



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

SIMULAÇÃO ACÚSTICA E AURALIZAÇÃO:
QUÃO PRÓXIMOS DO AMBIENTE REAL
PODEMOS CHEGAR?

Renato Junqueira Coelho Netto

Brasília, Julho de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

SIMULAÇÃO ACÚSTICA E AURALIZAÇÃO: QUÃO PRÓXIMOS DO AMBIENTE REAL PODEMOS CHEGAR?

Renato Junqueira Coelho Netto

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista.*

Banca Examinadora

Prof. Alexandre Romariz, UnB/ ENE
Orientador

Prof. Ricardo Zelenovsky, UnB/ENE
Examinador Interno

Prof. Daniel Café, UnB/ ENE
Examinador Interno

Auralização é o processo de estimar o campo sonoro emitido por uma fonte em um espaço, de modo a simular uma sensação binaural em uma posição do espaço modelado, ou seja, sintetizar os sons de maneira que, ao escutá-los, o ouvinte seja virtualmente transportado ao ambiente em questão. Recentemente, as auralizações se tornaram mais influentes na acústica arquitetônica e na realidade virtual. No entanto, existem poucos estudos examinando a qualidade perceptiva alcançável por simulações acústicas de salas/ambientes e auralizações. Para realizar auralizações realísticas, a calibragem do modelo de acústica geométrica é considerada uma importante etapa. Nas situações em que o espaço estudado já existe, auralizações bem calibradas podem ser empregadas para diversos propósitos, como, por exemplo, explorações multimodais de realidade virtual, estudos da influência acústica de renovações e pesquisas históricas. Este trabalho visa explicar os conceitos de auralização e inteligibilidade de fala e analisar a qualidade da simulação em termos perceptivos. O estudo tem como base o Santuário Dom Bosco, localizado em Brasília/DF. O método escolhido para tal é fazer uma comparação dos resultados, através de parâmetros acústicos calculados/simulados com o software EASE, com gravações binaurais realizadas no local.

Palavras-chave: Auralização, Acústica de ambientes, Modelagem computacional, Inteligibilidade de fala.

Auralization is the process of estimating a sound field created by a source in a space, in order to simulate a binaural sensation in a position of the modelled space, that is, to synthesize the sounds in a way that, when listening, the listener is virtually transported to that environment. Recently, auralizations have become more influential in architectural acoustics and virtual reality. However, there are few studies examining the perceptual quality achievable by acoustic simulations of rooms / environments and auralizations. To perform realistic auralizations, the calibration of the geometric acoustics model is considered an important step. In situations where the space studied already exists, well-calibrated auralizations can be used for various purposes, such as multimodal explorations of virtual reality, studies of the acoustic influence of renovations and historical research. This project aims to explain the concepts of auralization and speech intelligibility and to analyse the quality of the simulation in perceptual terms. The study is based on the Dom Bosco Sanctuary, located in Brasília / DF. The method chosen for this is to make a comparison of the results, through acoustic parameters calculated / simulated with the software EASE, with binaural recordings performed on the spot.

Keywords: Auralization, Acoustics of environments, Computational modeling, Speech intelligibility.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. Objetivo Geral | 13 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 14 |
| 1.3. Estrutura do Trabalho | 14 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 15 |
| 2.1. Acústica Arquitetônica | 15 |
| 2.2. Som em ambientes fechados | 17 |
| 2.2.1. Fala | 19 |
| 2.3. Parâmetros Acústicos do ambiente..... | 21 |
| 2.3.1. Resposta ao Impulso (IR) | 21 |
| 2.3.2. Tempo de Reverberação (RT) | 21 |
| 2.3.3. Inteligibilidade de Fala (SI)..... | 25 |
| 2.3.4. Índice de Inteligibilidade de Fala (STI)..... | 25 |
| 3. ETAPAS DO TRABALHO | 28 |
| 3.1. Levantamento Arquitetônico do ambiente | 28 |
| 3.2. Calibragem do Modelo | 28 |
| 3.3. Procedimentos Experimentais | 32 |
| 3.3.1. Auralização | 36 |
| 4. RESULTADOS | 39 |
| 4.1. Avaliação Objetiva | 39 |
| 4.2. Avaliação Subjetiva..... | 41 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 41 |
| REFERÊNCIAS | 42 |
| ANEXO..... | 44 |
| I. Fotos do Santuário Dom Bosco | 44 |
| II. Fotos do dia de medições RT | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Quadro resumo dos principais parâmetros acústicos | 14 |
| Figura 2 : Espectro vocal masculino e feminino..... | 17 |
| Figura 3: Diagrama de reflexão de ondas sonoras..... | 19 |
| Figura 4: Resposta da sala em estado estacionário..... | 20 |
| Figura 5: Direcionalidade da fala para bandas de frequências diferentes..... | 21 |
| Figura 6: Exemplo de Everest - efeito do RT na palavra " <i>back</i> " | 21 |
| Figure 7: Resposta ao Impulso em um ambiente durante 400ms | 22 |
| Figura 8: Definição de RT | 23 |
| Figura 9: Valor recomendado de RT entre 500 e 1000Hz para música ou fala em função do volume da sala..... | 24 |
| Figura 10: Faixa de tolerância de frequências de RT/RT recomendado para fala..... | 24 |
| Figura 11: Faixa de tolerância de frequências de RT/RT recomendado para música..... | 24 |

| | |
|--|----|
| Figura 12 : Coeficiente de absorção do ar m em função da umidade relativa | 25 |
| Figura 13: materiais de revestimento das faces no modelo | 29 |
| Figura 14: Coeficientes de absorção (a) e espalhamento (b) dos materiais | 29 |
| Figura 15: Modelo 3D do Santuário Dom Bosco visualizado através da aba “Room Mapping” do EASE | 30 |
| Figure 16: Resposta do sistema (a) e RT (b) calculado para o microfone na posição 4: 16,2m de distância da fonte sonora..... | 31 |
| Figure 17: Gráfico da tabela 2..... | 32 |
| Figura 18: Vistas lateral (a) e superior (b) do balão de irradiação da fonte sonora em 1000Hz | 33 |
| Figure 19: Potência elétrica e pressão sonora máximas atingidas pela fonte sonora | 34 |
| Figure 20: Disposição dos microfones | 34 |
| Figure 21 : Vista superior da igreja mostrando as posições dos assentos em relação à área de audiência | 36 |
| Figure 22: Balão de atenuação para uma cabeça falsa (dummy head) na frequência de 1000Hz | 38 |
| Figure 23: visão plana do balão de atenuação para uma cabeça falsa (dummy head) na frequência de 1000Hz..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Figure 24: resposta binaural (BIR) gerada a partir da convolução nos assentos 4 (a) e 7 (b)..... | 39 |
| Figure 25: RT (T20) medido via resposta de impulso da sala..... | 40 |
| Figure 26: RT (T20) calculado através da auralização..... | 40 |
| Figure 27: STI medido via resposta de impulso da sala..... | 40 |
| Figure 28: STI calculado através da auralização..... | 40 |

LISTA DE TABELAS

Table 1: Valores subjetivos de STI.....27

Table 2: Tempos RT estimados via Sabine, Eyring e simulados utilizando fonte sonora omnidirecional e K10.....32

Table 3: Posição dos assentos.....35

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| C80 | Medida de Clareza |
| EASE | Enhanced Acoustic Simulator for Engineers |
| AFMG | Ahnert Feistel Media Group |
| fs | Frequência de Schroeder |
| RT | Tempo de Reverberação |
| NC | Noise Criteria |
| V | Volume do ambiente |
| IR | Resposta ao Impulso |
| α | Coefficiente médio de absorção da sala |
| Atot | Superfície total de absorção |
| Stot | Superfície total da sala |
| m | Fator de atenuação de energia do ar |
| SI | Inteligibilidade de Fala |
| STI | ndice de Transmissão de Fala |
| %ALCons | Porcentagem de Perda de Articulação de Consoantes |
| MTF | Função de transmissão de modulação |
| S | Sinal |
| N | Ruído |
| $m(F)$ | Fator de redução de modulação |
| F | Frequência de modulação |
| WMTF | Função de transmissão de modulação ponderada |
| HRTF | Função de Transferência Relacionada  Cabeça |
| BIR | Resposta ao Impulso Binaural |

1. INTRODUÇÃO

Com apresentações faladas ou musicais em auditórios e salas de concerto, a avaliação acústica baseia-se principalmente na percepção subjetiva do público e dos artistas. Esses julgamentos geralmente não são baseados em critérios definidos, mas caracterizam a percepção tonal. Além dos fatores secundários influenciando a impressão acústica global, como, por exemplo, o conforto dos assentos, o ar-condicionado, o nível de interferência, a impressão óptica, arquitetônica e estilística, é a expectativa do ouvinte que, especialmente, desempenha um papel fundamental para a avaliação acústica. Se um ouvinte em um concerto clássico está sentado ao lado dos instrumentos de sopro, mas ouve os instrumentos de metal muito mais altos, mesmo que não possa vê-los, suas expectativas como ouvinte e, portanto, à acústica estão "deslocadas". Diversos critérios subjetivos e objetivos foram definidos e sua correlação determinada a fim de objetivar esses julgamentos em relação à acústica do ambiente em que se está inserido. No entanto, estes critérios individuais estão estreitamente ligados uns aos outros e os efeitos acústicos não podem ser trocados tampouco alterados individualmente. Eles se tornam efetivos para julgamento somente em sua totalidade.

O julgamento dos apresentadores, por outro lado, pode ser considerado uma espécie de "avaliação do local de trabalho". Apenas o músico, cantor ou orador que se sente completamente à vontade com todos os fatores "marginais" também elogiará a qualidade acústica. Os principais fatores julgados aqui são o volume do som e a escuta mútua (retorno), que também é responsável pela entonação. Uma resposta acusticamente adequada do auditório tem que ser realizada para os artistas para que esta correspondência positiva suporte a experiência artística global. A impressão acústica geral de seu próprio trabalho depende de como ele é percebido na área de audiência e desempenha um papel secundário para o artista. O que é importante para ele são as condições de ensaio em que a acústica é a mais próxima possível do desempenho atual e que os critérios acústicos dependam o mínimo possível da densidade de ocupação tanto na área de audiência como na área da apresentação. Geralmente, um(a) ambiente (sala) de apresentação não deve mostrar nenhuma característica de reflexão perturbadora como efeitos de eco ou ecos vibrantes. Todos os assentos devem garantir boa audibilidade que esteja em boa conformidade com a expectativa auditiva. Isto requer um som equilibrado de alta clareza e um espaço adequado. Deslocamentos de localização ou desvios entre impressões visuais

e acústicas não devem ocorrer. Se a sala é usada como uma sala de concertos, a unidade espacial entre o auditório e as áreas da plataforma (apresentação) têm que ser mantidas para evitar distorções sonoras.

Com base nessas considerações e avaliações bem fundamentadas, exames técnicos objetivos e testes subjetivos, parcialmente em salas livres de reverberação dentro de campos sonoros gerados artificialmente, foi possível definir critérios de qualidade que permitem uma escuta e experiência ótimas dependendo do uso da sala. Quanto maior o espectro de uso, mais amplo é o intervalo do valor de referência desejável desses critérios. Sem medições acústicas extensas – eletrônicas também - apenas um grande comprometimento traz uma solução minimamente satisfatória. É lógico que este comprometimento só pode ser tão bom quanto o grau em que os requisitos acústicos da sala coincidam com ele. Uma pré-condição para um ótimo *design* de auditórios e salas de concerto é uma coordenação muito precoce na fase de planejamento. A base é o estabelecimento da *estrutura primária* da sala de acordo com o uso pretendido (formato da sala, volume, topografia das áreas dos espectadores e da plataforma). A *estrutura secundária* que decide o projeto das estruturas nas paredes e no teto, bem como a sua eficácia acústica, tem de ser trabalhada nesta base. Uma metodologia de planejamento que garanta a funcionalidade acústica e a qualidade de auditórios e salas de concerto de primeiro nível assim como para salas com estrutura primária complicada passa pela realização de simulações compostas por modelos matemáticos e físicos.

A avaliação acústica por ouvintes e atores da qualidade de um sinal que é emitido a partir de uma fonte acústica natural ou através de dispositivos eletroacústicos é, na maioria das vezes, muito imprecisa. Esta avaliação é influenciada por causas objetivas existentes, como perturbações climáticas, condições dos assentos e visibilidade, bem como por circunstâncias subjetivas como, por exemplo, a atitude e receptividade em relação ao conteúdo e aos antecedentes da apresentação. Muito diferenciada é a classificação subjetiva da música, onde o termo "boa acústica" é definido, dependendo do gênero, como um volume suficiente, um bom tempo e clareza do som, e um espaço que atende a composição. Mudanças de timbre que se desviam do timbre "natural" das fontes acústicas e da dependência de distância usual (sons em alta frequência são menos eficazes a uma distância maior do local de origem do que de perto) são julgados como não naturais quando se trata de música tradicional. Essas experiências determinam também a expectativa do que se escuta, por exemplo, em uma grande catedral bastante espaçosa e reverberante, enquanto se espera um som "seco" para áreas abertas; Desvios desta

expectativa são considerados um incômodo. Um ouvinte sentado na seção frontal de uma sala de concertos espera um som mais claro do que um sentado em uma seção traseira. Por outro lado, no entanto, ele quer desfrutar de um padrão acústico idealmente equilibrado em todos os assentos, pois ele cresceu com a influência da mídia e principalmente com produções de som pós-processadas que são independentes da sala e, portanto, adquiriu expectativas auditivas que não permitem uma avaliação isenta e objetiva da sala existente.

A avaliação da fala é geralmente um pouco mais fácil, uma vez que a audibilidade e inteligibilidade desejadas são uma atmosfera que não é influenciada pela sala ou meios electro-acústicos. Talvez com exceção dos quartos sacrais, o espaço geralmente não desempenha um papel tão importante neste quesito, considerando que o volume de som e inteligibilidade são mais importantes.

Numerosos critérios acústicos foram definidos para esclarecer os termos aplicados na avaliação subjetiva e objetiva de uma fala ou apresentação musical. Um único parâmetro idealmente determinado pode não ser acusticamente satisfatório, porque outro parâmetro influencia o julgamento de um modo negativo. Por exemplo, a faixa de valores ótimos de *Center Time* e definição só pode ser avaliada com uma estimativa correta do tempo de reverberação. Os valores-guia da medida de reverberação são válidos apenas se a medida de clareza estiver na faixa ideal. Nota-se que existe uma estreita correlação entre os critérios individuais.

Em princípio, os critérios de qualidade podem ser subdivididos em critérios de tempo e energia. O principal tipo de uso - fala ou música, então determina as recomendações para os valores-guia a serem considerados. Com salões polivalentes (sem medidas variáveis disponíveis para alterar a acústica), é necessário que se oriente sobre o tipo principal de uso.

Abaixo tem-se um quadro resumo dos principais parâmetros acústicos. Neste trabalho serão abordados durante o procedimento experimental apenas o RT e o STI.

| Parâmetros acústicos | Conceito |
|-------------------------------------|---|
| Tempo de Reverberação (TR) | É definido como o tempo necessário para o nível de pressão sonora existente em uma sala decair 60 dB, a partir do momento em que uma fonte sonora é cessada. |
| Tempo de Decaimento Inicial (EDT) | Caracteriza a parte inicial da curva de decaimento energético. É seis vezes o intervalo de tempo correspondente ao decaimento médio entre 0 dB e 10 dB após a fonte ter cessado. |
| Definição (D50) | Trata da relação entre a energia que chega ao ouvinte dentro dos primeiros 50 ms e a energia total recebida pelo mesmo. São as 'reflexões úteis' que dão suporte ao som direto. |
| Inteligibilidade da fala (SI) | É a proporção de itens da fala corretamente compreendidos e repetidos pelo ouvinte para um dado teste de inteligibilidade da fala. Avaliado através de testes subjetivos. |
| Índice de transmissão da fala (STI) | É o correlato físico do SI. Expressa o grau de alteração da profundidade de modulação em amplitude sofrida pelo sinal da fala, causada pela reverberação e pelo ruído de fundo. |
| Índice de articulação da fala (AI) | É um método de estimativa da inteligibilidade na presença do ruído. É a probabilidade de compreender um som individualmente. |
| Clareza (C80) | É o quociente em dB entre a energia recebida nos primeiros 80 ms do sinal percebido pelo ouvinte e a energia recebida após esse intervalo de tempo. Similar à Definição, porém indicado para fins musicais. |

Figura 1: Quadro resumo dos principais parâmetros acústicos
Fonte: Elaborado pelo autor.

1.1 Objetivo Geral

A auralização de salas tem muitas aplicações, desde a apresentação de propostas de projetos de construção até pesquisas usando testes de audição. Para a maioria das aplicações, é importante saber quão confiável é a auralização e até que ponto os detalhes acústicos são realmente calculados. A qualidade da auralização está intimamente relacionada com a qualidade do modelo acústico utilizado para o cálculo da resposta ao impulso. Assim, a primeira parte deste trabalho mostrará o processo de calibragem do modelo computacional do ambiente em estudo. Em seguida, o processo de auralização será explicado e, finalmente, os métodos de avaliação objetivos e subjetivos serão discutidos. Todo o método de cálculo foi realizado nos softwares EASE e Systune, desenvolvidos e distribuídos pela AFMG – Ahnert Feistel Media Group.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a modelagem acústica do Santuário Dom Bosco;
- Utilizar medições acústicas para calibrar o modelo;

- Testar a fidelidade do modelo em relação ao ambiente real;
- Fazer uma análise dos resultados objetivos e subjetivos afim de comprovar, ou não, a qualidade do modelo em estudo.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho é apresentado em cinco capítulos conforme disposto abaixo:

- **Capítulo 1: Introdução**
 - Um panorama dos assuntos que serão abordados ao longo do trabalho e a descrição dos objetivos;
- **Capítulo 2: Fundamentação Teórica**
 - Apresenta a revisão bibliográfica dos conceitos e parâmetros acústicos importantes para entendimento do estudo em questão;
- **Capítulo 3: Etapas do Trabalho**
 - Refere-se às etapas adotadas na realização das medições no local e posteriores simulações e cálculos utilizando-se dos softwares supracitados;
- **Capítulo 4: Resultados**
 - Trata da análise e comparações entre os resultados práticos e simulados;
- **Capítulo 5: Conclusão**
 - Visa relacionar os resultados com os objetivos propostos. Neste, também, destaca-se a importância do estudo e possíveis trabalhos correlatos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Acústica Arquitetônica

Nos teatros ao ar livre de gregos e romanos, a acústica arquitetônica teve sua origem e evoluiu muito desde então. Futuramente passaram a ser construídos sob limites físicos tais como paredes e telhados e o resultado disso são os chamados auditórios e anfiteatros. Com esta evolução, a acústica passou a ser melhor entendida e, assim, incorporada em outros tipos de ambientes como salas de aula, templos, igrejas, estúdios, etc, fazendo-se presente até hoje.

A acústica arquitetônica pode ser subdividida em três áreas: isolamento acústico, condicionamento acústico e acústica urbanística. O isolamento acústico trata da proteção de determinado ambiente em relação à interferências externas (ruídos e vibrações), onde adapta-se o ambiente para o uso ao qual fora destinado. O condicionamento acústico visa melhorar a qualidade do som dentro do ambiente, para geração e percepção, também com preocupações relacionadas ao seu uso. Já a parte de acústica urbanística se preocupa com a geração de ruídos externos em diferentes zonas urbanas que geralmente visam atender especificações legais ou normas técnicas.

Este trabalho se concentra na parte de condicionamento acústico cuja qualidade é definida por diferentes parâmetros que variam conforme o tipo de mensagem sonora que se deseja transmitir dentro de determinado ambiente. Esta variação ocorre em razão da percepção humana ser diferenciada quando se trata de fala e música. No caso da música, a percepção está, ainda, intimamente ligada com identificações sonoras distintas para cada tipo de instrumento e som tocado.

A acústica arquitetônica fica mais evidente, em diferentes locais, quando os tratamos como uma rede de comunicação composta, de forma básica, por emissor, canal ou meio de transmissão (neste caso, o próprio ambiente) e receptor (LLINARES; LLOPIS; SANCHO, 1996). Contudo, a boa qualidade só irá se fazer presente quando este canal for capaz de levar a mensagem sonora até o receptor sem muito impacto nas características originais da onda sonora, i.e., quando não há excesso de absorção da energia incidente ou de reflexões no recinto. Basicamente, é possível afirmar que o principal critério para qualificar a percepção das mensagens é que o som esteja inteligível, ou seja, que tenha intensidade suficiente para superar o ruído de fundo e que o espectro

sonoro seja alterado de forma mínima. Segundo Knudsen e Harris (1950), Long (2006) e Barron (2010), em auditórios, por exemplo, cuja principal finalidade é transmitir informações para um determinado número de pessoas, o primeiro objetivo é garantir que estes ambientes possuam condições de se ter uma boa inteligibilidade de fala. Esta característica representa o quão bem a fala é reconhecida e entendida.

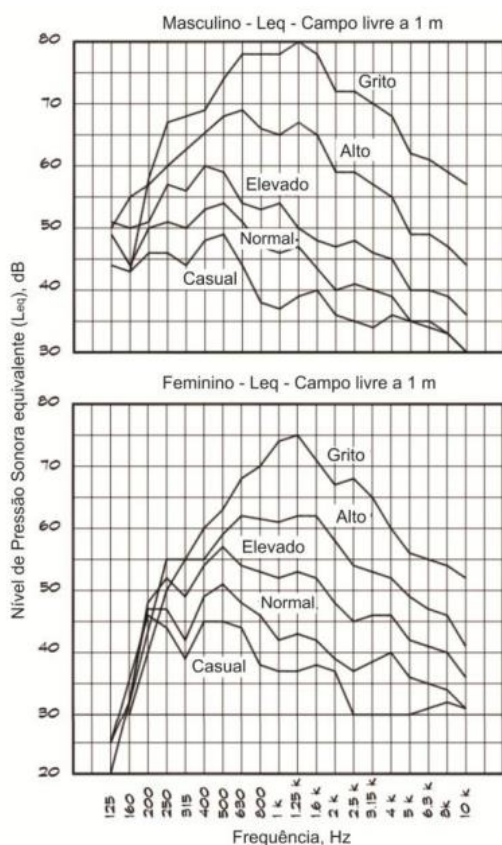


Figura 2: Espectro vocal masculino e feminino
 Fonte: (LONG, 2006), adaptado pelo autor

Afim de se garantir uma boa inteligibilidade, alguns fatores também se tornam importantes como o tempo de reverberação daquele ambiente, a eliminação de ecos e ecos flutuantes e a maximização da audibilidade na área de audiência e a minimização do ruído de fundo, por exemplo. Estes fatores são necessários pois a palavra falada não é uma fonte sonora de grande energia acústica. Outro detalhe que pode ser facilmente percebido através da figura 2 é a diferença entre o espectro sonoro masculino e feminino, onde o masculino existe uma maior concentração nas baixas frequências em relação ao feminino.

Ao se tratar da audição, os seres humanos jovens e com audição normal possuem a capacidade de escutar sons na faixa de frequência entre 20Hz e 20kHz. Com o passar do tempo, esta capacidade vai reduzindo principalmente para as altas frequências, a partir de 2kHz (BISTAFA, 2011; SILVA, 2013).

Segundo Silva (2013), a inteligibilidade da palavra tem grande relevância nas altas frequências, ou seja, nas consoantes. Como a maioria das palavras são formadas por vogais, no caso de consoantes emitidas num curto espaço de tempo e com menores níveis de pressão sonora em relação às vogais, essas podem ser mascaradas pelas próprias vogais, tornando, assim, o tempo de reverberação (RT) a característica mais suscetível a prejudicar a inteligibilidade do discurso. Este efeito de mascaramento ocorre quando sons

de frequências e intensidades distintas se misturam e o som de maior intensidade supera o de menor, tornando-o inaudível ou não inteligível.

Portanto o controle da reverberação, do ruído de fundo e da distância entre fonte sonora e ouvinte são fundamentais. Outros fatores como volume, forma, uso, etc, também influenciam, logo é preponderante manter, ou procurar, condições acústicas favoráveis de modo a garantir uma baixa atenuação das altas frequências. Tal atenuação ocorre naturalmente conforme a distância aumenta. Para grandes distâncias pode ocorrer a absorção total do som pelo ar.

2.2 Som em Ambientes Fechados

Ao ativar-se uma fonte sonora em um ambiente, esta causa uma vibração em todas as direções – as chamadas ondas sonoras esféricas – que, como fora supracitado, diminuem de intensidade com o aumento da distância. Ao primeiro encontro de uma frente de onda com o receptor, dá-se o nome de **som direto**. No entanto, ao encontrar os limites da sala, a onda sonora pode enfrentar três situações: absorção total, reflexão total ou um comportamento intermediário, onde parte da energia é absorvida e outra refletida.

Este último caso se aplica a quase que a totalidade dos ambientes reais e a energia refletida é novamente submetida a uma série de reflexões que podem ser em objetos presentes no local ou com os próprios limites do ambiente. Conforme essas reflexões vão acontecendo, a onda sonora vai perdendo energia até que fique completamente inaudível após a fonte ter sido interrompida. Porém estas reflexões “atrasadas” continuam chegando ao ouvinte que o percebe como um som contínuo. A este efeito dá-se o nome de **reverberação**. A figura 3 ilustra a situação.

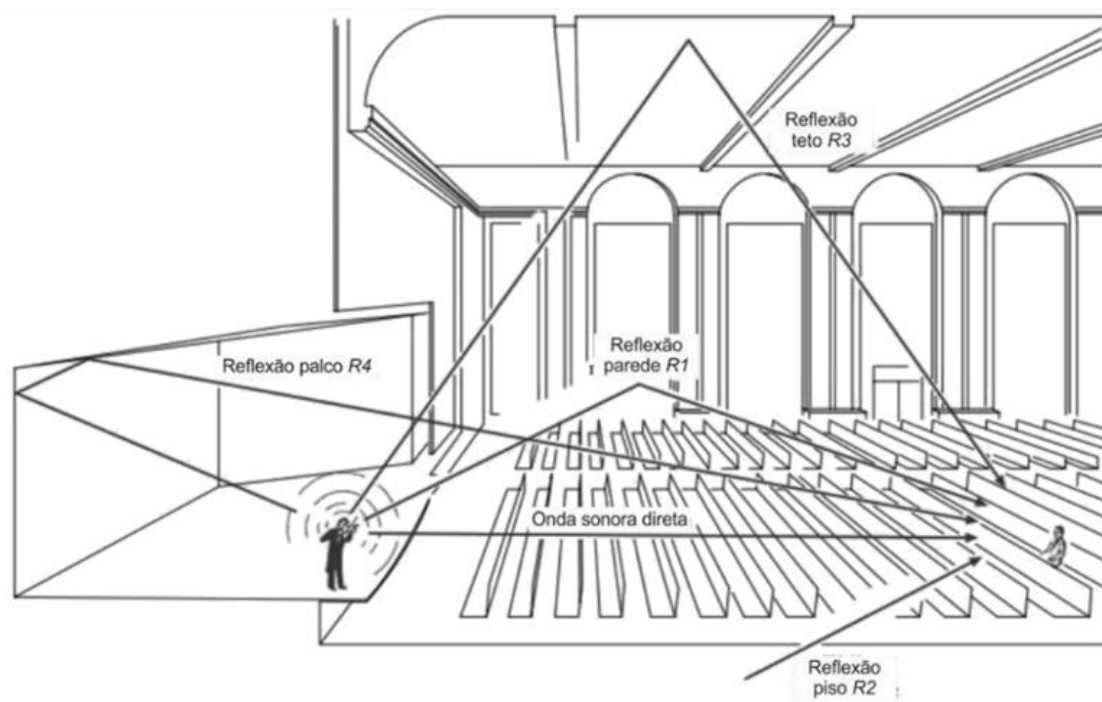


Figura 3: Diagrama de reflexão de ondas sonoras
 Fonte: (GADE, 2007), adaptado pelo autor

Lochner e Burger (1964) introduziram o conceito de som útil e prejudicial à estas reflexões. A energia sonora útil é a soma ponderada da energia dos primeiros 0,095 segundos após a chegada do som direto e a energia prejudicial é a energia que chega após a fala do emissor somado ao ruído de fundo do ambiente. Afim de se obter um equilíbrio entre a energia direta e reverberada utiliza-se da absorção acústica. Através desta é possível controlar o tempo de reverberação, eliminar ecos e ressonâncias e controlar ruídos, o que leva a reduzir o ruído de fundo do ambiente.

Compreender o comportamento das ondas sonoras num determinado ambiente é imperativo para se fazer um condicionamento acústico correto. Este ocorre a partir da interação entre as dimensões do ambiente e da frequência. Para uma análise prática de ambientes em função do desempenho sonoro e dos modos acústicos da sala, conforme mostrado na figura 4, é necessário calcular a Frequência de Schroeder (f_s) e considerar válidos apenas os valores acima desta frequência de corte, pois, para valores abaixo, os modos são muito distantes, o que diminui a uniformidade de distribuição das ondas sonoras e, por consequência, a inteligibilidade.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}$$

Sendo,
 T_{60} = Tempo de reverberação [s]
 V = Volume do ambiente [m³]

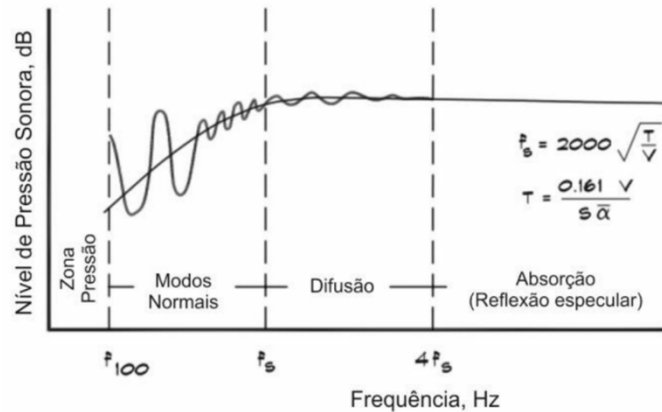


Figura 4: Resposta da sala em estado estacionário
 Fonte: (LONG, 2006).

O **ruído de fundo**, ou ruído de ambiente, é aquele ruído que, independente da atividade realizada no local, está presente. Não está relacionado a fonte sonora, por exemplo. A Norma Brasileira NBR 10152/1987 – Níveis de Ruído para conforto acústico – estabelece níveis de ruído compatíveis com diversos ambientes, apresentando valores de nível sonoro para conforto e nível sonoro aceitável para o ambiente, a depender do uso, sem interferência de ruídos externos. Para igrejas e templos, caso que se enquadra neste trabalho, os níveis recomendado e aceitável pela norma são de 40 a 50 dB(A), respectivamente. Para NC (Noise Criteria), utilizadas para análise e identificação destes ruídos por bandas de frequência, e que devem ser corrigidos, os valores definidos são de 35 a 45dB.

2.2.1 Fala

A compreensão das palavras afeta diretamente a inteligibilidade do que está sendo dito. Palavras, por sua vez, contam com potências sonoras distribuídas entre 100Hz e 10kHz no espectro de frequência e o intervalo de maior energia se encontra entre 100Hz e 800Hz. Entretanto, o torço e a cabeça produzem uma “sombra acústica” que não permite que toda essa energia seja irradiada de maneira uniforme. Frequências médias e altas, primordiais para o processo de compreensão, possuem maior diretividade enquanto as baixas são mais uniformemente distribuídas. A figura 5 ilustra este efeito.

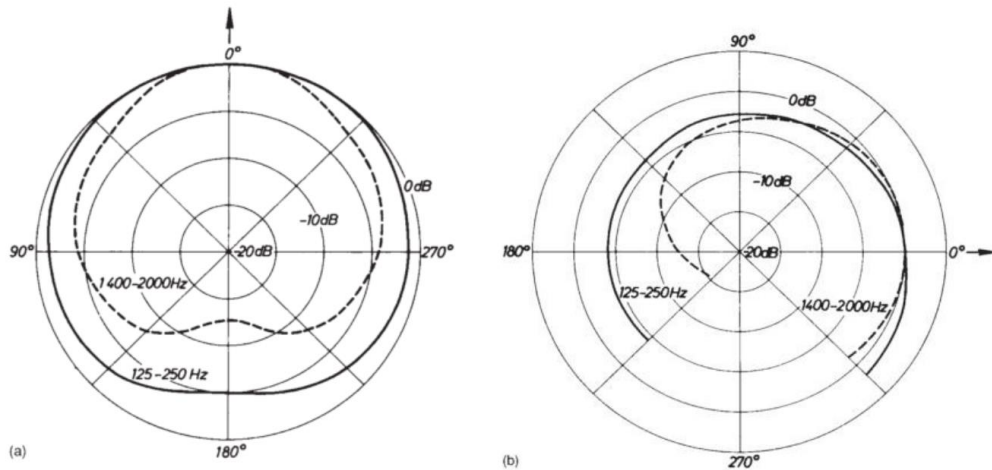


Figura 5: Direcionalidade da fala para bandas de frequências diferentes.

(a) plano horizontal e (b) plano vertical.

Fonte: (KUTTRUFF, 2009)

Conforme explicado anteriormente, as consoantes que costumam carregar as frequências mais altas, que possuem menor energia – conforme demonstra a figura 6, portanto em locais que possuem tempo de reverberação (RT) elevado – ao qual será explicado como calcular/medir posteriormente neste trabalho, a vogal existente na palavra impede a percepção da consoante seguinte e, conseqüentemente, a inteligibilidade. Um exemplo citado por Everest (2001) mostra isso acontecer – Figura 6. No caso, se a palavra “back” é pronunciada sob um $RT = 1,5s$, o nível de pressão sonora da sílaba “ba” será maior que o de “ck”. Esta sobreposição mascara a sílaba “ck” e a torna praticamente não inteligível. Já para o caso de um $RT = 0,5s$, quando da emissão de “ck”, esta apresentará um nível superior tornando, assim, a palavra inteligível.

Tal comportamento da sala pode ser identificado com maior acurácia e de forma numérica e objetiva através dos parâmetros acústicos que caracterizam o ambiente. Estes são identificados através da resposta ao impulso.

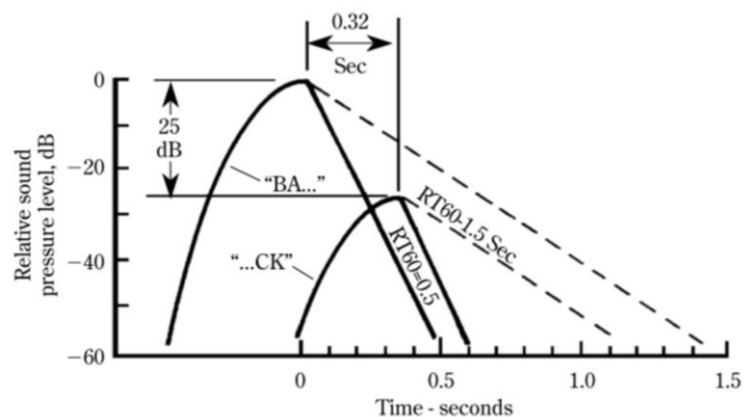


Figura 6: Exemplo de Everest - efeito do RT na palavra "back"

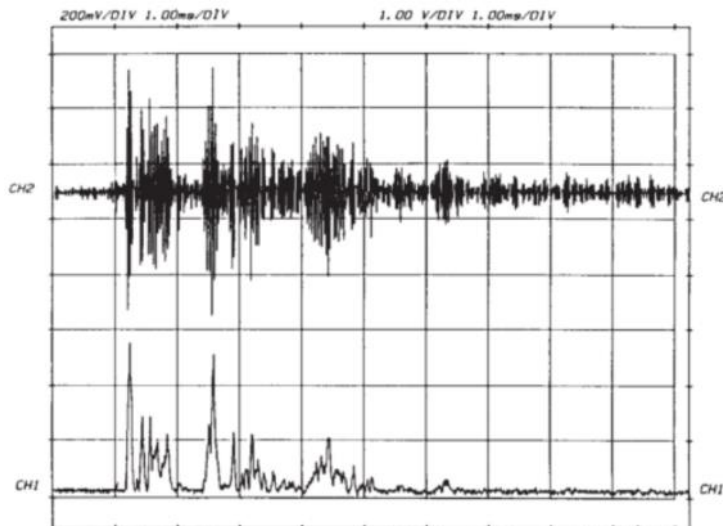
Fonte: (EVEREST, 2001)

2.3 Parâmetros acústicos do ambiente

2.3.1 Resposta ao Impulso (IR)

Quando as informações de determinado ambiente são medidas através de uma fonte sonora gerada por um impulso – uma batida de palmas, por exemplo – e seu espectro é amplo o suficiente para satisfazer a análise dos parâmetros do ambiente tem-se a Resposta ao Impulso (IR). A IR dispõe de uma grande quantidade de informações em seu espectro que são indicadas pelo tempo, nível de pressão sonora e direção de incidência, permitindo, assim, uma melhor análise dos parâmetros e a definição das propriedades de um sistema, neste caso do Santuário Dom Bosco, uma igreja.

A norma internacional ISO 3382/2009 estabelece as recomendações para se realizar cada medição. De acordo com a norma, a fonte do impulso deve garantir um nível



de pressão sonora – pico – suficiente para gerar uma curva de decaimento, no mínimo, 45dB acima do nível de ruído de fundo, na banda de frequência de interesse, para permitir a análise do RT.

Figure 7: Resposta ao Impulso em um ambiente durante 400ms.
Fonte: (KUTTRUFF, 2009)

2.3.2 Tempo de Reverberação (RT)

O RT não é só o mais antigo, mas também o mais conhecido parâmetro acústico. Após uma fonte sonora em um ambiente ter sido desligada, é a quantidade de tempo que se passa até a pressão sonora inicial ter decaído em 60dB. A queda definida do nível de pressão sonora de 60 dB corresponde aproximadamente ao alcance dinâmico de uma grande orquestra. O ouvinte, no entanto, apenas pode perceber o processo de decaimento até que o nível de ruído na sala se torne perceptível, ou seja, se equipare ao ruído de fundo. Este parâmetro subjetivamente avaliado, a duração do tempo de reverberação, portanto, depende do nível de excitação, bem como no nível de ruído.

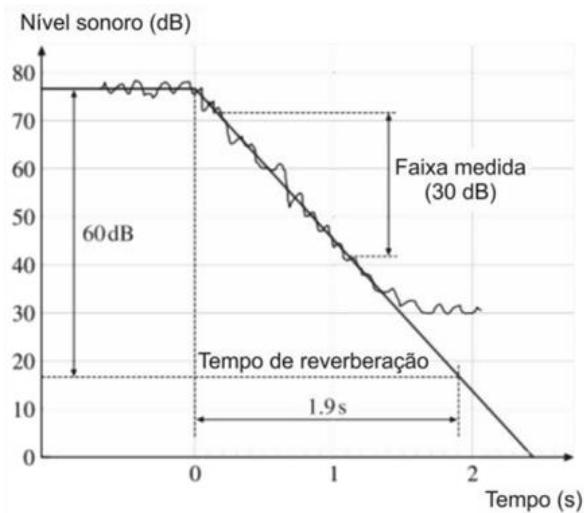


Figura 8: Definição de RT
 Fonte: (GADE, 2007), adaptador pelo autor.

A faixa de avaliação necessária é difícil de alcançar mesmo com medição, especialmente na faixa de baixas frequências. Portanto, o tempo de reverberação é determinado medindo o decaimento do nível sonoro na faixa de -5 dB a -35 dB e depois definido como RT30 (RT20, que será explorado neste trabalho, é determinado na faixa de -5dB a -25dB). O tempo de reverberação inicial (IRT, ou RT15, entre -5 dB e -20 dB) e o tempo de decaimento inicial (EDT, ou RT10, entre 0 dB e -10 dB) estão, na maior parte, em conformidade com a avaliação subjetiva da duração da reverberação, especialmente em volumes de baixo nível. Isso também explica o fato de que o tempo de reverberação subjetivamente percebido na sala pode variar, enquanto os valores medidos objetivamente de acordo com a definição clássica com um faixa dinâmica de 60 dB ou 30 dB são, exceto flutuações admissíveis, geralmente independentes da localização.

Servindo como único indicador das principais características de uma sala, esteja ocupada ou desocupada, é usado um valor médio de RT entre as duas bandas de oitava 500Hz e 1000Hz ou as 4 bandas de 1/3 de oitava 500, 630, 800 e 1000Hz, chamado de RT médio. O valor conveniente desejado do RT depende do tipo de apresentação (fala ou música) e do tamanho do ambiente. Para auditórios e casas de concerto, os valores desejados de RT médio entre 500 e 1000Hz, com uma ocupação entre 80% e 100%, podem ser vistos na figura 9 e as faixas de tolerância de frequência admissíveis são mostradas nas figuras 10 e 11. Isto mostra que, para garantir uma específica “vivacidade” sonora em apresentações musicais é necessário um aumento do RT em baixas frequências enquanto, para apresentações faladas, é melhor um decréscimo do RT nestas frequências.

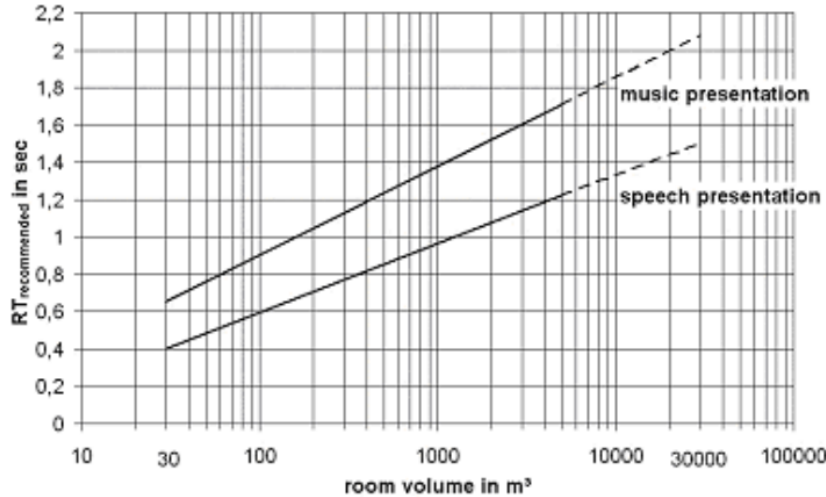


Figura 9: Valor recomendado de RT entre 500 e 1000Hz para música ou fala em função do volume da sala.

Fonte: Manual do Usuário do EASE 4.4

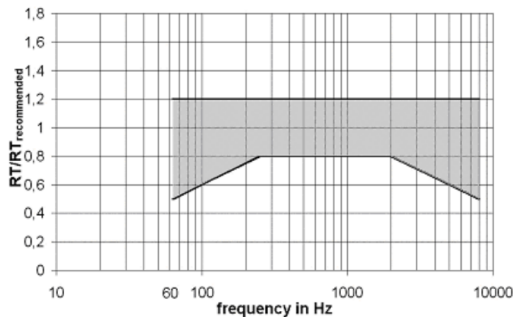


Figura 10: Faixa de tolerância de frequências de RT/RT recomendado para fala

Fonte: Manual do Usuário do EASE 4.4

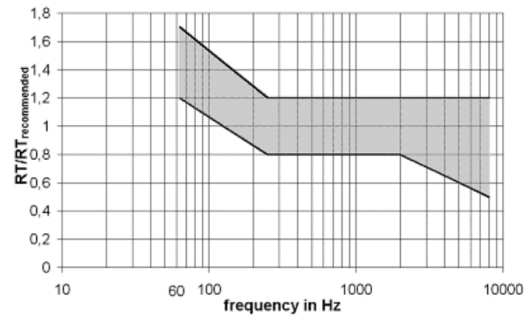


Figura 21: Faixa de tolerância de frequências de RT/RT recomendado para música

Fonte: Manual do Usuário do EASE 4.4

O RT de uma sala definido por EYRING varia primordialmente com tamanho da sala e das propriedades de absorção sonora das superfícies limite e não-superfícies (mobiliário ou aberturas, por exemplo) presentes:

$$RT = 0,163 (0,049) \frac{V}{-\ln(1 - \alpha) Stot + 4mV}$$

onde,

RT o tempo de reverberação em [s]

V: volume da sala em m³ (ft³)

$\alpha = Atot/Stot$: Coeficiente médio de absorção da sala

Atot : Superfície total de absorção em m² (ft²)

Stot : Superfície total da sala em m² (ft²)

m : Fator de atenuação de energia do ar em m⁻¹, ver figura 12.

Para um coeficiente médio de absorção de até $\alpha = 0,25$, a fórmula de Eyring pode ser simplificada por expansão de séries de acordo com SABINE para:

$$RT = 0,163 (0,049) \frac{V}{A_{tot} + 4mV}$$

onde,

RT o tempo de reverberação em [s]

V: volume da sala em m^3 (ft^3)

A_{tot} : Superfície total de absorção em m^2 (ft^2)

m : Fator de atenuação de energia do ar em m^{-1} , ver figura 12.

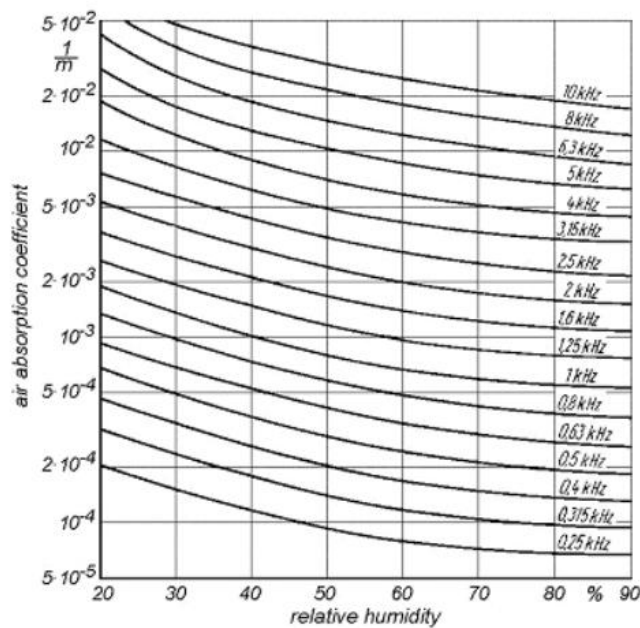


Figura 12: Coeficiente de absorção do ar m em função da umidade relativa
Fonte: Manual do Usuário do EASE 4.4

2.3.3 Inteligibilidade de fala (SI)

BRAND (2008) define o SI (*Speech Inteligibility*) diretamente e quantitativamente mensurável como “a proporção de itens de fala (sílabas, palavras ou frases) corretamente repetidos pelo ouvinte para um dado teste de inteligibilidade de fala”. Ao contrário da qualidade sonora, a inteligibilidade está ligada à quantidade de itens da expressão falada que são entendidos corretamente pelo ouvinte. Sempre que existe comunicação verbal de uma mensagem qualquer entre um receptor e um emissor é possível que a mensagem seja pouco ou nada entendida pelo receptor.

Nos anos 70, V.M.A. Peutz determinou a Porcentagem de Perda de Articulação de Consoantes, %ALCons (*Articulation Loss of Consonants*), dizendo se tratar de um parâmetro indicativo de perda onde, quanto maior o valor, pior será a inteligibilidade existente. Peutz concluiu que o valor de %ALCons podia ser determinado a partir do conhecimento do tempo de reverberação e da diferença de níveis de pressão sonora do campo direto e do campo reverberante em um determinado ponto. Geralmente o %ALCons é calculado em 2kHz, pois esta é considerada a banda com mais contribuição para o entendimento da palavra.

Segundo Hodgson (2004), a energia sonora inicial se soma ao som direto e compensa o ruído de fundo, o que melhora a inteligibilidade. Por outro lado, a energia tardia mascara o som direto, conseqüentemente aumenta o ruído de fundo, que diminui a inteligibilidade. Isso mostra que ambos estão vinculados à percepção da fala. Mesmo assim, a influência do ruído de fundo sobre a audibilidade, é desprezível se o nível de pressão sonora da fonte for 25dB superior à este.

2.3.4 Índice de transmissão de fala (STI)

O STI tem correlação física com o SI e expressa o grau de alteração da profundidade de modulação de amplitude sofrida pelo sinal de fala, causado por reverberação e ruído de fundo. Resumindo: é a medida de transmissão voz-som entre uma fonte de expressão falada e um microfone e o quanto essa relação é distorcida pelo ruído de fundo e reverberação. Uma boa inteligibilidade é o objetivo primordial em ambientes em que comunicação verbal é prioridade, tal qual salas de aula e de conferências, auditórios, etc.

A determinação dos valores STI (*Speech Transmission Index*) baseia-se na medição da redução da modulação de sinal entre a localização da fonte sonora e a posição de medição da recepção com frequências nas oitavas de 125 Hz até 8000 Hz. Não só a reverberação e o ruído reduzem a inteligibilidade da fala, mas geralmente todos os sinais externos ou mudanças que ocorrem nos sinais ao longo do caminho da origem até o ouvinte. Para averiguar esta influência emprega-se a *função de transmissão de modulação* (MTF) para propósitos acústicos. O assim determinado *fator de redução de modulação* $m(F)$ é um fator que caracteriza a interferência na inteligibilidade da fala:

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi F - RT/13,8)^2}} - \frac{1}{1 + 10^{-\left(\frac{S/N}{10dB}\right)}}$$

onde,

F é a frequência de modulação em [Hz]

RT o tempo de reverberação em [s]

S/N a razão sinal/ruído em dB.

A este efeito usam-se frequências de modulação de 0,63Hz até 12,5Hz em intervalos de terço de oitava, de modo a coincidir com a voz humana. Em adição, a $m(F)$ é submetida a uma ponderação de frequência (WMTF – *weighted modulation transmission function*) com o objetivo de atingir uma completa correlação com o SI. Ao fazer isso, $m(F)$ é dividida em 7 bandas de frequência onde cada uma é modulada por 14 sinais de frequência de modulação. O resultado desse processo é uma matriz $7 \times 14 = 98$ fatores de redução de modulação $m_i(F)$. Estes fatores sofrem efeitos de mascaramento e limiar e, portanto devem ser corrigidos. Após a aplicação de fator de correção, tira-se, então, uma média e, para as 7 bandas de oitava, o índice de transferência de modulação é calculado. Após uma ponderação de frequência nas 7 bandas (parcialmente separadas para falas masculinas e femininas) obtém-se o STI.

Baseado na comparação de testes subjetivos com uma inteligibilidade máxima possível das sílabas de 96%, os valores subjetivos de STI podem ser definidos conforme a tabela abaixo.

Table 1: Valores subjetivos de STI
Fonte: Manual do Usuário do EASE 4.4

| Syllable intelligibility | STI-value |
|--------------------------|-------------|
| poor | 0 to 0.3 |
| satisfactory | 0.3 to 0.45 |
| good | 0.45 to 0.6 |
| very good | 0.6 to 0.75 |
| excellent | 0.75 to 1.0 |

A relação, então, entre a função de transferência de modulação $m(F)$ e a inteligibilidade de fala é dada através da STI.

3. ETAPAS DO TRABALHO

3.1 Levantamento arquitetônico do ambiente

Para se iniciar qualquer estudo acústico acerca de um ambiente, neste caso já existente, é preciso tomar nota de suas características arquitetônicas, ou seja, geometria, materiais de revestimentos dos pisos, teto e paredes e mobiliário presente. Essas informações são fundamentais para realizar a modelagem computacional correta a qual se busca. Importante, também, a presença de fotos do ambiente no relatório de estudo conforme recomendação da norma técnica ISO 3382:1997. As fotos estão disponíveis no Anexo A.

Para o caso do Santuário Dom Bosco, o ambiente possui capacidade de 1200 pessoas, com uma área de audiência de aproximadamente 1600m² e um volume médio de 23.214m³, cuja geometria remete à um prisma quadrangular de dimensões médias iguais a 39,79m x 39,799m x 14,659m. O mobiliário considerado nos testes são cadeiras de couro simples posicionadas ao lado do palco/palanque e bancos de madeira medindo 1,90m cada e com espaço médio de 1,25m entre as fileiras nas áreas destinadas ao público. Para simplificação do modelo, o lustre não foi considerado.

Quanto ao revestimento, os vitrais apresentam pequenas aberturas, a parede é de concreto, o chão de mármore e as portas de metal (foi considerado no modelo que algumas estivessem abertas). Há, ainda, a presença de um longo tapete de carpete ao centro, de uma pequena sala de vidro para controle ao fundo e quatro escadas que dão acesso ao subsolo localizadas nos quatro cantos do ambiente.

3.2 Calibragem do modelo

Ao calibrar o modelo, primeiro foi necessário definir os materiais correspondentes às faces. Para isso, foram utilizados materiais encontrados no banco de dados do próprio EASE e outros criados baseados nas características dos materiais reais conforme figuras abaixo.

| Wall Material | Used | Description |
|---|------|---|
| CARPT CONC | Yes | Concrete floor with thin carpet |
| MARBLE | Yes | MARBLE |
| WIND GLASS | Yes | ORDINARY WINDOW GLASS |
| CONCRETE S | Yes | Concrete wall or floor (Smooth) |
| DOOR HOLLW | Yes | Door |
| Standard, Ideal, Absorber | Yes | Totally Sound-Absorbing |
| CstmStndGlass | Yes | Custom stained glass.Generated during room calibration process. |
| WoodPewNotUpholstrd | Yes | Not upholstered.Source: General Building Materials and Furnishings - USA and est. Digital Tecnologia de Au... |
| Opening into reverberant space, Wall or Ceiling | Yes | Opening into reverberant space1 Octave Data: 125Hz-8KHzData From Robert C Coffeen, PE, FASA |
| CstmAbsOvrZinc | Yes | Custom absorber (asbestos like) over zinc.Generated during room calibration process. |
| SlightlyUphlstrdSeat-LeatherOrPlastic | Yes | Slightly upholstered seat, leather or plasticGeneral Building and Furnishings - USA |

Figura 13: materiais de revestimento das faces no modelo

| Item | A 100Hz | A 125Hz | A 160Hz | A 200Hz | A 250Hz | A 315Hz | A 400Hz | A 500Hz | A 630Hz | A 800Hz | A 1000Hz | A 1250Hz | A 1600Hz | A 2000Hz | A 2500Hz | A 3150Hz | A 4000Hz | A 5000Hz | A 6300Hz | A 8000Hz | A 10000Hz |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| CARPT CONC | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.08 | 0.11 | 0.15 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.37 | 0.43 | 0.5 | 0.53 | 0.57 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| MARBLE | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| WIND GLASS | 0.35 | 0.35 | 0.32 | 0.28 | 0.25 | 0.23 | 0.2 | 0.18 | 0.16 | 0.14 | 0.12 | 0.1 | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| CONCRETE S | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| DOOR HOLLW | 0.15 | 0.15 | 0.13 | 0.12 | 0.1 | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.1 | 0.08 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| Standard, Ideal, Absorber | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| CstmStndGlass | 0.56 | 0.55 | 0.49 | 0.4 | 0.36 | 0.28 | 0.25 | 0.2 | 0.17 | 0.15 | 0.12 | 0.1 | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| WoodPewNotUph | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Opening into rev | 0.25 | 0.25 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.32 | 0.32 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.28 | 0.27 | 0.25 | 0.23 | 0.22 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| CstmAbsOvrZinc | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.1 | 0.12 | 0.16 | 0.2 | 0.24 | 0.27 | 0.3 | 0.32 | 0.35 | 0.43 | 0.58 | 0.73 | 0.89 | 0.94 | 0.98 | 0.99 |
| SlightlyUphlstrd | 0.12 | 0.12 | 0.14 | 0.15 | 0.17 | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.2 | 0.2 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.26 |

(a)

| Item | D 100Hz | D 125Hz | D 160Hz | D 200Hz | D 250Hz | D 315Hz | D 400Hz | D 500Hz | D 630Hz | D 800Hz | D 1000Hz | D 1250Hz | D 1600Hz | D 2000Hz | D 2500Hz | D 3150Hz | D 4000Hz | D 5000Hz | D 6300Hz | D 8000Hz | D 10000Hz |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| CARPT CONC | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MARBLE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| WIND GLASS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CONCRETE S | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DOOR HOLLW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Standard, Ideal, Absorber | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CstmStndGlass | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| WoodPewNotUph | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Opening into rev | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CstmAbsOvrZinc | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SlightlyUphlstrd | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |

(b)

Figura 14: Coeficientes de absorção (a) e espalhamento (b) dos materiais

Os materiais foram dispostos da seguinte maneira:

- *CARPT CONC*: carpete central (em vermelho);
- *MARBLE*: piso;
- *WIND GLASS*: sala de vidro;
- *CONCRETE S*: paredes;
- *DOOR HOLLOW*: portas (marrom nas paredes);
- *Standard, Ideal, Absorber*: portas abertas, ou seja, acesso ao exterior do ambiente;
- *CstmStndGlass*: vitrais;
- *WoodPewNotUpholstrd*: bancos (marrom);
- *Opening into reverb space*: escadas (azul, no chão, nos cantos do modelo);
- *CstmAbsOvrZinc*: cadeiras (marrom escuro);
- Áreas de audiência (verde).

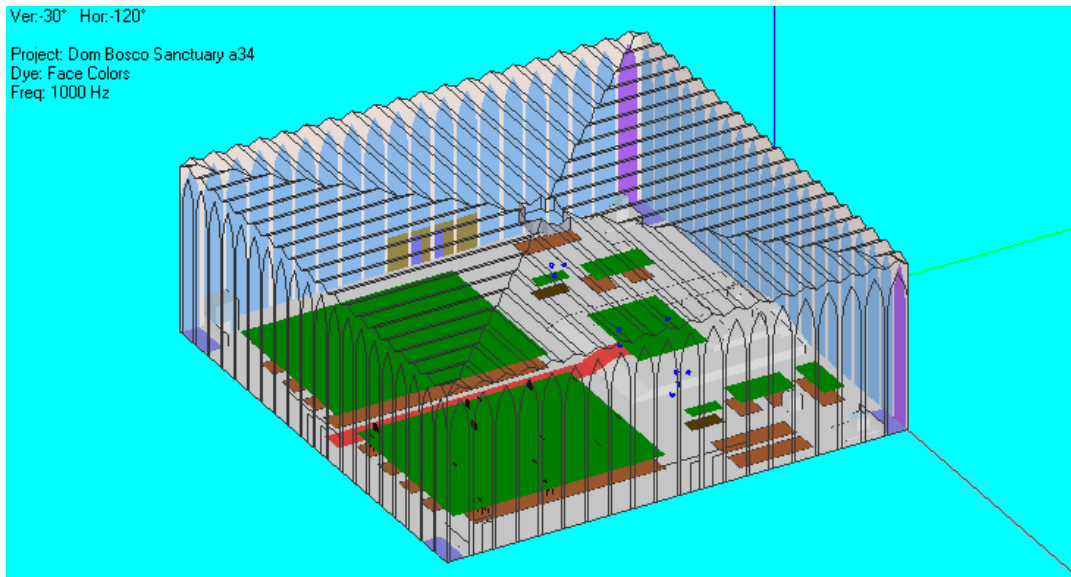


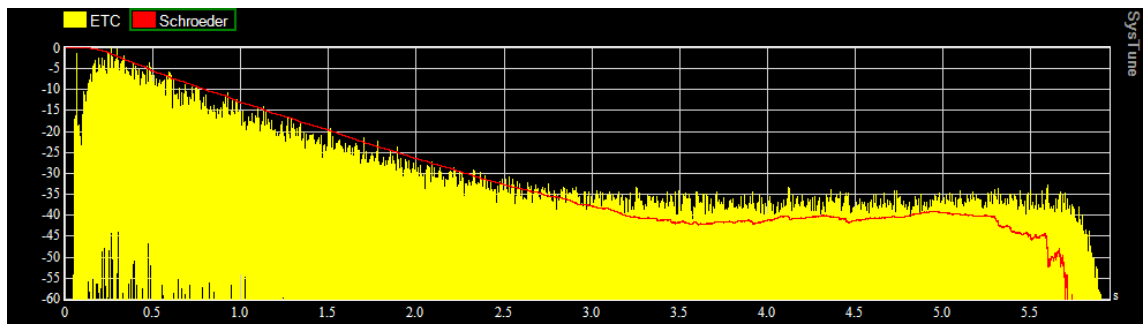
Figura 15: Modelo 3D do Santuário Dom Bosco visualizado através da aba “Room Mapping” do EASE

Após a definição dos materiais, partiu-se, então, para o cálculo analítico do RT. Utilizou-se os métodos descritos por Sabine e Eyring como forma de entender as variáveis que influenciam a acústica de um ambiente, especialmente o tempo de reverberação. Esta informação foi utilizada como referência sobre o RT ideal a ser atingido nas diferentes frequências do espectro com o modelo computacional. O tempo escolhido foi de 4.35s, que está dentro do esperado para o tipo de local (catedrais).

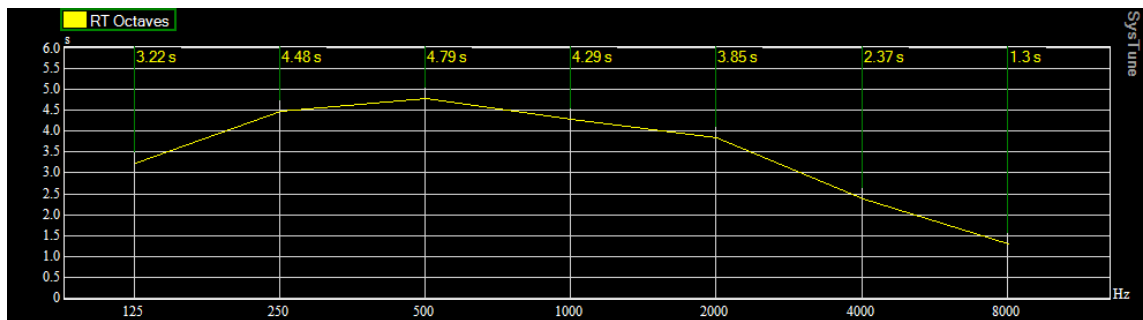
A segunda etapa, já experimental, possibilitou a avaliação dos tempos de reverberação no ambiente através da resposta de impulso. Utilizou-se, para tal, os seguintes equipamentos:

- Microfone Omnidirecional Earthworks M30;
- Fonte sonora: 2 caixas QSC K10 posicionadas no palanque, bem ao centro;
- Estímulo sonoro: Varredura senoidal logarítmica (20Hz a 20kHz);
- Interface de áudio: M-Audio Fireface 400;
- Software: Systune

O microfone foi posicionado em diferentes locais e, através do software em tempo real, medida a resposta do sistema e, conseqüentemente, calculado o tempo de reverberação medido. Um exemplo pode ser visto na figura abaixo. Fotos desta etapa também estão no Anexo A.



(a)



(b)

Figure 16: Resposta do sistema (a) e RT (b) calculado para o microfone na posição 4: 16,2m de distância da fonte sonora.

Com estes resultados de referência em mãos pôde-se, então, começar o trabalho com o modelo no EASE. Inicialmente, na posição das QSC K10s utilizadas experimentalmente, simulou-se uma fonte sonora omnidirecional (*AFMG Sphere*) constante do banco de dados do próprio software. Após, esta foi substituída e foram introduzidas as K10s da forma como medido experimentalmente. Os cálculos de Eyring e Sabine foram feitos pelo próprio software de maneira a atingir o tempo de referência escolhido.

Visto que o comportamento medido experimentalmente se aproxima do calculado, pode-se considerar que o modelo está calibrado de maneira satisfatória e, assim, seguir para as próximas etapas do projeto. O resultado destes cálculos e das simulações com ambas as fontes sonoras supracitadas pode ser conferido abaixo.

Table 2: Tempos RT estimados via Sabine, Eyring e simulados utilizando fonte sonora omnidirecional e K10

| Frequency | a34 Sabine | a 34 Eyring | T20 Avg Sphere | T20 Avg K10s | Delta |
|-----------|------------|-------------|----------------|--------------|-------|
| 100 Hz | 3.64 | 3.31 | 3.10 | 3.09 | 0.01 |
| 125 Hz | 3.74 | 3.40 | 3.15 | 3.16 | -0.01 |
| 160 Hz | 4.10 | 3.76 | 3.51 | 3.52 | -0.01 |
| 200 Hz | 4.61 | 4.28 | 4.02 | 4.02 | 0.00 |
| 250 Hz | 4.82 | 4.49 | 4.20 | 4.22 | -0.02 |
| 315 Hz | 5.21 | 4.89 | 4.60 | 4.60 | 0.00 |
| 400 Hz | 5.25 | 4.93 | 4.62 | 4.60 | 0.02 |
| 500 Hz | 5.39 | 5.06 | 4.75 | 4.74 | 0.01 |
| 630 Hz | 5.13 | 4.80 | 4.52 | 4.50 | 0.02 |
| 800 Hz | 4.80 | 4.48 | 4.28 | 4.27 | 0.01 |
| 1000 Hz | 4.66 | 4.34 | 4.20 | 4.19 | 0.01 |
| 1250 Hz | 4.46 | 4.16 | 4.07 | 4.03 | 0.04 |
| 1600 Hz | 4.22 | 3.94 | 3.89 | 3.87 | 0.02 |
| 2000 Hz | 3.91 | 3.65 | 3.68 | 3.64 | 0.04 |
| 2500 Hz | 3.26 | 3.01 | 3.17 | 3.12 | 0.05 |
| 3150 Hz | 2.49 | 2.26 | 2.62 | 2.59 | 0.03 |
| 4000 Hz | 1.96 | 1.75 | 2.17 | 2.10 | 0.07 |
| 5000 Hz | 1.53 | 1.34 | 1.77 | 1.68 | 0.09 |
| 6300 Hz | 1.28 | 1.13 | 1.44 | 1.41 | 0.03 |
| 8000 Hz | 1.04 | 0.93 | 1.13 | 1.11 | 0.02 |
| 10000 Hz | 0.81 | 0.74 | 0.86 | 0.90 | -0.04 |

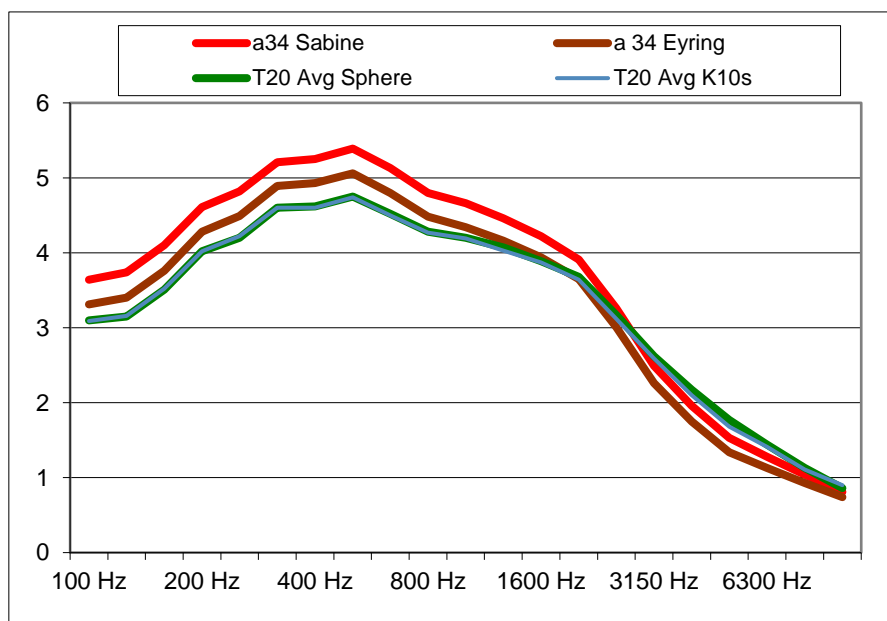


Figure 17: Gráfico da tabela 2 acima

3.3 Procedimentos experimentais

Após a etapa de calibragem, o modelo se encontra apto para os testes e, posteriormente, as simulações necessárias para se verificar sua fidelidade com a realidade, ou seja, realizar a auralização. Neste ponto do projeto, foram realizadas

mudanças nos métodos de testes, a começar pela posição da fonte sonora. Neste caso foi utilizado o sistema de som instalado na igreja; Trata-se de uma *JBL CBT 100LA*, as características podem ser vistas nas figura 18 e 19 abaixo, direcionada à área de audiência correspondente.

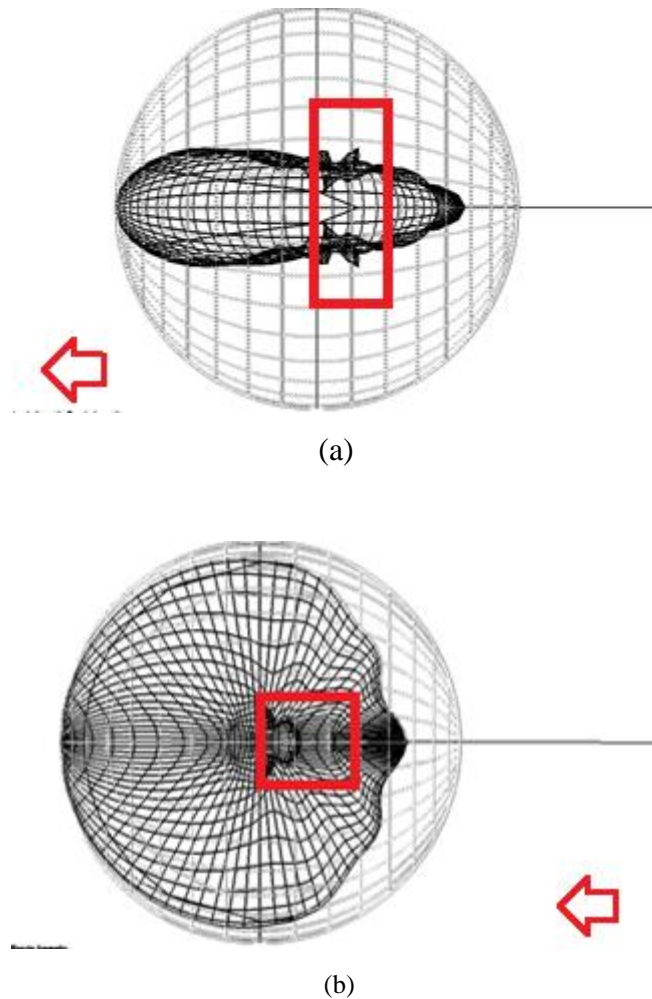


Figura 18: Vistas lateral (a) e superior (b) do balão de irradiação da fonte sonora em 1000Hz. Os retângulos vermelhos representam resumidamente a caixa de som e as setas apontam “para frente”.

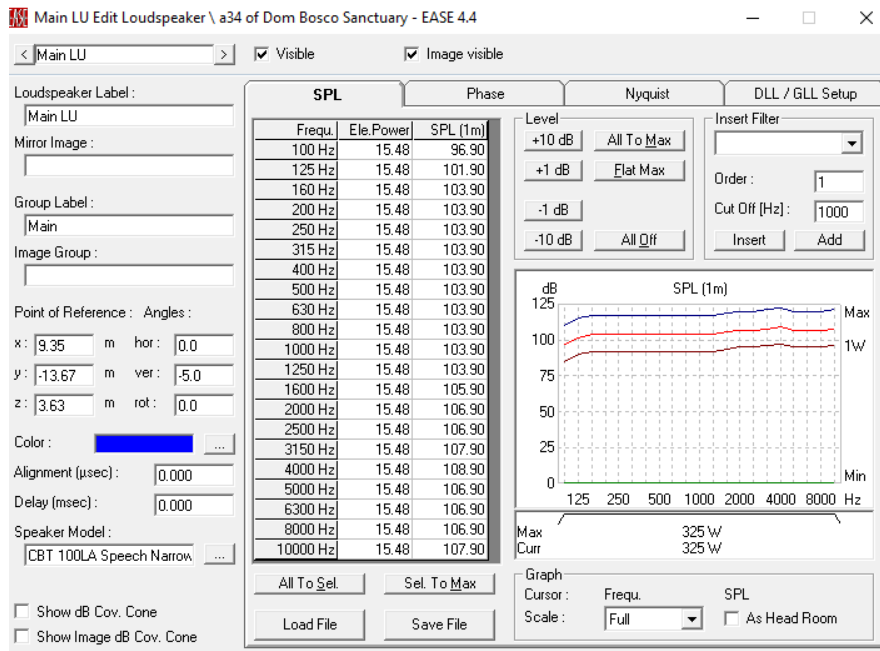


Figure 19: Potência elétrica e pressão sonora máximas atingidas pela fonte sonora

Outra mudança realizada foi o acréscimo de mais um microfone afim de realizar uma gravação binaural (*stereo*). Os microfones foram posicionados em “Y” afim de simular a posição dos ouvidos conforme a figura. Assim, o equipamento utilizado foi o seguinte:

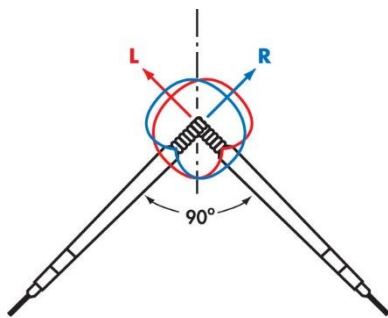


Figure 20: Disposição dos microfones

- Microfone Omnidirecional Earthworks M30 (correspondente ao lado direito);
- Microfone Omnidirecional DBX RTA-M (correspondente ao lado esquerdo);
- Fonte sonora: *JBL CBT 100LA*: 8 Ohms; Speech; Narrow;
- Estímulo sonoro: Varredura Senoidal logarítmica (20Hz a 20kHz) e Gravações anecóicas;
- Interface de áudio: M-Audio Fireface 400;
- Software de medição: Systune;
- Software de gravação: Audacity.

Inicialmente desligou-se todo o sistema de som – aplicou-se *bypass* nos *crossovers*, equalizadores, compressores, processadores em geral – e também foram desligados os subwoofers, pois estes não possuem um modelo correspondente no EASE,

afim de evitar distorções. Então utilizou-se varredura senoidal logarítmica para capturar a resposta ao impulso com ambos os microfones e verificar se estavam corretamente calibrados. Foi constatado que o DBX é 13,04dB mais sensível que o M30, portanto ajustou-se o seu ganho de entrada em 13dB.

Com tudo devidamente calibrado, os microfones foram posicionados em 8 “assentos” (posições) diferentes conforme tabela e figura abaixo. Foram medidas, então, as respostas ao impulso do sistema à varredura senoidal logarítmica e, também, realizadas gravações utilizando-se de arquivos de áudio “secos”, ou seja, gravações anecóicas. Estas medições serão utilizadas posteriormente no processo de auralização enquanto as gravações ficam para comparação dos resultados finais. As posições 1, 2 e 3, por estarem no eixo da fonte sonora, não dariam tanta sensação de localização, princípio da auralização, portanto foram negligenciadas.

Table 3: Posição dos assentos

| Seat | X [m] | Y [m] | Y Reference wall | X Reference wall |
|-------------|--------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 ☒ | 10.65 | 18.7 | Front wall | Right wall |
| 2 ☒ | 10.65 | 22.2 | Front wall | Right wall |
| 3 ☒ | 10.65 | 7.10 | Back wall | Right wall |
| 4 ☐ | 5.09 | 11.7 | Back wall | Right wall |
| 5 ☐ | 5.00 | 6.08 | Back wall | Right wall |
| 6 ☐ | 17.3 | 18.7 | Front wall | Right wall |
| 7 ☐ | 18.12 | 13.6 | Back wall | Right wall |
| 8 ☐ | 17.4 | 3.89 | Back wall | Right wall |

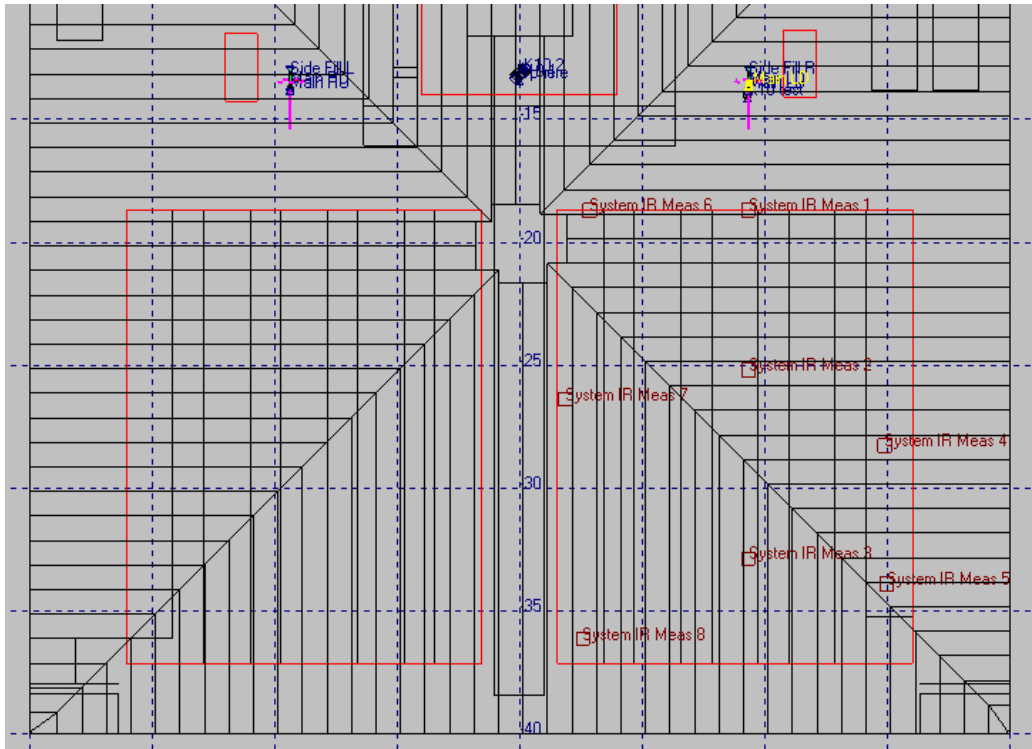


Figure 21: Vista superior da igreja mostrando as posições dos assentos em relação à área de audiência

3.3.1 Auralização

Auralização é o processo de estimar o campo sonoro emitido por uma fonte em um espaço, de modo a simular uma sensação binaural em uma posição do espaço modelado, ou seja, sintetizar os sons de maneira que, ao escutá-los, o ouvinte seja virtualmente transportado ao ambiente em questão. O processo de auralização é automatizado e baseado em algoritmos CAESAR desenvolvidos na Universidade de Aachen (RWTH). O AURA usa um algoritmo de fonte de imagem híbrida / rastreamento de raios que inclui dispersão difusa. O mecanismo de traçado de raios usado para mapeamento coleta somente informações direcionais aproximadas - ele fornece um ecograma monofônico comparável ao que seria medido com um microfone combinado ∞ (figura oito) / omnidirecional. Isto configura e inicia um cálculo de um Reflectograma em um único ponto para uma ou mais fontes sonoras selecionadas (por exemplo, altofalantes) como excitação para a sala em um ou mais assentos de ouvinte selecionados. O cálculo de resposta AURA pode ser usado para calcular um arquivo de resposta 3D em qualquer local de ouvinte, seja em pé ou sentado, neste caso foi considerado que o ouvinte estava sentado em um dos bancos. A resposta 3D pode ser exibida como um simples Reflectograma monofônico (no módulo EASE Probe), ou pode ser enviada para EASE

EARS. Lá, ele pode ser usado para calcular um Arquivo de Resposta Binaural, convoluindo-o com uma Função de Transferência Relacionada à Cabeça (HRTF) adequada, e, assim, gerar o arquivo binaural (.bir) usado para Auralização. A Resposta de Impulso da Sala Binaural (BIR) é a chave para a auralização. É calculada conforme explicado abaixo.

As respostas calculadas pelo módulo **Rays** podem ser consideradas como a saída de um microfone omnidirecional ideal (imaginário) em um único ponto no centro da cabeça de um ouvinte, com a capacidade de determinar o tempo e a direção de cada chegada de som, direto e refletido, bem como a magnitude e resposta de fase *versus* frequência para cada raio. Calculam-se e salvam os dados direcionais, de modo que a orientação direcional do Assento do Ouvinte é importante e pode ser definida para qualquer direção desejada para fins de análise. A resposta computada pode ser salva como um arquivo de resposta (.RSP).

Uma Função de Transferência Relacionada à Cabeça (HRTF) descreve a resposta direcional da cabeça humana. Ao convoluir um HRTF com um Arquivo de Resposta, a Resposta é transformada em duas respostas que são uma função da frequência e da direção de chegada para produzir um Arquivo de Resposta de Impulso Binaural (BIR). O módulo **EARS** pode executar essa convolução. O arquivo .BIR inclui a resposta direcional do ouvido humano / cabeça no local do receptor computado, e as respostas referentes ao lado esquerdo e direito estão contidas em um único arquivo .BIR. A direção de referência para o HRTF (a direção que o ouvinte humano está olhando) será a mesma que a direção de referência quando o Arquivo de Resposta (.RSP) foi calculado. Esta Resposta de Impulso Binaural pode ser convoluída com um sinal de áudio e o sinal de áudio resultante reproduzido através de alto-falantes ou fones de ouvido para simular como soará o(s) alto-falante(s) no local escolhido da sala. Este processo é chamado Auralização.

Resumindo, este é um processo de várias etapas em que:

1) cálculo da resposta em um determinado ponto dentro de uma sala conhecida com excitação por uma fonte de som conhecida, seguido por;

2) convolução dessa resposta com a Função de Transferência Relacionada à Cabeça (HRTF) de um ouvinte humano para produzir a Resposta de Impulso Binaural (BIR) para aquele ouvinte naquele ponto da sala, então;

3) convolução da Resposta de Impulso Binaural (BIR) com um Arquivo de Som de Entrada (.WAV) sem reverberação, de preferência anecóico, para produzir um arquivo de som resultante (.WAV) que inclua a resposta da sala, e;

4) a audição de uma reprodução do arquivo .WAV resultante através de um par de alto-falantes ou fones de ouvido.

Abaixo encontram-se as figuras correspondentes à Função de Transferência Relacionada à Cabeça (HRTF – *Dummy Head*) e aos filtros binaurais calculados para a posição 4 como exemplo.

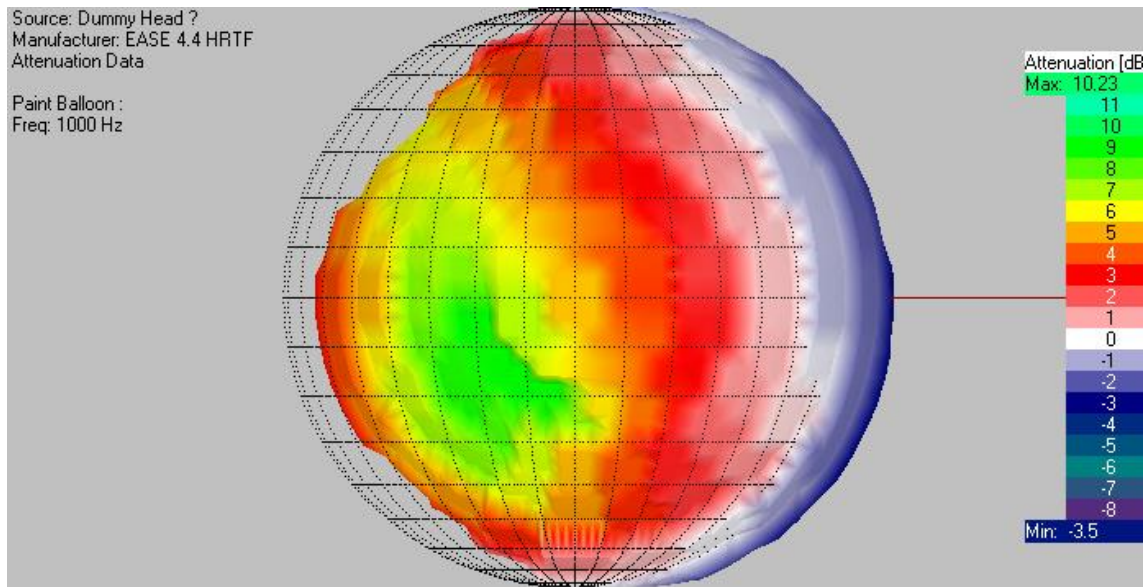


Figure 22: Balão de atenuação para uma cabeça falsa (dummy head) na frequência de 1000Hz

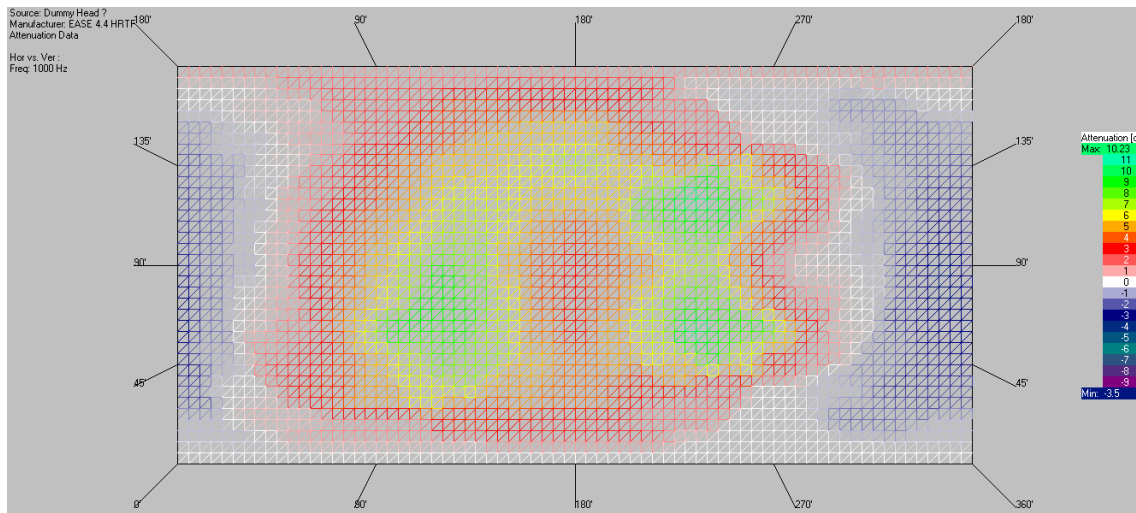
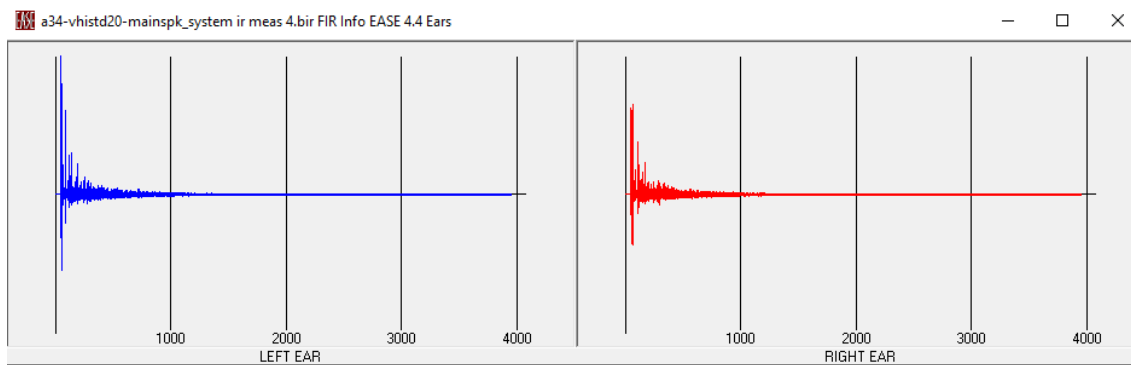
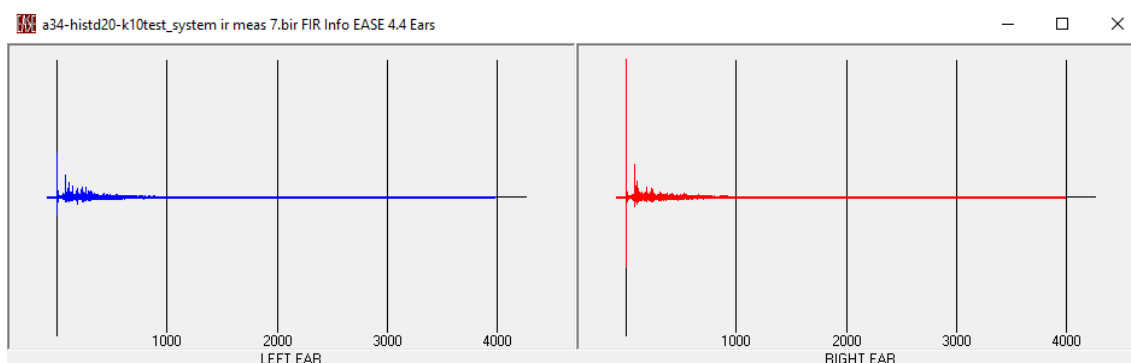


Figure 23: visão plana do balão de atenuação para uma cabeça falsa (dummy head) na frequência de 1000Hz



(a)



(b)

Figure 24: resposta binaural (BIR) gerada a partir da convolução nos assentos 4 (a) e 7 (b)

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Avaliação Objetiva

Uma pergunta que aparece quando se usa um sistema de auralização é se o sistema é realmente capaz de auralizar as propriedades acústicas, o que foi previsto pelo programa. Uma maneira simples de testar isso é medir os parâmetros acústicos da resposta ao impulso criados pelo programa, usando programa de medição para analisar a resposta impulsiva calculada. Os parâmetros acústicos da sala previstos pelo programa de simulação são então comparados com os medidos na auralização.

Nas figuras abaixo é possível comparar os resultados medidos nas posições 4 e 7 para os parâmetros RT T20 e STI. Para o caso do RT T20, as diferenças entre os valores estão próximas, abaixo do limiar de percepção em que se poderia notar alguma diferença. Para o caso do STI, também, os valores medidos e simulados são muito próximos, não fugindo da faixa esperada e mantendo uma boa inteligibilidade.

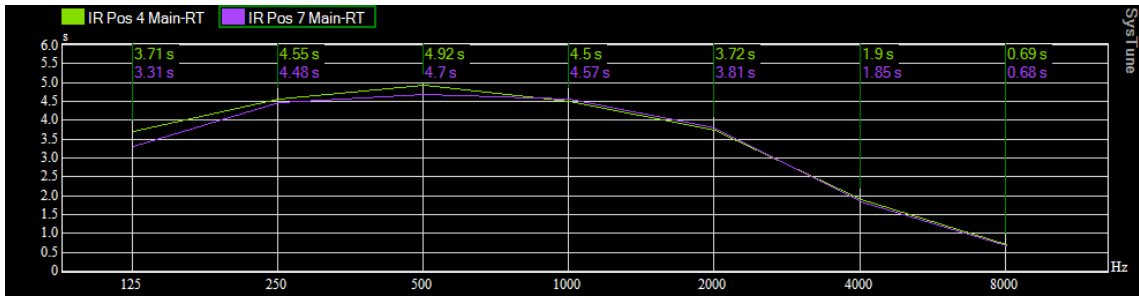


Figure 25: RT (T20) medido via resposta de impulso da sala

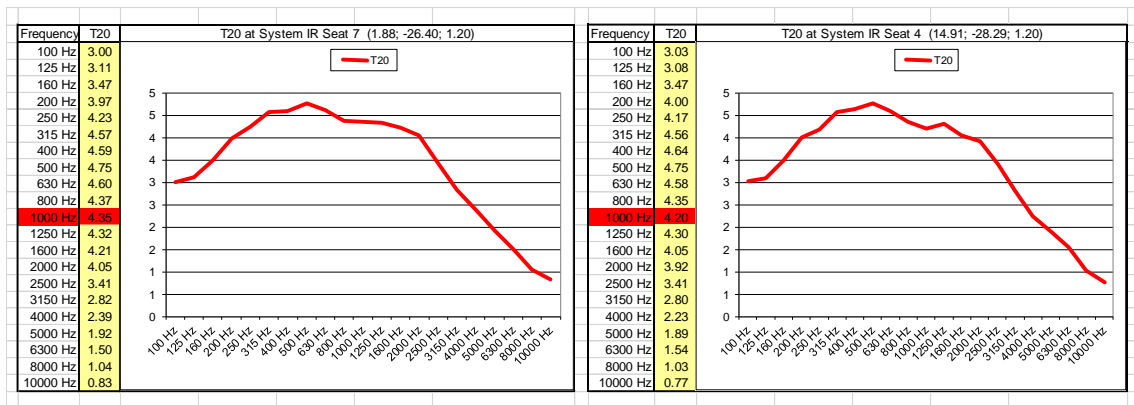


Figure 26: RT (T20) calculado através da auralização

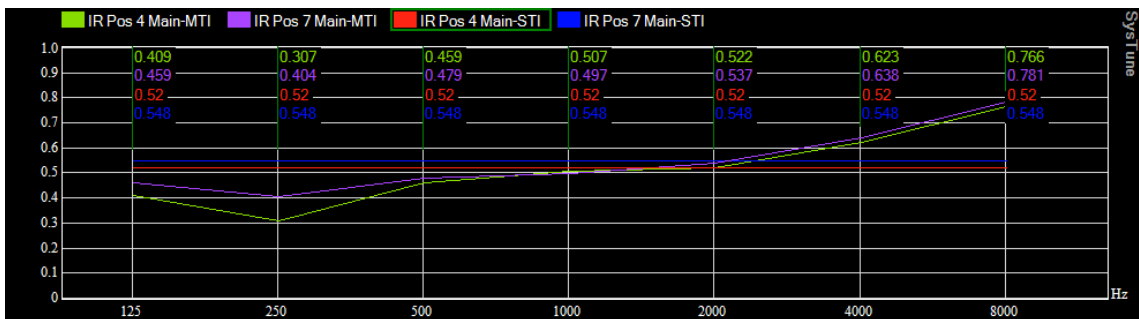


Figure 27: STI medido via resposta de impulso da sala

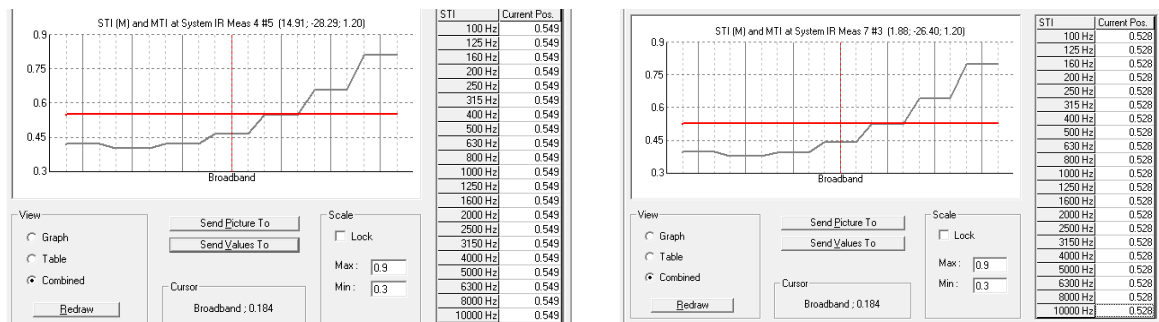


Figure 28: STI calculado através da auralização

4.2 Avaliação Subjetiva

Três tipos diferentes de comparações foram feitos:

- Apenas FALA gravada reproduzida pelo sistema de som instalado *versus* auralização via simulação computacional do ambiente;
- Apenas MÚSICA gravada reproduzida pelo sistema de som instalado *versus* auralização via simulação computacional do ambiente;
- FALA + MÚSICA gravada reproduzida pelo sistema de som instalado *versus* auralização via simulação computacional do ambiente.

Nos três casos percebe-se pouquíssima diferença entre o som gravado e o simulado, seja na sensação de “localização” da fonte sonora, à esquerda para o assento 4 e à direita para o assento 7, seja na inteligibilidade do áudio e sua reverberação. Os arquivos são públicos e podem ser encontrados no domínio: https://github.com/rjunqcn/TCC_UnB

5. CONCLUSÃO

Foi demonstrado que o método de auralização desenvolvido no programa EASE é capaz de reproduzir de maneira satisfatória as propriedades acústicas do ambiente em estudo. Os parâmetros acústicos da sala são bem representados pelos filtros criados para a auralização, e isso inclui a variação com a posição, bem como com a frequência. Ao ouvir as auralizações e comparando com as gravações de “cabeça fictícia” – *dummy head* – na mesma posição na mesma sala, as diferenças são poucas e dificilmente audíveis. A técnica de auralização avançou a tal nível que se torna difícil ao ouvido humano diferenciar se é uma simulação ou não.

Os resultados deste trabalho comprovam a confiabilidade do software e do método utilizado, o que permite seu uso de maneira educacional – *workshops*, palestras, aulas, trabalhos de campo, etc – assim como se mostra uma poderosa ferramenta para facilitar a realização de projetos tanto para novos ambientes quanto para simulação de renovação e estudo de ambientes já existentes, por exemplo.

REFERÊNCIAS

1. EASE website < <http://ease.afmg.eu/> >
2. Manual do usuário do EASE 4.4.
3. Systune website < <http://systune.afmg.eu> >
4. Manual do usuário do Systune.
5. OTERO CYSNE, L. F. **A Bíblia do Som**. Brasil, 2015.
6. KINSLER, L. E. **Fundamentals of Acoustics**. Fourth ed. EUA, 2000.
7. VORLÄNDER, M. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. Berlin, 2008.
8. ABNT, A. BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179 - Tratamento acústico em recintos fechados**. Brasil, 1992.
9. ABNT, A. BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152 - Níveis de ruído para conforto acústico**. Brasil, 1987.
10. INTERNACIONAL STANDARD. **ISO 3382-1:2009 - Acoustics Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces**, 2009.
11. LOCHNER, J.P.A; BURGER, J.F. **The influence of reflections on auditorium acoustics**, Volume 1, Issue 4, Pages 426-448, IN15, 449-454. Journal of Sound and Vibration. 1964.

12. BRAND, T. Speech Intelligibility. In: **Handbook of Signal Processing in Acoustics**. Oldenburg, Germany: Springer New York, 2008. p. 197–204.
13. EVEREST, F. A. **Master Handbook of Acoustics**. Fourth ed. EUA: [s.n.].
14. SILVA, C. M. F. **O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra - Caso de estudo: salas de aula da FEUP**. [s.l.] Universidade do Porto, Portugal, 2013.
15. BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2a edição ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
16. BARRON, M. **Auditorium acoustics and architectural design**. Second Edition. New York: Spon Press, 2010.
17. HODGSON, M. Case-study evaluations of the acoustical designs of renovated university classrooms. **Applied Acoustics**, 2004.
18. LONG, M. **Architectural Acoustics**. California, USA: Elsevier Academic Press, 2006.
19. LLINARES, J.; LLOPIS, A.; SANCHO, J. **Acústica arquitectónica y urbanística**. Valencia: Universidad politécnica de Valencia, 1996.
20. KNUDSEN, V. O. **Acoustical designing in architecture**. New York: J. Wiley, 1950.
21. KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 5th edition. New York: Spon Press, 2009.
22. GADE, A. P. A. Acoustics in halls for speech and music. In: PROF., T. D. R. (Ed.). **Springer Handbook of Acoustics**. New York: Springer New York, 2007. p. 301–350.

ANEXO A: Fotos (Fonte: Acervo próprio)

I. Fotos do Santuário Dom Bosco



Foto 1: Vista externa - fachada do Santuário



Foto 2: Vista interna



Foto 3: Escada de acesso ao subsolo. Todas seguem o mesmo padrão

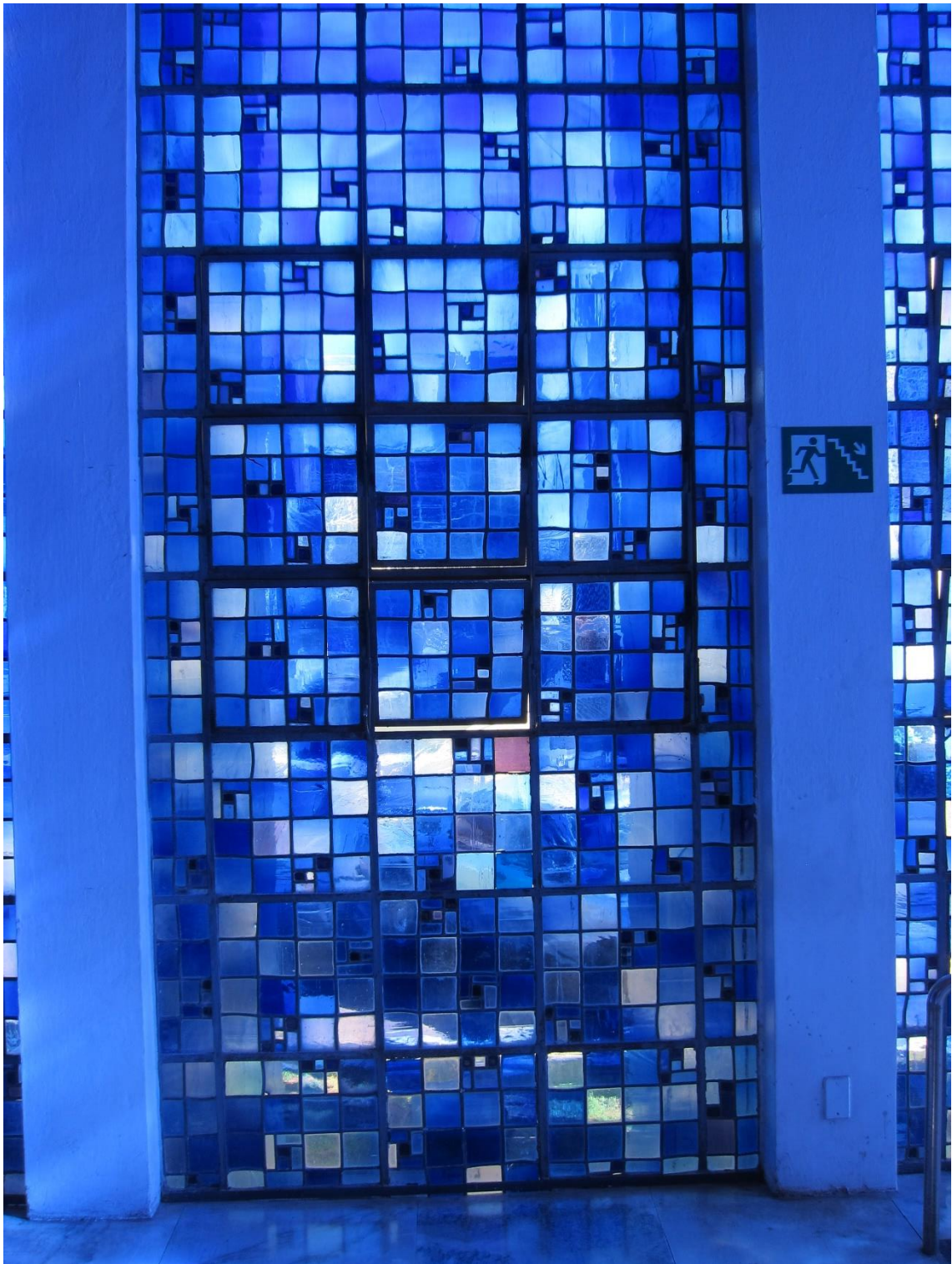


Foto 4: Visão dos vitrais e suas pequenas aberturas

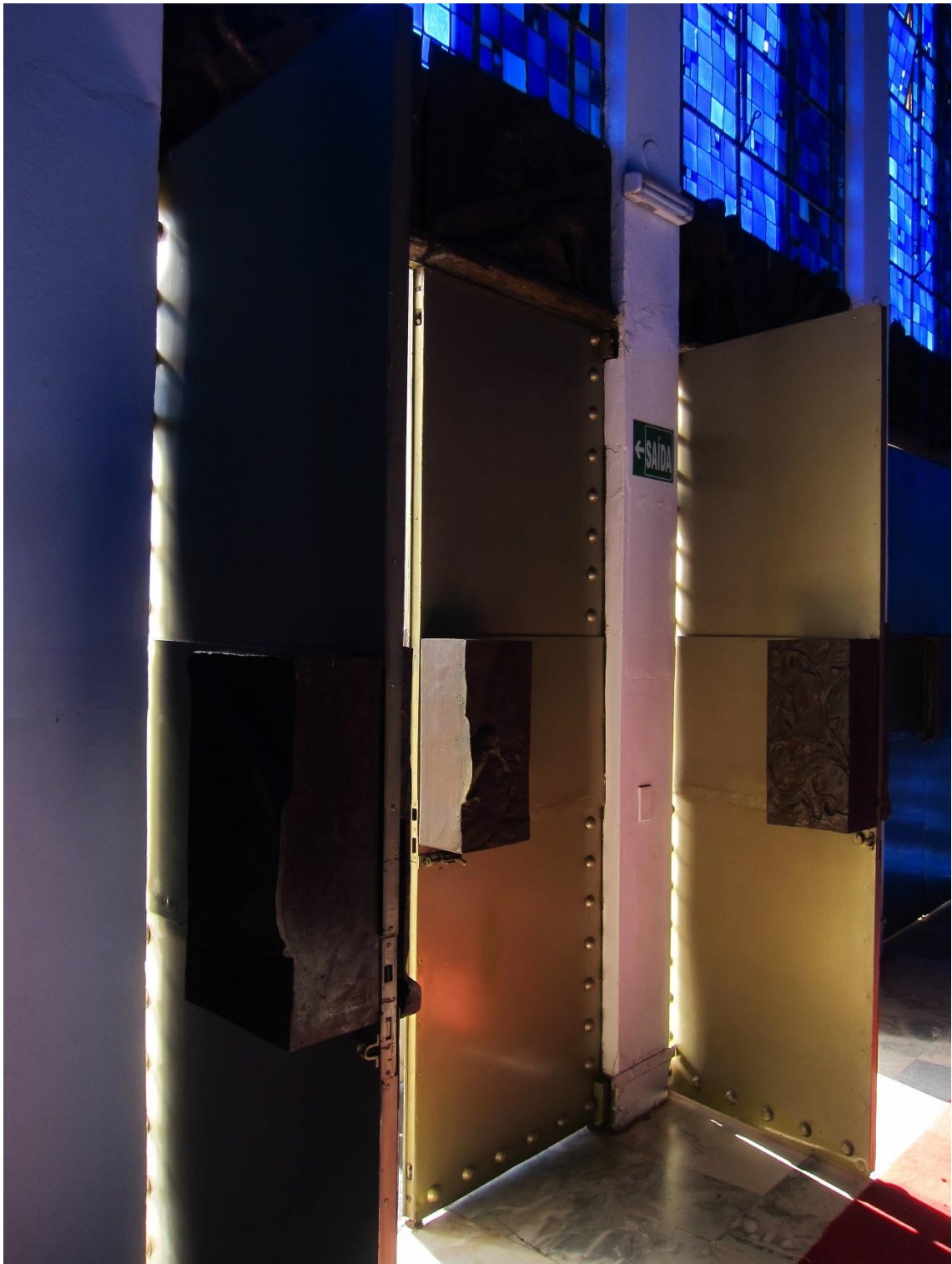
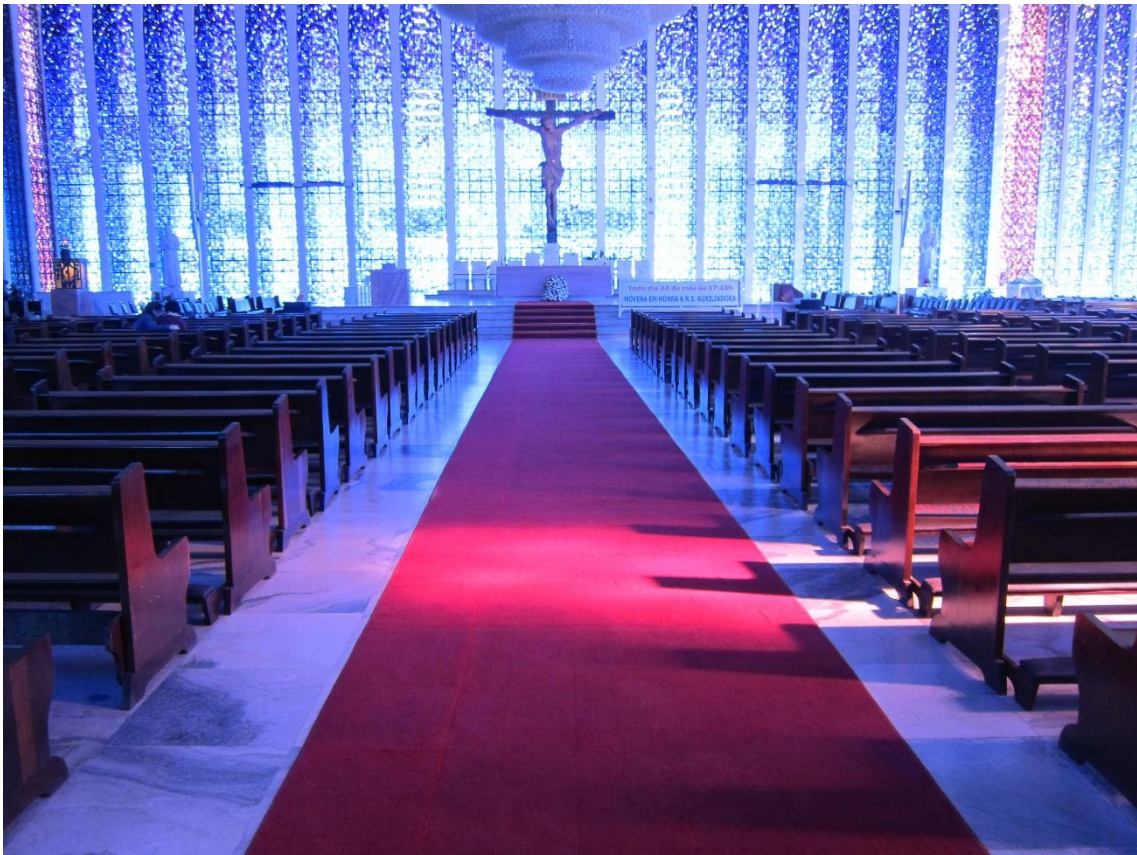


Foto 5: Portas do Santuário



Fotos 6 e 7: Vista traseira da área de audiência considerada nos testes e sala de controle



Fotos 8 e 9: Vista central do Santuário e cadeiras



Foto 10: Visão mais aproximada do teto

II. Fotos do dia de medições de RT



Foto 11: Microfone omnidirecional posicionado entre assentos

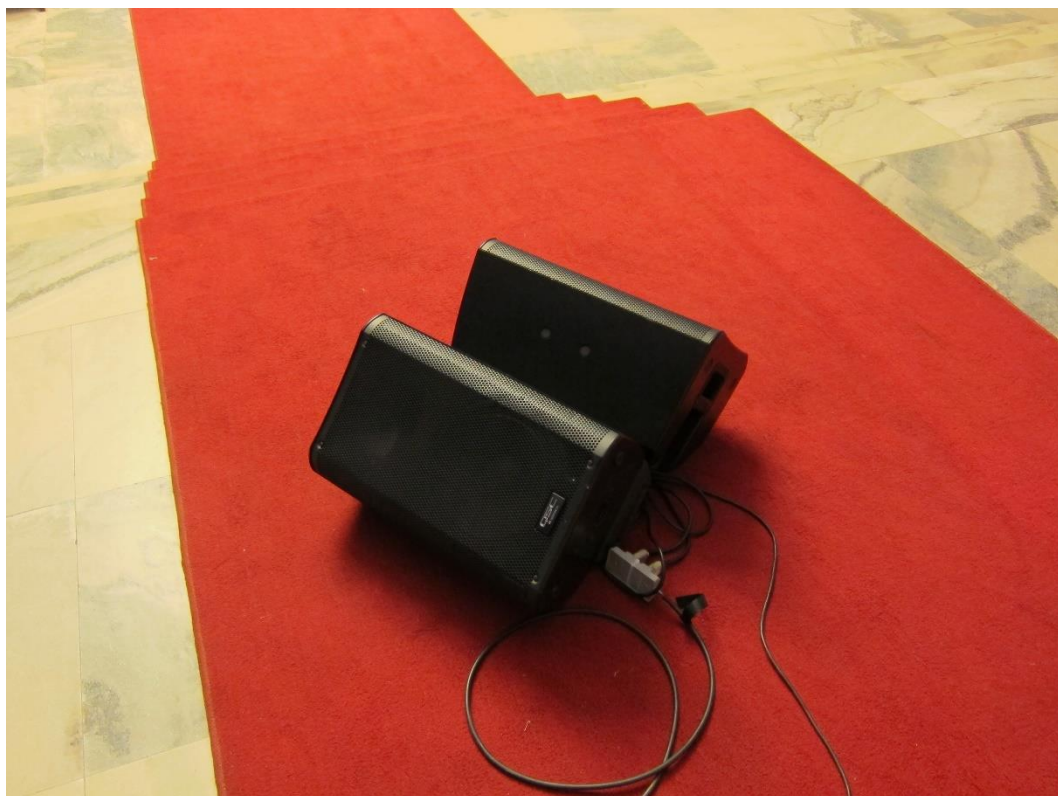


Foto 12: disposição das fontes sonoras nos testes de RT



Foto 13: posição das fontes sonoras nos testes de RT