



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

João Batista Santos Palhares

MELHORIA ACÚSTICA DE ESPAÇOS FECHADOS
DESTINADOS A USO MÚLTIPLO
PROPOSTAS DE AJUSTES AOS DIVERSOS TIPOS DE
UTILIZAÇÃO PARA O TEATRO POLYTHEAMA

Dissertação no âmbito do Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano, orientada pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus, apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Março de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

MELHORIA ACÚSTICA DE ESPAÇOS FECHADOS

Propostas de Ajustes aos Diversos Tipos de Utilização para o Teatro Polytheama

João Batista Santos Palhares

Dissertação no âmbito do Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, no ramo de Acústica e Vibrações em Ambiente Urbano, orientada pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus, apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Março de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

Aos meus pais, por nela me guiarem.

À minha amada esposa Liliana, companheira de jornada, e aos meus queridos filhos Leonardo e Gabriela, pelo estímulo e motivação permanentes.

À Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e ao Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus, pela orientação segura, compartilhando o conhecimento com atenção.

A todos os Professores que atuaram no MEAECS 2020/2022, em especial ao coordenador Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes, pela partilha dedicada e abrangente de conhecimento, enfrentando e vencendo com competência os desafios do ensino remoto devido às limitações da pandemia.

À Professora Doutora Stelamaris Rolla Bertoli, professora associada e livre docente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Campinas, Estado de São Paulo, Brasil, e ao Engenheiro Henrique Pousa Caltram, por terem permitido meu acompanhamento durante a medição *in situ* dos tempos de reverberação realizados no ambiente do caso de estudo.

À Unidade de Gestão de Cultura do Município de Jundiaí, na pessoa do gestor Sr. Marcelo Peroni, e do diretor do Teatro Polytheama, Sr. Vagner Nacarato, pelas autorizações e informações.

Aos colegas de MEAECS pela cooperação e exemplo.

RESUMO

Em razão de racionalização de recursos econômicos, bem como por valorização dos aspectos da sustentabilidade, é comum encontrarem-se nas cidades, espaços fechados destinados a uso múltiplo. É o caso das salas de espetáculos utilizadas tanto para concertos, como para conferências, espetáculos de ballet, etc. A diversidade de tipos de usos nestes ambientes requer características acústicas também diversas, e por vezes conflitantes, a que a sala pode não atender simultaneamente em seu estado atual. Nestes casos, a reabilitação do espaço pode contribuir para a melhoria de seu desempenho acústico.

Em salas de espetáculos onde a atenção dos utentes na plateia é voltada somente para o que acontece no palco, com a sensibilidade auditiva aguçada, é importante que as características acústicas do interior lhes permitam uma boa sensação, uma percepção, mesmo que subjetiva, da qualidade acústica.

A qualidade do campo sonoro em qualquer ponto do ambiente, pode ser caracterizada por parâmetros objetivos, que se relacionam com a percepção subjetiva dos ouvintes. Em salas existentes, estes parâmetros podem ser medidos *in situ* por meio de instrumentação, mas também podem ser estimados por meio de análises matemáticas de modelação numérica, que levam em conta as características construtivas. Estas ferramentas podem ser utilizadas tanto em projetos de salas novas, como em estudos de reabilitação de espaços fechados existentes, na medida em que permitem avaliação dos parâmetros e auxiliam o estudo de possíveis soluções para a melhoria de qualidade acústica.

O presente trabalho buscou, por meio do estudo de modelação acústica, o ajuste da qualidade sonora de um espaço existente de uso múltiplo, através da avaliação dos parâmetros da situação atual e da proposta de soluções que incluem variação da geometria, materiais de revestimento e introdução de acústica variável. O caso de estudo teve como objeto o Teatro Polytheama, localizado na cidade de Jundiaí, Estado de São Paulo, Brasil. A simulação acústica fez-se por modelação numérica de traçado de raios, com o software CATT – Acoustic, e calibração com dados de medições de tempo de reverberação obtidos *in situ*.

Os resultados obtidos na investigação das condições existentes no teatro permitiram a avaliação dos *gaps* de desempenho acústico em relação às atividades desenvolvidas no local, e orientaram a proposição das soluções estudadas. As eficácias das soluções relativamente aos parâmetros calculados pela modelação numérica, avaliadas por região do auditório, foram analisadas em conjunto com estimativas de custo para adoção das referidas soluções, e são a base das propostas de ajuste elaboradas ao final deste trabalho.

Palavras-chave: espaços de uso múltiplo, reabilitação, modelação acústica, traçado de raios, eficácia

ABSTRACT

Due to reasons of economic resources rationalization, as well as considering sustainability aspects, it is common to find in cities, enclosed spaces intended for multiple use. This is the case of performance halls used for concerts, conferences, ballet shows, etc. The diversity of uses in these environments requires acoustic characteristics that are also diverse, and sometimes conflicting, that the room in its current state may not comply with simultaneously. In these cases, the rehabilitation of the space can contribute to the improvement of its acoustic performance.

In performance halls where the audience's attention is focused only on what happens on stage, with a heightened sense of hearing, it is important that the acoustical characteristics of the interior allow them a good sensation, a perception, even if subjective, of the acoustical quality.

Sound field quality at any point in the environment can be characterized by objective parameters, which relate to the listeners' subjective perception. In existing rooms, these parameters can be measured *in situ* by means of instrumentation, but they can also be estimated by numerical modeling mathematical analyses that take into account construction characteristics. These tools can be used both in new room designs and in rehabilitation studies of existing enclosed spaces, as they allow evaluation of the parameters and assist the study of possible solutions for improving acoustic quality.

The present work sought to study, through acoustic modeling, the adjustment of the sound quality of an existing multipurpose space, by evaluating the parameters of the current situation and proposing solutions that include variation of geometry, cladding materials and the introduction of variable acoustics. The case study object was the Polytheama Theater, located in the city of Jundiaí, State of São Paulo, Brazil. The acoustic simulation was done by numerical modeling of ray tracing, with CATT - Acoustic software, and calibration with data from reverberation time measurements obtained *in situ*.

The results obtained in the investigation of the existing conditions in the theater allowed the evaluation of the acoustic performance gaps in relation to the activities developed in the place, and guided the proposition of the studied solutions. The efficiencies of the solutions in relation to the parameters calculated by numerical modeling, evaluated by region of the auditorium, were analyzed together with cost estimates for the adoption of the referred solutions, and are the basis for the adjustment proposals elaborated at the end of this work.

Keywords: multiple-use spaces, rehabilitation, acoustical modeling, ray tracing, effectiveness

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	4
2.1 PROPAGAÇÃO DO SOM EM ESPAÇOS FECHADOS	4
2.2 ABSORÇÃO DE ENERGIA SONORA	7
2.2.1 Materiais absorventes	7
2.2.2 Coeficientes de absorção.....	10
2.3 REVERBERAÇÃO	12
2.4 PARÂMETROS OBJETIVOS DE AVALIAÇÃO ACÚSTICA DOS ESPAÇOS FECHADOS	13
2.4.1 Tempo de reverberação (Reverberation Time) – RT.....	13
2.4.2 Relações entre tempos de reverberação em frequência:	15
2.4.3 Tempo de decaimento inicial (Early Decay Time) – EDT.....	16
2.4.4 Índice de clareza de linguagem – C50.....	17
2.4.5 Índice de clareza musical – C80.....	17
2.4.6 Índice de transmissão de linguagem (Speech Transmission Index) – STI.....	18
2.4.7 Sonoridade (Strenght Factor) – G.....	19
2.4.8 Nível de pressão sonora (Sound Pressure Level) – SPL	20
2.4.9 Eficiência Lateral (Lateral Energy Fraction) – LF.....	21
2.4.10 Curvas NC.....	22
2.5 AUDITÓRIOS DE USO MÚLTIPLO	23

3.	METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO	26
3.1	ESTUDO DE CASO – TEATRO POLYTHEAMA.....	26
3.2	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO CASO DE ESTUDO.....	28
3.3	MODELAÇÃO NUMÉRICA E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	30
3.4	CÁLCULO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS	33
3.5	CALIBRAÇÃO / AJUSTE DO MODELO.....	34
4.	SITUAÇÃO EXISTENTE E PROPOSTAS DE AJUSTES.....	37
4.1	RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA	37
4.2	ESTUDO DE SOLUÇÕES PARA MELHORIA DO DESEMPENHO	43
4.2.1	<i>Solução 1: painéis refletores afixados nas treliças dos holofotes.....</i>	<i>43</i>
4.2.2	<i>Solução 2: difusores QRD nos peitoris dos camarotes da região frontal</i>	<i>46</i>
4.2.3	<i>Solução 3: canópia no palco.....</i>	<i>49</i>
4.2.4	<i>Solução 4: painéis refletores sobre parte da plateia</i>	<i>51</i>
4.3	ANÁLISE DE EFICÁCIA E CUSTO DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS	54
4.3.1	<i>Eficácia na mitigação das lacunas de desempenho.....</i>	<i>54</i>
4.3.2	<i>Estimativa de custos para as soluções propostas.....</i>	<i>59</i>
4.4	PROPOSTA DE AJUSTE.....	61
5.	CONCLUSÕES	64
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 1 -
7.	ANEXOS	A- 4 -

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A espécie humana interage com a acústica em espaços fechados, desde o tempo em que habitava as cavernas, a começar pelos ruídos da natureza, passando depois à palavra e à música, até chegar às grandes salas de conferência e concerto de hoje. Ao longo da história, a arquitetura tem procurado adequar os espaços fechados às condições acústicas correspondentes às suas finalidades. Segundo Long (2006), já na Roma antiga, Vitruvius Pollio registou em sua obra *De Architectura*, datada de 27 A.C., aspetos arquitetónicos de desenho de teatros, e de acústica. Nas igrejas, a acústica sempre teve papel importante, tanto na liturgia da palavra como nas celebrações com música. As características geométricas das catedrais góticas fizeram florescer o canto gregoriano. Da mesma forma, a música barroca foi influenciada pela acústica das igrejas da época. A construção das grandes catedrais, estimulou o surgimento das composições polifónicas.

No Renascimento, havia o pensamento de que a harmonia de músicas sublimes estimularia a geração de edifícios com proporções sublimes. Entretanto, a realidade prova que não há argumento lógico de que determinadas proporções tenham efeitos “mágicos” na qualidade dos auditórios. A proporção no design das salas de concertos, via de regra, é determinada por diferentes razões que, relacionadas com a propagação sonora, interferem em certos parâmetros acústicos. Barron (2010), afirma que a largura de uma sala de concertos pode ter relação com a largura máxima aceitável para um palco, assim como o comprimento pode ter relação com a distância visual, e a altura pode relacionar-se com o tempo de reverberação.

Preponderantemente a geometria e os materiais componentes de um espaço confinado exercem influência na propagação das ondas sonoras e, por consequência, nas características do campo sonoro registado pelo ouvido humano e processado no cérebro. Por este motivo, para a definição dos desenhos finais de projetos de salas, atualmente são considerados fatores como geometria, características de absorção e difusão sonora dos materiais de revestimento, bem como isolamento sonoro, com o objetivo de que o som se propague com qualidade auditiva em todo o ambiente.

A perceção subjetiva da qualidade sonora pela audiência em um ambiente fechado pode ser relacionada a atributos quantificáveis, como tempo de reverberação, índice de claridade da linguagem e índice de claridade musical, que servem de parâmetro para projetos de construção e de reabilitação acústica de salas.

Quando se trata de sala para fim específico, como auditório de concertos musicais, estes fatores podem ser determinantes, de forma a se obter uma grande eficiência acústica ajustada a esta função. Contudo, devido a fatores econômicos, atualmente incorporados aos conceitos de governança ambiental, social e corporativa (ESG - Environmental, Social and Governance), é cada vez maior o número de espaços fechados destinados a usos múltiplos, sejam para conferências, peças de teatro, dança e diversos tipos de música. Para estes espaços, devem ser ponderados os requisitos de cada atividade e, sendo impossível a otimização da qualidade sonora para todas simultaneamente, estabelecerem-se parâmetros de compromisso, visando atendimento das necessidades, dentro de limites satisfatórios. Todavia, observe-se que os parâmetros acústicos definidos em projeto, mesmo que obtidos com o auxílio de modelos numéricos computacionais avançados, aproximam-se do que será constatado após a obra pronta, com certa margem de erro, o que pode ser verificado por meio de medições *in situ*.

A reabilitação acústica de salas existentes tem permitido bons resultados, no sentido de aprimorarem-se os parâmetros de qualidade acústica relativos a determinadas atividades. Por meio de variação da geometria, aplicação materiais de revestimento e introdução de acústica variável é possível diminuir-se os *gaps* de qualidade sonora de um espaço existente. Para este fim, os modelos numéricos computacionais podem ser de grande valia, na simulação e análise de resultados.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho procura contribuir para o estudo de soluções de melhorias de condicionamento acústico de auditórios existentes de uso múltiplo, tendo como base a investigação das condições do Teatro Polytheama, localizado em Jundiaí, Estado de São Paulo, Brasil.

Pretende discorrer sobre parâmetros objetivos de qualidade sonora em espaços fechados de múltiplo uso, obtidos com cálculo numérico por meio de software de traçado de raios, como instrumento de análise, para proposição de soluções que permitam ajustes, visando melhoria de desempenho, analisadas sob os pontos de vista de eficácia e custo.

A motivação para este trabalho deve-se à busca, com base em dados teóricos e práticos, e com metodologia adequada, de soluções eficazes, economicamente viáveis e arquitetonicamente harmoniosas, para ajuste de desempenho acústico em auditório que tem a função social de abrigar múltiplas atividades culturais.

1.3 Organização do Trabalho

A estrutura do presente trabalho compõe-se de cinco capítulos, assim organizados:

No Capítulo 1, apresentou-se o enquadramento geral desta dissertação, seus objetivos e estrutura.

O Capítulo 2 apresenta o quadro teórico do trabalho, abordando a propagação do som em espaços fechados, absorção da energia sonora e reverberação, parâmetros objetivos de avaliação acústica e auditórios de uso múltiplo.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia do estudo de caso, descrevendo a caracterização experimental do espaço com medição *in situ*, a modelação numérica e caracterização dos materiais, o cálculo dos parâmetros e a calibração do modelo.

O Capítulo 4 trata da análise dos resultados obtidos para a situação atual do caso de estudo, apresenta estudos de soluções para melhoria de desempenho acústico, e analisando-as, sob a ótica da eficácia e dos custos, elabora uma proposta de ajuste para a sala.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 Propagação do som em espaços fechados

A energia omnidirecional emitida por uma fonte sonora num determinado recinto, chega a um ouvinte em qualquer ponto do mesmo de duas maneiras distintas: uma parte da energia chega diretamente aos seus ouvidos (som direto), ou seja, como se a fonte e o recetor estivessem no espaço livre, enquanto a outra parte chega de forma indireta (som refletido), portanto está associada aos sucessivos reflexos que a onda sonora sofre quando atinge as diferentes superfícies da sala até chegar ao recetor. Em qualquer ponto da sala, a energia correspondente ao som direto, chega ao recetor atenuada por dois fatores que dependem exclusivamente da distância da fonte sonora: por divergência geométrica, que é proporcional ao aumento da distância à fonte devido ao aumento da área da frente da onda, e por absorção atmosférica. Por sua vez, a energia sonora associada a cada reflexão, além do caminho percorrido pela onda, depende da orientação e relevo das superfícies envolvidas e do grau de absorção sonora dos materiais utilizados para o revestimento das mesmas. Bistafa (2006), afirma que quanto maior for a distância percorrida e mais absorventes forem os materiais utilizados, menor será a energia associada tanto ao som direto como aos sucessivos reflexos.

Segundo Vorländer (2008), o som direto, determina a direção percebida de incidência sonora pelo ouvinte, enquanto as reflexões chegam-lhe atrasadas devido ao caminho mais longo de propagação. O som refletido pode ser dividido em duas zonas de características distintas em relação ao seu tempo de chegada ao recetor: uma primeira zona inclui todos os reflexos que chegam imediatamente após o som direto, e que são chamadas de primeiras reflexões, e uma segunda zona, formada por reflexões tardias. As primeiras reflexões contribuem para uma impressão sonora direta. Aumentam a sonoridade, apoiam a inteligibilidade da fala, a clareza da música e a impressão da largura da fonte aos ouvintes. As reflexões que chegam ao recetor após de 50-80 ms constituem a reverberação no seu significado mais específico.

A palavra eco, segundo Barron (2010), é utilizada para uma reflexão ouvida como um evento discreto. Um eco é uma repetição inteligível e não deve ser confundido com reverberação, que é ininteligível.

As reflexões tardias chegam ao ponto de receção de forma contínua, sem variações abruptas, conforme afirma Carrion (1998). Por sua vez, as primeiras reflexões chegam de uma forma mais discreta do que as reflexões tardias, devido ao fato de serem reflexões de ordem baixa (geralmente de ordem ≤ 3). Diz-se que uma reflexão é de ordem "n" quando o raio sonoro associado incidiu "n" vezes nas diferentes superfícies da sala antes de chegar ao recetor.

Considera-se o patamar de 100 ms aproximadamente, como um limite de tempo para a zona de primeiras reflexões, a partir da chegada do som direto. Entretanto, este valor pode variar de caso para caso, dependendo da forma e do volume da sala.

A representação gráfica da chegada dos vários reflexos, acompanhada do seu correspondente nível de energia, é chamada de ecograma. A Figura 2.1 representa esquematicamente a chegada dos diferentes feixes sonoros a um recetor juntamente com o ecograma associado, indicando o som direto, a zona das primeiras reflexões e a zona de reflexões tardias.

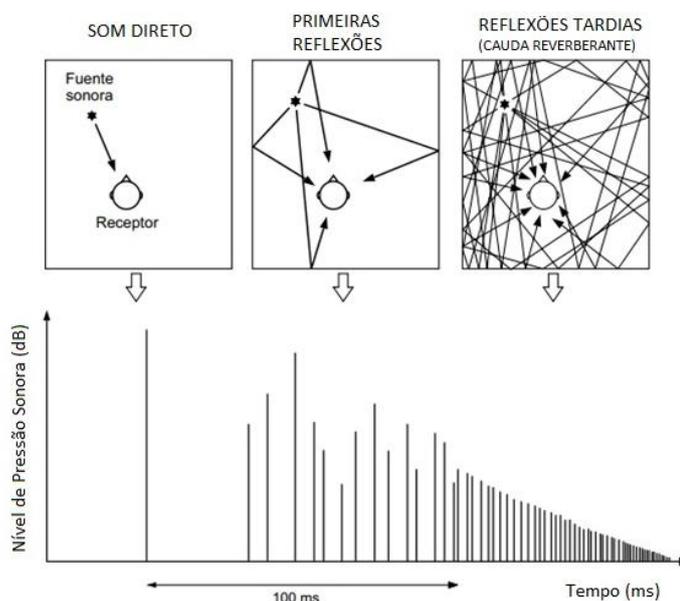


Figura 2.1 – Ecograma associado a um recetor com indicação do som direto, primeiras reflexões e cauda reverberante - Adaptado de Carrion (1998)

O ponto de partida hipotético para se calcular o ecograma associado a um ponto de receção pelo método geométrico, consiste em tratar os raios sonoros de maneira similar à dos raios luminosos, considerando que suas reflexões sobre as várias superfícies são totalmente especulares, i.e., o ângulo de incidência em relação à superfície é igual ao ângulo de fuga.

Em geral, as primeiras reflexões têm um nível de energia mais elevado do que as tardias, uma vez que sendo de ordem inferior, sofreram menor atenuação. Além disso, por dependerem diretamente das formas geométricas da sala, são específicas para cada ponto e, por consequência, determinam as características acústicas desse ponto, juntamente com o som direto conforme ilustra a Figura 2.2.

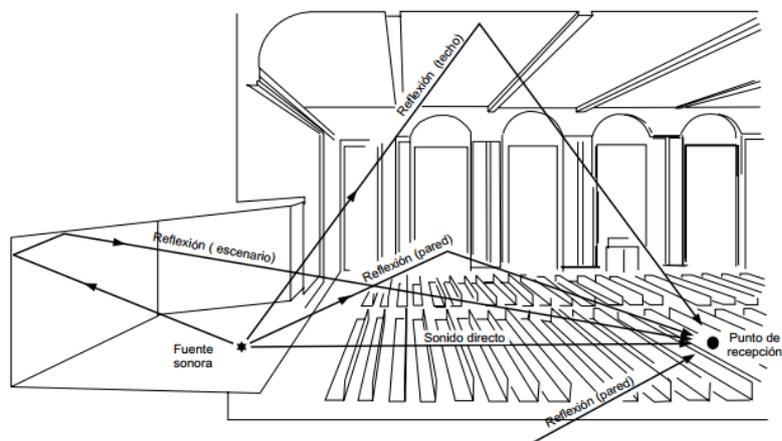


Figura 2.2 – Chegada de som direto e primeiras reflexões a um recetor - Fonte: Carrion (1998)

Carrion (1998) regista que as reflexões tardias, aquelas de ordem superior a 3, têm por característica uma grande densidade temporal de reflexões, com propriedades praticamente iguais em qualquer posição do recetor no espaço fechado. Por esta razão, o estudo das reflexões tardias, que compõem a chamada cauda reverberante, é sempre realizado utilizando-se critérios baseados na chamada acústica estatística, em vez da acústica geométrica.

A análise acústica geométrica é uma técnica de aproximação, uma vez que somente em determinadas circunstâncias a hipótese de reflexão especular corresponde à realidade, quais sejam: superfícies refletivas ou pouco absorventes, e de dimensões grandes em relação ao comprimento de onda. Caso as superfícies tenham dimensões menores que o comprimento da onda sonora incidente, como peitoris de balcões em um teatro, a onda passa pela borda da superfície sofrendo difração.

Quando a superfície em que incide o campo sonoro apresenta irregularidades de dimensões comparáveis ao comprimento de onda, as reflexões ocorrem em múltiplas direções. Este fenômeno é chamado de difusão sonora e pode ser útil para a uniformização do campo sonoro em espaços fechados, evitando distorção acústica. Softwares avançados, baseados em traçados de raios, levam em conta a dispersão, ou espalhamento, da onda em múltiplas direções em função da difusão.

Cox e d'Antonio (2017), referem que Schroeder concebeu difusores de grande eficiência, constituídos por grelhas de arranjo periódico, compostas por uma série de poços da mesma largura e de diferentes profundidades, separados por finas lâminas. A sequência e as profundidades dos poços são determinadas por meio de cálculo matemático baseado no resíduo quadrático. As ondas planas que são refletidas a partir dos fundos destes poços voltam

ao espaço em fases diferentes, devido ao tempo que levam para descer e subir cada poço. Consequentemente, gera-se um campo sonoro polar, produzindo-se a chamada difusão ótima, em que todos os laços do diagrama polar de directividade têm a mesma energia.

A Figura 2.3 ilustra dois tipos de difusores de Schroeder.



Figura 2.3 – Difusores de Schroeder: de uma direção (1D) e de duas direções (2D)
- Fonte: Cox e d'Antonio (2017)

Cham e To (2002), por meio de ensaios de ondulação com tabuleiros de água, confirmados por modelação numérica, verificaram que devido a efeitos de borda criados pelo tamanho finito dos peitoris dos balcões de um teatro, o som incidente é disperso em ângulos que não correspondem o reflexo especular, e o canto inferior do balcão mais próximo da fonte sonora atua como uma fonte virtual.

Recintos de grandes dimensões e com geometria irregular, têm modos de vibração próprios e a eles respondem quando são submetidos às suas frequências modais. Entretanto, quando uma fonte sonora excita o ambiente e o número de ondas é muito grande e a distribuição de pressão é complexa, criam-se ondas que envolvem cada superfície, em quase todos ângulos de incidência, mesmo se a fonte estiver emitindo uma banda estreita de frequências. Por isso, em qualquer ponto do ambiente as ondas sonoras caminham em todas as direções, o que nos permite dizer que nesse espaço fechado acontece um campo sonoro difuso. – Beranek (1993).

2.2 Absorção de energia sonora

2.2.1 Materiais absorventes

As ondas sonoras emitidas por uma fonte pontual omnidirecional propagam-se no ar de forma esférica e concêntrica. Em ambientes abertos, a propagação do som se dá de forma livre, sem

sofrer interferências de outras ondas. É o chamado campo livre. Nos ambientes fechados, onde o campo sonoro sofre interferências das ondas refletidas pelas superfícies do recinto, como parede, teto e piso, parte da energia sonora é refletida pela superfície, parte é transmitida à estrutura e parte da energia é absorvida, transformando-se em outro tipo de energia, geralmente térmica.

Os materiais absorventes utilizados em aplicações arquitetônicas tendem a enquadrar-se em três categorias: absorvedores porosos, absorvedores de painéis, e absorvedores ressonantes.

Destes materiais, os absorvedores porosos são os mais frequentemente encontrados e incluem produtos de fibra mineral, feltro, espumas, tapeçarias, e muitos outros produtos. Vários mecanismos contribuem para a absorção do som por materiais porosos. O movimento do ar induzido pela onda sonora ocorre nos interstícios entre fibras ou partículas, produzindo perdas de energia dinâmica devido ao arrasto viscoso (fricção), bem como mudanças de direção. Este mecanismo de dissipação de energia sonora é responsável pela maior parte das perdas em alta-frequência. As flutuações de pressão e densidade são isotérmicas, e o equilíbrio térmico é restaurado rapidamente, com a transformação da energia dinâmica em calor.

Absorvedores de painel, ou membranas, têm maior eficiência nas baixas frequências. São folhas leves não porosas, que possuem atrás de si uma caixa de ar, que pode ser preenchida com um material absorvente.

Os absorvedores ressonantes podem ser divisórias leves que vibram na sua frequência própria de ressonância ou podem ser ressonadores Helmholtz, ou ainda outros dispositivos semelhantes, como ressonadores de quarto de onda, e ressonadores massa-ar-massa que podem ser preenchidos com materiais absorventes porosos.

Em termos de eficiência, as membranas têm melhor desempenho na gama de baixas frequências entre 100 Hz e 400 Hz; os ressonadores têm bom desempenho em médias frequências, entre 400 Hz e 1600 Hz, e os materiais porosos ou fibrosos são eficazes para as altas frequências, entre 1600 Hz e 6400 Hz.

Carrion (1998) afirma que em qualquer auditório, a redução da energia associada às ondas sonoras, tanto em sua propagação pelo ar como quando incidem sobre superfícies limites, é determinante na qualidade acústica final do ambiente. Basicamente, a redução de energia, da maior para a menor importância, é devida a uma absorção produzida:

- pelo público e pelas cadeiras;
- por materiais absorventes e/ou absorventes seletivos (ressonadores), expressamente colocados em certas áreas como revestimento do recinto;

- por todas as superfícies limites da sala suscetíveis a vibração (por exemplo: portas, janelas e divisórias leves);
- pelo ar;
- pelos materiais mais rígidos e não porosos usados na construção corrente das paredes e do teto do recinto (como betão).

A acústica variável apresenta soluções técnicas para aprimorar o desempenho acústico de auditórios, controlando o tempo de reverberação e outros fenômenos acústicos. Pode valer-se de equipamentos eletroacústicos, situação em que se denomina acústica variável ativa, ou de dispositivos mecânicos que permitem variação de volume da sala e/ou variação da absorção e difusão sonora de superfícies, denominando-se neste caso acústica variável passiva. Nos últimos anos, foram desenvolvidas diversas soluções de dispositivos e equipamentos que permitem variação da absorção de energia sonora de salas. Na Figura 2.4 pode-se ver uma solução comercial denominada trifusor, cujas três faces possuem características diferentes, uma refletiva, outra com absorção e outra com difusão, e podem ser giradas em torno de um eixo, permitindo várias configurações voltadas à sala.



Figura 2.4 – Fotografia do dispositivo Triffusor, da empresa RPG, indicado para pequenas salas.
Obtido pelo sítio do fabricante: <http://www.rpgeurope.com/products/product/triffusor.html>

Dispositivos de acústica variável têm sido estudados na academia. A Figura 2.5 apresenta uma solução desenvolvida por uma equipa formada por investigadores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra – Portugal, e do Departamento de Física da Universidade de Alicante – Espanha . Segundo Pereira et al (2021), o dispositivo é constituído por uma câmara que possui painel perfurado na frente voltada à incidência do som, com uma

caixa de ar na qual está inserido um painel de material absorvente, cuja posição pode variar nas posições A, B e C da Figura 2.5, permitindo diferentes graus de absorção sonora.

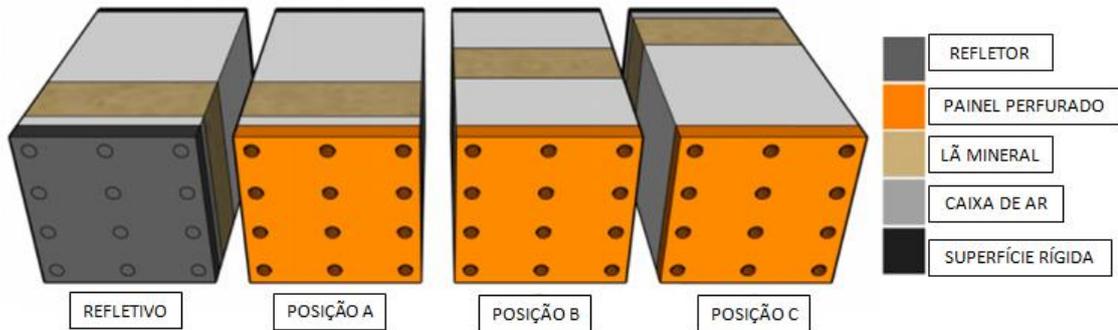


Figura 2.5 – Configuração do dispositivo de acústica variável desenvolvido pelos professores investigadores - Adaptado do Artigo: “On the Use of Perforated Sound Absorption Systems for Variable Acoustics Room Design, autoria de Pereira et al (2021)

Para além disso, por trás do painel perfurado, um painel móvel pode tapar os furos, modificando as propriedades acústicas do conjunto, tornando-o reflexivo. Componentes eletromecânicos podem ainda ser incorporadas ao dispositivo, de modo a tornar a solução automatizada, facilitando sua operação.

2.2.2 Coeficientes de absorção

A intensidade sonora de uma onda corresponde ao fluxo de energia que atravessa uma superfície de área unitária normal à direção de propagação da onda, e pode ser expressa pela relação:

$$I = \frac{P_{ef}^2}{z} = \frac{P_{ef}^2}{\rho c} \quad (2.1)$$

onde:

I = intensidade sonora (W/m^2)

P_{ef} = valor eficaz da pressão sonora (N/m^2)

z = impedância acústica ($kg/m^2 s$)

ρ = massa específica do meio de propagação (kg/m^3)

c = velocidade do som (m/s)

Ao atingir uma superfície absorvente, uma onda sonora tem parte de sua energia absorvida pelo material da superfície e parte refletida para o ambiente. Após a reflexão, a intensidade sonora será menor durante a sua próxima travessia do recinto.

Consideremos um coeficiente de absorção sonora, α , para cada superfície refletora, definido como a razão entre energia absorvida pela superfície e a energia incidente sobre a superfície:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (2.2)$$

onde:

E_a é a energia sonora absorvida pela superfície do material,
 E_i é a energia sonora incidente na superfície do material.

Ao atravessar a sala, a onda envolve as superfícies com vários ângulos de incidência. Como afirmado em 2.1, em um recinto grande e irregular, o número de ondas é tão grande que em cada superfície, todas as direções de incidência de fluxo são igualmente prováveis. O coeficiente de absorção sonora α é, portanto, obtido pela média de todos os ângulos de incidência da onda sobre a superfície.

Os coeficientes de absorção sonora para várias superfícies e materiais, são medidos em laboratório e podem ser encontrados em tabelas publicadas na literatura, bem como em catálogos fornecidos por fabricantes de materiais absorvedores.

Assim como se obtém a média do coeficiente de absorção para todos os ângulos de incidência em uma superfície, calcula-se a média ponderada de coeficientes de absorção sonora das diferentes superfícies de uma sala, de acordo com as áreas das superfícies, da seguinte forma:

$$\alpha_m = (S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + S_3 \cdot \alpha_3 + \dots + S_n \cdot \alpha_n) / S \quad (2.3)$$

$$e \quad S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n \quad (2.4)$$

onde

S_i = área da superfície absorvente i (m^2);

α_i = coeficiente de absorção sonora da superfície i , e

α_m = coeficiente de absorção sonora ponderado para a sala como um todo.

Beranek (1993), ressalta que cada material tem coeficientes de absorção próprios, que variam com a frequência. Para uma completa especificação das propriedades de absorção de um material, é necessário traçar-se uma curva de α em função da frequência. Nos catálogos de

fabricantes, é comum encontrarem-se especificações de coeficientes de absorção para as bandas de oitava de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz.

Podem ser utilizados, ainda, três critérios de coeficientes médios de absorção acústica:

- $\alpha_{500-1000-2000}$ (média entre 500, 1000 e 2000 Hz);
- NRC (valor médio de 250, 500, 1000 e 2000 Hz);
- α_w (valor de absorção média ponderada), que permite obter classes de absorção sonora.

2.3 Reverberação

De acordo com Egan (2007), o trabalho do Professor Wallace Clement Sabine, iniciado em 1895, solicitado a melhorar a acústica na nova sala de conferências do Fogg Art Museum, Universidade de Harvard, EUA, é pioneiro neste assunto. O som no salão persistia durante cerca de 5,5 segundos, devido aos múltiplos reflexos dos materiais de acabamento das superfícies envolventes. A maioria das pessoas de língua inglesa pode completar 15 sílabas em 5,5 segundos, e as palavras eram quase impossíveis de serem compreendidas em quase todos os pontos da sala.

Sabine reconheceu que o problema da persistência da energia do som refletido era devido ao tamanho do recinto e ao seu mobiliário, incluindo os ocupantes, e chamou a esta persistência de "duração da audibilidade do som residual". Realizou testes repetidos no salão, utilizando tubos de órgãos como fontes de ruído, com um nível sonoro inicial de cerca de 60 dB acima de um limiar de audibilidade dos jovens ouvintes a uma frequência de 512 Hz. Sabine usou o seu sentido disciplinado de audição para julgar quando o som dos tubos dos órgãos deixavam de ser audíveis. O tempo tomado para que o som decaísse em 60 dB, ou um milionésimo do seu nível sonoro inicial, foi medido por cronógrafo e definido por Sabine para ser o que é agora chamado o tempo de reverberação. Com a colocação de almofadas trazidas de um teatro, em etapas, Sabine descobriu que podia baixar o tempo de reverberação para cerca de 1 segundo quando quase 550 almofadas cobriram várias superfícies da sala. Pela primeira vez, o tempo de reverberação desejado em salas, pelo menos a 512 Hz, resultou de um critério. A equação que Sabine definiu e provou empiricamente é:

$$T = 0,161 V / A \quad (2.5)$$

onde:

V = volume da sala em m³

A = área de absorção sonora equivalente da sala, que podemos definir como $A = \sum S_i \alpha_i$

A fórmula acima é razoavelmente precisa quando as condições de campo sonoro são difusas (por exemplo, absorção sonora uniformemente distribuída e baixa) e as dimensões das salas

não variam muito (por exemplo, salas compactas sem uma dimensão extremamente longa, ou ambientes sem reentrâncias). É prática comum quando se pretende fazer o controlo da reverberação, a aplicação dos materiais absorventes concentrados em uma parte do ambiente. Além disso, é improvável que haja campo difuso em uma sala, se o coeficiente de absorção estiver muito acima de 0,3 porque a intensidade sonora das ondas diminui muito rapidamente. Nestas condições o tempo de reverberação obtido por esta expressão afasta-se do observado experimentalmente. Não deve ser utilizada para estúdios de gravação ou câmaras anecoicas, que têm coeficientes de absorção extremamente elevados em relação ao volume da sala. A fórmula de Eyring pode ser uma alternativa à fórmula de Sabine.

2.4 Parâmetros objetivos de avaliação acústica dos espaços fechados

As características de qualidade sonora registadas pelo ser humano de forma subjetiva, podem ser definidas de forma objetiva por meio de diversos parâmetros quantificáveis.

A NBR ISO 3382-1:2017, adoção idêntica em conteúdo técnico, estrutura e redação, à ISO 3382-1:2009, que normatiza a medição de parâmetros de acústica de salas de espetáculos, cita, *ipsis verbis*: “estudos subjetivos das características acústicas de auditórios têm mostrado que várias grandezas que podem ser obtidas a partir de medidas de respostas impulsivas estão correlacionadas a determinados aspetos subjetivos do carácter acústico de um auditório. Enquanto o tempo de reverberação se constitui como uma descrição fundamental do carácter acústico de um auditório, a inclusão destas grandezas mais recentes permite uma descrição mais completa das condições acústicas no auditório”.

Abordaremos neste trabalho os parâmetros que julgamos mais representativos, relativamente à qualidade sonora das salas de uso múltiplo, objeto deste estudo.

2.4.1 Tempo de reverberação (Reverberation Time) – RT

Como expresso em 2.3, o tempo de reverberação - RT - de um recinto, a uma dada frequência é definido como o tempo (em segundos) desde quando a fonte emissora é interrompida, até o nível de pressão sonora cair 60 dB do seu valor inicial, para o recetor. Recintos com tempo de reverberação grande, como, por exemplo, edifícios industriais e igrejas, são chamados de "vivos". Por outro lado, ambientes com RT pequenos, como, exemplificadamente, estúdios de gravação, salas de conferência, são chamados de recintos “secos”. Em geral, o RT varia com a frequência, tendendo a diminuir à medida que esta aumenta. Isto deve-se, em parte, às características de maior absorção dos materiais habitualmente utilizados como revestimentos, bem como à absorção de ar, o que é especialmente evidente em grandes recintos onde o percurso do som é maior.

Normalmente, quando se quer definir um único valor recomendado de tempo de reverberação para um determinado recinto, o RT médio, é referido como a média aritmética dos valores para as bandas de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. Em geral, o valor mais apropriado de RT médio depende tanto do volume do recinto, como da atividade para a qual ele será utilizado. Por exemplo, no caso de salas destinadas a conferências, é desejável que os valores de reverberação sejam baixos para se conseguir uma boa inteligibilidade da fala, enquanto no caso de salas de concerto, são recomendados valores significativamente mais elevados com o objetivo de assegurar uma melhor audição da música, com sensação de preenchimento do ambiente. A Figura 2.6 mostra-nos as gamas recomendadas de valores de RT médios para diferentes tipos de salas, assumindo que estão ocupadas.

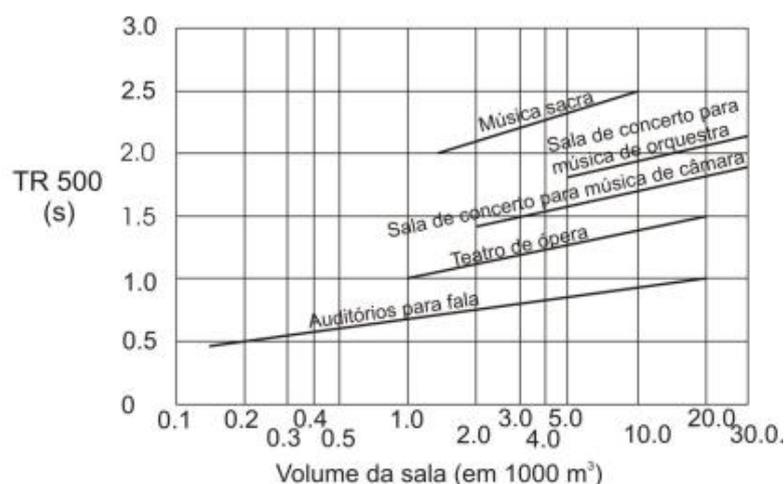


Figura 2.6 – RT a 500 Hz, recomendados em função do volume do ambiente, para usos diversos.
Adaptado de Mehta, et al. (1999)

O tempo de reverberação é calculado a partir da curva de decaimento da energia, medida em qualquer ponto de uma sala. Esta curva pode ser obtida como resposta à emissão de um som curto e intenso, como um tiro de pistola de sinalização, ou utilizando técnicas MLS com processamento em computador. Entretanto, o cálculo não é realizado diretamente pela simples observação do tempo até o nível diminuir em 60 dB, porque o decaimento da curva energia-tempo (ETC = Energy-Time Curve) apresenta irregularidades, uma vez que em nenhuma sala real existe um campo sonoro perfeitamente difuso, além de haver ruído de fundo. Na prática, o RT é determinado utilizando o método de integração de Schroeder, a partir do instante inicial e considerando uma janela temporal (normalmente entre 1 e 3 segundos), gerando uma reta. A figura 2.7 mostra uma curva de decaimento de energia no tempo, obtida a partir da integração temporal da energia pelo processo de Schroeder, e o valor de RT calculado a partir deste último (margem superior direita).

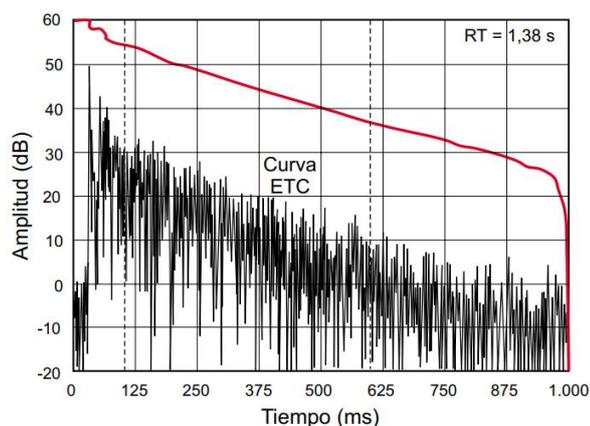


Figura 2.7 – Curva energia-tempo medida e obtida por integração - Fonte: Carrion (1998)

Na prática, não é possível observarmos uma queda de 60 dB, definindo-se os instantes inicial e final a partir dos quais o sistema de medição calcula automaticamente o tempo de reverberação. Normalmente, adotam-se intervalos correspondentes a 20 dB ou a 30 dB, obtendo T20 e T30 respetivamente, e faz-se a extrapolação linear para o RT correspondente a 60 dB. Finalmente, deve-se registar que a forma prática de se obter o valor do tempo de reverberação representativo de uma sala, em cada frequência de trabalho, é a média dos valores medidos em diferentes pontos da sala (normalmente entre 10 e 15 pontos, dependendo do seu volume). – Carrion (1998).

2.4.2 Relações entre tempos de reverberação em frequência:

Dois parâmetros obtidos a partir do RT dão-nos a ideia da resposta da sala às baixas e altas frequências.

O calor (warmth) de uma sala é um parâmetro subjetivo determinado de forma objetiva pelo parâmetro BR – Bass Ratio, relacionado à preponderância de reverberação de baixas frequências, em relação às frequências médias:

BR - Bass Ratio: representa a suavidade da melodia devido aos graves. Ocorre quando o tempo de reverberação das baixas frequências (menores que 250 Hz) é suficientemente grande para garantir que tais frequências sejam claramente percebidas – Iazzetta (2004). Corresponde à relação entre a soma dos Tempos de Reverberação T30 nas bandas de oitava de 125 Hz e 250 Hz e a soma dos T30 nas bandas de oitava de 500 Hz e 1000 Hz, i.e.

$$BR = (RT_{125\text{Hz}} + RT_{250\text{Hz}}) / (RT_{500\text{Hz}} + RT_{1\text{kHz}}) \quad (2.6)$$

O brilho de uma sala, por sua vez, é um parâmetro que representa a resposta da sala às altas frequências:

Br - Brilho: avalia a componente das altas frequências. Corresponde à relação entre a soma dos T30 nas bandas de oitava de 2 kHz e 4 kHz e a soma dos T30 nas bandas de oitava de 500 Hz e 1000 Hz, i.e.

$$Br = (RT_{2KHz} + RT_{4KHz}) / (RT_{500Hz} + RT_{1KHz}) \quad (2.7)$$

2.4.3 Tempo de decaimento inicial (Early Decay Time) – EDT

É o tempo decorrido para o decaimento da energia sonora entre 0 dB e 10 dB, extrapolado para 60 dB, conforme se vê no gráfico da Figura 2.8.

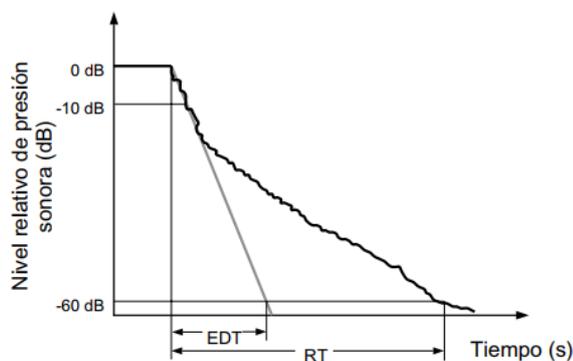


Figura 2.8 – Relação entre EDT e RT - Fonte: Carrion (1998)

Assim como o tempo de reverberação RT, o EDT relaciona-se à quantidade de absorção sonora existente na sala e também é influenciado pela difusão dos materiais. Em tese, em salas com difusão homogênea, onde o decaimento seria praticamente linear, os dois valores tendem a ser idênticos. O EDT mostra-se mais relacionado ao julgamento subjetivo da reverberação, também chamado de “reverberância”, do que o RT – Barron (2010).

Geralmente, as salas de espetáculos não possuem distribuição uniforme de absorção, e por esta razão o EDT é inferior ao RT (obtido pelo T30), sobretudo nos pontos mais próximos da fonte, quando se utilizam superfícies refletoras de modo a orientar as primeiras reflexões para a plateia e existe elevada absorção sonora da plateia. Nestes casos, menos energia sonora ficará disponível para o som reverberante mais tardio. Enquanto o tempo de reverberação tende a ter uma variação menor no espaço, o EDT apresenta uma variação maior. O valor de EDT tende a ser menor em zonas por baixo de balcões. Nos pontos da plateia ou balcão de teatros, o valor de EDT deve aproximar-se de RT, para a média das oitavas de 500 e 1000 Hz.

2.4.4 Índice de clareza de linguagem – C50

É a relação entre a quantidade de energia registada pelo recetor nos primeiros 50 ms, desde a chegada do som direto, e a quantidade de energia registada a partir dos 50 ms. O parâmetro de 50ms corresponde ao intervalo de tempo entre sons, acima do qual o ser humano consegue perceber que existe entre eles uma pausa. Calcula-se em cada banda de oitava entre 125 Hz e 4.000 Hz, e pode ser expressa em escala logarítmica, pela expressão:

$$C_{50} = 10 \log \left| \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right|, \text{ em dB} \quad (2.8)$$

onde: p^2 = energia sonora

Para uma boa inteligibilidade da fala, é recomendável que a energia registada nos primeiros 50 ms seja maior que aquela registada a seguir, ou seja, $C_{50} > 0$ dB, ou ainda que o rácio entre a energia registada nos primeiros 50 ms e a energia a partir dos 50 ms seja igual a 100%. Define-se como representativo o valor ponderado de clareza de linguagem chamado de C50(Speech Average), por meio da fórmula: $C_{50}(\text{Speech Average}) = 0,15 \cdot C_{50}(500\text{Hz}) + 0,25 \cdot C_{50}(1\text{kHz}) + 0,35 \cdot C_{50}(2\text{kHz}) + 0,25 \cdot C_{50}(4\text{kHz})$. Carrion (1998) indica que os valores recomendados para pontos de uma sala ocupada são de $C_{50}(\text{Speech Average}) > 2$ dB. Já Arau-Puchades (2008) refere que espaços com valores de C50 acima de -1,5 dB são apropriados para a linguagem. A norma NBR ISO 3382-1:2017 estabelece o intervalo de definição sonora regulamentar para salas multi funcionais não ocupadas de até 25.000 m³, que convertido ao índice de clareza de linguagem, como número único médio entre as bandas de oitavas de 500 Hz e 1 kHz, chega aos valores de $-3,68 \text{ dB} < C_{50}(500-1000) < +3,68 \text{ dB}$.

2.4.5 Índice de clareza musical – C80

É a relação entre a energia sonora registada pelo ouvinte nos primeiros 80 ms (som direto e principais reflexões), e a energia a partir dos 80 ms (reflexões tardias). Calcula-se pela expressão:

$$C_{80} = 10 \log \left| \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right|, \text{ dB} \quad (2.9)$$

onde:

p^2 = energia sonora

Segundo Carrion (1998), a escolha deste critério deve-se ao fato de que, quando se trata de música, as reflexões que chegam ao ouvinte no intervalo de tempo de 80 ms, são integradas pelo ouvido juntamente com o som direto e, portanto, contribuem para a clareza musical. Brandão (2018) afirma que os parâmetros C80 indicam se uma sequência de notas rápidas pode ser facilmente compreensível pela audiência.

O valor único, calcula-se pela média linear dos valores obtidos na expressão acima, nas bandas de frequência entre 125 Hz e 4 kHz. Este índice pode variar de valores positivos em salas “secas” a valores negativos para salas reverberantes. Salas reverberantes têm C80 da ordem de -4dB, ou seja, o rácio entre a energia registada nos primeiros 80 ms e a energia a partir dos 80 ms é da ordem de 39,8%. Numa sala “morta”, ou “seca”, o índice C80 é igual ou superior a 4dB, ou rácio de 251,2%.

Encontram-se diferentes intervalos de valores recomendados para este parâmetro entre vários autores.

Para Long (2006), os valores adequados deste parâmetro deve estar, preferencialmente, no intervalo $-4 \text{ dB} < C80 < 0 \text{ dB}$.

Higini Arau-Puchades (2008) recomenda os seguintes intervalos:

- Para concertos de orquestra: $-2 \text{ dB} < C80 < +4 \text{ dB}$;
- Para ópera: $-2 \text{ dB} < C80 < +6 \text{ dB}$;
- Para peças de teatro: $C80 > 6 \text{ dB}$.

A NBR ISO 3382-1:2017 define o intervalo de índice de clareza musical regulamentar para salas de uso múltiplo não ocupadas de até 25.000 m³, como número único médio em frequência entre as bandas de 500 Hz e 1000 Hz, como $-5 \text{ dB} < C80(500-1000) < +5 \text{ dB}$.

2.4.6 Índice de transmissão de linguagem (Speech Transmission Index) – STI

É associado à percepção clara da palavra. Diretamente relacionada à inteligibilidade das consoantes, esta percepção é afetada quando há excesso de reverberação na sala. A voz humana apresenta espectro médio significativo entre 125 Hz e 8 kHz, com preponderância de baixas frequências para os homens. Além disto, a articulação da voz é modulada em amplitude, com as componentes de modulação relacionadas ao ritmo natural da fala. Brandão (2018) regista que o STI baseia-se na medição da razão entre as amplitudes de modulação dos sinais enviados e recebidos em uma sala. Está fundamentado no fato de que a reverberação e o ruído de fundo fazem com que a amplitude de modulação do sinal recebido por um ouvinte na

sala seja menor que a amplitude de modulação do sinal emitido (sem ruído e reverberação). Uma diminuição da amplitude de modulação está associada a uma perda na inteligibilidade da fala. No intervalo entre 125 Hz e 8000 Hz, o STI leva em conta um total de 98 frequências de modulação. O índice denominado RASTI, análogo, é calculado pela média dos STI para as bandas de 500 Hz e 2000 Hz. Ambos os índices podem ser calculados para diferentes relações de Sinal/Ruído.

O Quadro 2.1 relaciona a percepção subjetiva da inteligibilidade da palavra aos parâmetros objetivos STI e RASTI.

Quadro 2.1 – Relação de parâmetros objetivos com avaliação subjetiva da inteligibilidade da palavra - Carrion (1998).

STI / RASTI	Avaliação subjetiva
0,88 - 1	Excelente
0,66 - 0,86	Boa
0,50 - 0,64	Aceitável
0,36 - 0,49	Pobre
0,24 - 0,34	Ruim

2.4.7 Sonoridade (Strenght Factor) – G

Segundo Carrion (1998), sonoridade, ou fator de força sonora, corresponde ao grau de amplificação do som, produzido pela sala, influenciando no *loudness*, que é o volume sonoro ou intensidade percebida do som. Subjetivamente, relaciona-se ao fato de a sala possuir um campo reverberante que dá suporte ao som direto da fonte. Depende da distância do ouvinte ao palco, da energia associada às primeiras reflexões, da área ocupada pelo público e do nível de campo reverberante. É definida como a diferença entre o nível total de pressão sonora produzido por uma fonte omnidirecional num determinado ponto da sala, e o nível de pressão sonora produzido pela mesma fonte, em campo livre, à distância de 10 metros. De acordo com Arau-Puchades (2008), é conveniente que este valor seja superior a 0 dB, em todos os pontos do auditório e para todas as bandas de frequências.

A sonoridade da sala relaciona-se com o volume da mesma e o tempo de reverberação, o que pode ser representado por:

$$G = 10 \log (RT/V) + 45 \quad (2.10)$$

onde:

RT é o tempo de reverberação (s) e

V é o volume da sala (m³)

Brandão (2018) explica que, pela expressão, é possível inferir que um aumento do RT, mantendo-se o volume da sala constante, implicaria em um aumento do *loudness* (ruído de fundo + reflexões em zonas com fraca contribuição do som direto). Isto se explica pela maior quantidade de reverberação, i.e., mais energia acústica retorna à sala pelas reflexões e a sala fornece suporte ao som direto gerado pela fonte. O aumento do volume da sala, mantendo-se o RT constante, levaria a uma diminuição do *loudness*, pois as paredes tendem a estar mais distantes e a sala continuaria a mesma quantidade de absorção ($S \cdot \alpha_m$).

A norma NBR ISO 3382-1:2017 define o intervalo de fator de força sonora regulamentar para salas de uso múltiplo não ocupadas de até 25.000 m³, como número único médio em frequência entre as bandas de 500 Hz e 1000 Hz, que é de $-2 \text{ dB} < G(500-1000) < +10 \text{ dB}$.

2.4.8 Nível de pressão sonora (Sound Pressure Level) – SPL

Pressão sonora (N/m²) é a forma mais comum de expressar a grandeza de um campo sonoro. A gama de pressões a que o ouvido responde é extraordinariamente ampla, desde o limiar da audição, à pressão de 20 µPa, até ao que causa dor, da ordem de 20 Pa. A variação é tão grande, que é fácil perder-se o senso de volume alto, adequado ou baixo.

Nosso sistema auditivo não responde linearmente aos estímulos que recebe, mas sim de uma forma logarítmica. Ademais, a audição humana não tem resolução temporal infinita, ou seja, não detecta mudanças muito súbitas na amplitude de sinal acústico, e tende a integrar sinais que são muito próximos.

Por ambas as razões acima, o nível de pressão sonora é uma grandeza logarítmica, que leva em conta o valor médio quadrático ("root-mean-square") da pressão sonora, e o limiar da audição a 1000 Hz é utilizado como pressão de referência $P_{ref} = 20 \text{ µPa}$ – Brandão (2018). O nível de pressão sonora, em dB, define-se por:

$$\text{SPL} = 20 \log \frac{P_{ef}}{P_{ref}} \quad \text{em dB} \quad (2.11)$$

onde:

P_{ef} = pressão efetiva

P_{ref} = pressão de referência = 20 µPa

A utilização do limiar auditivo como referência destina-se a assegurar que todos os sons audíveis sejam representados por valores positivos de SPL, variando de 0 a 135 dB, em que o

valor 0 dB representa uma pressão igual ao limiar da audição e 135 dB o limiar aproximado da dor. A Figura 2.9 mostra os níveis de pressão sonora percebidos pelo ouvido humano, em função das frequências sonoras, delimitando as zonas de geração sonora pela voz humana e pelos instrumentos musicais convencionais.

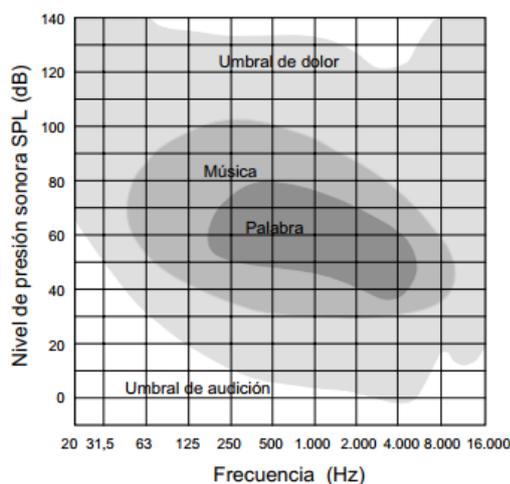


Figura 2.9 – Níveis de pressão sonora em função das frequências - Fonte: Carrion (1998)

Para o estudo de acústica de auditórios, este parâmetro é muito importante, na medida em que, calculando-se as diferenças de níveis de pressão sonora por bandas de oitavas, ou mesmo níveis equivalentes de pressão sonora, nos vários pontos de receção, a partir do ponto mais próximo da fonte, pode-se avaliar o grau de uniformização do campo sonoro em todo o ambiente.

2.4.9 Eficiência Lateral (Lateral Energy Fraction) – LF

Este parâmetro procura registar a sensação de amplitude da fonte sonora, devido às primeiras reflexões, que chegam lateralmente ao ouvinte nos primeiros 80 ms após o som direto. Define-se pela razão entre a energia lateral que chega aos ouvidos do recetor entre 5 e 80 ms (energia contida nas primeiras reflexões, que exclui o som direto), e a energia total, vinda de todas as direções entre 0 e 80 ms (som direto mais primeiras reflexões), assim definida:

$$LF = \frac{\int_{0,005}^{0,08} P^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_0^{0,08} p^2(t) dt} \quad (2.12)$$

onde:

p^2 = energia sonora

θ = ângulo de incidência

É geralmente analisada levando-se em conta a média aritmética dos valores para as bandas de oitavas entre 125 Hz e 1.000 Hz, devido ao fato de que as baixas frequências são seus principais contribuintes. A aplicação de materiais ou objetos que aumentem a difusão sonora, sobretudo nas laterais da sala, incrementam a eficiência lateral. Segundo Brandão (2018), o valor obtido no cálculo da Eficiência Lateral é diretamente proporcional à impressão sonora do tamanho ocupado pela fonte.

De acordo com a norma NBR ISO 3382-1:2017, os valores regulamentares de eficiência lateral, como número único médio para as frequências de bandas de 500 Hz e 1000 Hz, estão no intervalo entre 5% e 35%, para salas de concerto e multiuso com volume até 25.000 m³.

Carrion (1998), afirma que um valor de LF demasiado elevado pode comprometer a localização acústica dos músicos. O autor, entretanto, recomenda que este parâmetro não seja inferior a 19% para as frequências de oitavas entre 125 Hz a 1000 Hz.

2.4.10 Curvas NC

A avaliação objetiva do grau de incômodo que um determinado ruído de fundo causa a um ouvinte é feita por comparação dos níveis de ruído na sala para cada banda de oitava, no intervalo entre 63 Hz a 8 kHz, com um conjunto de curvas de referência denominadas NC (Critério do Ruído). O ruído de fundo pode ser devido ao ruído dentro da sala (por exemplo, causado pelo sistema de ar condicionado) e ruído externo (por exemplo, ruído de tráfego). As curvas NC, conforme Figura 2.10 abaixo, são utilizadas para estabelecer níveis máximos recomendados para diferentes tipos de salas, dependendo da sua utilização.

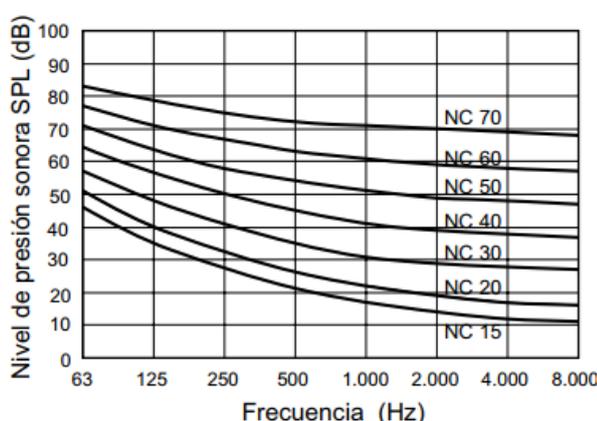


Figura 2.10 – Curvas NC em percentual, no gráfico de SPL x frequências - Fonte: Carrion, 1998

Diz-se que um recinto está em conformidade com uma determinada especificação NC quando os níveis de ruído de fundo na sala estão abaixo da curva de referência NC correspondente para todas as frequências na sala. Carrion (1998) refere que a curva NC recomendada para salas de concertos é NC-15, que assegura que os níveis de ruído de fundo são suficientemente baixos para não prejudicarem a audição de um "pianissimo", bem como para permitir o aumento da amplitude dinâmica da orquestra na sala, sendo esta entendida como a diferença entre o nível de pressão sonora correspondente a movimentos mais altos e mais fracos da composição musical. Entretanto, até NC-25 considera-se normalmente aceitável.

2.5 Auditórios de uso múltiplo

Sob o ponto de vista da acústica, podemos inicialmente separar o conjunto de atividades dos auditórios de uso múltiplo em dois grupos: aqueles em que a prioridade é a fala, e aqueles em que a prioridade é a música.

Na maioria das vezes, os valores dos parâmetros objetivos, sobretudo o tempo de reverberação apresentam um conflito: os que caracterizam uma sala como boa para música de concerto, tornam-na menos adequada para a palavra falada, e vice-versa.

O Quadro 2.2 apresenta valores recomendados de parâmetros sonoros relevantes para salas de teatro, em que é preponderante a percepção da palavra falada, e para sala de concertos, onde a reverberação tem papel importante.

Quadro 2.2 – Valores recomendados de parâmetros acústicos para salas de teatro e de concertos

Parâmetro acústico	Atividade relevante para estes parâmetros objetivos		Valorização subjetiva
	Teatro	Sala de concertos	
Tempo de reverberação – RT, sala ocupada	$0,7s \leq RT_{med} \leq 1,2s$	$1,8s \leq RT_{med} \leq 2,0s$	Grau de vivacidade da sala
BR - Bass Ratio, sala ocupada	-	$1,10 \leq BR \leq 1,25$ (se $RT_{med} = 2,2s$) $1,10 \leq BR \leq 1,45$ (se $RT_{med} = 1,8s$)	Riqueza em sons graves e suavidade da música
Br - Bilho	-	$Br \geq 0,87$	Riqueza em sons agudos
Tempo de decaimento inicial – EDT	-	$EDT_{med} \approx RT_{med}$	Grau de vivacidade da sala
Índice de clareza de linguagem – C50	$C50 > 2$ dB	-	
Índice de transmissão de linguagem – STI	$STI \geq 0,65$	-	
Sonoridade (Strenght Factor) – G	$4 \leq S_{med} \leq 8$ dB (orientação frontal do ator) $2 \leq S_{med} \leq 6$ dB (orientação lateral do ator) *	$4 \leq G_{med} \leq 5,5$ dB **	Grau de amplificação produzido pela sala
	* (500 Hz - 2 kHz) sala ocupada	** (500 Hz - 1 kHz) sala vazia	

Fonte: Adaptado de Carrion I., Antoni (1998). “Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos”.

A Tabela A.1, Anexo A da NBR ISO 3382-1:2017 apresenta grandezas que se caracterizaram importantes subjetivamente, podendo ser obtidas diretamente a partir da integração de respostas impulsivas.

O Quadro 2.3 reproduz as faixas típicas das grandezas de quatro parâmetros, sendo que um deles, o C50, foi aqui adaptado a partir da correlação entre o D50, parâmetro expresso na NBR ISO 3882-1:2017.

Quadro 2.3 – Valores recomendados de quatro parâmetros acústicos – Adaptado da NBR ISO 3382-1

Aspecto subjetivo do ouvinte	Grandeza acústica	Número único médio em frequência (Hz)	Faixa Típica *
Nível sonoro subjetivo	Fator de força do som, G, em dB	500 a 1000	-2 dB; +10 dB
Clareza sonora percebida	Clareza C80, em dB	500 a 1000	-5 dB; +5 dB
	Clareza C50 **, em dB	500 a 1000	-3,68 dB; +3,68 dB
Largura aparente da fonte (ASW)	Fração de energia lateral inicial, LF em percentual	500 a 1000	5 %; 35 %
* Valores médios em frequência em posições únicas em salas de concerto e salas multiuso não ocupadas, até 25.000 m ³			
** Valores adaptados, calculados em função dos parâmetros de Definição D50 registados na NBR ISO 3882-1:2017			
		$D_{50} = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10}}}$	

A qualidade acústica de uma sala de auditório está relacionada ao bom equilíbrio e estabelecimento de compromisso entre estes parâmetros. Em salas utilizadas para atividades relacionadas à fala, para compreensão da linguagem, o ideal é que o volume não seja de grande magnitude, e os tempos de reverberação sejam baixos, em torno de 1 segundo. A energia sonora deve-se concentrar nas primeiras reflexões, sendo as mais importantes as do teto, e as paredes devem ter uma pequena difusão. Por outro lado, as salas de concerto, por exemplo, devem ter maior volume, para que os tempos de reverberação sejam maiores, aproximando-se dos 2 segundos, com concentração de energia na cauda reverberante. Para salas de concerto, as reflexões mais importantes são as das superfícies laterais, que devem ter boa difusão. Deste modo, um projeto de auditório com uso múltiplo deve ter um compromisso criterioso entre discurso oral e música não amplificada.

Algumas diretrizes devem nortear a concepção das salas de uso múltiplo:

- as linhas de visão, e consequentemente audição, entre a fonte e os recetores na audiência não devem ter obstrução. Por esta razão, é muito comum nos projetos o posicionamento do palco em nível elevado e o piso da plateia inclinado em ângulo que permite a visualização;
- o teto de um auditório de uso múltiplo é mais complexo que o de uma sala de conferências. Para a inteligibilidade da fala, são desejáveis fortes reflexões sobre a audiência. Para a música, é desejável que o teto promova a difusão e provoque a sensação de envolvimento do ambiente pelo som;
- para espetáculos de música não amplificada, devem-se incluir no projeto superfícies refletoras ou difusoras próximas aos músicos que lhes ofereçam retorno acústico, como apoio. Com este objetivo proporcionam bom efeito a instalação de superfícies refletoras convexas posicionadas adequadamente na estrutura do teto, acima do proscênio, bem como a colocação, no palco, de painéis refletores ou difusores móveis, como biombos, por exemplo;
- para todas as utilizações, tem bom efeito a disposição de superfícies convexas refletoras também sobre a plateia, posicionadas com ângulos adequados em função da altura do teto, que favoreçam a reflexão do som para o centro da audiência, uma região difícil de se atingir;
- a nível de projeto, na concepção da forma da planta baixa do teatro, a colocação de frisas, camarotes, balcões e galeria permite que, na média, a audiência se situe a distâncias menores em relação à fonte;
- o projeto deve prever também sonorização eletrônica, capaz de reproduzir toda gama de frequência, de forma a que se tenha na sala a sensação de que a origem do som é a fonte não amplificada no palco, e não no sistema de altifalantes;
- volume da sala, e absorção sonora dos materiais, controlados, são o maior desafio para ajuste dos tempos de reverberação;
- é importante usarem-se cadeiras que, vazias, tenham coeficiente de absorção próximo ao de quando estejam ocupadas, normalmente com estofamentos finos no assento e no encosto.

A literatura reconhece que os lugares no teatro, tanto ocupados como desocupados, produzem uma grande atenuação do som direto proveniente do palco, principalmente em frequências próximas a 150 Hz. Em grandes auditórios, o maior quinhão de absorção sonora está na audiência sentada, chegando a 85% em salas de concerto que não tenham outros materiais absorventes aplicados.

Cadeiras almofadadas subdividem o piso de um auditório numa grelha regular, tendo uma profundidade e espaçamentos particulares, que, segundo Carrion (1998), acabam por funcionar como um conjunto de ressonadores. A existência de ressonâncias horizontais e verticais entre as filas consecutivas causa atenuação, que se caracteriza por uma forte absorção a baixas frequências, entre 100 Hz e 300 Hz e ocorre quer as cadeiras estejam ocupadas ou vazias.

3. METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO

Como afirmado em 1.2, este trabalho tem por objetivo contribuir para o estudo de soluções que contribuam com a melhoria de condicionamento acústico em auditórios de uso múltiplo. O tema será tratado a partir do estudo elaborado para um teatro com esta característica. Para este fim, será feita a avaliação de parâmetros acústicos da sala, por meio de modelação geométrica e cálculo de traçado de raios com o software CATT - Computer Aided Theatre Technique, com licença demonstrativa para fins acadêmicos. Esta versão possui limitações técnicas, como, por exemplo, não permitir a importação de modelos tridimensionais para a configuração da modelagem 3D, e limitar a 5.000 o número de raios para a simulação. Os dados obtidos foram calibrados com medições *in situ*, o que permitiu ajustar os dados de entrada do *software*, dando confiabilidade aos resultados. Os parâmetros acústicos do auditório no estado atual, obtidos pelo cálculo numérico computacional, foram analisados à luz das várias atividades funcionais do teatro, a fim de identificarem-se os principais *gaps* de desempenho acústico. Com base nesta análise foram elaboradas propostas de soluções para melhoria do acondicionamento acústico da sala, por meio de intervenções de acústica variável, geometria e revestimentos, com o objetivo de se mitigarem os pontos fracos da situação atual. As soluções propostas foram avaliadas em função dos resultados obtidos em modelação e análises numéricas com o *software*. As eficácias das soluções propostas em relação aos *gaps* de desempenho, foram analisadas também sob o critério de custo estimado, após o que se elaborou uma proposta final de ajuste, adequada ao espaço de uso múltiplo.

3.1 Estudo de caso – Teatro Polytheama

Um dos principais patrimônios históricos, culturais e arquitetônicos de Jundiaí, cidade do Estado de São Paulo - Brasil, o Teatro Polytheama foi fundado em 1911 e figura atualmente como um dos poucos teatros centenários ainda em atividade no Brasil. Seu nome mistura os termos em latim *poly*, que quer dizer muitos, e grego *theama*, que significa espetáculo. Sítio de uso múltiplo desde sua fundação, o Teatro Polytheama de Jundiaí chama a atenção não somente pelo seu tamanho, com seus 1124 lugares, mas também por sua história.

Após seus áureos tempos como espaço para apresentações de todos os tipos a partir da década de 1920, o Polytheama viu a redução de seu público na década de 1950, com a chegada da televisão ao Brasil, até ao fechamento do então cine-teatro em 1975. Na década de 1980, o Polytheama foi adquirido pela Prefeitura de Jundiaí e passou a integrar o patrimônio público do Município. Em 1987 a renomada arquiteta ítalo-brasileira Lina Bo Bardi, que projetou também o MASP (Museu de Arte de São Paulo), elaborou um projeto de revitalização e

restauração da área, mas não conseguiu ver sua obra finalizada. Lina faleceu em 1993, três anos antes da reinauguração, em 1996. A Figura 3.1 apresenta duas fotografias do teatro.

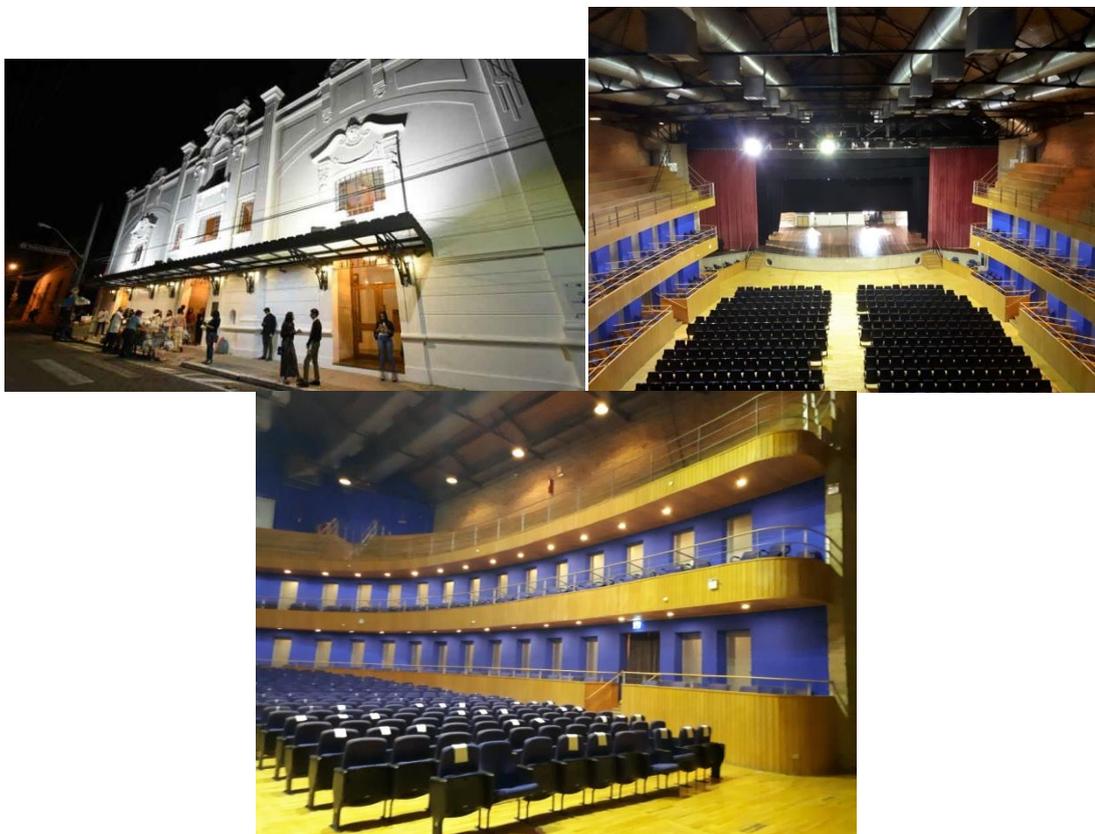


Figura 3.1 – Registos fotográficos da fachada frontal e do interior do Teatro Polytheama

Reabilitado e em plena atividade, o Polytheama tem uma programação intensa, que contempla as mais diversificadas linguagens artísticas. Além da agenda de espetáculos de teatro, música e dança, o teatro é também a casa da Orquestra Municipal de Jundiaí (OMJ), da Cia. de Teatro de Jundiaí e da Cia. Jovem de Dança, três dos corpos artísticos municipais mantidos pela Unidade de Gestão de Cultura. Utiliza-se também para conferências, treinamentos do corpo docente das escolas municipais, entrega de diplomas e audiências públicas. A sala tem capacidade de 1124 lugares, sendo 566 na plateia, 116 nas frisas, 136 nos camarotes, e 306 na galeria. O palco, em estilo italiano, disposição em que a plateia fica de frente para o espetáculo, possui boca de cena de 14,0 m de largura, profundidade de espaço cênico de 8,0 m, dos quais normalmente se utilizam 5,5 m, mais 2,5 m de proscênio, e 8,9 m de altura. A altura do urdimento é de 9,5 m. Não há fosso para a orquestra. Material informativo e o projeto do teatro em AutoCad foi disponibilizado pela Prefeitura do Município de Jundiaí.

A planta baixa do nível da plateia e cortes transversal e longitudinal são vistos na Figura 3.2.

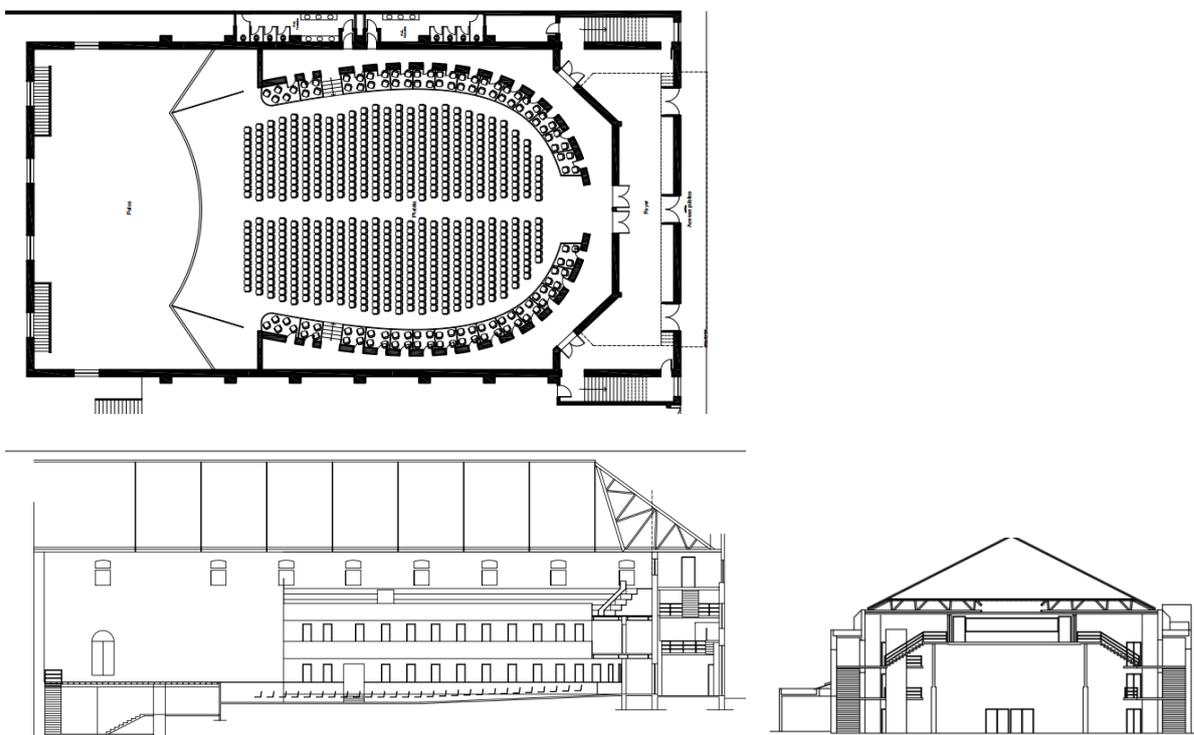


Figura 3.2 – Planta do térreo e cortes do teatro

3.2 Caracterização experimental do caso de estudo

O Teatro Polytheama foi objeto de estudo do engenheiro Henrique Pousa Caltram, ao elaborar o Trabalho de Conclusão de Curso no ano de 2021, na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas - SP – sob a orientação da Professora Doutora Stelamaris Rolla Bertoli. No dia 28/07/2021, aluno e orientadora efetuaram as medições *in situ* para determinação de Tempos de Reverberação RT30, que, com autorização de ambos, pudemos acompanhar. Os procedimentos de medição foram feitos conforme a norma NBR ISO 3382-1:2017. Os seguintes instrumentos foram utilizados para medição acústica, com a sala desocupada: uma fonte sonora omnidirecional dodecaédrica, um microfone omnidirecional, um amplificador de som e uma placa de captura de áudio conectada a um computador portátil. A análise de dados foi efetuada através do programa para medição acústica de salas Dirac (Room Acoustics Software) da Bruel & Kjaer, que emprega a técnica da resposta impulsiva a um sinal de varredura de senos de comprimento 10 segundos, e calcula os parâmetros pelo método de deconvolução. Foram definidas 4 posições para posicionamento da fonte, sendo três no palco e uma logo à frente do proscênio, conforme se vê na Figura 3.3.

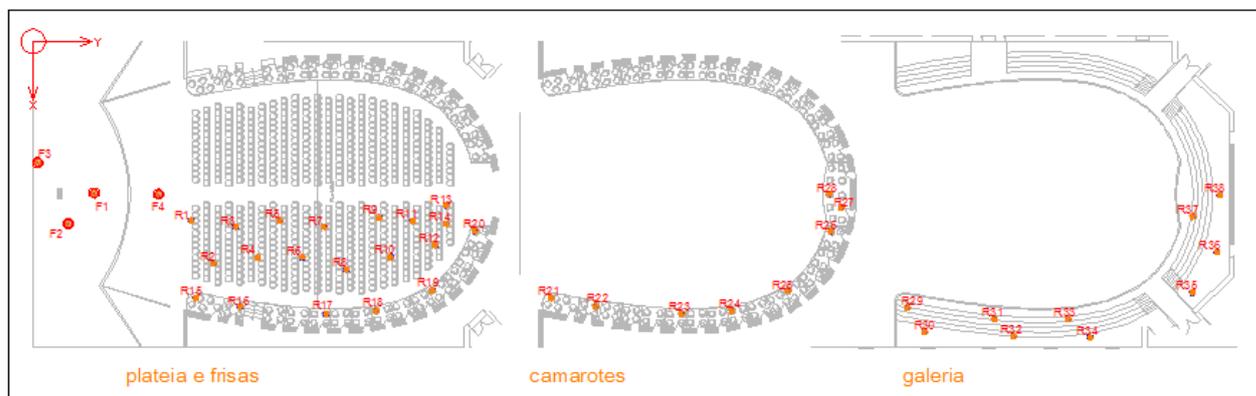


Figura 3.3 – posições de fontes e recetores na medição

Devido à simetria do espaço em relação ao eixo longitudinal central e para abrangência dos ensaios em relação ao ambiente estudado, definiram-se 38 posições de recetores, localizados na metade esquerda do teatro, assim distribuídos: 14 na plateia, 6 nas frisas, 8 nos camarotes e 10 na galeria. Fotos feitas na ocasião são vistas na Figura 3.4., juntamente com figura de código QR para o link de acesso ao vídeo sonoro da fonte omnidirecional a emitir sinal impulsivo, cujo endereço no canal Youtube é: <https://youtu.be/jAh37xjcOOw>

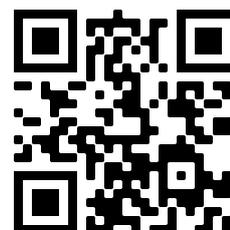


Figura 3.4 – Fotografias do experimento e QR Code com acesso ao link de vídeo sonoro da fonte

Para o presente trabalho foram consideradas as posições F1 e F2 da medição *in situ*. Os valores de RT para todos estes recetores com as fontes nas posições F1 e F2, obtidos na medição, podem ser vistos nos Anexo 1 e Anexo 2.

No Quadro 3.1 são reproduzidos os valores médios obtidos para a fonte nestas duas posições, medidos por sectores do teatro.

Quadro 3.1 – médias das medições de RT30 *in situ*, por sectores da sala

Fonte na posição F1		Bandas de frequências (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
		Médias dos Tempos de Reverberação - RT30 (s)					
Médias por sector							
R1 a R14	PLATEIA	1,61	1,26	1,34	1,54	1,59	1,40
R15 a R20	FRISAS	1,49	1,22	1,39	1,53	1,61	1,44
R21 a R28	CAMAROTES	1,48	1,24	1,37	1,51	1,60	1,42
R29 a R38	GALERIA	1,61	1,31	1,38	1,57	1,62	1,43
Média da sala		1,55	1,26	1,37	1,54	1,61	1,42

Fonte na posição F2		Bandas de frequências (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
		Médias dos Tempos de Reverberação - RT30 (s)					
Médias por sector							
R1 a R14	PLATEIA	1,63	1,27	1,38	1,55	1,59	1,41
R15 a R20	FRISAS	1,47	1,29	1,42	1,56	1,59	1,41
R21 a R28	CAMAROTES	1,41	1,29	1,40	1,53	1,58	1,40
R29 a R38	GALERIA	1,47	1,28	1,45	1,55	1,58	1,39
Média da sala		1,50	1,28	1,41	1,55	1,59	1,40

3.3 Modelação numérica e caracterização dos materiais

O presente trabalho utilizou como ferramenta o software CATT-Acoustic® (Computer Aided Theatre Technique) em versão demonstrativa, cedido pelo desenvolvedor para fins académicos. Este software baseia-se no método geométrico de traçado de raios (*ray tracing*), e é utilizado para a simulação e previsão de parâmetros acústicos de espaços fechados.

Inicialmente, para a modelagem geométrica do ambiente em 3D, foram definidas as coordenadas x, y e z dos pontos limites dos planos de conformação do espaço, por meio de medidas obtidas no AutoCad, com base em um referencial arbitrado. Devido à geometria complexa do teatro, que possui formas curvas, e com outros três níveis de assistência além da plateia, mesmo adotando-se pequenas simplificações sem influência significativa nos

resultados do cálculo numérico, foi necessário definirem-se as coordenadas de 668 pontos, para situarem-se os vértices das arestas que definiram 403 planos a representar o volume da sala.

A modelagem em 3D no software gerou as imagens mostradas na figura 3.5.

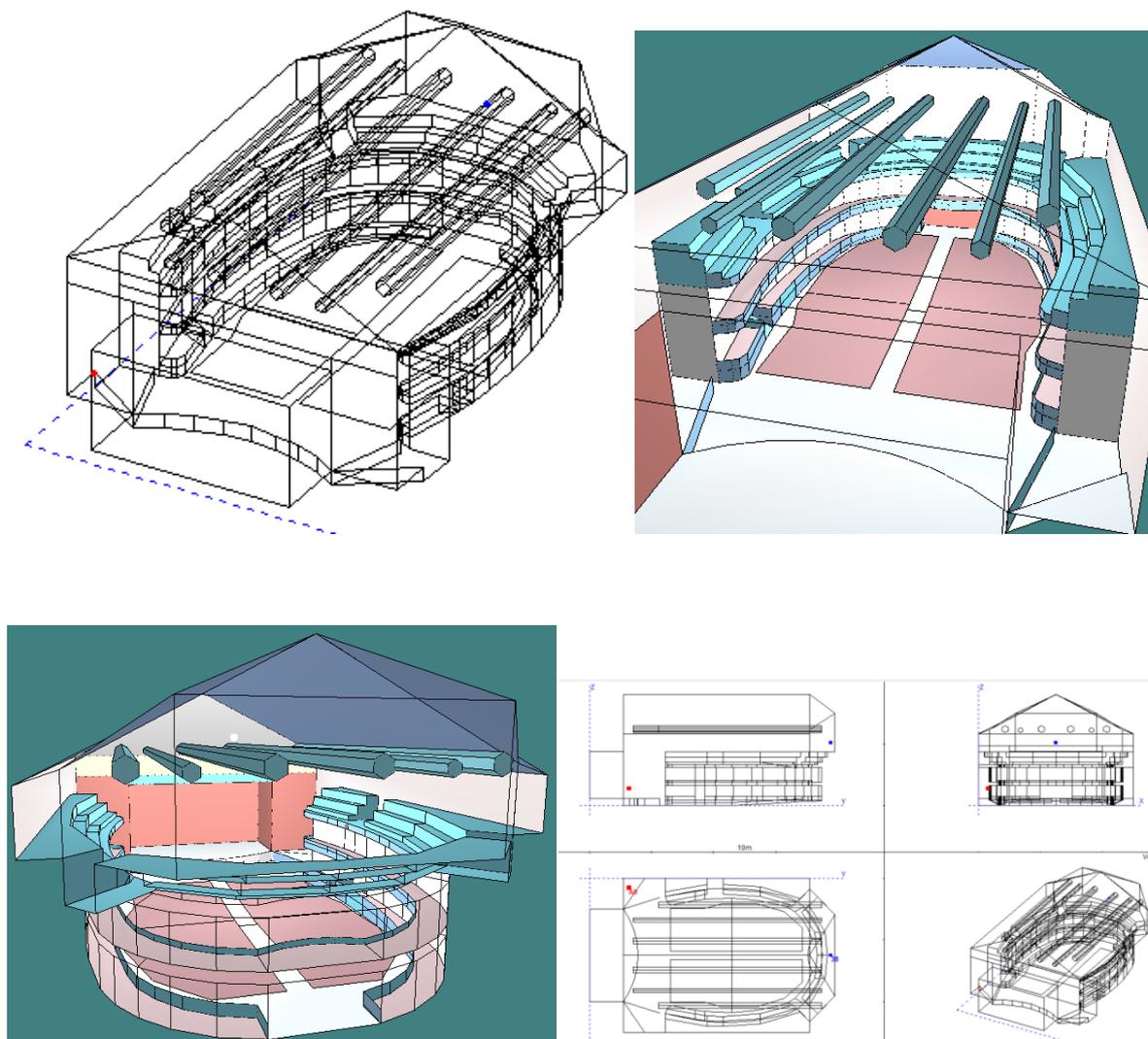


Figura 3.5 – Imagens geradas a partir da modelação geométrica no software

A parametrização de coeficientes de absorção e difusão sonora das superfícies como pisos, paredes, teto, portas, cadeiras, cortinas, etc., foi feita, em sua maioria, com base em referências bibliográficas. Entretanto, em salas existentes, é possível que se encontrem materiais executados *in loco*, especificamente para a edificação, como é o caso dos painéis de madeira do caso de estudo.

Não foram localizadas as memórias de projeto acústico da sala. Portanto, foram estimados os coeficientes referentes aos revestimentos em madeira mostrados na Figura 3.6: os painéis de madeira existentes no tardo dos peitoris e tetos das frisas e camarotes, e na arquibancada das galerias, bem como dos painéis verticais de tábuas espaçadas com 11% de vazios aplicados na frente dos peitoris voltada para a plateia, e do teto junto ao telhado, com tábuas espaçadas com vazios de 18%, dos quais não se tem a informação sobre existência ou não de material absorvente na caixa de ar.

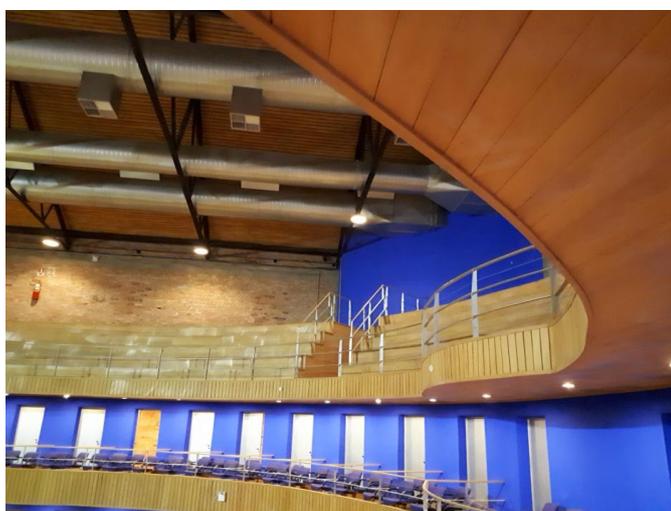


Figura 3.6 – Pormenores dos materiais de revestimento em madeira

Os coeficientes de absorção inicialmente adotados são mostrados no Quadro 3.2, por bandas de frequências em oitavas.

Quadro 3.2 – Coeficientes de absorção sonora adotados para a primeira análise

Material / frequência (Hz)	Coefs. de absorção por bandas de frequência em Hz (%)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso de madeira	5	5	5	5	5	5
Poltronas da plateia - desocupadas	35	45	57	61	59	55
Tardoz das poltronas da plateia	30	25	20	17	15	10
Painéis vert. tábuas espaçadas c/ vazado 11%	40	40	40	35	30	25
Concreto aparente	1	1	2	2	2	2
Cadeiras das frisas e camarotes	21	27	34	37	35	33
Parede "lisa" - reboco áspero	3	3	3	3	4	7
Painéis de madeira	30	25	20	17	15	10
Parede de tijolos nus	6	6	8	8	10	10
Cortina de veludo pesada - palco e entrada	14	35	55	72	70	65
Tecido leve ribalta - sob banzo inf. tesoura	3	4	11	17	24	35
Teto em tábuas espaçadas com vazado 18%	50	60	55	50	42	37
Vazio - abertura para campo livre	40	40	40	40	40	40
Conduas de ar - superf. rígida corrente	5	5	5	5	5	5

3.4 Cálculo dos parâmetros acústicos

Inseridos no programa os dados de localização das fontes sonoras e dos pontos de recepção do som, o algoritmo de cálculo emite, de forma aleatória (randômica), “raios” virtuais a partir da fonte omnidirecional, que sofrem reflexões especulares ao atingirem as superfícies da sala, e acabam por chegar aos recetores, conforme descrito em 2.1. Em função das difusões e absorções α das superfícies atingidas, os raios vão perdendo energia a cada reflexão. O cálculo resulta na simulação de diversos parâmetros acústicos registados em cada um dos pontos de recepção, para as bandas de oitavas de 125 Hz a 4000 kHz.

Convém ressaltar que a acurácia dos resultados do programa depende fortemente da parametrização, sobretudo dos coeficientes de absorção sonora, bem como pela correta definição dos planos. Quando a geometria da sala possui muitos planos, lança-se mão de simplificações para entrada de dados no programa. No caso de estudo, as superfícies curvas foram discretizadas em vários planos, a fim de atender aos parâmetros do software. Evitou-se o detalhamento excessivamente minucioso da geometria, uma vez que as margens de erro associadas ao método de traçado de raios, e as eventuais incertezas em relação aos parâmetros informados, não o justificam.

Em função das dimensões e do grande número de planos da sala de espetáculos, com o número máximo limitado a 5.000 raios, seria possível o programa deixar de atingir algumas regiões do teatro, não representando satisfatoriamente a distribuição do campo sonoro no

espaço. Por se tratar de processo estocástico gerando raios nas três direções de um espaço amplo, a fim de mitigar a dispersão de resultados, efetuou-se o cálculo em 5 rondas sucessivas, totalizando 25.000 raios, com a fonte na posição F1, e apurando a média para os 38 recetores, agrupados por zonas do teatro, para a calibração do modelo numérico, conforme descrito a seguir.

3.5 Calibração / Ajuste do modelo

Dada a incerteza no que se refere aos coeficientes de absorção sonora dos painéis de madeira existentes, a calibração do modelo foi efetuada por meio do método intuitivo de tentativa e erro, com o objetivo de se aproximarem os RT30 calculados, aos medidos, considerando-se no software a fonte omnidirecional na posição F1, com nível de pressão sonora de 100 dB em cada banda de oitava, a 1 m de distância da fonte. Os resultados de TR30, mesmo parâmetro de atuação impulsiva utilizado na medição *in situ*, apurados na primeira série de cinco rondas, apresentavam relativa aderência aos valores somente para as bandas centrais de 500 Hz e 1000 Hz. Entretanto, verificaram-se divergências em relação às bandas extremas, baixas e altas. Além disto, encontraram-se diferenças em relação às zonas de recepção do som, sobretudo naquelas onde os painéis de madeira tinham maior interferência devido à reflexão especular. A análise destes fatores combinados, orientou o ajuste passo a passo, a cada tentativa, permitindo que se fizessem aproximações nos coeficientes. Ao cabo de 19 tentativas com séries de 5 rondas cada, efetuando os ajustes, chegamos aos valores para coeficientes de absorção registados no Quadro 3.3 .

Quadro 3.3 – Coeficientes de absorção definidos na calibração

Material	Coefs. de absorção por bandas de frequência em Hz (%)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso de madeira	15	11	10	7	6	7
Piso do palco	15	11	10	7	6	7
Poltronas da plateia - desocupadas	35	45	57	61	59	55
Tardoz das poltronas da plateia	35	45	57	61	59	55
Painéis vert. tábuas espaçadas c/ vazado 11%	53	50	40	15	10	7
Concreto aparente	5	5	6	6	6	6
Cadeiras das frisas e camarotes	21	27	35	37	35	33
Parede "lisa" - reboco áspero	6	7	7	8	8	8
Painéis de madeira	61	65	24	12	10	6
Parede de tijolos nus	12	15	18	18	18	18
Cortina de veludo pesada - palco e entrada	14	35	55	72	70	65
Tecido leve ribalta - sob banzo inf. tesoura	3	4	11	17	24	35
Teto em tábuas espaçadas com vazado 18%	55	60	55	30	22	17
Vazio - abertura para campo livre	40	40	40	40	40	40
Conduas de ar - superf. rígida corrente	55	53	20	10	7	7

Para os materiais de revestimento com características de dispersão sonora, foram considerados os coeficientes mostrados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Coeficientes de dispersão sonora adotados no modelo numérico

Material	Coefs. de dispersão por bandas de frequência em Hz (%)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Piso do palco	10	15	20	20	20	20
Poltronas da plateia - desocupadas	30	40	50	60	70	70
Tardoz das poltronas da plateia	30	40	50	60	70	70
Cadeiras das frisas e camarotes	30	40	50	60	70	70
Parede "lisa" - reboco áspero	10	12	15	15	15	15
Parede de tijolos nus	10	15	20	20	20	20

Os resultados obtidos após a calibração aproximam-se dos medidos, conforme pode-se observar no Quadro 3.5 e Figura 3.7, abaixo:

Quadro 3.5 – Tempos de reverberação obtidos no modelo e na medição experimental

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação - RT30					
	Modelo sem calibração	2,20	1,89	1,56	1,49	1,42
Modelo calibrado	1,71	1,44	1,37	1,47	1,53	1,38
Medição <i>in situ</i>	1,55	1,26	1,37	1,54	1,61	1,42
Δ RT (s)	0,16	0,18	0,00	-0,07	-0,08	-0,04

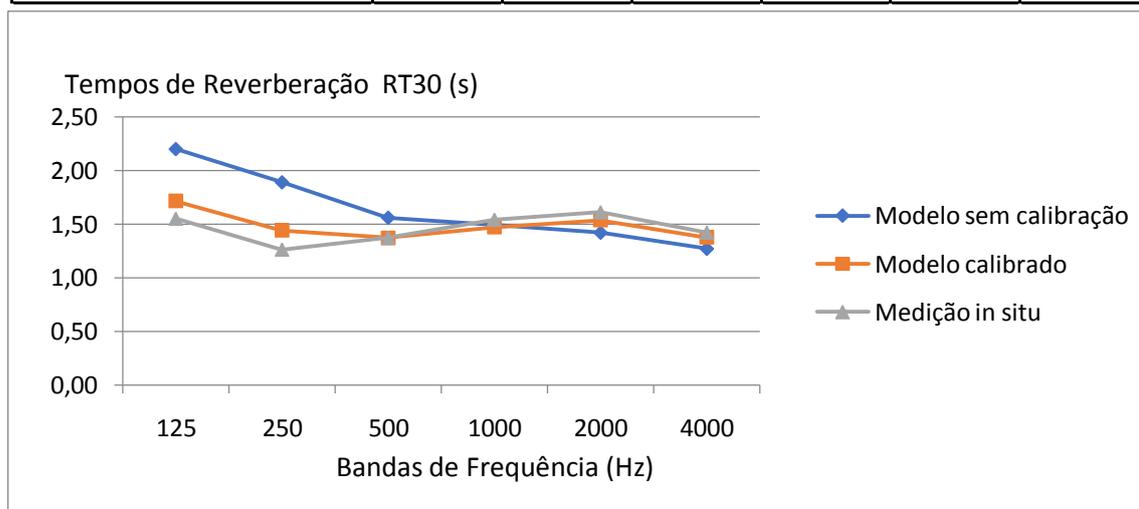


Figura 3.7 – Gráfico de RT30 por bandas de frequência, para a medição experimental, modelo sem calibração e modelo após calibração.

Feita a calibração/ajuste do modelo com base nos tempos de reverberação, procedeu-se ao cálculo dos parâmetros acústicos objetivos, a partir da aplicação do modelo numérico.

Para o cálculo dos parâmetros descritos nos itens 2.4.1 a 2.4.9., efetuaram-se 3 rondas de cálculo, com a fonte na posição F1, para 14 recetores, distribuídos pelas zonas da sala conforme abaixo descrito e ilustrado pela Figura 3.8 :

- zona da frente da plateia: R1 e R2
- meio da plateia: R7 e R8
- fundo da plateia: R11 e R12
- frisas: R16, R18 e R20
- camarotes: R22, R24 e R28
- galerias: R31 e R37

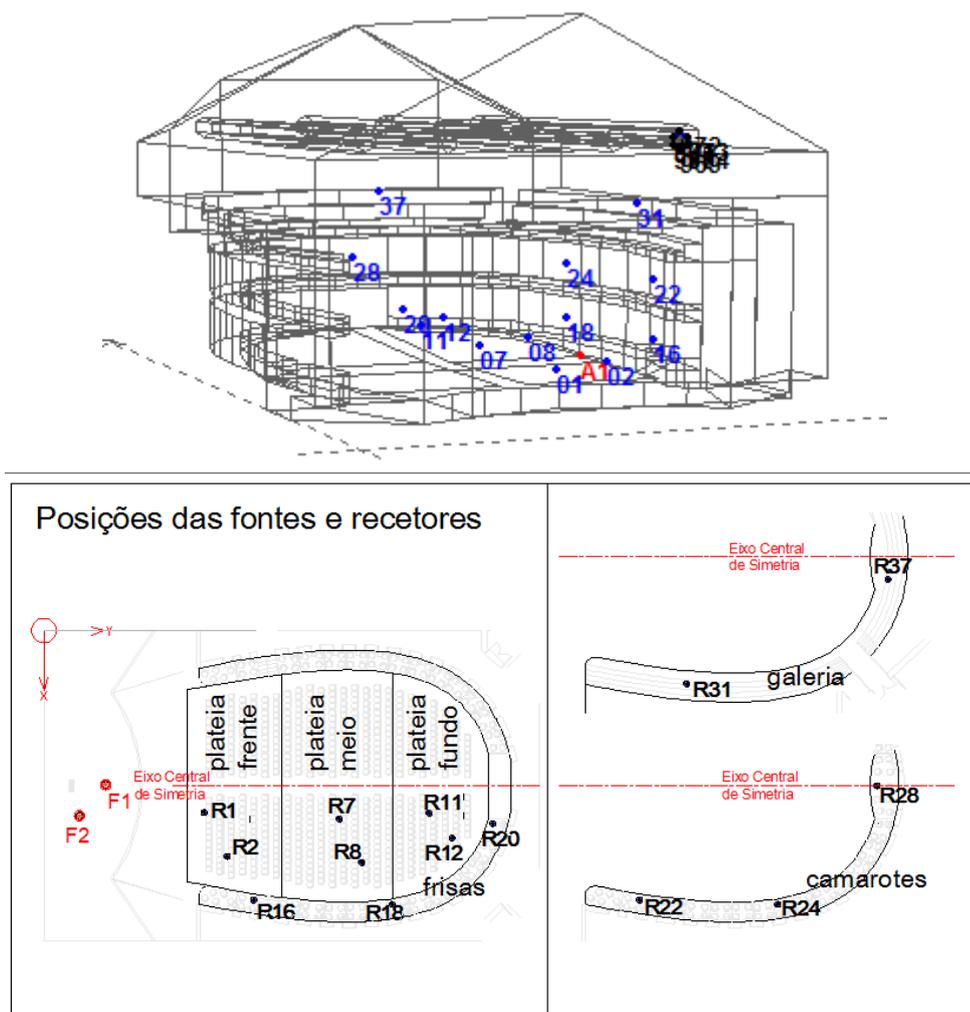


Figura 3.8 – Perspetiva e plantas com as posições das fontes, F1 e F2, e dos 14 recetores considerados no cálculo numérico

4. SITUAÇÃO EXISTENTE E PROPOSTAS DE AJUSTES

4.1 Resultados da análise numérica

Os resultados do cálculo numérico, analisados nas bandas de oitavas de 125 Hz a 4 kHz após a calibração, permitiram obter o diagnóstico da performance acústica do teatro em relação a suas múltiplas funções, com base na avaliação dos parâmetros calculados em relação aos valores apresentados no Quadro 2.2, bem como em informações disponíveis na bibliografia acadêmica.

A primeira avaliação refere-se aos parâmetros relativos à reverberação sonora, registados no Quadro 4.1, em que os valores de média referem-se às bandas de oitavas de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Quadro 4.1 – Tempos de reverberação, calor, brilho e tempo de decaimento inicial da sala

		Bandas de frequência sonora						Média (500 Hz - 2000 Hz)
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
T30 (s)	sala toda	1,71	1,44	1,37	1,47	1,53	1,38	1,46
BR - Bass Ratio	1,11							
Br - Brilho	1,02							
EDT (s)		1,28	1,06	1,17	1,39	1,42	1,17	1,33
EDT / T30		0,75	0,74	0,85	0,95	0,93	0,85	0,91

Mehta, et al (1999), sugerem tempos ótimos de reverberação aos 500 Hz em função do volume do ambiente, conforme registado no gráfico da Figura 2.6 supra. Para a sala em estudo, cujo volume é de 11.260 m³, os valores ótimos de RT500 sugeridos por estes autores são, aproximadamente: 0,95 s para auditórios para fala; 1,40s para ópera; 1,70s para sala música de câmara; e 1,90s para sala de concerto de orquestra. O RT500 da sala na condição atual, de 1,37 segundos, indica-nos ser uma sala ótima para espetáculos de ópera.

Long (2006), apresenta uma síntese das recomendações de vários autores, de tempos de reverberação médios em função do volume da sala, para vários usos, conforme se vê na Figura 4.1, em que o volume da sala em estudo e o RT calculado estão assinalados a vermelho:

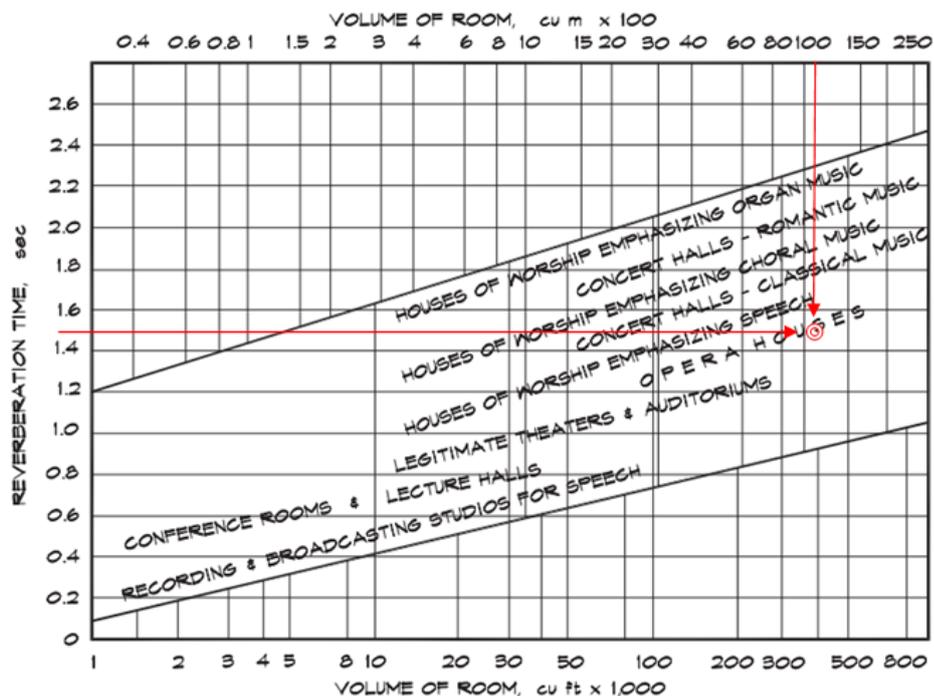


Figura 4.1 – Utilizações de salas em função dos tempos de reverberação e volume, com marcação dos parâmetros referentes à sala em estudo, a vermelho – Adaptado de Long (2006)

Também por este critério, o RT médio para as bandas de oitavas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz, de 1,46 segundos, é classificado como ideal para espetáculos de ópera. Pelo mesmo gráfico, o tempo de reverberação adequado para execução de concertos de orquestra estaria no intervalo entre 1,7 segundos e 2,1 segundos, e para peças de teatro, estaria próximo de 1,3 segundos.

As fórmulas propostas por Higini Arau-Puchades (2008), aplicadas ao volume da sala em estudo, resultam nas seguintes referências para intervalos ótimos de RT médios: entre 0,97s e 1,50s para peças teatrais, entre 1,30s e 1,75s para óperas, entre 1,47s e 1,77s para música de câmara, e entre 1,77s e 2,06s para concertos de orquestra.

Com base nos critérios acima, concluímos que o RT registado é compatível com um auditório multifuncional, a solução de compromisso atinge bom desempenho para teatro e ópera, e há um *gap* em relação à música de concerto.

No que se refere à resposta da sala a baixas frequências, o valor de BR calculado de 1,11 está próximo ao limite inferior, mas dentro da região recomendada no Quadro 2.2 para sala de concertos, entretanto, no mesmo patamar de salas como Kennedy Center em Washington, Ópera de Viena e Ópera de Amsterdão - Jaffe (2005). Para as altas frequências, o brilho $Br = 1,02$ calculado para a sala atende o requisito mínimo de 0,87 recomendado no Quadro 2.2.

Os tempos de decaimento inicial EDT, parâmetro relacionado à sensação subjetiva de vivacidade, fazem-nos concluir que a sala tem uma boa difusão sonora, considerando-se que o tempo de reverberação fica abaixo do ideal para concertos musicais. Em salas com grande absorção, em que a intensidade das ondas sonoras diminui muito rapidamente, é improvável que haja campo difuso perfeito. Na média das bandas de frequências de oitavas entre 500 Hz e 2000 Hz, o quociente $EDT_{\text{médio}}/R_{\text{médio}}$ é de 0,91. Arau-Puchades (2008), classifica como adequados os seguintes intervalos para este quociente: entre 0,6 e 0,75 para teatro, entre 0,75 e 1,0 para ópera, e entre 0,9 e 1,0 para concerto.

A avaliação dos demais parâmetros, analisados por regiões da assistência, permitiu-nos o refinamento do diagnóstico, formando-se um cenário abrangente em que foram identificados os pontos fortes e fracos da sala, no que respeita aos parâmetros acústicos desejáveis.

Os resultados obtidos para o índice de clareza de linguagem C50 na situação existente, por bandas de frequência, bem como ponderados conforme descrito em 2.4.4, mostram diferenças importantes em relação à posição do recetor na assistência, conforme Quadro 4.2 abaixo:

Quadro 4.2 – Clareza de linguagem C50 e C50 ponderado, por frequência, na situação atual da sala

Região da sala	C50						C50(Speech Average) - dB
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
plateia frente	-0,6	0,2	1,7	0,9	0,4	1,2	0,9
plateia meio	-0,4	1,0	-0,2	-2,2	-1,9	-1,4	-1,6
plateia fundo	0,7	2,8	0,4	-0,9	0,0	0,4	0,0
frisas	1,6	2,8	1,8	1,7	1,3	1,7	1,6
camarotes	0,2	2,1	2,2	1,5	1,5	2,1	1,7
galeria	2,0	4,5	2,9	1,5	1,7	2,1	1,9

Observou-se déficit de qualidade da clareza de linguagem na região do meio da plateia. Levando-se em conta que a sala não é reverberante, conclui-se que esta região recebe pouca incidência das primeiras reflexões. Os valores de C50 para as frequências de 500 Hz a 1 k Hz estão dentro do intervalo de conformidade dos homólogos D50 com a norma ISO 3382-1, entretanto os índices C50(Speech Average) não atendem ao critério de valor mínimo de 2 dB constante no Quadro 2.2 para atividades de locução, como teatro. Higini Arau-Puchades (2008), considera genericamente que acima de -1,5 dB os valores de C50 são apropriados. Sob este critério, a única região da sala que não se enquadra é o meio da plateia.

Inversamente, a região central da plateia apresenta melhor desempenho em relação às demais, no que se refere à clareza musical, cujos resultados são apresentados no Quadro 4.3:

Quadro 4.3 – Claridade musical C80 da sala na situação atual

Região da sala	C80						Média
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	(125 Hz - 4 kHz)
plateia frente	1,8	3,3	4,7	3,8	3,5	5,1	3,7
plateia meio	1,0	2,0	1,2	0,1	0,6	2,1	1,2
plateia fundo	4,6	7,4	5,0	2,9	3,4	4,6	4,6
frisas	5,1	7,7	5,6	3,9	3,0	4,5	5,0
camarotes	3,2	4,9	4,9	3,4	3,6	4,9	4,1
galeria	4,5	7,7	5,6	3,8	3,4	4,9	5,0

Todos valores médios para as frequências de 500 Hz a 1000 Hz estão dentro do intervalo da norma ISO 3382-1, cujo máximo é +5 dB. Para alguns autores, a sala não seria adequada a concertos, pois $C80 > 0$ em todas as regiões da sala. As zonas do fundo da plateia, frisas, camarotes e galerias, onde estes índices superam o patamar de 4 dB, podem ser caracterizadas como “mortas” para concertos musicais. Isto se deve ao tempo de reverberação, função da absorção da sala. Entretanto, parece-nos adequado analisar a claridade musical do teatro pelo critério de Higini Arau-Puchades (2008) descrito em 2.4.5. Deste modo, no que se refere à claridade musical, a sala enquadra-se como plenamente adequada para ópera, cujos parâmetros são: $-2 \text{ dB} < C80 < +6 \text{ dB}$, o que apresenta conformidade com a análise de tempo de reverberação feita em 4.1. Para música de concerto, em que o autor estabelece os limites: $-2 \text{ dB} < C80 < +4 \text{ dB}$, encontram-se relativas inadequações nas regiões do fundo da plateia, frisas, camarotes e galerias. Todavia, com a análise mais minuciosa dos resultados obtidos para os pontos de recepção destas regiões, constatou-se que a deficiência de claridade musical das frisas, camarotes e galerias situa-se nas zonas mais próximas do palco e nos fundos da sala, e os valores para a região a média distância encontram-se adequados.

O Quadro 4.4 apresenta os índices de transmissão STI obtidos pelo software e os RASTI calculados pela média dos STI registados nas bandas de oitavas de 500 Hz e 2000 Hz.

Quadro 4.4 – Índices de transmissão da linguagem STI resultados do cálculo numérico por traçado de raios e RASTI, calculados pelas médias de STI para 500 Hz e 2 kHz, por região da assistência

	STI CATT(125Hz- 8 kHz)	500 Hz	2000 Hz	RASTI
plateia frente	58%	61%	57%	59%
plateia meio	56%	58%	53%	56%
plateia fundo	61%	62%	57%	60%
frisas	61%	61%	56%	59%
camarotes	62%	62%	60%	61%
galeria	63%	65%	60%	63%

Em que pese o menor valor na região central da plateia, em todas regiões do teatro os parâmetros STI e RASTI situam-se entre 50% e 64%, intervalo classificado como de inteligibilidade aceitável da palavra sob avaliação subjetiva, conforme visto no quadro 2.1.

Os valores calculados para o fator de força sonora G estão registrados no Quadro 4.5:

Quadro 4.5 – Sonoridade “G” e “Gmed” na condição atual da sala

Região da sala	Sonoridade G -Strenght Factor (dB)						Gmed (500 Hz - 1 kHz)
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
plateia frente	7,0	5,1	6,0	6,7	7,1	7,1	6,35
plateia meio	4,6	3,5	2,8	3,0	4,0	3,7	2,90
plateia fundo	5,8	4,0	3,3	2,6	3,9	3,4	2,95
frisas	4,0	3,5	3,1	4,0	3,9	3,9	3,55
camarotes	3,5	2,9	3,3	4,1	4,6	4,8	3,70
galeria	2,8	2,4	2,9	4,3	5,0	4,7	3,60

Em toda a sala a sonoridade é positiva, o que Arau (2008) classifica como conveniente. Todos valores para as bandas de oitavas de 500 Hz a 1000 Hz estão em conformidade com a norma NBR ISO 3382-1:2017.

A região frontal da plateia apresenta índice G_{med} acima dos limites superiores dos intervalos considerados ideais conforme Quadro 2.2, devido à menor distância em relação à fonte, e às reflexões das superfícies de alvenaria e concreto junto ao palco. As demais regiões apresentam valor menor que 4 dB, mínimo das faixas consideradas adequadas, tanto para peças de teatro quanto para concertos musicais, conforme Quadro 2.2.

Consideramos que este é um *gap* importante de qualidade acústica do caso de estudo. Sem o suporte proporcionado pela sonoridade adequada, a sala deve exigir um esforço adicional dos atores e músicos para que chegue aos ouvintes um nível adequado de pressão sonora.

Os níveis de pressão sonora mostrados no Quadro 4.6 demonstram que há uma boa distribuição do campo sonoro em todas as regiões da assistência, o que é espectral em teatros com geometria similar a ferradura.

Os níveis equivalentes de pressão sonora, calculados pela soma logarítmica dos SPLs para as bandas de oitavas entre 125 Hz e 4000 Hz, com ponderação A, foram denominados neste trabalho de Leq' , e encontram-se na coluna à direita do Quadro 4.6. Constatou-se um diferencial de nível sonoro equivalente entre a região da frente da plateia e a região do fundo da plateia, da ordem de 3 dB.

Quadro 4.6 – Níveis de pressão sonora SPL, e níveis sonoros equivalentes Leq' para o intervalo de bandas de oitavas de 125 Hz a 4 kHz, com ponderação A, por regiões da sala, em sua atual condição

Região da sala	Nível de pressão sonora SPL (dB)						Leq' (*) - dB(A)
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Média logarítmica
plateia frente	86,9	85,6	86,2	86,5	87,1	87,2	93,1
plateia meio	84,4	83,6	82,8	83,2	83,8	83,8	89,8
plateia fundo	85,7	84,5	83,3	82,7	83,8	83,6	89,7
frisas	84,8	83,1	83,3	83,9	83,8	83,7	89,9
camarotes	83,5	82,7	83,2	84,1	84,7	84,4	90,5
galeria	82,6	82,3	83,1	84,3	84,7	84,2	90,4

(*) Leq' = média logarítmica dos SPL para as bandas de oitavas entre 125 Hz e 4 kHz, com ponderação A

A eficiência lateral LF da sala cumpre com a especificação da NBR ISO 3382-1:2017, uma vez que em todas as regiões da sala este parâmetro situa-se entre os limites de 5% e 35%, conforme se pode ver no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – LF - eficiência lateral, na condição atual da sala

Região da sala	LF – Lateral Energy Fraction (%)						Média (%)
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	(125 Hz - 1 kHz)
plateia frente	15	17	15	20	19	23	17
plateia meio	21	20	27	32	21	25	25
plateia fundo	32	32	35	35	27	33	34
frisas	40	37	37	32	32	30	37
camarotes	27	25	27	23	23	24	26
galeria	20	14	20	23	22	24	19

Pela recomendação de Carrion (1998), a eficiência lateral deve ser maior ou igual a 19%, o que ocorre em quase todas as regiões da sala, exceto na região da frente da plateia, onde há poucos planos laterais com dispersão.

A análise dos parâmetros de reverberação permitiu-nos concluir que se trata de uma sala que apresenta bom desempenho para teatro e ópera, entretanto existe uma lacuna de desempenho ideal para a música de concerto. Os índices de clareza de linguagem ficam abaixo dos ideais, sobretudo na região do meio da plateia, onde se situa abaixo do parâmetro mínimo sob o critério menos rigoroso. Os índices de transmissão de linguagem resultaram aceitáveis, com pequeno *gap* na região central da plateia. Além disto, a clareza musical é adequada à ópera, mas não ideal para música de concerto, na região dos fundos da plateia, frisas, camarotes e galeria. A sonoridade média situa-se em nível abaixo do desejado, sobretudo no meio e nos fundos da plateia onde a influência da absorção devida às poltronas é maior. Todavia, o

espaço apresenta relativa uniformidade dos níveis sonoros para as várias zonas da assistência, bem como eficiência lateral satisfatória, à exceção da zona frontal da plateia.

4.2 Estudo de soluções para melhoria do desempenho

Tendo como base estas constatações, foram elaborados estudos de possíveis soluções para melhorar os parâmetros com lacuna de desempenho em determinadas regiões do auditório. Inicialmente, verificamos que a sala apresenta fortes limitações no que se refere à possibilidade de aplicação de dispositivos refletores para aumento do tempo de reverberação, utilizando o conceito de acústica variável, posto que as grandes superfícies de absorção são as poltronas na plateia, e o teto em tábuas espaçadas com 18% de abertura, onde a montagem de dispositivos é muito prejudicada, devido às condutas de ar condicionado e exaustão, como pode-se ver na fotografia da Figura 4.2.



Figura 4.2 – Fotografia da sala de uso múltiplo

O estudo para melhoria acústica tratou de soluções não intrusivas, buscando a melhoria dos demais parâmetros acústicos.

4.2.1 Solução 1: painéis refletorres afixados nas treliças dos holofotes

O estudo desta solução teve como objetivo aumentar as primeiras reflexões na frente e no meio da plateia, esperando-se com isto a melhoria nos parâmetros C50 e C80, bem como o aumento da sonoridade G, sobretudo no meio da sala.

Trata-se da instalação de dois painéis, cujo esquema é mostrado na Figura 4.3, executados com material leve, e com revestimento refletivo. Devem ser fabricados de acordo com projeto geométrico e afixados no banzo inferior das treliças metálicas existentes, onde estão fixados os holofotes que iluminam o palco.

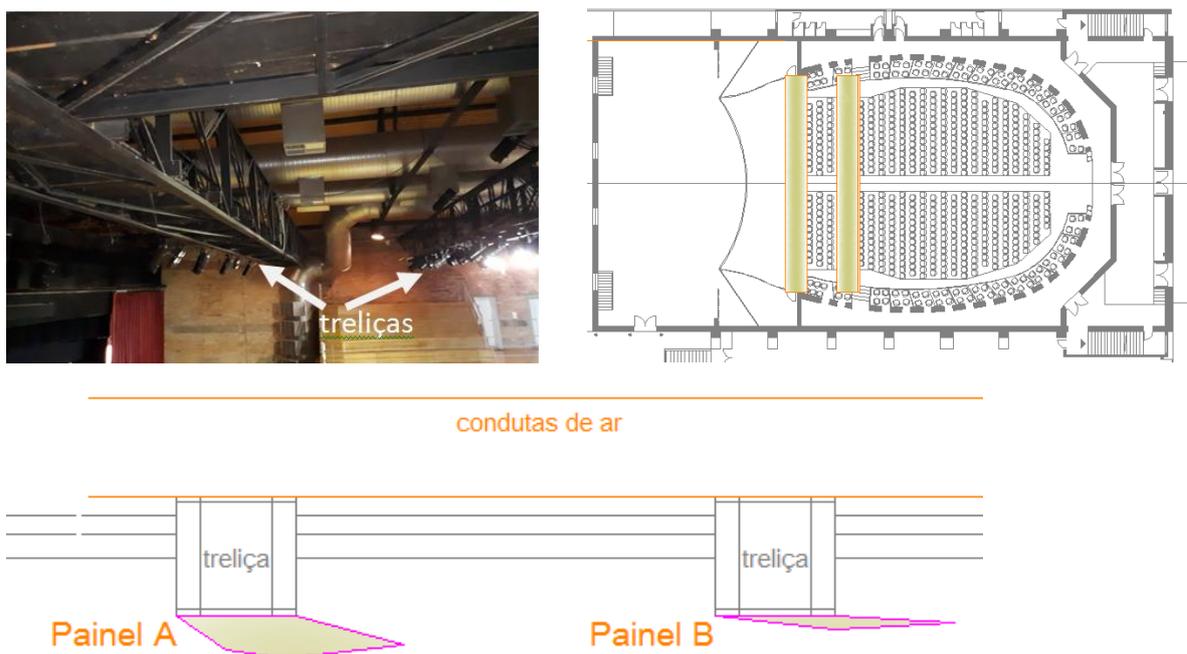


Figura 4.3 – fotografia das treliças e esquema geométrico dos painéis a serem fixados

Os painéis horizontais denominados A e B, de seções transversais semelhantes às de asas de avião, a atravessar a sala no sentido transversal, podem ser fabricados com estrutura interna de alumínio, e revestidos com chapas de alumínio composto ACM, espessura de 4mm, cortadas e dobradas ou curvadas conforme projeto. As formas propostas para os painéis foram estudadas com o objetivo de permitirem uma primeira reflexão de parte do som originado no palco, antes de chegarem ao teto, direcionando para pontos específicos da plateia, o que se pode ver na Figura 4.4.

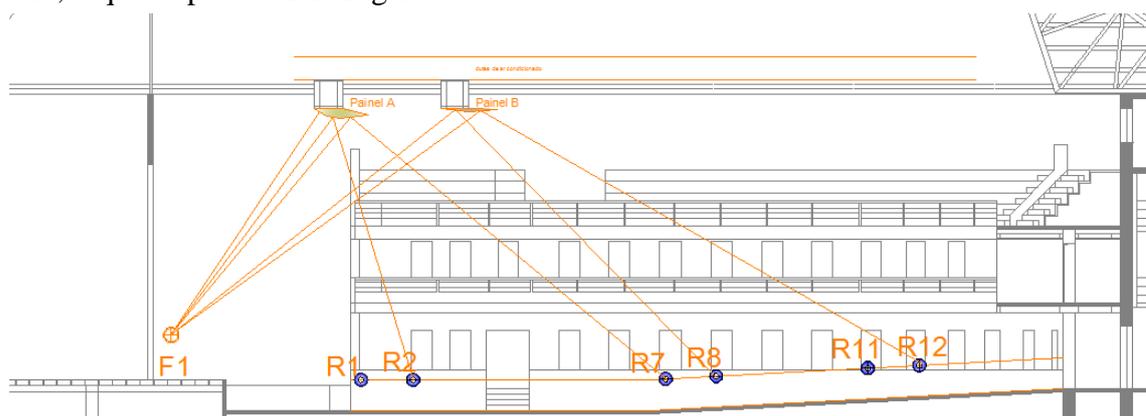


Figura 4.4 – geometria da reflexão do som pelos painéis A e B

Os resultados para o cálculo numérico, em que se utilizou a mesma metodologia descrita no item 3.4.2. são mostrados no Quadro 4.8, ao lado dos parâmetros referentes à situação atual.

Quadro 4.8 – parâmetros acústicos obtidos na Solução 1 e na situação atual da sala

Solução 1: painéis A e B		Bandas de frequência sonora						Solução 1	Média 500 Hz - 2 kHz	Situação Atual
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz			
TR 30 (s)	sala toda	1,59	1,41	1,31	1,47	1,63	1,39	1,47		1,46
BR - Bass Ratio	1,08	<- sala toda								1,11
Br - Brilho	1,09	<- sala toda								1,02
EDT (s)	sala toda	1,24	0,99	1,04	1,34	1,39	1,13	1,26		1,33
	Região da sala	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Solução 1		Situação Atual
C50 (dB)	plateia frente	0,0	0,0	1,8	2,3	1,6	2,0	1,9	C50 (Speech Average)	0,9
	plateia meio	0,1	0,7	0,5	-0,9	-1,0	0,0	-0,5		-1,6
	plateia fundo	0,0	0,3	1,2	0,7	0,3	1,0	0,7		0,0
	frisas	1,2	3,0	2,1	1,5	1,1	1,6	1,5		1,6
	camarotes	0,4	2,2	2,0	2,5	2,0	2,7	2,3		1,7
	galeria	2,7	5,2	4,1	2,5	2,7	3,0	2,9		1,9
C80 (dB)	plateia frente	2,4	2,9	5,2	3,6	3,5	5,8	3,9	C80 (Média 125 - 4 kHz)	3,7
	plateia meio	1,9	2,0	2,5	0,8	1,7	2,2	1,8		1,2
	plateia fundo	4,8	6,5	5,5	2,4	2,6	4,2	4,3		4,6
	frisas	4,6	6,8	5,3	4,2	3,9	4,9	4,9		5,0
	camarotes	3,1	4,9	4,3	3,9	3,9	5,1	4,2		4,1
	galeria	5,1	8,4	7,4	4,9	4,3	4,8	5,8		5,0
STI (%)		STI (125Hz a 8 kHz)		500 Hz		2000 Hz	RASTI			
	plateia frente	60%		62%		57%	60%	60%	STI CATT (125 - 8 kHz)	58%
	plateia meio	58%		60%		55%	58%	58%		56%
	plateia fundo	59%		62%		55%	59%	59%		61%
	frisas	61%		62%		58%	60%	61%		61%
	camarotes	63%		63%		60%	62%	63%		62%
galeria	64%		66%		60%	63%	64%	63%		
G (dB)	plateia frente	6,9	5,5	6,2	6,3	6,9	7,2	6,24	Gmed = média G 500Hz e 1 kHz	6,35
	plateia meio	4,8	3,9	3,4	3,0	4,3	3,8	3,16		2,90
	plateia fundo	5,7	4,4	3,4	2,8	3,6	3,7	3,06		2,95
	frisas	4,6	3,2	3,1	3,2	3,7	4,0	3,13		3,55
	camarotes	3,6	3,1	3,4	3,9	4,5	4,7	3,65		3,70
	galeria	3,1	3,1	3,2	4,5	5,3	4,7	3,83		3,60
SPL (dB)	plateia frente	86,9	85,1	86,3	86,2	86,8	86,6	92,7	Leq' média logarítmica pond. A dB(A)	93,1
	plateia meio	85,1	83,9	83,2	83,5	84,2	83,6	90,0		89,8
	plateia fundo	85,4	84,4	83,1	82,8	83,5	83,4	89,5		89,7
	frisas	84,6	83,6	82,8	83,4	83,6	83,5	89,7		89,9
	camarotes	84,0	83,0	83,2	83,9	84,3	84,3	90,3		90,5
	galeria	83,3	83,2	83,4	84,3	85	84,6	90,7		90,4
LF (%)	plateia frente	15	18	16	17	23	22	16	Média das bandas entre 125 Hz e 1000 Hz	17
	plateia meio	19	17	20	25	19	23	20		25
	plateia fundo	32	31	34	39	27	33	34		34
	frisas	41	39	40	37	35	32	40		37
	camarotes	26	24	24	22	22	23	24		26
	galeria	17	12	16	18	20	20	16		19

Observa-se que a Solução 1 proposta implicou em relativa melhoria do índice de clareza da linguagem ponderado, com diminuição da lacuna de desempenho no meio da plateia, onde C50 ponderado chegou a -0,5 dB, ante -1,6 dB na situação existente, aproximando-se da zona

ideal, cujo valor mínimo é 0 dB. Este índice é particularmente importante nas atividades de teatro, para as quais o valor mínimo recomendado de C50 é de 2 dB. Sob este aspeto, observou-se considerável melhoria, sobretudo na região da frente da plateia, nos camarotes e na galeria. No que se refere ao índice de claridade musical, para apresentações de concertos musicais, sob o critério de Higini Arau-Puchades, houve pequena melhoria no fundo da plateia e nas frisas. A sonoridade média para 500 Hz e 1000 Hz, apresentou pequeno aumento no meio e nos fundos da plateia, bem como nas galerias, aproximando-se do mínimo desejável de 4 dB. Apesar de não serem aqui apresentados resultados, o aumento de área dos painéis refletores desta Solução 1, poderá contribuir para uma melhoria mais acentuada dos principais parâmetros apresentados.

4.2.2 Solução 2: difusores QRD nos peitoris dos camarotes da região frontal

Os difusores QRD, ou *quadratic-residue diffusers* são painéis Schroeder compostos por diversos poços quadrados ou retangulares, de diferentes profundidades em determinada ordem, que resultam em altas difusões do som em uma gama de frequências, a partir de 350 Hz. Para efeito deste estudo, considerou-se a instalação de painéis difusores QRD734 da empresa RPG, cujos coeficientes de absorção e espalhamento são mostrados no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 – Coeficientes de absorção e espalhamento de ondas do difusor QRD734 da RPG

QRD® 734	Bandas de oitavas de frequências					
	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente de Absorção (%)	23	24	35	23	20	20
Coeficiente de Espalhamento (%)	15	21	41	79	84	71

Considerou-se a aplicação dos painéis nos primeiros 12 metros lineares dos peitoris dos camarotes, nas faces voltadas à plateia, sendo 20 painéis de cada lado, cada painel com dimensão de 60 x 60 x 23 cm³, conforme se vê na Figura 4.5. Estes difusores encobrem, neste troço, a área antes revestida por tábuas espaçadas com 11% de área vazada.

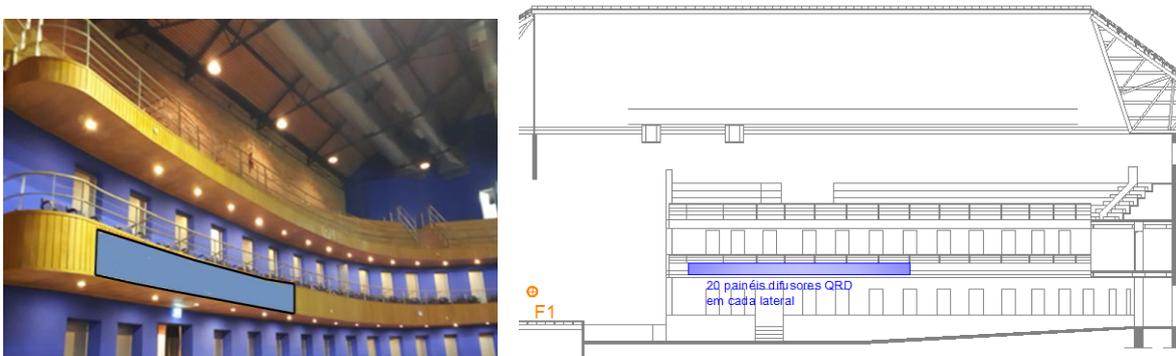


Figura 4.5 – Posição dos painéis difusores afixados nos peitoris dos camarotes

Para maior espalhamento das ondas, os painéis difusores devem ser instalados alternadamente em desfase de 90° conforme mostra a fotografia da Figura 4.6, que apresenta também seu posicionamento em planta, com possíveis direções de dispersão das ondas sonoras.

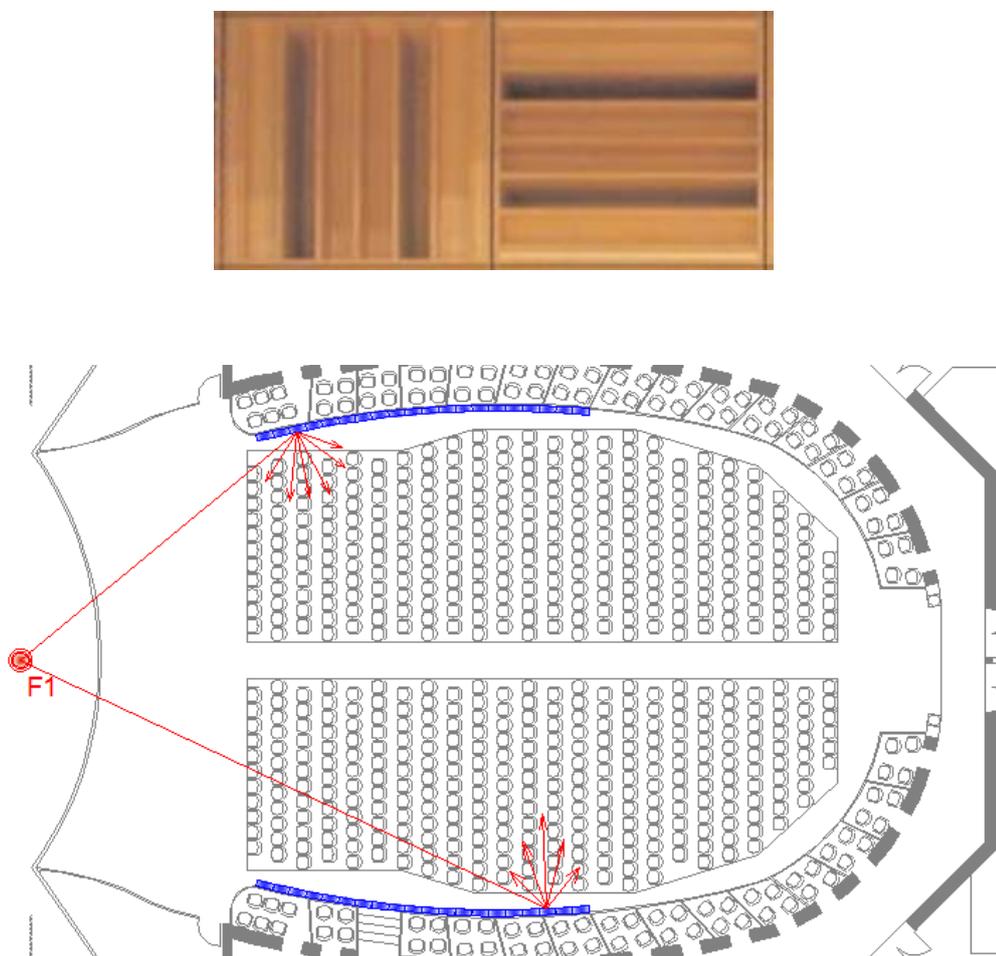


Figura 4.6 – Fotografia e posições de aplicação do difusor quadrático, cuja ficha técnica com dados acústicos de absorção e dispersão pode ser obtida pelo endereço:

[//www.rpgacoustic.com/documents/2016/09/qrd-734_acoustical-data_rpga.pdf/](http://www.rpgacoustic.com/documents/2016/09/qrd-734_acoustical-data_rpga.pdf/)

O objetivo do estudo desta solução foi aumentar a dispersão dos raios sonoros nas zonas da frente e central da plateia, com espalhamentos polares em muitas direções, bem como aumentar o número de primeiras reflexões nestas regiões, a melhorar a eficiência lateral LF, bem como os parâmetros C50 e C80.

Os resultados do cálculo numérico para a Solução 2 estudada são apresentados no Quadro 4.10, juntamente com os parâmetros atualmente existentes na sala, para comparação.

Quadro 4.10 – parâmetros acústicos obtidos na Solução 2 e no estado atual da sala

Solução 2: difusores QRD		Bandas de frequência sonora						Solução 2	Média 500 Hz - 2 kHz	Situação Atual
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz			
TR 30 (s)	sala toda	1,59	1,47	1,39	1,54	1,57	1,36	1,50		1,46
BR - Bass Ratio	1,04	<- sala toda								1,11
Br - Brilho	1,00	<- sala toda								1,02
EDT (s)	sala toda	1,31	0,96	1,04	1,33	1,36	1,16	1,24		1,33
	Região da sala	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Solução 2		Situação Atual
C50 (dB)	plateia frente	-0,5	0,4	1,6	0,8	1,0	1,2	1,1	C50 (Speech Average)	0,9
	plateia meio	-0,2	0,4	-0,2	-1,9	-0,8	-0,5	-0,9		-1,6
	plateia fundo	0,7	2,5	1,0	-1,2	-0,1	0,2	-0,1		0,0
	frisas	1,5	3,1	2,3	1,2	0,8	2,4	1,5		1,6
	camarotes	0,4	1,7	1,4	1,4	0,6	2,7	1,4		1,7
	galeria	1,1	3,9	3,0	1,9	1,7	2,1	2,0		1,9
C80 (dB)	plateia frente	2,1	3,7	4,6	3,4	3,6	4,8	3,7	C80 (Média 125 - 4 kHz)	3,7
	plateia meio	1,5	2,3	1,2	0,4	1,2	2,0	1,4		1,2
	plateia fundo	5,1	7,5	5,5	2,2	3,3	3,7	4,6		4,6
	frisas	4,9	6,5	5,7	3,5	3,0	5,3	4,8		5,0
	camarotes	3,0	5,0	3,9	3,3	2,7	4,6	3,8		4,1
	galeria	3,9	7,3	6,1	4,1	4,1	4,5	5,0		5,0
STI (%)		STI (125Hz a 8 kHz)		500 Hz		2000 Hz	RASTI			
	plateia frente	58%		60%		56%	58%	58%	STI CATT (125 - 8 kHz)	58%
	plateia meio	56%		57%		53%	55%	56%		56%
	plateia fundo	61%		63%		57%	60%	61%		61%
	frisas	61%		63%		57%	60%	61%		61%
	camarotes	61%		60%		57%	59%	61%		62%
galeria	62%		65%		59%	62%	62%	63%		
G (dB)	plateia frente	7,1	5,5	6,5	6,5	7,1	7,4	6,46	Gmed = média G 500Hz e 1 kHz	6,35
	plateia meio	4,4	3,5	3,2	3,3	4,2	3,7	3,24		2,90
	plateia fundo	5,5	4,3	3,2	3,0	3,9	4,0	3,08		2,95
	frisas	4,2	3,4	2,8	3,8	4,1	3,8	3,28		3,55
	camarotes	3,4	2,9	3,2	3,7	4,5	4,5	3,44		3,70
	galeria	2,6	2,6	2,9	4,2	4,8	4,6	3,54		3,60
SPL (dB)	plateia frente	87,2	85,5	86,5	86,4	87,0	87,1	93,0	Leq' média logarítmica pond. A dB(A)	93,1
	plateia meio	84,5	83,5	83,2	83,2	84,1	83,4	89,8		89,8
	plateia fundo	85,7	84,3	83,2	82,9	83,8	83,6	89,7		89,7
	frisas	84,3	83,3	82,8	83,8	84,0	83,6	89,9		89,9
	camarotes	83,5	82,9	83,2	83,6	84,4	84,2	90,2		90,5
	galeria	82,7	82,6	82,9	84,2	84,7	84,3	90,4		90,4
LF (%)	plateia frente	16	21	15	19	22	24	18	Média das bandas entre 125 Hz e 1000 Hz	17
	plateia meio	21	22	27	27	24	24	24		25
	plateia fundo	29	30	37	39	31	34	34		34
	frisas	40	40	38	33	32	28	38		37
	camarotes	27	27	27	23	23	23	26		26

Os efeitos positivos devidos à Solução 2 são de pequena monta. O aumento da eficiência lateral na região da frente da plateia de 17% da situação existente para 18% com a solução proposta é pouco significativo. Entretanto, de 37% para 38% nas frisas, faz este parâmetro

afastar-se mais do limite superior da norma ISO 3382-1, que é de 35%. Houve uma pequena melhoria na clareza da linguagem, nas regiões da frente e do meio plateia e nas galerias, contudo pequenas perdas nas outras regiões.

4.2.3 Solução 3: canópia no palco

Esta solução foi estudada com o objetivo de projetar o som de maneira mais homogênea para a plateia, a fim de aumentar a sonoridade na região central e nos fundos. Além disto, pretendeu-se melhorar a qualidade acústica no palco para os músicos. Este parâmetro subjetivo tem sido objeto de reclamações dos membros da orquestra. Espera-se, também, algum incremento no tempo de reverberação T30 devido à diminuição da absorção da caixa cênica.

Concebeu-se uma concha de orquestra no palco, com dimensões e materiais que permitem a desmontabilidade, condição necessária em espaços de uso múltiplo. O material liso proposto são placas cimentícias de CRFS (Cimento Reforçado com Fio Sintético) com 8 mm de espessura. Este painel tem densidade superficial de 13,6 kgf/m², o que possibilita reflexão do som em todas as bandas, inclusive nas baixas frequências, uma vez que, enrijecidas pela estrutura de apoio, não vibram como membranas.

O perfil que pode ser visto na Figura 4.7, é um modelo de estudo. Para adoção desta solução na prática, deverá ser executada com estrutura de aço treliçado para suporte e fixação das chapas, ter rodízios para locomoção e contrapesos para evitar-se o tombamento.

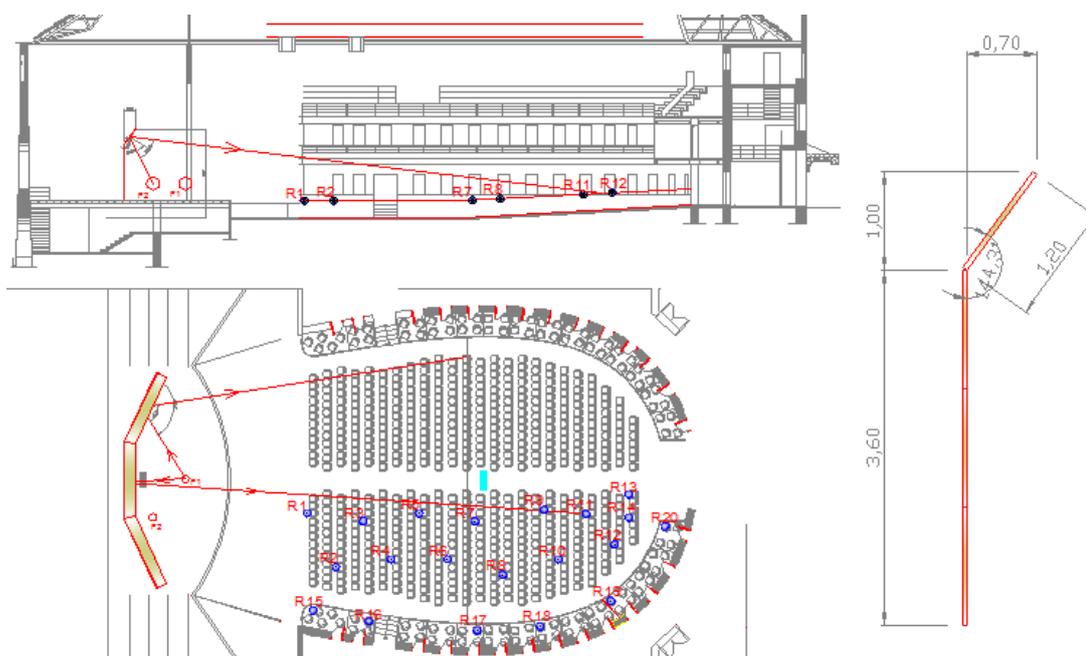


Figura 4.7 – Planta e corte com possíveis reflexões, e pormenor do perfil da canópia

Apresenta-se no Quadro 4.11 o resultado do cálculo numérico da modelação da solução estudada, ao lado dos parâmetros da situação atual da sala.

Quadro 4.11 – parâmetros acústicos obtidos na Solução 3 e no estado atual da sala

Solução 3: canópia		Bandas de frequência sonora						Solução 3	Média 500 Hz - 2 kHz	Situação Atual
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz			
TR 30 (s)	sala toda	1,63	1,31	1,40	1,62	1,68	1,47	1,57		1,46
BR - Bass Ratio	0,97	<- sala toda								1,11
Br - Brilho	1,04	<- sala toda								1,02
EDT (s)	sala toda	1,18	0,97	1,15	1,43	1,50	1,20	1,36		1,33
	Região da sala	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Solução 3		Situação Atual
C50 (dB)	plateia frente	1,5	0,8	2,4	1,3	1,2	1,9	1,6	C50 (Speech Average)	0,9
	plateia meio	1,3	1,9	-0,8	-1,6	-1,5	-1,2	-1,3		-1,6
	plateia fundo	0,8	1,3	0,0	-2,2	-1,7	-0,7	-1,3		0,0
	frisas	2,4	3,1	1,7	1,5	0,8	1,3	1,2		1,6
	camarotes	1,8	3,6	2,3	1,4	1,8	2,3	1,9		1,7
	galeria	1,3	3,9	1,8	0,6	-0,3	1,4	0,7		1,9
C80 (dB)	plateia frente	2,9	2,9	4,4	3,2	3,2	4,5	3,5	C80 (Média 125 - 4 kHz)	3,7
	plateia meio	2,0	2,5	0,4	0,0	-0,1	0,6	0,9		1,2
	plateia fundo	6,7	7,8	6,5	3,0	3,1	4,1	5,2		4,6
	frisas	5,2	7,2	5,0	4,0	3,5	3,7	4,8		5,0
	camarotes	3,7	5,4	4,4	3,0	3,4	4,5	4,1		4,1
	galeria	4,9	6,9	5,1	3,4	2,9	4,4	4,6		5,0
STI (%)		STI (125Hz a 8 kHz)		500 Hz		2000 Hz	RASTI		STI CATT (125 - 8 kHz)	
	plateia frente	58%		60%		55%	58%	58%		58%
	plateia meio	54%		54%		51%	53%	54%		56%
	plateia fundo	58%		61%		53%	57%	58%		61%
	frisas	60%		61%		56%	59%	60%		61%
	camarotes	61%		62%		58%	60%	61%		62%
G (dB)	plateia frente	7,9	6,4	7,8	8,0	8,5	8,5	7,88	Gmed = média G 500Hz e 1 kHz	6,35
	plateia meio	5,4	5,0	4,1	5,3	5,9	5,6	4,69		2,90
	plateia fundo	6,5	5,7	5,0	5,3	5,7	5,4	5,12		2,95
	frisas	4,7	4,3	5,0	5,7	5,6	5,6	5,36		3,55
	camarotes	4,2	3,8	4,9	6,0	6,4	6,3	5,48		3,70
	galeria	3,5	3,4	4,5	6,5	6,9	6,3	5,50		3,60
SPL (dB)	plateia frente	87,2	86,4	87,8	87,9	88,4	88,2	94,3	Leq' média logarítmica pond. A dB(A)	93,1
	plateia meio	85,5	85	84,1	85,3	85,8	85,3	91,5		89,8
	plateia fundo	86,6	85,7	84,9	85,2	85,6	85,1	91,5		89,7
	frisas	84,8	84,3	85	85,6	85,5	85,3	91,6		89,9
	camarotes	84,4	83,8	84,9	86	86,1	85,9	92,0		90,5
	galeria	83,6	83,4	84,5	86,4	86,8	85,9	92,3		90,4
LF (%)	plateia frente	15	18	16	17	21	22	16	Média das bandas entre 125 Hz e 1000 Hz	17
	plateia meio	13	14	20	21	16	20	17		25
	plateia fundo	32	34	38	37	37	37	35		34
	frisas	36	36	34	34	27	30	35		37
	camarotes	23	24	26	25	25	24	25		26
	galeria	15	13	17	20	21	22	16		19

O cálculo numérico indicou que houve importante aumento no desempenho da sonoridade G_{med} . Na região frontal da plateia esta solução afasta ainda mais este parâmetro da faixa recomendável pelo Quadro 2.2, entretanto continua a atender à especificação da norma ISO 2882-1 cujo limite superior é 10 dB. Outrossim, houve ganhos significativos de G_{med} nas demais regiões: cerca de 2,2 dB na região dos fundos da plateia e de 1,8 dB nas regiões de meio e fundo da plateia, frisas, camarotes e galerias, levando o parâmetro à faixa ideal da Tabela 2.2, cujo limite inferior é de 4 dB.

O nível equivalente de pressão sonora para as bandas estudadas, também teve melhoria sensível em todas as regiões da sala, com variação positiva média de 1,7 dB(A). Observou-se também uma pequena diminuição, da ordem de 0,6 dB(A), no diferencial de nível equivalente de pressão sonora entre as regiões da frente e dos fundos da plateia, relativamente à situação atual.

Houve um pequeno aumento no RT, da ordem de 0,1 dB.

Não se observam melhorias na clareza da linguagem e clareza musical. A componente dos graves da sala, BR, teve desempenho inferior à situação atual, e a eficiência lateral teve baixo desempenho nas regiões da frente e meio da plateia bem como nas galerias.

4.2.4 Solução 4: painéis refletores sobre parte da plateia

O estudo desta solução teve como objetivo buscar, por meio de dispositivos de acústica variável, o aumento do nível de pressão sonora e da sonoridade no fundo da plateia.

Trata-se da aplicação de um conjunto de painéis basculantes, denominados de painéis C, que quando posicionados na horizontal, formam um plano sob o teto nas regiões projetadas sobre o meio e os fundos da plateia, conforme ilustrado na Figura 4.8. Devem ser feitos com material leve, possuir certa rigidez, e serem lisos, com a finalidade de refletir o campo sonoro para a plateia nas primeiras reflexões, antes que atinja o teto de tábuas espaçadas.

Como pode-se ver na Figura 4.2, há duas limitações de espaço para posicionamento destes painéis. A primeira delas é a interferência das tesouras metálicas da estrutura de cobertura, e das condutas de ar condicionado.

No estudo, o plano horizontal dos painéis foi posicionado sustentando-se sob os banzos inferiores das tesouras metálicas, e alguns painéis são recortados para encaixe das grelhas das caixas plenum de entrada e saída de ar das condutas. A segunda razão é a posição das treliças que suportam os holofotes de iluminação do palco, o que faz com que esta solução possa ser adotada somente a partir da região do meio para os fundos da plateia.

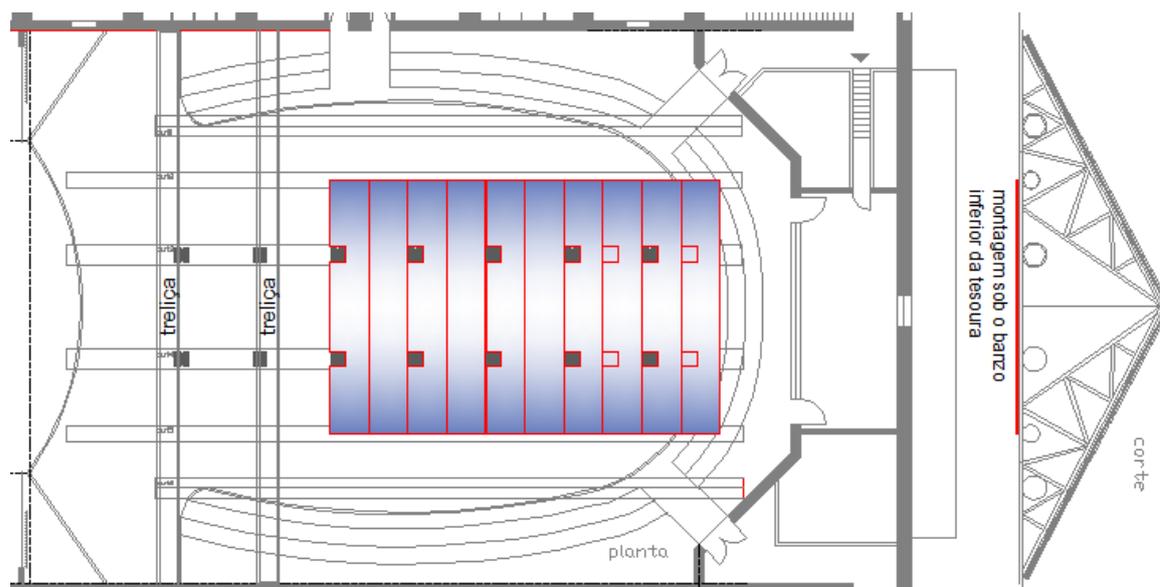


Figura 4.8 – Esquema da posição dos painéis fechados na horizontal, vista inferior e em corte

Quando os painéis basculantes estão na posição vertical, como se mostra no pormenor superior da Figura 4.9, consideramos que o comportamento do campo sonoro seja semelhante ao da sala em seu estado atual.

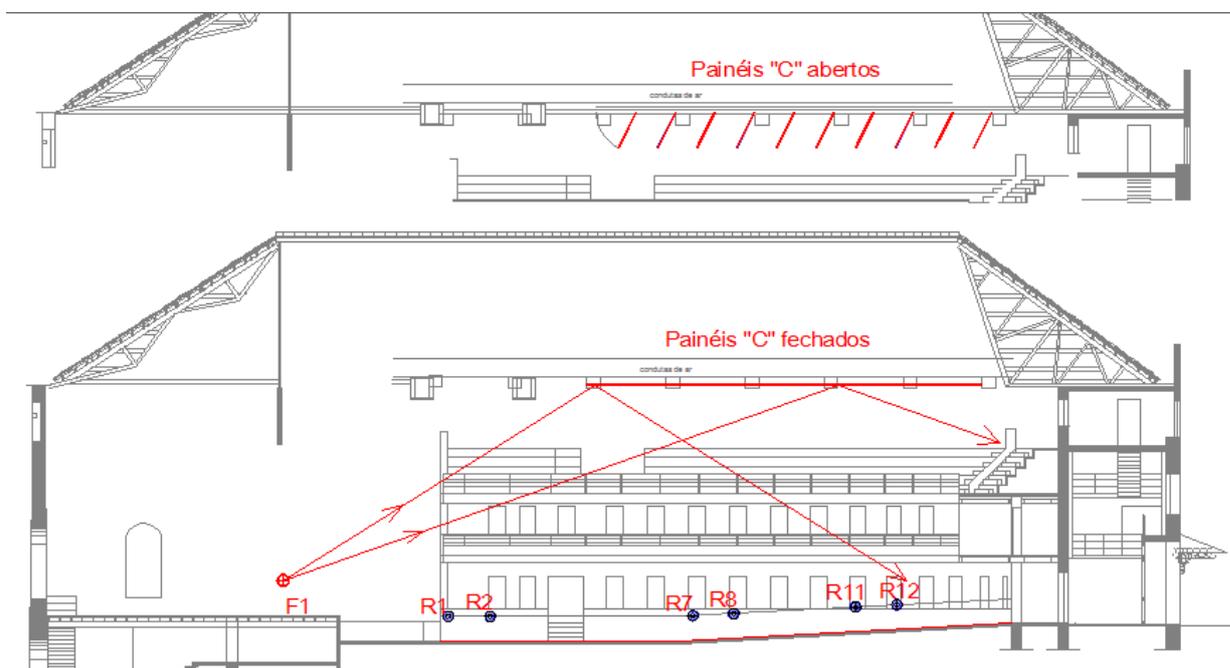


Figura 4.9 – Esquema dos painéis basculantes, nas posições de abertos e fechados

Os resultados do cálculo numérico referentes a esta solução, registados no Quadro 4.12, não confirmaram o aumento esperado do nível equivalente de pressão sonora.

Quadro 4.12 – parâmetros acústicos obtidos na Solução 4 e no estado atual da sala

Solução 4: painéis C		Bandas de frequência sonora						Solução 4	Média 500 Hz - 2 kHz	Situação Atual			
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz						
TR 30 (s)	sala toda	1,61	1,3	1,37	1,49	1,6	1,36	1,49		1,46			
BR - Bass Ratio	1,02	<- sala toda								1,11			
Br - Brilho	1,03	<- sala toda								1,02			
EDT (s)	sala toda	1,41	0,98	1,09	1,32	1,34	1,12	1,25		1,33			
Região da sala		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Solução 4		Situação Atual			
C50 (dB)	plateia frente	-0,2	-0,1	1,6	0,6	0,6	1,2	0,9	C50 (Speech Average)	0,9			
	plateia meio	-1,0	0,6	0,4	-2,5	-1,4	-1,0	-1,3		-1,6			
	plateia fundo	0,6	2,5	1,3	0,8	0,8	1,8	1,1		0,0			
	frisas	1,2	3,4	2,2	2,5	1,7	2,5	2,2		1,6			
	camarotes	-0,7	2,3	1,6	1,5	1,9	2,8	2,0		1,7			
	galeria	1,3	4,0	3,0	1,4	1,9	2,7	2,1		1,9			
C80 (dB)	plateia frente	2,2	3,1	4,3	3,3	3,2	4,7	3,5	C80 (Média 125 - 4 kHz)	3,7			
	plateia meio	0,5	2,6	2,3	-0,6	0,4	1,8	1,2		1,2			
	plateia fundo	4,7	7,3	6,4	3,8	3,7	4,9	5,1		4,6			
	frisas	5,0	8,0	5,2	5,0	4,2	4,8	5,4		5,0			
	camarotes	2,5	4,9	4,3	3,7	4,1	5,2	4,1		4,1			
	galeria	3,6	6,5	5,3	3,9	3,9	5,2	4,7		5,0			
STI (%)	STI (125Hz a 8 kHz)		500 Hz		2000 Hz		RASTI		STI CATT (125 - 8 kHz)				
	plateia frente	57%		60%		55%		58%			57%	58%	
	plateia meio	56%		59%		53%		56%			56%	56%	
	plateia fundo	62%		63%		59%		61%			62%	61%	
	frisas	62%		61%		59%		60%			62%	61%	
	camarotes	62%		61%		60%		61%			62%	62%	
galeria	63%		65%		60%		63%		63%	63%			
G (dB)	plateia frente	6,9	5,4	6,6	6,5	7,2	7,4	6,58	Gmed = média G 500Hz e 1 kHz	6,35			
	plateia meio	4,7	3,6	2,9	3,1	4,1	3,6	3,01		2,90			
	plateia fundo	5,9	4,9	3,8	3,4	4,4	4,1	3,58		2,95			
	frisas	4,8	4,0	3,7	4,1	4,3	4,1	3,90		3,55			
	camarotes	3,9	3,2	3,3	3,9	4,5	4,5	3,64		3,70			
	galeria	2,4	2,3	3,3	4,3	4,7	4,4	3,79		3,60			
SPL (dB)	plateia frente	87,1	85,4	86,6	86,5	87,1	87	93,0	Leq' média logarítmica pond. A dB(A)	93,1			
	plateia meio	84,8	83,6	82,9	83,1	84	83,3	89,7		89,8			
	plateia fundo	86,0	84,9	83,7	83,4	84,3	83,8	90,1		89,7			
	frisas	84,9	84,0	83,5	84,0	84,2	83,7	90,1		89,9			
	camarotes	84,0	83,2	83,3	83,9	84,4	84,2	90,3		90,5			
	galeria	82,6	82,3	83,2	84,3	84,6	84,1	90,4		90,4			
LF (%)	plateia frente	14	19	17	19	22	23	17	Média das bandas entre 125 Hz e 1000 Hz	17			
	plateia meio	19	23	26	28	23	24	24		25			
	plateia fundo	33	29	34	40	29	32	34		34			
	frisas	38	34	33	30	30	28	34		37			
	camarotes	27	25	25	21	23	24	25		26			
	galeria	27	25	25	21	23	24	25		26			

A sonoridade média Gmed, para as oitavas de 500 Hz e 1000 Hz, apresentou resultado positivo digno de menção somente no fundo da plateia, da ordem de 0,6 dB. A variação positiva de 0,03 s no tempo de reverberação pode ser considerada desprezável.

4.3 Análise de eficácia e custo das soluções propostas

O objetivo das soluções estudadas é de mitigar as lacunas de desempenho acústico em determinadas zonas do auditório, no que se refere a determinados parâmetros objetivos. No sentido de se obterem resultados práticos, a análise deve ter foco na comparação do desempenho acústico dos parâmetros estudados, em função das várias soluções propostas. As quatro soluções propostas foram analisadas com enfoque nos parâmetros objetivos, sob os critérios de eficácia na mitigação de pontos fracos. A estimativa de custos teve o objetivo nortear estudos futuros para implementação das soluções analisadas.

4.3.1 Eficácia na mitigação das lacunas de desempenho

As interferências das soluções estudadas no campo sonoro causaram variação nos tempos de reverberação RT30 encontrados nos cálculos numéricos, relativamente à situação atual. Na Figura 4.10 pode-se verificar que as quatro soluções estudadas aumentaram o RT30.

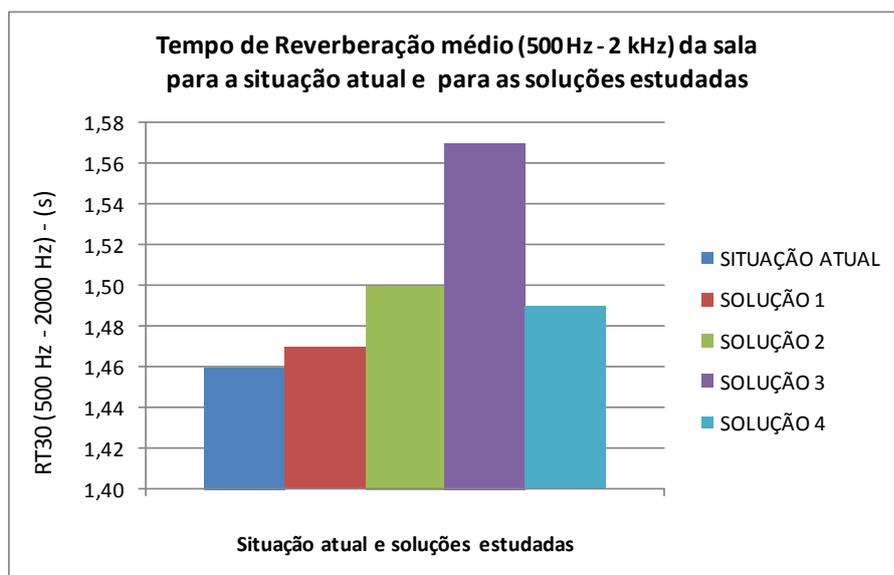


Figura 4.10 – Tempo de reverberação médio da situação atual e das soluções estudadas

Estes pequenos aumentos deveram-se, preponderantemente, à substituição de superfícies absorvedoras nas primeiras reflexões, por painéis refletoras antepostos, como no caso das Soluções 1, 3 e 4, ou por dispositivos difusores sobrepostos, caso da Solução 2.

O maior incremento entre as soluções foi o devido à canópia da Solução 3, que refletiu para a plateia os primeiros raios sonoros que teriam o sentido das cortinas e do urdimento da caixa cênica, passando o RT a 1,57 segundos ante 1,46 segundos na situação atual. Mesmo sendo de pequena ordem, este aumento contribuiria para posicionar o RT um pouco mais próximo do mínimo ideal para música de concertos, da ordem de 1,77 segundos.

A análise comparativa dos demais parâmetros acústicos, por regiões do auditório, calculados para as soluções propostas, permitiu-nos avaliar sua eficácia.

No que concerne à clareza de linguagem, a região do meio da plateia registou na situação atual um desempenho inferior em relação às demais regiões do auditório. Esta é a única zona onde a clareza da linguagem ponderada, $C50(\text{Speech Average})$, não atingiu o patamar mínimo ideal correspondente a de 0 dB. A Figura 4.11 abaixo retrata o desempenho do parâmetro nesta e nas outras regiões, para as soluções propostas.

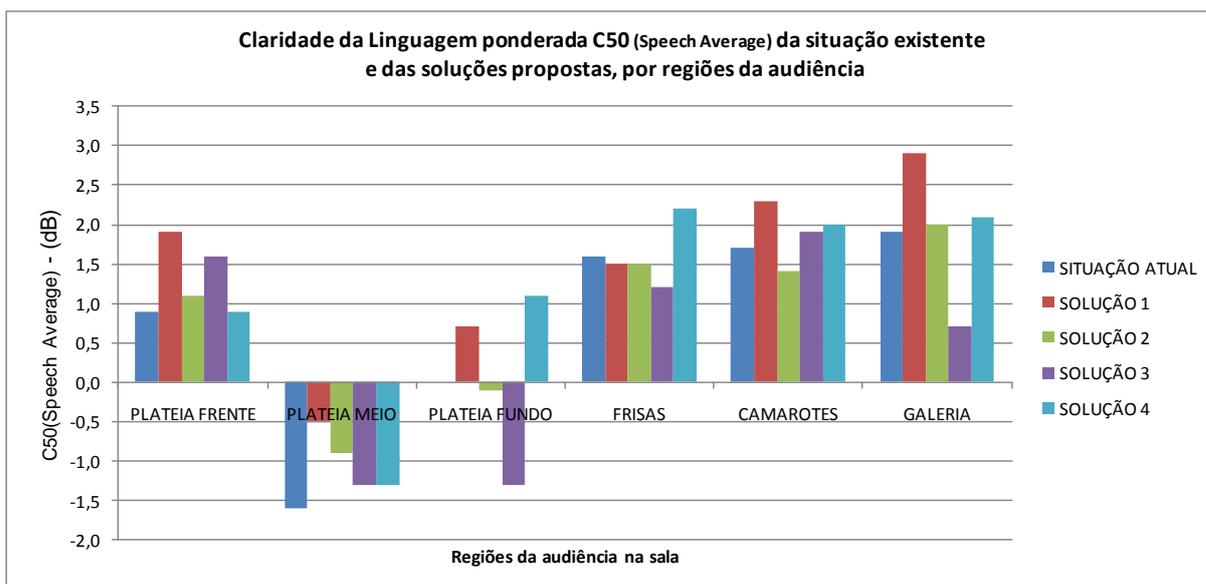


Figura 4.11 – Clareza da linguagem ponderada da situação atual e das soluções estudadas

Verifica-se que a Solução 1 é a que apresentou melhor eficácia para mitigar o déficit de clareza de linguagem existente na região do meio da plateia. Atribuímos este fato ao aumento das primeiras reflexões nesta região. As ondas sonoras emitidas na posição de fonte F1 e refletidas pelos painéis A e B convexos, percorrem cerca de 7 metros a mais que a linha direta fonte-recetor, e chegam ao meio da plateia cerca de 20ms após o som direto. Nesta região o *gap* de clareza de linguagem passou de -1,6 dB para -0,5 dB. A Solução 1 apresentou também melhoria dos índices $C50$ nas outras áreas, sobretudo na região da frente da plateia, nos camarotes e na galeria.

A análise comparativa da clareza musical $C80$ apresenta-se na Figura 4.12. As regiões do fundo da plateia, frisas e galeria apresentam, na situação atual, valores de $C80$ acima de +4 dB, limite superior do intervalo proposto por Higiní Arau-Puchades (2008) para a apresentação de concertos musicais, atividade em que este parâmetro tem grande importância.

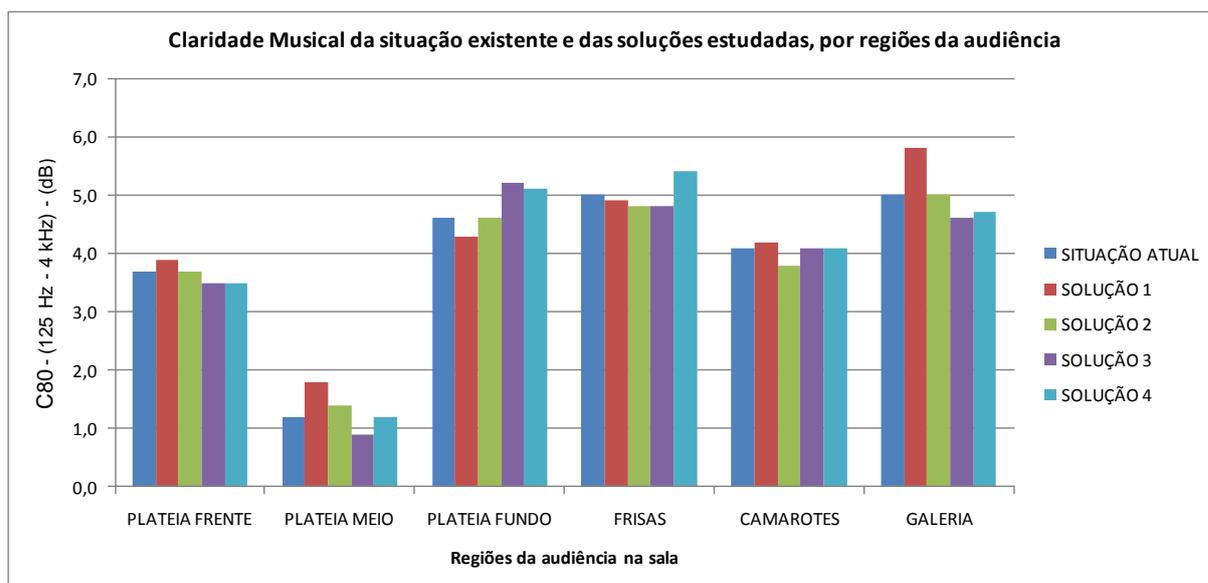


Figura 4.12 – Clareza musical C80 da situação atual e das soluções estudadas

Percebe-se que nenhuma das soluções propostas melhora a clareza musical de forma homogênea em relação à música orquestral.

A Solução 1 mitiga o déficit na região do fundo da plateia e nas frisas, mas, por outro lado, aumenta-o na galeria.

A Solução 2 é um pouco favorável para as frisas e camarotes, mas sem resultados no fundo da plateia e na galeria.

A Solução 3 apresenta eficácia relativa para as regiões da frente e do meio da plateia, frisas e galeria, entretanto apresenta o maior prejuízo para o fundo da plateia.

A Solução 4 apresenta melhorias para a frente da plateia e galeria, contudo implica em piores índices nas frisas e no fundo da plateia.

O índice de transmissão de linguagem STI, verificado nas seis regiões da sala estudadas, tanto para a situação atual como para todas as soluções propostas, encontra-se dentro da faixa entre 50% e 64%, considerada aceitável.

No entanto, conforme pode-se verificar na Figura 4.13, a Solução 1 tem maior eficácia na melhoria do índice, aumentando-o nos camarotes e galeria e, sobretudo, na frente e no meio da plateia, justamente as duas regiões de desempenho mais fraco na condição atual da sala.

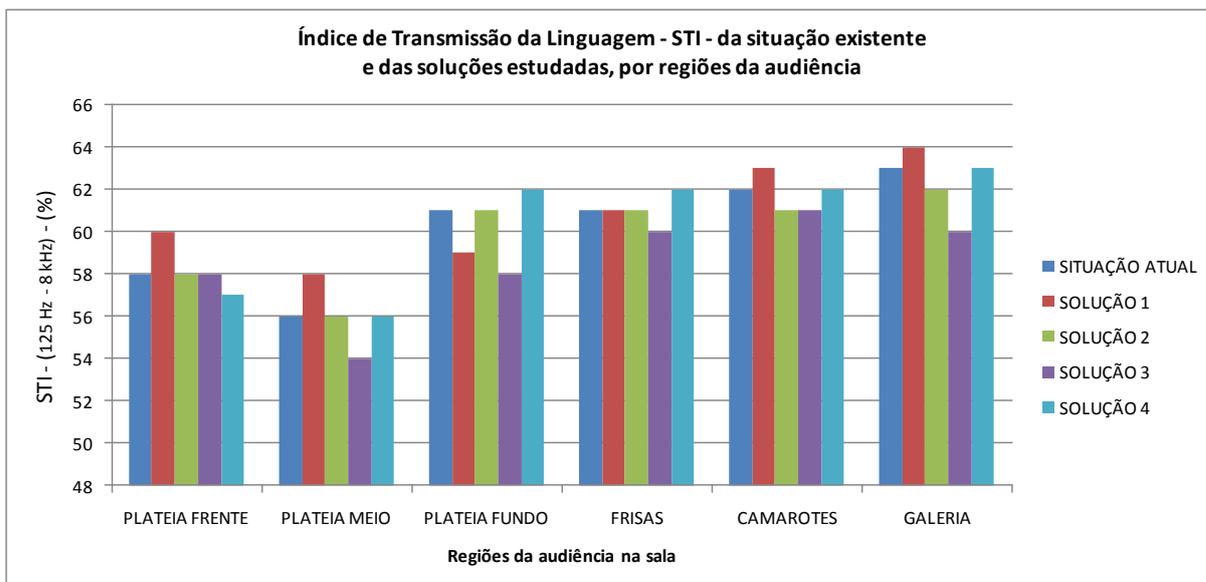


Figura 4.13 – Índices de transmissão de linguagem da situação atual e das soluções estudadas

A sonoridade G é importante para a sala, pois ali se fazem as apresentações regulares da orquestra municipal. O cálculo numérico deste parâmetro para a situação atual, indica que a Sonoridade $G_{med}(500-1000)$, média para 500 Hz e 1kHz, encontra-se fora da faixa situada entre 4 dB e 5,5 dB, recomendada por Beranek (1996).

A modelação das soluções propostas indica-nos que a Solução 3 é a única eficaz a levar este parâmetro para níveis recomendados em todas as regiões da sala, à exceção da região da frente da plateia, conforme se pode ver na Figura 4.14.

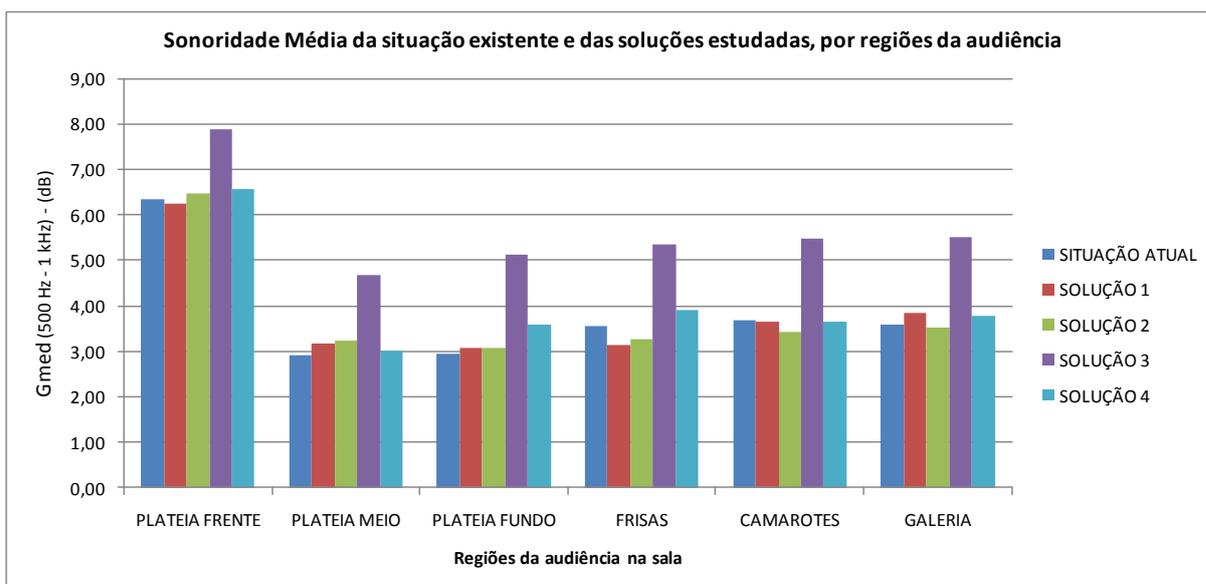


Figura 4.14 – Sonoridade média da situação atual e das soluções estudadas

Conforme visto no Quadro 4.6, na condição atual, os níveis de pressão sonora equivalentes para as bandas de oitavas entre 125 Hz e 4000 Hz, calculados pela soma logarítmica de pressões sonoras, apresentam maior diferença entre as regiões da frente e do fundo da plateia, da ordem de 3 dB(A).

A Figura 4.15. retrata graficamente os níveis de pressão sonora obtidos para a situação atual e para as quatro soluções estudadas.

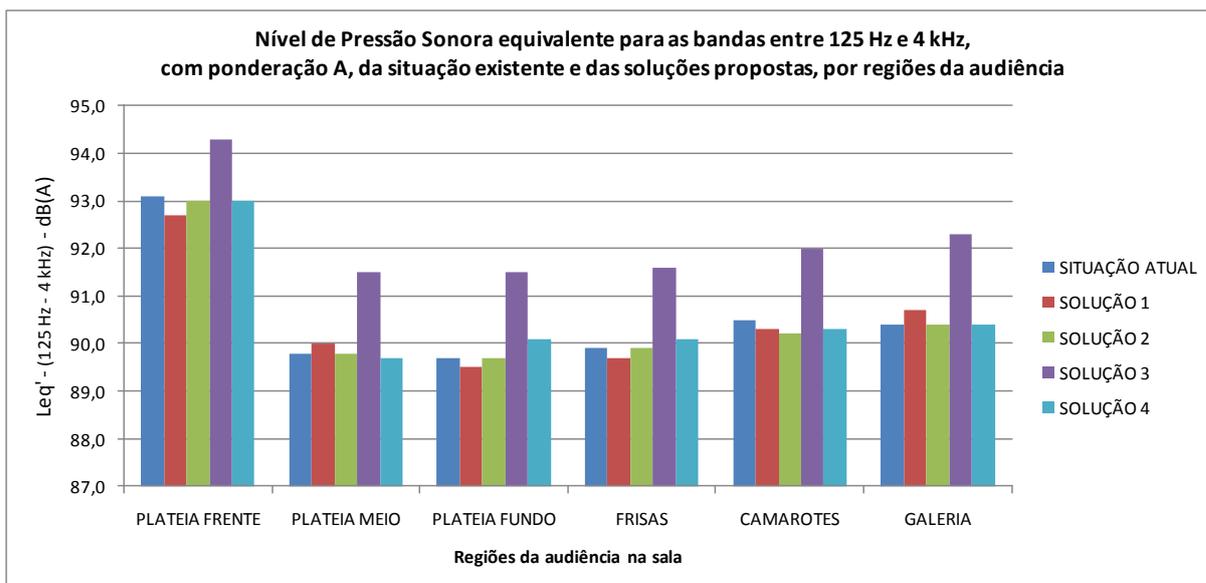


Figura 4.15 – Níveis sonoros equivalentes Leq' (125 Hz – 4 kHz), com ponderação A, da situação atual e das soluções estudadas

A solução 1 apresentou algum incremento de pressão sonora no meio da plateia e na galeria.

Contudo, a Solução 3 foi a que apresentou o mais importante aumento dos níveis equivalentes de pressão sonora em todas as regiões da audiência, e ainda fez diminuir em cerca de 0,6 dB(A) a diferença de níveis sonoros equivalentes entre frente e fundos da plateia.

Os valores médios de eficiência lateral – LF – para as bandas entre 125 Hz e 1000 Hz são registados na Figura 4.16, em percentuais.

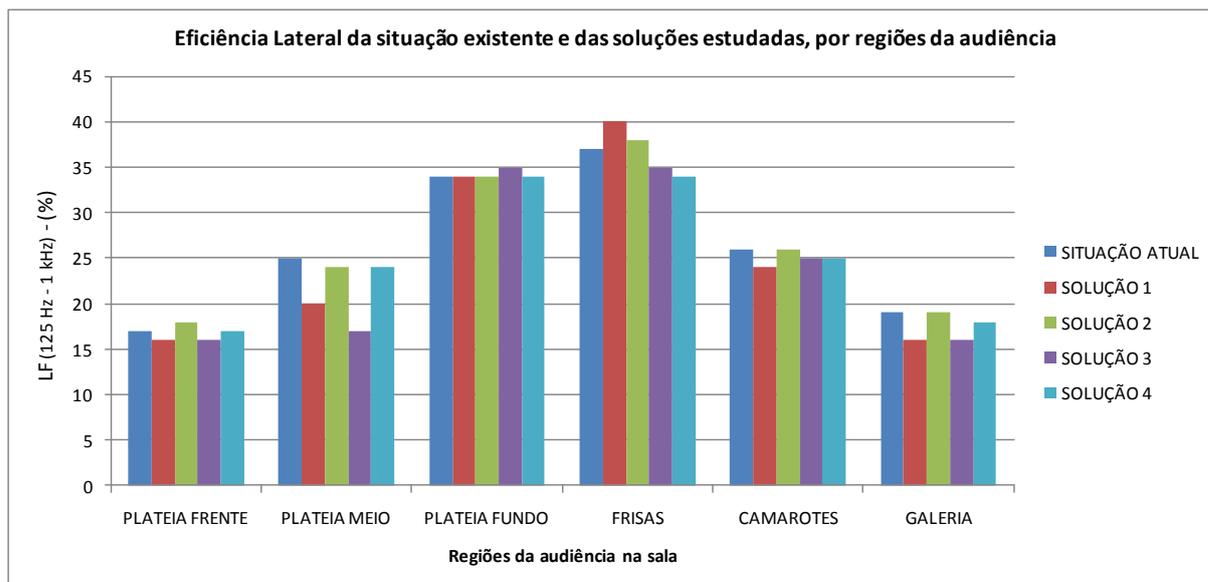


Figura 4.16 – Eficiência lateral da situação atual e das soluções estudadas

Apreende-se do gráfico que a Solução 2 teve pequena eficácia na melhoria do LF nas regiões da frente da plateia e galeria, aproximando este parâmetro do valor desejável de 19%. Contudo, esta solução, bem como a Solução 1, elevam o LF na região das frisas, afastando-o ainda mais do intervalo regulamentado pela ISO 3382-1, cujo limite superior é 35%.

4.3.2 Estimativa de custos para as soluções propostas

No ambiente virtual da modelação geométrica e do cálculo numérico há pleno grau de liberdade para lançar-se mão de criatividade ao elaborar propostas de soluções de melhoria de desempenho acústico. Entretanto, após a avaliação das eficácias, é importante que as soluções estudadas sejam analisadas sob a ótica de demanda de recursos financeiros, a fim de sejam priorizadas aquelas que apresentem uma boa relação custo / benefício e tenham possibilidade de execução.

Nos estudos deste trabalho, foram elaborados esboços geométricos das soluções propostas, idealizados em função de sua interação com as ondas sonoras, entretanto não há projetos estruturais e executivos para sua implementação. Para as soluções suspensas apoiadas em estruturas existentes, há que se fazer o cálculo estrutural para reforço das treliças de sustentação.

Por esta razão, neste trabalho apresentamos cálculos aproximados de custos, registrados no Quadro 4.13, com base em quantidades estimadas e informações de valores médios de mercado. Ressalve-se que a estimativa de custos permite aos gestores a classificação em ordem prioritária das soluções a serem detalhadas. Após a decisão das prioridades os valores

de investimento devem ser confirmados por meio de orçamentos baseados em projetos pormenorizados.

Quadro 4.13 – Estimativas de custos para as soluções estudadas

Estimativas de custo para as soluções propostas					
Valores em Reais - referência março de 2.022					
* Fator de conversão de moedas: 1 Euro = R\$ 5,56					
Solução 1 - Painéis A e B presos às treliças de holofotes					
Item	Quant.	Un.	R\$ / Un.	Custo (R\$)	Custo - Euros*
Revisão do projeto das treliças devido ao novo carregamento	1	unid.	8.000	8.000	1.439
Reforço da estrutura das treliças de aço - mat+fabr+mont	500	kg	45	22.500	4.047
Projeto da estrutura interna de alumínio dos painéis	1	unid.	10.000	10.000	1.799
Estrutura interna dos painéis em Al - material e fabricação	152	m ²	1.050	159.600	28.705
Chapas de alumínio composto ACM 1500mm x 5000mm x 4mm	22	unid.	1.450	31.900	5.737
Corte, dobra e revestimento da estrutura dos painéis	152	m ²	80	12.160	2.187
Montagem	1	unid.	18.000	18.000	3.237
			soma:	262.160	47.151
Solução 2 - Painéis difusores QRD nos peitoris dos camarotes					
Item	Quant.	Un.	R\$ / Un.	Custo (R\$)	Custo - Euros*
Painéis QRD 734 fabricação da RPG - 60cm x 60cm x 23cm	40	unid.	1.200	48.000	8.633
Custos de importação: administração e impostos (58,9%)	-	-	-	28.272	5.085
Custos de transporte	-	-	-	15.000	2.698
Montagem	1	unid.	8.000	8.000	1.439
			soma:	99.272	17.855
Solução 3 - canópia no palco					
Item	Quant.	Un.	R\$ / Un.	Custo (R\$)	Custo - Euros*
Projeto da estrutura de apoio dos painéis articulados	1	unid.	9.000	9.000	1.619
Aço para a estrutura metálica de apoio	1328	kg	15	19.920	3.583
Chapas de CRFS com dimensões 1200mm x 2400mm x 8mm	24	unid.	105	2.520	453
Fabricação, pintura e transporte das estruturas	1287	kg	22	28.314	5.092
Montagem dos painéis	1	unid.	3.600	3.600	647
			soma:	63.354	11.395
Solução 4- Painéis C sob as tesouras do telhado					
Item	Quant.	Un.	R\$ / Un.	Custo (R\$)	Custo - Euros*
Revisão do projeto das tesouras devido ao novo carregamento	1	unid.	15.000	15.000	2.698
Reforço da estrutura das treliças de aço: mat+fabr+mont	1940	kg	45	87.300	15.701
Projeto da estrutura de apoio e articulação dos painéis	1	unid.	25.000	25.000	4.496
Estrutura de apoio e articulação dos painéis - mat+fab+mont	5030	kg	45	226.350	40.710
Chapas de alumínio composto ACM 1500mm x 5000mm x 4mm	27	unid.	1.450	39.150	7.041
Corte e revestimento da estrutura dos painéis	201	m ²	80	16.080	2.892
Montagem	1	unid.	30.000	30.000	5.396
** Não incluídos os custos de automatização			soma **:	438.880	78.935

4.4 Proposta de ajuste

Sob a análise de eficácia, fica claro que a Solução 1 e a Solução 3 são as que produzem melhores resultados aos parâmetros estudados. A Solução 1 aprimora a qualidade dos parâmetros ligados à linguagem, exceto na galeria, e a Solução 3 melhora a sonoridade e a distribuição da pressão sonora no ambiente.

A Solução 2 acarreta melhorias menos significativas aos parâmetros, e pode ser classificada como não prioritária, a ser adotada em uma segunda etapa de reabilitação. A solução 4 apresenta algum incremento na sonoridade, entretanto bem menor que o resultado da Solução 3, e por seu custo elevado em relação ao benefício, não é recomendada.

É prerrogativa dos gestores do Teatro, de posse destas informações, em conjunto com as estimativas de custo, decidir sobre a adoção das soluções estudadas. Neste trabalho a proposta de ajuste das condições da sala de espetáculos para melhoria da acústica é a implementação de duas soluções: a primeira pela variação da geometria, qual seja a Solução 1, com os painéis A e B fixos às treliças de iluminação, e a segunda com dispositivo de acústica variável, a canópia estudada na Solução 3.

Os efeitos da adoção destas duas soluções em conjunto, denominada Solução 5, foram estudados por meio do cálculo numérico seguindo a mesma metodologia citada em 3.5 e utilizada para o cálculo das demais soluções, com a fonte na posição F1. Em seguida, considerando-se a fonte na posição F2, fez-se novo cálculo numérico para o que se denominou Solução 5A neste trabalho. As posições 1 e 2 consideradas para a fonte podem ser vistas na Figura 4.17.

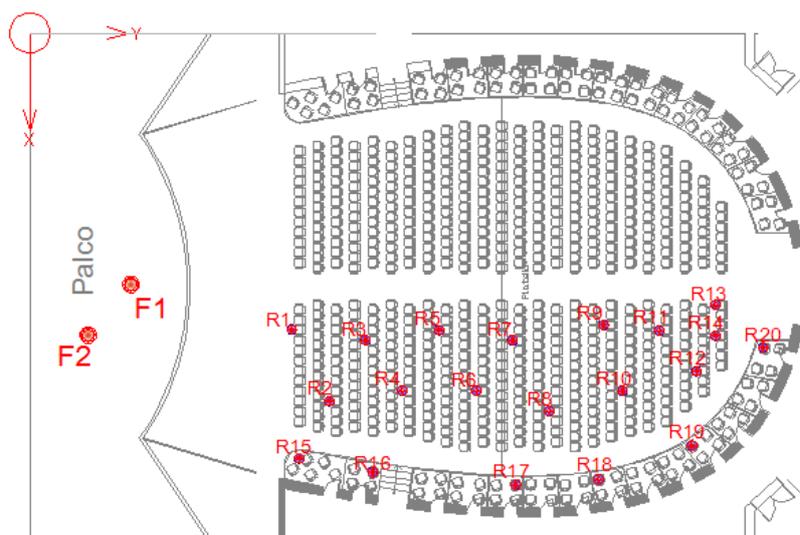


Figura 4.17 – Posições das fontes sonoras F1 e F2

Os painéis suspensos A e B proporcionam melhor inteligibilidade da palavra, condição importante para espetáculos de teatro e ópera, assim como uma pequena redução da lacuna de claridade musical no fundo da plateia e nas frisas. Por esta razão a proposta é de ser implementada a Solução 1 de forma definitiva. Quando o auditório for utilizado para atividade ligadas à fala, e houver lotação que ocupe as galerias, recomenda-se a utilização de eletroacústica, para que se reduza o considerável *gap* de sonoridade existente, bem como se obtenha melhoria dos parâmetros ligados à linguagem.

A construção de canópia estudada na Solução 3 é fortemente recomendada, para montagem no palco, exclusivamente quando a sala for utilizada para concertos musicais. Sua utilização em conjunto com a Solução 1, causa um pequeno aumento de 0,1 segundos no RT, reduz ligeiramente a *défice* de claridade musical, leva a bons níveis a sonoridade média, e melhora a distribuição dos níveis equivalentes de pressão sonora na sala, reduzindo em cerca de 1 dB(A) a perda entre frente e fundo da plateia.

Em que pese a redução da eficiência lateral na região frontal da plateia e na galeria, que entretanto atendem à norma ISO 3382-1, a colocação das canópias no palco gera melhoria de qualidade sonora em toda a sala, nos parâmetros relativos às apresentações de música, para as quais é proposta como ajuste adequado.

Em uma segunda etapa de ajuste, de acordo com a disponibilidade de recursos, a adoção da Solução 2 permitiria a melhoria da eficiência lateral pela difusão do som nas regiões da frente e meio da plateia.

No Quadro 4.14 encontram-se os resultados finais obtidos por meio do cálculo destas modelações, bem como dos valores médios entre elas, comparando-os com os parâmetros atuais da sala.

Quadro 4.14 – resumo dos parâmetros acústicos obtidos pela Solução 5, com a fonte na posição F1, pela Solução 5A (posição F2) e valores médios entre as duas, bem como no estado atual da sala

Proposta de Ajuste Solução 5 e 5A (F1 E F2) Sol. 1 + Sol. 3		Média 125 Hz - 4 kHz	Solução 5 Fonte F1	Solução 5A Fonte F2	Média entre Sols. 5 e 5A	Situação Atual Fonte F1
TR 30 (s)	Média (500 Hz - 2 kHz)		1,58	1,56	1,57	1,46
BR - Bass Ratio - Sala toda			0,96	1,03	0,99	1,11
Br - Brilho - Sala toda			1,00	1,02	1,01	1,02
EDT (s)	Média (500 Hz - 2 kHz)		1,33	1,44	1,39	1,33
Região da sala			Solução 5	Solução 5A	Média Sol. 5 e 5A	Situação Atual
C50 (dB)	plateia frente	C50 % (Speech Average)	2,1	1,9	2,0	0,9
	plateia meio		-0,7	-3,7	-2,2	-1,6
	plateia fundo		-1,6	-2,3	-2,0	0,0
	frisas		1,5	2,3	1,9	1,6
	camarotes		1,9	1,5	1,7	1,7
	galeria		1,5	1,2	1,3	1,9
C80 (dB)	plateia frente	C80 % (Média 125 - 4 kHz)	3,7	3,2	3,5	3,7
	plateia meio		1,2	-1,7	-0,2	1,2
	plateia fundo		5,2	4,1	4,6	4,6
	frisas		4,9	4,9	4,9	5,0
	camarotes		4,3	3,7	4,0	4,1
	galeria		5,2	4,6	4,9	5,0
STI (%)	plateia frente	STI CATT (125 - 8 kHz)	59%	59%	59%	58%
	plateia meio		56%	52%	54%	56%
	plateia fundo		58%	56%	57%	61%
	frisas		60%	62%	61%	61%
	camarotes		61%	60%	61%	62%
	galeria		61%	60%	61%	63%
G (dB)	plateia frente	Gmed = média G 500Hz e 1 kHz	7,63	7,10	7,37	6,35
	plateia meio		4,94	5,11	5,03	2,90
	plateia fundo		5,13	4,82	4,98	2,95
	frisas		4,94	5,64	5,29	3,55
	camarotes		5,73	6,61	6,17	3,70
	galeria		5,89	5,51	5,70	3,60
Leq' dB(A)	plateia frente	Leq' = média logarítmica ponderada A dB(A)	94,1	93,6	93,9	93,1
	plateia meio		91,7	91,6	91,6	89,8
	plateia fundo		91,5	91,2	91,4	89,7
	frisas		91,4	92,0	91,7	89,9
	camarotes		92,2	92,8	92,5	90,5
	galeria		92,5	92,1	92,3	90,4
LF (%)	plateia frente	Média das bandas entre 125 Hz e 1000 Hz	16	10	13	17
	plateia meio		14	9	11	25
	plateia fundo		36	28	32	34
	frisas		36	27	31	37
	camarotes		24	21	23	26
	galeria		15	19	17	19

5. CONCLUSÕES

Esta dissertação procura descrever o estudo de soluções para aprimorar as condições acústicas de um espaço de uso múltiplo, com proposição de ajustes para melhorar sua performance em quesitos que apresentem déficit de qualidade sonora para atividades específicas.

A percepção subjetiva da qualidade acústica de um ambiente depende de referências também subjetivas que o ouvinte traz em sua história pessoal. Entretanto, parâmetros objetivos definidos mediante estudos estatísticos permitem-nos inferir esta percepção, e são ferramenta importante para estudos de caracterização e reabilitação de salas existentes, bem como para concepção de novos projetos.

A acurácia dos cálculos numéricos para obtenção destes parâmetros depende fortemente da correta caracterização da geometria e dos materiais constituintes da edificação, sobretudo no que se refere aos coeficientes de absorção sonora, que interferem diretamente no cálculo dos tempos de reverberação.

A modelação do Teatro Polytheama, objeto deste estudo, foi feita por meio do programa computacional CATT, baseado em feixe de raios. Em salas existentes, como é o caso do presente objeto, pode haver materiais de revestimento fabricados especificamente para a edificação, dos quais não há conhecimento sobre os coeficientes acústicos de absorção e dispersão. Nestes casos, a calibração e o ajuste da modelação acústica feitos com parâmetros obtidos com medições *in situ* podem ser de uma grande mais valia. No presente caso de estudo a calibração foi feita com base em medições do tempo de reverberação realizadas conforme especificações da norma ISO 3382-1. Os cálculos numéricos foram feitos a partir de coeficientes estimados para os revestimentos em madeira, com tentativas de aproximação nos cálculos feitos com o *software*, até chegar-se, após 19 rondas, a valores de tempo de reverberação próximos aos da medição *in situ*. Este parâmetro, da ordem de 1,46 segundos, é plenamente adequado à realização de óperas em uma sala com o volume de 11.260 m³, mas insuficiente para um perfeito desempenho acústico em concertos musicais.

A análise numérica dos demais parâmetros acústicos foi importante para a identificação de lacunas de desempenho que nortearam os estudos de soluções. Estes parâmetros que caracterizaram a adequação da sala para diversos usos, seja com ênfase na linguagem falada, seja na música orquestral, foram mapeados por regiões da sala, com amostragem de 14 recetores. A sala atende aos requisitos da NBR ISO 3382-7:2017 em todos os parâmetros.

Entretanto, o procedimento permitiu verificar-se o atendimento a outros critérios, que definem faixas adequadas de parâmetros. Verificou-se que a sala tem bom índice de clareza de linguagem, com um pequeno *gap* na região do centro da plateia. Analisando com minúcia o índice de clareza musical observa-se que tem necessidade de melhoria, entretanto o desempenho nas posições de recetores no meio da sala são mais favoráveis. As informações mais rigorosas fizeram-nos concluir que há menor densidade de primeiras reflexões nesta região, e motivaram o estudo da Solução 1 composta pelos painéis refletoras A e B. O estudo dos difusores da Solução 2 buscou aumentar a eficiência lateral na região da frente da plateia. Os estudos da canópia em forma de concha na Solução 3 e dos painéis basculantes C na Solução 4, tiveram por objetivo aumentar a pressão sonora e a sonoridade na região central, e sobretudo nos fundos da plateia.

Os resultados dos cálculos numéricos de cada parâmetro acústico para as soluções estudadas, foram consolidados por solução e por região da sala, gerando gráficos que facilitam a comparação de eficácia entre as soluções. A estimativa de custos para a implantação das soluções estudadas, em complemento à análise de eficácia, permitiu que fosse atingido o principal objetivo do trabalho, que consiste em apresentar uma proposta adequada de ajuste para melhoria do desempenho acústico da sala.

Para estudos futuros julgamos de interesse estudarem-se canópias com formas variadas a serem aplicadas no palco, que proporcionem reflexão e difusão, semelhantes às citadas no item 2.8 em Cox (2017), bem como as estudadas 6.2.2. de Maiolino (2013).

Soluções que considerem a alteração da forma da sala na zona frontal, através de painéis inclinados, quer suspensos no teto, a diferentes cotas e com diferentes inclinações, quer eventualmente nas zonas laterais, devem surtir bons resultados na propagação do campo sonoro para o fundo da sala, de forma mais uniforme.

Além disto, estudo de soluções de acústica variável, como, por exemplo, o aprimoramento da ideia da Solução 4, conjugando-a com a Solução 1, sendo aplicada em quase toda a área do teto, com a possibilidade de fechar e abrir, permitiria variar significativamente o tempo de reverberação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros

Arau-Puchades, Higini (2007). “ABC de la Acústica Arquitectónica”. CEAC, Barcelona, Espanha.

Barron, Michael (2010). “Auditorium Acoustics and Architectural Design”. Spon Press, Nova Iorque, EUA.

Beranek, Leo L. (1993). “Acoustics”. M.I.T., Cambridge, MA, EUA.

Beranek, Leo L. (1996). “Concert Halls and Opera Houses: How They Sound”. Springer, New York, NY, EUA.

Bistafa, Sylvio R. (2006). “Acústica aplicada ao controle do ruído”. Edgard Blucher, São Paulo, Brasil.

Carrion I., Antoni (1998). “Diseño Acústico de Espacios arquitectónicos”. Edicions UPC, Barcelona, Espanha.

Cox, T., d’Antonio, P. (2017). “Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application”. CRC Press, Boca Raton, FL, EUA.

Egan, M. David (2007). “Architectural Acoustics”. J. Ross Publishers, Plantation, EUA.

Long, Marshall (2006). “Architectural Acoustics”. Elsevier Academic Press, Burlington, EUA.

Mehta, M., Johnson, J, Rocafort, J. (1999). “Architectural Acoustics: Principles and design”. Prentice Hall, New Jersey, EUA.

Vorländer, M. (2008). “Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality”. Springer, Berlin/Heidelberg, Alemanha.

Artigos

Arau-Puchades, H. (2008). “¿Es el Criterio Acustico el Paradigma de la Excelencia Acustica em el Diseño de Salas? ”. V Congresso Ibérico de Acústica + XXXIX Congresso Espanhol de Acústica TECNIACÚSTICA 2008 + Simpósio Europeu de Acústica, Universidade de Coimbra, Portugal.

Arau-Puchades, H. (2015). “La Arquitectura Del Sonido y La Envolvente de los Espacios”. Conferência realizada na Escola Tècnica Superior d’Arquitectura de Barcelona, Espanha.

Bistafa, S. R. (2004). “ Difusão Sonora em Salas: Paradigmas do Passado e Estado da Arte”. Seminário Música Ciência e Tecnologia: Acústica Musical, Universidade de São Paulo, Brasil.

Chan, T.M.; To, W. M. (2002). “Modelling of Scattering from Balcony Fronts”. Building Acoustics, Volume 9 – Nº 3, pp. 219-231

Griesinger, David (2007). “Concert Hall Acoustics and Audience Perception” - IEEE SIGNAL Processing Magazine – March 2007 – New Jersey, EUA, pp. 126-131.

Hidaka, T; Nishihara N. (2015). “Acoustical Quality in Concert Halls as Related to Hall Shape: Shoebox, Surround, and Other”. Psychomusicology: Music, Mind, and Brain - 2015, Vol. 25, No. 3, 240–252 - American Psychological Association, EUA.

Iazzetta, F., Figueiredo, F. L., Masiero, B. S. (2004). “Parâmetros Subjetivos em Salas Destinadas à Prática Musical”. IV Congresso Ibero-Americano de Acústica, Guimarães, Portugal.

Jaffe, J. Christopher (2005). “Innovative approaches to the design of symphony halls”. Artigo publicado na revista Acoustic Science & Technology. 26, 2 (2005), pp. 240-243.

Jo H. I; Jeon J. Y. (2022) – “Optimizing sound diffusion in a concert hall using scale-model measurements and simulations”. Journal of Building Engineering 50 (2022) 104240, pp. 1-16 acessado pelo site: www.elsevier.com/locate/job

Pereira, A., Gaspar, A., Godinho, L., Mendes, P. A., Mateus, D., Carbajo, J., Ramis, J., Poveda, P. (2021). “On the Use of Perforated Sound Absorption Systems for Variable Acoustics Room Design”. Publicação Buildings 2021, 11, 543, MDPI, pp. 1-25 - obtido pelo endereço eletrônico: https://mdpi-res.com/d_attachment/buildings/buildings-11-00543/article_deploy/buildings-11-00543.pdf

Lee, D., Cabrera, D., Martens, W. L. (2012). “The effect of loudness on the reverberance of music: Reverberance prediction using loudness models” . The Journal of the Acoustical Society of America 131 (2), February 2012 , pp. 1194-1205, obtido em: www.researchgate.net/publication/221849511

Tese de Doutorado

Zhang, Y. (2005). “A Method to Predict Reverberation Time in Concert Hall Preliminary Design Stage”. Tese de Doutorado, College of Architecture, Georgia Institute of Technology, EUA.

Dissertação de Mestrado

D’Almeida, J. M. (2018). “Reabilitação Acústica em Edifícios de Valor Histórico – Estratégias para Melhoria do Condicionamento Acústico de Espaços”. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.

Gaspar, A.C.R. (2018). “Estudos de Estratégias Não-convencionais de Acústica Variável”. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal.

Maiorino, A. V. (2013). “Influência acústica de concha orquestral na área da plateia de teatro de múltiplo uso”. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil.

Manual de Software

CATT- Acoustic v9.1 with TUCT v2 Introduction Manual

Especificação

NBR ISO 3382-1:2017. Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 1: Salas de espetáculos; Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 2017.

Catálogos técnicos de fabricantes:

Difusor QRD 734 de fabricação RPG – disponível em:

www.rpgacoustic.com/documents/2016/09/qrd-734_acoustical-data_rpga.pdf

Placa cimentícia Eterplac – disponível em: <https://www. eternit.com.br/wp-content/uploads/2020/08/Catálogo-Técnico-Sistemas-Construtivos-022022.pdf>

Site da Internet

Site da internet para acesso a informações sobre o Teatro Polytheama:

<https://cultura.jundiai.sp.gov.br/espacos-culturais/teatropolytheama/>

7. ANEXOS

7.1 Anexo 1 – RT30 obtidos na medição in situ, com a fonte na posição F1, para todas as posições de recetores

TEATRO POLYTHEAMA								
Medição in situ dos tempos de reverberação RT 30, em 28/07/2021								
Realizado pela Professora Doutora Stelamarei Rolla Bertoli, orientadora,								
juntamente com Henrique Pousa Caltram, engenheiro, em seu T.C.C. na UNICAMP								
Fonte na posição F1								
	Bandas de frequências (Hz)							
PLATEIA	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Recetores	Tempo de Reverberação - RT30 (s)							
R1	1,47	1,642	1,226	1,338	1,505	1,5	1,347	1,08
R2	1,309	1,601	1,31	1,264	1,438	1,523	1,349	1,085
R3	1,432	1,636	1,231	1,344	1,502	1,583	1,368	1,096
R4	1,622	1,699	1,226	1,276	1,549	1,565	1,374	1,132
R5	1,059	1,742	1,115	1,379	1,586	1,612	1,404	1,152
R6	1,069	1,765	1,386	1,309	1,562	1,584	1,446	1,205
R7	1,932	1,543	1,285	1,34	1,595	1,618	1,427	1,191
R8	1,127	1,507	1,243	1,381	1,553	1,561	1,413	1,159
R9	1,069	1,679	1,301	1,33	1,549	1,644	1,432	1,212
R10	1,627	1,761	1,308	1,379	1,596	1,644	1,463	1,205
R11	1,497	1,409	1,216	1,437	1,514	1,567	1,346	1,137
R12	0,5	1,53	1,227	1,431	1,553	1,587	1,398	1,159
R13	1,689	1,654	1,354	1,347	1,515	1,614	1,438	1,16
R14	1,142	1,414	1,247	1,263	1,508	1,613	1,442	1,199
MÉDIAS	1,32	1,61	1,26	1,34	1,54	1,59	1,40	1,16
	Bandas de frequências (Hz)							
FRISAS	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Recetores	Tempo de Reverberação - RT30 (s)							
R15	2,216	1,677	1,317	1,317	1,512	1,559	1,42	1,186
R16	1,691	1,625	1,289	1,374	1,551	1,602	1,427	1,183
R17	1,297	1,522	1,166	1,399	1,539	1,65	1,452	1,198
R18	1,629	1,499	1,051	1,355	1,531	1,613	1,469	1,206
R19	2,071	1,285	1,303	1,473	1,569	1,637	1,431	1,153
R20	1,305	1,339	1,222	1,418	1,502	1,624	1,418	1,202
MÉDIAS	1,70	1,49	1,22	1,39	1,53	1,61	1,44	1,19
	Bandas de frequências (Hz)							
CAMAROTES	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Recetores	Tempo de Reverberação - RT30 (s)							
R21	1,059	1,606	1,218	1,376	1,53	1,567	1,398	1,159
R22	3,687	1,358	1,341	1,44	1,537	1,607	1,434	1,198
R23	1,085	1,601	1,353	1,396	1,521	1,589	1,403	1,124
R24	0,991	1,512	1,28	1,39	1,556	1,632	1,438	1,183
R25	1,347	1,519	1,145	1,347	1,473	1,631	1,435	1,16
R26	1,91	1,522	1,155	1,415	1,511	1,581	1,418	1,166
R27	1,281	1,359	1,194	1,294	1,443	1,604	1,405	1,161
R28	1,157	1,362	1,265	1,338	1,535	1,608	1,422	1,119
MÉDIAS	1,56	1,48	1,24	1,37	1,51	1,60	1,42	1,16

GALERIA	Bandas de frequências (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Recetores	Tempo de Reverberação - RT30 (s)							
R29	1,548	1,589	1,301	1,483	1,57	1,59	1,435	1,183
R30	1,264	1,52	1,29	1,458	1,562	1,613	1,421	1,182
R31	1,077	1,613	1,285	1,36	1,557	1,618	1,401	1,145
R32	1,928	1,589	1,316	1,325	1,622	1,642	1,428	1,212
R33	1,53	1,705	1,291	1,294	1,615	1,643	1,426	1,176
R34	0,761	1,462	1,327	1,354	1,552	1,645	1,464	1,185
R35	1,983	1,56	1,442	1,422	1,606	1,679	1,443	1,184
R36	1,033	1,388	1,26	1,425	1,54	1,634	1,419	1,192
R37	2,049	2,107	1,234	1,323	1,558	1,589	1,455	1,205
R38	1,107	1,545	1,32	1,405	1,549	1,587	1,428	1,177
MÉDIAS	1,43	1,61	1,31	1,38	1,57	1,62	1,43	1,18

Fonte na posição F1		Bandas de frequências (Hz)					
Médias por sector		125	250	500	1000	2000	4000
		Tempo de Reverberação - RT30 (s)					
R1 a R14	PLATEIA	1,61	1,26	1,34	1,54	1,59	1,40
R15 a R20	FRISAS	1,49	1,22	1,39	1,53	1,61	1,44
R21 a R28	CAMAROTES	1,48	1,24	1,37	1,51	1,60	1,42
R29 a R38	GALERIA	1,61	1,31	1,38	1,57	1,62	1,43
Média da sala		1,55	1,26	1,37	1,54	1,61	1,42

7.2 Anexo 2 – RT30 obtidos na medição in situ, com a fonte na posição F2, para todas as posições de recetores

TEATRO POLYTHEAMA								
Medição in situ dos tempos de reverberação RT 30, em 28/07/2021								
Realizado pela Professora Doutora Stelamarei Rolla Bertoli, orientadora, juntamente com Henrique Pousa Caltram, engenheiro, em seu T.C.C. na UNICAMP								
Fonte na posição F2								
Bandas de frequências (Hz)								
PLATEIA	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Recetores	Tempo de Reverberação - RT30 (s)							
R1	1,366	1,783	1,345	1,459	1,583	1,592	1,397	1,17
R2	1,471	1,572	1,296	1,462	1,498	1,609	1,427	1,203
R3	1,432	1,636	1,231	1,344	1,502	1,583	1,368	1,096
R4	1,622	1,699	1,226	1,276	1,549	1,565	1,374	1,132
R5	1,059	1,742	1,115	1,379	1,586	1,612	1,404	1,152
R6	1,069	1,765	1,386	1,309	1,562	1,584	1,446	1,205
R7	1,932	1,543	1,285	1,341	1,595	1,618	1,427	1,191
R8	1,127	1,507	1,243	1,381	1,553	1,561	1,413	1,159
R9	0,697	1,567	1,287	1,41	1,536	1,573	1,397	1,179
R10	1,146	1,566	1,356	1,478	1,545	1,577	1,402	1,166
R11	1,611	1,522	1,233	1,463	1,549	1,59	1,448	1,199
R12	1,243	1,892	1,25	1,423	1,575	1,583	1,43	1,202
R13	0,396	1,457	1,256	1,318	1,476	1,631	1,408	1,151
R14	1,091	1,592	1,209	1,287	1,524	1,637	1,423	1,122
MÉDIAS	1,23	1,63	1,27	1,38	1,55	1,59	1,41	1,17
Bandas de frequências (Hz)								
FRISAS	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Recetores	Tempo de Reverberação - RT30 (s)							
R15	2,472	1,625	1,295	1,365	1,56	1,578	1,424	1,188
R16	1,29	1,402	1,229	1,405	1,576	1,576	1,395	1,185
R17	1,138	1,438	1,309	1,435	1,527	1,589	1,378	1,162
R18	1,196	1,494	1,237	1,456	1,543	1,571	1,402	1,176
R19	1,513	1,456	1,354	1,42	1,545	1,579	1,422	1,182
R20	1,221	1,417	1,308	1,426	1,589	1,634	1,443	1,215
MÉDIAS	1,47	1,47	1,29	1,42	1,56	1,59	1,41	1,18
Bandas de frequências (Hz)								
CAMAROTES	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Recetores	Tempo de Reverberação - RT30 (s)							
R21	1,232	1,401	1,234	1,388	1,551	1,617	1,418	1,168
R22	1,458	1,552	1,388	1,393	1,577	1,611	1,434	1,228
R23	1,41	1,419	1,322	1,44	1,488	1,571	1,389	1,132
R24	1,228	1,394	1,278	1,452	1,562	1,593	1,434	1,215
R25	0,974	1,546	1,311	1,344	1,515	1,563	1,397	1,081
R26	1,423	1,471	1,241	1,434	1,529	1,598	1,379	1,127
R27	2,443	1,403	1,387	1,39	1,514	1,523	1,385	1,151
R28	2,258	1,133	1,137	1,356	1,526	1,582	1,382	1,164
MÉDIAS	1,55	1,41	1,29	1,40	1,53	1,58	1,40	1,16

GALERIA	Bandas de frequências (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Recetores	Tempo de Reverberação - RT30 (s)							
R29	0,946	1,524	1,369	1,469	1,575	1,599	1,404	1,151
R30	1,406	1,4	1,143	1,461	1,567	1,606	1,412	1,179
R31	4,323	1,278	1,203	1,443	1,528	1,569	1,396	1,145
R32	1,41	1,629	1,43	1,375	1,471	1,576	1,383	1,137
R33	0,973	1,498	1,194	1,496	1,557	1,578	1,413	1,135
R34	0,976	1,441	1,298	1,49	1,569	1,605	1,375	1,163
R35	1,094	1,395	1,371	1,422	1,562	1,615	1,38	1,14
R36	1,326	1,601	1,296	1,463	1,558	1,572	1,395	1,149
R37	1,282	1,379	1,363	1,537	1,531	1,549	1,375	1,149
R38	1,418	1,563	1,173	1,317	1,543	1,564	1,363	1,109
MÉDIAS	1,52	1,47	1,28	1,45	1,55	1,58	1,39	1,15

Fonte na posição F2		Bandas de frequências (Hz)					
Médias por sector		125	250	500	1000	2000	4000
		Tempo de Reverberação - RT30 (s)					
R1 a R14	PLATEIA	1,63	1,27	1,38	1,55	1,59	1,41
R15 a R20	FRISAS	1,47	1,29	1,42	1,56	1,59	1,41
R21 a R28	CAMAROTES	1,41	1,29	1,40	1,53	1,58	1,40
R29 a R38	GALERIA	1,47	1,28	1,45	1,55	1,58	1,39
Média da sala		1,50	1,28	1,41	1,55	1,59	1,40