



Magda Alexandra da Cruz de Carvalho

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Caracterização da qualidade acústica da Catedral Metropolitana de Campinas - Brasil

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil - Perfil Construção

Orientador: Professor Doutor Daniel Aelenei

Co-Orientador: Professora Doutora Stelamaris Rolla Bertoli

Júri:

Presidente: Professor Doutor Mário J. Franca

Arguente: Professor Doutor Albano Neves e Sousa

Vogal: Professor Doutor Daniel Aelenei

Vogal: Professora Doutora Stelamaris Rolla Bertoli



Setembro 2012

“Copyright” Magda Alexandra da Cruz de Carvalho, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Daniel Aelenei e à Professora Doutora Stelamaris Rolla Bertoli, pelo estímulo, orientação e disponibilidade demonstrados ao longo do período de elaboração deste trabalho.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pela criação de elementos fundamentais para a minha formação académica.

Deixo um agradecimento à Roberta Smiderle por me ter permitido integrar neste projecto, pelo bom humor que a caracteriza e que fizeram com que o trabalho experimental se tornasse uma experiência divertida.

Quero também agradecer à Teresa e à Lígia que me receberam em sua casa, como se fizesse parte da família e fizeram com que tivesse adorado a experiência de viver no Brasil.

Como a conclusão deste trabalho é o finalizar de uma etapa da vida, gostaria de agradecer a todos os amigos e colegas que me acompanharam e ajudaram de alguma forma, não só na conclusão deste trabalho mas também ao longo de todo o percurso académico. Gostaria de deixar um agradecimento especial ao Rui Curveira, Joaquim Silva, João Correia, Inês Geraldês, Beatriz Machado, Célia Rodrigues, Maria Roseta, Sofia Silva, Marta Eiró e Diogo Ferreira que me acompanharam e ajudaram com partilha de ideias e de bons momentos ao longo destes últimos anos.

Não posso deixar de agradecer ao Diogo pela ajuda, carinho e paciência demonstrados no decorrer desta pesquisa.

Aos meus pais, irmãs e avó, um agradecimento especial por todo o apoio e motivação que me têm dado ao longo da vida.

Resumo

As igrejas, em geral, são edifícios de interesse histórico, grande importância social e estilo arquitectónico único. Do ponto de vista acústico, são caracterizadas por requisitos específicos para a qualidade do discurso e da música em simultâneo, o que na maior parte das situações pode parecer incompatível.

O presente estudo apresenta os resultados e a análise da caracterização da qualidade acústica da Catedral Metropolitana de Campinas, situada na cidade de Campinas, estado de São Paulo, Brasil. Trata-se de um estudo desenvolvido em parceria por investigadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, financiado pela FAPESP e coordenado pela Prof.^a Dr.^a Stelamaris Rolla Bertoli.

Para a caracterização acústica do espaço foram analisados parâmetros acústicos objectivos, nomeadamente, tempo de reverberação (T_r), tempo de decaimento inicial (EDT), clareza (C_{80}), definição (D_{50}) e índice de inteligibilidade (STI). Estes parâmetros acústicos foram caracterizados em função da frequência, para várias combinações fonte/receptor, representativas das condições reais de uso da igreja. Na caracterização foi utilizado o método da resposta impulsiva com varredura de senos e ferramenta de medição acústica DIRAC da Bruel & Kjaer.

Relativamente ao parâmetro *tempo de reverberação*, na perspectiva da percepção da palavra considera-se que a igreja apresenta um comportamento muito insatisfatório, enquanto que para a música o seu comportamento é razoável. Da avaliação do *índice de transmissão da fala* pode concluir-se que a igreja tem uma *inteligibilidade pobre*. O *ruído de fundo médio* apresenta um bom resultado que favorece a qualidade acústica do ambiente interior.

Como conclusão principal, pode considerar-se que, com excepção do *tempo de reverberação* e *clareza*, a Catedral apresenta resultados favoráveis em todos os parâmetros acústicos analisados.

Palavras-chave: Catedral Metropolitana de Campinas, acústica de igrejas, qualidade acústica, medições acústicas, Dirac

Abstract

Churches are generally considered buildings of historic interest, social importance and unique architectural style. In what regards to the acoustic, such buildings are characterized by specific requirements that ensure the quality of speech and music at the same time, which in most cases may appear to be incompatible.

The present study presents the results of an empirical analysis conducted to characterize the acoustic behavior of the Metropolitan Cathedral of Campinas, located in Campinas, São Paulo, Brazil. It is a study conducted jointly by researchers from the Faculty of Science and Technology of Universidade Nova de Lisboa and the School of Civil Engineering, Architecture and Urbanism of the University of Campinas, supported by FAPESP and coordinated by Prof. Stelamaris Rolla Bertoli.

The acoustic behavior of the space has been made on the basis of the analysis of the reverberation time (T_r), early decay time (EDT), clarity (C_{80}), definition (D_{50}) and speech intelligibility (STI), acoustic parameters that have been described as a function of frequency for various source/receiver combinations, representative of actual conditions of use of the church. These parameters were obtained by the impulse response method with sweep signals, using the measurement software DIRAC room acoustics of Bruel & Kjaer.

Concerning the reverberation time parameter, in view of the perception of the word, it is considered that the church has a very unsatisfactory behavior, while for the music their behavior is reasonable. From the evaluation of speech transmission index, it can be concludes that the church has a poor intelligibility. The background noise presents a good result that provides the acoustic quality of the indoor environment.

In conclusion, it can be assumed that, with the exception of the reverberation time and clarity, the Cathedral provides good results in all acoustic parameters analyzed.

Keywords: Metropolitan Cathedral of Campinas, church acoustics, acoustic quality, acoustic measurements, Dirac

Índice de Matérias

1	Introdução	1
1.1	Motivação e enquadramento do tema	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Estado do conhecimento	5
3	Características acústicas de recintos fechados	9
3.1	Introdução	9
3.2	Conceitos básicos	10
3.3	Qualidade acústica de recintos fechados	12
3.3.1	Som Directo e Som Reverberado	12
3.3.2	Intensidade do campo sonoro	13
3.3.3	Distância crítica ou raio de reverberação	15
3.3.4	Absorção sonora	15
3.3.5	Reflexão e difusão	15
3.3.6	Evolução temporal da energia sonora	16
3.4	Parâmetros objectivos	17
3.4.1	Tempo de reverberação, T_r	17
3.4.2	Tempo de decaimento inicial, EDT	20
3.4.3	Definição, D_{50}	21
3.4.4	Clareza, C_{80}	22
3.4.5	Relação entre Sinal e Ruído, SNR	22
3.4.6	Inteligibilidade da fala	23
3.4.7	Índice de transmissão da fala, STI	23
3.4.8	Perda de articulação de consoantes, $\%ALC$	24

3.5	Qualidade acústica de Igrejas	25
3.5.1	Concílio do Vaticano II <i>versus</i> arquitectura interna das igrejas	25
3.5.2	Importância da qualidade acústica em igrejas católicas	25
3.5.3	Influência da arquitectura na qualidade acústica de espaços de culto: Função <i>versus</i> qualidade acústica	26
4	Caso de Estudo: Catedral Metropolitana de Campinas	27
4.1	Resenha histórica	27
4.2	Caracterização do interior da Catedral	32
5	Metodologia de estudo	35
5.1	Método da Resposta Impulsiva, <i>RI</i>	35
5.1.1	Técnicas de medição	37
5.1.2	Sistema linear invariante no tempo - Modelo ideal	39
5.1.3	Impulso de Dirac	40
5.1.4	Sistema não linear	40
5.1.5	Técnica de Deconvolução - Varredura	43
5.2	Equipamento utilizado	43
5.2.1	Fonte sonora	43
5.2.2	Microfone	44
5.2.3	Amplificador de potência	45
5.3	Posicionamento do equipamento para medição acústica	45
5.3.1	Posicionamento das fontes sonoras	46
5.3.2	Posicionamento dos receptores	47
6	Análise de Resultados	51
6.1	Dimensões	51
6.2	Parâmetros Acústicos	53
6.2.1	Tempo de reverberação	53
6.2.2	Distância Crítica	53
6.2.3	Tempo de decaimento inicial	54
6.2.4	Definição	55
6.2.5	Clareza	57
6.2.6	Inteligibilidade	59
6.2.7	Perda de articulação de consoantes, % <i>ALC</i>	60

6.3	Comparação com outros casos de estudo com volumetria da mesma ordem de grandeza .	62
7	Conclusões e Desenvolvimentos futuros	65
7.1	Conclusões	65
7.2	Pistas para desenvolvimentos futuros	67
	Bibliografia	69
A		75
A.1	Resultados numéricos dos parâmetros acústicos obtidos nas medições em todas as combinações fonte/receptor	75
A.1.1	Tempo de Reverberação	75
A.1.2	Tempo de atraso inicial, <i>EDT</i>	75
A.2	Clareza	84
A.3	Definição	88

Índice de Figuras

3.1	Exemplo ilustrativo da variação da pressão sonora num ponto	11
3.2	Diagrama ilustrativo das variações de pressão e de compressão durante propagação do som através do ar	11
3.3	Designação do som consoante a sua frequência	12
3.4	Diagrama exemplificativo da resposta impulsiva de uma sala	13
3.5	Tempo de atraso inicial	13
3.6	Lei do afastamento sonoro	14
3.7	Ilustração dos conceitos de reflexão especular e difusa	16
3.8	Evolução temporal da energia sonora	16
3.9	Tempo de Reverberação	18
3.10	Tempo de reverberação óptimo em função do volume e do uso	19
3.11	Diagrama ilustrativo da relação entre energia útil e energia total para o cálculo de D_{50}	21
3.12	Diagrama ilustrativo da relação entre energia útil e não útil para o cálculo de C_{80}	22
3.13	Relação entre <i>índice de transmissão da fala e perda de articulação das consoantes</i>	24
4.1	Localização da cidade de Campinas	28
4.2	Matriz Velha representada em ilustração de 1871	29
4.3	Projecto de Cristovan Boninni para a fachada da Matriz	30
4.4	Fotografias da Matriz	31
4.5	Fachada da Catedral Metropolitana de Campinas nos dias actuais	32
4.6	Planta da Catedral	33
4.7	Corte da Catedral	33
4.8	Fotografias do interior da Catedral	34
5.1	Reflectograma de um ambiente após geração de um impulso sonoro	36
5.2	Resposta Impulsiva de um ambiente	36

5.3	Diagrama de um sistema ideal	39
5.4	Diagrama de um sistema excitado por um impulso de Dirac	40
5.5	Sistema caracterizado por não linearidades	41
5.6	Equipamentos típicos da cadeia de medição da Resposta Impulsiva	42
5.7	Esquema do sistema de medição	43
5.8	Fonte sonora 4296 da Brüel & Kjaer	44
5.9	Diagrama de directividade de uma fonte sonora em forma de dodecaedro para a frequência de 4kHz	44
5.10	Receptor do tipo 4189 da Brüel & Kjaer	45
5.11	Amplificador de potência do tipo 2715 da Brüel & Kjaer	45
5.12	Planta de localização das fontes e receptores	48
6.1	Planta de localização das fontes e receptores	52
6.2	Tempo de Reverberação médio medido nas várias posições fonte/receptor e respectivo desvio padrão para cada banda de oitava	53
6.3	<i>Tempo de decaimento inicial</i> médio medido nas várias posições fonte/receptor e respectivo desvio padrão para cada banda de oitava	54
6.4	Comparação dos parâmetros tempo de reverberação e tempo de decaimento inicial	55
6.5	<i>Definição</i> média medida nas várias posições fonte/receptor e respectivo desvio padrão para cada banda de oitava	56
6.6	Variação do parâmetro D_{50} com a distância	56
6.7	Comparação dos índices de <i>Clareza</i> medidos nas 3 posições representativas da emissão de discurso	57
6.8	Comparação entre os valores médios de D_{50} medidos nas posições do sacerdote pré e pós Concílio do Vaticano II (<i>CV – II</i>)	57
6.9	<i>Clareza</i> média medida nas várias posições fonte/receptor e respectivo desvio padrão para cada banda de oitava	58
6.10	Variação do parâmetro C_{80} com a distância	59
6.11	Comparação dos índices de <i>Clareza</i> medidos nas 3 posições destinadas emissão de música	59
6.12	Índice de inteligibilidade da voz em função da distância entre a fonte e o receptor	61
6.13	Perda de articulação das consoantes em função da distância entre a fonte e o receptor	62
6.14	Comparação do tempo de reverberação medido em várias igrejas	63
6.15	Comparação do tempo atraso inicial medido em várias igrejas	63
6.16	Comparação dos valores de <i>Clareza</i> medidos em várias igrejas	64

6.17 Comparação dos valores de *Definição* medidos em várias igrejas 64

Índice de Tabelas

3.1	Relação entre <i>STI</i> , % <i>ALC</i> e inteligibilidade	25
5.1	Tipo de emissão sonora associado a cada fonte	47
6.1	Dimensões da Catedral	52
6.2	Localização dos equipamentos de medição	52
6.3	<i>STI</i> para todas as combinações fonte/receptor	60
6.4	% <i>ALC</i> para todas as combinações fonte/receptor	61
6.5	Comparação entre estudos de várias igrejas de volumetria da mesma ordem de grandeza .	63
7.1	Quadro resumo dos resultados obtidos	66
7.2	Quadro resumo dos resultados obtidos	66
A.1	Tempo de reverberação medido em segundos, [<i>s</i>], para cada receptor, estando a fonte na posição F01	76
A.2	Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F02	76
A.3	Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F03	77
A.4	Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F04	77
A.5	Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F05	78
A.6	Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F06	78
A.7	Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F07	79
A.8	Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F08	79
A.9	Tempo de atraso inicial medido em segundos, [<i>s</i>], para cada receptor, estando a fonte na posição F01	80
A.10	Tempo de atraso inicial medido em segundos, [<i>s</i>], para cada receptor, estando a fonte na posição F02	80

A.11 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F03	81
A.12 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F04	81
A.13 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F05	82
A.14 TTempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F06	82
A.15 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F07	83
A.16 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F08	83
A.17 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F01	84
A.18 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F02	85
A.19 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F03	85
A.20 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F04	86
A.21 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F05	86
A.22 TTempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F06	87
A.23 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F07	87
A.24 Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F08	88
A.25 Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F01	89
A.26 Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F02	89
A.27 Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F03	90
A.28 Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F04	90
A.29 Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F05	91

A.30 Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F06	91
A.31 Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F07	92
A.32 Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F08	92

Lista de siglas e símbolos

Siglas

CV – II Concílio do Vaticano II

EDT Tempo de decaimento inicial (Early Decay Time) [s]

FT Função de Transferência

FFT Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)

IFFT Transformada rápida de Fourier inversa (Inverse Fast Fourier Transform)

MLS Maximum Length Sequences

SII Índice de Inteligibilidade do discurso (Speech Inteligibility Index)

SNR Relação entre o sinal e o ruído (Signal to Noise Ratio)

STI Índice de transmissão da fala (Speech Transmission Index)

TDS Time Delay Spectrometry

RI Resposta Impulsiva

Letras Gregas Minúsculas

ρ Massa volúmica [kg/m³]

σ Desvio padrão

Letras Latinas Minúsculas

c Velocidade de propagação do som no ar [m/s]

p Pressão sonora [Pa]

r_{cr} Distância crítica ou raio de reverberação [m]

Letras Latinas Maiúsculas

A	Área	$[m^2]$
A_{nave}	Área da nave	$[m^2]$
A_{total}	Área total	$[m^2]$
C_{80}	Clareza	$[dB]$
D_{50}	Definição	
H_{max}	Altura máxima	$[m]$
H_{med_total}	Altura média	$[m]$
H_{nave}	Altura da nave	$[m]$
I	Intensidade do campo sonoro	$[W/m^2]$
I_d	Intensidade do campo sonoro directo	
I_r	Intensidade do campo reverberante	
L_{max}	Comprimento máximo	$[m]$
L_{nave}	Comprimento da nave	$[m]$
$Larg_{max}$	Largura máxima	$[m]$
$Larg_{md}$	Largura média	$[m]$
$Larg_{nave}$	Largura da nave	$[m]$
P	Pressão	$[Pa]$
P_0	Pressão atmosférica	$[Pa]$
S	Área de absorção sonora equivalente	$[m^2]$
T	Temperatura	$[K]$ ou $[^{\circ}C]$
T_{20}	Tempo de reverberação com decaimento de 20 dB	$[s]$
T_{30}	Tempo de reverberação com decaimento de 30 dB	$[s]$
T_r	Tempo de reverberação	$[s]$
W	Potência	$[W]$
V	Volume	$[m^3]$
V_{nave}	Volume da nave	$[m^3]$
V_{total}	Volume total	$[m^3]$

1

Introdução

1.1 Motivação e enquadramento do tema

As igrejas são edifícios de interesse histórico, grande importância social e estilo arquitectónico único. Por serem edificações desenhadas e pensadas para um objectivo muito específico, o seu projecto é influenciado por vários factores, além da qualidade acústica, destacando-se a beleza arquitectónica adaptada às várias funções da igreja, os rituais religiosos e, não menos importante, a tradição.

Até ao século XIX os projectos acústicos dos ambientes destinados à audição da música ou da palavra tinham como base critérios provenientes da comparação com ambientes existentes e reconhecidos como tendo uma boa qualidade acústica. O problema surgia quando se inovava ou se criavam novas formas porque a qualidade acústica só se podia avaliar após a conclusão da obra, o que, em muitos casos, não correspondia à expectativa.

Verifica-se, actualmente, um crescente interesse no estudo da área de acústica com o objectivo de controlar os níveis de ruído e o ambiente sonoro interior, para proporcionar assim, um melhor nível de bem-estar aos ocupantes. Existem espaços, como é o caso dos locais de culto, onde este tema assume um papel acrescido contribuindo para uma utilização mais agradável e adequada.

Capítulo 1. Introdução

1.2 Objectivos

O principal objectivo deste estudo é a caracterização da qualidade acústica da Catedral Metropolitana de Campinas tendo em conta não só a configuração de uso actual, mas também aquela que se praticava antes do Concílio do Vaticano II.

Este estudo é suportado por uma componente prática que consiste em ensaios *in situ* dos parâmetros acústicos a avaliar, nomeadamente, ruído de fundo, tempo de reverberação (T_r), tempo de decaimento inicial (EDT), clareza (C_{80}), definição (D_{50}) e índice de inteligibilidade (STI). Todos os parâmetros acústicos foram obtidos pelo método da resposta impulsiva e caracterizados em função da frequência, para várias combinações fonte/receptor, representativas das condições reais de uso da igreja.

Pretende-se avaliar as semelhanças e diferenças existentes entre os resultados do caso de estudo e os de outras igrejas portuguesas com volumetria da mesma ordem de grandeza.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, organizados da seguinte forma:

O estado do conhecimento constitui a primeira abordagem da presente dissertação e inclui todo o Capítulo 2. A abordagem integra uma pesquisa sobre a evolução da acústica enquanto ciência e os estudos efectuados por diversos investigadores.

No Capítulo 3 faz-se referência aos conceitos básicos importantes para o presente estudo, assim como os conceitos relacionados com a qualidade acústica de recintos fechados. São também definidos os parâmetros acústicos objectivos a determinar na campanha de ensaios, e a importância de uma boa qualidade acústica em igrejas.

O Capítulo 4 caracteriza a Catedral Metropolitana de Campinas, fornecendo informações sobre a sua história e arquitectura. Uma vez que a Catedral desempenha um importante papel na vida religiosa de Campinas desde a sua formação enquanto cidade, é feita uma introdução histórica que descreve a origem da povoação e a sua evolução ao longo dos tempos.

No Capítulo 5 é descrito em pormenor o método de medição acústica utilizado nos ensaios, o equipamento utilizado e o seu posicionamento no espaço interior da igreja.

O Capítulo 6 diz respeito aos resultados dos ensaios realizados *in situ* para a elaboração deste estudo. São apresentados em pormenor e analisados segundo os pressupostos da ISO-3382 (1997). Neste capítulo são também comparados com os resultados obtidos em estudos de igrejas portuguesas com volumetria semelhante.

O último capítulo desta dissertação apresenta as conclusões do estudo levado a cabo e as pistas

1.3. Estrutura da Dissertação

para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 1. Introdução

2

Estado do conhecimento

As primeiras investigações sobre o som, considerando a acústica como ciência, foram iniciadas na Grécia antiga, com os estudos de filósofos gregos como Pitágoras, no século VI a.C., Arquitas e Aristoxeno, no século IV a.C., e continuados ao longo dos séculos por vários pensadores. A palavra Acústica é uma derivação da palavra grega *akouein* que significa *ouvir*, embora, aparentemente, Sauveur tenha sido a primeira pessoa a usar essa palavra para se referir à ciência que estuda o som, em 1701. (Rossing, 2007)

Pitágoras, filósofo e matemático, estudou a vibração de cordas e sons musicais e as conclusões a que ele chegou constituíram um estudo que veio designar-se *Teoria Harmónica de Pitágoras*. O matemático trabalhou no sentido de construir uma escala de som considerando que a música era um ramo da Matemática e que o Som era resultado de relações numéricas entre sons, função das vibrações de cada objecto sonoro, sendo os sons classificados como números sonoros. Pitágoras defendia que dividindo o comprimento de vibração de uma corda em pequenos intervalos, se produziriam sons musicais consonantes e relacionáveis entre si através do chamado *número sonoro*.

No entanto, a noção de *altura sonora* só foi associada à frequência de vibração da corda alguns séculos depois por Mersenne (1588-1648), discípulo de Descartes no seu trabalho intitulado *Harmonie*

Capítulo 2. Estado do conhecimento

Universelle.

Embora os Gregos fossem conscientes das importância da boa qualidade acústica no projecto dos seus fabulosos anfiteatros, foi o arquitecto romano Marcus Vitruvius (séc. I a.C.) quem primeiro escreveu sobre o tema na sua obra *De Architectura*, que inclui uma notável compreensão e análise da acústica de salas. (Rossing, 2007)

Até ao século XIX os projectos acústicos dos ambientes destinados à audição da música ou da palavra tinham como base critérios provenientes da comparação com ambientes existentes e reconhecidos como tendo uma boa qualidade acústica. O problema surgia quando se inovava ou se criavam novas formas porque a qualidade acústica só se podia avaliar após a conclusão da obra, o que, em muitos casos, não correspondia à expectativa (Bottazzini, 2007).

Até meados do século passado foram registados inúmeros casos de insucessos de obras realizadas segundo teorias físicas e acústicas baseadas no conhecimento empírico. Nos últimos anos factos semelhantes têm-se tornado mais raros porque houve uma separação clara entre as técnicas baseadas no conhecimento experimental e as análises físicas de complexas formulações matemáticas.

As igrejas são edifícios de interesse histórico, grande importância social e estilo arquitectónico único. Por serem edificações desenhadas e pensadas para um objectivo muito específico, o seu projecto era influenciado principalmente por determinados factores que não contemplavam a qualidade acústica. De entre eles destacam-se a beleza arquitectónica adaptada às várias funções da igreja, os rituais religiosos e, não menos importante, a tradição.

Um dos primeiros investigadores a demonstrar preocupações ao nível da qualidade acústica de locais de culto foi o arquitecto britânico Sir Christopher Wren (1632-1723) (Carvalho, 1994). Em 1666, após o grande incêndio que destruiu a maior parte da cidade de Londres, Wren foi nomeado supervisor das obras de reconstrução e responsável directo pelo projecto de mais de meia centena de igrejas, com destaque para a Catedral de St. Paul que é considerada uma das obras primas da arquitectura europeia (Wikipédia, 2012a).

Desde o final do século XIX, vários outros manifestaram interesse no assunto e foram levados a cabo alguns estudos que resultaram na publicação de obras que serviam como guia para o projecto de igrejas de diferentes religiões. De entre as obras publicadas destacam-se *A manual of Architecture: for Churches, Parsonages and School-houses* publicado em 1875 e escrito por William Patterson, (Patterson, 1875), e mais tarde, em 1928, *Planning Modern Church Buildings* de Mouzon Brabham, (Brabham, 1928).

Raes and Sacerdote (1953) determinaram experimentalmente alguns parâmetros acústicos e estudaram a influência de elementos arquitectónicos no comportamento acústico de duas basílicas de

Roma: S. Giovanni in Laterano e S. Paolo Fuori le Mura.

Fitzroy (1973) que foi consultor acústico no projecto de construção da nova Catedral de St. Mary, São Francisco, descreve a forma como desenvolveu esse trabalho, as dificuldades sentidas e os resultados conseguidos relativamente ao comportamento acústico do edifício, incluindo o respeitante à inteligibilidade da palavra.

Tzekakis (1975) estudou a variação do tempo de reverberação da Igreja de Jorge de Salónica, Grécia, em três situações diferentes, correspondentes à de igreja ocupada, sem pessoas e sem pessoas nem bancadas. Esta igreja é um monumento do séc. IV e tem uma planta em forma octogonal.

Lewers and Anderson (1983) estudaram o tempo de reverberação na Catedral de St. Paul, Londres, nas situações em que a igreja se encontrava ocupada e vazia, utilizando diferentes métodos. Também desenvolvem testes de articulação para calcular a inteligibilidade da palavra, utilizando listas de palavras recomendadas por Beranek, lidas em frase portadora.

Lopez and Gonzalez (1987) desenvolveram um estudo experimental sobre a acústica da igreja do Mosteiro de Santo Domingos de Silos, na cidade de Burgos, em Espanha.

Hammad (1990) avaliou o comportamento acústico de trinta mesquitas existentes na cidade de Amman, na Jordânia, através da análise dos resultados de ensaios de campo desenvolvidos, utilizando diferentes técnicas. Na avaliação, entre outros parâmetros acústicos, utilizou o tempo de reverberação, tempo de atraso inicial (*EDT*) e *RASTI* (Rapid Speech Transmission Index). Embora este estudo não respeite a igrejas católicas, a metodologia nele empregue pode ser-lhes aplicável.

No panorama nacional destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Carvalho (1994) e Lencastre (1988), nos quais foram analisadas cinquenta e quatro igrejas com estilos arquitectónicos de várias épocas (do século VI ao século XX), constituindo assim uma amostra representativa da arquitectura religiosa de todo o país, foi possível obter os valores de vários parâmetros acústicos, relacionar a arquitectura dos diferentes templos com as condições acústicas registadas em cada um deles e ainda estabelecer fórmulas de previsão das condições acústicas, para serem utilizadas posteriormente em projectos de novas igrejas ou análise de outras.

Também Silva (2008) se interessou pelo assunto e desenvolveu o *Guião da Acústica de Igrejas em Portugal* com o objectivo de demonstrar de que forma os parâmetros arquitectónicos influenciam a sonoridade existente neste tipo particular de edifícios.

As igrejas e outros locais de culto são edifícios muito peculiares ao nível da acústica porque devem cumprir os requisitos para o discurso e, em simultâneo, para a música. Outra particularidade deste tipo de edificado é a complexidade do ponto de vista geométrico. As dimensões e forma podem ser bastante variadas, desde pequenas e simples capelas até complicadas igrejas barrocas, caracterizadas por paredes

Capítulo 2. Estado do conhecimento

curvas, capelas laterais, abóbadas e cúpulas. A gama de mensagens sonoras também é extremamente variada e no mesmo serviço litúrgico tem-se o discurso proferido pelo sacerdote, os cânticos e a música instrumental. Além do serviço litúrgico, as igrejas são o palco natural e onde devem ser realizadas as apresentações de música sacra, tanto coral como instrumental. É frequente que, quando não existem salas adequadas para a sua performance, as igrejas recebam concertos de orquestras.

3

Características acústicas de recintos fechados

3.1 Introdução

O que habitualmente se designa pelo nome de *som* é, na verdade, a sensação provocada no cérebro devido à captação, pelo sistema auditivo, de perturbações no meio fluido envolvente, que se propagam ao longo do mesmo. Mersenne, na sua obra *Harmonie Universelle* publicada em 1636, definiu o som da seguinte forma:

Livro I, p. 2

É preciso portanto concluir que todos os movimentos produzidos no ar, na água, ou em outro lugar, podem ser chamados de Sons; de modo que somente lhes falta um ouvido muito delicado e subtil para os ouvir; e que podemos dizer a mesma coisa do barulho do trovão e do canhão com respeito a um surdo, que não percebe esses grandes ruídos: pois o movimento, ou a vibração que ele sente, não é chamada de Som, e no entanto é capaz de se fazer sentir aos espíritos do ouvido: de maneira que o Som pode ser definido como um movimento do ar

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

exterior ou interior capaz de ser ouvido; eu digo, ou interior, em virtude dos ruídos que são produzidos dentro do ouvido. (...) isto me faz concluir que aquilo que torna esse movimento capaz de ser ouvido, não é outra coisa senão que ele movimenta uma quantidade de ar presa, capaz de enfraquecer sua prisão, e de ser comunicada ao ar exterior vizinho até que este chegue ao ouvido.”

Em primeiro lugar, ao afirmar que o som é um movimento que pode ser ouvido, Mersenne faz com que o som possa ser investigado através daquilo mesmo que o produz, isto é, o movimento que o causou. Nesse sentido, temos aí um dos princípios necessários para o estabelecimento da mecânica do som. O estudo do som está, portanto, associado ao estudo dos movimentos que o produzem. Assim, é preciso levar em conta a natureza do meio no qual o som é transmitido, já que o movimento que produz o som é transmitido às partes que compõe o meio, as quais, por sua vez, comunicam o movimento produzido ao ouvido humano (Silva, 1999).

Segundo Pereira (2010a), o ar é considerado como um meio fluído com propriedades elásticas e constituído por partículas. O termo partícula é entendido como um volume de ar infinitesimal suficientemente grande para conter milhões de moléculas podendo ser tratado como um meio contínuo, mas suficientemente pequeno para que as suas propriedades acústicas sejam uniformes ao longo desse volume. A propagação sonora origina o deslocamento das partículas e provoca no ar uma sucessão de compressões e rarefacções que se afastam progressivamente da fonte de vibração. À medida que as partículas são deslocadas da sua configuração normal surgem forças internas de restauro (elásticas). São estas forças, em conjunto com a inércia do sistema, que possibilitam o movimento de vibração ou ondulatório do meio e conseqüentemente, a produção e transmissão de ondas sonoras. A energia que uma onda acústica transporta através do meio fluído é de dois tipos: energia cinética das partículas em movimento e energia potencial devido à compressão destas partículas de fluído. Uma das grandezas físicas perturbada pela passagem onda sonora e que possibilita uma medida directa da energia sonora é a pressão do meio, também denominada por pressão de equilíbrio. Na figura 3.1 são representadas as oscilações da pressão, num ponto e ao longo do tempo, devido a uma perturbação sonora.

3.2 Conceitos básicos

Para existir som, são necessários três factores: a fonte sonora, o meio de propagação e o aparelho receptor. A fonte sonora pode ser um instrumento musical, a voz humana, ou qualquer outra coisa que produza som. O meio de propagação mais comum é o ar, mas o som também se propaga em outros meios, como a água, por exemplo. O aparelho receptor é o que capta as alterações no ambiente induzidas pela

3.2. Conceitos básicos

produção do som. (CAEF, 2010)

As perturbações sonoras traduzem-se na compressão e dilatação de volumes de ar elementares, correspondendo-lhes, respectivamente, uma alteração da pressão que, em repouso, é a pressão atmosférica e um movimento vibratório das moléculas constituintes do ar (Patrício, 2010).

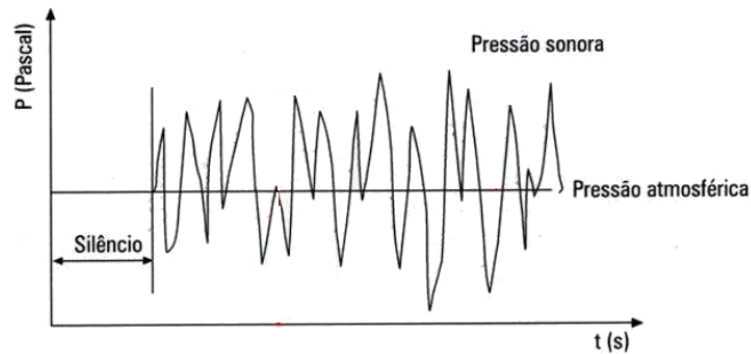


Figura 3.1: Exemplo ilustrativo da variação da pressão sonora num ponto - Fonte: Patrício (2010)

De acordo com o ilustrado na figura 3.1, a pressão total resultante, designada por $P(t)$, corresponde à soma da pressão atmosférica, P_0 , com a pressão devida às perturbações referidas. Nesta circunstância, define-se pressão sonora, $p(t)$, como sendo:

$$p(t) = P(t) - P_0 \quad (3.1)$$

Normalmente, não é muito importante o conhecimento da evolução do valor de $p(t)$, sendo mais relevante a quantificação da energia posta em jogo durante um intervalo de tempo considerado (Patrício, 2010).

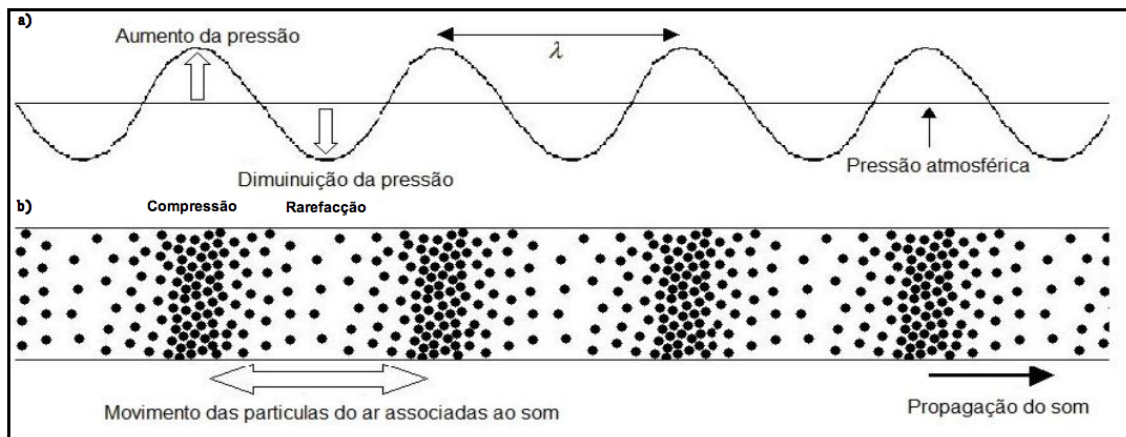


Figura 3.2: Diagrama ilustrativo das variações de pressão e de compressão durante propagação do som através do ar - Fonte: Bastos (2010)

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

Em meio fluido, onde se desprezam os fenómenos de perda de energia por viscosidade, a propagação sonora processa-se sob a forma de ondas longitudinais, para as quais o deslocamento das partículas de ar, em torno da sua posição de equilíbrio, ocorre na direcção de propagação (Patrício, 2010). A figura 3.2a representa a variação da pressão sonora em relação à pressão atmosférica, enquanto que a 3.2b representa o movimento relativo das partículas do ar associado à propagação do som.

No entanto, segundo Patrício (2010), nem todas as flutuações de pressão produzem sensação auditiva quando atingem o ouvido humano. A sensação da estimulação devida ao som só ocorre quando a amplitude dessas flutuações e a taxa de variação em que ocorrem na unidade de tempo (frequência), estiverem dentro de determinados limites. O ouvido apercebe-se de variações de pressão sonora para as frequências situadas, em média, entre 20 Hz e 20 kHz e de um ponto de vista geral, a gama de frequências audíveis decompõe-se em três zonas: frequências graves, frequências médias e frequências altas, de acordo com o apresentado na figura 3.3.

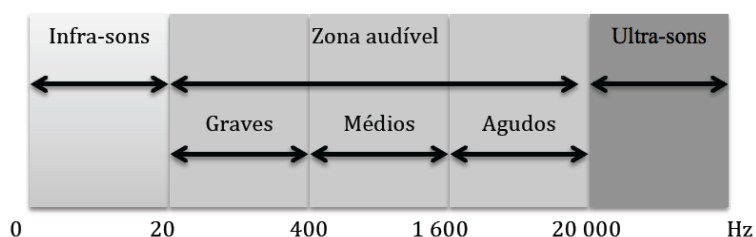


Figura 3.3: Designação do som consoante a sua frequência - Fonte: Patrício (2010)

O ouvido humano não é igualmente sensível ao longo da gama de frequências de interesse. A sua sensibilidade é maior nas médias e altas frequências do espectro do que na gama das frequências baixas. Na gama de frequências relacionada com a acústica de edifícios esta variação de sensibilidade estende-se, fundamentalmente, até à banda com frequência central de 500 Hz . (Patrício, 2010)

3.3 Qualidade acústica de recintos fechados

3.3.1 Som Directo e Som Reverberado

Considerando uma fonte sonora que emite um impulso sonoro num determinado ponto, como demonstra a figura 3.4. Uma onda esférica propaga-se desde o emissor em todas as direcções, sendo que o primeiro som detectado pelo receptor é originado pela parte da onda que foi propagada directamente da fonte para o receptor e é chamado de *Som Directo*. Esta componente é rapidamente seguida por outras partes da onda que foram reflectidas uma ou mais vezes nos contornos da sala ou nos objectos antes de chegar ao receptor, denominada de *Som Reflectido* ou *Som Reverberado*.

3.3. Qualidade acústica de recintos fechados

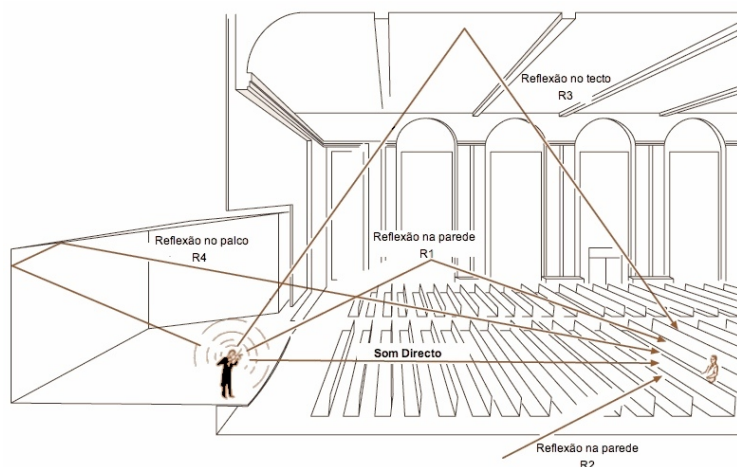


Figura 3.4: Diagrama exemplificativo da resposta impulsiva de uma sala - Adaptado de Rossing (2007)

Além das ondas reflectidas atingirem o receptor depois das directas (figura 3.5), normalmente a sua energia é menor, uma vez que a intensidade da onda diminui ao longo do tempo, enquanto a superfície da onda aumenta (figura 3.6).

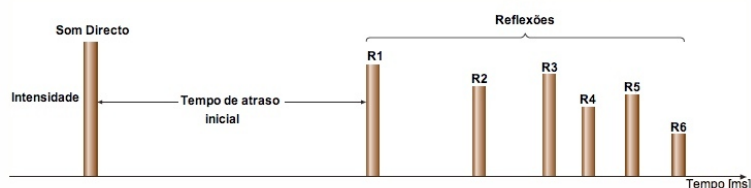


Figura 3.5: Tempo de atraso inicial - Adaptado de Rossing (2007)

Outro factor que influencia bastante a energia da onda é o tipo de superfície em que a mesma incide e o número de vezes que a mesma reflecte, porque uma fracção da energia é absorvida em cada uma dessas reflexões, tornando-a mais fraca. O som reflectido pode chegar ao receptor mesmo após a extinção do som directo.

3.3.2 Intensidade do campo sonoro

Martins (2010) diz que a *intensidade* é o fluxo de energia por unidade de área. Refere-se ao produto da pressão pela velocidade das partículas num meio fluido, o que é equivalente à potência recebida por unidade de área. Em termos acústicos, a intensidade, I , é o valor médio do fluxo de energia por unidade de área perpendicular à direcção de propagação, medida em $[W/m^2]$. A intensidade do campo sonoro é dada pela expressão:

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

$$I = \frac{W}{4 \pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (3.2)$$

Sendo:

I a intensidade sonora [W/m^2]

W a potência sonora [W]

r a distância à fonte [m]

p a pressão sonora [Pa]

ρ a massa volúmica do ar [kg/m^3]

c a velocidade de propagação do som [m/s]

A velocidade de propagação do som no ar depende da temperatura do ar e é dada pela equação $c = 20,045 \sqrt{T}$, sendo T a temperatura do ar ambiente em [K] dada por $T[K] = 273,15 + T[^\circ C]$.

A expressão 3.2 mostra claramente que a potência sonora, W , é proporcional à intensidade sonora, I , e é proporcional ao quadrado da pressão sonora, p . Do mesmo modo se verifica que a intensidade sonora e a pressão sonora diminuem com o quadrado da distância à fonte. Se a distância à fonte aumenta para o dobro, a mesma quantidade de energia atravessará uma área que é quatro vezes maior e portanto $I_2 = \frac{I_1}{4}$, figura 3.6.

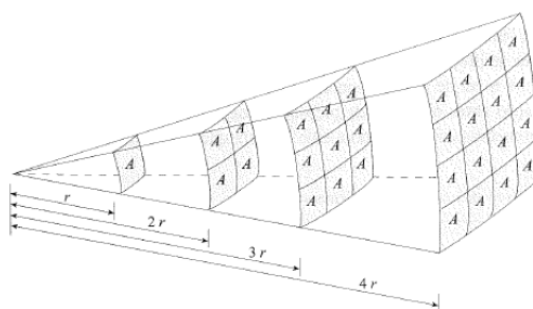


Figura 3.6: Lei do afastamento sonoro

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

3.3. Qualidade acústica de recintos fechados

3.3.3 Distância crítica ou raio de reverberação

A pressão sonora em cada ponto resulta da sobreposição de dois campos sonoros, denominados por campo directo e campo reverberante. O campo directo consiste na área mais próxima do emissor onde o campo sonoro é devido, essencialmente, às ondas directas, enquanto que o campo reverberante é mais afastado e nele há predominância das ondas reflectidas. A distância à fonte para a qual a intensidade do campo directo é igual à do campo reverberante, denomina-se por distância crítica ou raio de reverberação, r_{cr} . Este parâmetro delimita a zona de maior influência do campo directo e igualando a intensidade do campo directo, I_d , à do campo reverberado, I_r , obtém-se a equação 3.3.

$$r_{cr} = \sqrt{\frac{V}{c T_r}} \quad (3.3)$$

onde:

V é o volume [m^3]

T_r é o tempo de reverberação [s]

c é a velocidade do som [m/s]

A norma ISO-3382 (1997) determina que nenhum receptor deve estar suficientemente perto da fonte sonora, de forma a evitar a influência do som directo no cálculo dos parâmetros acústicos. A distância mínima que deve existir entre eles é a *distância crítica*.

3.3.4 Absorção sonora

Aquando da incidência de ondas sonoras na superfície de um material, parte da energia incidente é absorvida transformando-se em energia térmica. Na maior parte dos materiais, a conversão em energia térmica resulta do atrito à passagem de ar, entre poros, quando a superfície possua características de porosidade. Parte da energia pode também ser absorvida pela deformação de lâminas ou painéis, quando solicitados pela fonte sonora

3.3.5 Reflexão e difusão

Em muitas situações relacionadas com a qualidade acústica de salas é necessário que a absorção proporcionada pelos elementos da envolvente não reduzam demasiado a energia sonora estabelecida e não tornem o campo heterogéneo do ponto de vista de distribuição dessa mesma energia, não criando condições para uma boa acústica da sala. Nesse sentido, para garantir um boa qualidade acústica é necessário recorrer ao conceito de difusão (ou reflexão difusa), de modo a que o campo sonoro criado

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

seja envolvente e que a energia do campo reverberante chegue aos receptores, oriunda com igual probabilidade de todas as direções existentes no espaço fechado.

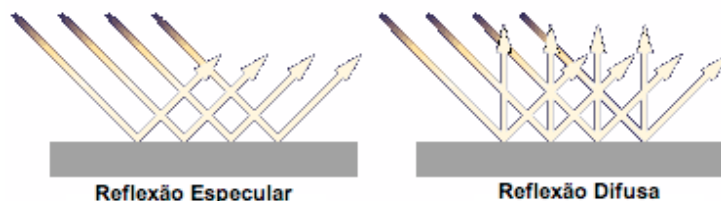


Figura 3.7: Ilustração dos conceitos de reflexão especular e difusa - Adaptado de HowStuffWorks (2007)

Na figura 3.7 é ilustrado o conceito de difusão (ou reflexão difusa), comparativamente com o da reflexão tradicional (reflexão especular). Como se pode denotar, a reflexão especular segue a lei de Snell (o ângulo de incidência é numericamente igual ao ângulo de reflexão). No caso da reflexão difusa esta lei não é aplicável porque a onda incidente na superfície é reflectida em várias direções (difusão espacial), chegando ao receptor espaçadas no tempo (difusão temporal) (Patrício, 2010).

3.3.6 Evolução temporal da energia sonora

Pereira (2010a) defende que modelação da evolução temporal da distribuição da densidade de energia sonora no interior de uma sala, considerando a aproximação de campo difuso, é representada na figura 3.8. A fonte é ligada a uma potência constante, W , e nos instantes iniciais a densidade de energia eleva-se até alcançar um valor máximo.

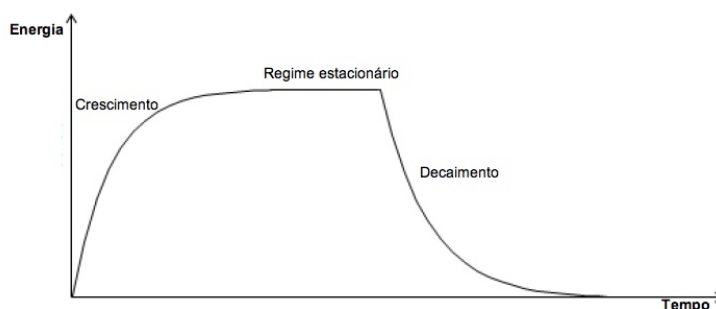


Figura 3.8: Evolução temporal da energia sonora - Adaptado de Pereira (2010a)

À medida que a fonte permanece, é estabelecido um campo sonoro estacionário no interior da sala, isto é, atinge-se um estado em que a taxa de produção de energia sonora é igual à taxa de absorção. A absorção ocorre principalmente nas superfícies interiores da sala, mas em espaços com volumes elevados, a absorção do som pelo ar torna-se relevante para as frequências mais altas, digamos superiores

3.4. Parâmetros objectivos

à banda de oitava centrada na frequência de 1 kHz . De acordo com o modelo teórico, após um número sucessivo de reflexões, o campo sonoro torna-se difuso e ao desligar-se a fonte, a energia sonora decresce exponencialmente ao longo tempo. A amplitude máxima da energia sonora produzida, correspondente à amplitude do estado estacionário, e a taxa de decaimento desta após a extinção da fonte é condicionada pela capacidade de absorção sonora da sala.

3.4 Parâmetros objectivos

O tempo de reverberação é o parâmetro mais conhecido para caracterizar e avaliar a qualidade acústica de um recinto fechado. Contudo, embora a sua determinação seja considerada fundamental, este não consegue, por si só, definir adequadamente as características acústicas da sala. Outras grandezas têm demonstrado grande importância nesse sentido e tem-se verificado que um recinto fechado só é adequadamente caracterizado se forem tomados em consideração os vários parâmetros acústicos (Pereira, 2010a). Nesta secção são descritos os parâmetros acústicos considerados na caracterização da qualidade acústica da Catedral Metropolitana de Campinas.

3.4.1 Tempo de reverberação, T_r

A energia sonora instituída num recinto fechado e limitado por superfícies que originam múltiplas reflexões (figura 3.4), perdura, após interrupção da fonte geradora de ruído, tanto mais tempo quanto menor for a absorção sonora desses elementos (figura 3.8). O tempo de reverberação é, então, o intervalo de tempo que um qualquer som demora a extinguir-se por completo, após múltiplas reflexões, e quantifica o “rasto sonoro” de um som num recinto.

O tempo de reverberação, T_r , encontra-se representado na figura 3.9 e é definido como o tempo que a energia de um campo sonoro reverberante leva para decair 60 dB , depois de interrompido o som directo (Morfeý, 2000), ou, de um ponto de vista energético, ao tempo que é necessário decorrer para que a densidade média da energia sonora existente no espaço em causa atinja um milionésimo do seu valor inicial (Patrício, 2010).

O valor do *tempo de reverberação* depende da frequência, da absorção sonora dos materiais que integram a envolvente exposta (revestimentos ou elementos definidores da compartimentação) e dos objectos existentes no recinto fechado. Neste sentido, é facilmente perceptível que, para a diferença de níveis referida (60 dB) possa ser atingida, é fundamental que o ruído de fundo existente no local assuma um valor relativamente baixo, de forma a não mascarar o ruído produzido e que é utilizado para o cálculo do tempo de reverberação. Quando tal não é possível devido a factores externos, ou quando o ruído não atinge tal nível, podem utilizar-se os parâmetros T_{20} e T_{30} , os quais correspondem, respectivamente,

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

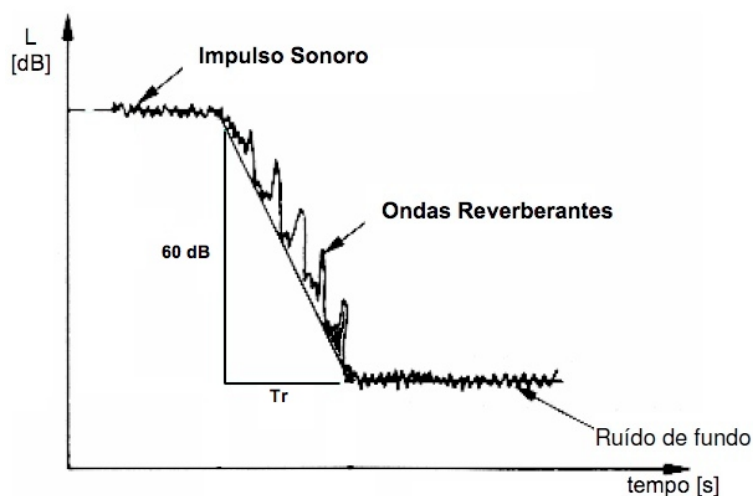


Figura 3.9: Tempo de Reverberação

a 20 dB e 30 dB de decréscimo do nível de pressão sonora (Patrício, 2010). Para excluir o efeito do som directo e tomar apenas a influência da reverberação, a norma ISO-3382 (1997) recomenda que se ignorem os primeiros 5 dB da curva de decaimento.

O *tempo de reverberação* excessivo numa sala tem um duplo e antagónico efeito. Por um lado, reduz bastante a inteligibilidade da palavra porque devido ao baixo nível sonoro das consoantes e o seu curto período de duração, estas são suplantadas pelo rasto sonoro das vogais imediatamente antecedentes (que são emitidas a nível mais elevado e com maior duração), mas por outro lado, as peças musicais soam consideravelmente melhor porque as notas musicais não são entendidas individualmente mas sim como um todo.

Nos diferentes períodos da história, as salas de apresentação de música foram mudando, por exemplo, a música sacra do período barroco era mostrada em catedrais, onde os tempos de reverberação eram muito altos e os compositores podiam contar com esse efeito na execução de suas obras. Executá-las em ambientes com baixa reverberação elimina o realismo e muda seu carácter original. (Méndez et al., 1994). O gráfico da figura 3.10 mostra os valores óptimos de tempos de reverberação, de acordo com os volumes e usos.

Valle (2007) destaca que analisar o T_r por si só não diz se uma sala é viva (muito reverberante) ou morta (pouco reverberante). É preciso adequar o *tempo de reverberação* ao volume da sala. Um T_r de 1 s pode representar uma sala de 50 m² muito viva, porém um ginásio de 15 000m² bastante morto.

O *tempo de reverberação* pode ser obtido através de cálculos numéricos ou através de medições com equipamentos adequados. A equação mais conhecida para o seu cálculo foi desenvolvida pelo grande pioneiro da acústica de salas, o físico norte-americano Wallace Clement Sabine, que foi quem determinou

3.4. Parâmetros objectivos

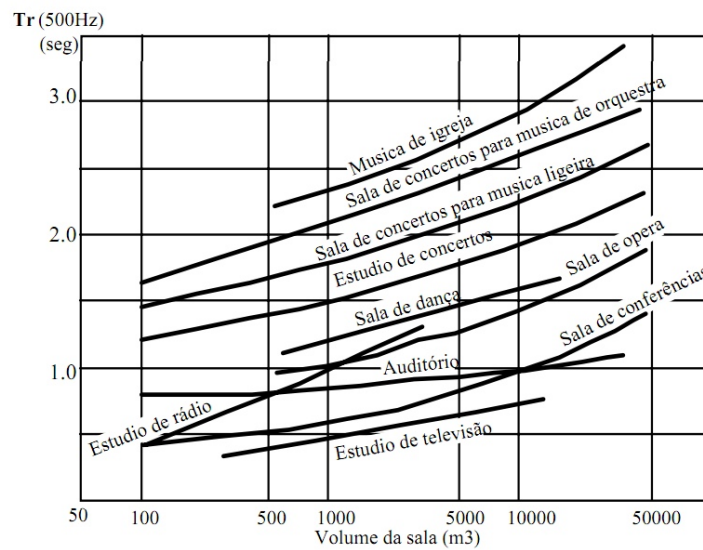


Figura 3.10: Tempo de reverberação óptimo em função do volume e do uso - Fonte: Beranek (1993)

a relação para o tempo de reverberação, tendo em consideração as características arquitectónicas do ambiente, assim como as características sonoras dos materiais da envolvente. Por meio das medidas experimentais realizadas em diversos ambientes, com particular destaque para aquelas realizadas no Boston Concert Hall, foi possível concluir que o vínculo existente entre o tempo de reverberação por ele definido e as características do ambiente poderia ser expresso pela equação 3.4:

$$T_r = 0,161 \frac{V}{S} \quad (3.4)$$

V tem o significado já definido

S é a área de absorção sonora equivalente [m^2]

A área de absorção sonora equivalente é dada pela expressão 3.5, onde A_i é a área de cada material da envolvente e α_i é o respectivo coeficiente de absorção sonora.

$$S_i = \sum \alpha_i A_i \quad (3.5)$$

Sabine foi o primeiro investigador a reconhecer a *tempo de reverberação* como um parâmetro físico importante, capaz de dar informações sobre a qualidade acústica do ambiente. Definiu-o como sendo o tempo empregado por um som reverberante para tornar-se inaudível. Só vários anos mais tarde, quando se tornou possível executar medições com auxílio de meios electrónicos para determinação do nível de pressão sonora, o *tempo de reverberação* veio a ser definido como sendo o tempo empregado

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

por um som, depois de interrompida a fonte, decrescer 60 *dB*.

Foi Sabine quem apresentou os primeiros critérios de projectos acústicos de ambientes fechados, pois conseguiu fazer a relação entre o parâmetro *tempo de reverberação* e as características físicas e geométricas dos ambientes, fixando algumas condições como requisitos necessários para obter uma boa qualidade acústica. A primeira delas é que o som tem que ser suficientemente forte. A segunda, que os componentes simultâneos de um som complexo (som composto por mais do que uma frequência) mantenham uma relação apropriada entre a sua intensidade. A terceira e última condição, é que os sons sucessivos na sua rápida articulação sejam claros e distintos, livre da sobreposição mútua e de ruído de fundo. Ainda hoje os requisitos formulados por Sabine são válidos. Também foi possível interpretar melhor suas palavras, tendo sido permitido evidenciar a importância de um quarto requisito, relacionado com direccionalidade do campo acústico. Para uma boa audição é preciso ser envolvido pelo som, e isso só pode ocorrer em ambientes que apresentam suficientes reflexões laterais (Farina, 1986).

3.4.2 Tempo de decaimento inicial, *EDT*

O *tempo de decaimento inicial* é um índice semelhante ao *tempo de reverberação*, também fornecido em segundos (*s*), e que considera apenas os primeiros 10 *dB* de decaimento da curva, sendo o seu valor extrapolado para os 60 *dB*. É um parâmetro que está mais relacionado mais com a percepção do ouvinte do que com as propriedades físicas da sala, sendo por isso considerado bastante importante na análise dos parâmetros acústicos subjectivos de um recinto fechado (Barbo, 2009).

Cirillo and Martellotta (2006) afirmam que num espaço difuso ideal, onde o decaimento do nível sonoro é linear, mesmo que na prática o *EDT* e o T_r sejam iguais, a primeira parte do decaimento é fortemente influenciada pelas reflexões iniciais e, conseqüentemente, o *EDT* é muito mais sensível às posições relativas entre fontes e ouvintes.

Bottazzini (2007) na sua pesquisa sobre as características arquitectónicas e a qualidade acústica das igrejas barrocas de Minas Gerais (Brasil) chegou à conclusão que quando o *EDT* possui um valor menor que o T_r , a sensação de reverberação é diminuída, e na situação contrária, ou seja, quando o *EDT* é maior que o T_r , aumenta a sensação de reverberação. Essas características influenciam no conceito de qualidade acústica do ambiente. A maior presença de superfícies reflectoras aumenta o *EDT*, e por consequência, aumenta a sensação de reverberação sentida pelo ouvinte. Na mesma pesquisa, os autores constataram que as características arquitectónicas influenciam bastante a qualidade sonora num ambiente.

3.4. Parâmetros objectivos

3.4.3 Definição, D_{50}

A *definição* de uma sala faz parte do conjunto de critérios que se exprimem sob a forma de relações entre a energia sonora que atinge o receptor durante um certo intervalo de tempo (energia útil) e a energia total, Patrício (2010).

Quando se quer avaliar a *definição* das palavras de um discurso em determinado ambiente, utiliza-se o intervalo de 50 ms, e quando a avaliação é para música, utiliza-se o de 80 ms. Esta pesquisa utilizou *definição* em 50 ms, e os resultados apresentados nesse parâmetro são referentes à fala. É calculada a partir da resposta impulsiva através da equação:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.6)$$

e seu resultado varia de 0 a 1, portanto, quanto mais próximo de 1, melhor é a *definição* de um discurso em determinado ambiente, (Barbo, 2009).

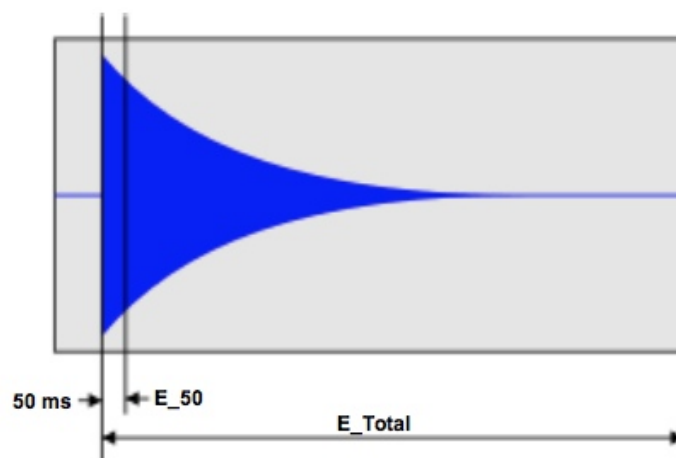


Figura 3.11: Diagrama ilustrativo da relação entre energia útil e energia total para o cálculo de D_{50} - Adaptado de Brüel and Kjær (2003b)

Na figura 3.11, é ilustrada a relação entre a quantidade de energia útil, E_{50} , e a energia total, E_{total} para a determinação do parâmetro *definição*. Na verdade, pode simplificar-se a equação 3.6 e apresentá-la da seguinte forma, como sugere Brüel and Kjær (2003b):

$$D_{50} = \frac{E_{50}}{E_{total}} \quad (3.7)$$

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

3.4.4 Clareza, C_{80}

A *clareza* assenta no mesmo princípio físico que a *definição* e a *inteligibilidade* porque também resulta das relações de energia. É um parâmetro que define a inteligibilidade das notas musicais e está relacionado com o equilíbrio entre a clareza percebida e a reverberação, a qual pode ser particularmente delicada para a audição de música. Assim, para determinação do parâmetro *clareza* calcula-se a relação entre a energia sonora que chega ao auditor nos primeiros 80ms (energia útil) e a energia que é apercebida por ele após a passagem do intervalo de tempo referido (energia não útil), de acordo com a equação 3.8.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.8)$$

Este critério é de extrema importância para caracterizar acusticamente espaços onde se realizem espetáculos musicais e também se processe a emissão de palavra. Na figura 3.12 é ilustrada a relação entre a energia útil, E_{80} , e a energia não útil, $E_{t \geq 80}$, aplicadas ao conceito de *clareza*. Tal como acontece com o parâmetro D_{50} , também a equação 3.8 ser simplificada e escrita na forma:

$$C_{80} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{t > 80}} \quad (3.9)$$

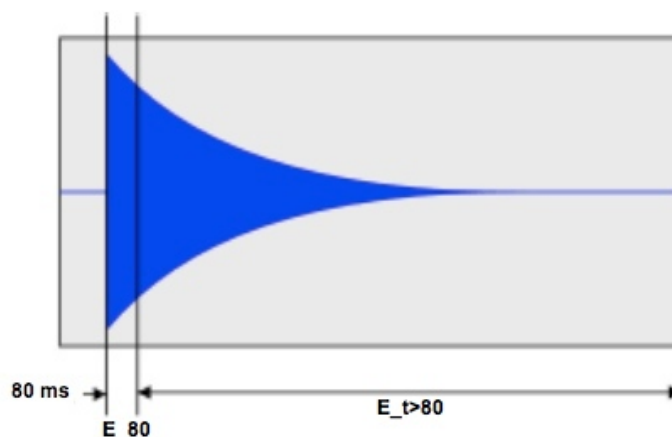


Figura 3.12: Diagrama ilustrativo da relação entre energia útil e não útil para o cálculo de C_{80} - Adaptado de Brüel and Kjær (2003b)

3.4.5 Relação entre Sinal e Ruído, SNR

A *relação entre o sinal e ruído* é a diferença entre o nível de pressão sonora gerado pela fonte e o nível de pressão sonora do ambiente, medido na posição do receptor. Quanto maior for o valor de SNR melhor é a compreensão da fala e quando se obtém SNR próximo perto de zero ou negativo,

3.4. Parâmetros objectivos

a compreensão é praticamente nula. Para que se possa atingir um adequado grau de inteligibilidade é recomendável que $SNR \geq 15dB$

3.4.6 Inteligibilidade da fala

A *inteligibilidade* de uma mensagem de voz é um aspecto fundamental para a qualidade acústica de um compartimento, mesmo que o seu uso não seja exclusivamente dirigido a actividades relacionadas com o uso da palavra (Patrício, 2010).

Os primeiros estudos sobre a *inteligibilidade da fala* datam de 1940, quando a Bell Laboratories começou a desenvolver tecnologias de medição para o efeito . Actualmente, com o uso de software e algoritmos que geram índices mensuráveis, como o Índice de transmissão da fala (*STI*), é possível classificar qualitativamente a *inteligibilidade*, numa escala com 5 posições que variam entre *inteligibilidade nula* e *inteligibilidade excelente*.

3.4.7 Índice de transmissão da fala , *STI*

O *índice de transmissão da fala* (*STI* - Speed Transmission Index) é o critério utilizado para caracterizar a percepção da palavra, sendo que a mesma, para ser inteligível, deve ser entendida com o mínimo de deformação possível. O termo *STI* foi mencionado pela primeira vez por Houtgast and Steeneken (1971) mas só foi aceite pela Acoustical Society of América em 1980 com a publicação do artigo *A physical method for measuring speech-transmission quality*, dos mesmos autores. O *STI* é um parâmetro adimensional que toma valores entre 0 e 1, e quanto maior o seu valor, melhor é a inteligibilidade da palavra.

A qualidade da comunicação verbal é largamente influenciada por dois factores de maior importância: *tempo de reverberação* e *relação entre o sinal e ruído*. Quando o nível sonoro da voz se mantém constante, a inteligibilidade do discurso é inversamente proporcional ao T_r e proporcional ao SNR , ou seja, quanto maior é o tempo de reverberação menor é a inteligibilidade e quanto maior é a *relação entre o sinal e o ruído*, maior é a inteligibilidade do discurso. Segundo Beranek and Vér (2006), para garantir níveis adequados de *STI* o *tempo de reverberação* deve ser minimizado e optimizado em função do volume do compartimento e do ruído de fundo. Os autores defendem ainda que o valor óptimo de *STI* é obtido quando T_r varia entre valores muito baixos, para compartimentos com reduzido ruído de fundo, e 1s para as situações em que isso não acontece.

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

3.4.8 Perda de articulação de consoantes, %ALC

Segundo Patrício (2010), de um ponto de vista de critério, uma boa inteligibilidade pode ser expressa sob a forma de uma relação percentual entre as consoantes recebidas e as consoantes emitidas. O autor considera que é necessário que esta relação, denominada *perda de articulação de consoantes* (%ALC - Percentage Articulation Loss of Consonants), tenha um valor superior a 60% para que seja considerada como adequada, ou seja, $\%ALC < 40\%$.

A *perda de articulação de consoantes* era, originalmente, baseada na percepção das palavras por parte dos ouvintes. Actualmente, admite-se que %ALC é relacionável com *STI* através da equação 3.10. A expressão, também conhecida como *equação de Farrel Becker*, é uma aproximação e a sua origem não está documentada na literatura. Contudo, existe uma notável aproximação com resultados empíricos obtidos em vários estudos levados a cabo por Houtgast et al. (apud Brüel and Kjær, 2003a).

$$\%ALC = 170,5405 e^{-5,419 STI} \quad (3.10)$$

%ALC toma valores entre 0 e 100 correspondendo, respectivamente, a uma excelente inteligibilidade e inteligibilidade nula do discurso. É importante salientar que a equação 3.10, por se tratar de aproximação, excede 100% para valores muito baixos de *STI*, sendo que nesse caso os resultados obtidos são desprezáveis. No gráfico da figura 3.13 é explícita a relação entre os parâmetros %ALC e *STI*.

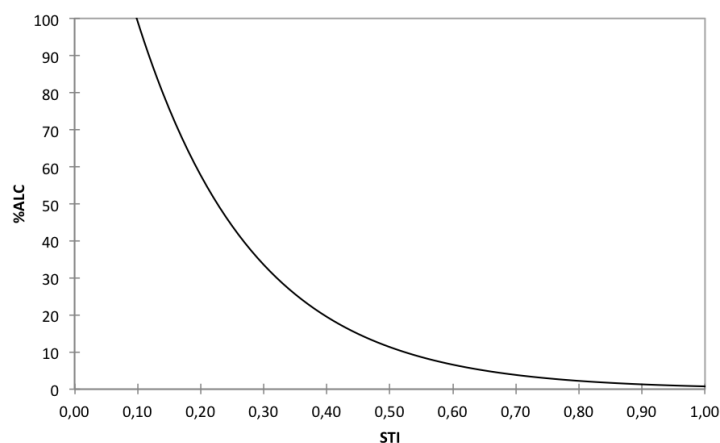


Figura 3.13: Relação entre *índice de transmissão da fala* e *perda de articulação das consoantes*

A tabela 3.1 demonstra a relação entre os parâmetros *índice de transmissão da fala* e *perda de articulação de consoantes* (parâmetros quantitativos) e a *inteligibilidade* (parâmetro qualitativo).

3.5. Qualidade acústica de Igrejas

Tabela 3.1: Relação entre *STI*, *%ALC* e *inteligibilidade* - Adaptado de Patrício (2010)

STI	<i>%ALC</i>	Inteligibilidade
0,00 - 0,29	≥ 35	Nula
0,30 - 0,44	15 - 35	Pobre
0,45 - 0,59	7 - 15	Razoável
0,60 - 0,74	3 - 7	Boa
0,75 - 1,00	≤ 3	Excelente

3.5 Qualidade acústica de Igrejas

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

3.5.1 Concílio do Vaticano II *versus* arquitectura interna das igrejas

O Concílio Vaticano II (CVII), XXI Concílio Ecuménico da Igreja Católica, foi convocado no dia 25 de dezembro de 1961, através da bula papal *Humanae salutis*, pelo Papa João XXIII.

O Concílio Vaticano II não proclamou nem alterou nenhum dogma, mas as suas orientações doutrinárias, pastorais e práticas são de extrema importância para a Igreja actual. Dando maior abertura aos fiéis e tentando com que esses se mantivessem mais ligados à Igreja, as celebrações começaram a ser celebradas em vernáculo e esta passou a abrigar actividades que até então não faziam parte das práticas comuns, tornando a edificação num espaço multifuncional. Por sua vez, a música passou a ser amplamente permitida dentro da igreja, cantada pelo povo também em vernáculo, facto que trouxe à tona os problemas acústicos dos templos. A modificação da localização do altar implicou alterações ao nível da qualidade acústica, o que na maior parte das situações foi considerado com uma ocorrência favorável.

3.5.2 Importância da qualidade acústica em igrejas católicas

A qualidade acústica de igrejas é património cultural que deve ser preservado tão cuidadosamente como a arquitectura e arte destes edifícios.

As formas mais complexas das igrejas consistem na aglutinação de um determinado número de espaços. O design acústico das igrejas, com essas formas complexas, envolve considerações das propriedades acústicas de cada ambiente separadamente assim como das combinações. Afinal, as áreas

Capítulo 3. Características acústicas de recintos fechados

para o órgão e o coro requerem um espaço para a geração de música; o altar deve prover condições ótimas para o serviço falado; a nave e os transeptos requerem propriedades de ambientes para ouvir tanto o sermão quanto a música; e todos os espaços da igreja necessitam arredores quietos que conduzem a uma meditação e prece sem distúrbios (LabCon, 2002). É por isso considerado que a boa qualidade acústica dos templos católicos é essencial para o seu bom funcionamento.

3.5.3 Influência da arquitectura na qualidade acústica de espaços de culto: Função *versus* qualidade acústica

A arquitectura de Igrejas, desde sempre, está orientada segundo a sua função principal que é o cerimonial litúrgico, isto é, o culto exercido por todos os fiéis em ordem à sua santificação. Cada elemento da arquitectura no espaço de culto cristão tem uma função que o torna sublime e o enche de sentido, simbolismo e identidade (Sartore and Triacca, 1987), assim são enunciadas algumas definições constantes do GlossárioCatólico (2011) com o objectivo de caracterizar cada uma dos espaços importantes no comportamento acústico da igreja, figura 4.6.

O **púlpito** é o local dentro de uma igreja onde são proferidas as leituras da Sagrada Escritura e, portanto, um ponto de emissão. Nas igrejas mais antigas está, em geral, localizado fora da Capela-Mor e perto da congregação, sendo composto por uma pequena varanda que dá para a nave da igreja. Nas igrejas católicas mais modernas e também nas antigas com apoio electroacústico, como é o caso de estudo, o púlpito é, geralmente, composto por um pequeno pódio com atril onde a Bíblia se encontra e de onde os leitores e pregadores se dirigirem à congregação.

A **capela-Mor** é a capela principal da igreja e onde se localiza o altar-Mor. De maiores proporções do que as restantes capelas, a capela-Mor encontra-se ligada ao corpo da nave através do arco triunfal ou arco cruzeiro.

Numa igreja católica, o **altar-Mor** é o altar principal, situado dentro da capela-Mor e geralmente mais adornado que os restantes altares. É bastante comum que o mesmo esteja localizado na extremidade oposta à entrada principal do templo.

A **nave** é o espaço reservado por excelência à congregação de fiéis, percorre longitudinalmente a quase totalidade do edifício, desde a fachada principal até ao transepto. É uma zona caracterizada como de produção de som, e também de audição.

O **transepto** é a parte do edifício que atravessa perpendicularmente o seu corpo principal, perto do coro, e dá ao edifício a sua planta em cruz. O **cruzeiro** é a área de intersecção entre o transepto e a nave.

4

Caso de Estudo: Catedral Metropolitana de Campinas

4.1 Resenha histórica

A origem da cidade de Campinas data do início do século XVIII, com as inúmeras incursões dos colonos para o interior do território brasileiro. Essas incursões, chamadas de bandeiras e entradas, tinham por objectivo avançar continente dentro para a conquista e controlo de maior quantidade de terras, visando estabelecer novos pousos e povoados, espaços para a agricultura, além de, principalmente, procurar riquezas minerais, capturar escravos e afastar eventuais espanhóis e outros que pudessem estabelecer-se nesse interior. A abertura de caminhos do litoral para o sertão de Goiás e Mato Grosso proporcionou o surgimento de pequenas povoações entre 1721 e 1730, e começou a nascer Campinas, na região que fica entre Jundiaí e Mogi Mirim, conhecida como a "Boca do Sertão".

A vida religiosa de Campinas tem origem na formação do pequeno bairro de Mato Grosso, fundado por Francisco Barreto Leme no ano de 1739. Como o bairro fazia parte da Paróquia de Jundiaí, os seus moradores eram obrigados a deslocar-se cerca de 70 quilómetros para a sede da paróquia todas

Capítulo 4. Caso de Estudo: Catedral Metropolitana de Campinas



Figura 4.1: Localização da cidade de Campinas - Adaptado de BrasilAzul (2012)

as vezes que necessitavam dos serviços religiosos. O mais antigo documento que se conhece, relativo ao germe do núcleo urbano é a petição para a construção de uma capela, e é constante do Livro do Tombo da Freguesia de Nossa Senhora da Conceição de Campinas. Por essa data o pequeno bairro já se teria transformado num povoado com cerca de 360 moradores e foi então que os chefes das famílias mais influentes resolveram encaminhar a Petição ao Vigário Capítular do Bispado de São Paulo, Cónego Antônio de Toledo Lara, litigando a construção da capela, como mostra o texto original:

Ilmo. e Revmo. Snr. Dizem os inclusos assinados existentes nos limites entre Jundiahy e Mogy-Mirim, que eles suplicantes, para maior cômodo e bem de suas almas, desejam erigir a sua própria custa uma capela na paragem chamada Campinas, onde tenham valimento espiritual si não sempre, ao menos em várias ocasiões que por ali se acharem sacerdotes; o que também justifica se achar na mesma paragem um cemitério bento para sepultura dos fieis que foi concedido por ser notoriamente dificultoso o recurso à sua Matriz, pois não dista menos de dez léguas; portanto. pedem a V. S., atendendo a tão justa súplica, seja servido deferir no que pedem, na forma do estilo Leite (2004).

Embora o documento não esteja datado, não carece de dúvida que é anterior a 1772, pois data de 15 de Setembro desse mesmo ano o pedido de informação ao pároco de Jundiahy, por parte do Cónego Lara, então responsável pelo expediente da Diocese de São Paulo, à qual a petição tinha sido dirigida (Leite, 2004).

Essa primeira petição foi impugnada pelo então Vigário de Jundiahy, Pe. Ignácio Paes de Oliveira, mas

4.1. Resenha histórica

após esforços e empenhos, é iniciada a construção da igreja em taipas de pilão que viria a ser conhecida como Matriz Velha.



Figura 4.2: Matriz Velha representada em ilustração de 1871 - Fonte: Leite (2004)

A freguesia é elevada à categoria de vila em 1797 e tem o seu nome mudado para Vila de São Carlos. No ano de 1807, um ano antes do Brasil se tornar um Reino Unido a Portugal, com a vinda da Família Real Portuguesa ao Brasil fugindo das tropas de Napoleão, uma assembleia na Câmara da Vila determina o início da construção de uma nova igreja, visto que o templo que servia como Matriz, além de muito pequeno para dentro dele se recolherem todos os fregueses, quando se juntavam nas festividades, era muito insignificante para se celebrarem com decência os ofícios divinos. O novo templo foi chamado de Igreja de Nossa Senhora da Conceição em honra da padroeira da cidade e é esta igreja que mais tarde viria a ser a Catedral Metropolitana de Campinas. O sítio escolhido era um terreno do rocío a Sudoeste da Vila, na zona de mato e abundante em veados.

Os grandes alicerces, típicos das construções em taipa de pilão que impressionavam pelas suas dimensões, foram abertos com mão de obra escrava e sob orientação do primeiro administrador das obras, Felipe Teixeira Néri. Posteriormente, com bênção do vigário Joaquim José Gomes, deu-se início à confecção das taipas com a terra que era retirada das praças hoje conhecidas como José Bonifácio e Largo Rui Barbosa. Durante os 38 anos subsequentes, as taipas foram sendo apiloadas. Factores como as lutas pela Independência, a Revolução Liberal de 1842 e as suas consequências contribuíram para o lento andamento das obras, e somente em 1845 as taipas ficaram concluídas para que a Sacristia e a nave central pudessem, finalmente, ser cobertas. Em 1853 Antônio Francisco Guimarães, membro da Irmandade do Santíssimo Sacramento, prontificou-se a pagar as despesas de viagem e trouxe da Bahia um grupo de entalhadores para a confecção da ornamentação interna do templo. Um novo administrador das obras, Antônio Joaquim de Sampaio, organizou, em 1862, um novo grupo de entalhadores para a conclusão da ornamentação da nave central, e no final de 1865 estavam concluídos os dois altares dos

Capítulo 4. Caso de Estudo: Catedral Metropolitana de Campinas

cantos, os quatro altares laterais e as duas capelas laterais. Todos os entalhes foram executados em cedro, madeira abundante nas matas em redor da cidade.

Com o término dos trabalhos de entalhe, Sampaio empenhou-se em definir a fachada do novo templo, tendo havido cinco mudanças de projecto: o primeiro, do Dr. Bitencourt, tinha características barrocas com duas torres e, neste sentido, seria perfeitamente integrado no estilo adoptado no interior do templo, mas não pôde ser executado pois não havia cantaria disponível na região; o segundo, neoclássico, de Charles Romieu, previa uma única torre assente sobre quatro colunas de pedra, cal e tijolos, mas foi suspenso devido aos acidentes ocorridos na construção (1865) que levaram ao soterramento de quatro funcionários e uma criança; o terceiro, escolhido como resultado de um concurso público, de José Maria Villaronga (Villaronga, Faria & Cia), previa uma fachada neogótica (1871) mas houve desentendimentos entre os administradores e não chegou sequer a ser iniciado; em 1876 foi contratado o engenheiro italiano Cristóvão Bonini, para mudanças na planta e conclusão da obra, mas foi exonerado pela Câmara em 1879, havendo o quinto projecto, o qual recuperou o estilo neoclássico e foi implementado pelo campineiro Francisco de Paula Ramos de Azevedo (1880). Este último, foi o responsável geral pela conclusão das obras e dotou o templo de canos embutidos para a iluminação a gás, uma novidade na época.

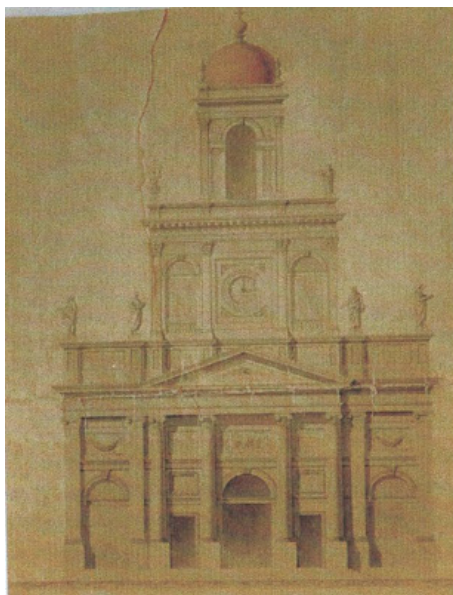


Figura 4.3: Projecto de Cristovan Boninni para a fachada da Matriz - Fonte: Pereira (2010b)

Inaugurada em 8 de Setembro de 1883, data dedicada à Padroeira de Campinas, a Matriz Nova torna-se a sede da Paróquia de Nossa Senhora da Imaculada Conceição. A 1 de Novembro de 1908, após a criação da Diocese de Campinas, a Matriz recebe o título de Catedral de Campinas.

4.1. Resenha histórica

A Catedral manteve-se inalterada até 1923, ano em que se deu a grande reforma. Os telhados com telhas coloniais já não garantiam a estanquidade do edifício e foram substituídas por telhas tipo francesas. Com o intuito de desafogar o altar-mor, que quase tocava o forro da capela-mor, foram levantadas as paredes da Capela do Santíssimo e da Sacristia, para que um novo forro, agora nivelado com o da nave central, pudesse ser executado. Na fachada frontal foram retiradas as instalações da antiga iluminação a gás, colocados dois emblemas, símbolo da sabedoria (Águia) e da eucaristia (Pelicano), e também quatro brasões com as datas comemorativas. No terraço do relógio foram instaladas quatro imagens dos Anjos do Apocalipse, e a fachada posterior foi toda refeita. Foi também nesta época que o zimbório foi trocado por uma cúpula em gomos, encimada pela imagem de Nossa Senhora.



(a) Matriz Nova após a inauguração



(b) Matriz Nova após a reforma de 1923

Figura 4.4: Fotografias da Matriz - Fonte: Leite (2004)

Quase três décadas se passaram até que, em 1954, o 1º Arcebispo Metropolitano de Campinas tomou a iniciativa de realizar mais uma reforma na Catedral. Desta feita foram restauradas as paredes internas, os pisos de mármore e de madeira, remodelados os telhados e substituídas as janelas.

Nos anos que se seguiram foram sendo realizadas pequenas obras de manutenção, mas em 1999, a Matriz apresentava já sinais visíveis de degradação. Nesse ano foi estabelecida a parceria com uma universidade local com o objectivo de produzir um projecto de restauro para a Catedral. As obras foram iniciadas em 2004, tendo como responsável o Arquitecto Ricardo Leite, e estava previsto que terminassem em 2007, data comemorativa dos 200 anos do lançamento da pedra fundamental deste

Capítulo 4. Caso de Estudo: Catedral Metropolitana de Campinas



Figura 4.5: Fachada da Catedral Metropolitana de Campinas nos dias actuais- Fonte: Leite (2004)

edifício. Por diversos motivos, isso não foi possível e está previsto que o restauro esteja concluído na íntegra, em 2014.

4.2 Caracterização do interior da Catedral

O interior do templo tem capacidade para cerca de 600 pessoas e é composto pela nave central, transepto, capela-Mor e capelas laterais de menores dimensões (figura 4.6). Existem ainda duas zonas distintas destinadas ao coro, sendo que a primeira é a mais pequena, está localizada na entrada da capela-Mor e é usada nas celebrações do dia-a-dia. A segunda é utilizada nas grandes celebrações e encontra-se no piso intermédio na nave, no extremo oposto ao altar-Mor.

A nave central mede 36 *m* de comprimento e 13,5 *m* de largura. O transepto tem um comprimento igual ao dobro da largura da nave (27 *m*), largura de 8 *m*, e forma um corredor terminado por dois pórticos laterais. Vem finalmente a capela-Mor, cujas dimensões estão em harmonia com o resto da igreja, sendo a altura interior de 21,5 *m* acima do andar térreo (Leite, 2004).

Todos os ornamentos e entalhes interiores são em madeira de cedro vermelho. A nave é ornamentada com pilastras da ordem coríntia, em cujos intervalos estão dispostos dois púlpitos, seis altares (2-Altar de Santo António, 3-Altar de São José, 4-Altar de Nossa Senhora das Dores, 5- Altar do Senhor Bom Jesus, 8-Altar do Sagrado Coração de Jesus e 9-Altar de Nossa Senhora do Rosário) e

4.2. Caracterização do interior da Catedral

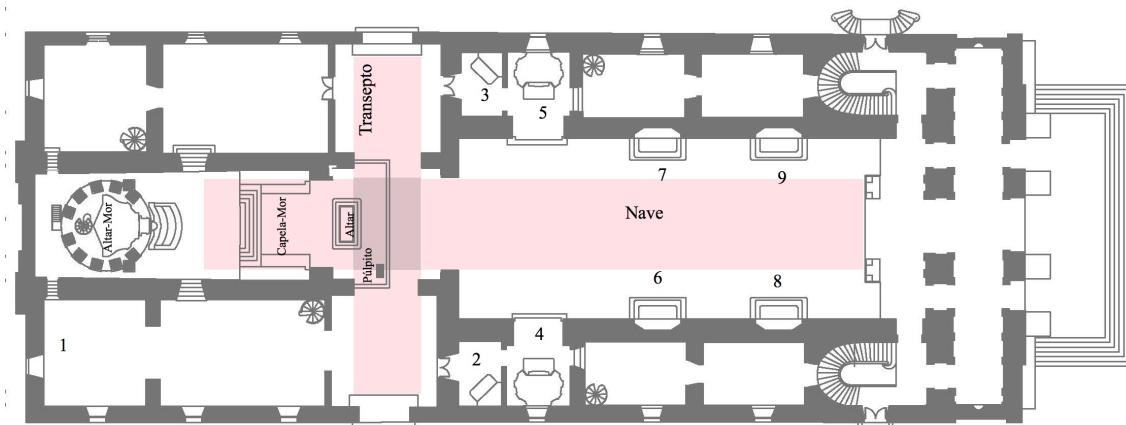


Figura 4.6: Planta da Catedral

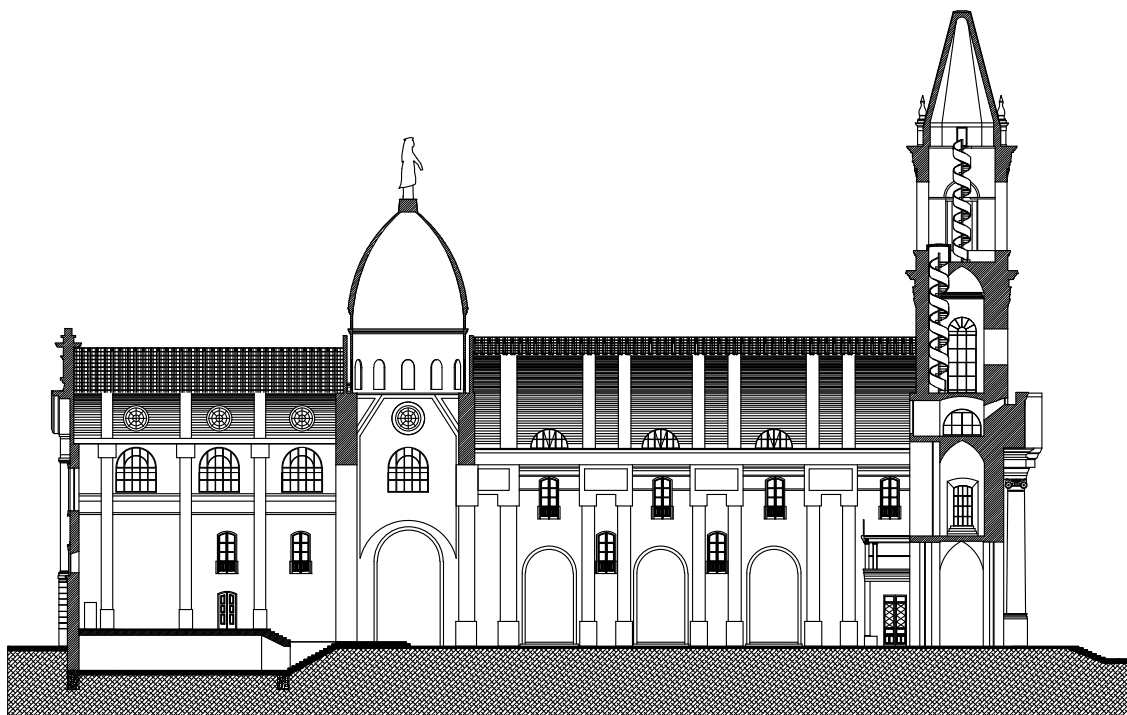


Figura 4.7: Corte da Catedral

Capítulo 4. Caso de Estudo: Catedral Metropolitana de Campinas



(a) Nave



(b) Altar-Mor

Figura 4.8: Fotografias do interior da Catedral - Fonte: Leite (2004)

duas capelas laterais (6-Capela de Nosso Senhor dos Passos e 7-Capela de Nossa Senhora Aparecida). As abóbadas são semi-circulares, sendo a nave ornada com relevos de entalhe e florões.

O coro, no qual está montado um magnífico órgão, assenta sobre colunas de madeira canelada de origem coríntia. Todos os capitéis, bem como a ornamentação superior e balaustrada, são obras de entalhe concluídas com primor.

5

Metodologia de estudo

5.1 Método da Resposta Impulsiva, *RI*

No presente capítulo são apresentados o método e equipamentos utilizados na determinação dos parâmetros necessários para a avaliação da qualidade acústica da Catedral Metropolitana de Campinas.

Segundo Schroeder (1965), para se obter informações sobre as características acústicas de um ambiente basta conhecer a sua Função de Transferência (*FT*), ou seja, a sua resposta impulsiva, porque esta fornece informações suficientes sobre a densidade e a distribuição do som reflectido no domínio do tempo, e a partir daí muitos outros parâmetros podem ser calculados (Bottazzini, 2007). A medição precisa da *RI* de uma sala é uma tarefa fundamental no projecto acústico de espaços com funcionalidades específicas, como são os casos de salas para palavra, música e outras actividades onde ocorra a transmissão de mensagens sonoras.

A representação do efeito das reflexões múltiplas num ambiente fechado, da energia em função do tempo, pode ser visto na figura 5.1. A primeira barra vertical representa a chegada ao microfone do som directo e na sua sequência, a chegada das sucessivas ondas reflectidas, representadas pelos demais segmentos verticais positivos, que se reduzem na medida em que o tempo passa. Essa representação

Capítulo 5. Metodologia de estudo

baseia-se na hipótese de que a fonte sonora consiga gerar um impulso ideal, uma Função Delta de Dirac, ou seja, um impulso unitário positivo de pressão, de duração temporal que tende a zero. Este diagrama teórico é conhecido como Reflectograma ou Resposta a um Impulso Teórico e pode ser construído mediante a separação das fontes virtuais.

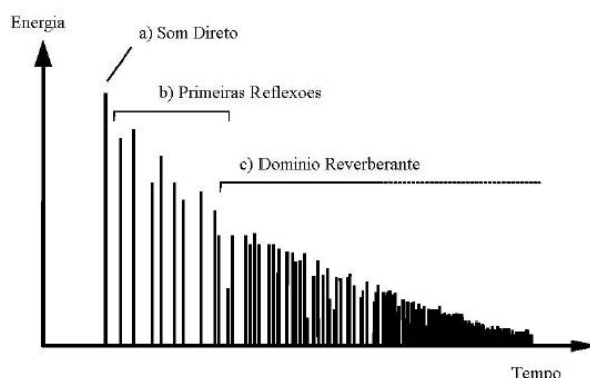


Figura 5.1: Reflectograma de um ambiente após geração de um impulso sonoro - Fonte: Bertoli and de Avelar Gomes (2005)

Na figura 5.2 é representada a resposta impulsiva obtida na sequência da análise de um ambiente específico. É observável que existem picos positivos e negativos que são devidos a dois fenómenos distintos: os sons impulsivos apresentam um comportamento aproximadamente bipolar, isto é, depois de uma variação positiva de pressão, produzem uma negativa quase equivalente; além disso, os receptores não possuem características perfeitamente omnidireccionais e tendem a dar uma resposta eléctrica negativa quando recebem por trás uma onda de pressão positiva (Farina, 2001).

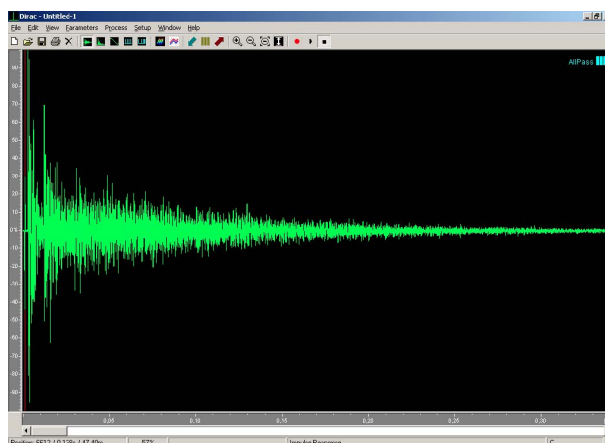


Figura 5.2: Resposta Impulsiva de um ambiente - Fonte: Brüel and Kjær (2003b)

Os formatos das respostas impulsivas de medidas experimentais estão relacionados com distância entre a fonte e o receptor, motivo pelo qual se torna difícil comparar traçados medidos em locais,

5.1. Método da Resposta Impulsiva, *RI*

ambientes e pontos diferentes. De qualquer maneira, nestas respostas impulsivas estão contidas as melhores e mais precisas informações a respeito de um ambiente, pois é por meio delas que podem ser definidos os seus parâmetros acústicos (Bottazzini, 2007).

Pereira (2010a) diz que é essencial obter a resposta apenas do espaço acústico, sem os efeitos de distorção provocados pelas respostas não-lineares dos equipamentos e com a presença mínima de ruído (acústico, térmico e eléctrico), para que se possa descrever, da forma mais precisa, as características acústicas de uma sala. Idealmente, o sistema deve ter um comportamento linear e invariante no tempo, pois quanto maior for o afastamento destes pressupostos maior será a imprecisão com que é obtida a resposta impulsiva da sala. Num sistema real de medição é necessário considerar os efeitos de distorção devido a não-linearidades dos equipamentos e a variações no tempo do comportamento destes. Outro efeito que introduz um aumento na incerteza das medições é a existência de uma certa quantidade de ruído.

5.1.1 Técnicas de medição

De uma maneira geral, os métodos de medição para obtenção da resposta impulsiva de uma sala podem ser caracterizados, essencialmente, pelo tipo de sinais utilizados na excitação da sala e pela forma como é processado o sinal de resposta (tipos de transformada e técnicas de deconvolução) captado por um determinado sistema de gravação (microfone, placa de som e computador).

Para que os dados experimentais colhidos nas medições sejam adequados para a obtenção da resposta impulsiva, as fontes de excitação devem produzir sinais com energia suficiente para que a razão sinal-ruído (secção 3.4.5) seja elevada em toda a gama de frequências de interesse. Os sinais produzidos devem ter a forma de impulsos de curta duração sem variações de pressão significativas. Deverão ainda possuir repetibilidade ao longo do tempo e do espaço (Pereira, 2010a).

Existem diferentes técnicas para a medição da resposta impulsiva baseadas na excitação da sala por sinais determinísticos. O software utilizado (Dirac) dá a possibilidade de analisar o meio ambiente usando como excitação três tipos de sinal distintos, sendo eles *Maximum Length Sequences (MLS)*, *Varredura Linear (lin – Sweep)* e *Varredura Exponencial (e – Sweep)*.

A técnica de correlação *MLS* consiste na emissão periódica de um ruído pseudo-aleatório de máximo comprimento, que ao ser repetido apresenta uma densidade espectral de potência plana, ou seja, o seu espectro é perfeitamente branco. As sequências de comprimento máximo gozam da propriedade de terem como função de autocorrelação um impulso de Dirac. Este método foi popularizado no uso da acústica na década de 80 pela rapidez de aplicação, alta resolução espectral, facilidade de geração do impulso e uma relação sinal-ruído, *SNR*, com intensidade suficiente para a aquisição da

Capítulo 5. Metodologia de estudo

Resposta Impulsiva (Bottazzini, 2007). A técnica de MLS é bastante vulnerável a não-linearidades do meio, tornando o seu uso desaconselhado na medição de grandes espaços (Masiero, 2004).

A técnica de deconvolução *varredura* é caracterizada por um sinal sonoro cuja intensidade permanece constante ao longo do tempo, enquanto a sua frequência aumenta (Bottazzini, 2007). As duas formas de variação mais utilizadas são a linear e a exponencial.

A *varredura linear* é chamada por alguns cientistas de “*time stretched pulse*”, que pode ser traduzido por “impulso espalhado no tempo”, uma vez que o seu espectro é branco e a sua frequência aumenta a uma taxa constante no tempo, equação 5.1.

$$\frac{f_2 - f_1}{t_2 - t_1} = cte \quad (5.1)$$

A *varredura exponencial* é caracterizada pelo facto da sua amplitude decair $3dB$ por cada banda de oitava, sendo que todas as bandas de oitava do sinal possuem a mesma energia. A frequência do sinal varia ao longo do tempo, aumentando para o dobro por cada unidade fixa de tempo, equação 5.2. Existe actualmente a tendência de usar varreduras exponenciais ao invés de lineares como sinal de excitação, uma vez que elas apresentam uma melhor distribuição da energia no seu espectro, característica do espectro rosa.

$$\frac{\log \frac{f_2}{f_1}}{t_2 - t_1} = cte \quad (5.2)$$

Este último método é uma técnica desenvolvida mais recentemente e apresenta vantagens importantes face aos outros métodos mais enunciados (Pereira, 2010a). As vantagens podem ser evidenciadas tendo em conta a susceptibilidade de cada método à presença de ruído e ao afastamento do sistema das condições ideais. Com o método da *varredura exponencial* é possível separar por completo a resposta impulsiva pretendida das componentes de distorção do sinal, devido a não-linearidades e ainda melhorar a razão sinal-ruído, principalmente nas baixas frequências.

Muller and Massarani (2002), após analisarem as técnicas citadas para a obtenção da função de transferência, destacam as vantagens do uso da *varredura exponencial*, que são:

- Rapidez de medição,
- Alta resolução, exatidão e confiabilidade,
- Relação Sinal-Ruído muito satisfatória,
- Perfeitamente imune às distorções harmónicas,
- Pouco sensível à variância no tempo.

5.1. Método da Resposta Impulsiva, RI

Pelas razões já enumeradas e face ao volume significativo do ambiente em estudo, o sinal utilizado na análise é a *varredura exponencial*, sendo que a técnica de deconvolução para obtenção da Resposta Impulsiva se encontra descrita em mais pormenor na secção 5.1.5. Para uma melhor compreensão desta técnica, é importante definir os conceitos de *sistema linear*, *impulso de Dirac* e *sistema não linear*, que são enunciados nas secções seguintes.

5.1.2 Sistema linear invariante no tempo - Modelo ideal

A análise de um sistema físico requer um modelo matemático adequado para descrever o seu comportamento. Este modelo constitui uma conceptualização ideal do sistema, que é útil e preciso quando as suas limitações são tidas em conta e quando se conhece o domínio de validade para a sua aplicação. Um recinto pode ser considerado como um sistema físico que recebe um sinal de entrada $x(t)$, geralmente um estímulo sonoro produzido por um altifalante, e transforma-o num sinal de saída $y(t)$ que será captado por um receptor, para posteriormente ser processado e analisado em computador. O diagrama simplificado do sistema está indicado na figura 5.3

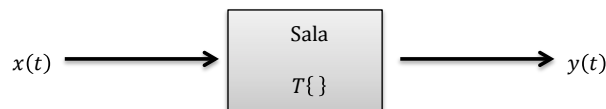


Figura 5.3: Diagrama de um sistema ideal

Matematicamente, pode escrever-se que o sinal de entrada está relacionado com o sinal de saída da forma seguinte:

$$T\{x(t)\} = y(t) \quad (5.3)$$

Onde $T\{\}$ é o operador matemático que representa o sistema e que estabelece a regra de transformação do sinal de entrada, $x(t)$, no sinal de saída, $y(t)$.

Assumindo a imobilidade do par emissor-receptor, a sala pode ser tratada como um sistema linear invariante no tempo. Num sistema linear um sinal de entrada dado por $ax_1 + bx_2 = x_3$, corresponde uma saída $y_3 = ay_1 + by_2$, onde y_1 e y_2 são as saídas de x_1 e x_2 , e a saída y_3 é combinação linear das saídas y_1 e y_2 . O princípio da sobreposição é aplicável a sistemas lineares em que a resposta do sistema a uma combinação linear de sinais, é uma combinação linear das respostas de cada sinal. O comportamento de um sistema linear ideal é independente da amplitude dos sinais. O sistema, por ser invariante no tempo, tem propriedades constantes ao longo do tempo, ou seja, o sinal de entrada $x(t - t_0)$ será transformado no sinal de saída $y(t - t_0)$ sem que este último sofra alterações na sua amplitude ou forma, apenas o

Capítulo 5. Metodologia de estudo

instante em que este é recebido é modificado de t_0 (constante real) .

5.1.3 Impulso de Dirac

Quando um sistema é estimulado por um impulso ideal, isto é, quando o sinal de entrada for uma função delta de Dirac, $\delta(t)$, o sinal de saída denomina-se por resposta impulsiva do sistema, $h(t)$, como é exemplificado na figura 5.4. Esta transformação é também conhecida por função de Green, equação 5.4

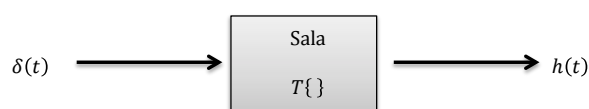


Figura 5.4: Diagrama de um sistema excitado por um impulso de Dirac

A função delta de Dirac é um conceito matemático definido através de um integral de convolução. Idealmente, a função delta de Dirac pode ser considerada como um impulso com duração infinitesimal, altura infinita e área unitária. A resposta impulsiva depende do ponto de aplicação do impulso de Dirac. Uma sala que recebe um estímulo sonoro descrito por um delta de Dirac, $x(t) = \delta(t)$, produz directamente a resposta impulsiva desse espaço, $y(t) = h(t)$, podendo-se escrever que:

$$T\{\delta(t)\} = h(t) \quad (5.4)$$

A resposta impulsiva fornece uma descrição precisa do sistema “sala” no domínio do tempo. Em teoria, a saída de um sistema linear invariante no tempo é obtida pela operação de convolução entre o sinal de entrada e a resposta impulsiva do sistema, denotada por $x(t) * h(t) = y(t)$.

No caso em que o sinal de entrada é um impulso de Dirac, a resposta do sistema é a própria resposta impulsiva, ou seja, numa situação prática em que se pretende caracterizar a resposta impulsiva de uma sala, a medição pode ser realizada com um sinal de entrada com características impulsivas e o sinal recebido será, aproximadamente, a resposta impulsiva (equação 5.5).

$$\delta(t) * h(t) = h(t) \quad (5.5)$$

5.1.4 Sistema não linear

Considerando que o sistema ideal da figura 5.3 pode conter uma certa quantidade de ruído e de não-linearidades, o sistema real em análise pode ser representado pelo modelo esquemático da figura 5.5

5.1. Método da Resposta Impulsiva, *RI*

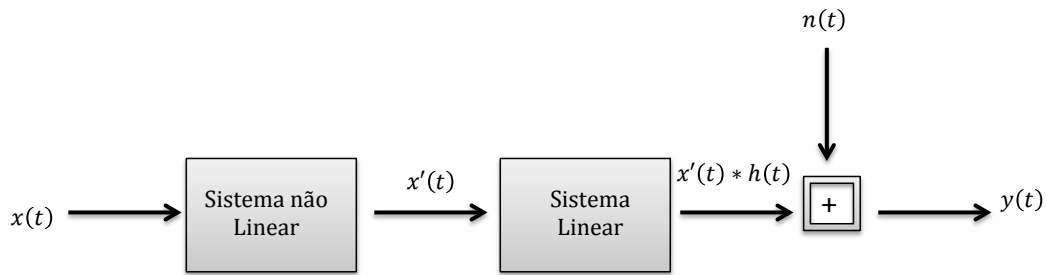


Figura 5.5: Sistema caracterizado por não linearidades

O modelo do sistema pode ser conceptualizado por um conjunto de elementos ligados em série, caracterizados pelas respostas impulsivas de cada um desses elementos (Farina, 2000; Berkhout and Boone, 1980). Neste modelo o sistema global apresenta características não-lineares todavia, assume-se que o elemento “sala” do sistema tem propriedades lineares e invariantes no tempo e cuja função resposta em frequência ou resposta impulsiva se pretende obter. Pode ser escrito que:

$$y(t) = x'(t) * h(t) + n(t) \quad (5.6)$$

sendo:

$x'(t)$ a resposta produzida pelo sistema não linear ao sinal de entrada $x(t)$,

$h(t)$ a resposta impulsiva da sala,

$y(t)$ o sinal captado, após o efeito dos filtros não-linear e linear,

$n(t)$ o ruído

Utilizando um sinal de excitação determinístico $x(t)$, de preferência periódico e de banda larga, é possível medir o sinal de resposta e através deste calcular a função de transferência do sistema, considerando que o ruído de fundo foi eliminado em virtude da média de várias medições (Pereira, 2010a). Em primeira aproximação o sistema é linear e invariante no tempo, a resposta impulsiva $h(t)$ é a transformada de Fourier inversa da função de transferência. Mediante o uso de um processamento digital da resposta captada, $y(t)$, é possível implementar os algoritmos Transformada rápida de Fourier (*FFT*) e Transformada rápida de Fourier inversa (*IFFT*) para extrair a resposta impulsiva da sala:

$$h(t) = IFFT \left[\frac{FFT[y(t)]}{FFT[x(t)]} \right] \quad (5.7)$$

Este método melhora a razão sinal/ruído e permite separar os efeitos de distorção causados pelas não-linearidades do sistema, da resposta impulsiva pretendida. Neste método é aplicado um processo de

Capítulo 5. Metodologia de estudo

deconvolução linear da resposta impulsiva no domínio do tempo (Farina, 2000) através da resposta da sala a um sinal de excitação sinusoidal, em que a frequência instantânea varia de forma exponencial ao longo do tempo. A técnica consiste aplicar ou convoluir um filtro inverso, $f(t)$, com a resposta da sala, $y(t)$, ao sinal de excitação, $x(t)$:

$$x(t) * f(t) \Rightarrow \delta(t) \quad (5.8)$$

$$h(t) = y(t) * f(t) \quad (5.9)$$

Os equipamentos típicos utilizados na cadeia de medição da resposta impulsiva com excitação digital estão representados de forma esquemática na figura 5.6. O computador gera um sinal de excitação digital que será convertido pela placa de som num sinal analógico, este é transmitido ao transdutor de emissão (altifalante) que emite um sinal acústico para o interior da sala. A resposta da sala é captada pelo transdutor de recepção (microfone) e convertida num sinal eléctrico analógico; em seguida é transformada no conversor (placa de som) e digitalizada. O processamento deste sinal para deconvolução da resposta impulsiva é realizado por um analisador digital no computador. A configuração apresentada permite fazer o todo o controlo do sistema de medição a partir do computador. Actualmente, a geração do sinal de excitação, a gravação da resposta da sala e o processamento e a análise dos sinais captados, é feita por um único programa operado a partir do computador.

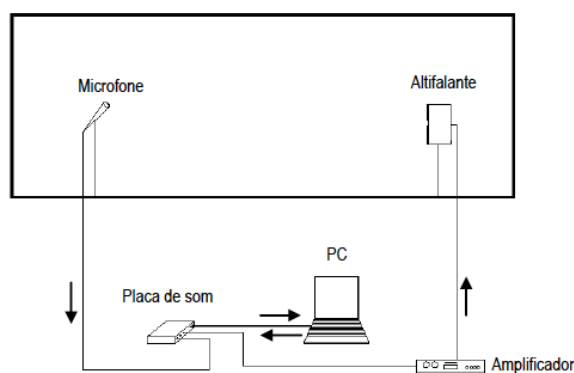


Figura 5.6: Equipamentos típicos da cadeia de medição da Resposta Impulsiva- Fonte:Pereira (2010a)

Assim sendo, fica caracterizada a importância da obtenção da *Função de Transferência* para se chegar à *Resposta Impulsiva* do sistema. O procedimento é aplicável a qualquer tipo de excitação, também não impulsiva, uma vez que se conhece a característica temporal do sinal de excitação. (Farina, 1986).

5.2. Equipamento utilizado

5.1.5 Técnica de Deconvolução - Varredura

Muller and Massarani (2002) analisaram várias técnicas para obter a Função de Transferência e concluíram que as varreduras são os sinais mais aptos para avaliação de funções de transferência por serem mais imunes a distorções harmônicas e não-linearidades.

Segundo Bottazzini (2007), a técnica de deconvolução varredura de senos é caracterizada por um sinal sonoro, cuja intensidade permanece constante no tempo enquanto sua frequência aumenta. Como já foi referido, esta varredura pode ser linear ou exponencial.

Com o uso de um computador e software adequados, uma varredura (sweep) como sinal sonoro, após passar por um conversor digital/analógico e um amplificador, é emitido no ambiente por meio de um altifalante, sendo captado por um receptor conectado ao computador. Como o sinal de excitação e a resposta obtida pelo software são função do tempo, é necessário aplicar uma Transformada rápida de Fourier tanto no sinal produzido pelo software como no captado pelo microfone, para transformá-los no domínio da frequência. Deste modo, quando se divide o sinal de saída pelo de entrada, obtêm-se a Função de Transferência do sistema, também em função da frequência. De seguida, é aplicada uma Transformada rápida de Fourier inversa para finalmente se obter a Resposta Impulsiva em função do tempo.

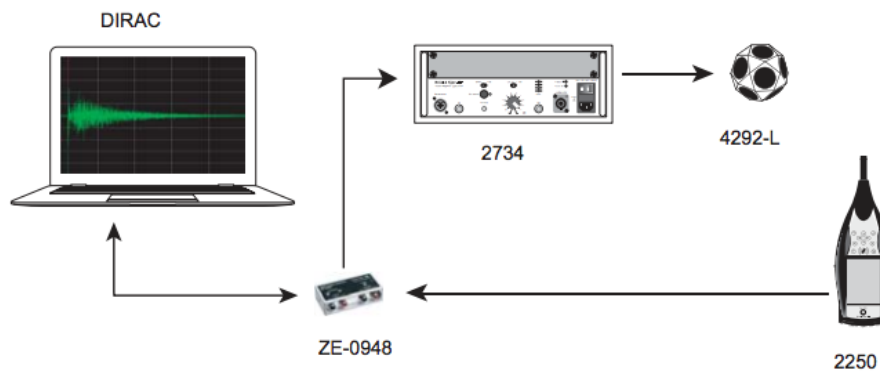


Figura 5.7: Esquema do sistema de medição - Fonte: Brüel and Kjær (2003b)

5.2 Equipamento utilizado

5.2.1 Fonte sonora

Foi utilizada uma fonte sonora produzida pela Brüel & Kjaer, do tipo 4296, constituída por um agrupamento de 12 altifalantes e que, pela sua configuração em dodecaedro, figuras 5.8 e 5.9, tem a possibilidade de radiar o som uniformemente com uma distribuição aproximadamente esférica.

Esta fonte sonora foi adoptada porque a maioria das medições acústicas em ambientes fechados

Capítulo 5. Metodologia de estudo



Figura 5.8: Fonte sonora 4296 da Brüel & Kjaer

requerem fontes que possam radiar som uniformemente em todas as direcções, para que os resultados sejam mais exactos e reflectam, tanto quanto possível, as condições reais.

A norma ISO-3382 (1997), na sua alínea 4.2.1, sugere que na medida do possível, seja utilizada uma fonte sonora omnidireccional porque permite a produção de pressão sonora suficiente para proporcionar uma curva de decaimento com a faixa dinâmica mínima exigida, sem sofrer a interferência do ruído de fundo e ressaltando a resposta impulsiva do ambiente.

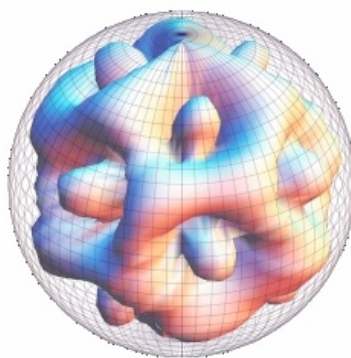


Figura 5.9: Diagrama de directividade de uma fonte sonora em forma de dodecaedro - Fonte: Leishman and Smith (2004)

5.2.2 Microfone

O microfone utilizado para captar o sinal de excitação lançado no ambiente foi o modelo 4189 da Brüel & Kjaer (figura 5.11), com sensibilidade de $50mV/Pa$ e gama dinâmica de 14,6 a 146 dB, conectado ao medidor de nível de pressão sonora da mesma marca, modelo 2260, com diâmetro de $1/2''$ e sensibilidade suficiente para se evitar distorções que possam influenciar o campo acústico alterando,

5.3. Posicionamento do equipamento para medição acústica

desta forma, o resultado da análise.



Figura 5.10: Receptor do tipo 4189 da Brüel & Kjaer

5.2.3 Amplificador de potência

O amplificador de potência utilizado é da Brüel & Kjaer, do tipo 2716, com entrada electronicamente equilibrada e saída de 300 W.



Figura 5.11: Amplificador de potência do tipo 2715 da Brüel & Kjaer

5.3 Posicionamento do equipamento para medição acústica

O estudo da qualidade acústica de locais de culto, e em particular de igrejas, tem vindo a ganhar destaque nos últimos anos. Várias grupos de investigadores, em áreas geográficas distintas, têm dirigido os seus estudos para a acústica de igrejas. Contudo, uma análise mais detalhada dessas mesmas pesquisas demonstra que as técnicas de medição são significativamente diferentes em termos de equipamento de medida e parâmetros calculados. A maior fonte de discórdia está relacionada com a variabilidade de formas arquitectónicas das igrejas, o que pode induzir a que diferentes investigadores posicionem as fontes e receptores de modo distinto, o que tem como consequência a dificuldade em obter dados comparáveis com os de outras igrejas e estudos. (Martellotta et al., 2008)

Capítulo 5. Metodologia de estudo

No sentido tentar diminuir as incertezas e obter parâmetros comparáveis, uma equipa composta por investigadores de três Universidades italianas propôs directrizes que visam fornecer apoio técnico e operacional às sessões de medição de igrejas de diferentes tradições e nacionalidades.

Um dos aspectos mais interessantes, e ao mesmo tempo preocupantes, que surgem quando se estuda igrejas está relacionado com as suas dimensões, que podem variar bastante, e a complexidade espacial, que nem sempre deriva do projecto inicial e que, frequentemente, é resultado de modificações e acréscimos feitos ao longo dos séculos. A proposta de Martellotta et al. (2008) tem em consideração a norma ISO 3382 e tem por base três aspectos básicos para o procedimento de medição: escolha da posições das fontes e dos receptores, assim como do equipamento a ser utilizado.

5.3.1 Posicionamento das fontes sonoras

A localização das fontes sonora numa igreja pode variar bastante de templo para templo porque, embora a capela-Mor seja o centro da acção litúrgica existem mais posições de emissão importantes e que devem ter tidas em conta.

Segundo as *Guidelines for acoustical measurements in churches*, são definidas várias posições para a fonte sonora e por forma a tornar comparáveis as medições de diferentes equipas de investigadores, é sugerido que existam, no mínimo, duas posições para a mesma. A primeira posição é fixa, denomina-se por *fonte de referência* e é posicionada em frente ao altar usado actualmente nas celebrações, na parte virada para a assembleia de fiéis. A localização da segunda fonte é variável e depende dos propósitos específicos da campanha de medição, assim como dos parâmetros acústicos que se pretende avaliar. No caso da Catedral Metropolitana de Campinas, devido às suas dimensões, não seria aconselhável que existissem apenas 2 fontes na simulação. É, por isso, recomendável que sejam definidos outros pontos para posicionamento da fonte sonora, com o objectivo de obter uma simulação tão aproximada quanto possível das condições reais de uso da igreja. Assim, devem ser tidos em conta os seguintes aspectos:

- A posição do Sacerdote durante a liturgia e o púlpito são particularmente importantes para a emissão de discurso e por isso são reproduzidos por duas fontes sonoras;
- Na Catedral Metropolitana de Campinas foi preservado o altar-Mor, o qual já não é utilizado, e tendo em atenção que distância existente entre este e o altar usado actualmente é de 13,7 m, este deve ser também representado por uma fonte sonora para que se consiga ter uma noção das alterações ao nível da qualidade acústica decorrentes desta modificação;
- A assembleia de fiéis, sendo uma parte activa durante os cânticos, é também reproduzida com duas fontes sonoras;

5.3. Posicionamento do equipamento para medição acústica

- Também o órgão e o coro têm posições bem definidas na igreja e o seu papel é fundamental durante a celebração, por isso devem ser tidos em conta na simulação com uma fonte sonora cada
- É necessário considerar que outros tipos de performance musicais são hospedados na igreja e nestas situações, é frequente que os músicos se posicionem na frente do altar no local já referido e denominado de *fonte de referência*, ou sob a cúpula. Quando a *fonte de referência* é localizada fora da área coberta pela cúpula, a fonte representativa desta última é colocada no eixo de simetria da projecção horizontal da mesma, a 2 m do centro.

Na tabela 5.1 são relacionados os dois tipos uso (discurso e música) com a localização das fontes sonoras a eles associada.

Tabela 5.1: Tipo de emissão sonora associado a cada fonte

Tipo de emissão	Posição das fontes sonoras
Discurso	Altar Mor
	Altar
	Púlpito
Música	Órgão
	Coro
Discurso e Música	Frente ao Altar ou sob a Cúpula
	Congregação

5.3.2 Posicionamento dos receptores

A complexidade da forma na maior parte das igrejas torna a definição da posição dos receptores numa tarefa ainda mais difícil e subjectiva do que a escolha da posição das fontes sonoras. Vários parâmetros são levados em consideração a fim de facilitar todo processo de medição mas a escolha final é, geralmente, um compromisso entre duas necessidades contrastantes. Por um lado, existe a necessidade de se obter um panorama exacto da variação dos parâmetros acústicos dentro da igreja e esse factor conduz a uma maximização do número de receptores. Por outro lado, o período de tempo disponível para as medições é limitado e a necessidade de minorar a interferência com o normal uso do templo para que não hajam interrupções faz com que não seja razoável a definição de um número alto de receptores, o que aumentaria significativamente o tempo despendido com o processo.

A localização óptima dos receptores capaz de garantir com precisão a descrição das variações dos parâmetros acústicos tem que levar em conta não só as questões práticas, mas também a distribuição real do som no compartimento. Um número maior de receptores é colocado na principal área de assistência na nave, tendo como critério de selecção o facto de que esta deve ser adequadamente representada,

Capítulo 5. Metodologia de estudo

incluindo as posições mais extremas (desde a mais perto até à mais afastada) e que a distância máxima entre receptores não deve exceder $1/6$ do comprimento da nave. O facto de a igreja ser simétrica facilita as medições porque os receptores são colocados num alinhamento numa das metades e ao garantir que, simetricamente, são colocados 4 dispositivos de controlo na outra metade, consegue obter-se uma panorâma mais completo da variação dos parâmetros acústicos ao longo da área de audiência.

A principal área de assistência é significativamente maior que as outras duas existentes no transepto, e por isso basta que haja um receptor em cada uma das menores, localizado na intersecção dos seus eixos de simetria.

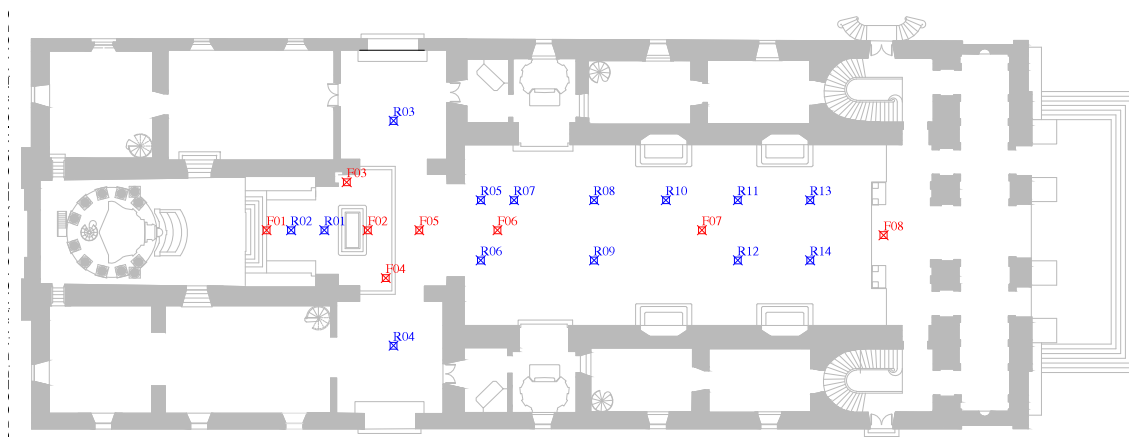


Figura 5.12: Planta de localização das fontes e receptores

Além dos dispositivos colocados nos locais acima referidos e para que seja possível analisar o comportamento acústico de toda a área da igreja, é colocado um receptor nas proximidades da *fonte sonora de referência* (a aproximadamente 1 m de distância) e pelo menos um receptor em cada um dos volumes secundários. Neste último grupo são incluídos o transepto, capelas de dimensões mais significativas e qualquer volume acoplado que pelas suas dimensões ou combinação dos materiais da envolvente e forma, independentemente do seu grau de acoplamento acústico com o volume da nave, podem induzir alterações no comportamento acústico de todo o espaço. No caso específico da Catedral Metropolitana de Campinas, as capelas laterais têm dimensões reduzidas que não afectam o comportamento acústico da igreja e o transepto é caracterizado por duas zonas de audiência já representadas com dispositivos receptores.

É importante mencionar que norma ISO-3382 (1997) sugere que os microfones sejam colocados a $1,2\text{ m}$ acima do pavimento e as fontes sonoras a $1,5\text{ m}$, tendo o cuidado de que todos os dispositivos fiquem a pelo menos 1 m de distância de qualquer superfície reflectora. A norma determina ainda que nenhum receptor deve estar suficientemente perto da fonte sonora, de forma a evitar a influência do som

5.3. Posicionamento do equipamento para medição acústica

directo no cálculo dos parâmetros acústicos, e por isso é necessário garantir que a distância existente entre as fontes e os receptores é igual ou superior ao raio de reverberação (equação 3.3). A combinação dos equipamentos de medição e de recepção encontra-se representada na figura 6.1.

Capítulo 5. Metodología de estudio

6

Análise de Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições e respectiva análise dos parâmetros acústicos obtidos nas medições realizadas na Catedral Metropolitana de Campinas no dia 21 de Outubro de 2011. Todos os parâmetros avaliados foram obtidos a partir do método da resposta impulsiva do ambiente.

6.1 Dimensões

Antes de se dar início às medições na igreja seleccionada, foi feito o ajuste do sistema de medição e verificação das características arquitectónicas da Catedral, resumidas na tabela 6.1.

Para realização da campanha de medições, foram escolhidas as posições constantes da tabela 6.2, por se considerar descreverem adequadamente o comportamento acústico da igreja.

Na figura 6.1 encontra-se o arranjo final dos dispositivos (fontes e receptores sonoros) usados na campanha de medições.

Capítulo 6. Análise de Resultados

Tabela 6.1: Dimensões da Catedral

Designação	Sigla		
Volume total	V_{total}	17 156	m^3
Volume da nave	V_{nave}	7761	m^3
Área total	A_{total}	1216	m^2
Área da nave	A_{nave}	408	m^2
Comprimento máximo	L_{max}	67,9	m
Comprimento da nave	L_{nave}	36,0	m
Largura máxima	$Larg_{max}$	27,0	m
Largura média	$Larg_{md}$	12,6	m
Largura da nave	$Larg_{nave}$	13,5	m
Altura máxima	H_{max}	34,0	m
Altura média	H_{med_total}	14,2	m
Altura da nave	H_{nave}	19,0	m

Tabela 6.2: Localização dos equipamentos de medição

Fontes Sonoras		Receptores	
F01	Altar-Mor	R01	Na proximidade da fonte de referência
F02	Altar / Fonte de referência	R02	Capela -Mor
F03	Coro e órgão	R03 e R04	Transepto
F04	Púlpito	R05 a R14	Congregação
F05	Sob a Cúpula		
F06 e F07	Congregação		
F08	Coro		

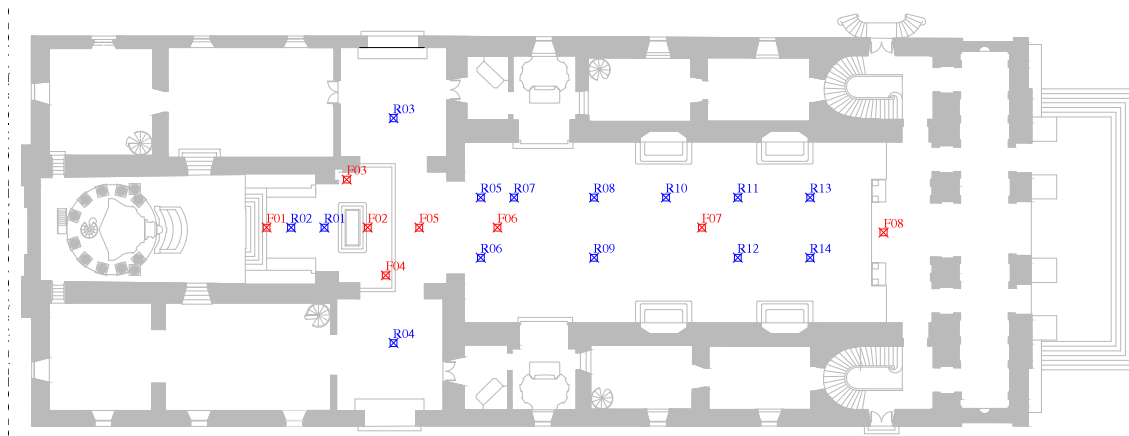


Figura 6.1: Planta de localização das fontes e receptores

6.2 Parâmetros Acústicos

6.2.1 Tempo de reverberação

O tempo de reverberação foi medido por bandas de frequência entre os 125 Hz e 4k Hz . O valor médio de T_r obtido nas médias frequências (500 – 1k Hz) foi de 3,5 s. O grau de dispersão dos valores, por gama de frequência (figura 6.2) é muito baixo, existindo uma certa uniformização dos valores obtidos nas várias posições.

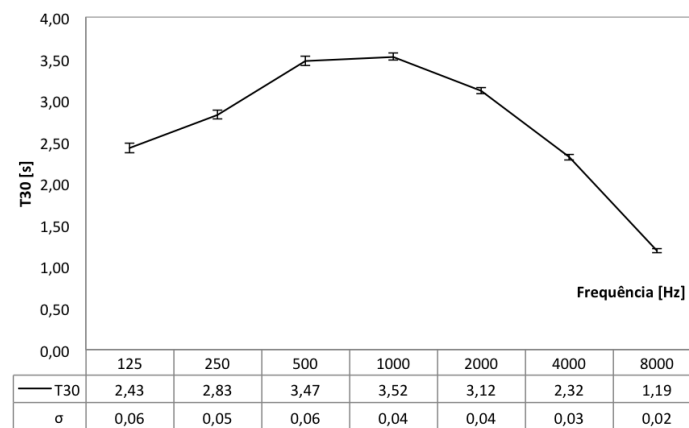


Figura 6.2: Tempo de Reverberação médio medido nas várias posições fonte/receptor e respectivo desvio padrão para cada banda de oitava

Os valores de T_r são influenciados pela existência de materiais reflectores a cobrir as superfícies interiores, pela cúpula e pelo grande volume. Beranek and Vér (2006) recomendam para este tipo de espaço os mesmos valores de T_r aconselhados para espaços onde a inteligibilidade da palavra é importante, aproximadamente 1 s. Para espaços onde a emissão de música é importante, Beranek (1993) elaborou curvas com valores de T_r ideais em função do volume e do uso (figura 3.10). Para o volume do caso de estudo (17 156 m^3), Beranek (1993) recomenda que o T_r seja próximo de 3,1 s. Assim, pode verificar-se que o T_r medido é aproximadamente 11% superior ao recomendado pelo autor para a música, e bastante superior ao recomendado para a boa prática de discurso.

6.2.2 Distância Crítica

De modo a verificar que nenhum dos receptores se encontrava no campo sonoro directo, procedeu-se ao cálculo da distância crítica conforme descrito na secção 3.3.3. Para isso, utilizou-se a média das temperaturas medidas durante a campanha de ensaios, $T = 23,0^\circ C$, e a média do tempo de reverberação para as médias frequências, $T_r = 3,5$ s, para se chegar à velocidade de propagação do som

Capítulo 6. Análise de Resultados

no ambiente, equação 6.1

$$c = 20,045 \sqrt{T} = 20,045 \sqrt{23,0 + 273,15} = 344,9 \text{ [m/s]} \quad (6.1)$$

Substituindo o resultado da equação 6.1 na equação 6.2, chega-se a $r_{cr} = 3,8 \text{ m}$ e verifica-se que é superior à distância existente em qualquer combinação entre a fonte e o receptor. Assim, não é necessário desprezar nenhuma combinação para o cálculo dos restantes parâmetros.

$$r_{cr} = \sqrt{\frac{V}{c T_r}} = \sqrt{\frac{17\ 156}{344,9 \cdot 3,5}} = 3,8 \text{ [m]} \quad (6.2)$$

6.2.3 Tempo de decaimento inicial

Como já foi referido na secção 3.4.2, o tempo de decaimento inicial é um índice semelhante ao T_r , mas que considera apenas os primeiros 10dB de decaimento da curva, sendo relacionado mais com a percepção do ouvinte do que com as propriedades físicas da sala. (Barbo, 2009)

Segundo Cirillo and Martellotta (2006), num espaço difuso ideal e onde o decaimento é linear, o EDT e o T_r podem ser iguais na prática, porém, a primeira parte do decaimento é fortemente influenciada pelas reflexões iniciais e, por consequência, o EDT é muito mais sensível às posições relativas e distância entre fontes e ouvintes.

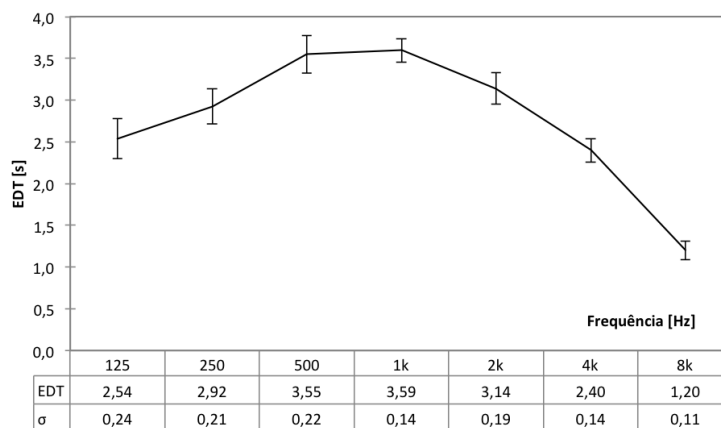


Figura 6.3: Tempo de decaimento inicial médio medido nas várias posições fonte/receptor e respectivo desvio padrão para cada banda de oitava

Bottazzini (2007) defende que quando o EDT possui um valor menor que o T_r , a sensação de reverberação é diminuída, e a situação contrária, ou seja, quando o EDT é maior que o T_r , aumenta a sensação de reverberação. Essas características influenciam no conceito de qualidade acústica do ambiente. A maior presença de superfícies reflectoras aumenta o EDT , e por consequência, aumenta

6.2. Parâmetros Acústicos

a sensação de reverberação sentida pelo ouvinte.

O valor médio de EDT obtido nas médias frequências ($500 - 1k\ Hz$) foi de $3,6\ s$. O grau de dispersão dos valores, por gama de frequência (figura 6.3), é relativamente baixo, existindo maior variação na banda de frequência de $500\ Hz$ ($\sigma = 0,22\ s$) do que para a de $1k\ Hz$ ($\sigma = 0,14\ s$). É de notar que a dispersão torna-se menos significativa nas altas frequências.

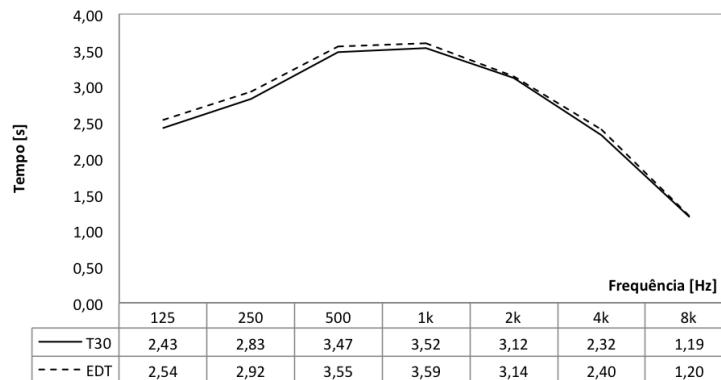


Figura 6.4: Comparação dos parâmetros tempo de reverberação e tempo de decaimento inicial

No gráfico da figura 6.4 faz-se uma análise comparativa dos resultados obtidos de T_r e EDT para as bandas de frequência em estudo, e verifica-se que ambos são bastante próximos mas que o T_r é sempre inferior ao EDT , sendo que a diferença máxima entre ambos é de 4% e acontece nas baixas frequências ($125\ Hz$).

6.2.4 Definição

A *definição*, D_{50} , é um parâmetro acústico baseado na quantificação da energia das reflexões que atingem o receptor até $50\ ms$ depois da chegada do som directo (Patrício, 2010). Normalmente, estas são consideradas como reflexões benéficas porque dão suporte ao som directo e contribuem para a audibilidade do som sem apresentar prejuízos em sua qualidade (Granado Junior, 2002). É calculada a partir da resposta impulsiva e seu resultado toma valores entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo é da unidade, melhor é a definição de um discurso de um determinado ambiente (Barbo, 2009), o que, sem dúvida, melhora a compreensão das palavras.

A média dos valores de D_{50} medidos para a banda de frequências de $500\ Hz$ é $0,22$ ($\sigma = 0,06$). O grau de dispersão dos valores por gama de frequência (figura 6.5) é relativamente alto, verificando-se uma certa heterogeneidade nos resultados obtidos para as várias combinações fonte/receptor. Estes resultados devem-se ao facto de existir uma correlação entre o parâmetro D_{50} e a distância entre o receptor e a

Capítulo 6. Análise de Resultados

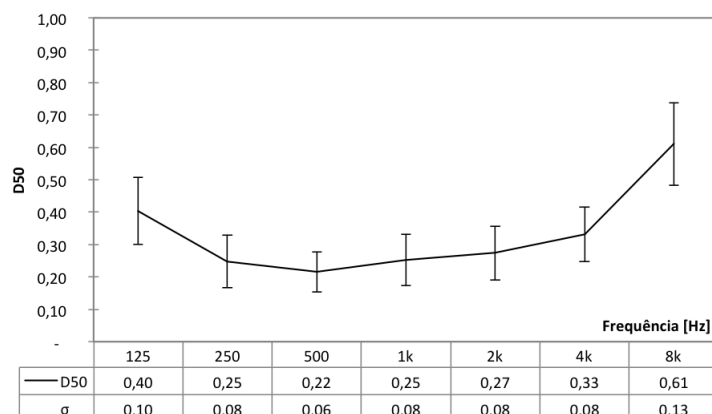


Figura 6.5: *Definição* média medida nas várias posições fonte/receptor e respectivo desvio padrão para cada banda de oitava

fonte, e é notória a diminuição do mesmo com o aumento da distância, sendo que a relação entre os dois factores pode ser adequadamente descrita por uma função logarítmica (figura 6.6).

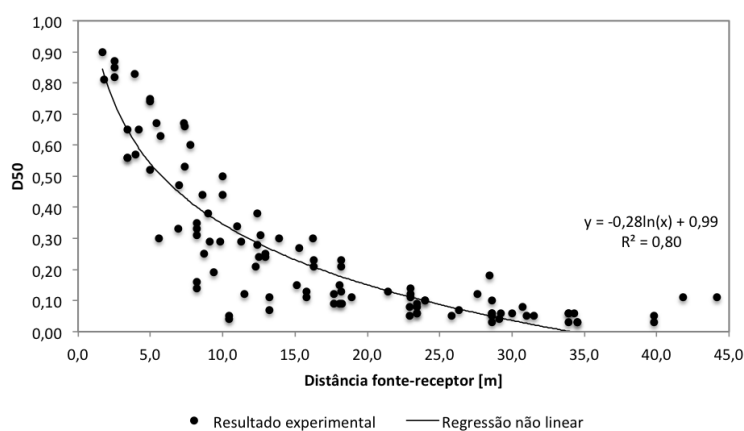


Figura 6.6: Variação do parâmetro D_{50} com a distância

É de salientar a importância de uma análise comparativa aos valores de *definição* médios obtidos quando a fonte sonora se encontra nas posições típicas de emissão de discurso (figura 6.7) para. Observa-se que as fontes representadas por F04 (púlpito) e F06 (congregação) são aquelas que apresentam melhores resultados de D_{50} , obtendo-se 0,23 e 0,32, respectivamente.

Após o Concílio do Vaticano II e com o objectivo de fomentar a união entre os fiéis, tornou-se comum a construção de um altar separado da parede para que a celebração da eucaristia se fizesse na forma *versus populum* (virado para o povo) usando a língua vernácula. Assim, a emissão do discurso passou a fazer-se na posição F02 em vez da F01.

6.2. Parâmetros Acústicos

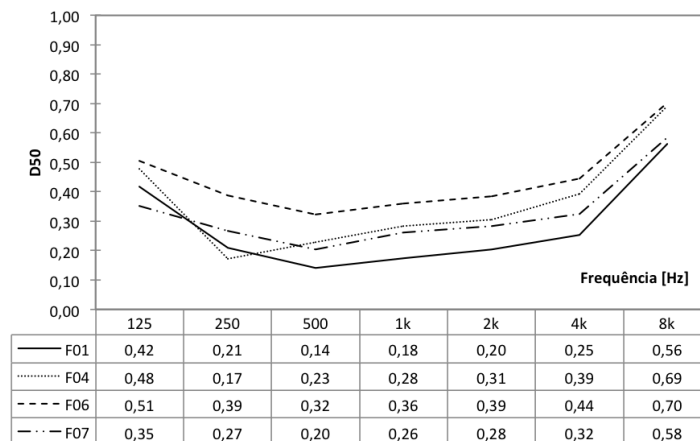


Figura 6.7: Comparação dos índices de *Clareza* medidos nas 3 posições representativas da emissão de discurso

Quando o parâmetro D_{50} é analisado comparando os valores obtidos quando a fonte se encontra na posição do Sacerdote anterior ($F01$) e posteriormente às modificações decorrentes ($F02$) do Concílio do Vaticano II (1964), figura 6.8 verifica-se, para todas as bandas de frequência compreendidas entre 125 e 8 kHz , uma clara melhoria da *definição*, e portanto um incremento da qualidade sonora sentida pelos ouvintes após o *CV – II*

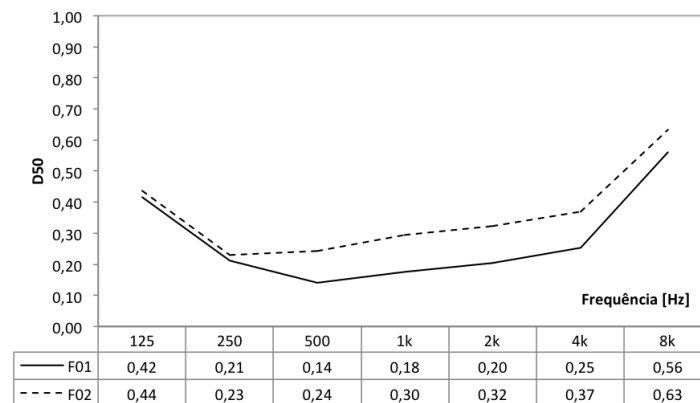


Figura 6.8: Comparação entre os valores médios de D_{50} medidos nas posições do sacerdote pré e pós *CV – II*

6.2.5 Clareza

A *clareza* é um parâmetro que define a inteligibilidade das notas musicais e está relacionado com o equilíbrio entre a clareza percebida e a reverberação, a qual pode ser particularmente delicada para

Capítulo 6. Análise de Resultados

a audição de música. Este critério é de extrema importância para caracterizar acusticamente espaços onde se realizem espectáculos musicais e também se processe a emissão de palavra. Segundo Bottazzini (2007), a *clareza* é largamente influenciada pela forma e pelos materiais da envolvente, mas não pelo volume do espaço. A distância fonte/receptor é também um parâmetro de suma importância na determinação deste parâmetro.

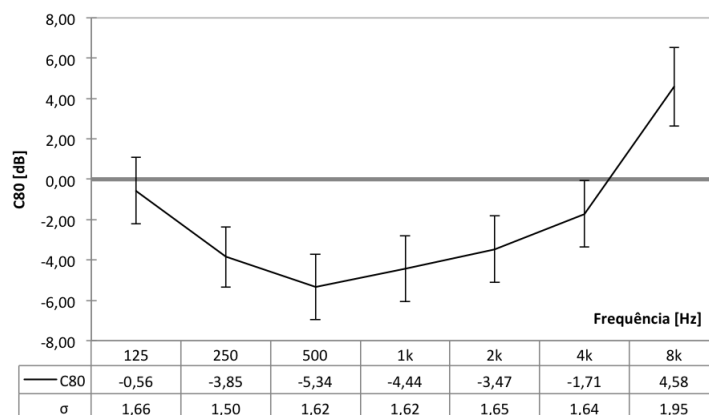


Figura 6.9: *Clareza* média medida nas várias posições fonte/receptor e respectivo desvio padrão para cada banda de oitava

É de salientar que que ainda não há um estudo preciso que defina o melhor valor que este parâmetro acústico deve tomar. Sabe-se porém, que cada estilo musical admite variações neste índice, mediante as articulações das notas musicais pertinentes a cada um. Beranek (2004) define uma faixa de valores óptimos para o parâmetro *clareza* entre -2 dB e 2 dB . Sendo estes valores perfeitamente aceitáveis entre -4 dB e 4 dB .

A média dos valores de C_{80} medidos para a banda de frequências de 1 kHz é $4,4\text{ dB}$ ($\sigma = 1,62\text{ dB}$), encontrando-se fora do intervalo considerado adequado, mas relativamente próximo do limite inferior do mesmo. O grau de dispersão dos valores por gama de frequência (figura 6.9) é relativamente alto, verificando-se uma certa heterogeneidade nos resultados obtidos para as várias combinações fonte/receptor. Esta variação de resultados pode ser explicada pelo facto de cada combinação fonte/receptor ser caracterizada pela distância entre estes dois pontos, e esse mesmo intervalo variar de forma não linear para as diferentes combinações. Quando se analisa a correlação entre o parâmetro C_{80} e a distância entre o receptor e a fonte, é notória a diminuição do mesmo com o aumento da distância, sendo que a relação entre eles pode ser adequadamente descrita por uma função logarítmica (figura 6.10).

Quando se faz uma comparação entre os valores médios de C_{80} obtidos para as várias posições

6.2. Parâmetros Acústicos

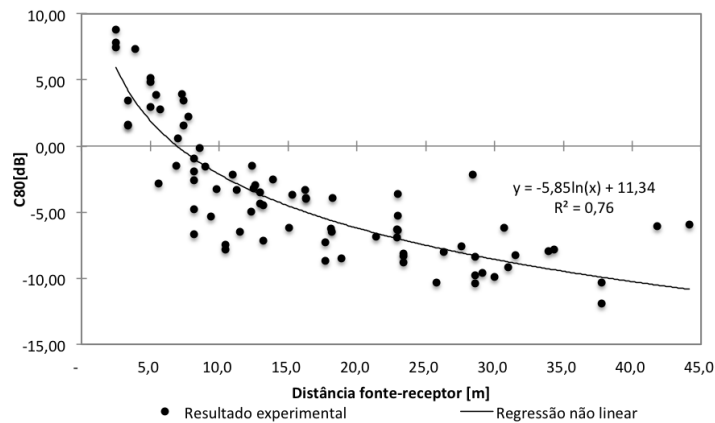


Figura 6.10: Variação do parâmetro C_{80} com a distância

representativas da emissão de música (figura 6.11), observa-se que os pontos representados por $F05$ (sob a cúpula) e $F06$ (congregação) são aqueles que apresentam valores mais adequados de C_{80} , embora os resultados obtidos na posição destinada ao órgão e coro ($F03$) se aproximem do intervalo considerado adequado.

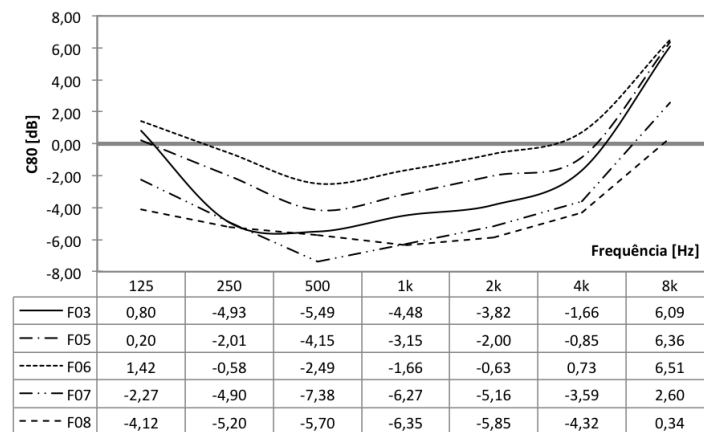


Figura 6.11: Comparação dos índices de *Clareza* medidos nas 3 posições destinadas emissão de música

6.2.6 Inteligibilidade

O índice de transmissão da fala é o critério utilizado para caracterizar a percepção da palavra, sendo que a mesma, para ser inteligível, deve ser entendida com o mínimo de deformação possível.

O *STI* é um parâmetro adimensional independente da frequência que toma valores entre 0 e 1, e quanto mais próximo o seu valor é da unidade, melhor é a inteligibilidade da palavra falada.

Capítulo 6. Análise de Resultados

Na tabela 6.3 encontram-se os resultados de *STI* obtidos para cada combinação fonte/receptor. Encontram-se classificados segundo uma escala de cor, tanto mais escura quanto melhor é o resultado.

Tabela 6.3: *STI* para todas as combinações fonte/receptor

STI	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08
R01	0,56	0,87	0,74	0,59	0,50	0,43	0,36	0,37
R02	0,75	0,61	0,69	0,59	0,41	0,36	0,29	0,35
R03	0,36	0,44	0,44	0,40	0,50	0,39	0,26	0,30
R04	0,40	0,48	0,46	0,53	0,51	0,39	0,26	0,29
R05	0,37	0,50	0,44	0,54	0,67	0,76	0,40	0,38
R06	0,35	0,49	0,44	0,53	0,66	0,82	0,38	0,37
R07	0,37	0,46	0,41	0,52	0,56	0,76	0,43	0,39
R08	0,34	0,40	0,37	0,46	0,45	0,54	0,43	0,39
R09	0,29	0,40	0,36	0,40	0,44	0,60	0,46	0,36
R10	0,30	0,33	0,32	0,39	0,39	0,46	0,74	0,40
R11	0,30	0,29	0,30	0,34	0,36	0,35	0,53	0,39
R12	0,27	0,32	0,30	0,32	0,36	0,38	0,51	0,38
R13	0,30	0,31	0,33	0,34	0,34	0,36	0,38	0,42
R14	0,28	0,33	0,32	0,32	0,35	0,36	0,43	0,40

Da avaliação do *índice de transmissão da fala*, tabela 6.3, resulta o valor médio de 0,43, podendo então classificar-se, segundo a escala subjectiva de inteligibilidade da palavra normalizada (tabela 3.1), como *inteligibilidade pobre*.

O índice de inteligibilidade é inversamente proporcional ao aumento da distância existente entre a fonte e o receptor, sendo que esta relação é adequadamente descrita por uma função logarítmica, tal como se pode observar no gráfico da figura 6.12. O grau de dispersão dos valores de *STI* em relação à curva é baixo, verificando-se um coeficiente de correlação de 0,83, o que significa que a função logarítmica é representativa das condições existentes na igreja e é aceitável a estimação do *índice de transmissão do discurso* para qualquer ponto da mesma.

6.2.7 Perda de articulação de consoantes, %*ALC*

A *percentagem de perda de articulação das consoantes* resulta da aplicação da equação de Farrell Becker ao *índice de transmissão da fala*. Como já foi referido na secção 3.4.8, esta fórmula trata-se de uma aproximação que demonstra uma notável proximidade com resultados empíricos obtidos por Houtgast et al. (1980). A %*ALC* é inversamente proporcional ao *STI* e pode tomar valores entre 0 e 100, correspondendo, respectivamente, a uma *excelente inteligibilidade* e *inteligibilidade nula do discurso*.

Na tabela 6.4 encontram-se os resultados de %*ALC* obtidos para cada combinação fonte/receptor. Estão classificados segundo uma escala de cor, tanto mais escura quanto mais favorável é o resultado.

Da avaliação da *perda de articulação de consoantes* da tabela 6.4, resultou o valor médio de 19,8%, podendo classificar-se, segundo a escala subjectiva de inteligibilidade da palavra normalizada

6.2. Parâmetros Acústicos

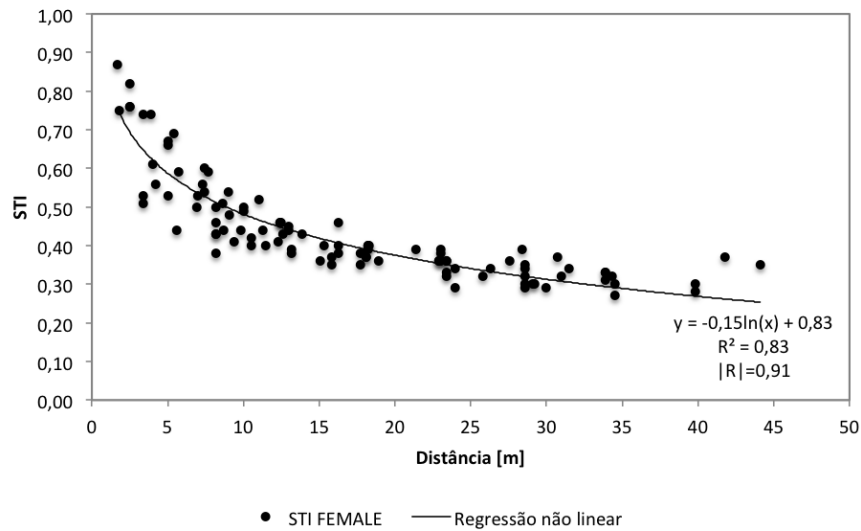


Figura 6.12: Índice de inteligibilidade da voz em função da distância entre a fonte e o receptor

Tabela 6.4: %ALC para todas as combinações fonte/receptor

%ALC	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08
R01	8,2	1,5	3,1	7,0	11,4	16,6	24,2	23,0
R02	2,9	6,3	4,1	7,0	18,5	24,2	35,4	25,6
R03	24,2	15,7	15,7	19,5	11,4	20,6	41,7	33,6
R04	19,5	12,7	14,1	9,6	10,8	20,6	41,7	35,4
R05	23,0	11,4	15,7	9,1	4,5	2,8	19,5	21,8
R06	25,6	12,0	15,7	9,6	4,8	2,0	21,8	23,0
R07	23,0	14,1	18,5	10,2	8,2	2,8	16,6	20,6
R08	27,0	19,5	23,0	14,1	14,9	9,1	16,6	20,6
R09	35,4	19,5	24,2	19,5	15,7	6,6	14,1	24,2
R10	33,6	28,5	30,1	20,6	20,6	14,1	3,1	19,5
R11	33,6	35,4	33,6	27,0	24,2	25,6	9,6	20,6
R12	39,5	30,1	33,6	30,1	24,2	21,8	10,8	21,8
R13	33,6	31,8	28,5	27,0	27,0	24,2	21,8	17,5
R14	37,4	28,5	30,1	30,1	25,6	24,2	16,6	19,5

Capítulo 6. Análise de Resultados

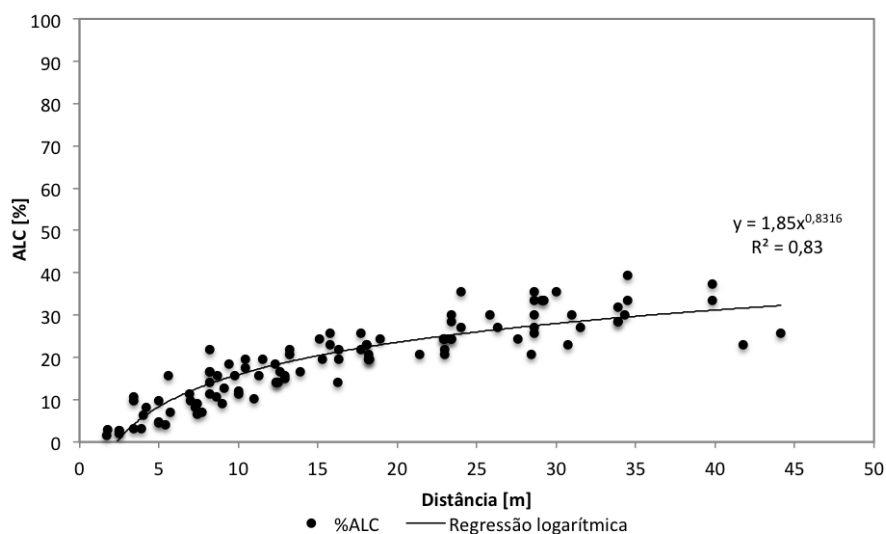


Figura 6.13: Perda de articulação das consoantes em função da distância entre a fonte e o receptor

(tabela 3.1), como *inteligibilidade pobre*.

Como resultado da análise da correlação existente entre o parâmetro %ALC e a distância entre o receptor e a fonte, figura 6.13, é notório o aumento do mesmo com o aumento da distância, sendo que a relação entre eles pode ser adequadamente descrita por uma função logarítmica. O grau de dispersão dos valores de %ALC em relação à curva é baixo (coeficiente de correlação de 0,83), o que significa que a função logarítmica é representativa das condições existentes na igreja e é aceitável a estimação das %ALC para qualquer ponto no interior da mesma.

6.3 Comparação com outros casos de estudo com volumetria da mesma ordem de grandeza

Com base nos parâmetros descritos no capítulo 3 e os resultados referidos na secção 6.2, pretende-se avaliar as semelhanças e diferenças existentes entre os resultados do caso de estudo e os de outras igrejas portuguesas com volumetria da mesma ordem de grandeza.

Em comparação com outras igrejas portuguesas de volume semelhante, a Catedral apresenta resultados bastante favoráveis.

Em relação ao *tempo de reverberação* (figura 6.14) e *tempo de atraso inicial* (figura 6.15), só a Igreja de S. Francisco no Porto é que tem comportamento mais favorável (1,8 s) e mais adequado para a prática de discurso, aproximando-se do valor ideal mencionado por Beranek and Vér (2006).

Quanto ao parâmetro *clareza*, figura 6.16, tanto a Igreja de S. Francisco como a Igreja de S.

6.3. Comparação com outros casos de estudo com volumetria da mesma ordem de grandeza

Tabela 6.5: Comparação entre estudos de várias igrejas de volumetria da mesma ordem de grandeza

Igreja	Volume [m ³]	T_r [s]	EDT [s]	C_{80} [dB]	D_{50}	T_s [m.s]
Lapa (Porto)	11 423	5,7	5,6	- 7,6	0,12	428
Serra do Pilar (V,N,Gaia)	11 566	7,8	7,7	- 8,2	0,10	574
S, Francisco (Porto)	12 045	1,8	1,8	- 1,0	0,27	137
Sé (Lamego)	13 424	4,6	4,0	- 5,4	0,15	291
S, Roque (Lisboa)	14 207	3,8	3,7	- 4,6	0,15	264
Sé (Porto)	15 260	3,6	3,5	- 6,9	0,08	283
Catedral (Campinas)	17 156	3,5	3,6	- 4,9	0,23	268
S, Francisco (Évora)	18 631	5,0	4,9	- 6,5	0,17	344
Basílica da Estrela (Lisboa)	18 674	8,1	8,1	- 10,0	0,09	577

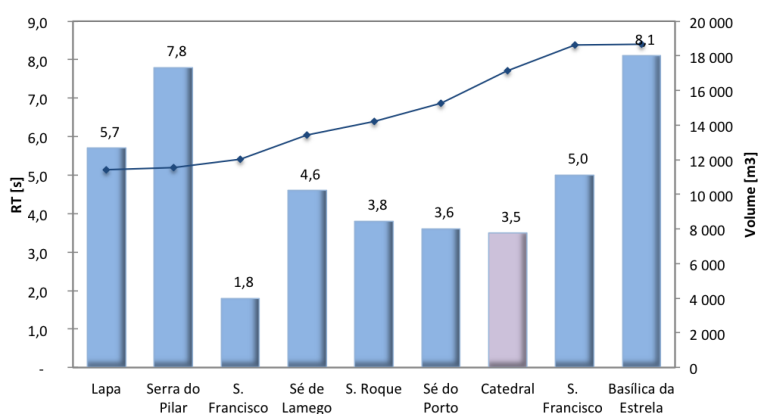


Figura 6.14: Comparação do tempo de reverberação medido em várias igrejas

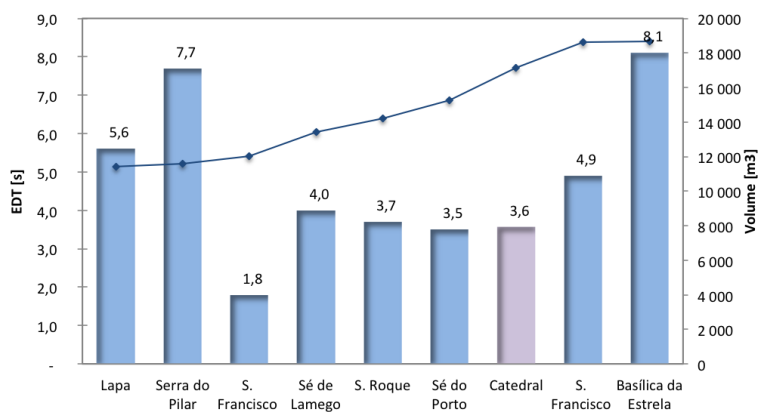


Figura 6.15: Comparação do tempo atraso inicial medido em várias igrejas

Capítulo 6. Análise de Resultados

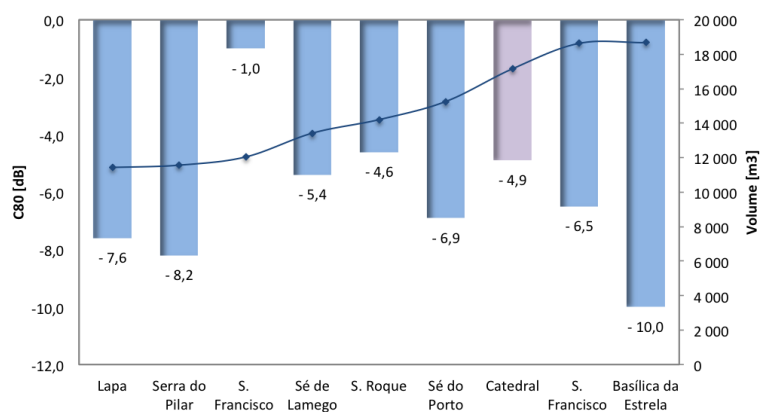


Figura 6.16: Comparação dos valores de *Clareza* medidos em várias igrejas

Roque são mais adequadas para a prática de ações relacionadas com as práticas musicais tendo, respectivamente, $C_{80} = -1,0 \text{ dB}$ e $C_{80} = -4,6 \text{ dB}$, valores mais próximos do que é recomendado por Beranek (2004)

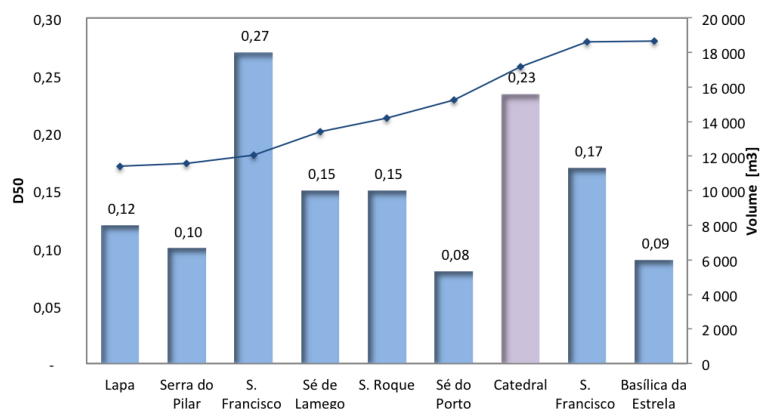


Figura 6.17: Comparação dos valores de *Definição* medidos em várias igrejas

Relativamente à *definição do discurso*, figura 6.17, e como seria de esperar devido ao facto de apresentar $T_r = 1,8 \text{ s}$, a Igreja de S. Francisco continua a apresentar um melhor comportamento ($D_{50} = 0,27$).

7

Conclusões e Desenvolvimentos futuros

Este estudo tinha como principal objectivo, caracterizar acusticamente, através de parâmetros objectivos, o interior da Catedral Metropolitana de Campinas. Pretendia-se ensaiar *in situ* este espaço com vista à determinação de parâmetros acústicos previamente definidos. Estes parâmetros foram escolhidos por serem vitais para caracterizar objectivamente o interior da igreja.

7.1 Conclusões

Os parâmetros acústicos escolhidos para análise no presente trabalho foram o tempo de reverberação, T_r , o tempo de decaimento inicial, EDT , a definição, D_{50} , clareza, C_{80} e índice de transmissão da fala, STI . Foi também medido o ruído de fundo. Além da caracterização, o estudo teve também como objectivo a comparar dos resultados obtidos com os de outros estudos relativos a igrejas de volumetria semelhante.

Os resultados obtidos encontram-se sintetizados no quadro 7.2, que serve como resumo dos ensaios efectuados ao longo desta pesquisa.

Os resultados obtidos podem ser interpretados de forma subjectiva, como se apresenta na tabela 7.2.

Capítulo 7. Conclusões e Desenvolvimentos futuros

Tabela 7.1: Quadro resumo dos resultados obtidos

Parâmetro acústico	Valor
Tempo de reverberação	[s] 3,5
Tempo de decaimento inicial	[s] 3,6
Definição	0,23
Índice de transmissão da fala	0,43
Clareza	[dB] -4,9
Perda de articulação de consoantes	[%] 19,8
Ruído de fundo medido no interior devido a ambiente exterior (média 500-1k Hz)	[dB] 34,3
Temperatura média	[°C] 23,0

Relativamente ao parâmetro *tempo de reverberação*, T_r , obteve-se o valor de 3,5 s. Na perspectiva da percepção da palavra, considera-se que a igreja apresenta um comportamento muito insatisfatório, enquanto que para a música o seu comportamento é razoável.

Da avaliação do *índice de transmissão da fala* resultou o valor de 0,43 e da *perda de articulação de consoantes* o valor de 19,8%, podendo então classificar-se, segundo a escala subjectiva de inteligibilidade da palavra normalizada, como *inteligibilidade pobre*

Tabela 7.2: Quadro resumo dos resultados obtidos

Parâmetro acústico	Qualidade acústica subjectiva
Tempo de reverberação:	
Para o discurso	Mau
Para a música	Suficiente
Clareza para a prática de música	Suficiente
Inteligibilidade da palavra	Pobre
Ruído de fundo medido no interior devido a ambiente exterior (média 500-1k Hz)	Bom

Relativamente ao *ruído de fundo*, a Catedral Metropolitana de Campinas apresenta bons resultados, que favorecem a boa qualidade acústica do edifício.

Analisando o panorama de resultados, pode classificar-se a Catedral de Campinas como tendo um comportamento acústico *razoável/suficiente*

Em comparação com outras igrejas portuguesas de volume semelhante (secção 6.3), a Catedral apresenta resultados bastante favoráveis. Em relação ao *tempo de reverberação* e *tempo de atraso inicial*, só a Igreja de S. Francisco no Porto é que tem comportamento mais favorável (1,8 s). Quanto ao parâmetro *clareza*, tanto a Igreja de S. Francisco como a Igreja de S. Roque são mais adequadas para a prática de acções relacionadas com as práticas musicais tendo, respectivamente, $C_{80} = 1,0$ dB e

7.2. Pistas para desenvolvimentos futuros

$C_{80} = -4,6 \text{ dB}$. Relativamente à *definição do discurso*, e como seria de esperar, a Igreja de S. Francisco continua a apresentar um melhor comportamento ($D_{50} = 0,27$).

7.2 Pistas para desenvolvimentos futuros

A realização deste trabalho teve como principal objectivo a caracterização da qualidade acústica da Catedral Metropolitana de Campinas.

Entende-se ser necessário um aprofundamento na investigação do índice de transmissão da fala, fazendo-se a comparação com testes subjectivos de inteligibilidade de palavras, com a aplicação de questionários com uso de uma lista de palavras em português para se obter uma avaliação mais fiel e real do ambiente.

De modo a permitir uma melhor análise estatística sobre o efeito da presença de pessoas no interior da igreja, considera-se que este tipo de estudo com a igreja ocupada, poderá em trabalhos futuros, ser tido em consideração.

Capítulo 7. Conclusões e Desenvolvimentos futuros

Bibliografia

- Almeida, M., Silva, S., and Ferreira, T. (2005). *Acústica Ambiental e de Edifícios*. Universidade do Minho - Escola de Engenharia, Minho.
- Amorim, A. (2007). Formas geométricas e qualidade acústica de salas de aula: estudo de caso em campinas-são paulo. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas - SP.
- Ando, Y. (1998). *Architectural Acoustics - Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. Modern Acoustics and Signal Processing. Springer - Verlag New York, Inc.
- Arana, M. (2011). Predictions vs measurements in room acoustics: A difficult adjustment. In *Predictions vs Measurements in room acoustics: A difficult adjustment*. International Seminar on Virtual Acoustics - Valência.
- Barbo, M. N. (2009). Avaliação acústica de um templo católico de grandes dimensões submetido à excitação impulsiva. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Maria - Centro de Tecnologia, Santa Maria - RS.
- Bastos, L. R. (2010). Qualidade acústica de auditórios. Master's thesis, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Beranek, L. L. (1993). *Acoustics*. Acoustical Society of America, New York, N.Y.
- Beranek, L. L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture*. Verlag Dashofer, New York, N.Y., 2 edition.
- Beranek, L. L. and Vér, I. L., editors (2006). *Noise and Vibration Control Engineering - Principals and applications*. John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, second edition.
- Berardi, U., Cirillo, E., and Martellotta, F. (2009). A comparative analysis of acoustic energy models for churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(4).
- Berkhout, D. J. and Boone, M. M. (1980). A new method to acquire impulse responses in concert halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68(1):179–183.

Bibliografia

- Bertoli, S. R. and de Avelar Gomes, M. H. (2005). *Técnicas de Medição para Acústica de Salas - Apostila da disciplina Acústica III - Aprofundamento*. Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Campinas - SP.
- Bottazzini, M. C. (2007). *Igrejas setecentistas mineiras: a influência das características arquitetônicas na qualidade acústica*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Civil, Campinas - SP.
- Brabham, M. (1928). *Planning modern church buildings*. Cokesbury press.
- BrasilAzul (2012). Brasil azul - <http://www.brasilazul.com.br/cartografia.asp>, consultado em: 2012-08-01.
- Brüel and Kjær, editors (2003a). *Application Note - Measuring Speech Intelligibility Using DIRAC - Type 7841*, chapter Application Note. Brüel and Kjær Sound and Vibration Measurement.
- Brüel and Kjær, editors (2003b). *DIRAC Room Acoustics Manual*. Brüel and Kjær Sound and Vibration Measurement, 3.1 edition.
- CAEF (2010). *Princípios de Acústica Musical*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Carvalho, A. P. O. (1994). *Influence of architectural features and styles on various acoustical measures in churches*. PhD thesis, University of Florida, Florida.
- Cirillo, E. and Martellotta, F. (2005). Sound propagation and energy relations in churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(1):232–248.
- Cirillo, E. and Martellotta, F. (2006). *Worship, acoustics, and architecture*. Multi-Science Publishing Co.
- Encyclopaedia Britannica (1994). Amplitude: sound waves - <http://www.britannica.com/ebchecked/media/3536/graphic-representations-of-a-sound-wave>, consultado em: 2012-04-10.
- Everest, F. A. and Pohlmann, K. C. (2009). *Master Handbook of Acoustics*. Mc Graw Hill, New York, N.Y., fifth edition.
- Farina, A. (1986). *La Caratterizzazione Acustica Delle Sale Da Spettacolo Con Particolare Attenzione Alle Esigenze Di Ascolto Della Musica Sinfonica*. PhD thesis, Università di Bologna - Facoltà di Ingegneria, Bologna.

Bibliografia

- Farina, A. (2000). Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *Audio Engineering Society Convention 108*, volume 48, page 350.
- Farina, A. (2001). L'acustica dei piccoli ambienti di ascolto. In *Seminario Top Audio 2001*. Audio Engineering Society Italian Section.
- Fearn, R. W. (1975). Reverberation in spanish, english, and french churches. *Journal of Sound and Vibrating*, 43(3):562–567.
- Fitzroy, D. (1973). The sounds of st. mary's. *Journal of the Acoustical Society of America*, 54(2):349–352.
- Galindo, M., Zamarreño, T., and Girón, S. (2005). Acoustic analysis in mudejar-gothic churches: Experimental results. *Journal of the Acoustical Society of America*, 117(5):17.
- Girardi, L. D. (2010). Condicionamento acústico para a igreja católica do bairro século xx. Technical report, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.
- GlossárioCatólico (2011). Glossário católico - <http://www.lisboa-cidade.com/lx/paginas/ptglossario.htm>, consultado em: 2012-09-16.
- Granado Junior, M. V. (2002). *Acústica arquitetônica: subsídios para projetos de salas para palavra falada (Teatro de Palco Italiano)*. PhD thesis, Universidade de São Paulo - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, São Paulo.
- Hammad, R. (1990). Rasti measurements in mosques in amman, jordan. *Applied Acoustics*, 30(4):335–345.
- Houtgast, T. and Steeneken, H. J. M. (1971). Evaluation of speech transmission channels by using artificial signals. *Acustica*, 25:355–367.
- Houtgast, T. and Steeneken, H. J. M. (1980). A physical method for measuring speech-transmission quality. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67:318–326.
- Houtgast, T., Steeneken, H. J. M., and Plomp, R. (1980). Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. *Acustica*, 46:60–72.
- HowStuffWorks (2007). How stuff works - <http://ciencia.hsw.uol.com.br/holograma3.htm>, consultado em: 2012-08-05.
- ISO-3382, editor (1997). *ISO 3382 - Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*. International Organization of Standardization.

Bibliografia

- LabCon (2002). Labcon - laboratório de conforto ambiental - universidade federal de santa catarina - faculdade de arquitetura e urbanismo - http://www.arq.ufsc.br/labcon/arq5661/trabalhos_2002-1/acustica_arquitetonica/, consultado em: 2012-09-15.
- Leishman, T. W. and Smith, H. (2004). Numerical evaluation of the omnidirectional behavior of regular polyhedron loudspeakers. *Journal of the Acoustical Society of America*.
- Leite, R. (2004). *Catedral Metropolitana de Campinas, Um templo e sua história*. Komedi.
- Lencastre, M. (1988). A inteligibilidade da palavra em igrejas católicas, através de análises de carácter objectivo e subjectivo. Master's thesis, Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia.
- Lewers, T. and Anderson, J. (1983). Some acoustical properties of st paul's cathedral, london. *Journal of Sound and Vibrating*, 92(2):285–297.
- Lopes, R. K. (2010). Relações e influência da aplicação da acústica no processo de projeto de arquitetura contemporânea. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Civil, Campinas - SP.
- Lopez, M. R. and Gonzalez, C. G. (1987). Experimental study of the acoustics in the church of the monastery of "santo domingo de silos". *Acta Acustica united with Acustica*, 62(3):241–248.
- Marshall, H. A., Day, C. W., and Elliott, L. J. (1987). The acoustical design of a 4000-seat church. *Journal of the Audio Engineering Society*, 35(11):897–906.
- Martellotta, F. (2008). Subjective study of preferred listening conditions in italian catholic churches. *Journal of Sound and Vibrating*.
- Martellotta, F. (2009). A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(3).
- Martellotta, F. (2010). The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 128(2):11.
- Martellotta, F. and Cirillo, E. (2008). Experimental studies of sound absorption by church pews. *Applied Acoustics*.
- Martellotta, F., Cirillo, E., Carbonari, A., and Ricciardi, P. (2008). Guidelines for acoustical measurements in churches. *Applied Acoustics*, page 11.

Bibliografia

- Martins, C. F. (2010). Caracterização acústica das duas igrejas de santo ovídio, mafamude. Master's thesis, Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto.
- Masiero, B. S. (2004). Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva em salas de pequeno porte. Technical report, Laboratório de Acústica Musical e Informática, São Paulo.
- Mattos, O. N. (2004). *Arquidiocese de Campinas: Subsídios para a sua História*. Komedi.
- Mersenne, M. (1636). *Harmonie Universelle*. Sebastien Cramoisy, Paris.
- Morfey, C. (2000). *The dictionary of acoustics*. Academic Press, U.K., 1 edition.
- Muller, S. and Massarani, P. (2002). Medições da resposta em frequência de sistemas de seonorização. Technical report, LAENA - INMETRO, Rio de Janeiro - Brasil.
- Parkin, P. H. and Taylor, P. (1952). Speech re-inforcement in st. paul's cathedral, london. *Nature*, 169(4293):214–215.
- Patrício, J. (2010). *Acústica nos edifícios*. Verlag Dashofer, 6 edition.
- Patterson, W. (1875). *A manual of Architecture: for Churches, Parsonages and School-houses*. House of the Methodist Episcopal Church.
- Pereira, R. (2010a). Caracterização acústica de salas. Master's thesis, Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Porto.
- Pereira, R. (2010b). Painel histórico de campinas - <http://painelrondin.blogspot.pt/> - consultado em: 2011-12-28.
- Raes, A. C. and Sacerdote, G. G. (1953). Measurements of the acoustical properties of two roman basilicas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 25(5):954–961.
- Rocha, L. Z. (2004). Estudo e análise da acústica de ambientes submetidos a sistemas de áudio. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Rossing, T. D., editor (2007). *Springer handbook of acoustics*. Springer, New York, N.Y.
- Sant'Ana, D. Q. and Zannin, P. H. T. (2010). Acoustic evaluation of a contemporary church based on in situ measurements of reverberation time, definition, and computer-predicted speech transmission index. *Building and Environment*, 46:7.
- Sartore, D. and Triacca, A. M. (1987). *Nuevo Diccionario de Liturgia*. Ediciones Paulinas, Madrid, ii edition.

Bibliografia

- Shankland, R. S. and Shankland, H. K. (1971). Acoustics of st. peter's and patriarchal basilicas in rome. *Journal of the Acoustical Society of America*, 50(2A):389–396.
- Silva, P. T. (1999). Mersenne e a teoria da vibração das cordas. *Cadernos Espinosanos V*, pages 65–96.
- Silva, T. L. (2008). Guião da acústica de igrejas em portugal. Master's thesis, Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto.
- Soeta, Y., Ito, K., Shimokura, R., ichi Sato, S., Ohsawa, T., and Ando, Y. (2012). Effects of sound source location and direction on acoustic parameters in japanese churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2):1206–1220.
- Tzekakis, E. G. (1975). Reverberation time of the rotunda of thessaloniki. *Journal of the Acoustical Society of America*, 57(5):1207–1209.
- Wikipédia (2012a). Christopher wren - http://pt.wikipedia.org/wiki/christopher_wren, consultado em: 2012-04-30.
- Wikipédia (2012b). Grande incêndio de londres - http://pt.wikipedia.org/wiki/grande_incem: 2012-04-30.
- Zamarreño, T., Girón, S., and Galindo, M. (2007). Acoustic energy relations in mudejar-gothic churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121(1):234–250.
- Zamarreño, T., Girón, S., and Galindo, M. (2008). Assessing the intelligibility of speech and singing in mudejar-gothic churches. *Applied Acoustics*, 69:242–254.



A.1 Resultados numéricos dos parâmetros acústicos obtidos nas medições em todas as combinações fonte/receptor

A.1.1 Tempo de Reverberação

A.1.2 Tempo de atraso inicial, *EDT*

Apêndice A.

Tabela A.1: Tempo de reverberação medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F01

F01	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,10	2,57	3,04	3,22	2,80	1,99	1,10
R02	1,60	2,23	2,98	2,85	2,70	1,86	0,99
R03	2,80	2,69	3,40	3,39	2,97	2,18	1,15
R04	2,10	2,59	3,41	3,32	2,82	2,13	1,10
R05	2,60	2,67	3,46	3,52	3,12	2,22	1,14
R06	2,48	2,71	3,49	3,59	3,16	2,22	1,14
R07	2,43	3,05	3,76	3,68	3,13	2,37	1,18
R08	2,65	3,02	3,74	3,59	3,22	2,46	1,23
R09	2,47	2,73	3,59	3,65	3,27	2,41	1,24
R10	2,54	2,86	3,75	3,74	3,33	2,49	1,31
R11	2,40	3,16	3,67	3,70	3,27	2,53	1,36
R12	2,46	2,88	3,52	3,65	3,35	2,51	1,34
R13	2,52	3,05	3,83	3,64	3,31	2,52	1,36
R14	2,75	2,96	3,73	3,69	3,25	2,46	1,35
\overline{T}_{30}	2,42	2,80	3,53	3,52	3,12	2,31	1,21
σ	0,30	0,24	0,25	0,24	0,21	0,21	0,11

Tabela A.2: Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F02

F02	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	1,83	2,29	2,89	3,24	2,61	1,86	0,89
R02	1,97	2,85	2,98	3,23	2,82	2,12	1,06
R03	1,91	2,49	3,25	3,13	2,79	2,03	1,04
R04	2,51	2,75	3,42	3,24	2,78	1,96	1,04
R05	2,12	3,09	3,12	3,46	2,92	2,12	1,06
R06	2,35	2,63	3,64	3,60	3,12	2,22	1,07
R07	2,60	3,04	3,59	3,53	3,13	2,28	1,14
R08	2,32	2,87	3,61	3,57	3,28	2,43	1,23
R09	2,19	3,14	3,45	3,77	3,23	2,46	1,27
R10	2,69	2,96	3,57	3,62	3,28	2,47	1,29
R11	2,58	2,66	3,73	3,65	3,22	2,50	1,31
R12	2,52	3,06	3,69	3,63	3,18	2,47	1,33
R13	2,64	2,88	3,62	3,69	3,25	2,46	1,32
R14	2,69	3,14	3,64	3,70	3,33	2,52	1,29
\overline{T}_{30}	2,35	2,85	3,44	3,50	3,07	2,28	1,17
σ	0,29	0,25	0,26	0,20	0,23	0,22	0,13

A.1. Resultados numéricos dos parâmetros acústicos obtidos nas medições em todas as combinações fonte/receptor

Tabela A.3: Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F03

F03	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	1,85	2,45	3,19	3,04	2,73	2,02	1,05
R02	2,22	2,94	2,85	3,05	2,77	1,94	1,03
R03	1,88	2,85	3,28	3,04	2,79	2,01	1,06
R04	2,05	2,85	3,23	3,31	2,94	2,09	1,11
R05	2,25	2,99	3,54	3,48	3,01	2,20	1,09
R06	2,24	2,64	3,36	3,49	3,11	2,19	1,10
R07	2,45	2,70	3,57	3,51	3,18	2,31	1,17
R08	2,73	2,98	3,37	3,55	3,24	2,43	1,26
R09	2,76	3,05	3,41	3,56	3,24	2,45	1,25
R10	2,28	3,13	3,62	3,62	3,17	2,42	1,30
R11	2,62	3,15	3,28	3,78	3,26	2,50	1,35
R12	2,71	3,04	3,74	3,71	3,27	2,49	1,35
R13	2,47	3,29	3,55	3,75	3,24	2,48	1,36
R14	2,24	2,97	3,64	3,68	3,28	2,51	1,34
\overline{T}_{30}	2,34	2,93	3,40	3,47	3,09	2,29	1,20
σ	0,29	0,21	0,22	0,25	0,19	0,20	0,12

Tabela A.4: Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F04

F04	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	1,94	2,47	2,88	3,13	2,82	2,06	1,00
R02	1,92	2,78	3,10	3,35	2,92	2,03	1,05
R03	2,25	2,79	3,30	3,21	2,85	2,16	1,09
R04	1,58	2,21	2,86	2,92	2,63	1,81	0,96
R05	2,39	2,88	3,56	3,44	3,05	2,13	1,11
R06	2,37	2,80	3,56	3,48	3,06	2,21	1,08
R07	2,54	3,11	3,49	3,74	3,08	2,37	1,19
R08	2,61	3,05	3,57	3,76	3,25	2,42	1,25
R09	2,30	2,90	3,47	3,69	3,18	2,41	1,29
R10	2,46	3,26	3,23	3,68	3,21	2,39	1,32
R11	3,05	2,97	3,63	3,57	3,22	2,53	1,32
R12	2,71	3,02	3,97	3,57	3,22	2,52	1,30
R13	2,53	3,01	3,67	3,73	3,27	2,54	1,36
R14	3,02	2,95	3,74	3,55	3,27	2,50	1,32
\overline{T}_{30}	2,40	2,87	3,43	3,49	3,07	2,29	1,19
σ	0,39	0,26	0,31	0,25	0,19	0,22	0,13

Apêndice A.

Tabela A.5: Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F05

F05	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,58	2,46	3,40	3,30	2,89	2,17	0,97
R02	2,30	2,74	3,13	3,50	3,05	2,26	1,10
R03	2,37	2,79	3,28	3,19	2,89	2,04	0,95
R04	2,37	2,42	3,42	3,16	2,98	2,00	0,98
R05	2,31	2,71	3,40	3,60	3,02	2,20	1,03
R06	1,88	2,15	3,19	3,47	3,08	2,11	1,04
R07	2,47	2,80	3,52	3,53	3,08	2,36	1,12
R08	2,66	3,02	3,58	3,74	3,16	2,41	1,26
R09	2,39	3,13	3,44	3,61	3,22	2,38	1,27
R10	2,53	2,87	3,60	3,74	3,23	2,40	1,27
R11	2,74	3,11	3,50	3,47	3,30	2,43	1,30
R12	2,56	2,96	3,29	3,67	3,24	2,47	1,27
R13	2,53	2,79	3,54	3,62	3,20	2,41	1,31
R14	2,86	3,15	3,58	3,61	3,23	2,39	1,30
\overline{T}_{30}	2,47	2,79	3,42	3,51	3,11	2,29	1,15
σ	0,23	0,28	0,14	0,18	0,13	0,15	0,14

Tabela A.6: Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F06

F06	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,24	2,90	3,53	3,56	3,04	2,28	1,17
R02	2,06	2,71	3,59	3,68	3,05	2,33	1,08
R03	2,48	2,82	3,34	3,56	2,99	2,33	1,16
R04	2,54	2,44	3,35	3,55	3,24	2,38	1,16
R05	2,68	3,03	3,40	3,55	3,13	2,18	1,09
R06	2,63	2,86	3,50	3,49	3,02	2,14	1,04
R07	2,69	2,85	3,46	3,34	3,20	2,29	1,07
R08	2,46	2,91	3,62	3,58	3,18	2,36	1,19
R09	2,34	2,91	3,46	3,61	3,18	2,34	1,17
R10	2,80	2,87	3,53	3,57	3,19	2,42	1,18
R11	2,37	2,89	3,55	3,59	3,14	2,41	1,23
R12	2,37	2,84	3,54	3,53	3,26	2,41	1,19
R13	2,67	2,52	3,59	3,47	3,19	2,42	1,24
R14	2,93	2,45	3,66	3,62	3,25	2,34	1,24
\overline{T}_{30}	2,52	2,79	3,51	3,55	3,15	2,33	1,16
σ	0,23	0,18	0,09	0,08	0,09	0,08	0,06

A.1. Resultados numéricos dos parâmetros acústicos obtidos nas medições em todas as combinações fonte/receptor

Tabela A.7: Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F07

F07	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,40	2,92	3,68	3,76	3,18	2,50	1,32
R02	2,47	2,69	3,72	3,80	3,22	2,47	1,30
R03	2,28	2,84	3,79	3,66	3,26	2,53	1,34
R04	2,92	3,06	3,57	3,83	3,25	2,46	1,32
R05	2,47	2,79	3,59	3,81	3,32	2,43	1,23
R06	2,36	2,69	3,64	3,65	3,20	2,30	1,19
R07	2,53	2,46	3,36	3,45	3,18	2,40	1,20
R08	2,52	2,93	3,44	3,45	3,19	2,35	1,18
R09	2,68	2,61	3,71	3,57	3,10	2,30	1,13
R10	2,51	2,57	3,34	3,55	3,14	2,24	1,17
R11	2,28	3,01	3,11	3,58	3,10	2,27	1,14
R12	2,06	2,80	3,28	3,50	3,15	2,28	1,19
R13	2,53	2,62	3,29	3,53	3,05	2,32	1,21
R14	2,67	2,73	3,34	3,34	3,15	2,32	1,20
\overline{T}_{30}	2,48	2,77	3,49	3,61	3,18	2,37	1,22
σ	0,20	0,17	0,20	0,15	0,07	0,09	0,07

Tabela A.8: Tempo de reverberação medido nos receptores estando a fonte na posição F08

F08	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,63	2,83	3,77	3,73	3,16	2,51	1,28
R02	2,35	3,21	3,73	3,73	3,33	2,48	1,27
R03	2,21	3,06	3,79	3,74	3,19	2,47	1,34
R04	2,78	2,91	3,45	3,68	3,17	2,51	1,27
R05	2,30	3,03	3,55	3,28	3,12	2,38	1,20
R06	2,60	2,78	3,50	3,52	3,26	2,27	1,20
R07	2,33	2,47	3,56	3,49	3,18	2,38	1,18
R08	2,61	2,89	3,60	3,47	3,12	2,31	1,18
R09	2,41	2,69	3,52	3,52	3,09	2,31	1,19
R10	2,60	2,45	3,49	3,45	3,06	2,35	1,15
R11	2,25	2,81	3,41	3,53	3,18	2,32	1,19
R12	2,22	2,80	3,59	3,53	3,15	2,28	1,17
R13	2,31	2,82	3,53	3,52	3,13	2,31	1,16
R14	2,49	2,69	3,51	3,48	3,15	2,33	1,16
\overline{T}_{30}	2,43	2,82	3,57	3,55	3,16	2,37	1,21
σ	0,18	0,20	0,11	0,13	0,06	0,08	0,06

Apêndice A.

Tabela A.9: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F01

F01	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,63	2,73	3,05	2,87	2,79	2,16	0,87
R02	1,21	2,49	2,98	2,28	2,17	1,33	0,23
R03	1,42	2,74	3,48	3,28	3,03	2,16	1,28
R04	1,83	2,79	3,08	3,08	2,78	2,18	1,23
R05	2,26	3,60	3,44	3,72	3,16	2,42	1,46
R06	2,42	2,75	3,27	3,17	3,08	2,42	1,40
R07	2,58	2,75	3,86	3,70	3,39	2,33	1,42
R08	2,98	3,77	3,86	4,42	3,75	2,88	1,59
R09	2,14	4,12	4,22	4,43	3,49	2,82	1,61
R10	2,97	3,86	3,88	4,16	4,06	2,96	1,56
R11	3,57	3,12	4,22	4,11	4,20	3,07	1,76
R12	3,71	3,81	4,55	4,62	3,84	3,02	1,71
R13	2,77	3,64	3,95	4,60	4,01	3,08	1,57
R14	3,64	3,44	4,39	4,34	4,02	2,96	1,63
\overline{EDT}	2,44	3,26	3,73	3,77	3,41	2,56	1,38
σ	0,90	0,52	0,50	0,71	0,58	0,49	0,39

Tabela A.10: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F02

F02	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	1,73	2,56	2,96	1,86	0,29	0,53	0,00
R02	1,86	2,43	2,87	3,12	2,72	2,06	0,30
R03	1,41	2,52	2,54	2,86	2,21	1,99	1,02
R04	0,80	2,31	2,29	2,74	2,37	1,85	1,05
R05	2,78	2,48	3,30	3,56	2,56	2,10	1,16
R06	3,51	2,66	3,45	2,75	2,85	2,02	1,19
R07	2,38	2,43	3,68	3,95	3,33	2,46	1,37
R08	3,45	4,11	4,08	4,08	3,67	2,83	1,49
R09	2,36	3,28	3,75	4,12	3,40	2,64	1,55
R10	3,91	3,69	4,07	4,18	4,10	3,07	1,53
R11	3,53	3,00	3,98	4,19	4,01	2,83	1,48
R12	2,42	3,36	4,42	4,58	3,92	2,89	1,41
R13	3,04	3,58	3,98	4,32	3,72	2,96	1,51
R14	4,11	3,00	4,37	4,13	3,71	2,83	1,41
\overline{EDT}	2,66	2,96	3,55	3,60	3,06	2,36	1,18
σ	0,95	0,55	0,65	0,77	0,98	0,65	0,46

A.1. Resultados numéricos dos parâmetros acústicos obtidos nas medições em todas as combinações fonte/receptor

Tabela A.11: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F03

F03	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,05	2,14	2,78	2,48	1,98	1,76	0,27
R02	0,60	2,04	2,82	2,71	2,34	1,96	0,26
R03	1,47	2,75	2,52	2,98	2,08	1,91	1,00
R04	3,09	1,93	3,16	3,22	3,05	2,13	1,03
R05	1,77	2,62	3,18	3,55	2,81	2,23	1,37
R06	2,12	2,85	3,57	3,51	3,02	2,12	1,35
R07	2,49	2,94	3,32	3,60	3,01	2,41	1,50
R08	2,40	3,55	3,91	4,29	3,58	2,90	1,62
R09	2,48	3,55	4,29	4,23	3,78	2,68	1,63
R10	3,03	3,97	4,21	4,23	3,95	2,98	1,50
R11	3,03	3,47	4,53	4,30	3,95	3,10	1,72
R12	3,13	2,81	3,92	3,89	3,79	3,04	1,67
R13	2,86	3,93	4,35	4,38	3,89	3,06	1,36
R14	3,16	4,01	4,27	4,73	4,08	3,05	1,34
\overline{EDT}	2,41	3,04	3,63	3,72	3,24	2,52	1,26
σ	0,72	0,69	0,64	0,66	0,70	0,48	0,46

Tabela A.12: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F04

F04	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,35	1,86	3,36	2,87	2,31	1,73	0,90
R02	1,84	2,71	3,17	3,15	2,54	2,12	0,78
R03	2,30	2,95	3,16	2,85	2,76	2,13	1,21
R04	1,10	1,89	2,04	2,14	1,69	1,40	0,87
R05	2,24	1,75	2,99	3,28	2,87	2,00	0,97
R06	2,06	2,82	3,19	3,24	2,84	2,13	1,36
R07	2,80	2,23	3,62	3,41	3,26	2,31	1,25
R08	2,55	3,56	3,74	4,29	3,51	2,80	1,47
R09	2,88	3,45	3,70	4,37	3,72	2,93	1,28
R10	3,13	3,22	3,90	3,99	3,78	2,93	1,42
R11	2,70	3,38	4,27	4,46	3,85	2,95	1,41
R12	3,00	3,19	4,00	4,02	3,88	3,01	1,52
R13	3,33	4,32	4,29	4,22	3,80	3,04	1,37
R14	2,06	3,26	4,43	4,61	3,88	2,94	1,42
\overline{EDT}	2,45	2,90	3,56	3,63	3,19	2,46	1,23
σ	0,57	0,72	0,61	0,72	0,67	0,53	0,24

Apêndice A.

Tabela A.13: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F05

F05	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	1,84	2,05	3,00	2,94	2,88	1,93	1,06
R02	2,61	3,00	3,34	3,06	2,94	2,28	1,21
R03	1,78	1,81	2,83	2,71	2,24	1,75	1,03
R04	1,01	1,98	2,72	3,03	2,03	1,79	1,02
R05	1,97	2,36	2,46	3,17	2,25	1,93	0,37
R06	1,73	2,25	2,51	2,79	2,76	1,78	0,29
R07	2,30	2,56	3,36	3,29	3,14	2,10	0,46
R08	2,69	3,21	3,90	4,11	3,76	2,68	1,22
R09	2,88	2,81	3,91	4,05	3,49	2,87	1,25
R10	2,71	2,98	3,90	3,79	3,43	2,72	1,41
R11	4,05	2,49	4,01	3,88	3,47	2,78	1,42
R12	4,07	3,26	4,28	3,96	3,36	2,71	1,41
R13	3,68	2,77	4,18	3,93	3,48	2,80	1,34
R14	4,26	2,63	4,37	4,29	3,51	2,94	1,51
\overline{EDT}	2,68	2,58	3,48	3,50	3,05	2,36	1,07
σ	0,97	0,44	0,66	0,53	0,53	0,45	0,39

Tabela A.14: TTempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F06

F06	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,93	2,98	3,42	3,79	3,17	2,36	1,41
R02	2,90	3,02	3,45	3,74	3,25	2,25	1,42
R03	1,85	2,74	3,28	3,42	3,18	2,39	1,13
R04	2,15	2,13	3,45	3,59	2,90	2,22	1,22
R05	2,01	0,85	0,29	2,89	1,09	1,53	0,39
R06	2,12	2,17	1,56	1,62	0,24	0,31	0,29
R07	1,67	1,87	1,69	2,31	2,01	0,96	0,22
R08	2,08	3,52	2,89	3,19	3,16	2,29	0,87
R09	2,02	2,60	3,54	3,46	3,07	2,10	0,61
R10	1,79	2,74	3,33	3,39	3,17	2,46	0,99
R11	1,96	3,60	3,71	3,86	3,26	2,56	1,24
R12	1,97	3,56	3,76	3,86	3,11	2,42	1,36
R13	1,74	2,94	4,11	3,58	3,46	2,60	1,34
R14	1,51	2,90	3,53	3,57	3,11	2,51	1,33
\overline{EDT}	2,05	2,69	3,00	3,30	2,73	2,07	0,99
σ	0,39	0,72	1,03	0,62	0,91	0,65	0,42

A.1. Resultados numéricos dos parâmetros acústicos obtidos nas medições em todas as combinações fonte/receptor

Tabela A.15: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F07

F07	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	3,10	3,65	4,15	4,23	3,97	3,11	1,62
R02	3,14	3,40	3,84	4,46	4,01	3,12	1,87
R03	2,96	3,54	4,35	4,30	3,94	2,76	1,56
R04	4,02	3,78	3,96	4,26	3,74	2,96	1,62
R05	2,73	3,62	3,54	3,66	3,24	2,49	1,12
R06	2,67	3,08	3,63	3,73	3,24	2,55	1,22
R07	2,23	3,09	3,84	3,71	3,11	2,45	1,27
R08	2,40	2,56	3,86	3,48	3,02	2,35	1,14
R09	2,11	2,23	3,71	3,39	3,13	2,17	1,09
R10	2,76	3,32	2,95	3,11	2,55	0,81	0,43
R11	2,96	2,20	3,48	3,32	2,78	2,27	0,82
R12	2,95	2,76	3,65	3,32	2,90	2,27	1,04
R13	2,59	3,08	3,57	3,44	3,08	2,31	1,30
R14	2,52	3,60	3,62	3,71	3,09	2,44	1,35
\overline{EDT}	2,79	3,14	3,72	3,72	3,27	2,43	1,24
σ	0,45	0,51	0,32	0,41	0,44	0,54	0,35

Tabela A.16: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F08

F08	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	2,05	3,34	4,04	3,94	3,66	2,73	1,21
R02	3,17	3,94	4,38	4,04	3,55	2,84	1,23
R03	3,24	3,56	4,29	4,22	3,73	2,99	1,47
R04	3,32	3,14	4,57	4,28	4,10	2,90	1,58
R05	3,36	3,30	3,69	3,56	3,30	2,47	1,25
R06	2,61	2,84	3,40	3,87	3,07	2,55	1,27
R07	2,63	3,12	3,64	3,37	3,00	2,25	1,20
R08	2,42	2,65	3,37	3,35	2,92	2,24	1,24
R09	3,20	2,99	3,57	3,48	3,16	2,36	1,28
R10	2,35	2,13	3,13	3,09	2,79	2,26	1,02
R11	2,99	1,86	3,17	3,00	2,68	2,11	1,19
R12	2,50	2,55	3,44	2,91	2,65	2,22	1,20
R13	2,82	2,07	3,66	2,96	2,99	1,92	1,21
R14	2,75	2,26	3,36	2,97	2,74	2,01	1,18
\overline{EDT}	2,81	2,84	3,69	3,50	3,17	2,42	1,25
σ	0,40	0,59	0,44	0,47	0,43	0,33	0,13

Apêndice A.

A.2 Clareza

Tabela A.17: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F01

F01	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	9,61	-4,24	-0,53	3,57	0,54	2,53	8,88
R02	3,95	8,07	7,88	6,96	5,97	8,74	16,02
R03	4,80	-4,53	-9,14	-6,59	-4,95	-4,74	2,23
R04	4,50	-1,05	-7,12	-5,23	-5,58	-2,71	1,92
R05	-3,21	-7,71	-7,93	-7,21	-4,56	-2,87	2,15
R06	-4,23	-8,66	-6,87	-7,16	-5,01	-4,01	1,24
R07	-1,59	-3,42	-8,35	-7,89	-3,72	-4,36	3,27
R08	-1,97	-4,99	-8,57	-8,47	-4,11	-3,51	1,65
R09	-0,49	-4,96	-9,62	-7,16	-7,35	-6,27	0,04
R10	-2,26	-6,65	-12,84	-9,98	-7,96	-4,28	2,13
R11	-4,16	-8,44	-10,76	-11,90	-8,93	-5,76	4,04
R12	-1,88	-7,07	-13,49	-11,95	-10,44	-8,07	0,84
R13	-2,25	-6,55	-12,77	-10,81	-8,77	-6,39	3,69
R14	0,69	-7,35	-13,41	-10,31	-10,30	-6,76	1,71
C80	0,11	-4,83	-8,11	-6,72	-5,37	-3,46	3,56
σ	3,94	4,11	5,53	5,31	4,26	4,17	4,01

Tabela A.18: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F02

F02	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	9,27	8,63	9,41	10,52	11,80	15,19	20,34
R02	1,43	0,51	2,84	2,17	2,66	5,02	12,54
R03	1,44	-2,47	-3,22	-2,69	-2,12	-1,12	3,92
R04	5,20	-0,69	-1,75	-1,63	-0,86	0,58	6,31
R05	-2,75	-3,29	-1,19	-1,23	-1,26	2,06	5,21
R06	-3,96	-3,67	-0,20	-1,17	-2,56	0,65	7,19
R07	-2,99	-5,91	-3,01	-1,50	-0,65	-0,38	3,63
R08	-3,56	-3,96	-6,25	-4,69	-2,54	-1,04	3,49
R09	-4,18	-4,60	-6,04	-4,78	-3,63	-2,50	5,64
R10	-4,06	-4,58	-8,42	-7,85	-5,22	-3,31	0,62
R11	-4,24	-7,96	-10,78	-8,31	-6,94	-5,62	-0,16
R12	-5,42	-8,97	-9,93	-7,95	-7,54	-3,35	2,79
R13	-3,36	-6,08	-9,47	-8,46	-7,48	-4,42	1,53
R14	-2,20	-6,23	-7,13	-7,76	-6,19	-3,38	2,54
$\overline{C80}$	-1,38	-3,52	-3,94	-3,24	-2,32	-0,12	5,40
σ	4,08	4,18	5,38	5,03	4,86	5,03	5,15

Tabela A.19: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F03

F03	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	4,91	7,67	6,89	7,37	7,81	7,52	13,68
R02	9,01	3,74	2,62	3,88	5,67	6,93	13,91
R03	5,59	-6,87	-5,62	-2,82	-1,17	-1,46	6,05
R04	1,17	-0,06	-2,31	-1,50	-1,79	-0,63	6,32
R05	-6,79	-9,19	-2,06	-3,24	-3,99	-1,69	4,93
R06	-0,52	-9,91	-2,75	-3,29	-3,70	-1,59	5,04
R07	-0,23	-7,95	-5,29	-4,98	-4,67	-2,44	6,08
R08	-1,90	-4,49	-8,51	-6,25	-6,58	-2,33	6,82
R09	3,05	-5,67	-7,67	-8,51	-5,11	-3,38	5,03
R10	-1,83	-6,87	-10,88	-8,33	-7,84	-3,74	3,80
R11	-1,78	-6,38	-11,50	-9,75	-8,22	-4,66	4,15
R12	0,10	-10,40	-10,63	-9,59	-8,86	-5,80	2,28
R13	-0,64	-4,22	-11,30	-7,96	-7,24	-5,25	5,03
R14	1,01	-8,38	-7,88	-7,80	-7,84	-4,73	2,17
$\overline{C80}$	0,80	-4,93	-5,49	-4,48	-3,82	-1,66	6,09
σ	3,74	5,09	5,30	4,90	4,89	3,93	3,41

Apêndice A.

Tabela A.20: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F04

F04	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	3,67	1,68	1,11	2,80	1,63	2,47	9,65
R02	-0,21	-1,54	1,62	2,22	2,03	2,98	10,43
R03	0,12	-1,17	-5,36	-6,48	-5,60	-3,04	5,12
R04	1,54	-3,96	1,41	2,97	1,37	1,91	4,99
R05	4,79	-3,93	0,99	-1,58	1,24	1,32	8,65
R06	1,76	-5,55	-1,51	0,59	-1,45	2,35	7,23
R07	0,73	-7,26	-4,30	-2,15	-0,42	2,85	6,40
R08	2,15	-5,46	-9,93	-3,32	-0,97	0,28	3,58
R09	-1,00	-5,74	-9,87	-3,67	-4,59	-2,09	8,39
R10	-1,11	-6,35	-12,03	-6,88	-3,30	-0,98	3,31
R11	-0,12	-8,60	-10,70	-8,03	-4,34	-2,12	2,48
R12	2,18	-4,37	-10,56	-10,34	-7,75	-5,30	3,56
R13	-0,36	-7,73	-9,07	-8,25	-6,66	-3,58	3,11
R14	-3,79	-7,99	-7,91	-9,15	-7,93	-3,27	4,44
$\overline{C80}$	0,74	-4,86	-5,44	-3,66	-2,62	-0,44	5,81
σ	2,09	2,81	5,03	4,46	3,45	2,70	2,55

Tabela A.21: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F05

F05	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	-0,09	-3,74	-0,65	-1,49	0,06	0,47	4,92
R02	-0,89	-4,43	-7,37	-5,32	-4,15	-1,95	4,2
R03	3,79	0,21	-1,93	-0,97	-0,03	0,8	8,4
R04	3,53	1,56	-0,51	-0,14	0,41	1,91	7,39
R05	-0,09	4,23	4,54	4,85	5,99	5,58	11,9
R06	-0,49	3,66	2,63	5,16	5,1	5,49	11,89
R07	0,35	-0,78	-0,11	3,93	1,08	1,65	11,05
R08	-0,96	1,78	-4,48	-3,51	-0,38	-1,36	6,12
R09	0,15	0,01	-4,61	-4,36	-1,5	-2,07	7,4
R10	-1,86	-5,11	-7,69	-6,51	-6,73	-2,07	3,3
R11	-2,85	-6,99	-8,82	-8,11	-7,2	-4,36	4,21
R12	-3,32	-5,8	-10,2	-8,82	-6,63	-5,96	2,45
R13	3,02	-8,01	-9,97	-8,38	-6,69	-4,47	4,23
R14	2,49	-4,77	-8,9	-10,39	-7,28	-5,49	1,59
$\overline{C80}$	0,20	-2,01	-4,15	-3,15	-2,00	-0,85	6,36
σ	2,18	3,87	4,68	5,03	4,36	3,56	3,31

Tabela A.22: TTempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F06

F06	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	-0,46	-4,79	-3,44	-2,96	-2,66	-2,09	6,27
R02	-2,30	-6,61	-6,80	-6,21	-4,18	-4,18	1,90
R03	2,90	-2,15	-6,52	-5,55	-4,52	-2,44	1,78
R04	4,61	-1,91	-6,65	-5,16	-4,22	-2,92	2,74
R05	1,42	10,21	10,65	7,86	9,53	7,48	10,51
R06	2,78	9,14	9,81	8,79	11,63	12,90	13,93
R07	4,75	9,87	10,66	7,49	7,51	9,51	14,00
R08	3,44	-0,04	-0,45	1,55	0,98	2,67	8,06
R09	3,24	-0,92	1,05	3,42	3,70	5,36	10,61
R10	0,19	-2,03	-8,25	-3,22	-2,42	0,70	8,07
R11	-0,99	-5,23	-9,37	-7,31	-6,28	-3,41	4,00
R12	-0,37	-5,42	-8,81	-8,69	-5,35	-4,13	3,80
R13	0,07	-3,87	-5,62	-6,90	-6,87	-4,85	3,52
R14	0,54	-4,38	-11,15	-6,32	-5,61	-4,44	1,93
$\overline{C80}$	1,42	-0,58	-2,49	-1,66	-0,63	0,73	6,51
σ	2,12	5,68	7,43	5,99	6,02	5,67	4,23

Tabela A.23: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F07

F07	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	-6,61	-8,51	-9,42	-7,58	-4,75	-3,82	5,42
R02	-5,32	-10,01	-11,87	-9,93	-7,60	-7,39	1,07
R03	-4,93	-8,83	-12,88	-12,36	-10,62	-10,22	-3,44
R04	-13,79	-22,61	-35,25	-38,10	-32,97	-27,04	-20,58
R05	-1,72	-2,97	-4,99	-3,97	-4,29	-1,37	2,42
R06	-2,23	-5,74	-8,83	-3,96	-5,82	-4,16	1,75
R07	-0,98	-4,20	-6,24	-2,50	-3,96	-0,38	4,46
R08	1,48	-4,01	-3,41	-1,94	-2,70	-2,52	4,30
R09	1,18	-4,39	-1,67	-2,61	-0,34	-1,45	6,04
R10	-0,34	6,52	6,50	3,47	8,04	10,32	11,29
R11	0,39	-1,73	-1,61	1,58	1,06	2,51	10,09
R12	0,58	-2,97	-1,99	1,61	-1,12	0,19	7,93
R13	0,85	-1,78	-6,53	-6,66	-5,45	-3,93	2,73
R14	-0,35	2,66	-5,16	-4,77	-1,67	-0,93	2,86
$\overline{C80}$	-2,27	-4,90	-7,38	-6,27	-5,16	-3,59	2,60
σ	4,04	6,47	9,06	9,80	8,79	7,94	7,38

Apêndice A.

Tabela A.24: Tempo de atraso inicial medido em segundos, [s], para cada receptor, estando a fonte na posição F08

F08	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	-6,14	-1,04	-2,75	-6,08	-4,77	-1,28	4,06
R02	-7,3	-3,92	-6,37	-5,96	-3,55	-1,52	3,67
R03	-6,61	-4,99	-8,09	-10,35	-8,84	-6,75	-1,36
R04	-8,52	-11,98	-12,39	-11,94	-9,25	-8,05	-3,47
R05	-1,82	-6,94	-3,94	-6,39	-3,51	-3,36	1,77
R06	-2,95	-9,13	-4,29	-6,18	-5,27	-3,44	2,15
R07	-2,7	-5,96	-3,95	-2,16	-3,51	-1,59	1,45
R08	-4,16	-7,32	-4,73	-3,64	-5,02	-3,62	1,38
R09	-2,51	-4,65	-5,77	-5,27	-4,44	-3,61	0,27
R10	-3,56	-2,21	-5,23	-3,95	-6,37	-4,66	1,78
R11	-7,33	-2,91	-5,46	-7,13	-6,12	-4,21	-1,02
R12	-2,12	-6,03	-5,25	-4,46	-4,78	-5,74	-0,8
R13	-3,65	-0,15	-5,49	-7,48	-9,45	-7,2	-2,92
R14	1,73	-5,59	-6,14	-7,84	-7,06	-5,45	-2,16
$\overline{C80}$	-4,12	-5,20	-5,70	-6,35	-5,85	-4,32	0,34
σ	2,67	3,04	2,23	2,49	2,01	2,05	2,27

A.3 Definição

A.3. Definição

Tabela A.25: Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F01

F01	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,78	0,20	0,43	0,65	0,50	0,60	0,84
R02	0,66	0,86	0,85	0,81	0,77	0,86	0,97
R03	0,53	0,13	0,08	0,09	0,14	0,14	0,45
R04	0,59	0,32	0,10	0,17	0,14	0,24	0,46
R05	0,22	0,08	0,09	0,11	0,22	0,29	0,51
R06	0,18	0,08	0,11	0,13	0,17	0,22	0,47
R07	0,39	0,28	0,10	0,09	0,26	0,22	0,60
R08	0,33	0,21	0,04	0,10	0,23	0,26	0,49
R09	0,35	0,19	0,04	0,10	0,12	0,13	0,39
R10	0,35	0,12	0,03	0,06	0,10	0,20	0,53
R11	0,21	0,10	0,02	0,03	0,08	0,15	0,64
R12	0,39	0,10	0,03	0,03	0,04	0,08	0,45
R13	0,32	0,14	0,03	0,05	0,05	0,10	0,59
R14	0,54	0,14	0,02	0,03	0,04	0,07	0,47
$\overline{D50}$	0,42	0,21	0,14	0,18	0,20	0,25	0,56
σ	0,17	0,19	0,22	0,23	0,19	0,21	0,16

Tabela A.26: Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F02

F02	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,77	0,85	0,83	0,90	0,93	0,96	0,99
R02	0,71	0,39	0,64	0,57	0,65	0,74	0,92
R03	0,43	0,25	0,22	0,25	0,30	0,29	0,54
R04	0,58	0,23	0,30	0,29	0,36	0,40	0,64
R05	0,39	0,15	0,38	0,50	0,38	0,57	0,66
R06	0,34	0,16	0,38	0,44	0,32	0,39	0,75
R07	0,54	0,11	0,22	0,38	0,43	0,40	0,59
R08	0,40	0,27	0,15	0,21	0,30	0,29	0,60
R09	0,33	0,20	0,12	0,23	0,27	0,25	0,80
R10	0,48	0,23	0,03	0,09	0,19	0,26	0,43
R11	0,21	0,06	0,02	0,10	0,10	0,12	0,36
R12	0,22	0,08	0,03	0,06	0,10	0,19	0,56
R13	0,35	0,11	0,05	0,06	0,07	0,14	0,49
R14	0,38	0,12	0,04	0,06	0,13	0,17	0,52
$\overline{D50}$	0,44	0,23	0,24	0,30	0,32	0,37	0,63
σ	0,16	0,19	0,24	0,23	0,23	0,23	0,17

Apêndice A.

Tabela A.27: Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F03

F03	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,76	0,83	0,81	0,83	0,84	0,83	0,95
R02	0,79	0,67	0,62	0,67	0,77	0,80	0,94
R03	0,68	0,11	0,15	0,30	0,31	0,30	0,71
R04	0,50	0,37	0,18	0,28	0,32	0,34	0,70
R05	0,10	0,08	0,36	0,29	0,23	0,34	0,71
R06	0,43	0,05	0,33	0,29	0,25	0,36	0,71
R07	0,49	0,12	0,22	0,21	0,22	0,31	0,76
R08	0,30	0,22	0,10	0,15	0,14	0,31	0,79
R09	0,61	0,16	0,07	0,11	0,18	0,26	0,71
R10	0,38	0,14	0,05	0,08	0,08	0,24	0,63
R11	0,35	0,17	0,02	0,06	0,06	0,15	0,64
R12	0,48	0,06	0,02	0,04	0,06	0,13	0,52
R13	0,27	0,25	0,02	0,03	0,05	0,10	0,61
R14	0,46	0,05	0,04	0,06	0,06	0,14	0,36
$\overline{D50}$	0,47	0,23	0,21	0,24	0,26	0,33	0,70
σ	0,19	0,23	0,23	0,23	0,24	0,22	0,15

Tabela A.28: Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F04

F04	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,63	0,59	0,55	0,63	0,56	0,57	0,87
R02	0,45	0,29	0,57	0,60	0,60	0,63	0,88
R03	0,38	0,23	0,17	0,12	0,16	0,23	0,65
R04	0,51	0,17	0,51	0,52	0,42	0,43	0,63
R05	0,74	0,08	0,55	0,38	0,53	0,54	0,85
R06	0,49	0,17	0,39	0,47	0,38	0,58	0,80
R07	0,44	0,11	0,23	0,34	0,45	0,63	0,78
R08	0,63	0,19	0,03	0,30	0,41	0,47	0,63
R09	0,45	0,13	0,07	0,27	0,20	0,33	0,84
R10	0,38	0,14	0,04	0,13	0,24	0,36	0,57
R11	0,39	0,07	0,03	0,07	0,15	0,26	0,52
R12	0,56	0,09	0,02	0,05	0,06	0,14	0,58
R13	0,35	0,06	0,02	0,05	0,07	0,19	0,50
R14	0,27	0,09	0,02	0,05	0,06	0,14	0,56
$\overline{D50}$	0,48	0,17	0,23	0,28	0,31	0,39	0,69
σ	0,12	0,13	0,22	0,20	0,19	0,17	0,13

A.3. Definição

Tabela A.29: Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F05

F05	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,29	0,24	0,43	0,33	0,46	0,47	0,68
R02	0,28	0,26	0,12	0,19	0,22	0,33	0,67
R03	0,56	0,43	0,28	0,33	0,36	0,44	0,79
R04	0,56	0,50	0,33	0,44	0,34	0,50	0,77
R05	0,47	0,69	0,71	0,74	0,77	0,76	0,92
R06	0,43	0,68	0,63	0,75	0,75	0,76	0,92
R07	0,50	0,37	0,48	0,67	0,53	0,54	0,90
R08	0,43	0,58	0,21	0,25	0,42	0,37	0,74
R09	0,50	0,47	0,19	0,24	0,35	0,31	0,79
R10	0,37	0,21	0,11	0,13	0,13	0,34	0,61
R11	0,20	0,12	0,05	0,06	0,11	0,20	0,66
R12	0,21	0,13	0,05	0,06	0,11	0,13	0,52
R13	0,41	0,10	0,04	0,03	0,07	0,14	0,59
R14	0,51	0,18	0,03	0,05	0,05	0,11	0,42
$\overline{D50}$	0,41	0,35	0,26	0,31	0,33	0,39	0,71
σ	0,12	0,20	0,22	0,25	0,23	0,20	0,14

Tabela A.30: Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F06

F06	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,42	0,17	0,28	0,31	0,29	0,34	0,75
R02	0,31	0,11	0,10	0,15	0,23	0,21	0,52
R03	0,54	0,19	0,10	0,11	0,19	0,25	0,41
R04	0,69	0,12	0,07	0,16	0,14	0,24	0,53
R05	0,54	0,90	0,92	0,85	0,89	0,82	0,89
R06	0,60	0,87	0,89	0,87	0,92	0,94	0,95
R07	0,73	0,90	0,91	0,82	0,82	0,87	0,94
R08	0,67	0,47	0,45	0,53	0,50	0,58	0,80
R09	0,63	0,43	0,52	0,66	0,64	0,73	0,89
R10	0,43	0,38	0,10	0,24	0,32	0,49	0,83
R11	0,43	0,20	0,06	0,12	0,12	0,24	0,63
R12	0,46	0,21	0,05	0,09	0,16	0,21	0,63
R13	0,28	0,23	0,04	0,05	0,08	0,14	0,58
R14	0,36	0,25	0,03	0,08	0,09	0,15	0,49
$\overline{D50}$	0,51	0,39	0,32	0,36	0,39	0,44	0,70
σ	0,14	0,28	0,34	0,30	0,30	0,28	0,18

Apêndice A.

Tabela A.31: Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F07

F07	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,16	0,09	0,05	0,12	0,22	0,25	0,73
R02	0,15	0,07	0,04	0,06	0,11	0,11	0,5
R03	0,17	0,06	0,02	0,02	0,03	0,04	0,15
R04	0	0	0	0	0	0	0
R05	0,33	0,29	0,16	0,23	0,23	0,36	0,54
R06	0,27	0,18	0,07	0,21	0,16	0,21	0,5
R07	0,41	0,26	0,12	0,3	0,25	0,43	0,66
R08	0,54	0,25	0,26	0,35	0,29	0,25	0,63
R09	0,57	0,22	0,34	0,31	0,43	0,37	0,74
R10	0,44	0,8	0,8	0,65	0,84	0,9	0,91
R11	0,48	0,37	0,32	0,56	0,52	0,6	0,89
R12	0,51	0,29	0,34	0,56	0,39	0,44	0,81
R13	0,48	0,33	0,13	0,14	0,17	0,19	0,56
R14	0,42	0,54	0,2	0,16	0,34	0,38	0,56
$\overline{D50}$	0,35	0,27	0,20	0,26	0,28	0,32	0,58
σ	0,17	0,20	0,20	0,20	0,21	0,23	0,25

Tabela A.32: Definição para cada receptor, estando a fonte na posição F08

F08	Frequência [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
R01	0,20	0,35	0,27	0,11	0,17	0,31	0,55
R02	0,13	0,17	0,11	0,11	0,16	0,30	0,53
R03	0,07	0,10	0,09	0,05	0,06	0,09	0,22
R04	0,02	0,02	0,03	0,01	0,04	0,04	0,10
R05	0,34	0,11	0,11	0,11	0,15	0,22	0,40
R06	0,25	0,05	0,09	0,08	0,13	0,18	0,42
R07	0,19	0,15	0,11	0,18	0,13	0,26	0,34
R08	0,10	0,12	0,14	0,14	0,08	0,15	0,36
R09	0,11	0,13	0,14	0,12	0,11	0,13	0,35
R10	0,09	0,16	0,16	0,09	0,08	0,13	0,33
R11	0,10	0,13	0,04	0,07	0,08	0,14	0,22
R12	0,21	0,13	0,13	0,11	0,09	0,11	0,20
R13	0,28	0,08	0,09	0,04	0,03	0,06	0,10
R14	0,12	0,11	0,06	0,05	0,05	0,06	0,14
$\overline{D50}$	0,16	0,13	0,11	0,09	0,10	0,16	0,30
σ	0,09	0,07	0,06	0,04	0,04	0,08	0,14