicial (EDT), medido com a sala vazia e predito para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

A clareza (C_{80}) apresentou um aumento de 5 dB nas comparações dos valores calculados pelo modelo de computador e os medidos no edifício. Os valores para o ponto F1-P11 na capela-mor foram privilegiados pela pequena distância em relação à fonte (figura 4.3.3.c).

Com a nave totalmente ocupada, os valores de C_{80} variaram entre -4 dB e +2 dB, esta faixa de valores figura entre as especificações para ótimos desempenhos em salas cuja performance na execução musical é requerida.

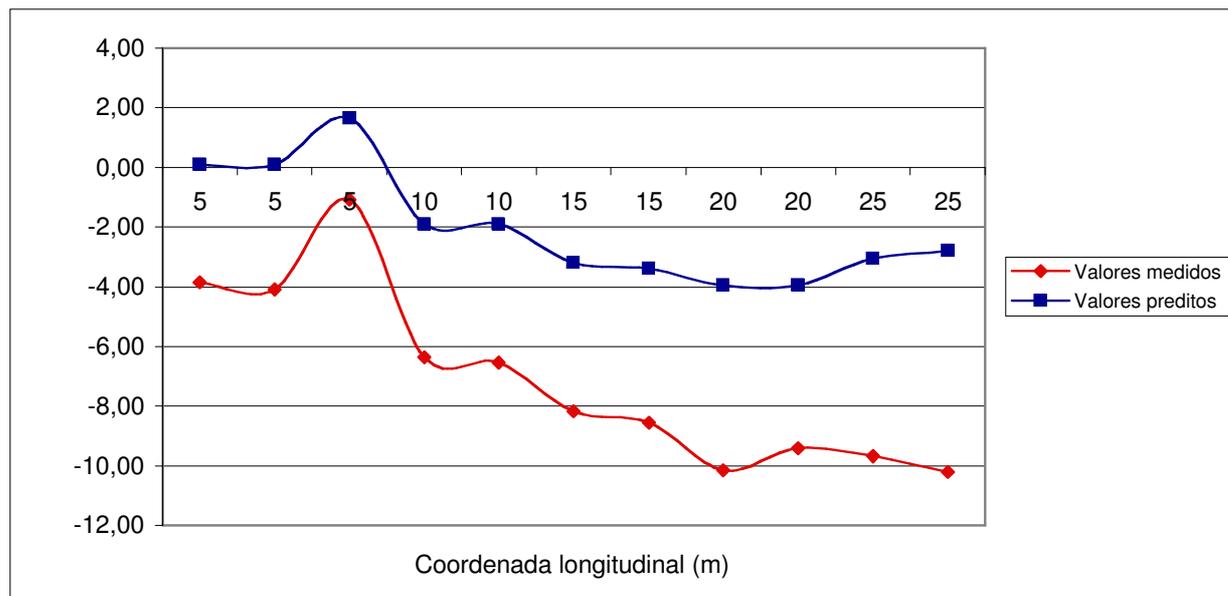


Figura 4.3.3.c – Clareza (C_{80}), medido com a sala vazia e predito para condição de ocupação total dos assentos, Fonte F1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

O aumento médio de 5 dB para as freqüências centrais, preditos com a igreja ocupada, deve ser observado com ressalvas (quadro 4.3.3.C). As simplificações na geometria da sala demonstraram que a abóbada de berço modelada em substituição das abóbadas de aresta poderiam ter causado um aumento dos valores estimados do C_{80} em 1 dB (1 JND). Com esta consideração em mente poder-se-ia esperar resultados reais menos animadores sobre as condições acústicas da igreja ocupada.

Tabela 4.3.3.C – Clareza (C_{80}), predito em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Freqüência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	-4,20	-1,60	-0,10	0,30	0,70	2,00
F1-P2	-4,10	-1,60	-0,10	0,30	0,70	2,00
F1-P3	-6,60	-3,70	-2,10	-1,70	-1,20	0,00
F1-P4	-6,40	-3,60	-2,10	-1,70	-1,20	0,10
F1-P5	-7,70	-5,00	-3,50	-2,90	-2,40	-1,20
F1-P6	-7,60	-5,00	-3,60	-3,20	-2,60	-1,10
F1-P7	-8,50	-5,60	-4,10	-3,80	-3,30	-2,10
F1-P8	-8,50	-5,60	-4,10	-3,80	-3,30	-2,00
F1-P9	-7,90	-4,80	-3,30	-2,80	-2,10	-0,90
F1-P10	-7,90	-4,60	-3,00	-2,60	-2,10	-0,90
F1-P11	-2,40	0,20	1,50	1,80	2,10	3,20
VALOR MÉDIO		-5,12		-2,03		-0,71
DIFERENÇA (PEDITO-MEDIDO)		1,94		5,07		4,25

Novamente, a definição para a fala (D_{50}) não atingiu os requisitos mínimos para uma boa inteligibilidade (quadro 4.3.3.D). Observou-se também que a definição foi menos beneficiada com o aumento da absorção quando comparada a Clareza (são 3 JND para o D_{50} e 4 JND para o C_{80} – 5 JND se não se considerar a super-estimação de valores para a clareza).

Tabela 4.3.3.D – Definição (D_{50}), predito em bandas de oitava, para condição de ocupação total dos assentos Fonte F1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

Ponto predito para o par, fonte - receptor (F-P)	Frequência em bandas de oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
F1-P1	0,22	0,33	0,41	0,42	0,45	0,51
F1-P2	0,21	0,32	0,40	0,42	0,45	0,51
F1-P3	0,11	0,19	0,26	0,28	0,29	0,34
F1-P4	0,11	0,19	0,26	0,28	0,29	0,34
F1-P5	0,07	0,14	0,20	0,21	0,23	0,27
F1-P6	0,06	0,12	0,18	0,20	0,22	0,27
F1-P7	0,06	0,12	0,16	0,18	0,19	0,24
F1-P8	0,06	0,12	0,17	0,18	0,20	0,24
F1-P9	0,08	0,16	0,22	0,23	0,26	0,32
F1-P10	0,09	0,17	0,23	0,25	0,27	0,32
F1-P11	0,25	0,36	0,42	0,43	0,45	0,50
VALOR MÉDIO	0,16	0,27	0,33	0,33	0,33	0,33
DIFERENÇA (PEDITO-MEDIDO)	0,06	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15

A figura 4.3.3.d mostra que somente os pontos mais próximos da fonte tem boa definição, a partir de 10 metros de distância da fonte, a Definição tem uma redução acentuada (quase 15% a menos que os pontos F1-P1, F1-P2 e F1-P11).

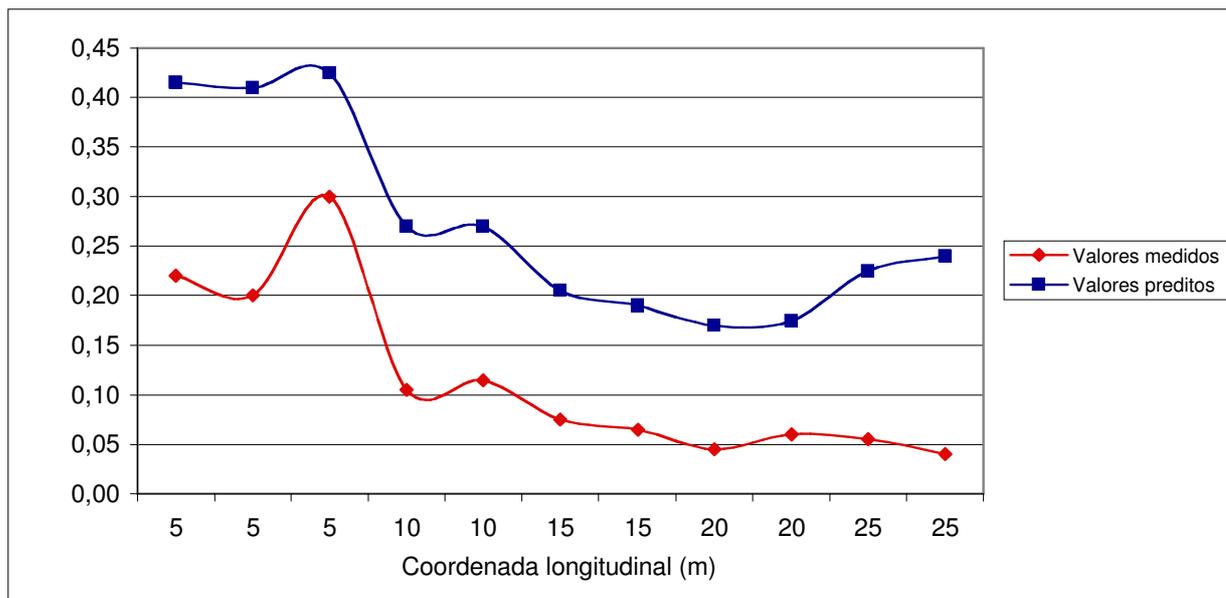


Figura 4.3.3.d – Definição (D_{50}), medido com a sala vazia e previsto para condição de ocupação total dos assentos, Fonte F1 – Igreja do Bom Jesus dos Perdões.

A ocupação das áreas de audiência demonstrou como maiores benefícios, a redução da reverberação em todas as salas e por consequência, obteve-se ganhos na clareza e definição na amostra de salas investigada.

Observou-se que entre as métricas, a Clareza (C_{80}) passou a apresentar condições ótimas para a maioria das posições estudadas em cada uma das igrejas, caracterizando estas salas como boas salas para execução de música e no caso da Igreja do Bom Jesus dos Perdões, sua indicação para músicas de órgão.

Esta qualidade porém não se estende para a oratória e para a leitura. Mesmo com o aumento da absorção (na situação ocupada), os valores de D_{50} caracterizam o campo acústico destas salas como de baixa qualidade quando de sua utilização como auditórios para fala.

5. CONCLUSÃO

É sabido que os parâmetros acústicos em recintos fechados são dependentes do volume das salas e das propriedades acústicas dos materiais empregados na construção e nos acabamentos das superfícies. Há muito foi demonstrada as interações entre o volume e a absorção das salas e o tempo de reverberação.

A estas características, inerentes ao espaço arquitetônico, somam-se outras variáveis, ao se investigar os parâmetros indicadores de clareza, dentre as quais, a posição da fonte sonora e dos pontos de recepção e as características geométricas do espaço.

A caracterização acústica de edifícios religiosos, especialmente das igrejas católicas envolvem algumas particularidades. As igrejas são edifícios que possuem demandas acústicas muitas vezes antagônicas, devem possuir as qualidades acústicas de um auditório para fala e leitura e garantir boas condições para execução musical. As medições acústicas realizadas neste trabalho obtidas sem a ocupação de pessoas, mostraram que as igrejas são ambientes com tempos de reverberação relativamente longos.

Embora os edifícios tenham composições arquitetônicas diferentes – uma igreja colonial ampliada posteriormente (Igreja da Ordem), uma em estilo barroco (Igreja da do Rosário) e uma neogótica (Igreja do Bom Jesus) – e a amostra muito pequena para que quaisquer correlações possam ser feitas entre o comportamento dos parâmetros medidos e determinada característica arquitetônica ou emprego de determinado material, algumas conclusões podem ser destacadas.

A reverberação é proporcional aos volumes (m^3) das salas. Quando indicada pelo Tempo de Decaimento Inicial (EDT), apresentou valores muito próximos aos medidos para o T_{30} , especialmente, nas igrejas da Ordem III de São Francisco da Chagas e Bom Jesus dos Perdões. Pouca concordância entre as métricas para a Igreja de Nossa Senhora do Rosário de São Benedito foi verificada. A dispersão dos dados desta sala não foi produto apenas da influência da distância entre a fonte e o receptor. Uma análise mais aprofundada desta sala poderia ser feita para a investigação das variáveis intervenientes no decaimento inicial, mas isto escapa às delimitações deste trabalho e deve ser incluído nas sugestões para trabalhos futuros.

Os descritores de clareza foram impactados pela distância e o comportamento comum foi o de redução nos valores dos índices com o afastamento da fonte. Mas esta

redução tornou-se menor entre os pontos mais afastados. Os valores medidos de C_{80} e D_{50} tornam-se quase equivalentes para os pontos de medição com raios de afastamento maiores que doze metros.

Outro ponto observado foi a reprodução do campo acústico das salas em programa de computador. A análise estatística realizada para as predições do Tempo de Reverberação demonstraram que este parâmetro foi reproduzido de maneira bastante precisa em quase todas as bandas de oitava (p -valor $> 0,05$ na comparação das médias).

As diferentes possibilidades de ajustes para a execução dos cálculos oferecidas pelo programa utilizado não tiveram desempenho uniforme para todas as salas e não se pôde eleger uma combinação (grupo) dentre os doze avaliados como o mais robusto.

A comparação dos demais parâmetros preditos (EDT , C_{80} e D_{50}) com seus respectivos valores medidos apontou diferenças de aproximadamente 2 JND. A reverberação calculada com o T_{30} provou mais confiabilidade nos resultados e mostrou-se preferível ao EDT para as análises baseadas em modelos digitais.

Em salas destinadas à recepção de grandes quantidades de pessoas (salas de concerto, auditórios e edifícios religiosos), o incremento de absorção sonora nas condições normais de funcionamento não deve ser ignorado na avaliação.

A qualidade das predições permitiu que a influência da ocupação na acústica das igrejas fosse avaliada de maneira mais rápida e a baixo custo operacional, vantagens intrínsecas dos modelos de computador.

As predições em que a presença da audiência foi considerada demonstrou que o aumento da absorção sonora da sala reduziu o Tempo de Reverberação e promoveu um aumento significativo na clareza.

Com exceção da Igreja do Bom Jesus dos Perdões, cuja reverberação permanece acima dos 2 segundos, os valores para o T_{30} e o C_{80} passaram a figurar entre os recomendados para que se atinja condições ótimas de performance em salas multi-uso. Quanto à definição (D_{50}), mesmo com um aumento de 10% a 15% em relação à condição de sala desocupada, os resultados são compatíveis com uma definição pobre da fala.

Por fim, ressalte-se que as edificações estudadas fazem parte do patrimônio cultural da cidade de Curitiba como bens tombados e que suas construções antecedem

quaisquer regulamentações sobre a qualidade acústica de recintos fechados ou de técnicas de predição acústica.

Lembre-se também que os serviços religiosos eram cantados em latim e que somente em meados da década de 1960, com as modificações implementadas pelo Concílio Vaticano II (1965), especialmente, com a adoção dos idiomas nacionais, as necessidades de inteligibilidade da fala passaram a ser um requisito imperioso para a acústica desses edifícios.

Além disso, em todas as igrejas foi constatada a presença de instalações para a amplificação eletroeletrônica do som. Estes recursos podem corrigir as deficiências de clareza encontradas pela investigação proposta por este trabalho, mas isto por si já é objeto de estudo para um futuro trabalho e figura aqui apenas como sugestão.

Dentre outras possibilidades de estudos sugere-se a investigação do Índice de Transmissão da Fala (STI), fundamental para a caracterização qualitativa da inteligibilidade da fala, cujas medições podem testar além das condições acústicas naturais, os sistemas de amplificação eletroeletrônicos.

Outra possibilidade seria a ampliação do número de igrejas analisadas para que se pudesse investigar características específicas de um determinado estilo arquitetônico, do emprego de materiais ou técnicas construtivas.

Uma investigação de um número maior de métricas também poderia ser desejável para a compreensão da acústica neste tipo de sala, dentre elas, destaque-se as frações laterais de energia refletida (LF) e também da impressão binaural IACC, responsáveis pelas sensações de espacialidade do som.

E finalmente, as possibilidades de predição acústica dos programas de computador poderiam servir à análise de soluções de projeto, entre elas, a substituição de materiais ou adoção de estruturas móveis para o condicionamento acústico, ou mesmo, o melhor posicionamento de alto falantes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, J. B.; BERKLEY, D. A. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 65, n. 4, p. 943-950, abr. 1979.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C423-07a** - Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method, West Conshohocken – Pennsylvania, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179** Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.

BARRON, M. Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. **Acoustic, Science & Technology**, v. 26, n. 2, p. 168, 2005.

BERANEK, L. **Concert halls and Opera houses: music, acoustics, and architecture**. 2. ed. New York: Springer Verlag, 2004.

BERANEK, L., Acoustics and musical qualities. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 99, n. 5, p. 2647-2652, mai. 1996.

BISQUERRA, R.; SARRIERA, J.C.; MARTÍNEZ, F. **Introdução a estatística: enfoque informático com o pacote estatístico SPSS**. 1^a ed. Porto Alegre, Artmed, 2004.

BORK, I. A comparison of room simulation software — The 2nd round robin on room acoustical computer simulation. **Acustica united with Acta Acustica**, v. 86, p. 943-956, 2000.

BORK, I. Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation — part I: Measurements. **Acustica united with Acta Acustica**, v. 91, p. 740-752, 2005.

BORK, I. Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation — part II: Calculations. **Acustica united with Acta Acustica**, v. 91, p. 753-763, 2005.

BOSTWICK, L. G. An efficient loud speaker at the higher audible frequencies. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 2, n. 2, p. 242-250, out. 1930.

BOTTAZZINI, M. C., **Igrejas setecentistas: a influência do estilo arquitetônico sobre as qualidades acústicas**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

BRADLEY, D. T.; WANG, L. M. Comparison of measured and computer-modeled objective parameters for an existing coupled volume concert hall. **Building acoustics**, v. 14, n. 2, p.79-90, 2007.

BRADLEY, J. S. A comparison of three classical concert halls. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 89, n. 3, p. 1176-1192, 1991.

BRADLEY, J. S. Auditorium acoustics measures from pistol shots. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 80, n. 1, p. 199-205, jul. 1986.

BRADLEY, J. S.; REICH, R.; NORCROSS, S. G. A just noticeable difference in C_{50} for speech. **Applied Acoustics**, v. 58, p. 99-108, 1999.

BRADLEY, J.; SOULODRE, G. A. Subjective evaluation of new room acoustic measures. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 98, n. 1, p. 295-301, jul. 1995.

BRADLEY, J.; SOULODRE, G. A. The influence of late arriving energy on spatial impression. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 97, n. 4, p. 2263-2271, abr. 1995.

BRADLEY, J.S. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls. **Acoustic, Science and Technology**, v. 26, n. 2, p. 170-178, 2005.

BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT A/S, Dirac Room Acoustic Software Type 7841 for Windows. Version 3.0, Instruction Manual, Brüel & Kjaer Sound & Vibration A/S, Nærum outubro, 2003.

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

CARVALHO, A. P. O. The use of the Sabine and Eyring reverberation time equations to churches. 129th meeting of the Acoustical Society of America, Washington DC, 30 maio - 03 junho, 1995. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~carvalho/asa129.pdf>. acesso em 04 de agosto de 2006 as 12:43:00.

CAVANAUGH, W. J.; WILKES, J. A. **Architectural Acoustics: principles and practice**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

CIRILLO, E.; MARTELOTTA, F. Acoustic of Apulian-Romanesque churches: an experimental survey. **Building Acoustics**, v. 9, n. 4, p. 271-288, 2002.

CIRILLO, E.; MARTELOTTA, F. Acoustic of Apulian-Romanesque churches: correlations between architectural and acoustic parameters. **Building Acoustics**, v. 10, n. 1, p. 22-76, 2003.

CIRILLO, E.; MARTELOTTA, F. Sound propagation and energy relations in churches. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 118, n. 1, p. 232-248, 2005.

CIRILLO, E.; MARTELOTTA, F. **Worship, acoustics, and architecture**. Essex: Multi-Science Publishing Company LTD, 2006.

CREMER, L.; MÜLLER, H. A. **Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik**, Stuttgart: Hirzel Verlag, 1978.

CRISTENSEN, C.L. Odeon Room Acoustics Program User Manual Version 7.0, p. 1-86 2003.

DESARNAULDS, V. **De l'acoustique des églises en Suisse – une approche multidisciplinaire.** ,Lausanne, Suíça, 2002. Tese de Doutorado, Escola Politécnica Federal de Lausanne, Suíça, 2002. Disponível em: <http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2002/2597/EPFL_TH2597_screen.pdf> Acesso em 15 out. 2006, 15:27:00.

EL-KHATEEB, A. A.; ISMAIL, M. R. Sounds from the past the acoustics of Sultan Hassan Mosque and Madrassa. **Building Acoustics**, v. 14, n. 2, p. 109-132, 2007.

EVEREST, F. A. **Master handbook of acoustics.** 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

EYRING, C. F. Reverberation time in “dead” rooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 1, n. 2, jan. 1930.

FARINA, A. Verification of the accuracy of the pyramid tracing algorithm by comparison with experiental measurements of objective acoustic parameters. In: 5TH INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS – ICA95, 1995, Trondheim. Disponível em: <http://www.angelo farina.it/Public/Papers/073-ICA95.PDF> Acesso em: 10 out. 2007, 16:30:00.

FLETCHER, H.; MUNSON, W. A. Loudness, its definition, measurement and calculation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 2, n. 2, p. 82-108 out. 1933.

GALINDO, M.; ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S. Clarity and definition in Mudejar-Gothic churches. **Building Acoustics**, v. 6, n. 1, p. 1-16, mar. 1999.

GALINDO, M.; ZAMARREÑO, T.; GIRÓN, S. Speech inteligibility in Mudejar-Gothic churches. **Acustica united with Acta Acustica**, v. 86, p. 381-384, 2000.

GÖSSEL, P.; LEUHÄUSER, G. **Arquitetura no século XX.** Köln: Taschen Verlag, 2001.

HIDAKA, T.; BERANEK, L. L.; OKANO, T. Relations among interaural cross-correlation coefficient ($IACC_E$), lateral fraction (LF_E), and apparent source width (ASW) in concert halls, **The Journal of the Acoustical Society of America**, v.104, n 1, p. 255-265, 1998.

HIDAKA, T.; NISHIHARA, N.; BERANEK, L. L. Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied state. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.109, n 3, p. 1028-1042, 2001.

HOJAN, E.; PÖSSELT, C. Subjective evaluation of acoustic properties of concert halls based on their impulse responses. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 88, n. 4, p. 172-178, out. 1990.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DIS 3382-1** Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance rooms. Geneva, 2006.

JEON, J. Y.; LEE, S. C.; VORLÄNDER, M. Development of scattering surfaces for concert halls. **Applied acoustics**, v. 65, p. 341-355, 2004.

JEONG, D.; FRICKE F.R. Frequency perception as a measure of room. **Applied Acoustics**, v.60, p. 63-79, 2000.

JORDAN, V. L. Acoustical criteria for auditorium and their relation to model techniques. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 47, n. 2, p. 408-412, fev. 1970.

KNUDSEN, V.O.; HARRIS, C.M. **Acoustical design in architecture**. Acoustical Society of America, 5ª edição, 1978.

LONG, M. **Architectural acoustics**. New York: Elsevier Academic Press, 2006.

MARSHALL, A.H.; BARRON, M. Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression. **Applied Acoustics**, v. 62, p. 91-108, 2001.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural Acoustics: principles and design**. 1ª ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

MOMMERTZ, E, Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. **Applied Acoustics**, v.60, p 201-203, 2000.

NAYLOR, G.; RINDEL, J. H. Predicting room acoustical behavior with the odeon computer model. In: 124th ASA MEETING, 1992, New Orleans, **Paper 3aAA3**, New Orleans, nov. 1992.

NEMETSCHKE NORTH AMERICA, VectorWorks for Windows. Version 11.5: Nemetschke NA, 2005. 1 CD-ROM.

ODEON A/S, Odeon for Windows. Version 7.01: Odeon A/S, 2005, 1 CD-ROM.

RAES, A. C.; SACERDOTE, G. G. Measurements of the acoustical properties of two roman basilicas. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 25, n. 5, p. 925-961, 1953.

RINDEL, J. H., The use of computer modeling in room acoustics. **Journal of Vibroengineering**, v. 3, n. 4, p. 219-224, index 41-72, Paper of the International Conference BALTIC-ACOUSTIC 2000, 2000.

SANTOS, R. O. dos; OITICICA, M. L. G. R. Análise da qualidade acustica em templos religiosos – estudo de caso. In: ENCAC-ELACAC 2005, 2005, Maceió, Alagoas, **Anais do ENCAC-ELACAC 2005**, Maceió, 2005. 1 CD-ROM.

SATO, S.; SAKAI, H. Subjective preference for sound sources located on the stage and in the orchestra pit of an opera house. **Journal of Sound and Vibration**, v. 258, n.3, p. 549–561, 2002.

SCHROEDER, M. R.; GOTTLOB, D.; SIEBRASSE, K.F., Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 56, n. 4, p.1195-1201, out.1974.

SHANKLAND, R. S.; SHANKLAND, H. K. Acoustics of St. Peter`s and Patriarchal Basilicas in Rome. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 50, n. 2, p. 389-395, 1971.

SIMÕES, F. M.; OLIVEIRA, D. B.; GOMES, J. T. F.; FIGUEIREDO, P. Análise do comportamento acustico das igrejas do seculo XIX em Porto Alegre. In: ENCAC-ELACAC 2005, 2005, Maceió, Alagoas, **Anais do ENCAC-ELACAC 2005**, Maceió, 2005. 1 CD-ROM.

VIEIRA, S. **Análise de variância: (ANOVA)**. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 2006.

VORLÄNDER, M. International round robin on room acoustical computer simulations. In: 5TH INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS – ICA95, 1995, Trondheim, p. 689-692.

VORLÄNDER, M. Simulation of the transient and Steady State sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 86, n. 1, p. 172-178, jul. 1989.

VORLANDER, M.; MOMMERTZ, E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. **Applied Acoustics**, v. 60, p. 187-199, 2000.

YAMAGUCHI, K. Multivariate analysis of subjective and physical measures of hall acoustics. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 52, n. 5, p.1271-1279, nov.1972.

ZENG, X.; CHRISTENSEN, C.L.; RINDEL, J.H. Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. **Applied Acoustics**, v. 67, p. 771-786, 2006.