

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

INGRID KNOCHENHAUER DE SOUZA

**PERFORMANCE ACÚSTICA DE UMA IGREJA PROTESTANTE DE MÉDIAS
DIMENSÕES**

**Florianópolis
2016**

INGRID KNOCHENHAUER DE SOUZA

**PERFORMANCE ACÚSTICA DE UMA IGREJA PROTESTANTE DE MÉDIAS
DIMENSÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de engenheiro civil, pela Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

Orientador: Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Knochenhauer de Souza, Ingrid
Performance acústica de uma igreja protestante de
médias dimensões / Ingrid Knochenhauer de Souza ;
orientador, Erasmo Felipe Vergara - Florianópolis, SC, 2016.
101 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Acústica de igrejas. 3.
Acústica arquitetônica. 4. Simulação acústica. I. Vergara,
Erasmo Felipe. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Ingrid Knochenhauer de Souza

**PERFORMANCE ACÚSTICA DE UMA IGREJA PROTESTANTE DE MÉDIAS
DIMENSÕES**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para
obtenção de grau de engenheiro civil, pela Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico.**

Florianópolis, 1 de julho de 2016.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda
Orientador

Prof. Phd. Roberto Lamberts

MEng. Pablo Giordani Serrano

MArq. Gabriella Kurtz Oliveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que tem me amado e sido meu amigo fiel.

À minha família e amigos por todo apoio e amor compartilhado. Acreditem, vocês me fazem muito feliz e eu amo muito vocês!

À UFSC pelo suporte e grande qualidade em seu ensino.

A todos amigos de graduação, mas principalmente Grazielle, Fernanda, Lídia, Thomas e Priscila, que não somente fazem parte da minha caminhada profissional, mas também do meu amadurecimento como pessoa.

Ao CNPQ que me proporcionou o intercâmbio em engenharia acústica que mudaria minha vida. Lá descobri esta paixão por acústica mudando meu rumo na engenharia civil.

À Prof. Elvira Viveiros que foi a primeira pessoa a confiar seus conhecimentos acústicos em mim e por ter me indicado a University of Salford.

Ao pessoal da University of Salford que contribuíram muito para meu aprendizado. Principalmente ao Danny Mccaul, Prof. Bruno Fazenda, David Waddington, Andy Moorhouse, Ian Rattigan, Claire Lomax e Gary Philips, obrigada!

Ao meu orientador de TCC, Prof. Felipe Vergara, que com sua análise crítica, exigência e conhecimento pôde fazer possível esse TCC.

Ao pessoal da acústica que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho. Ao Pablo, que confiou um estágio em mim sem nunca ter me visto. A Gabriella, Pollyanna, Camillo e Ana que fazem parte da quadrilha acústica estouradora de balões.

Ao Prof. Roberto Lamberts e a todos já mencionados que aceitaram fazer parte da minha banca avaliando este TCC.

À Primeira Igreja Batista de Florianópolis, que não só permitiu ser usada como estudo de caso neste trabalho, mas que também contribui para a minha comunhão e fé com meus irmãos em Cristo.

Ao LabCon, que me teve como bolsista aprendendo o programa Odeon e me proporcionou a convivência com pessoas e ambiente arquitetônico maravilhosos.

À minha revisora e grande amiga, Caroline.

Enfim, só tenho a agradecer.

“Louvai ao SENHOR. Louvai a Deus no seu santuário; louvai-o no firmamento do
seu poder.
Louvai-o pelos seus atos poderosos; louvai-o conforme a excelência da sua
grandeza.
Louvai-o com o som de trombeta; louvai-o com o saltério e a harpa.
Louvai-o com o tamborim e a dança, louvai-o com instrumentos de cordas e com
órgãos.
Louvai-o com os címbalos sonoros; louvai-o com címbalos altissonantes.
Tudo quanto tem fôlego louve ao Senhor. Louvai ao Senhor.”
(Salmos 150)

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) faz o estudo de caso da performance acústica de uma igreja protestante de médias dimensões no centro comercial da cidade de Florianópolis, SC, Brasil, através de simulação computacional com o software comercial Odeon. A resposta impulsiva experimental da igreja foi obtida a partir da excitação sonora no palco e da medição de pressão sonora em diferentes posições para a determinação do Tempo de Reverberação (TR). Este parâmetro acústico da igreja, obtido experimentalmente, foi utilizado para calibrar o modelo virtual do templo com auxílio do programa computacional Odeon. Considerando que o templo estivesse ocupado em 70% da sua capacidade e utilizando a simulação computacional, o desempenho acústico da igreja foi analisado e classificado em termos de parâmetros como Tempo de Reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}) e Índice de Transmissibilidade da Fala (STI). O templo sem ocupação de pessoas teve um TR médio medido e simulado de 1,5 segundos, enquanto quando ocupado com 70% da capacidade de pessoas, o TR foi de 1,3 segundos. Através do Odeon, a média de cálculo de outros parâmetros foram: 1,2 segundos de EDT, 2,2 dB de C_{80} e 0,57 de STI. A reverberação do templo foi considerada boa de acordo suas médias proporções e sua denominação de igreja protestante, pois estava dentro dos valores esperados. No entanto, a sensação foi de menor reverberação do que realmente tinha, pois o parâmetro EDT apresentou valores menores que o TR. A clareza da música foi aceitável de acordo com os valores de C_{80} , mas a inteligibilidade da palavra falada representada por parâmetros de D_{50} e STI teve valores correspondendo a qualidade de discurso razoável.

Palavras-chave: Acústica de igrejas. Acústica arquitetônica. Simulação Acústica.

ABSTRACT

This Conclusion Work Course studies the acoustic performance of a protestant church of medium proportions. This case study was located in the commercial center of the city of Florianópolis, SC, Brazil, and was evaluated through numerical simulation using the commercial software Odeon. The impulse response was obtained through sound excitement at the stage and sound pressure measurements in different audience positions. These measurement results determined the acoustical parameter Reverberation Time (RT). Having the church acoustical parameter experimentally, this RT was used to calibrate the temple virtual model supported by the software Odeon. Considering an occupancy capacity of 70% and using computational simulation, the church acoustic performance was analyzed and classified evaluating parameters as RT, Early Decay Time (EDT), Clarity Index (C_{80}), Definition (D_{50}) and Speech Intelligibility Index (STI). The unoccupied temple had an average measured and simulated RT of 1.5 seconds, while the RT was 1.3 seconds when simulated with 70% of occupancy. Through Odeon, the average of other calculated parameters was: 1.2 seconds for EDT, 2.2 dB for C_{80} and 0.57 for STI. The church reverberation was considered good as it showed expected values considering its medium proportions and its nomination as a protestant church. However, the subjective judgment of reverberation was lesser than the reverberation time because EDT parameter presented lower values than RT. Music clarity was acceptable according to C_{80} results, but spoken word intelligibility represented by D_{50} and STI parameters showed reasonable speech quality.

Keywords: Church acoustics. Architectural acoustics. Acoustics simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação de reflexão, absorção e transmissão sonora (adaptado de MEHTA et al., 1999 por SMIDERLE, 2013)	20
Figura 2 Reflexão parcialmente difusa de uma superfície com textura mostrando os componentes difusos e especulares Barron (2010).....	22
Figura 3 Modos normais da sala em modos axial, tangencial e oblíquo	23
Figura 4 Exemplo de som direto, primeiras reflexões e som reverberante com seu correspondente NPS ao longo do tempo. (Adaptado de BARRON, 2010 apud MARROS, 2011)	25
Figura 5 Comportamento de uma sala representado pelo nível de pressão sonora ao longo da frequência. (adaptado de LONG, 2014)	26
Figura 6. Conceito de tempo de reverberação - (Adaptado de MEHTA et al., 1999 apud BOTTAZZINI, 2007)	27
Figura 7 Tempo Ótimo de Reverberação para 500Hz, em função do volume e do uso. (BISTAFA, 2011)	29
Figura 8. Representação do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) na curva de decaimento sonoro (OGASAWARA, 2006).....	30
Figura 9. Gráficos de decaimento sonoro (a) uniforme; (b) inicial rápido, seguido de lento; (c) inicial lento, seguido de rápido. (MEHTA et al., 1999)	31
Figura 10 Passo a passo desde a localização até a análise da performance acústica da igreja. Fonte: Elaborado pela autora.	40
Figura 11 Planta de situação da Primeira Igreja Batista de Florianópolis. Fonte: Google Maps	42
Figura 12 Vista da fachada da igreja pela Rua Tenente Silveira. Fonte: Google Maps	42
Figura 13 Foto da igreja vista do mezanino tirada pela autora	45
Figura 14 Foto da igreja vista do palco tirada pela autora	45
Figura 15 Foto do mezanino tirada pela autora.....	46
Figura 16 Equipamentos usados durante a medição da resposta impulsiva (OLIVEIRA, 2015)	48
Figura 17 Foto da medição acústica tirada pela autora	49
Figura 18 Posicionamento da fonte e dos microfones na captação do sinal impulsivo na parte térrea. Fonte: planta elaborada pela autora.....	50

Figura 19 Comparação de TRs com outras igrejas protestantes ao longo da frequência.....	55
Figura 20 TR médio para medição e para simulação ao longo da frequência	55
Figura 21 Planta baixa da igreja. Fonte: Odeon.....	58
Figura 22 Corte da igreja. Fonte: Odeon.....	58
Figura 23 Cobertura de reflexão: reflexões de primeira ordem. Fonte: Odeon.....	59
Figura 24 Tempo de reverberação pela análise analítica por Sabine e Eyring ao longo da frequência. Fonte: Odeon.....	62
Figura 25 Área de absorção distribuídas pelos materiais ao longo da frequência. Fonte: Odeon.	62
Figura 26 Área de absorção em potencial de uso distribuído nos materiais ao longo da frequência. Fonte: Odeon.....	64
Figura 27 Coeficientes de absorção dos materiais ao longo da frequência. Fonte: Odeon.....	64
Figura 28 Média de T_{30} e T_{20} ao longo da frequência. Fonte: Odeon.	66
Figura 29 Curva de decaimento para cada frequência ao longo do tempo. Fonte: Odeon.....	66
Figura 30 Distribuição do caminho livre mostrando a quantidade de colisões de partículas ao longo do tempo	68
Figura 31 Visão da propagação dos modos normais da sala (frequências) a partir da distância da fonte em cortes e planta.....	68
Figura 32 Posição dos 18 pontos simulados no templo no projeto tridimensional da igreja. Fonte: Odeon.....	69
Figura 33 TRs simulados para os setores da igreja e seus limites máximos e mínimos ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.	70
Figura 34 TRs simulados para os setores, médias do TR com igreja ocupada e sem pessoas ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.	71
Figura 35 EDTs simulados para os setores junto a média do TR e do EDT ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.	72
Figura 36 C_{80} s simulados junto a média do C_{80} . Fonte: elaborada pela autora.....	73
Figura 37 D_{50} s simulados para os setores, médias do D_{50} com igreja ocupada e vazia ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.	74
Figura 38 STIs simulados para os setores quando a igreja estava ocupada. Fonte: elaborada pela autora.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Nível de Conforto para Ruído de Fundo e a curva NC para o local avaliado: Valores dB(A) – NBR 10152/1987	22
Tabela 2. Ponderações para Tempo Ótimo de Reverberação baseados no Tempo Ótimo de Reverberação de 500 Hz encontrado no gráfico de Bistafa para os limites máximos e mínimos ao longo da frequência. (PRADO, 1962 apud VIANNA, 2015)	28
Tabela 3. Valores de STI com sua correspondente qualidade da inteligibilidade de acordo com norma IEC 60268-16.	33
Tabela 4 Parâmetros acústicos e seu limiar diferencial (JND). Fonte: User Manual (Odeon, 2009)	35
Tabela 5 TRs para igrejas protestantes com volumes semelhantes (DESARNAULDS, 2002)	39
Tabela 6 Detalhes técnicos da igreja protestante em estudo	43
Tabela 7 Materiais, seus coeficientes de absorção ao longo da frequência e área ou unidade correspondente. Fonte: tabela elaborada pela autora.....	47
Tabela 8 Distribuição do JND para cada frequência e sua média para o parâmetro acústico TR nos sete pontos medidos na igreja.....	56
Tabela 9 Representatividade dos pontos receptores nos setores	57
Tabela 10 Ressonâncias (frequências) simuladas, número de colisões (hits) e sua distância da fonte. Fonte: elaborada pela autora.	67
Tabela 11 Volume e correspondente TR ótimo em 500Hz. Fonte: elaborada pela autora.	70
Tabela 12 Limites máximos e mínimos para o TR ótimo aceitável na igreja ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.	70
Tabela 13 Informações da medição.....	84
Tabela 14 Ruído de fundo por frequência	84
Tabela 15 Informações do ambiente durante a medição. Fonte: LEPTEN	84
Tabela 16 Medição do Tempo de Reverberação para cada uma de suas três repetições em cada um dos 7 pontos ao longo da frequência.....	85
Tabela 17 Posição da fonte e dos pontos medidos nas coordenadas x, y e z.....	85
Tabela 18 Média do Tempo de Reverberação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência.....	86

Tabela 19 Média do EDT simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência	87
Tabela 20 Média do T30 simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência	87
Tabela 21 Média do C80 simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência	87
Tabela 22 Média do D50 simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência	88
Tabela 23 STI simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos	88
Tabela 24 Posição da fonte e dos pontos simulados nas coordenadas x, y e z	89
Tabela 25 Média do EDT simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos ao longo da frequência	89
Tabela 26 Média do T30 simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos ao longo da frequência	90
Tabela 27 Média do C80 simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos ao longo da frequência	90
Tabela 28 Média do D50 simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos ao longo da frequência	91
Tabela 29 STI simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos.....	92
Tabela 30 Representatividade de cada um dos 18 pontos nos setores	93
Tabela 31 Média dos parâmetros acústicos simulados ao longo da frequência para o setor de parte central	93
Tabela 32 Média dos parâmetros acústicos simulados ao longo da frequência para o setor de abaixo do mezanino	93
Tabela 33 Média dos parâmetros acústicos simulados ao longo da frequência para o setor de mezanino	93
Tabela 34 Média dos parâmetros acústicos simulados ao longo da frequência para o setor de palco	94
Tabela 35 Modos Normais no modo axial em ordem de frequência e seu respectivo número inteiro (m, n ou l) para as dimensões de L_x , L_y e L_z	95

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 Frequência dos modos normais (LONG, 2014)	24
Equação 2 TR de Sabine (LONG, 2014).....	27
Equação 3 TR de Eyring (LONG, 2014).....	28
Equação 4 C_{80} (BOTTAZZINI, 2007).....	31
Equação 5 D_{50} (BOTTAZZINI, 2007).....	32

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Condições do ambiente durante a medição	84
APÊNDICE 2 - Medição da igreja sem ocupação de pessoas	85
APÊNDICE 3 - Simulação da igreja sem ocupação de pessoas	87
APÊNDICE 4 - Simulação da igreja com 70% de ocupação de pessoas	89
APÊNDICE 5 - Parâmetros acústicos simulados por setor de localização na igreja quando ocupada em 70%	93
APÊNDICE 6 - Modos normais axiais da igreja de acordo com suas dimensões ..	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Especificos.....	16
1.2	Justificativa.....	17
1.3	Estrutura do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Energia Sonora	20
2.1.1	Coeficiente de Absorção e Materiais Absorvedores	20
2.1.2	Difusão sonora, difusores e índice de espalhamento	21
2.2	Ruído de Fundo.....	22
2.3	Modos normais da sala.....	22
2.4	Resposta Impulsiva	24
2.6	Parâmetros Acústicos para Avaliação de Salas	26
2.6.1	Tempo de Reverberação (TR).....	26
2.6.2	Tempo de Decaimento Inicial (EDT).....	30
2.6.3	Clareza (C_{80}).....	31
2.6.4	Definição (D_{50}).....	32
2.6.5	Índice de Transmissibilidade da Fala (STI)	32
3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ACÚSTICA DE SALAS	34
3.1	Limiar diferencial (Just Noticeable Difference).....	34
4	A ARQUITETURA DAS IGREJAS CRISTÃS AO LONGO DO TEMPO	36
4.1	Acústica de igrejas evangélicas	37
5	METODOLOGIA	40
5.1	Procedimentos metodológicos	41
5.1.1	Localização.....	41
5.1.2	Levantamento arquitetônico.....	43
5.1.3	Equipamentos e programas utilizados na medição experimental.....	47
5.2.2	Validação do modelo e as variáveis envolvidas	53
5.2.3	Validação de modelo virtual através dos resultados medidos versus simulados	54
5.2.3.1	Tempo de Reverberação (TR).....	54
5.2.3.2	Limiar Diferencial (JND).....	56
6	PERFORMANCE DA IGREJA PROTESTANTE DE MÉDIAS DIMENSÕES	57
6.1	Geometria do templo.....	57
6.2	Estimativa geral dos dados obtidos pelas áreas junto aos seus materiais	60
6.3	Estimativa global do TR, das curvas de decaimento e da distribuição de caminho livre	65
6.4	Resposta de múltiplos pontos.....	69
6.4.1	Tempo de Reverberação (TR)	69
6.4.2	Tempo de Decaimento Inicial (EDT).....	72
6.4.3	Clareza (C_{80}).....	73
6.4.4	Definição (D_{50}).....	74
6.4.5	Índice de Transmissibilidade da Fala (STI)	75
7.1	Considerações finais.....	80
7.2	Indicações para futuro estudos.....	81

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICES.....	84

1 INTRODUÇÃO

Quando um som é gerado, não somente se ouve a emissão da fonte, mas o recinto também contribui decisivamente para a ampliação sonora. Em um recinto fechado, onde o volume é grande, e paredes são superfícies reflexivas, a sala é preenchida pelo som e a impressão de que ele chega de todos os lados. Temos, portanto, a percepção que o som transcende as paredes e que há algo além daquele espaço físico. Há grande beleza no prazer e na contemplação deste som que além de chegar como informação aos nossos ouvidos, nos envolve e emociona.

Nas edificações religiosas, a música “ecoa” nos louvores e o ensino é proclamado pela palavra falada. O louvor não pode ser “seco”, pois estar envolvido na música traz a lembrança da fé. A palavra, porém, deve ser direta e precisa aos ouvidos para que o evangelho seja recebido com a razão. Dois enfoques distintos que pedem um tempo de reverberação que satisfaça a ambos os momentos. Além disso, a sensação de intimismo, vivacidade, brilho, calor, audibilidade, envolvimento e clareza são equalizados de acordo com o fim do determinado ambiente e são conhecidos como parâmetros acústicos subjetivos. Dentre os parâmetros acústicos objetivos, os mais importantes são o Tempo de Reverberação (TR), Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT). Estes parâmetros podem ser calculados a partir da resposta impulsiva da sala mediante medições acústicas *in loco*.

A acústica de salas é um campo de conhecimento aplicado também em igrejas. Ela envolve principalmente a geometria, forma da sala estudada e os materiais que compõem o espaço. Assim, alterando estes aspectos do ambiente, os parâmetros acústicos objetivos podem se adequar para estarem mais próximos das sensações desejadas, ou seja, os parâmetros subjetivos. Como as ondas sonoras tem comportamentos distintos ao longo da frequência, alguns fenômenos acústicos as justificam. Assim, para promover conforto acústico que atenda aos membros da igreja, objeto de estudo, a análise do espaço e dos fenômenos acústicos é essencial.

Para avaliação da performance acústica será utilizada simulação computacional através de um software comercial que utiliza o método de raios acústicos para a determinação dos parâmetros acústicos objetivos da sala a partir da resposta impulsiva. Através da inserção da geometria e materiais componentes, a acústica do recinto pode ser prevista, ilustrada e ouvida.

O objeto de estudo é a Primeira Igreja Batista de Florianópolis (PIB) localizada na Rua Tenente Silveira, centro de Florianópolis em Santa Catarina. Fundada em 1942, esta igreja protestante que um dia começou com 30 pessoas, hoje conta com 800 membros. Durante os cultos, o templo da igreja tem capacidade para 338 pessoas sentadas. Sua forma simples e retangular é composta por superfícies lisas e rígidas possuindo um pé-direito de 5 metros. No seu volume de 1335 m³, a composição de seus materiais está em seus bancos e piso de madeira, assim como as paredes de alvenaria que refletem o som e somente no seu mezanino e palco estão alguns materiais absorventes como poltronas estofadas e carpete. Para reforçar a palavra proclamada no palco, sistemas de alto-falantes foram instalados pelo templo.

1.1 Objetivos

Os objetivos estão divididos em objetivo geral e em objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar acusticamente o espaço interno de uma igreja com características contemporâneas através de conceitos ou fundamentos da literatura clássica, medição e de simulação computacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantamento das características de localização e arquitetônicas do templo para confecção do correspondente modelo virtual da igreja, considerando

dimensões, materiais e coeficientes de absorção.

- Realizar medições acústicas *in loco* da Primeira Igreja Batista de Florianópolis para obtenção do Tempo de Reverberação (TR) e do ruído de fundo do ambiente sem ocupação de pessoas.
- Calibrar modelo virtual através da correspondência dos resultados medidos com os simulados para o templo sem ocupação de pessoas.
- Determinar os parâmetros acústicos objetivos: Tempo de Reverberação (TR), Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}) e Índice de Transmissão da Fala (STI) através de simulação computacional a partir da adição da absorção sonora de pessoas nos assentos com 70% de ocupação do local, simulando um culto.
- Avaliação da performance acústica do estudo de caso através dos resultados dos parâmetros acústicos simulados.

1.2 Justificativa

A busca do transcendental é algo comum entre os povos e ao longo de toda história da humanidade. Um vazio existencial no homem o leva a procura de algo maior que ele que de tal forma preencha o seu significado vital. Algumas pessoas não acreditam que exista uma força maior governante de todo o universo, outros, porém, chamam essa força de Deus e que esse ser é do tamanho do seu vazio existencial.

Para essas pessoas que cultivam a vida espiritual, há grande importância no desenvolvimento e perseverança da fé. A fé vem do ouvir a palavra divina e a comunhão entre irmãos reforça a crença através da identidade como um todo. Pela necessidade de comunhão, o espaço físico para encontros recorrentes se torna uma necessidade.

Esses espaços físicos para prática religiosa são conhecidos como sinagogas, mesquitas, santuários e igrejas. São lugares em que a reunião traz a identidade do povo através da reflexão, comunhão e entrega e a acústica faz papel fundamental para promover essas práticas.

A acústica arquitetônica em igrejas deve ser projetada para proporcionar que a palavra seja transmitida e entendida pelos fiéis, assim como os louvores através da música envolva a congregação. Porém, com a Reforma Protestante (século XVI) dividindo a Igreja Católica, a proclamação da palavra teve um peso maior que a prática de louvores para esta vertente. Como os dois enfoques pedem aspectos acústicos contrapostos, a palavra falada deveria ser a maior beneficiada no tratamento acústico interno do templo protestante.

As Igrejas Protestantes hoje possuem muitas denominações, mas possuem características gerais que as diferenciam das Igrejas Católicas. A arquitetura é mais simples, pois há pouca preocupação com o visual visto que imagens de santos, esculturas e afrescos não são mais reverenciados. Além disso, a reverberação é menor beneficiando a inteligibilidade do discurso através do menor volume com pês-direitos menores.

Cerca de 31% dos 6,9 bilhões da população mundial em 2010, de acordo com o Pew Research Center, se diz pertencer ao cristianismo. Ainda com essa percentagem, foram encontrados somente alguns estudos sobre a acústica destes espaços religiosos, e quase nenhum sobre a acústica de Igrejas Protestantes.

Portanto, julga-se válido este estudo de caso ao oferecer dados que possam auxiliar em outros projetos arquitetônicos de igrejas protestantes uma vez que ainda há falta de pesquisas e desenvolvimento nesta área. Além disso, o uso de simulação computacional como ferramenta de avaliação de performance facilita a previsão acústica de espaços internos. Assim, a tecnologia aliada aos conhecimentos sócio-culturais e a conscientização da importância do conforto acústico pode promover uma melhoria da acústica interna de tais ambientes.

1.3 Estrutura do trabalho

Este primeiro capítulo é a introdução deste TCC. Nele pode-se encontrar uma apresentação geral do tema, os objetivos gerais e específicos, bem como a justificativa do trabalho.

A fundamentação teórica para os assuntos discutidos no desenvolvimento deste estudo de caso é apresentada no segundo capítulo.

No terceiro capítulo, uma breve apresentação da simulação acústica de salas é comentada, bem como o parâmetro que qualifica se a sala virtual corresponde a sala real.

No capítulo quatro, faz-se a ligação da história da igreja cristã com sua arquitetura desde o século IV até a Reforma Protestante que então mostra como deveriam ser as características acústicas das igrejas evangélicas de acordo com seus princípios.

No quinto capítulo, o procedimento metodológico de medição à simulação computacional da igreja é detalhado. Enfim, uma avaliação dos resultados de simulação frente aos de medição é realizada a fim de calibrar o modelo virtual proposto.

Após a simulação do templo sem ocupação de pessoas, no capítulo seis a performance da igreja é avaliada simulando um culto, com 70% de ocupação de pessoas, sendo apresentados os parâmetros acústicos e arquitetônicos avaliados com o auxílio do software Odeon.

Enfim, no capítulo sete são apresentadas as conclusões, considerações finais e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção de fundamentação teórica apresenta os conceitos nos quais este trabalho é baseado.

2.1 Energia Sonora

Quando o som atinge uma barreira, ele se divide por reflexão, absorção e transmissão. A energia sonora em cada etapa dessas depende das propriedades do material incidente e de seus coeficientes de reflexão, absorção e transmissão. Assim, incidindo o som em uma parede, ele em parte será refletido, outra parte absorvida pelo material e o restante transmitido através da partição como mostra a figura 1.

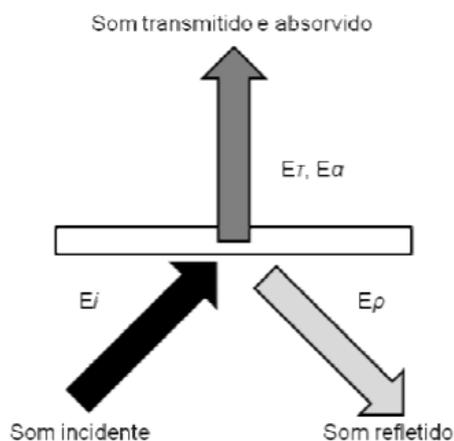


Figura 1 Representação de reflexão, absorção e transmissão sonora (adaptado de MEHTA et al., 1999 por SMIDERLE, 2013)

Sendo E_i o som incidente, as parcelas de reflexão, absorção e transmissão são representados na figura 1 respectivamente por E_r , E_a e E_t .

2.1.1 Coeficiente de Absorção e Materiais Absorvedores

Os coeficientes de absorção, representados pela letra grega alfa (α), indicam a porcentagem de energia sonora incidente que foi absorvida e transmitida pelo

material. Ou seja, o coeficiente de absorção é a fração da energia do som incidente que não foi refletida pela partição (MEHTA ET AL, 1999). Por isso, o coeficiente de absorção teoricamente varia de 0, material totalmente reflexivo, a 1, material totalmente não reflexivo.

Os materiais de absorção são usados para reduzir o ruído do interior de salas e controlar o tempo de reverberação. A efetividade do material de absorção sonora vai depender do coeficiente de absorção que por sua vez varia com o ângulo de incidência do som. O coeficiente de absorção de incidência aleatória é a média dos coeficientes de absorção para todos ângulos de incidência. Segundo Mehta et al (1999), existem três tipos de materiais de absorção sonora: absorvedores porosos, membranas e painéis absorvedores e absorvedores de volume.

2.1.2 Difusão sonora, difusores e índice de espalhamento

Um perfeito campo sonoro difuso é definido, conforme Mehta et al (1999), como aquele em que o som chega ao ouvinte de todas as direções com igual força. No entanto, este perfeito campo não existe já que o som direto dependendo da posição do ouvinte geralmente é mais forte que o som refletido. A difusão sonora é uma das mais importantes necessidades para salas com performance musical, pois com o som vindo de todas as direções, o ouvinte se sente envolvido pela música.

Um difusor é um elemento construtivo que deve ser suficientemente grande em relação ao comprimento de onda do som e suficientemente rígido e pesado. Ele tem a função de refletir o som incidente igualmente em todas as direções. A superfície do refletor deve conter irregularidades aproximadas ao comprimento de onda que se queira tratar difusamente. Quanto mais aleatórios e de tamanhos diferentes forem os padrões geométricos das superfícies, melhor será o difusor (MEHTA ET AL, 1999).

Além disso, toda superfície possui uma certa difusibilidade. Existe um índice que quantifica a distribuição de som chamado de índice de espalhamento de acordo com a textura de uma superfície. De acordo com Barron (2010), este índice é a

proporção do som refletido que é espalhado em relação a energia total refletida e varia de 0 a 1.

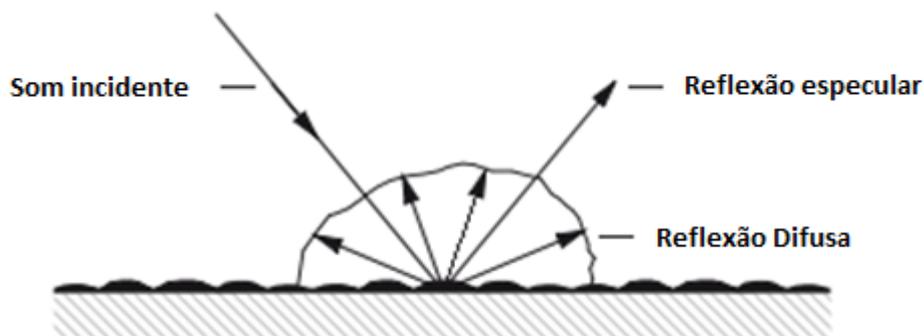


Figura 2 Reflexão parcialmente difusa de uma superfície com textura mostrando os componentes difusos e especulares Barron (2010).

2.2 Ruído de Fundo

O ruído de fundo não deve atrapalhar no propósito de um ambiente. Por isso, a norma brasileira NBR 10.152 – Níveis de Ruído para Conforto Acústico estabelece e sugere limites máximos de ruído de fundo para diferentes ambientes devido a sua classificação.

A tabela 1 relaciona faixa de valores de ruído de fundo que garantem conforto para o local de igreja como culto meditativo. O valor inferior representa o nível recomendado para o conforto acústico, enquanto o valor superior é o máximo aceitável para fins normativos.

Tabela 1 Nível de Conforto para Ruído de Fundo e a curva NC para o local avaliado: Valores dB(A) – NBR 10152/1987

Local	dB(A)	NC
Igrejas e Templos (Cultos meditativos)	40-50	35-45

2.3 Modos normais da sala

O balanço tonal e o timbre de um som podem ser modificados pelo ambiente em que são gerados. Este fenômeno varia dependendo da posição da fonte e do

ouvinte juntamente com a geometria da sala afetando principalmente as baixas frequências pelos modos normais da sala de acordo com D'Antonio e Cox (2004).

Os modos normais da sala fazem com que o decaimento do som seja excessivamente longo e não uniforme ao longo da frequência (D'ANTONIO E COX, 2004). Isto acontece porque o comprimento de onda coincide com alguma das dimensões do recinto criando pontos máximos e mínimos em que o som ora é amplificado e ora a energia é reduzida dependendo da posição. Portanto, a escolha de dimensões é essencial para amenizar este problema e conferir ao ambiente uma distribuição modal que evite ou minimize pontos de amplificação ou regiões modais.

Três modos normais são encontrados: axial, tangencial e oblíquo, representados pela figura 3. O modo axial é a interação de um par de superfícies, enquanto tangencial são dois pares e oblíquo três pares de superfícies. Os modos mais problemáticos são os axiais, pois são os modos com mais energia. Ainda é importante evitar que as dimensões sejam múltiplas entre si para que a mesma frequência não gere modos em mais de um par de superfícies, agravando o comportamento modal daquela frequência.

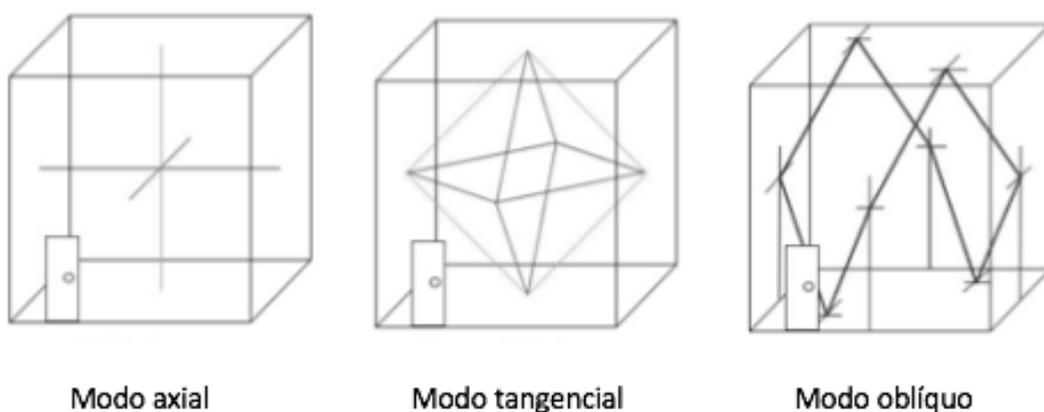


Figura 3 Modos normais da sala em modos axial, tangencial e oblíquo

As frequências modais podem ser definidas a partir das dimensões da sala como apresenta a equação 1. De acordo com Long (2014), ela é válida para

espaços retangulares com paredes rígidas, a absorção é negligenciada e todos os modos (axial, tangencial e oblíquo) tem o mesmo peso.

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

Equação 1 Frequência dos modos normais (LONG, 2014)

Onde: f é a frequência representando o modo normal

c é a velocidade do som no ar;

n_x, n_y, n_z são números inteiros representando os modos e

L_x, L_y, L_z representam as dimensões de comprimento, largura e altura do recinto

Para evitar uma má distribuição dos modos normais da sala é importante a observação de alguns aspectos. Deve-se escolher as melhores dimensões aplicadas no espaço estudadas por vários autores como Bolt, Gilford, Walker facilitando e barateando o tratamento dos modos da sala conforme D'Antonio e Cox (2004). Sendo muito prejudiciais, não devem existir modos duplos ou triplos. Os modos normais da sala podem ser minimizados por superfícies não paralelas inclinando as paredes e por absorção das frequências modais (LONG, 2014).

2.4 Resposta Impulsiva

Cada ambiente possui uma identidade própria. A partir da medição da Resposta Impulsiva, valores de parâmetros acústicos podem ser calculados e consequentemente caracterizarem a sala.

A Resposta Impulsiva é um som de curta duração, que seja por técnicas de geração a partir de softwares como Dirac ou impulsos sonoros como tiros ou estouros de balões, qualifica a sala a partir do comportamento de suas reflexões no recinto. O primeiro som que chega ao ouvinte é o som direto que se propaga da fonte em linha reta até o receptor. Ele então é seguido por uma série de primeiras

reflexões vindas das paredes laterais, teto, etc. Já o som reverberante propaga-se por um caminho maior chegando mais tarde e com menos energia (BARRON, 2010). A Resposta Impulsiva é representada pelo Nível de Pressão Sonora (NPS) ao longo do tempo como é ilustrado na figura 4.

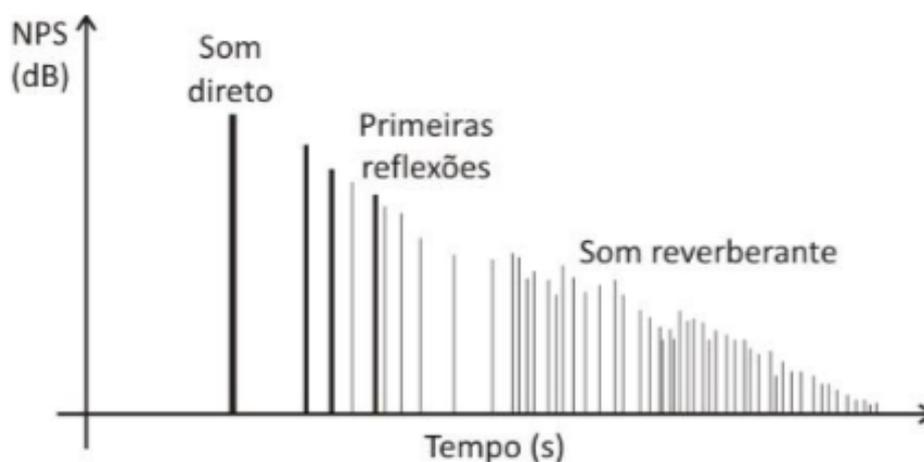


Figura 4 Exemplo de som direto, primeiras reflexões e som reverberante com seu correspondente NPS ao longo do tempo. (Adaptado de BARRON, 2010 apud MARROS, 2011)

2.5 Distribuição do caminho livre

O som se comporta diferentemente ao longo da frequência em uma sala. A partir de uma frequência chamada de Schroeder, ondas sonoras podem ser tratadas como raios ou partículas quanto ao seu comportamento de reflexão nas superfícies da sala. Essa avaliação pode ser feita pela distribuição do caminho livre de raios pela sala e estudada a sua interação com paredes ao ser somada às suas contribuições no ponto receptor. (LONG, 2014).

O comportamento de uma sala pode ser representado pela figura 5. Nas primeiras frequências a sala tem comportamento modal em que os modos normais da sala são determinantes. A frequência de Schroeder, dependente do tempo de reverberação e volume, é divisora deste comportamento com o de difusão em que o ambiente tem resposta mais homogênea, variando menos os níveis de pressão sonora ao longo da frequência. Enfim, a partir da frequência Schroeder quadruplicada, o som se comporta por reflexões especulares em que o ângulo

incidente quando um raio sonoro atinge uma superfície terá o mesmo ângulo de saída quando refletido.

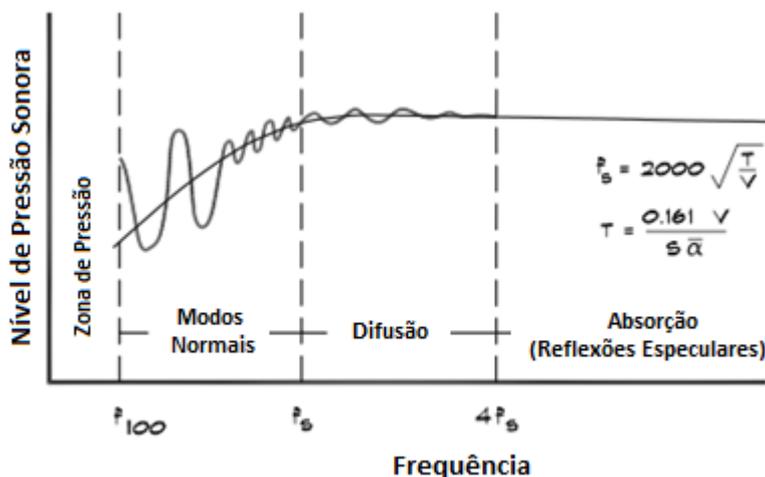


Figura 5 Comportamento de uma sala representado pelo nível de pressão sonora ao longo da frequência. (adaptado de LONG, 2014)

2.6 Parâmetros Acústicos para Avaliação de Salas

Seja sua finalidade o discurso da fala, a performance da música, ou um meio termo entre os dois usos, os parâmetros acústicos ajudam na avaliação de salas. Cada espaço quando planejado tem um propósito, assim a acústica deve corresponder ao uso da sala contribuindo para o ambiente interno na sua qualidade e conforto acústico. Os parâmetros acústicos apresentados provêm da resposta impulsiva junto ao ruído de fundo como o tempo de reverberação, decaimento inicial, clareza, definição e índice de transmissibilidade da fala.

2.6.1 Tempo de Reverberação (TR)

O tempo de reverberação é o tempo necessário para que a energia sonora decaia 60 dB depois de cessada sua emissão. Segundo (SILVA, 1983, apud OGASAWARA, 2006), ele representa a persistência do som no ambiente pelas múltiplas reflexões nas superfícies da sala. Essas reflexões não são ouvidas separadamente, pois o ouvido só distingue eventos sonoros separados por 50 milissegundos, caso contrário eles reforçam o som no ambiente. É definido o tempo

de reverberação como o “processo de decaimento sonoro” (BERANEK, 1996, apud BOTTAZZINI, 2007) e está ilustrado pela figura 6.

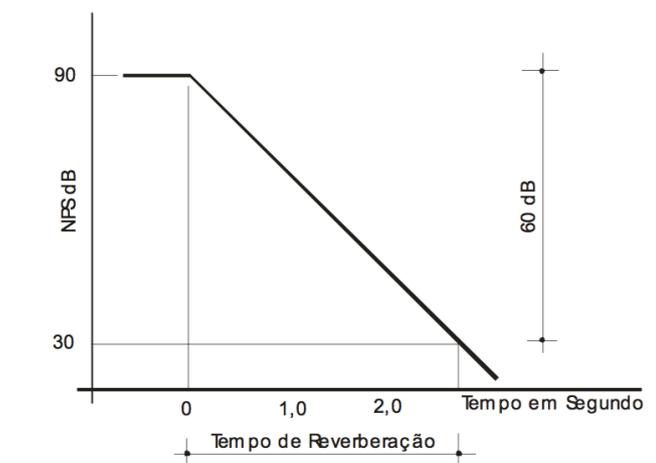


Figura 6. Conceito de tempo de reverberação - (Adaptado de MEHTA et al., 1999 apud BOTTAZZINI, 2007)

Ele depende de alguns fatores como volume, geometria e composição de materiais nas superfícies do ambiente. Pode ser obtido através de cálculos numéricos, ou medido no próprio ambiente. O tempo de reverberação foi pioneiramente estudado por Wallace C. Sabine, pai da “Acústica dos Ambientes fechados”, e é representado matematicamente pela equação 2, chamada de equação de Sabine:

$$TR = 0,161 \frac{V}{\Sigma A}$$

Equação 2 TR de Sabine (LONG, 2014)

Onde: TR é o tempo de reverberação (s)

V é o volume do ambiente (m³)

A é a absorção da sala (m² Sabine)

A equação de Sabine é usada principalmente quando índice de absorção médio da sala (α) é menor que 0,20. Quando esse índice é maior que 0,20, geralmente usa-se para uma análise analítica a equação 3, equação de Eyring.

$$TR = \frac{-0,16V}{S \ln(1 - \alpha)}$$

Equação 3 TR de Eyring (LONG, 2014)

Onde: TR é o tempo de reverberação (s)

V é o volume do ambiente (m³)

S é o somatório das áreas de todas as superfícies (m²)

α é o coeficiente médio de absorção das superfícies

O tempo de reverberação está presente em todas as salas e afeta os sinais transmitidos, tanto na fala quanto na música (KUTTRUFF, 2000, apud OGASAWARA, 2006). Normalmente para música a reverberação é desejada, pois a performance é reforçada e avivada. No entanto, em lugares com o uso da palavra como discurso, a reverberação deve ser menor em relação a música deixando o ambiente mais “seco” e inteligível.

Existe para cada ambiente um tempo de reverberação adequado dependendo de sua função e volume. A figura 7 apresenta valores de tempo de reverberação ótimos na frequência de 500 Hz para diversas atividades em função do volume do recinto.

O tempo de reverberação ótimo varia na frequência em função de um coeficiente de tolerância que considera pequenas diferenças para se evitar distorções. Prado, (1962) apud Vianna, (2015) propôs correções para o tempo de reverberação máximo e mínimo para diferentes bandas de frequência baseado no tempo ótimo de reverberação em 500 Hz. Os valores de ponderação multiplicados pelo TR ótimo em 500 Hz dão os limites máximos e mínimos. A tabela 2 abaixo apresenta os pesos sugeridos por Prado ao longo das frequências.

Tabela 2. Ponderações para Tempo Ótimo de Reverberação baseados no Tempo Ótimo de Reverberação de 500 Hz encontrado no gráfico de Bistafa para os limites máximos e mínimos ao longo da frequência. (PRADO, 1962 apud VIANNA, 2015)

Freq (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Limite máximo	1,8	1,3	1,2	1,1	1,2	1,2
Limite mínimo	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9

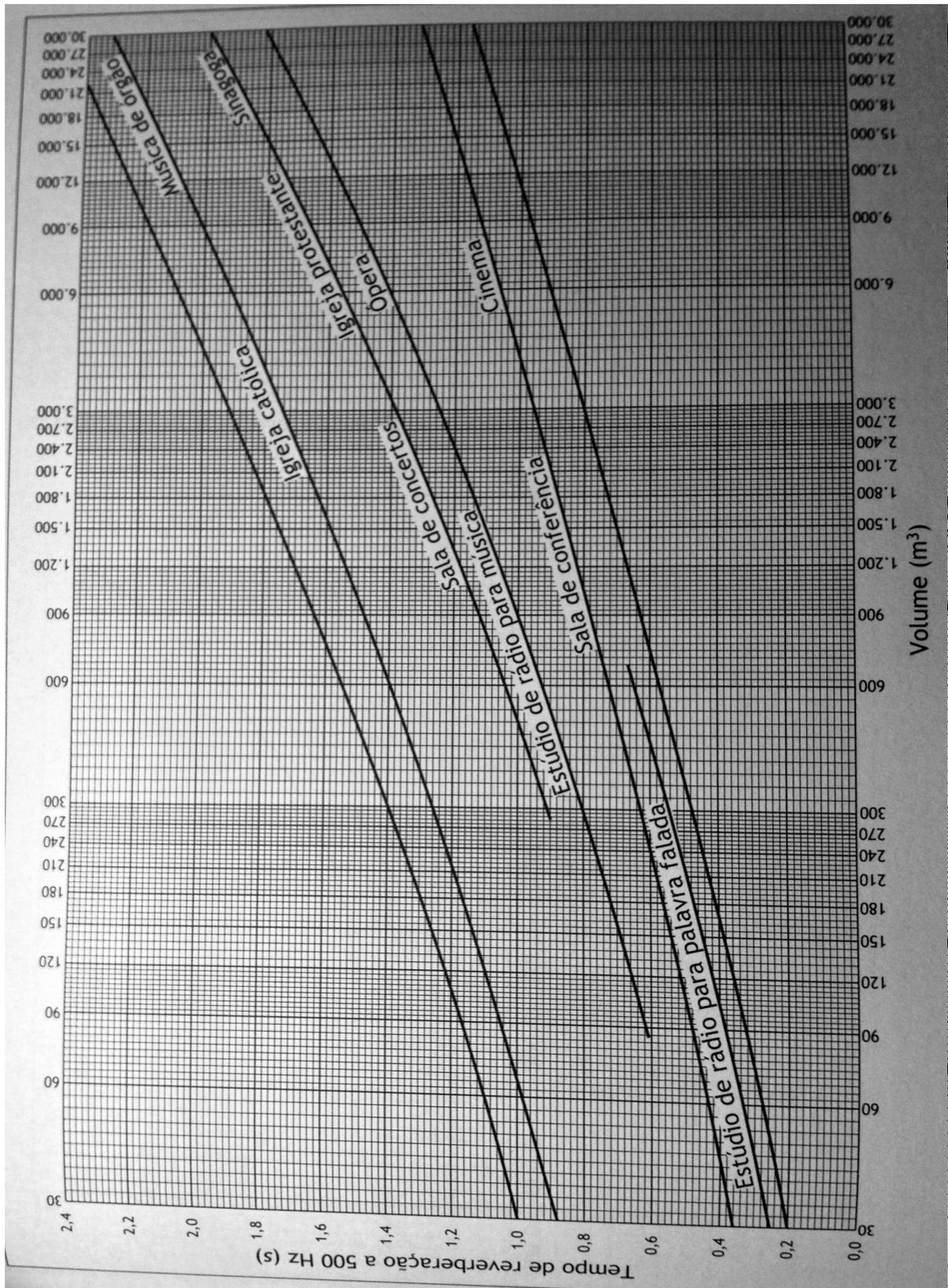


Figura 7 Tempo Ótimo de Reverberação para 500Hz, em função do volume e do uso. (BISTAFÁ, 2011)

2.6.2 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

O Tempo de Decaimento Inicial (EDT), do inglês Early Decay Time, é obtido da curva de decaimento sonoro do intervalo entre 0 e -10 dB. O tempo obtido é multiplicado por 6, ficando proporcional aos 60 dB do tempo de reverberação. Assim como o tempo de reverberação, sua unidade é segundos e medido em função da frequência. A figura 8 abaixo representa o Tempo de Decaimento Inicial na curva de decaimento.

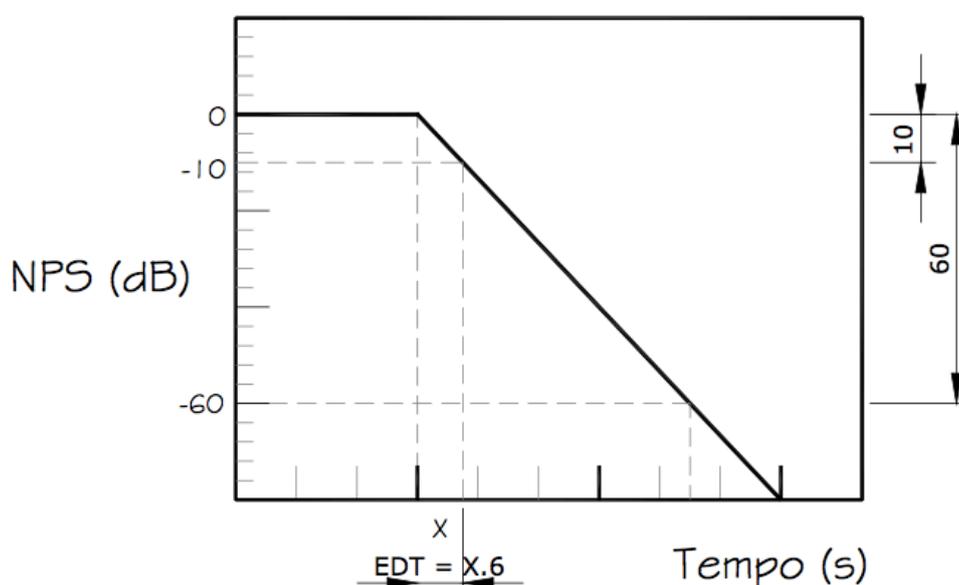


Figura 8. Representação do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) na curva de decaimento sonoro (OGASAWARA, 2006)

O tempo de decaimento inicial está principalmente ligado à quantidade de absorção na sala, assim como também é influenciado pela difusão dos materiais (OGASAWARA, 2006). A curva de decaimento sonoro normalmente não é uniforme e linear. Portanto, para um mesmo tempo de reverberação, o tempo de decaimento inicial pode apresentar valores distintos, assim como Mehta et al. (1999) demonstrou pela figura 9.

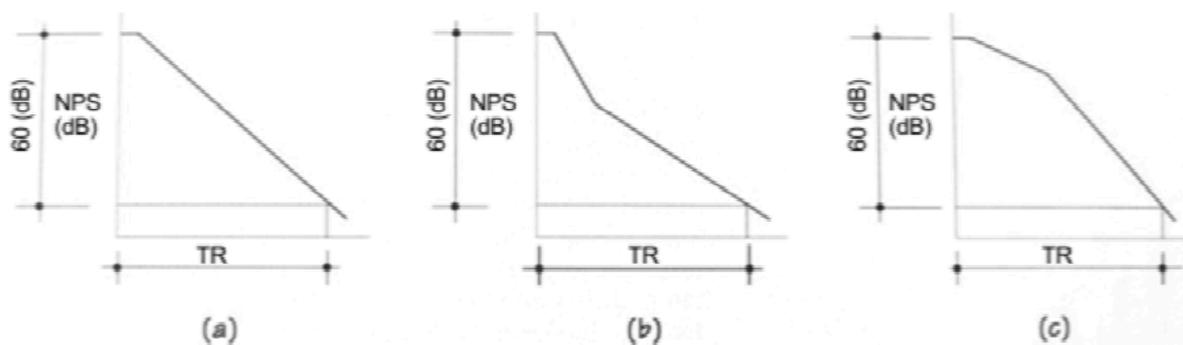


Figura 9. Gráficos de decaimento sonoro (a) uniforme; (b) inicial rápido, seguido de lento; (c) inicial lento, seguido de rápido. (MEHTA et al., 1999)

Este parâmetro está ligado à impressão subjetiva da reverberação, pois é nas primeiras reflexões que somos mais sensíveis. Se o EDT possuir um tempo menor que o TR, a sensação subjetiva de reverberação é diminuída, a situação contrária é análoga na qual o EDT maior que o TR causa a sensação de reverberação maior que a real.

2.6.3 Clareza (C_{80})

A Clareza é o parâmetro objetivo que quantifica a inteligibilidade da sala quanto a música. Ele é importante, pois as articulações entre notas musicais precisam ter uma nitidez tal que a música ao ser executada rapidamente seja inteligível, mas ao mesmo tempo em seu curso normal não aparente ser “seca” demais. Sua determinação matemática é a razão entre a energia da resposta impulsiva que chega ao ouvinte nos primeiros 80 milissegundos através do som direto somado às suas primeiras reflexões, pelo restante da energia após este tempo. A Clareza é representada pela equação 4 tendo sua unidade em decibel.

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

Equação 4 C_{80} (BOTTAZZINI, 2007)

Em termos gerais, (FABBRI ET AL, 1998, apud BOTTAZZINI, 2007) define uma faixa ótima de valores para Clareza entre -2 e +2 dB e sendo plenamente aceitável de -4 a +4 dB. A Clareza é dependente da distância fonte-ouvinte,

largamente influenciada pela forma da sala e de seus materiais componentes, mas não pelo volume do espaço. (BOTTAZZINI, 2007)

2.6.4 Definição (D_{50})

Definição (D_{50}) é o parâmetro acústico que quantifica a inteligibilidade da fala. Este parâmetro é determinado pela razão entre a energia da resposta impulsiva que chega ao ouvinte nos primeiros 50 milissegundos e a energia total podendo ser representado pela equação 5. Seu resultado é medido em percentagem que quanto mais próximo de 100%, mais definido e inteligível será o discurso ouvido.

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} [\%]$$

Equação 5 D_{50} (BOTTAZZINI, 2007)

Assim como a Clareza, seu valor depende da posição do ouvinte na sala. Quanto maior o número de reflexões até 50 milissegundos após a chegada do sinal direto, melhor a inteligibilidade do discurso. Normalmente, estas são consideradas como reflexões benéficas por que dão suporte ao som direto e contribuem para a audibilidade do som sem apresentar prejuízos em sua qualidade. (GRANADO JÚNIOR, 2002 apud BOTTAZZINI, 2007)

Os valores de D_{50} são ditos aceitáveis se acima de 50% (ISBERT, 1998, apud OLIVEIRA, 2015). No entanto, como afirmam (CUSTODIO, 2004, apud OLIVEIRA, 2015), se a fala é recurso importante no ambiente, o valor de definição deve ser igual ou maior que 65%.

2.6.5 Índice de Transmissibilidade da Fala (STI)

O Índice de Transmissibilidade da Fala é outro parâmetro que avalia a inteligibilidade do discurso na sala. Obtido da resposta impulsiva, é fundamentado nas frequências centrais de 125 Hz a 8 kHz, cobrindo a escala de frequência da fala. Este índice relaciona as possíveis causas de alterações para o bom entendimento do discurso como alto tempo de reverberação, ecos e ruído de fundo (BARBO,

2009). Segundo Oliveira (2015), a análise através do STI permite a distinção dos problemas para a melhora da comunicação da palavra falada. Seus valores variam de 0, péssima inteligibilidade, a 1, excelente inteligibilidade, e são avaliados para cada faixa de valores pela tabela 3 de acordo com a norma IEC 60268-16.

Tabela 3. Valores de STI com sua correspondente qualidade da inteligibilidade de acordo com norma IEC 60268-16.

STI	Inteligibilidade
0-0,3	Ruim
0,30-0,45	Pobre
0,45 - 0,6	Razoável
0,60-0,75	Bom
0,75-1	Excelente

3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ACÚSTICA DE SALAS

A simulação computacional é uma ferramenta muito útil na previsão acústica e auralização¹ de espaços. O funcionamento da simulação irá depender da volumetria e geometria da sala representada na inserção do modelo arquitetônico tridimensional no programa.

Cada superfície do projeto deve ser caracterizada com seu respectivo material, representado pelos coeficientes de absorção ao longo da frequência, e textura. Assim, após posicionar e caracterizar as fontes sonoras e posição de receptores, o programa pode simular a propagação de som no ambiente, assim como calcular os parâmetros acústicos.

Apesar do grande custo inicial para adquirir os programas de simulação, suas vantagens são inúmeras. Além de suas interfaces amigáveis, há cada vez maior precisão nos resultados, pois essa tecnologia vem sendo aprimorada desde 1960, ano em que a modelagem acústica foi proposta por Schroeder (VORLÄNDER, 2008 apud BARBO, 2009). As alterações no modelo podem ser realizadas sem grande esforço e rapidamente. Assim, a confecção ou aprimoramento de um modelo já existente podem ser aperfeiçoados mais facilmente, mesmo após obter os parâmetros acústicos calculados pelo programa. A possibilidade de previsão acústica de inúmeros modelos simultâneos também torna viável a utilização dos softwares melhorando sua relação custo-benefício.

3.1 Limiar diferencial (Just Noticeable Difference)

Existe uma margem no limiar subjetivo entre parâmetros acústicos chamado de Limiar Diferencial (JND) em que valores dentro desta faixa comparados com uma referência são equivalentes auditivamente. Bistafa (2011) diz que este limiar é a

¹ Auralização é um termo da área acústica e representa o processo de ouvir um áudio como se fosse reproduzido e ouvido na sala estudada. Tal arquivo de áudio é obtido por convolução do sinal com a resposta impulsiva do ambiente, a qual pode ser medida ou mesmo simulada através de técnicas de processamento de sinais em ambientes virtuais.

variação mínima da grandeza física capaz de provocar uma variação apenas perceptível da sensação subjetiva. Este limiar é importante para a comparação e validação entre os resultados simulados e medidos em campo, pois a partir dele é possível avaliar se o modelo virtual inserido no software de simulação é fidedigno à situação real. A tabela 4 apresenta os parâmetros acústicos avaliados com seu respectivo limiar diferencial representado em percentagem ou valor absoluto.

Tabela 4 Parâmetros acústicos e seu limiar diferencial (JND). Fonte: User Manual (Odeon, 2009)

Parâmetro	Definição	Limiar diferencial (JND)
TR (s)	Tempo de Reverberação	5%
EDT (s)	Tempo de decaimento inicial	5%
D50 (%)	Definição	5%
C80 (dB)	Clareza	1 dB
STI	Índice de transmissão de discurso	0.05

4 A ARQUITETURA DAS IGREJAS CRISTÃS AO LONGO DO TEMPO

A igreja cristã, antes da Reforma Protestante, acontecer possuía características arquitetônicas muito expressivas. No período Constantino, suas basílicas eram grandes, cobertas por telhados e muito reverberantes. Como afirma Jones (2011), na grande basílica de São Paolo Fuori em Roma datada de 386 d.C. foi medido 9,1 segundos de tempo de reverberação em médias frequências.

Nestes espaços grandes e reverberantes, a palavra falada não era entendida e a consequência foi o crescente abandono da liturgia falada em favor da liturgia musical. Segundo Jones (2011), neste tempo que surgiu o canto gregoriano. Como o canto permanecia no ambiente por muito tempo, cantar várias notas consecutivas criava harmônicos que ressonavam no local.

Já nos séculos IV a VI havia maior formalismo, cerimônias mais elaboradas e cultos cantados eram normais. A música cantada era executada por corais treinados tendo a música e texto executados por mais tempo. Além disso, a leitura das passagens foi encurtada e os sermões não eram mais pregados (JONES, 2011).

A acústica das igrejas góticas levou o desenvolvimento da polifonia no século IX. Nas músicas polifônicas as linhas melódicas independentes (quarta ou quinta acima ou abaixo) são executadas simultaneamente, conhecidas como segunda voz. Tempos de reverberação nas catedrais de York, Salisbury, Canterbury e Durham durante o período Gótico estão na média de 8 segundos em baixas frequências e 5,5 segundos em médias frequências, como observado em Jones (2011).

Martinho Lutero ao romper com o catolicismo através da Reforma Protestante, século XVI, trouxe a necessidade doutrinária de entender a palavra pregada. Assim, cultos não eram mais celebrados em latim, mas na língua nacional. Acusticamente, os templos evangélicos foram construídos para um menor tempo de reverberação para que o ambiente fosse mais “seco” e a pregação inteligível. A música litúrgica teve que se adaptar ao novo ambiente com melodias mais simples e tonais já que o discurso era o mais importante. As igrejas evangélicas também

possuem um pé-direito menor que as católicas, diminuindo o volume e deixando o ambiente menos “vivo”. Além disso, os templos não são mais tão ornamentados e preocupados com a aparência e esculturas de homens, já que não rezam mais a santos e não consideram o templo sagrado ou santo, mas que a atividade realizada no templo que o torna um espaço sagrado. No catolicismo, o simbolismo é forte havendo muito uso de ouro ornando as igrejas com esculturas e detalhes arquitetônicos que acabavam contribuindo na difusão do som. Já nas igrejas evangélicas, geralmente as paredes são lisas, sem pinturas e sem muitos detalhes.

Além da mudança do latim para a língua nacional nos cultos, a bíblia na Reforma Protestante também foi traduzida dando maior acessibilidade à população, não somente aos religiosos, o que trouxe maior independência e assim criando muitas denominações, entre elas está a vertente Batista.

Somente nos Estados Unidos, já existem 10 mil igrejas evangélicas da denominação batista (JONES, 2011). Dois elementos definem os Batistas no Cristianismo: um é a ênfase do batismo de imersão nas águas como um ato extremamente importante na vida cristã, e o outro é a centralidade na palavra e a pregação e prática da correta doutrina. Mesmo dentro dos Batistas, existe ainda variedade de crenças, por exemplo, em algumas igrejas mais conservadoras, como os batistas primitivos, instrumentos musicais não são permitidos durante os cultos, enquanto na maioria das igrejas durante o culto de celebração a música contemporânea é executada, como exemplifica Jones (2011).

4.1 Acústica de igrejas evangélicas

Três tipos de atividades deveriam ser considerados ao projetar acusticamente uma igreja evangélica. Existem a palavra falada do púlpito para a congregação, o canto congregacional, e a performance da música originada do palco e ouvida pela congregação. Igrejas evangélicas por contemplar música e discurso são espaços multi-uso e o design acústico e eletro-acústico sempre será uma necessidade.

O pé direito deve estar entre 3 e 4,5 metros para a congregação poder ter retorno do que cantam, isso significa reflexões de volta na congregação na faixa de

16 a 24 milissegundos reforçando o canto. Se as reflexões sonoras forem produzidas mais cedo que 16 milissegundos, elas serão percebidas como irritantes e se forem mais tardias poderão ser ouvidas como sons independentes, como ecos (JONES, 2011).

O ideal é que o teto seja irregular para provocar um som mais difuso e não simplesmente reto. A difusão é importante na melhor distribuição do som gerado no palco para a congregação dando uma maior sensação de envolvimento para aqueles que cantam. Se não for possível um pé direito das dimensões citadas, podem ser utilizados difusores pendentes no teto ou ainda refletores.

O tempo de reverberação pode ser controlado com absorvedores sonoros estrategicamente colocados no fundo e paredes laterais assim como usar cadeiras estofadas. No entanto, essa necessidade se dá dependendo das frequências a serem tratadas, bem como do tipo de funcionamento do absorvedor acústico para uma melhor eficiência no tratamento acústico.

A terceira atividade considerada é a acústica da performance musical que o som deve ser direcionado à congregação. Assim, superfícies refletoras (sejam elas conchas portáteis ou parte da arquitetura das superfícies internas) sobre a banda deveriam ser projetadas. A altura não é tão crítica como aquela projetada para o canto congregacional, mas de acordo com Jones (2011) fica na faixa de 2 a 4,5 metros.

O fundo da igreja deve ser controlado para que as reflexões tardias não atrapalhem nem o pregador, nem o coral e instrumentistas. No entanto, Jones (2011) também afirma da existência da diferença entre músicos e pregador. Enquanto, o pregador precisa de um ambiente “seco” para ser entendido, os músicos preferem um espaço mais reverberante para o preenchimento da música.

É um grande desafio adequar uma igreja acusticamente, pois como espaço multi-uso, o tratamento para a palavra falada requer um ambiente mais “seco”, enquanto a música nos momentos de adoração para uma melhor performance pede mais reverberação para tanto os instrumentistas e cantores, quanto para a

congregação. No entanto, a inteligibilidade da fala é o objetivo principal com o ouvir e o entender da Palavra acima da música.

Na tabela 5 encontram-se valores para o tempo de reverberação de igrejas protestantes com dimensões semelhantes entre si.

Tabela 5 TRs para igrejas protestantes com volumes semelhantes (DESARNAULDS, 2002)

			TR [s]						
	Localização	Volume [m ³]	125	250	500	1000	2000	4000	
Igrejas Protestantes	Cheseaux	Suíça	575	1,17	1,51	1,75	1,84	1,86	1,60
	Romanel	Suíça	477	1,17	1,51	1,75	1,84	1,86	1,60
	Heslington	Inglaterra	2000	1,40	1,59	1,75	1,65	1,49	1,14

5 METODOLOGIA

Para avaliar a performance acústica da Primeira Igreja Batista de Florianópolis, alguns passos foram seguidos como mostrado no fluxograma da figura 10.

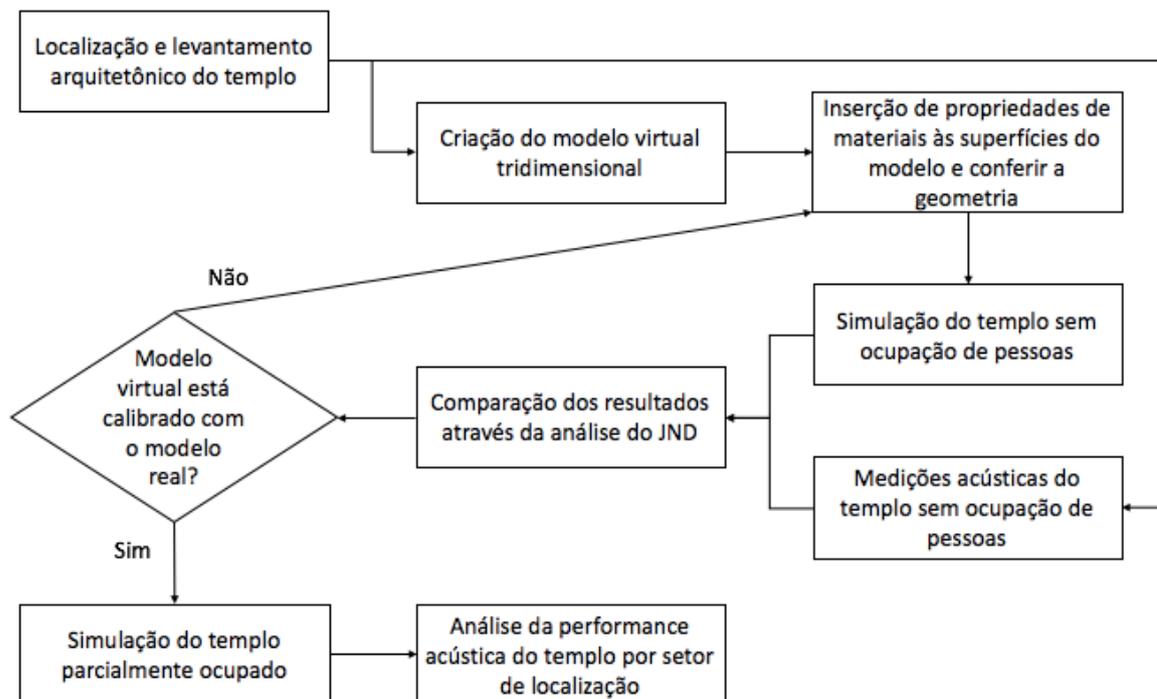


Figura 10 Passo a passo desde a localização até a análise da performance acústica da igreja. Fonte: Elaborado pela autora.

Primeiramente foi feito o reconhecimento do local através de visitação à igreja. Pelo plano diretor da cidade seu zoneamento foi identificado e suas características arquitetônicas levantadas.

Depois de localizar a igreja e levantar seus dados arquitetônicos e de zoneamento, medições acústicas foram realizadas no templo para sua caracterização acústica quando vazia. Estes dados foram usados para calibrar o modelo virtual da igreja.

Com as dimensões do templo em mãos, o modelo tridimensional foi criado no computador e inserido no software de simulação de acústica de salas, Odeon.

A partir de então, suas superfícies caracterizadas com seus respectivos materiais e com o posicionamento da fonte e dos microfones, a simulação computacional do templo sem ocupação de pessoas pôde ser realizada.

Os resultados simulados foram, portanto, comparados com os resultados medidos in loco num processo iterativo de ajuste de melhores materiais que caracterizassem o modelo real até que o modelo virtual correspondesse ao real utilizando o critério de JND para calibração do parâmetro de tempo de reverberação.

Com a validação do modelo virtual, a performance do templo com ocupação parcial foi simulada. Os resultados gerados foram analisados por setores de localização.

5.1 Procedimentos metodológicos

Esta seção mostra quais foram os procedimentos até que a performance acústica da igreja pudesse ser avaliada.

5.1.1 Localização

A Primeira Igreja Batista de Florianópolis é uma igreja protestante fundada em 1942 localizada na Rua Tenente Silveira, no centro de Florianópolis (SC). De acordo com o plano diretor da cidade, a igreja pertence a Área Mista Comercial (AMC) e Área Residencial Mista (ARM). Sua planta de situação e fachada vista da Rua Tenente Silveira são representadas pelas figuras 11 e 12 respectivamente.

Aos arredores da igreja batista estão localizados edifícios comerciais, dois colégios de ensino fundamental e médio e alguns apartamentos residenciais. Sua fachada está diretamente voltada a Rua Tenente Silveira que possui grande movimento durante a semana. No entanto, como a igreja está situada no centro comercial da cidade, a circulação de pessoas e automóveis é reduzida consideravelmente nos fins de semana. Neste período de menor circulação, das tardes de sábado a domingo, o bairro passa de um lugar ruidoso para silencioso e vazio.

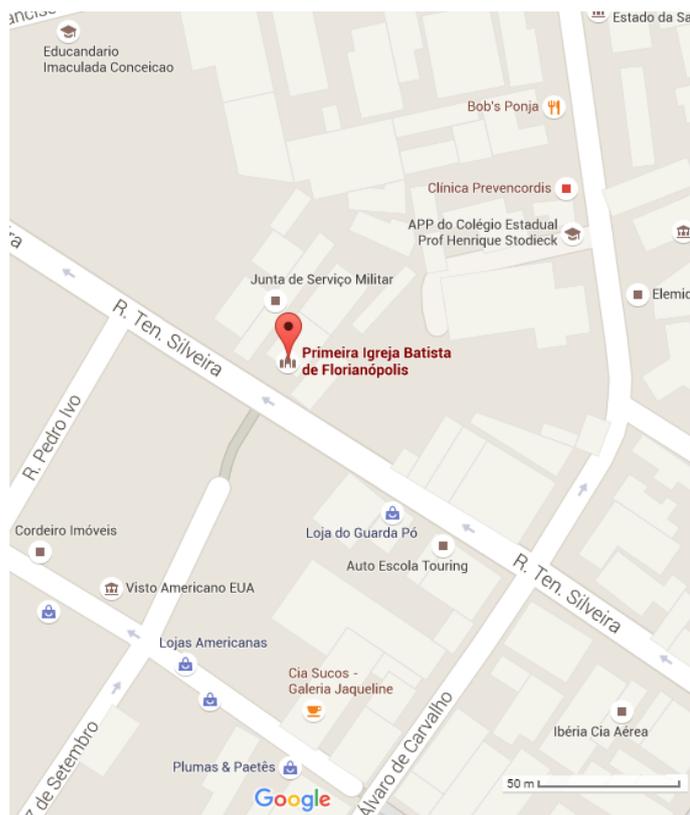


Figura 11 Planta de situação da Primeira Igreja Batista de Florianópolis. Fonte: Google Maps



Figura 12 Vista da fachada da igreja pela Rua Tenente Silveira. Fonte: Google Maps

Os cultos em que há maior intensidade de geração sonora acontecem nos domingos pela manhã e noite e a maior preocupação do templo é que o isolamento acústico seja o suficiente para que cumpra a norma NBR 10.151 – Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento. No entanto, o isolamento acústico não foi avaliado no corpo deste TCC, sendo este responsável apenas pela avaliação interna do espaço.

5.1.2 Levantamento arquitetônico

O levantamento arquitetônico é o ponto de partida para uma melhor compreensão do espaço estudado. Dados como geometria, volumetria, composição de materiais, capacidade de pessoas e mobiliário são levantados e a partir deles, são confeccionados a planta, cortes e seu projeto tridimensional. Este levantamento de dados é fundamental para os cálculos analíticos, análise dos dados medidos no local e elaboração do modelo virtual para o software de simulação.

As características mais pontuais do espaço como dimensionamento e composição estão na tabela 6 abaixo.

Tabela 6 Detalhes técnicos da igreja protestante em estudo

DETALHES TÉCNICOS	
Volume	1335 m ³
Largura	11,5 metros
Comprimento	20 metros
Altura	5 metros
Área do palco	32 m ²
Capacidade	338 pessoas
Volume por assento	4 m ³ /assento
Piso	Madeira e no mezanino carpete
Piso do palco	Carpete
Paredes	Alvenaria
Teto	Forro de PVC
Portas de acesso	Madeira
Assentos	Bancos de madeira e cadeiras estofadas

Com o crescimento da sua membresia, foi acrescentado um mezanino em uma estrutura metálica para comportar mais pessoas. A sua planta apresenta geometria retangular com paredes de alvenaria, teto com forro de PVC, bancos de madeira e poltronas estofadas. O seu palco de madeira é elevado, possui uma abertura para o instrumento musical bateria e é revestido de carpete, assim como o revestimento do mezanino. Localizadas ao lado do palco estão duas portas de modelo “vai-e-vem” de madeira maciça composta de uma folha e a frente do palco está disposta uma mesa de madeira maciça. Já o piso da nave é levemente inclinado em menos de 1% e composto por tacos de madeira. Com o problema de isolamento acústico, suas janelas foram revestidas de placas de gesso se tornando paredes cegas, restando somente a janela da fachada que interiormente é coberta por uma cortina leve. O revestimento das paredes é de reboco liso pintado e o forro composto de PVC que esconde a estrutura de tesouras do telhado. O pé-direito do palco até o mezanino é de 5 metros que então eleva-se em 1,5 metros acima do mezanino expondo a última tesoura do telhado. A iluminação do ambiente interno é artificial e acontece por luminárias fluorescentes tubulares organizadas em quatro filas pela extensão de comprimento do templo. A igreja possui de instrumentos eletrônicos que reforçam o som como alto-falantes no palco, abaixo e acima do mezanino e microfones favorecendo a inteligibilidade e preenchimento do som. No entanto, neste TCC não houve avaliação do sistema eletrônico, somente das características arquitetônicas do espaço ficando como sugestão para futuros estudos.

As figuras 13, 14 e 15 são fotos do espaço interior do templo da igreja.

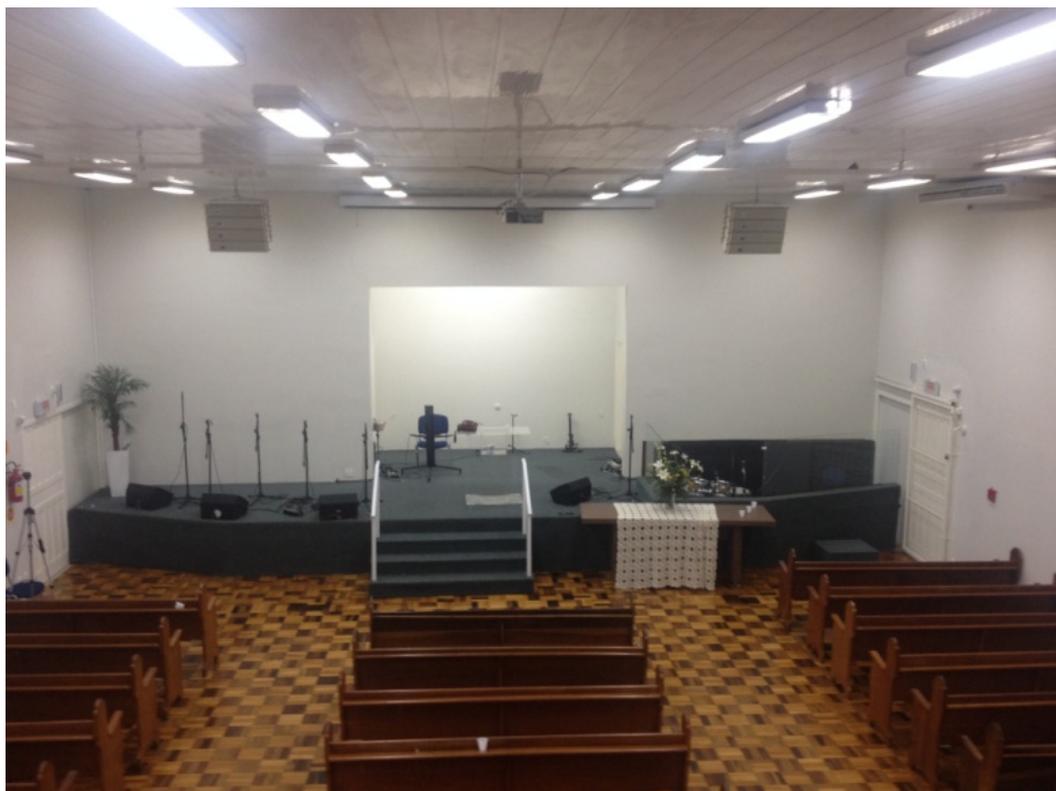


Figura 13 Foto da igreja vista do mezanino tirada pela autora



Figura 14 Foto da igreja vista do palco tirada pela autora

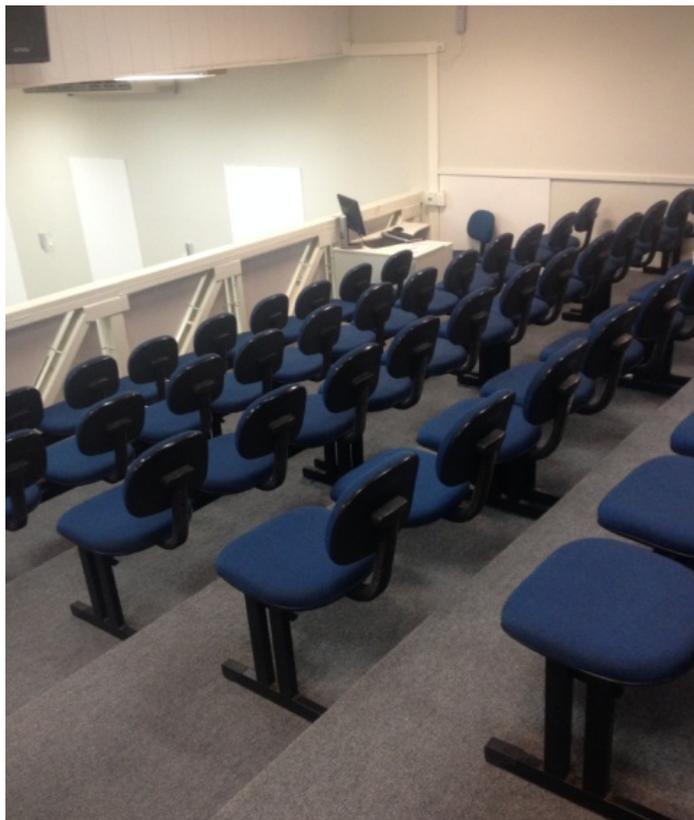


Figura 15 Foto do mezanino tirada pela autora

O levantamento dos materiais de cada superfície no recinto é uma das principais informações a serem inseridas no programa de simulação acústica, além de possibilitar o cálculo analítico do tempo de reverberação de início. A relação de áreas dos materiais e seus coeficientes de absorção sonora em função da frequência é identificada na tabela 7.

A referência dos coeficientes de absorção foi tirada da literatura. O forro de PVC foi encontrado na tese de Barbo (2009), adulto sentado em banco de igreja de Prado (1962) apud Vianna (2015), gesso acartonado de Carvalho (2006) apud Vianna (2015) e o restante dos materiais e unidades foram de Bistafa (2011).

Os coeficientes de absorção foram contabilizados por unidade foram transformados em coeficientes por unidade de área de absorção, pois o software Odeon não reconhece objetos unitários, somente superfícies.

Tabela 7 Materiais, seus coeficientes de absorção ao longo da frequência e área ou unidade correspondente. Fonte: tabela elaborada pela autora.

Material	Coeficiente de absorção (α)						Área (m ²)
	125	250	500	1000	2000	4000	
Ar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-
Carpete (mezanino e palco) – 15009	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	124,7
Forro de PVC - 15036	0,25	0,23	0,20	0,20	0,11	0,10	263,5
Gesso Acartonado - 15023	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	19,4
Estrutura Metálica (estimado por concreto) – 15001	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	133,3
Parede Alvenaria Rebocada – 15004	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	306,6
Madeira Comum* (portas, bancos e piso) – 15005	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10	216,5
Persiana (cortina de tecido leve) – 15007	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35	16,2
<i>Unidade</i>							
Adulto Sentado em Banco de Igreja - 15022	0,23	0,25	0,31	0,35	0,37	0,35	
Cadeira Estofada Vazia – 15008	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24	
Cadeira Estofada Ocupada – 15014	0,39	0,38	0,38	0,38	0,42	0,42	

Unidade	Igreja vazia	Igreja cheia	Igreja parcialmente ocupada (73%)
Adulto Sentado em Banco de Igreja - 15022	0	230	138
Cadeira Estofada Vazia – 15008	108	0	21
Cadeira Estofada Ocupada – 15014	0	108	87

5.1.3 Equipamentos e programas utilizados na medição experimental

O método experimental avaliou o comportamento acústico da igreja através da resposta impulsiva. A coleta de dados do templo procurou seguir as recomendações da norma ISO 3382/2009 que a partir das medições, parâmetros como o tempo de reverberação puderam ser quantificados.

Os equipamentos utilizados para a medição experimental foram:

- Sonômetro SOLO medidor de nível de integração e registro de dados 01 dB Acoustics

- Calibrador para microfone
- Microfone
- Notebook
- Software dBbati32 da 01dB
- Balões de festa de tamanhos gigante da marca Art Latex, aproximadamente 46 cm de diâmetro com balão cheio em 90% conforme fabricante

O balão de festa foi utilizado como um gerador de sinal impulsivo que ao ser estourado excita o ambiente retornando a resposta impulsiva. A resposta impulsiva então é captada pelo microfone e sua curva de energia ao longo do tempo para cada frequência transferida ao notebook. A análise aconteceu para bandas de frequência de oitava nas frequências de 250 a 4000 Hz. Assim, o software dBbati pôde calcular os dados recebidos através das curvas de decaimento e retornar os parâmetros acústicos objetivos da sala para cada posição de microfone. A figura 16 representa os equipamentos utilizados durante uma medição.

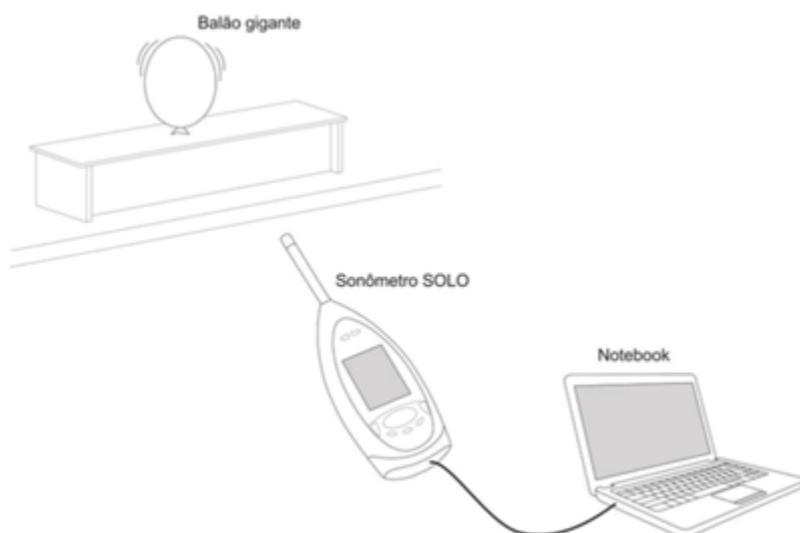


Figura 16 Equipamentos usados durante a medição da resposta impulsiva (OLIVEIRA, 2015)

A fonte sonora balão foi posicionada na altura de 1,5 metros e os microfones a 1,2 metros. O microfone foi inicialmente calibrado. Foram escolhidos sete pontos para captação da resposta impulsiva na sala e em cada ponto o sinal impulsivo foi excitado três vezes. A determinação do tempo de reverberação nesses sete pontos foi feita para uma única posição de fonte sonora. A escolha destes pontos procurou caracterizar o espaço em seus três lugares distintos: o centro da nave, abaixo e sobre o mezanino.

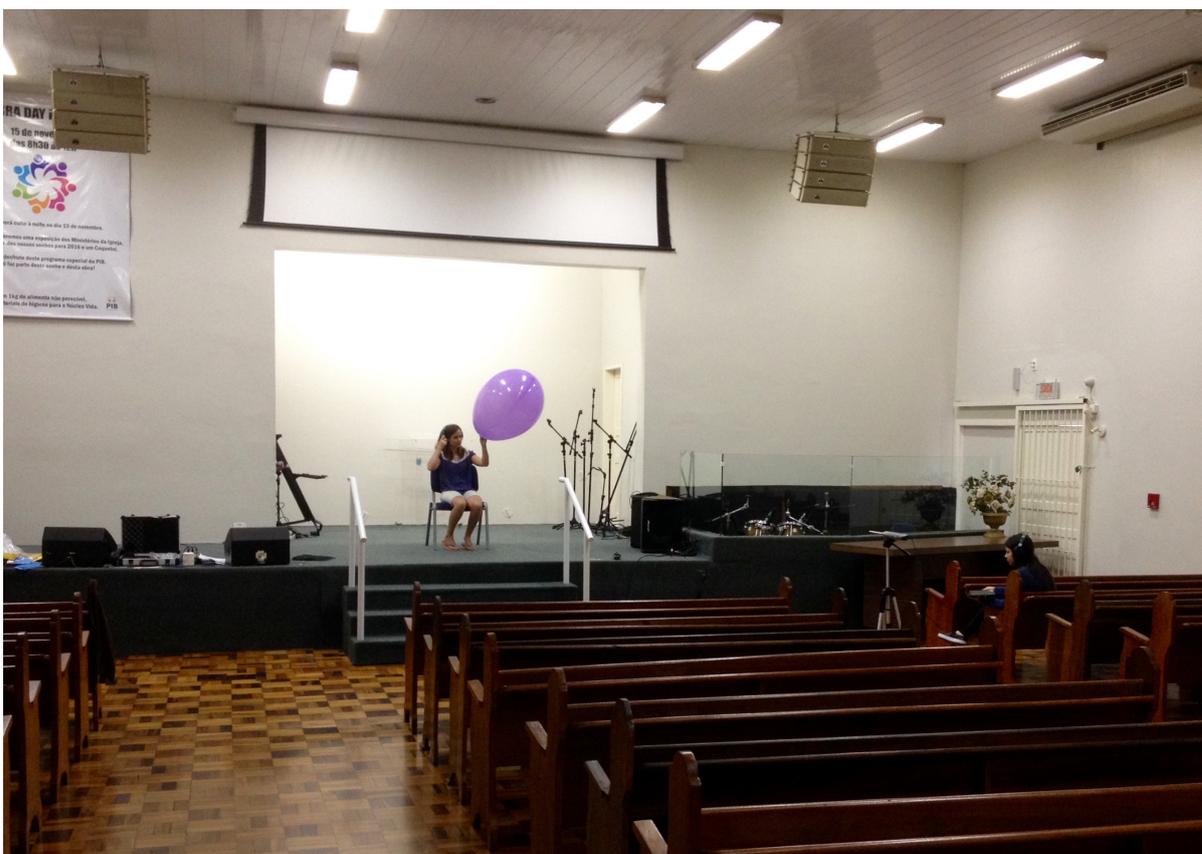


Figura 17 Foto da medição acústica tirada pela autora

As posições dos pontos de medição e fonte estão representadas nas plantas baixas representadas pelas figuras 15 e 16.

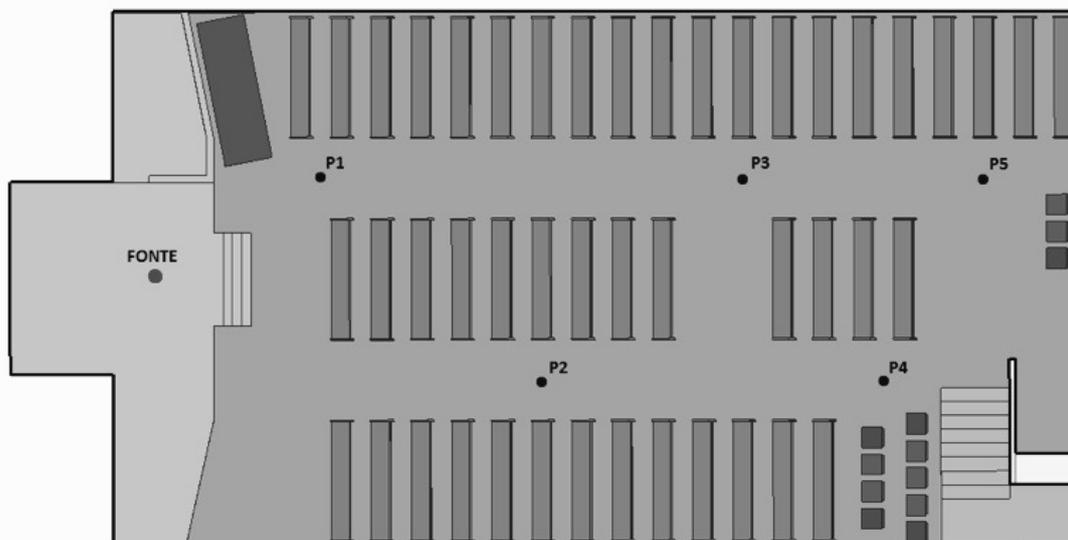


Figura 18 Posicionamento da fonte e dos microfones na captação do sinal impulsivo na parte térrea.
Fonte: planta elaborada pela autora.

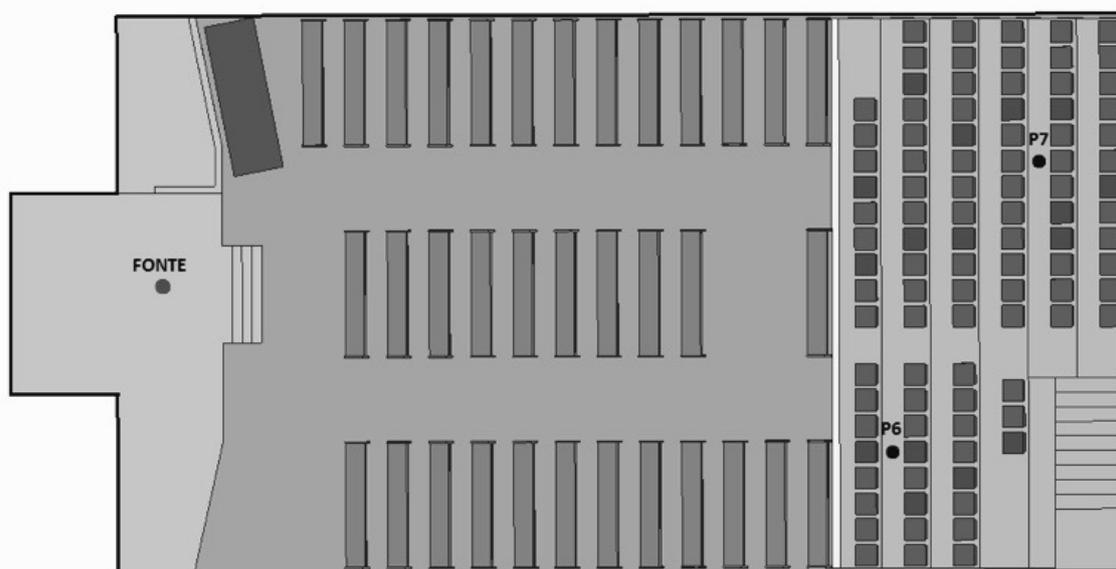


Figura 16 Posicionamento da fonte e dos microfones na captação do sinal impulsivo no mezanino.
Fonte: planta elaborada pela autora.

Os pontos escolhidos ficaram no corredor pela facilidade de medição na parte da nave e no mezanino entre fileira de poltronas.

Os posicionamentos P1, P2 e P3 representam a parte central do templo. Quanto aos posicionamentos P4 e P5, eles são pontos representativos da área abaixo do mezanino. O restante dos pontos, P6 e P7, caracterizam o mezanino.

As informações sobre as medições acústicas do ruído de fundo no templo e condições do ambiente no dia estão detalhadas no apêndice 1 e 2.

5.2 Simulação computacional de acústica de salas

A simulação computacional pelo software Odeon é baseado na acústica geométrica com métodos híbridos, contemplando das baixas às altas frequências, através do traçado de raios e imagem das fontes virtuais. O programa foi desenvolvido para simulação e medição da acústica de salas possibilitando a acústica de ser prevista, ilustrada e ouvida.

5.2.1 Procedimento de uso do software Odeon

O primeiro passo ao abrir o software Odeon, versão Combined, é inserir o modelo arquitetônico tridimensional da igreja. Este modelo pode ser confeccionado pelo próprio editor do programa, Odeon Editor, ou importado de outros programas computacionais como AutoCad² e SketchUp³.

Primeiramente, o modelo virtual foi criado em planta 2D usando o AutoCad, depois tridimensionado em SketchUp e enfim importado⁴ para o software de simulação acústica Odeon Combined.

Após inserido o modelo geométrico do templo, as características acústicas de cada superfície foram inseridas. Cada tipo de material já havia sido organizado em camadas no programa SketchUp. Assim, como muitas superfícies são geradas, organizar o conjunto em camadas com mesmas características e propriedades

² AutoCad é um software do tipo CAD — computer aided design ou desenho auxiliado por computador - criado e comercializado pela Autodesk, Inc.

³ SketchUp é um software para a criação de modelos em 3D no computador pertencente a Google.

⁴ Um plugin é disponível pelo site do Odeon para conversão de modelos de SketchUp para Odeon

facilitam o processo de listagem de materiais. Os materiais são definidos no programa por seus coeficientes de absorção nas oitavas de 63Hz a 8000Hz e também por seu índice de espalhamento, que não foi alterado, mas utilizado como default do software, com o valor de 0,05.

Tendo todas as superfícies caracterizadas, devem-se posicionar fontes e receptores. No primeiro momento, o objetivo do modelo virtual era ser validado pelas medições acústicas *in loco*. Portanto, as posições de fonte e dos sete microfones foram colocados nas mesmas posições medidas. A fonte foi considerada em sua directividade como omnidirecional e com um ganho de 120 dB de potência sonora.

Após esse procedimento, uma rápida estimativa através de cálculos analíticos do tempo de reverberação, uma visão geral do uso de materiais, absorção em potencial de uso, área estimada e o coeficiente de absorção de cada material são disponibilizados pelo software e ilustrados por gráficos.

Antes de rodar a simulação no ambiente interno representado pelo templo, são necessárias a configuração para o espaço proposto e a precisão de cálculo desejada. No menu de configurações há três níveis de cálculo pré-estabelecidos em ordem de precisão: pesquisa, engenharia e precisão. Quanto maior a precisão, maior tempo exigido para simulação. Para as configurações de cálculo de performance do templo, o nível estabelecido foi de precisão, além de aumentados a duração da resposta impulsiva para 3000 milissegundos e da densidade desejada na reflexão tardia para 999999/ms.

Para verificar se as configurações atendem aos requisitos para o ambiente proposto, o cálculo de uma estimativa global do tempo de reverberação pode ser realizado antes da simulação em si. Uma curva de decaimento é simulada e seus resultados são derivados a partir do momento que o operador do programa avaliar que o decaimento esteve o mais próximo da homogeneidade. Assim, para cada banda de frequência, curvas de decaimento da pressão sonora ao longo do tempo são ilustradas, bem como o tempo de reverberação global e a distribuição do caminho livre.

Enfim, a simulação dos parâmetros acústicos começa nesta próxima etapa. Ela é dividida em tarefas que em cada uma delas são selecionados a fonte em análise e o receptor. Para o espaço da igreja, a medição aconteceu para uma única fonte e sete posicionamentos de receptor, ou seja, sete tarefas para simulação. Em cada tarefa também é possível selecionar as opções de malha⁵ e resposta de múltiplos pontos. No modelo simulado, a opção de resposta de múltiplos pontos foi selecionada em uma das tarefas, pois a partir dela é possível avaliar todos os parâmetros acústicos em todos os pontos simultaneamente. Ainda mais, a partir desta opção, os resultados medidos *in loco* podem ser inseridos no programa, comparados visualmente em gráficos com a simulação e calculado o JND entre os resultados. Com o JND dentro dos limiares subjetivos, pôde então ser validado o modelo virtual simulado.

5.2.2 Validação do modelo e as variáveis envolvidas

A validação do modelo simulado com o real não é sempre simples, pois existem diversas variáveis influenciadoras no processo. Antes de partir para as variáveis do programa, deve-se avaliar se os resultados de medição são coerentes com o espaço proposto.

Quanto a avaliação de variáveis do programa, a geometria e materiais componentes são decisivos nos resultados. O modelo geométrico procurou ser o mais fiel possível, baseado nas dimensões medidas com trena eletrônica e inserido em seu interior o mobiliário existente, como bancos e mesa.

Já a informação dos materiais foi retirada da bibliografia existente. Como existem muitas JND dentro do limiar subjetivo.

⁵ Os valores dos parâmetros acústicos são representados em escalas de cores em toda a extensão do modelo. Antes de simular esta opção, é necessária sua configuração.

5.2.3 Validação de modelo virtual através dos resultados medidos versus simulados

O objetivo da simulação era ser validada com os resultados medidos. Tentou-se ao máximo transferir as mesmas condições na medição para a simulação. Portanto, o espaço religioso sem ocupação de pessoas foi representado com seus materiais componentes, características arquitetônicas e a não presença de pessoas. O JND alcançou valores favoráveis no parâmetro acústico de tempo de reverberação com pontos avaliados na faixa de frequência de 125 Hz a 4000 Hz.

5.2.3.1 Tempo de Reverberação (TR)

Para comparação de igrejas com volume similar e apresentando não ocupação de pessoas, os valores de TR para igrejas protestantes da tabela 5 junto ao TR da Igreja Batista sem ocupação de pessoas estão representados pela figura 19 para verificar se valores são coerentes e para uma melhor crítica da igreja estudada. Os TRs para a Primeira Igreja Batista de Florianópolis apresentam valores similares ao longo da frequência quando comparada a estas outras igrejas.

Sabendo que os valores medidos de TR são coerentes, simulação pôde ser comparada com a medição. Sendo assim, as curvas de medição e simulação representam a média de tempo de reverberação (TR) nos sete pontos na faixa de frequência entre 125 e 4000 Hz como se pode ver na figura 20.

Os valores simulados versus medidos para TR são muito próximos entre si diferenciando-se apenas nas casas decimais. Em baixas frequências, a curva simulada fica abaixo da medida. Já entre 500 Hz e 2000 Hz, este quadro se inverte com a simulação acima da medição e seguindo em alta frequência as curvas se aproximam.

TR em algumas igrejas protestantes

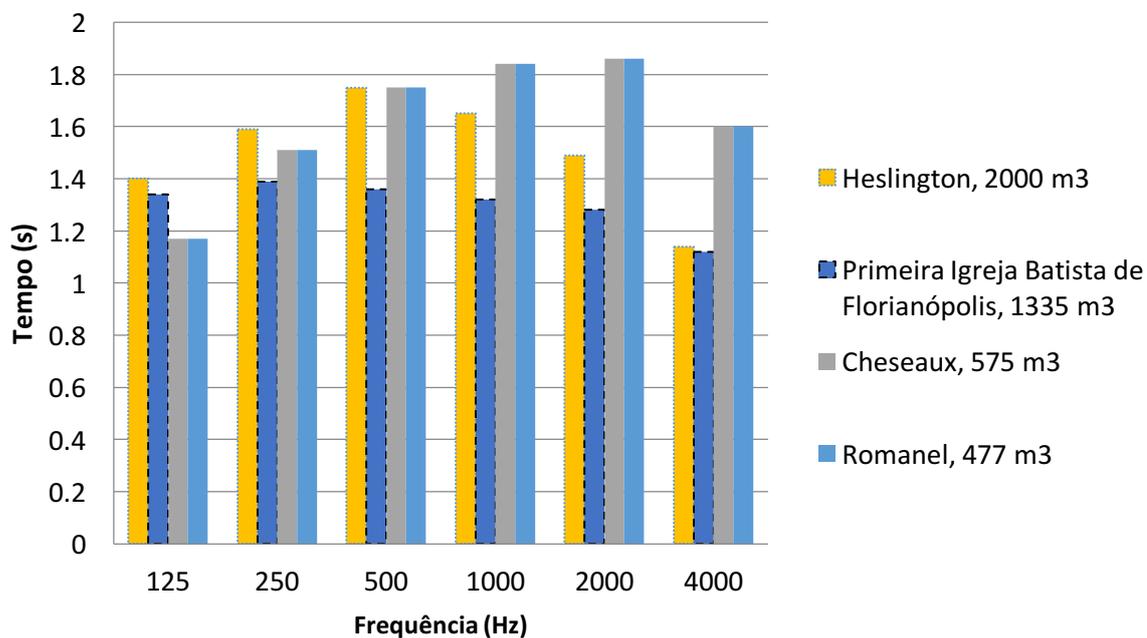


Figura 19 Comparação de TRs com outras igrejas protestantes ao longo da frequência

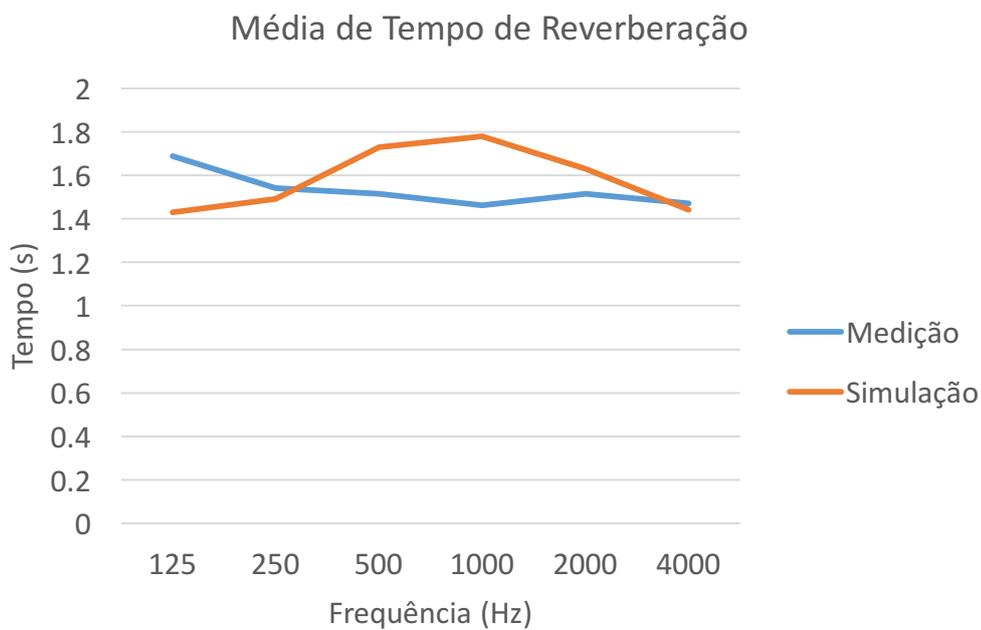


Figura 20 TR médio para medição e para simulação ao longo da frequência

5.2.3.2 Limiar Diferencial (JND)

Os resultados de limiar diferencial (JND) médio pelo software Odeon para cada ponto são representados pela tabela 8.

A média dos valores de JND para TR nos sete pontos ficaram entre 1,7 e 2,9 JNDs tendo valores altos para baixa frequência de 125 Hz e 1000 Hz. Os valores para as frequências de 250 Hz e 4000 Hz são os mais confiáveis. Essa maior diferença nestes valores pode ter se dado pela maior variação entre os três resultados medidos e a média não ter ficado tão representativa em baixas frequências no caso de 125 Hz. Quanto a grande diferença em 1000 Hz, os altos valores podem se remeter ao baixo coeficiente de absorção nesta frequência para as superfícies em geral. Contudo, na avaliação de acústica de salas com os materiais, este foi o modelo virtual simulado mais próximo ao real.

Tabela 8 Distribuição do JND para cada frequência e sua média para o parâmetro acústico TR nos sete pontos medidos na igreja

TR (s) JND Ponto	Frequência (Hz)						JND médio
	125	250	500	1000	2000	4000	
1	3,0	1,7	2,6	4,1	0,1	0,4	2,0
2	5,2	3,1	1,7	4,5	0,5	0,4	2,6
3	6,2	0,6	3,4	4,8	1,5	0,8	2,9
4	4,4	0,4	2,2	3,4	2,0	0,1	2,1
5	1,2	1,2	3,5	4,7	3,2	0,6	2,4
6	0,2	1,9	3,6	4,8	2,4	0,4	2,2
7	0,9	0,1	3,0	4,4	1,3	0,5	1,7

Na avaliação dos resultados da performance acústica da igreja protestante foi considerado que o modelo virtual estivesse calibrado com a situação real da igreja. Na comparação entre resultados medidos e simulados, vale ressaltar que em 125 Hz o TR para a simulação deveria ser um pouco maior e para 500Hz a 2000 Hz, o TR simulado deveria ser menor. Esta diferença pode repercutir nos outros parâmetros acústicos avaliados, pois há uma certa dependência entre eles. Geralmente quanto maior o TR, maior o EDT e menores C_{80} , D_{50} e STI.

6 PERFORMANCE DA IGREJA PROTESTANTE DE MÉDIAS DIMENSÕES

Depois de validado o modelo virtual com o modelo real e suas medições, a acústica interna durante os cultos pôde ser simulada e avaliada. Como a ocupação de pessoas tem grande influência na absorção do espaço, considerou-se para estimativas de cálculo que durante os cultos a ocupação esperada seria de 70% da capacidade total. Ainda, para uma maior caracterização do espaço, na performance simulada foram posicionados 18 pontos nos lugares de palco, mezanino, abaixo do mezanino e parte central como representados pelas figuras 21 e 22.

Para uma melhor caracterização de localização igreja, um conjunto de pontos receptores representou cada setor como pode ser visto na tabela 9.

Tabela 9 Representatividade dos pontos receptores nos setores

SETORES	Pontos de receptores						
Parte central	1	4	5	7	8	9	11
Abaixo do mezanino	2	3	6	10			
Mezanino	12	13	14	15	16		
Palco	17	18					

6.1 Geometria do templo

Não somente os materiais e volume influenciam na distribuição e qualidade acústica de um lugar, a geometria também é decisiva. O templo estudado possui características boas e algumas que podem ser melhoradas na propagação do som.

Listando as boas características tem-se o púlpito, lugar de proclamação da palavra no palco, que é bem localizado, pois está elevado e próximo às paredes. O som posicionado em elevação tem melhor alcance pela congregação e estando próximo às paredes o som direto é reforçado pelas reflexões.

As paredes de alvenaria, chão de madeira e forro são reflexivos espalhando e reverberando o som para os assentos traseiros mais afastados da fonte. O tempo de reverberação é controlado pela absorção das pessoas e das cadeiras estofadas e com o fundo parcialmente coberto por uma cortina leve.

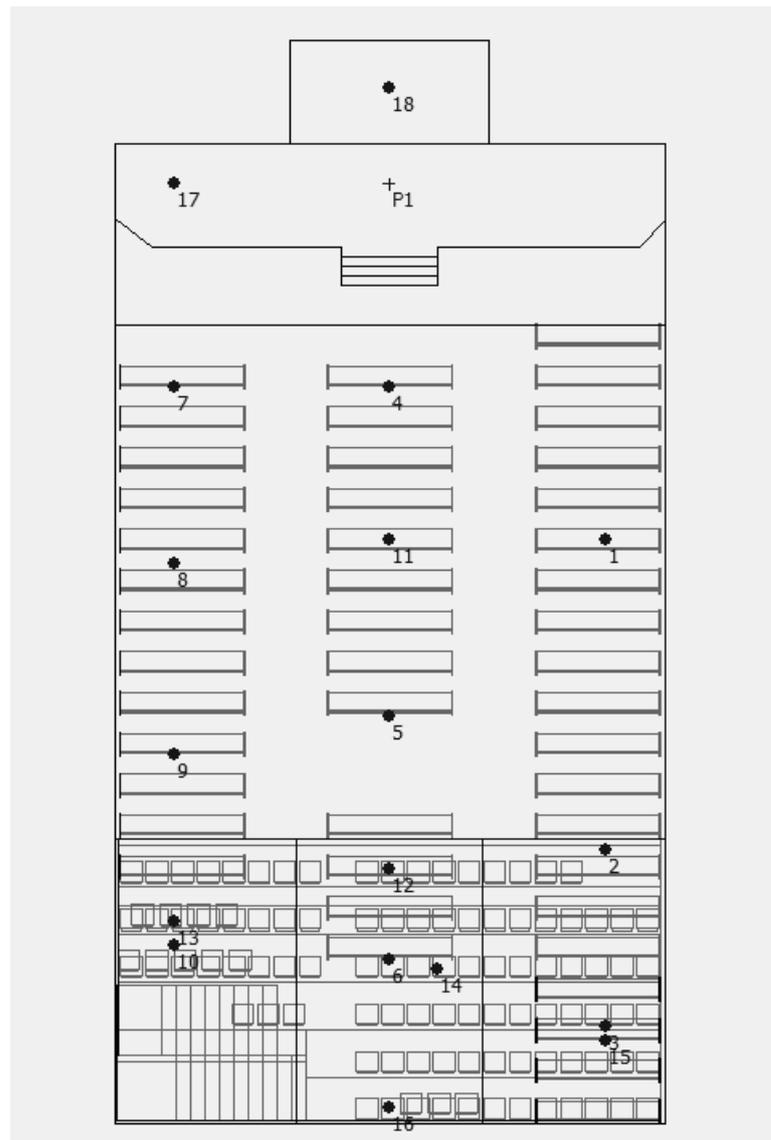


Figura 21 Planta baixa da igreja. Fonte: Odeon.

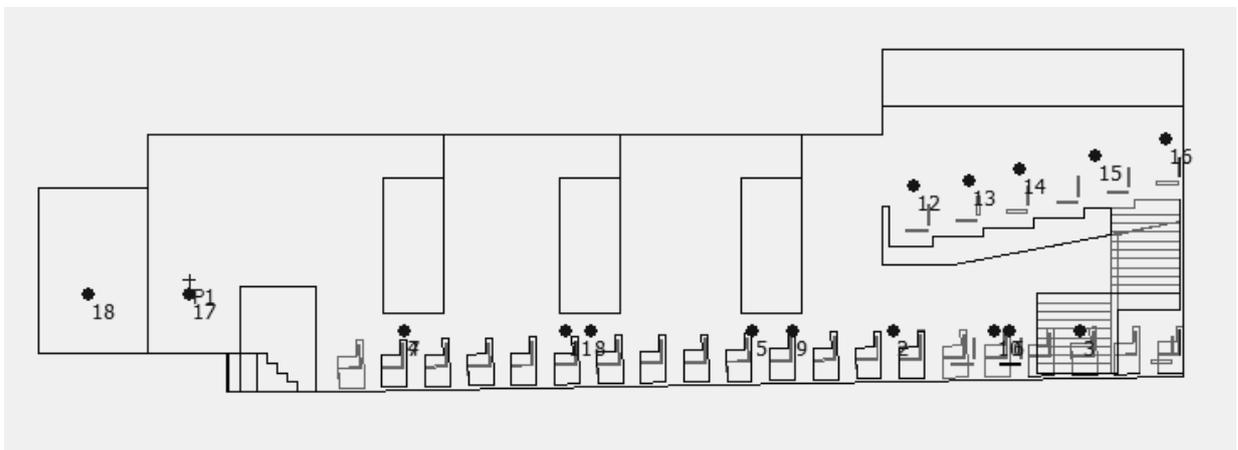


Figura 22 Corte da igreja. Fonte: Odeon.

No entanto, existem algumas características que dificultam uma boa acústica no templo. Apesar do forro não ser muito absorvente, ele é reto, sem difusibilidade e sem inclinações para direcionar os raios sonoros a congregação. Seu pé-direito é maior que 4,5 metros fazendo com que a congregação não tenha muito retorno do seu louvor. Isto faz com que reflexões de primeira ordem quase não sejam ouvidas nas partes mais traseiras e principalmente no mezanino, como ilustrado na figura 23. A falta de primeiras reflexões pode prejudicar a inteligibilidade da música e principalmente a de discurso, pois elas são muito importantes causando a sensação de falta de envolvimento da congregação.

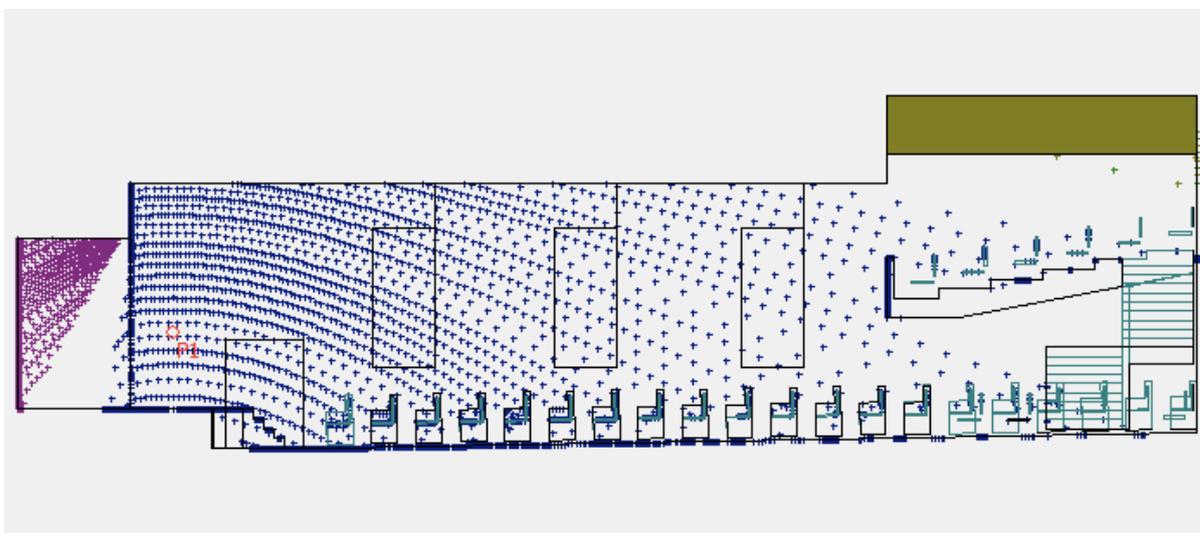


Figura 23 Cobertura de reflexão: reflexões de primeira ordem. Fonte: Odeon.

Além disso, as dimensões do templo retangular em torno de 11,5 por 20 metros e com altura de 5 metros e na parte do mezanino 7 metros são praticamente proporcionais entre si (a dimensão de 5 metros se dobrada está muito perto de 12 metros e se for quadruplicada corresponde aos 20 metros) criando modos normais nas mesmas frequências para mais de uma. Esse é um grande problema, pois poderão existir regiões do local com aumento e diminuição do som fazendo com que a distribuição da pressão sonora não seja homogênea e os parâmetros acústicos da sala (TR, EDT, etc) variem. As paredes poderiam ser inclinadas para evitar os modos normais, bem como usar absorvedores acústicos.

Para o cálculo analítico de modos normais da sala foram consideradas as dimensões de 11,5 x 20 x 5 metros como L_x , L_y e L_z e os resultados usados para

comparação das ressonâncias calculadas pelo software se encontram no apêndice deste TCC.

A frequência de Schroeder calculada a partir do TR médio e volume do templo foi 68 Hz para quando o templo estava sem ocupação de pessoas e 62 Hz com 70% de ocupação.

O palco e a cavidade atrás do palco com seu volume menor concentram o som direcionando a sua propagação e energia para as pessoas sentadas na parte da frente. Esse direcionamento, contudo, poderia ser melhor distribuído ao longo do templo em conjunto com um forro difuso.

O palco elevado junto a inclinação do piso são recursos que auxiliam a visualização e melhor propagação sonora, pois o som é menos atenuado pela pessoa sentada a frente. O palco é elevado em 75 cm e muito embora o piso da igreja, local de assentos da congregação, seja levemente inclinado, sua inclinação de menos de 1° não é o suficiente para tal efeito de melhoria citada.

6.2 Estimativa geral dos dados obtidos pelas áreas junto aos seus materiais

O software generaliza quão longo é o tempo de reverberação. Isto é feito através de uma análise analítica do modelo pelas informações dos coeficientes de absorção de cada material aplicado a cada área de superfície sendo muito útil na avaliação do impacto dos materiais no tempo de reverberação.

Os gráficos que serão mostrados na estimativa global começam de uma avaliação macro para uma detalhada. O tempo de reverberação é o parâmetro mais importante na acústica. Como ele depende de duas variáveis, o volume e área de absorção, é necessário avaliá-las antes de chegar ao entendimento do conceito macro de TR. No estudo de caso deste trabalho, o volume é constante representado pelo projeto da igreja inserido. Portanto, tem-se somente a área de absorção que por sua vez depende da área de superfície de cada material junto ao coeficiente de absorção por banda de frequência. Assim, para um maior detalhamento, a área de absorção é comparada nos gráficos gerados pelo software Odeon entre materiais e

em potencial de uso. Além disso, os coeficientes de absorção também são comparados entre si. É essencial esta avaliação seja para futuras modificações de materiais, ou para aprovação do estado em que a igreja se encontra atualmente.

Os tempos de reverberação são estimados pela fórmula de Sabine e Eyring e são ilustrados pela figura 24. Já a área de absorção de cada material é representada pela unidade m^2 Sabine e é quantificada pela figura 25.

O tempo de reverberação pela fórmula de Sabine foi sempre maior que o método de cálculo de Eyring independente da frequência. As curvas de TR para estes métodos têm a mesma tendência aumentando o tempo de 125 Hz para 250 Hz que então decresce os valores até 4000 Hz. Para ambos os cálculos, a reverberação ficou em torno de 1 segundo variando pouco ao longo da frequência com a maior diferença de 0,2 segundos entre 250 Hz e 4000 Hz.

A área de absorção é maior para alta frequência, pois os materiais presentes na igreja possuem maior coeficiente de absorção quanto mais alta a banda de frequência, excetuando os materiais de forro de PVC (15036), madeira comum (15005) e adulto sentado em banco de madeira (15022). O ar também se apresenta como absorvedor de energia sonora, no entanto sua atuação só é significativa nas altas frequências. Para baixas frequências, a madeira comum (15005) e o forro de PVC (15036) são os maiores responsáveis na atenuação.

Pode-se claramente ver a ligação direta entre os dois gráficos de tempo de reverberação e área de absorção distribuídas pelos materiais. Quanto maior a absorção, menor o tempo de reverberação e para o contrário o conceito é análogo.

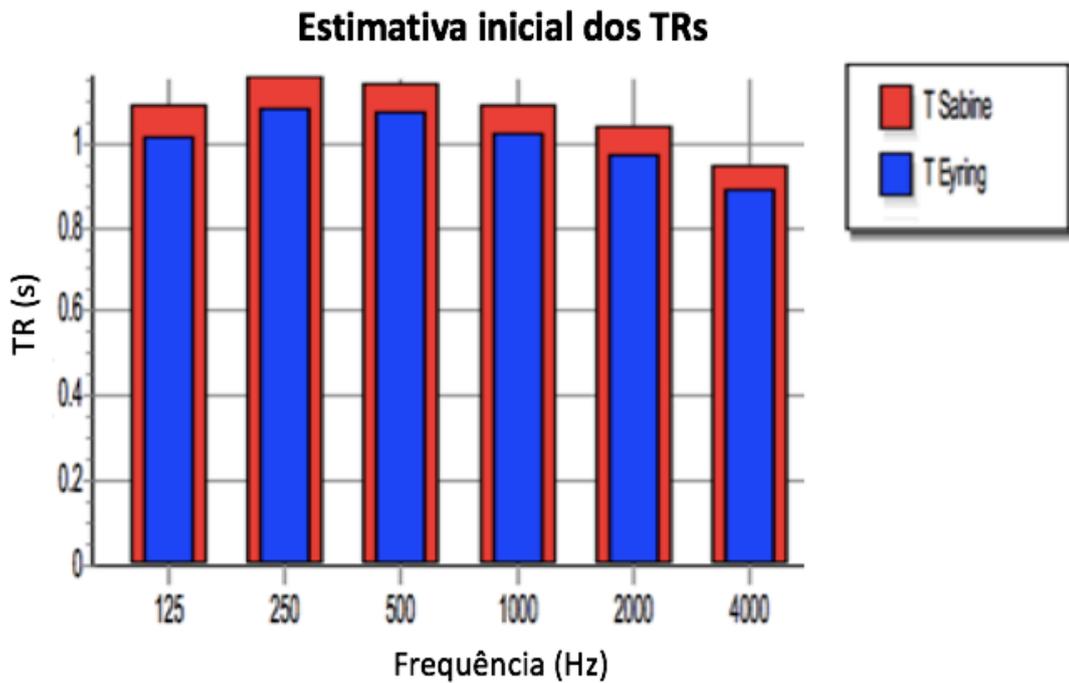


Figura 24 Tempo de reverberação pela análise analítica por Sabine e Eyring ao longo da frequência. Fonte: Odeon.

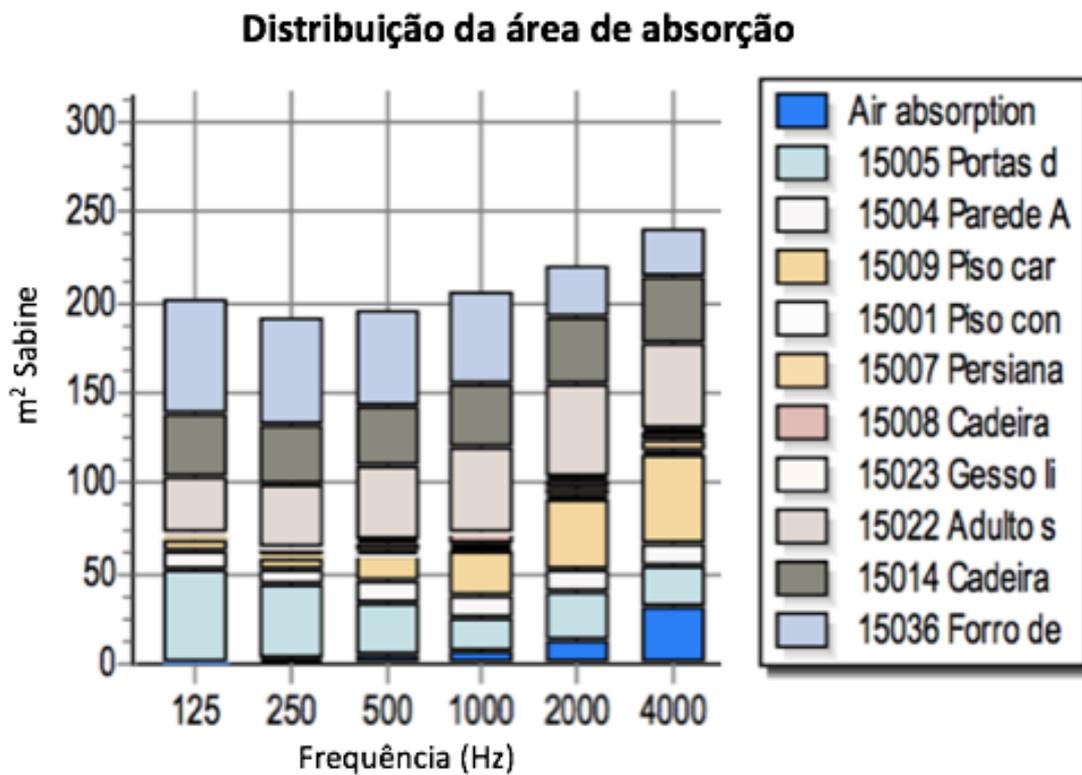


Figura 25 Área de absorção distribuídas pelos materiais ao longo da frequência. Fonte: Odeon.

A absorção em potencial de uso devido a área representada por cada material é ilustrada pela figura 26. Este gráfico faz uma avaliação interessante de qual seria a diferença de área máxima de absorção que poderiam conter (coeficiente de absorção igual a 1) para a atual área de absorção.

As paredes de alvenaria (15004) seguidas dos bancos de madeira parcialmente ocupados (15022) e forro de PVC (15036) são as áreas com maior potencial de uso caso maior absorção fosse necessária. Isto já era de se esperar, pois são os materiais com maior área de superfície e também são rígidos e duros se comportando como reflexivos.

A área em potencial de uso é muito superior àquela usada em todo o templo. Em termos totais, somente são usados de 200 a 250 m² Sabine durante um culto, sendo que teoricamente mais de 1200 m² Sabine poderiam funcionar em elementos acústicos absorvedores se necessários.

Os coeficientes de absorção para cada material em cada frequência são ilustrados pela figura 27. Estes valores já foram apresentados pela tabela 7 anteriormente mostrada, todavia os valores unitários apresentam-se diferentes, pois foram transformados em unidades de área para o software Odeon.

A cadeira estofada ocupada (15014) como material tem os maiores coeficientes de absorção com coeficientes de valores próximos entre si ao longo da frequência ficando em torno de 0,5. O carpete (15009) junto às persianas (15007) mostram uma grande ascensão na absorção de baixas a altas frequências. Já a madeira comum (15005) e o forro de PVC (15036) tem a tendência de maior absorção em bandas de baixas frequências.

Para a performance da igreja parcialmente ocupada, as pessoas sentadas fazem função importante de absorvedores na acústica do templo em relação a simulação deste modelo vazio sendo os responsáveis por baixar o TR médio de 1,5 segundos para 1,3 segundos.

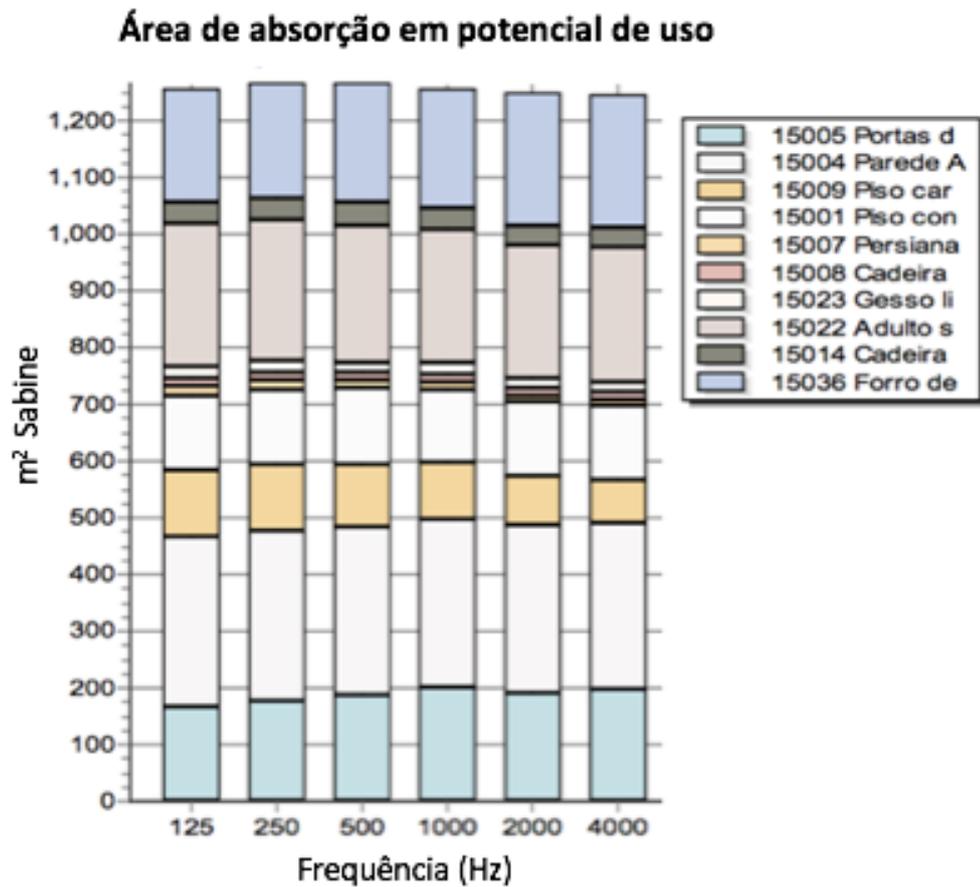


Figura 26 Área de absorção em potencial de uso distribuído nos materiais ao longo da frequência. Fonte: Odeon.

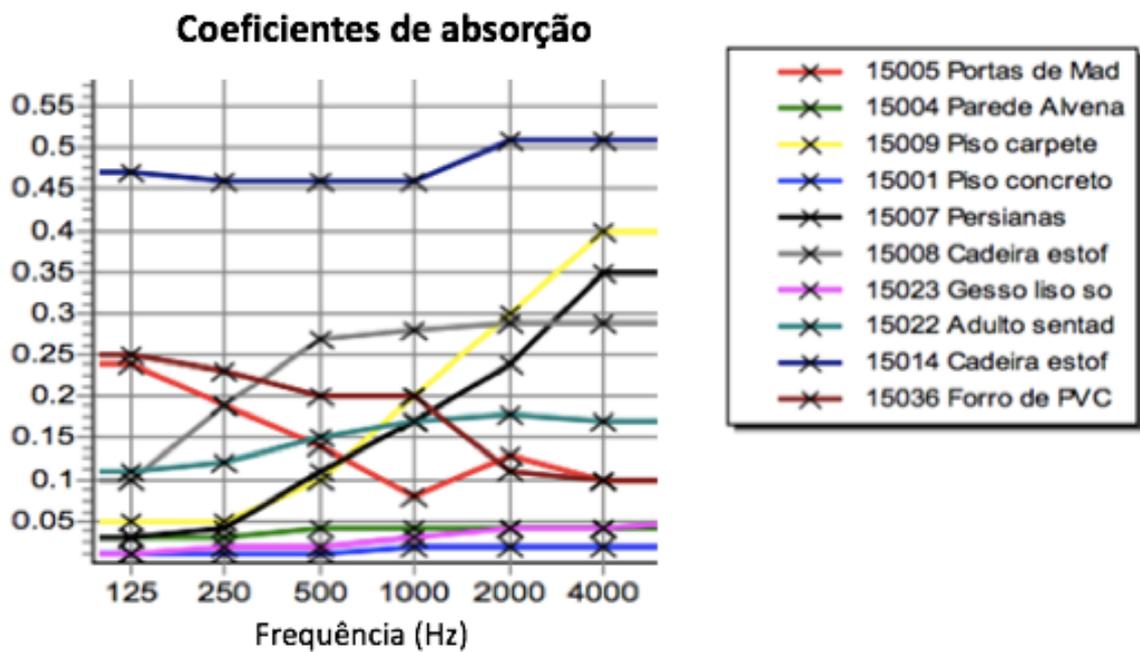


Figura 27 Coeficientes de absorção dos materiais ao longo da frequência. Fonte: Odeon.

6.3 Estimativa global do TR, das curvas de decaimento e da distribuição de caminho livre

Partículas são lançadas em direções randômicas da fonte sonora. A perda de energia de cada partícula é uma função do tempo e da absorção das superfícies e do ar. Com a soma das partículas, uma curva de decaimento global para o ambiente e correspondentes TRs são obtidos, assim como ressonâncias que são identificadas pela quantidade de passagens de partículas por uma mesma posição.

A partir deste método baseado no volume do ambiente e no caminho livre, os tempos de reverberação médios em T_{20} e T_{30} são calculados por banda de frequência como ilustrado na figura 28, curvas de decaimento são mostradas na figura 29 e a distribuição do caminho livre das partículas também é representado pela figura 30.

Os tempos de reverberação T_{20} e T_{30} têm a mesma tendência que quando calculados analiticamente, porém são caracterizados por serem um pouco maiores. na faixa de 1,1 a 1,3 segundos em detrimento da análise analítica de 0,9 a 1,2 segundos. Além disto, o T_{20} se mostra um pouco menor que o T_{30} em todas as frequências como o manual do Odeon recomenda que seja.

As curvas de decaimento mostram que quanto menor o tempo de reverberação, mais rápida a curva de decaimento do nível de pressão sonora no tempo. A curva 4000 Hz apresenta-se mais distantes das outras possuindo valores menores e mais distantes das outras frequências. Enquanto de 125 Hz a 2000 Hz, as curvas simuladas são parecidas e além de caírem suavemente, sem quebras, têm valores de T_{30} próximos entre si.

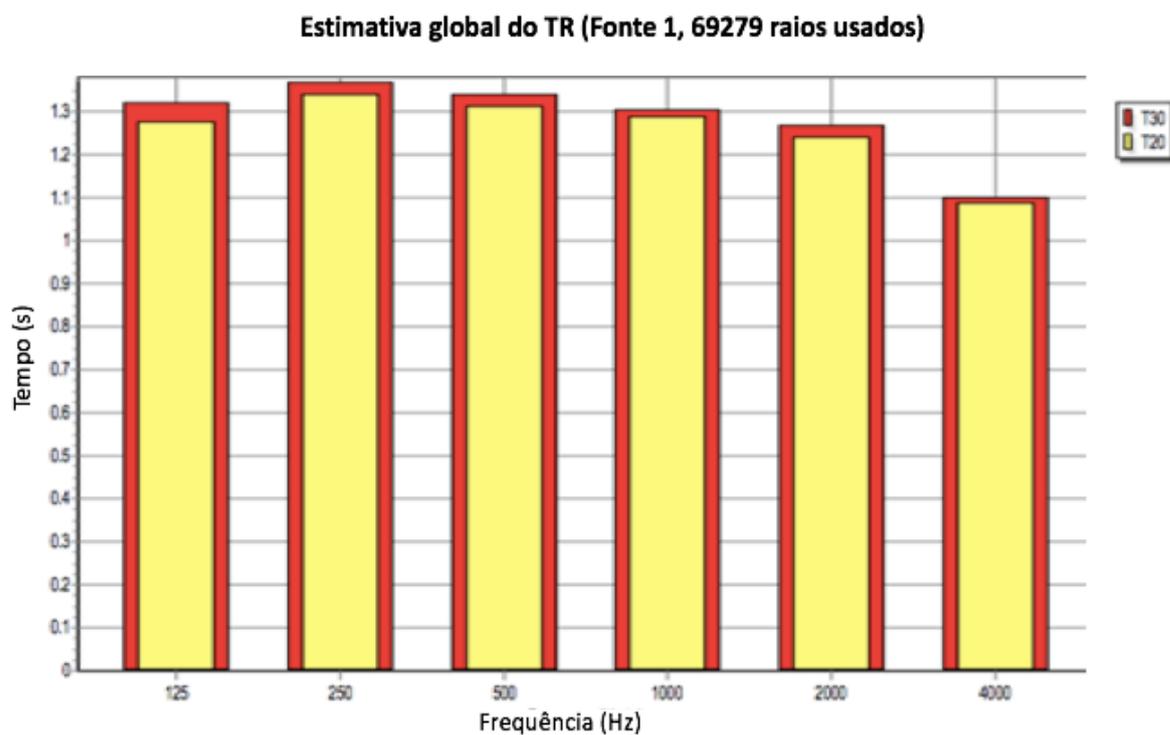


Figura 28 Média de T_{30} e T_{20} ao longo da frequência. Fonte: Odeon.

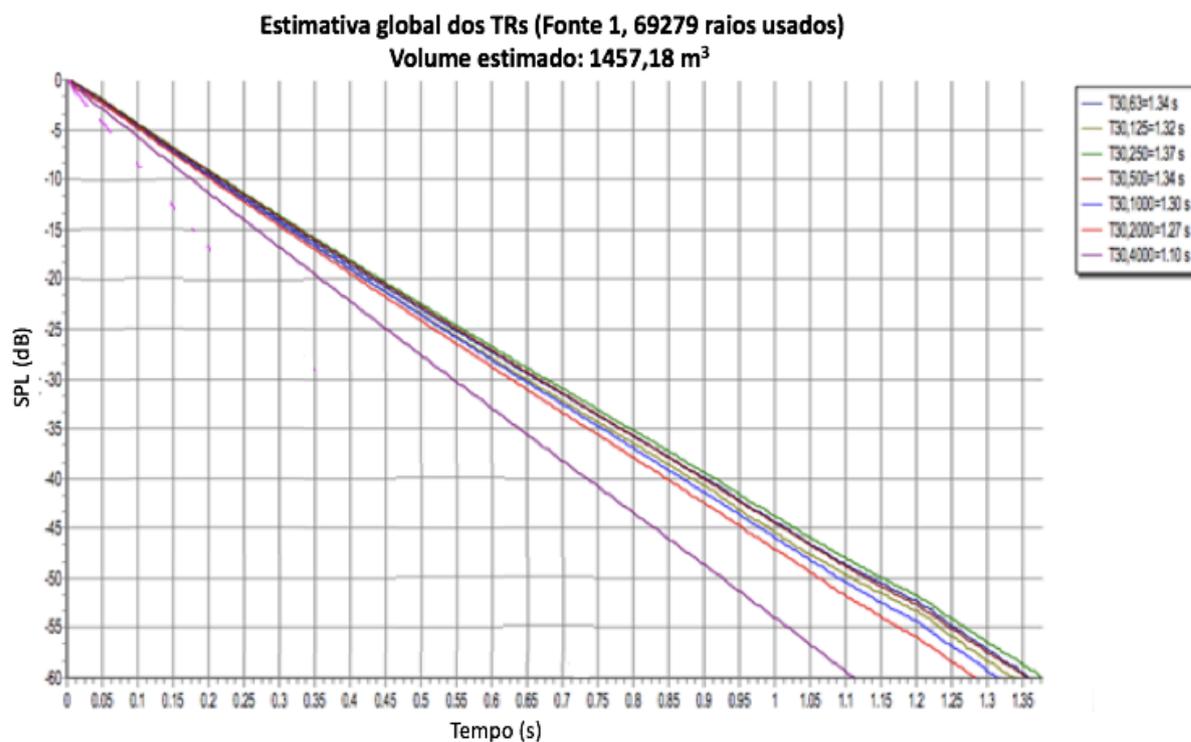


Figura 29 Curva de decaimento para cada frequência ao longo do tempo. Fonte: Odeon.

A distribuição do caminho livre mostra algumas ressonâncias significativas. A figura 30 representa a quantidade de colisões (hits) entre as partículas lançadas calculada a cada raio de distância da geração sonora, fonte. Ou seja, quanto maior o número de colisões maior a energia e ampliação sonora naquele ponto. Estes grandes picos de energia representam as ressonâncias da igreja que por sua vez correspondem aos modos normais calculados para o templo. As informações dos principais picos na figura 30 foram detalhadas na tabela 10 e ilustradas pelos cortes e planta representados na figura 31.

As ressonâncias listadas correspondem aos modos normais. As frequências com maior ressonância, como 207,2 Hz e 377,7 Hz, foram calculadas (apêndice 6) pela dimensão retangular da igreja são maiores que a frequência de Schroeder, mas encontradas como modos normais axiais nas três dimensões. Ou seja, além de terem maior energia como sendo modo axial, são ainda mais ressaltados por se repetirem nas três dimensões do templo. Essas ressonâncias estão muito próximas da fonte na região do palco e localizadas nos bancos na região central.

Os modos normais poderiam ser corrigidos com absorvedores de membrana para baixas frequências.

Tabela 10 Ressonâncias (frequências) simuladas, número de colisões (hits) e sua distância da fonte.
Fonte: elaborada pela autora.

Ressonâncias		
Frequência (Hz)	Hits	Distância da fonte (m)
207,2	17800	0,8
377,7	8800	0,5
1613,8	4000	0,1
560,6	2900	0.3
33,3	2000	5.2

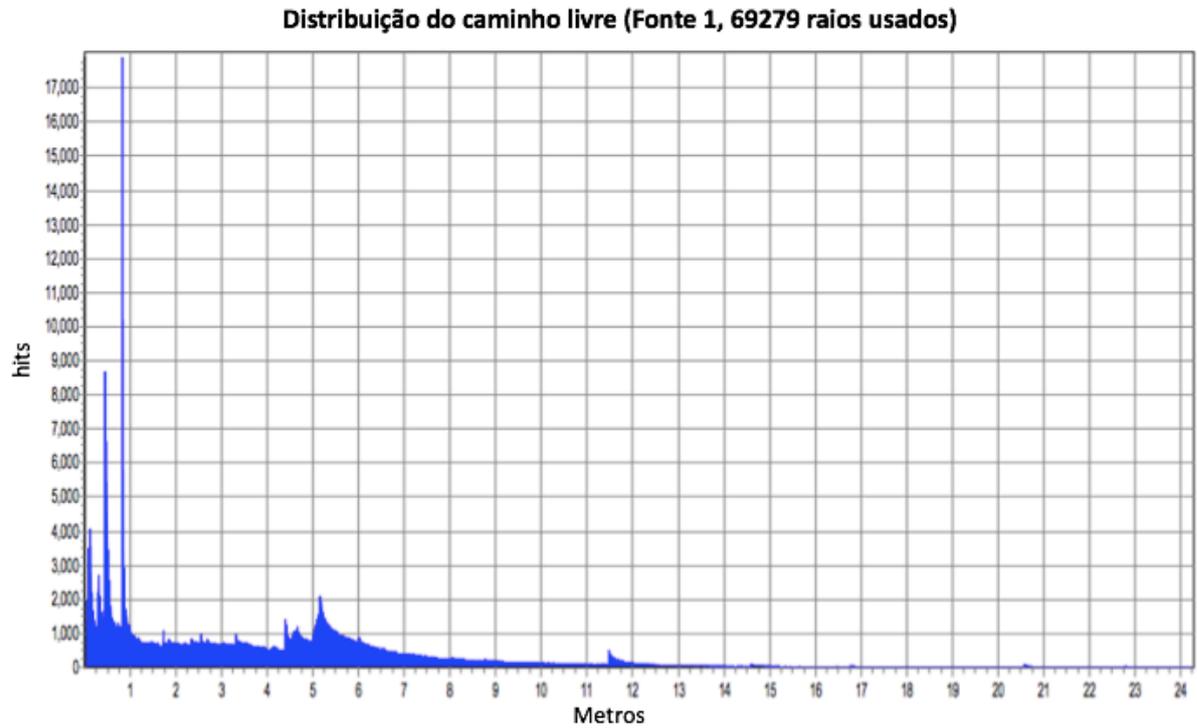


Figura 30 Distribuição do caminho livre mostrando a quantidade de colisões de partículas ao longo do tempo

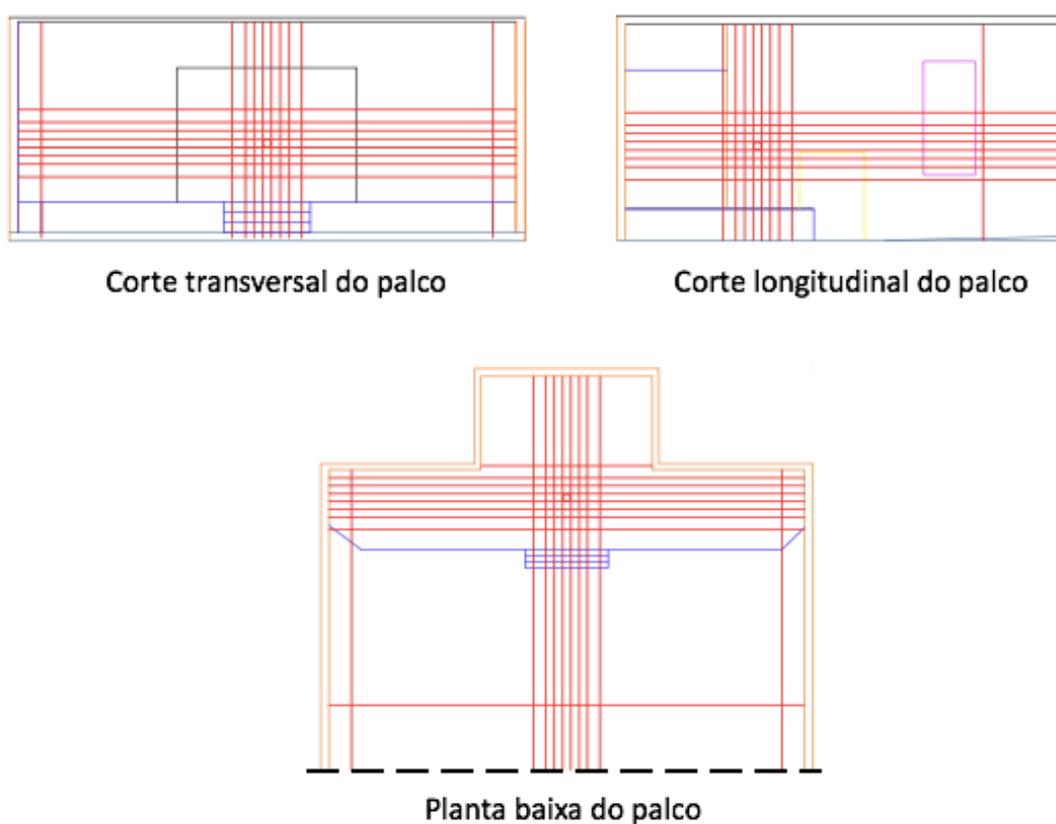


Figura 31 Visão da propagação dos modos normais da sala (frequências) a partir da distância da fonte em cortes e planta

6.4 Resposta de múltiplos pontos

O cálculo para múltiplos pontos é realizado a partir de raios lançados em direções distribuídas o mais homoganeamente possível. A direção dos raios é arranjada como uma esfera em propagação. Diferentemente da rápida e da estimativa global, as direções dos raios são aleatórias permitindo que o cálculo seja finalizado somente quando a distribuição de raios seja bem homogênea.

Os 18 pontos avaliados na simulação estão representados na figura 32 em planta tridimensional.

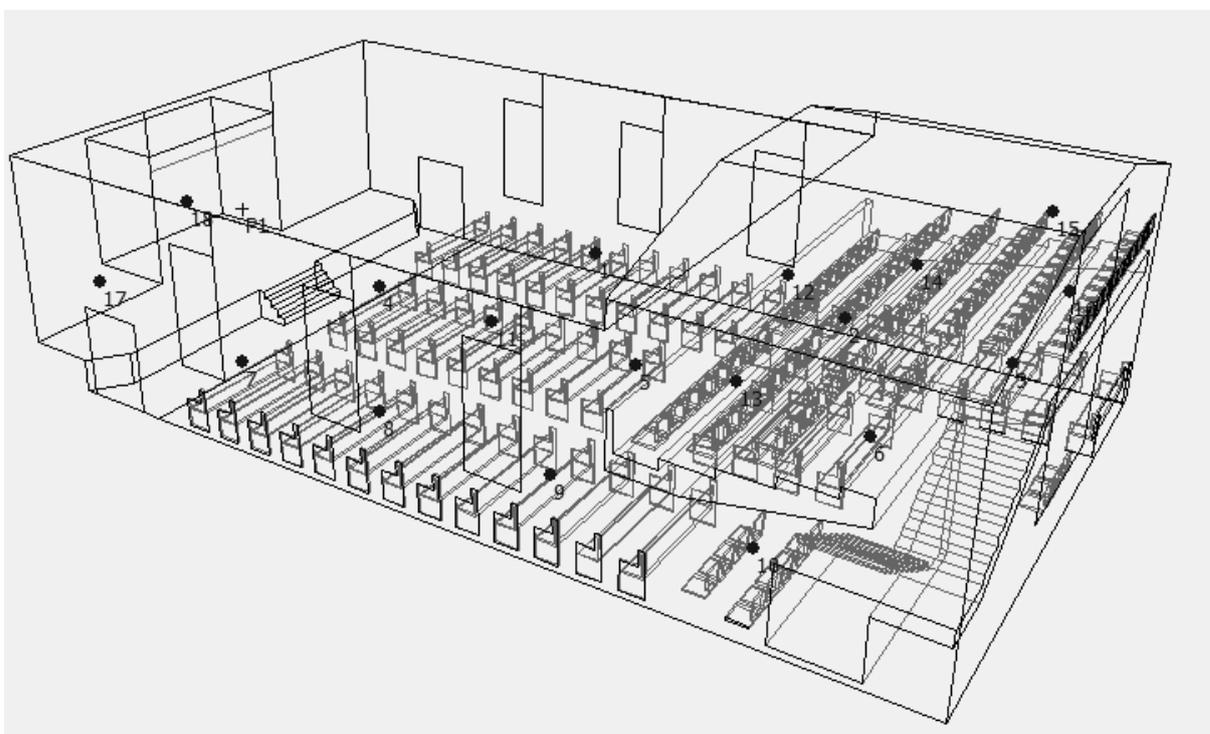


Figura 32 Posição dos 18 pontos simulados no templo no projeto tridimensional da igreja. Fonte: Odeon.

6.4.1 Tempo de Reverberação (TR)

Para avaliação do TR, parte-se para o gráfico de Bistafa, que em função do volume e do uso, apresenta o tempo de reverberação ótimo para a frequência de 500 Hz. O uso do espaço é destinado a uma igreja protestante e o volume e então correspondente TR ótimo achado no gráfico se encontram na tabela 14.

Tabela 11 Volume e correspondente TR ótimo em 500Hz. Fonte: elaborada pela autora.

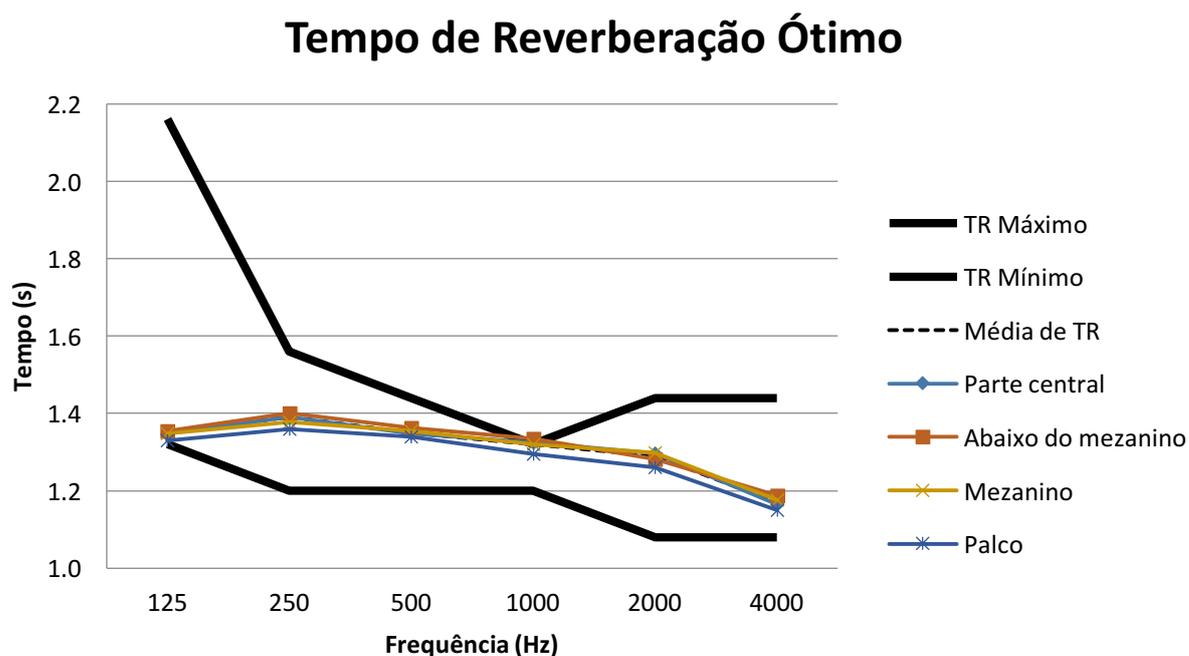
Volume (m ³)	1335
TR de Bistafa em 500Hz	1,2

Para estender os valores de tempo de reverberação para as outras frequências, Prado, como já apresentado na tabela 2, estabeleceu limites máximos e mínimos de TR baseado no TR ótimo de 500 Hz encontrado, 1,2 segundos. A tabela 15 mostra estes limites corrigidos para a igreja em estudo.

Tabela 12 Limites máximos e mínimos para o TR ótimo aceitável na igreja ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.

		TR ÓTIMO					
Hz	125	250	500	1000	2000	4000	
		PRADO					
MAX	2,2	1,6	1,4	1,3	1,4	1,4	
MIN	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	

O figura 33 apresenta os limites de Prado e os valores simulados de TR para a igreja durante o culto.

**Figura 33** TRs simulados para os setores da igreja e seus limites máximos e mínimos ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.

O tempo de reverberação simulado na igreja parcialmente ocupada está adequado, pois quase todos os setores avaliados estão dentro dos limites estabelecidos por Prado. As curvas de TR estão bem próximas entre si, como o esperado, e apresentam valores perto do limite inferior em 125 Hz e 4000 Hz. No entanto, em 1000 Hz, a margem de tolerância é bem estreita com valores ideais entre 1,2 e 1,3 segundos. Assim, alguns valores de TR coincidem e outros ficam um pouco acima na ordem de 4 milissegundos do limite máximo de 1,3 segundos. Como essa diferença é mínima, não há preocupação em tratamento acústico da igreja em relação ao TR ótimo. Além disso, as curvas simuladas são suaves não apresentando quedas ou subidas bruscas mostrando que o decaimento da energia sonora entre as frequências é parecido.

O figura 34 apresenta o TR simulado para cada setor da igreja comparado com o TR do templo sem ocupação de pessoas.

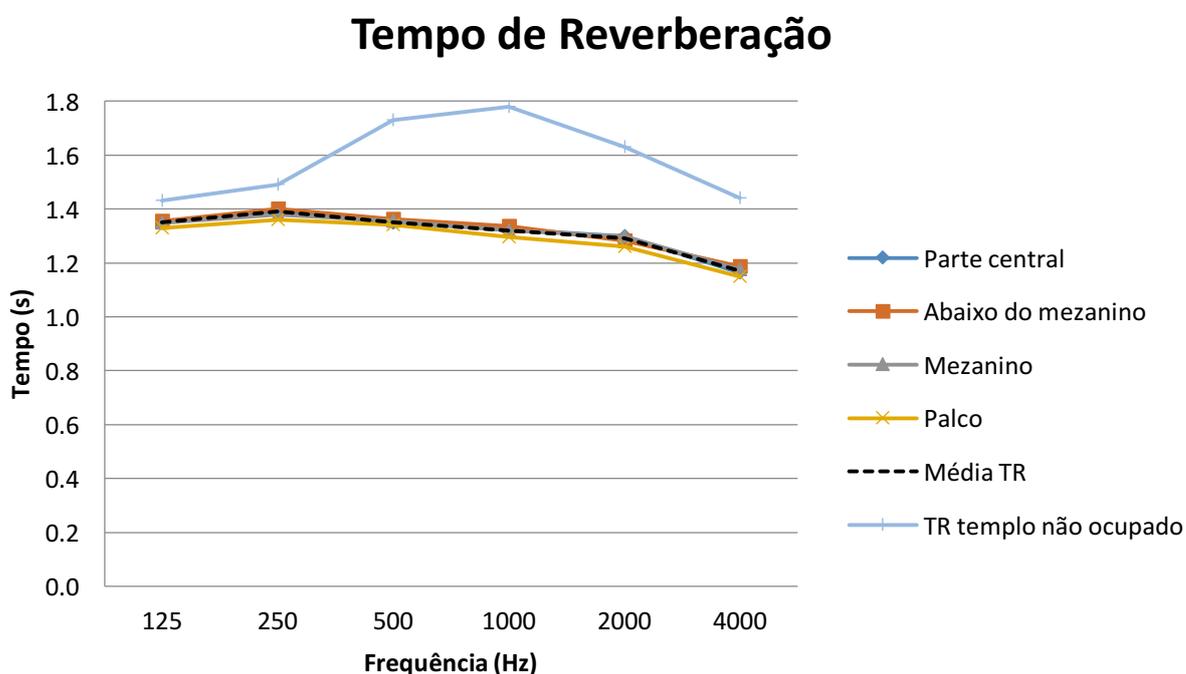


Figura 34 TRs simulados para os setores, médias do TR com igreja ocupada e sem pessoas ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.

Os dados de TR inseridos são os mesmos do gráfico anterior, todavia ao invés de compará-los com os limites máximos e mínimos de Prado, eles estão ao

lado da média de TR quando o templo não obtinha em seu interior a ocupação de pessoas. Portanto, pode-se concluir pela curva destoante (TR templo não ocupado) que as pessoas fazem a função de absorvedoras nas média-alta frequências, pois a igreja apresenta-se mais viva e reverberante sem pessoas.

6.4.2 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

O tempo de decaimento inicial por representar as primeiras reflexões, a parte do som que o ser humano é mais “sensível”, dá a real sensação de reverberação.

Os EDTs simulados junto à média de TR para comparação são mostrados na figura 35.

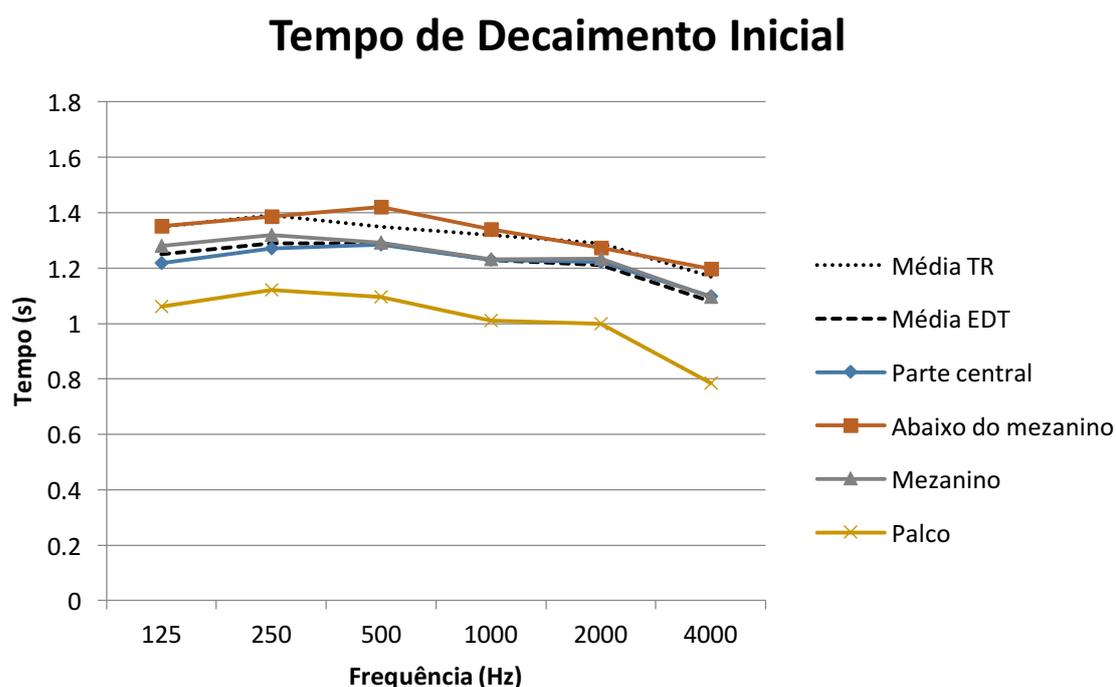


Figura 35 EDTs simulados para os setores junto a média do TR e do EDT ao longo da frequência.
Fonte: elaborada pela autora.

As curvas de EDT têm a mesma tendência de aumentar seus valores até 500 Hz e então cair até 4000 Hz. Ao contrário das curvas de TR, as curvas de EDT para cada setor são mais “espaçadas” entre si, isto mostra que o posicionamento do ouvinte tem certa influência na quantificação do EDT. Comparando a curva de TR

médio com a de EDT médio, podemos ver que as duas curvas também possuem a mesma tendência de resultados, a curva de EDT, porém, ficou cerca de 0,1s abaixo da curva de TR mostrando que a sensação de reverberação é menor do que o valor matemático de TR. O palco é o setor que apresenta menores valores para EDT, enquanto os maiores valores estão representados abaixo do mezanino. Portanto, o local influencia o EDT, pois quanto maior a proximidade da fonte, menor os valores para EDT.

6.4.3 Clareza (C_{80})

A clareza está relacionada a nitidez da música. Representada pela figura 36, a clareza simulada para o templo tem seus valores para cada setor e as médias deles.

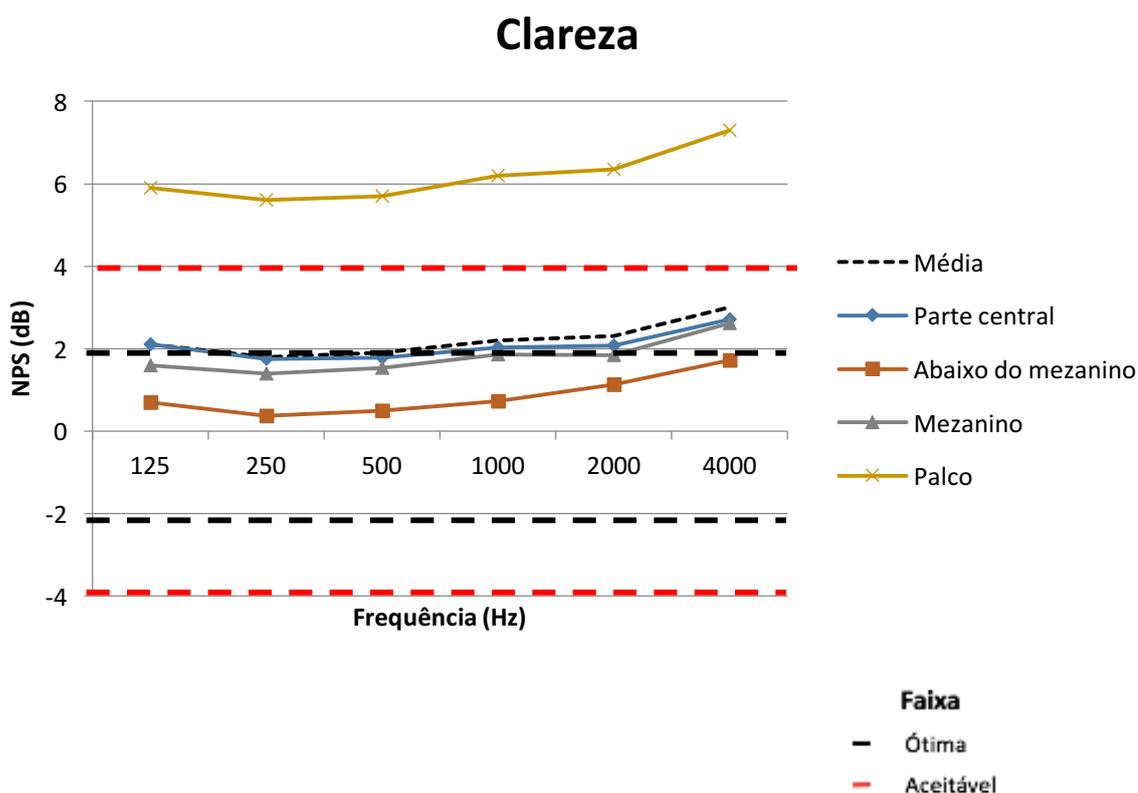


Figura 36 C_{80} s simulados junto a média do C_{80} . Fonte: elaborada pela autora.

O parâmetro acústico Clareza é claramente influenciado pelo posicionamento em relação à fonte sonora. A energia das primeiras reflexões é decisiva no seu

cálculo e, portanto, quanto maior proximidade a fonte sonora mais claro e nítido será o som. Os valores obtidos nos setores em que a congregação ocupa variaram de 0,4 dB e 2,6 dB com maioria dos resultados sendo ideais e o restante aceitável para audição de performance musical. A exceção está na Clareza no setor palco em que os valores estão muito acima do desejado pela proximidade da fonte. Quanto a sua tendência, as curvas C80 são espalhadas, mas parecidas quanto a ponderação de nível de pressão sonora de subidas suaves da baixa para alta frequência.

6.4.4 Definição (D_{50})

Enquanto a clareza quantifica a nitidez musical, o parâmetro de definição caracteriza a nitidez de discurso. Os valores de D_{50} ao longo da frequência para os diversos setores, assim como sua média, são ilustrados pela figura 37.

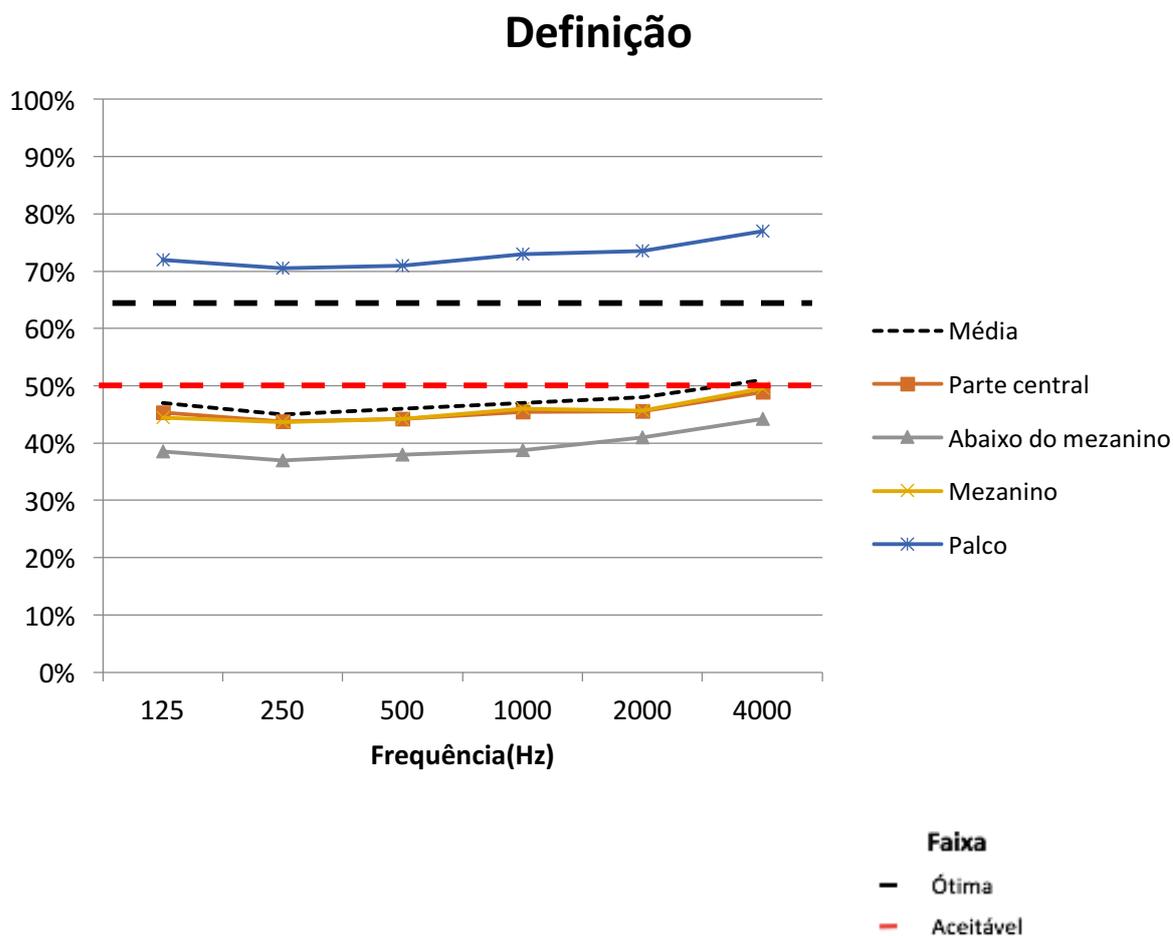


Figura 37 D_{50} s simulados para os setores, médias do D_{50} com igreja ocupada e vazia ao longo da frequência. Fonte: elaborada pela autora.

O comportamento do parâmetro definição tem comportamento similar ao da clareza, pois dependendo do lugar em que está sentado, o discurso pode ser mais inteligível. As curvas, representando cada setor, estão distantes entre si mostrando que a posição de ouvinte importa, mas cada curva apresenta-se constante com seus valores próximos ao longo da frequência. No entanto, em sua totalidade os valores de D_{50} não são bons para o discurso visto que estão abaixo dos 50%, valor aceitável para ambientes destinados a fala, excetuando o setor palco. Estão, portanto, muito abaixo do ideal de 65% para inteligibilidade da palavra falada.

O parâmetro de definição é essencial nas igrejas protestantes, pois a proclamação da palavra está acima dos louvores. Assim, é necessário que este aspecto seja melhorado na igreja. Isto pode acontecer com um melhor direcionamento das primeiras reflexões pela geometria na arquitetura ou por sistemas eletroacústicos que suprem esta carência que já existem no templo, mas não foram considerados na simulação.

6.4.5 Índice de Transmissibilidade da Fala (STI)

Assim como o parâmetro de definição, o parâmetro de índice de transmissibilidade da fala também avalia a inteligibilidade de discurso. No entanto, ele depende de outros fatores como TR e ruído de fundo e não é simulado dependendo da frequência. Os valores médios de STI para os diversos setores são ilustrados pela figura 38.

Índice de Transmissibilidade da Fala

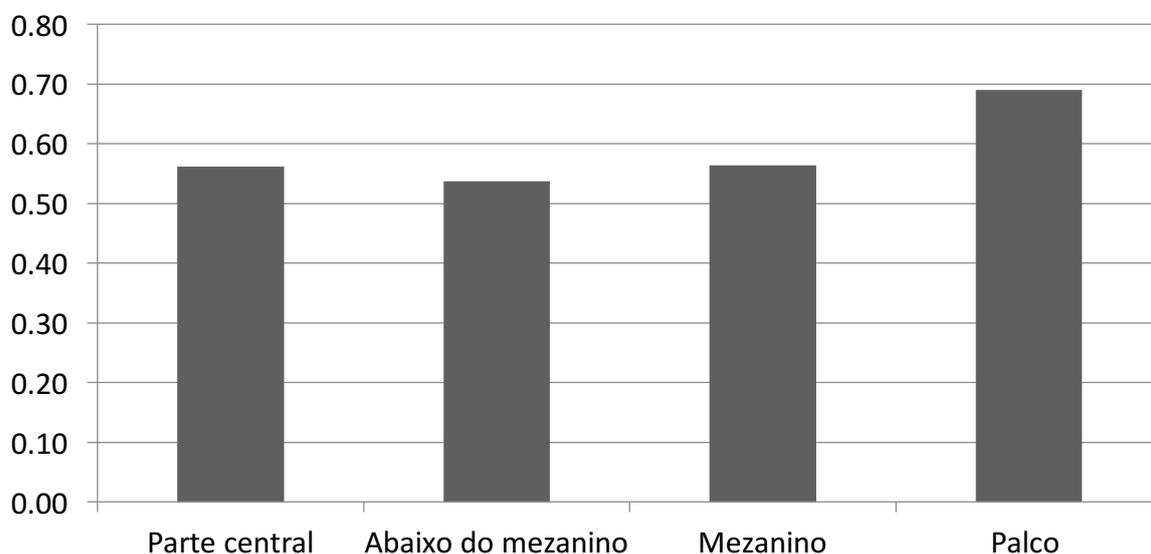


Figura 38 STIs simulados para os setores quando a igreja estava ocupada. Fonte: elaborada pela autora.

A inteligibilidade no templo é praticamente constante e está entre 0,5 e 0,6. De acordo com a IEC 60268-16, isto significa uma inteligibilidade razoável e somente os pontos que estão localizados no palco atingem inteligibilidade boa com valores médios de 0,7.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A performance acústica da igreja protestante Primeira Igreja Batista apresenta bom desempenho na performance musical, no entanto, peca em qualidade de inteligibilidade de discurso. A geometria possui grande influência no direcionamento dos raios sonoros junto a volumetria tendo grande relação na quantificação dos parâmetros acústicos avaliados.

Os modos normais da igreja são dependentes das dimensões da sala avaliada e são representados por ressonâncias na simulação. Essas ressonâncias se encontram com muita energia no setor do palco. Assim, esses modos poderiam ser amenizados por absorvedores de membrana colocados nessa região.

O tempo de reverberação, parâmetro acústico mais importante e mais utilizado para análise, se apresentou praticamente constante em todos setores da igreja dentro ou no limiar dos limites máximos e mínimos estabelecidos. Portanto, para uma igreja protestante de médias dimensões, o tempo de reverberação teve valores ótimos e similares a outras igrejas. A igreja não precisa ser tratado com superfícies absorvedoras de som.

O tempo de decaimento inicial é diretamente relacionado ao tempo de reverberação, pois representa a sensação de reverberação do espaço. Seu valor simulado é menor que os valores de TR, a sensação gerada é então de um ambiente mais “seco”. Isto deve acontecer pelo fato de no palco ter um espaço acoplado com volume muito menor que o restante da igreja, porém influenciador do decaimento sonoro do som, pois está próximo da fonte. Assim, a curva de decaimento sonoro cai mais rapidamente no primeiro tempo como mostra o EDT, mas depois diminui a velocidade de decaimento mostrando em totalidade da curva um TR maior que o EDT. Além disso, a posição do ouvinte em relação a fonte traz diferentes sensações de reverberação, pois os setores mais próximos da fonte têm menores valores para EDT.

A inteligibilidade de discurso é avaliada por dois parâmetros acústicos neste estudo de caso: D_{50} e STI. Enquanto a definição considera a percentagem de energia das primeiras reflexões de um ponto comparado com a energia total recebida no ambiente, o índice de transmissibilidade da fala depende do tempo de reverberação e do ruído de fundo. Isso leva a reflexão de duas conclusões em relação a estes parâmetros. A primeira conclusão é que, excetuando o palco, em todos os outros setores faltam direcionamento das primeiras reflexões, o que poderia ser feito geometricamente de acordo com os estudos de acústica arquitetônica. Seja em teto difuso, seja em difusores suspensos, ou paredes difusas, esse melhor espalhamento do som traria benefícios de inteligibilidade e qualidade sonora. A segunda conclusão é sobre a relação tempo de reverberação e ruído de fundo que se fossem diminuídos poderiam contribuir com a inteligibilidade de discurso.

A nitidez musical através do parâmetro clareza foi em geral considerada muito boa. Apesar de que dependendo da posição do ouvinte, obteve-se valores de clareza diferentes entre si. Ainda assim, os setores são em sua maioria ideais para a audição musical, ou ao menos aceitáveis. Portanto, este parâmetro mostra que o canto congregacional é estimulado pela estrutura da igreja, pois os fiéis se sentem envolvidos pelo som.

Quando voltamos a análise sobre os setores, o palco é o setor onde a fonte sonora se encontra, seja ela a banda que toca os louvores, ou o pastor que faz a pregação da palavra. Devido a sua localização, os raios diretos têm maior força que a parte reverberante do som. Isso acarreta que parâmetros que consideram as primeiras reflexões em seu cálculo como definição (50 milissegundos iniciais) e clareza (80 milissegundos iniciais) tenham valores mais altos com nitidez musical “maior que o aceitável” sendo “seco” para performance musical e com nitidez para o discurso alcançando valores excelentes. No entanto, como este local é onde os músicos tocam, eles ouvem um som com pouco retorno (ouvir a própria execução) e mais “seco” que o recebido pela congregação, não trazendo conforto aos seus ouvidos ao tocar os instrumentos e cantar. O desconforto é compensado com caixas de alto-falantes no palco direcionadas aos músicos para um melhor retorno da performance musical, contudo não foi comprovado esta melhora com este estudo de caso, pois alto-falantes não fizeram parte da simulação. O outro parâmetro de inteligibilidade, índice de transmissibilidade da fala, apresentou-se destoante do restante setores, como excelente em discurso devido ao som direto ser muito mais forte que o ruído de fundo auxiliando nessa qualidade de discurso.

O mezanino é o setor com pior qualidade de visualização do palco. Como ele não foi planejado desde a construção e sim um adicional ao longo da necessidade de aconchegar mais pessoas nos cultos, o teto neste local foi ascendido deixando a estrutura do telhado em tesouras a mostra. O mezanino tem o piso bem inclinado e devido a não tão grande abertura de visualização (apenas 1,5 metros de altura acima do parapeito) para o palco, os assentos traseiros são bem prejudicados neste lugar tanto em visualização e em alguns aspectos na acústica. A sensação de reverberação através do EDT é somente um pouco menor que a real reverberação (TR) do ambiente e a correspondência da sensação com a reverberação é um

aspecto bom, pois mostra que a curva de decaimento neste setor é homogênea. A nitidez musical, representada por C_{80} , é muito boa ficando na faixa ideal ao longo da frequência, excetuando 4000 Hz na faixa aceitável. Quanto a inteligibilidade de discurso, com o parâmetro D_{50} , o discurso mostra-se um pouco abaixo do considerável bom em todas as frequências, menos em 4000 Hz que fica no limiar de bom discurso. Já o parâmetro STI qualifica a inteligibilidade do discurso como razoável. Mesmo que os dois parâmetros tenham o mesmo objetivo de qualificação, o resultado passa por processos diferentes. Enquanto o D_{50} tem seu maior peso de cálculo na energia das primeiras reflexões, o STI depende do TR e ruído de fundo. Para aumentar a inteligibilidade de discurso através de D_{50} , as primeiras reflexões deveriam ser reforçadas em relação a energia total recebida que poderia ser feita ou através de um melhor direcionamento como um teto difuso, ou da diminuição da energia total com tratamento acústico de absorção. Neste caso, o tratamento acústico alteraria diminuindo o TR que já apresenta resultados bons. Quanto ao STI, sua qualidade razoável poderia ser melhorada se fossem diminuídos o produto dos dois efeitos de valores de TR e relação sinal/ruído de fundo. A relação sinal/ruído de fundo pode ser melhorada com isolamento acústico.

O setor abaixo do mezanino se caracteriza como o setor com menor inteligibilidade de discurso na igreja. Este espaço possui uma abertura em torno de 2,2 metros e a energia sonora gerada no palco tem menor alcance neste lugar. A sensação de reverberação corresponde a reverberação deste setor, pois valores de EDT e TR são muito semelhantes entre si. Além disso, a inteligibilidade musical é excelente abaixo do mezanino, pois seus valores em toda frequência estão na faixa ideal. No entanto, para D_{50} e STI, os valores são os menores encontrados. O STI com valores baixos provavelmente acontece pela distância da fonte que gera um sinal-ruído menor e o parâmetro D_{50} com baixas percentagens, pois as primeiras reflexões são menos presentes. Por esta razão, existem alto-falantes neste local que cumprem esta carência, mas não foram estudados na simulação.

Por fim, existe o setor chamado parte central que compreende toda a área de assentos com teto alto de 5 metros. Como os valores para EDT são menores que TR, a sensação é que a reverberação é menor do que realmente é. A clareza neste setor se mostra no limiar entre o ideal e aceitável para nitidez musical. A

inteligibilidade da fala, quando avaliada a definição, mostra valores um pouco abaixo do que é considerado bom e também mostra razoável inteligibilidade de discurso quando visto os valores de STI. Falta difusibilidade para que a energia sonora gerada não fique concentrada no palco ou diluída neste setor com volume maior, mas distribuída entre os bancos.

7.1 Considerações finais

Ao longo deste trabalho e através de pesquisas, foram estudados muitos conceitos acústicos. Ao término deste TCC existem algumas observações sobre o que poderia ter sido diferente.

A primeira observação é sobre a direccionalidade da fonte. Ela foi considerada omnidirecional em que apesar do balão ter tido esta direccionalidade, para a simulação a fonte poderia ter sido caracterizada diferente, pois o pregador não emite sons de todos os lados.

Houve medição de todos parâmetros acústicos avaliados, porém como nem todos parâmetros (C_{80} , D_{50} e STI) foram correspondidos em JND, eles não foram mencionados neste TCC. Além disso, ao estourar o balão na etapa de medição, houve influência da pessoa estouradora sobre a propagação do impulso sonoro gerado pelo balão e um outro método poderia ter evitado esta influência.

A calibração do modelo virtual ao estado real da igreja poderia ter sido mais precisa com JNDs menores. Isto aconteceu devido a inexperiência inicial do uso do programa e falta de informações do manual.

Como o objetivo inicial era avaliar pontos distribuídos pela igreja, alguns setores não tiveram significativa representação em todos pontos como o palco contando com apenas 2 pontos.

Poderia ter sido feito um estudo de traçado de raios para um melhor diagnóstico do design da igreja, além das ilustrações geradas pelo software.

As sugestões dadas para melhoria individual de cada parâmetro acústico influenciam a totalidade dos resultados. Por exemplo, se a solução para a inteligibilidade de discurso é a absorção acústica, o TR é alterado também e a igreja pode ter a sensação de “sequidão”. Assim, a solução acústica ideal é aquela em que todos os parâmetros acústicos (ou priorizando os mais importantes deles) alcancem valores aceitáveis.

7.2 Indicações para futuro estudos

Este estudo de caso procurou caracterizar a performance acústica da igreja protestante Primeira Igreja Batista de Florianópolis. Porém, algumas considerações poderiam ser acrescentadas e/ou estudadas com maior profundidade.

Os índices de espalhamento foram usados como default do software. No entanto, assim como existe uma biblioteca para coeficientes de absorção de materiais, existe uma para os índices de espalhamento que poderiam ser aplicados a seu respectivo material para ver se há mudança significativa nos parâmetros avaliados.

A performance do templo contou somente com seu volume, geometria e composição de materiais não simulando a presença de sistemas eletrônicos como microfones e alto-falantes presentes no recinto. A adição desse sistema na simulação poderia ser estudada para avaliar o seu impacto principalmente nos parâmetros de inteligibilidade que contam com as primeiras reflexões.

Por fim, propostas de mudança na geometria, como alteração de difusibilidade do forro, e/ou na composição de materiais poderiam ser simulados até que atingisse um desempenho acústico em que todos os parâmetros atingissem valores excelentes na igreja protestante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 10152/1987**: *Níveis de ruído para conforto acústico*. Rio de Janeiro, 1987.

BARBO, M.N. *Avaliação acústica de um templo católico de grandes dimensões submetido à excitação impulsiva*. Santa Maria, 2009.

BARRON, M. *Auditorium acoustics and architectural design*. 2. ed. New York: Spon Press, 2010.

BISTAFA, S.R. *Acústica aplicada ao controle de ruído*. 2. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 2011.

BOTTAZZINI, M.C. *Igrejas setecentistas mineiras: a influência das características arquitetônicas na qualidade acústica*. Campinas, 2007.

COX, T.J., D'ANTONIO, P AND AVIS. "Room sizing and optimization at low frequencies." . MR 2004. *Journal of the Audio Engineering Society*, 52 (6), pp. 640-651

DESARNAULDS, V.; CARVALHO, A.P.O.; Monay, G. *Church Acoustics and the Influence of Occupancy*. *Building Acoustics*, volume 9, 2002, pages 29-47.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO-3382-1:2009(E)**. *Acoustics – Measurement of rooms acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, Genebra (2009).

INTERNATIONAL STANDARD. IEC, I. E. C. **IEC 60268-16**: *International Standard: Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*. Suíça, 2011.

JONES, D.R. *Sound of worship: a handbook of acoustics and sound system design for the church*. Elsevier, 2011.

LONG, M. *Architectural acoustics*. 2ª edição. Oxford, 2014.

MARROS, F. *Caracterização acústica de salas para prática e ensino musical*. Santa Maria, 2011.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. *Architectural acoustics principles and design*. Colombus, 1999.

ODEON. *User Manual – Industrial, Auditorium and Combined Editions*. Dinamarca, 2009.

OGASAWARA, A.P. *Avaliação acústica de oito salas destinadas a apresentações teatrais da cidade de campinas, SP, Através da Técnica Impulsiva*. Campinas, 2006.

OLIVEIRA, G.K. *Avaliação do comportamento acústico de auditórios com ênfase nos critérios da inteligibilidade da fala*. Florianópolis, 2015.

SMIDERLE, Roberta. *Diagnóstico das características acústicas de seis igrejas católicas de campinas*. Campinas, 2013.

VIANNA, N.S. *Acústica arquitetônica, urbana e teatros e afins*. AEA Educação Continuada, São Paulo, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Condições do ambiente durante a medição

Tabela 13 Informações da medição

Data de medição	Horário da medição	Ruído de fundo (Leq)	NPS corrigido Lc*	NCA para área e horário de medição**
		[db(A)]	[db(A)]	[db(A)]
24/10/2015	de 10h às 12h	42,0	42,0	60

*sem componentes tonais, nem caráter impulsivo (Leq = Lc)

** (diurno com área mista, com vocação comercial e administrativa)

Tabela 14 Ruído de fundo por frequência

Ruído de Fundo	
Hz	dB
63	53,8
125	47,7
250	41,2
500	36,5
1000	35,2
2000	33,3
4000	33,9
8000	30
Global A*	42
Global Lin*	55,1

Tabela 15 Informações do ambiente durante a medição. Fonte: LEPTEN

Temp.	Umidade relativa	Pressão média	V vento	Curva NC	
[°C]	[%]	[mbar]	[m/s]	NC	[db(A)]
21,2	64,6	1017,5	3,4	35-45	40-50

APÊNDICE 2 - Medição da igreja sem ocupação de pessoas

Tabela 16 Medição do Tempo de Reverberação para cada uma de suas três repetições em cada um dos 7 pontos ao longo da frequência

MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO									
Pontos	1	1	1	2	2	2	3	3	3
125	1,74	1,48	1,72	2,06	1,89	1,79	2,11	1,69	2,32
250	1,54	1,48	1,85	1,6	1,73	1,9	1,6	1,49	1,47
500	1,48	1,54	1,62	1,61	1,6	1,5	1,49	1,51	1,47
1000	1,48	1,45	1,48	1,45	1,47	1,45	1,43	1,46	1,45
2000	1,58	1,59	1,59	1,55	1,64	1,56	1,54	1,49	1,54
4000	1,43	1,47	1,45	1,5	1,53	1,43	1,5	1,46	1,49
Pontos	4	4	4	5	5	5	6	6	6
125	1,93	1,51	2,23	1,6	1,4	1,49	1,3	1,51	1,54
250	1,45	1,5	1,44	1,46	1,45	1,81	1,36	1,52	1,27
500	1,57	1,64	1,47	1,42	1,52	1,47	1,44	1,5	1,48
1000	1,46	1,47	1,54	1,41	1,47	1,41	1,44	1,46	1,48
2000	1,51	1,49	1,47	1,41	1,48	1,38	1,39	1,44	1,51
4000	1,51	1,43	1,46	1,45	1,45	1,44	1,41	1,47	1,49
Pontos	7	7	7						
125	0,93	1,83	1,37						
250	1,45	1,41	1,62						
500	1,47	1,48	1,53						
1000	1,44	1,51	1,46						
2000	1,47	1,52	1,65						
4000	1,45	1,5	1,53						

Tabela 17 Posição da fonte e dos pontos medidos nas coordenadas x, y e z

	x	y	z
Fonte	0	3,04	2,25
Pontos Medidos	1	-2,34	6,84
	2	2,3	11,34
	3	-2,34	15,74
	4	2,04	18,8
	5	-2,34	20,75
	6	3,3	18
	7	-2,7	21,07

Tabela 18 Média do Tempo de Reverberação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência

Receptor No	Média de TR(s) medido					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	1,65	1,62	1,55	1,47	1,59	1,45
2	1,91	1,74	1,57	1,46	1,58	1,49
3	2,04	1,52	1,49	1,45	1,52	1,48
6	1,45	1,38	1,47	1,46	1,45	1,46
4	1,89	1,46	1,56	1,49	1,49	1,47
5	1,5	1,57	1,47	1,43	1,42	1,45
7	1,38	1,49	1,49	1,47	1,55	1,49

APÊNDICE 3 - Simulação da igreja sem ocupação de pessoas

Tabela 19 Média do EDT simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência

Receptor No	EDT(s) simulado						
	125	250	500	1000	2000	4000	
1	1,25	1,32	1,6	1,67	1,52	1,28	
2	1,32	1,38	1,68	1,77	1,63	1,43	
3	1,46	1,54	1,84	1,81	1,7	1,47	
6	1,45	1,47	1,81	1,74	1,64	1,41	
4	1,5	1,59	1,83	1,84	1,74	1,47	
5	1,53	1,65	1,92	1,98	1,71	1,57	
7	1,5	1,52	1,8	1,8	1,62	1,39	

Tabela 20 Média do T30 simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência

Receptor No	T30(s) simulado						
	125	250	500	1000	2000	4000	
1	1,4	1,48	1,75	1,77	1,6	1,42	
2	1,41	1,47	1,7	1,79	1,62	1,46	
3	1,41	1,47	1,75	1,8	1,64	1,42	
6	1,44	1,51	1,73	1,81	1,62	1,43	
4	1,47	1,49	1,73	1,74	1,64	1,46	
5	1,41	1,48	1,73	1,77	1,65	1,41	
7	1,44	1,5	1,71	1,79	1,65	1,45	

Tabela 21 Média do C80 simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência

Receptor No	C80(dB) simulado						
	125	250	500	1000	2000	4000	
1	3	2,6	1,3	1,4	1,8	2,8	
2	1,4	1	-0,3	-0,5	0	0,8	
3	0,3	-0,1	-1,5	-1,7	-1,1	-0,2	
6	0,7	0,6	-0,4	-0,3	0,4	1,3	
4	0,5	-0,1	-1,4	-1,5	-0,8	0,1	
5	-0,1	-0,5	-1,9	-2,1	-1,2	-0,4	
7	0,2	0,2	-0,8	-0,7	-0,1	1,1	

Tabela 22 Média do D50 simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos ao longo da frequência

Receptor No	D50 simulado					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,53	0,51	0,45	0,46	0,48	0,53
2	0,42	0,4	0,34	0,33	0,35	0,39
3	0,35	0,33	0,27	0,26	0,29	0,32
6	0,4	0,4	0,35	0,35	0,39	0,44
4	0,39	0,35	0,29	0,28	0,32	0,36
5	0,35	0,33	0,27	0,26	0,3	0,34
7	0,37	0,37	0,32	0,33	0,36	0,41

Tabela 23 STI simulado para igreja sem ocupação para cada um dos 7 pontos

STI simulado	
Receptor No	
1	0,56
2	0,51
3	0,48
6	0,52
4	0,49
5	0,48
7	0,51

APÊNDICE 4 - Simulação da igreja com 70% de ocupação de pessoas

Tabela 24 Posição da fonte e dos pontos simulados nas coordenadas x, y e z

	x	y	z
Fonte	0	3,04	2,25
1	-4,5	10,5	1,2
2	-4,5	17	1,2
3	-4,5	20,7	1,2
4	0	7,3	1,2
5	0	14,2	1,2
6	0	19,3	1,2
7	4,5	7,3	1,2
8	4,5	11	1,2
9	4,5	15	1,2
Pontos Medidos	10	19	1,2
11	0	10,5	1,2
12	0	17,4	4,1
13	4,5	18,5	4,2
14	-1	19,5	4,45
15	-4,5	21	4,7
16	0	22,4	5,05
17	4,5	3	1,95
18	0	1	1,95

Tabela 25 Média do EDT simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos ao longo da frequência

Receptor No	EDT(s) simulado						
	125	250	500	1000	2000	4000	
18	0,89	0,95	0,93	0,83	0,75	0,51	
4	1,12	1,15	1,19	1,15	1,14	0,99	
17	1,23	1,29	1,26	1,19	1,25	1,06	
7	1,13	1,21	1,24	1,14	1,14	1,04	
11	1,2	1,3	1,25	1,27	1,2	1,08	
1	1,18	1,26	1,28	1,21	1,25	1,05	
8	1,23	1,23	1,26	1,21	1,24	1,13	
5	1,37	1,41	1,43	1,37	1,27	1,24	
9	1,3	1,34	1,34	1,26	1,31	1,15	
12	1,31	1,29	1,3	1,25	1,28	1,16	

2	1,24	1,36	1,34	1,26	1,2	1,15
13	1,23	1,27	1,25	1,17	1,26	1,05
6	1,41	1,44	1,5	1,43	1,35	1,24
10	1,38	1,35	1,39	1,27	1,27	1,18
14	1,29	1,33	1,27	1,3	1,19	1,05
3	1,38	1,39	1,45	1,4	1,27	1,22
15	1,24	1,36	1,27	1,19	1,22	1,08
16	1,33	1,35	1,37	1,25	1,22	1,14

Tabela 26 Média do T30 simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos ao longo da frequência

Receptor No	T30(s) simulado					
	125	250	500	1000	2000	4000
18	1,34	1,37	1,36	1,3	1,27	1,15
4	1,33	1,38	1,32	1,31	1,3	1,15
17	1,32	1,35	1,32	1,29	1,25	1,15
7	1,36	1,4	1,36	1,32	1,3	1,15
11	1,33	1,37	1,38	1,33	1,32	1,18
1	1,35	1,39	1,34	1,32	1,3	1,16
8	1,36	1,4	1,34	1,33	1,29	1,14
5	1,36	1,39	1,36	1,35	1,29	1,19
9	1,35	1,41	1,34	1,31	1,28	1,18
12	1,37	1,39	1,36	1,33	1,32	1,19
2	1,35	1,35	1,35	1,31	1,26	1,18
13	1,34	1,4	1,33	1,33	1,29	1,17
6	1,34	1,42	1,38	1,34	1,3	1,18
10	1,34	1,38	1,33	1,33	1,28	1,18
14	1,33	1,35	1,37	1,34	1,28	1,15
3	1,39	1,45	1,39	1,36	1,29	1,21
15	1,37	1,4	1,37	1,32	1,3	1,17
16	1,33	1,35	1,34	1,28	1,3	1,2

Tabela 27 Média do C80 simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos ao longo da frequência

Receptor No	C80(dB) simulado					
	125	250	500	1000	2000	4000
18	7,7	7,4	7,5	8,2	8,5	9,6
4	3,5	3,1	3,2	3,6	3,6	4,4

17	4,1	3,8	3,9	4,2	4,2	5
7	3	2,7	2,8	3,1	3,1	3,8
11	1,8	1,5	1,5	1,7	1,7	2,3
1	2,2	1,8	1,9	2,1	2,1	2,7
8	2	1,7	1,7	1,9	1,9	2,5
5	0,6	0,2	0,2	0,4	0,6	1,2
9	1,6	1,2	1,2	1,4	1,5	2,1
12	1,5	1,2	1,2	1,5	1,5	2,3
2	1,3	1	1,1	1,3	1,5	2,1
13	2	1,9	2,2	2,6	2,5	3,2
6	-0,4	-0,8	-0,6	-0,4	0,2	0,8
10	1,5	1,2	1,3	1,6	1,9	2,5
14	1,8	1,6	1,7	2	2	2,8
3	0,4	0,1	0,2	0,4	0,9	1,5
15	1,6	1,4	1,6	1,9	1,9	2,6
16	1,1	0,9	1	1,3	1,3	2,2

Tabela 28 Média do D50 simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos ao longo da frequência

Receptor No	D50 simulado					
	125	250	500	1000	2000	4000
18	0,81	0,8	0,8	0,83	0,84	0,87
4	0,55	0,54	0,55	0,56	0,56	0,6
17	0,63	0,61	0,62	0,63	0,63	0,67
7	0,53	0,51	0,52	0,54	0,53	0,57
11	0,43	0,41	0,41	0,43	0,43	0,46
1	0,46	0,44	0,44	0,45	0,45	0,48
8	0,44	0,43	0,43	0,44	0,44	0,47
5	0,35	0,33	0,34	0,35	0,36	0,39
9	0,41	0,4	0,4	0,41	0,42	0,45
12	0,43	0,42	0,42	0,43	0,43	0,47
2	0,41	0,39	0,4	0,41	0,42	0,45
13	0,47	0,47	0,49	0,51	0,5	0,54
6	0,32	0,31	0,32	0,33	0,36	0,4
10	0,44	0,42	0,43	0,44	0,46	0,49
14	0,46	0,45	0,45	0,47	0,47	0,51
3	0,37	0,36	0,37	0,37	0,4	0,43
15	0,44	0,43	0,44	0,46	0,45	0,49

16 0,42 0,41 0,41 0,43 0,43 0,47

Tabela 29 STI simulado para igreja com 70% de ocupação para cada um dos 18 pontos

STI simulado	
Receptor No	
1	0,56
2	0,55
3	0,53
4	0,6
5	0,52
6	0,52
7	0,59
8	0,56
9	0,55
10	0,55
11	0,55
12	0,55
13	0,58
14	0,57
15	0,56
16	0,56
17	0,63
18	0,75

APÊNDICE 5 - Parâmetros acústicos simulados por setor de localização na igreja quando ocupada em 70%

Tabela 30 Representatividade de cada um dos 18 pontos nos setores

SETORES	Pontos						
Parte central	1	4	5	7	8	9	11
Abaixo do mezanino	2	3	6	10			
Mezanino	12	13	14	15	16		
Palco	17	18					

Tabela 31 Média dos parâmetros acústicos simulados ao longo da frequência para o setor de parte central

Parte central						
Param, simulated	125	250	500	1000	2000	4000
EDT	1,22	1,27	1,28	1,23	1,22	1,1
T30	1,35	1,39	1,35	1,32	1,3	1,16
C80	2,1	1,74	1,79	2,03	2,07	2,71
D50	0,45	0,44	0,44	0,45	0,46	0,49
STI	0,56					

Tabela 32 Média dos parâmetros acústicos simulados ao longo da frequência para o setor de abaixo do mezanino

Abaixo do mezanino						
Param, simulated	125	250	500	1000	2000	4000
EDT	1,35	1,39	1,42	1,34	1,27	1,2
T30	1,36	1,4	1,36	1,34	1,28	1,19
C80	0,7	0,38	0,5	0,73	1,13	1,73
D50	0,39	0,37	0,38	0,39	0,41	0,44
STI	0,54					

Tabela 33 Média dos parâmetros acústicos simulados ao longo da frequência para o setor de mezanino

Mezanino						
Param, simulated	125	250	500	1000	2000	4000
EDT	1,28	1,32	1,29	1,23	1,23	1,1
T30	1,35	1,38	1,35	1,32	1,3	1,18
C80	1,6	1,4	1,54	1,86	1,84	2,62

D50	0,44	0,44	0,44	0,46	0,46	0,5
STI	0,56					

Tabela 34 Média dos parâmetros acústicos simulados ao longo da frequência para o setor de palco

Palco

Param, simulated	125	250	500	1000	2000	4000
EDT	1,06	1,12	1,1	1,01	1	0,79
T30	1,33	1,36	1,34	1,3	1,26	1,15
C80	5,9	5,6	5,7	6,2	6,35	7,3
D50	0,72	0,71	0,71	0,73	0,74	0,77
Ts	49	52,5	51,5	47,5	46,5	40
STI	0,69					

APÊNDICE 6 - Modos normais axiais da igreja de acordo com suas dimensões

Tabela 35 Modos Normais no modo axial em ordem de frequência e seu respectivo número inteiro (m, n ou l) para as dimensões de L_x , L_y e L_z

Modos normais em ordem de frequência			
Frequências (Hz)	m	n	l
8,6	0	1	0
15,0	1	0	0
17,2	0	2	0
25,8	0	3	0
29,9	2	0	0
34,4	0	0	1
34,4	0	4	0
43,0	0	5	0
44,9	3	0	0
51,6	0	6	0
59,8	4	0	0
60,2	0	7	0
68,8	0	0	2
68,8	0	8	0
74,8	5	0	0
77,4	0	9	0
86,0	0	10	0
89,8	6	0	0
94,6	0	11	0
103,2	0	0	3
103,2	0	12	0
104,7	7	0	0
111,8	0	13	0
119,7	8	0	0
120,4	0	14	0
129,0	0	15	0
134,7	9	0	0
137,6	0	0	4
137,6	0	16	0
146,3	0	17	0
149,6	10	0	0
154,9	0	18	0
163,5	0	19	0
164,6	11	0	0

172,1	0	0	5
172,1	0	20	0
179,5	12	0	0
180,7	0	21	0
189,3	0	22	0
194,5	13	0	0
197,9	0	23	0
206,5	0	0	6
206,5	0	24	0
209,5	14	0	0
215,1	0	25	0
223,7	0	26	0
224,4	15	0	0
232,3	0	27	0
239,4	16	0	0
240,9	0	0	7
240,9	0	28	0
249,5	0	29	0
254,3	17	0	0
258,1	0	30	0
266,7	0	31	0
269,3	18	0	0
275,3	0	0	8
275,3	0	32	0
283,9	0	33	0
284,3	19	0	0
292,5	0	34	0
299,2	20	0	0
301,1	0	35	0
309,7	0	0	9
309,7	0	36	0
314,2	21	0	0
318,3	0	37	0
326,9	0	38	0
329,2	22	0	0
335,5	0	39	0
344,1	0	0	10
344,1	23	0	0
344,1	0	40	0
352,7	0	41	0
359,1	24	0	0
361,3	0	42	0
369,9	0	43	0
374,0	25	0	0
378,5	0	0	11

378,5	0	44	0
387,1	0	45	0
389,0	26	0	0
404,0	27	0	0
412,9	0	0	12
418,9	28	0	0
433,9	29	0	0
447,4	0	0	13
448,9	30	0	0
463,8	31	0	0
478,8	32	0	0
481,8	0	0	14
493,7	33	0	0
508,7	34	0	0
516,2	0	0	15
523,7	35	0	0
538,6	36	0	0
550,6	0	0	16
553,6	37	0	0
568,5	38	0	0
583,5	39	0	0
585,0	0	0	17
598,5	40	0	0
613,4	41	0	0
619,4	0	0	18
628,4	42	0	0
643,4	43	0	0
653,8	0	0	19
658,3	44	0	0
673,3	45	0	0
688,2	0	0	20
722,7	0	0	21
757,1	0	0	22
791,5	0	0	23
825,9	0	0	24
860,3	0	0	25
894,7	0	0	26
929,1	0	0	27
963,5	0	0	28
997,9	0	0	29
1032,4	0	0	30
1066,8	0	0	31
1101,2	0	0	32
1135,6	0	0	33
1170,0	0	0	34

1204,4	0	0	35
1238,8	0	0	36
1273,2	0	0	37
1307,7	0	0	38
1342,1	0	0	39
1376,5	0	0	40
1410,9	0	0	41
1445,3	0	0	42
1479,7	0	0	43
1514,1	0	0	44
1548,5	0	0	45