



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC
Florianópolis, SC, Brasil

Afinação da forma: A metamorfose acústica no espaço cênico multiconfigurável

Carvalho, Bianca Q. de ; Niemeyer, Maria Lygia¹; Torres, Julio Cesar B.²

¹ Programa de Pós-graduação em Arquitetura - PROARQ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, (biaqc.arq, lygianiemyer@gmail.com)

² Programa de Engenharia Urbana - PEU, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, julio@poli.ufrj.br

Resumo

As mudanças na cena teatral e performática, no âmbito do modo de representação, estimulam o surgimento de novas configurações do edifício teatral. Se por um lado o espaço físico se transforma para acompanhar a evolução da arte cênica, por outro, o surgimento de novos materiais e técnicas construtivas oferece ao arquiteto a possibilidade incorporar inovações plásticas e formais ao projeto do edifício teatral. As chamadas “Salas multiconfiguracionais”, que comportam diferentes arranjos espaciais palco-plateia, ganharam destaque nas últimas décadas. Esta flexibilidade, muito apreciada por encenadores, representa um desafio para o projeto acústico. O presente artigo investiga a variação dos parâmetros acústicos para uma sala de pequeno porte, com capacidade para cerca de 200 pessoas, em função das modificações na tipologia (italiano, arena e passarela) do espaço, e na relação do posicionamento fonte-receptores em cada tipologia. O software BRASS (*Brazilian Room Acoustic Simulator*) foi usado para calcular os parâmetros T60, EDT, C80 e D50. A pesquisa aponta que dimensões, níveis de absorção das superfícies e posicionamento de refletores de teto são mais aplicáveis à sala teatral. Os resultados das simulações indicam os níveis aceitáveis dos parâmetros acústicos analisados, em cada layout.

Palavras-chave: Acústica de salas; Teatro multiconfiguracional; Simulação acústica; BRASS

PACS: 43.55.-n; 43.55.Fw

Abstract

Changes in the theatrical and performance scene, in terms of the mode of representation, stimulate the emergence of new configurations of the theatrical building. If, on the one hand, the physical space is transformed to accompany the evolution of scenic art, on the other hand, the emergence of new materials and construction techniques offers the architect the possibility to incorporate plastic and formal innovations into the design of the theatrical building. The so-called “Multiconfiguration Rooms”, which include different stage-audience spatial arrangements, have gained prominence in recent decades. This flexibility, much appreciated by directors, represents a challenge for acoustic design. This article investigates the variation of acoustic parameters for a small room, with capacity for about 200 people, due to changes in the typology (Italian, arena and walkway) of the space, and in the relationship of source-receivers positioning in each typology. The BRASS (*Brazilian Room Acoustic Simulator*) software was used to calculate the parameters T60, EDT, C80 and D50. Research shows that dimensions, surface absorption levels and placement of ceiling reflectors are most applicable to the theater room. The simulation results indicate the acceptable levels of the analyzed acoustic parameters, in each layout.

Keywords: Room acoustics; multiconfiguration theater; Acoustic simulation; BRASS.



1. INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores a ser considerado no projeto de salas teatrais é o seu desempenho acústico, devido ao som nesta arquitetura interagir sensorialmente com o corpo humano enquanto receptor. Long [1] apresenta a evolução das salas voltadas para óperas, concertos e apresentações teatrais, relacionando-a ao surgimento da acústica como ciência e ao comportamento do som nessas edificações. O projeto acústico de salas voltadas ao teatro tem suas peculiaridades, sendo pensado ou a partir da forma do edifício ou a partir do tratamento de suas superfícies e vedações. Grande parte dos estudos e recomendações projetuais nessa área são direcionadas para teatros com a tipologia italiana – palco de frente para a plateia, com lugares fixos [2]. No entanto, em tempos recentes, nota-se o uso cada vez maior na arquitetura teatral de salas flexíveis que buscam o máximo aproveitamento funcional.

Jorge [3] usa o termo teatros multiconfiguracionais ao abordar os espaços cênicos contemporâneos brasileiros que foram projetados e construídos tendo como partido projetual sua mobilidade. Para isso, a tecnologia cenotécnica de iluminação, urdimento e plataformas de plateia e palco tiveram que se desenvolver para adaptar-se a diferentes configurações.

Na acústica arquitetônica, a geometria espacial está diretamente relacionada às reflexões sonoras que ocorrem no seu interior, sendo assim altamente recomendável que arquiteturas que requerem um fino desempenho acústico tenham sua morfologia pensada a partir desse aspecto [4].

Desta forma, este artigo tem como objetivo geral traçar recomendações projetuais para o projeto acústico de salas multiconfiguracionais, pensando na ideia de uma sala acusticamente

ajustável. Tem também como objetivos específicos:

- Avaliar o desempenho acústico de um modelo hipotético de sala com diferentes configurações tipológicas no espaço.
- Propor sistemas flexíveis móveis que se adequem a diferentes configurações cena / plateia, de acordo com os resultados obtidos através da simulação virtual.
- Aplicar a ferramenta de análise acústica BRASS, por meio do seu uso na simulação virtual.

Busca-se assim um sistema de condicionamento acústico que possua flexibilidade móvel associada a algumas configurações cena / plateia usualmente propostas por encenadores: arena, italiano e passarela [5]

2. SIMULAÇÃO ACÚSTICA

2.1 *Brazilian Room Acoustic Simulator (BRASS)*

O *software* BRASS (*Brazilian Room Acoustic Simulator*) foi elaborado pelo Profº Dr. Júlio Cesar Boscher Torres, do Programa de Engenharia Urbana da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEU-POLI/UFRJ). Esta ferramenta foi escolhida para ser usada neste artigo pela maior facilidade de manipulação da sua programação de acordo com a utilização, devido à proximidade com o seu desenvolvedor e por não ser ainda um *software* comercializado.

O BRASS possibilita obter os seguintes parâmetros acústicos como resultados da simulação: Tempo de Reverberação (T60), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C80), Definição (D50), Tempo Central (TC), Nível de Pressão Sonora (SPL – *Sound Pressure Level*) e Nível de Pressão Sonora Ponderado em “A” (SPL(A)), nas nove faixas de frequência – 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 e

16000Hz. Também é possível obter a audibilização da sala simulada.

Segundo Torres [6], as fontes inseridas no *software* podem ser omnidirecionais ou direcionais. A cada superfície é associado um coeficiente de absorção correspondente ao seu material. Os raios sonoros que se propagam na sala podem ser refletidos ou não (diretos), e a resposta impulsiva da sala no conjunto fonte-receptor será o somatório das energias de cada raio incidente no receptor. No caso de fonte direcional, a potência da fonte é calculada a 1m de distância, na direção do eixo principal de propagação.

O *software* utiliza o método de raios, obtendo-se respostas impulsivas mono e binauriculares nos receptores. A energia captada nos receptores dependerá dos seguintes fatores: distância entre fonte e receptor, geometria da sala, e as características acústicas das superfícies – absorção, espalhamento e transmissão [6].

3. METODOLOGIA

As simulações acústicas realizadas neste artigo fazem uma análise comparativa de uma sala teatral hipotética em três etapas, utilizando o *software* BRASS.

Baseado nas salas construídas em tempos recentes no Brasil [3] foi estimada uma sala teatral para um público variando entre 160 e 192 pessoas. Esta mesma sala é utilizada com três *layouts* diferentes: Arena, italiano e passarela. Na primeira etapa do estudo, este grupo é simulado com as três sem nenhum condicionamento acústico, apenas superfícies de palco e plateia. Na segunda etapa, são inseridos painéis refletores nas três salas, visando um estudo da forma de distribuição da energia sonora na sala. Na terceira etapa, são acrescentados materiais com propriedades de absorção em algumas superfícies, visando o controle do tempo de reverberação das salas.

3.1 Modelo geométrico

A escala das salas adotadas nos modelos hipotéticos neste trabalho foi pensada inicialmente a partir do material bibliográfico produzido pela FUNARTE – Oficina arquitetura cênica [7], que recomenda dimensões para diferentes capacidades de público, além de indicar as funções recomendadas para cada escala de projeto (Tabela 1).

Tabela 1: Característica dos modelos construídos.

<i>Layout</i>	<i>Público</i>	<i>Área de palco (m²)</i>
<i>Arena</i>	160	34
<i>Italiano</i>	192	50
<i>Passarela</i>	160	51
<i>Arena</i>	160	34
<i>Italiano</i>	192	50
<i>Passarela</i>	160	51

As dimensões das salas propostas para análise foram calculadas de acordo com o diagrama de Bolt [8] [9] que estabelece a relação das dimensões de salas com a distribuição dos modos, gerando um gráfico que relaciona a razão L_y/L_z com a razão L_x/L_z (eixos das superfícies de vedação da sala), onde a região demarcada indica as proporções aceitáveis para boa distribuição das frequências modais no espectro [10]. Todos os modelos possuem a planta baixa composta de módulos de 1,10 x 1,10m, totalizando nas seguintes dimensões: 12,1 x 19,8 x 6m, e com volume interno de 1.916,64m³. O pé-direito para todos os casos foi fixado em 6m, pensando em uma dimensão exequível para o projeto deste tipo de sala no interior de espaços já projetados como shoppings ou galpões.

O posicionamento da plateia foi disposto a partir do estudo da curva de visibilidade para cada *layout*, em cada sala proposta, o que possibilitou a localização das plataformas da plateia,



quantidade de fileiras, desníveis entre elas, altura do palco e posicionamento da fonte sonora (atores) e receptores (espectadores na plateia) (figura 1).

As linhas cheias na cor laranja (figuras 2 a 5) representam os raios sonoros emitidos diretamente pela fonte sonora, enquanto as tracejadas representam os raios refletidos. Aplicando graficamente a teoria de acústica geométrica onde o raio de incidência (i) é igual

ao de reflexão (r) nas superfícies (paredes e painéis refletores no teto), se direciona a predominância da energia sonora que é emitida pela fonte (ator no palco) para a área de abrangência desejada — as arquibancadas de público. Assim, foram definidos os graus de inclinação dos painéis refletores das salas propostas. Foi utilizado um tamanho retangular padrão comumente comercializado (2,74 x 1,60m). As inclinações da tipologia arena e passarela foram iguais.

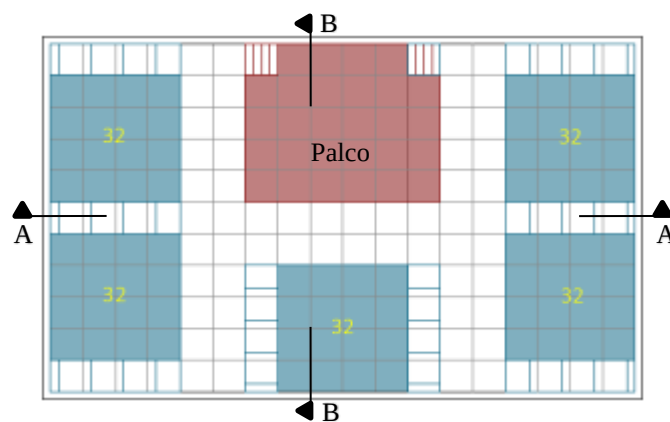


Figura 1: Planta baixa – Sala arena

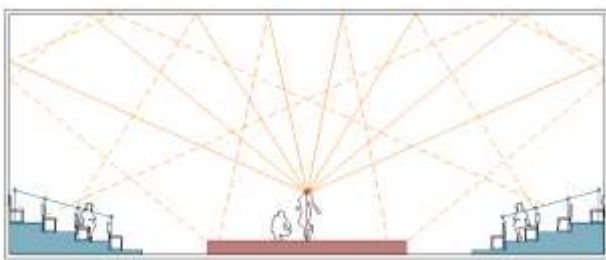


Figura 2: Corte AA – Sala arena (sem tratamento)

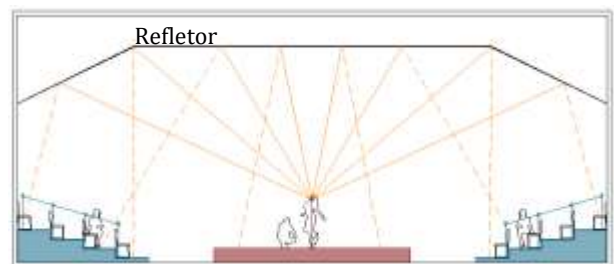


Figura 4: Corte AA - Sala arena (correção da forma)

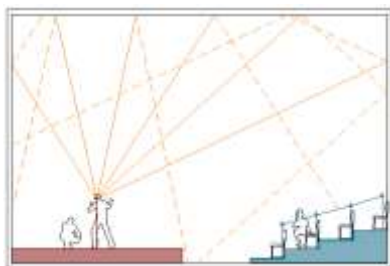


Figura 3: Corte BB – Sala arena (sem tratamento)

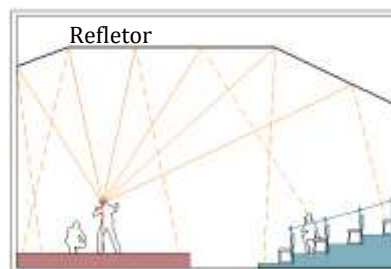


Figura 5: Corte BB – Sala arena (com tratamento)

3.2 Simulação dos modelos

O desenho inicial do modelo geométrico foi feito no software Autocad 3D, através do comando *3dpolyline*. A construção das superfícies deve respeitar a lei de Ampère, onde as faces são voltadas para dentro da sala. Cada plano foi desenhado em uma camada ou *layer* e associado a um material específico. Cada material posteriormente é associado a um coeficiente de absorção correspondente, de acordo com a Tabela 1 da NBR 12.179/1992 [11]. Por se tratar de um modelo hipotético foram atribuídos materiais usualmente utilizados em salas já projetadas (tabela 2).

Em seguida, o arquivo do Autocad foi salvo em formato *.dxf* a fim de ser exportado para o simulador BRASS. Na importação do arquivo *.dxf* para o simulador, foram gerados arquivos de texto *.txt* com as informações geométricas desenhadas e os *layers*. Esses arquivos de texto podem ser editados para mudança de configuração, se necessário.

Após a importação para o simulador, foram associados os coeficientes de absorção de cada material nas nove bandas de frequência (63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000Hz). Para as bandas que não constavam valores de coeficientes na referência utilizada [10], foram repetidos os valores das bandas adjacentes. Dados como temperatura média, umidade e pressão atmosférica também foram inseridos no BRASS para a simulação. Os dados utilizados referem-se à cidade do Rio de Janeiro, sendo: temperatura de 21,5°C, umidade relativa de 77% e pressão de 1Pa [12].

Foram inseridos em cada modelo uma fonte sonora central representando fala, com a característica da direcionalidade, conforme seria o posicionamento de um ator no palco voltado para algum lado da plateia. No caso do teatro de palco italiano, o direcionamento foi dado de frente para a plateia única. Também

foram inseridos três receptores em cada modelo, representando espectadores localizados em pontos diferentes da plateia. A escolha do posicionamento de fonte e receptores respeitou os itens destacados da ABNT NBR ISO 3382-1 [13] (figura 6).



Figura 6: Posicionamento da fonte e receptores na Sala arena – Planta baixa da sala crua.

Ao importar o modelo do Autocad 3D em *dxf* para o BRASS, é possível configurar outras informações na interface do simulador. Neste caso, foram ajustadas as direcionalidades de fonte e receptores, inseridos temperatura e pressão atmosférica, configurada a tabela de materiais com seus respectivos coeficientes de absorção e os *layers* foram associados aos materiais.

Inicialmente, as simulações foram feitas a partir de modelos simplificados de salas formando dois grupos: Salas reflexivas com dimensões da planta baixa calculadas pelas proporções de Bolt (tipologias: arena, italiano e passarela), e salas com as mesmas dimensões com acréscimo de refletores de teto com inclinações dispostas de acordo com o melhor desempenho para cada *layout*. Foi feita a simulação de cada uma dessas seis salas separadamente a fim de analisar como os diferentes *layouts* respondem acusticamente em uma sala sem nenhum tipo de tratamento acústico, e como é esta reposta comparativamente entre os modelos com refletores com inclinação projetada. Foram analisados os parâmetros: Tempo de



Reverberação (T60), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C80) e Definição (D50).

Na etapa seguinte, foram simuladas as mesmas salas, desta vez com a inserção de condicionamento acústico em dois setores: materiais com propriedades sonoabsorventes nas paredes e piso, e refletores acústicos no teto. As figuras 7 a 9 ilustram os modelos virtuais nos *layouts* arena, italiano e passarela conforme aparecem no BRASS, onde S01 é a fonte sonora localizada no palco e R01, R02 e R03 são os receptores localizados na plateia.

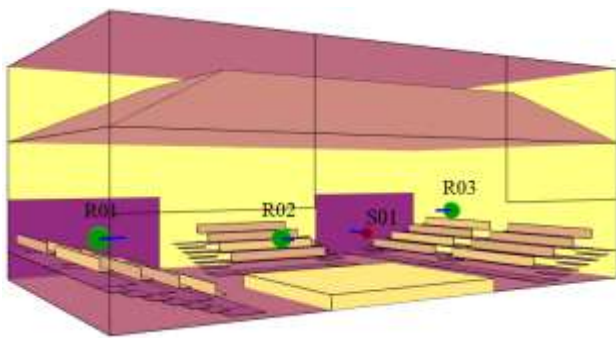


Figura 7: Perspectiva da Sala arena com refletores de teto e absorção nas paredes.

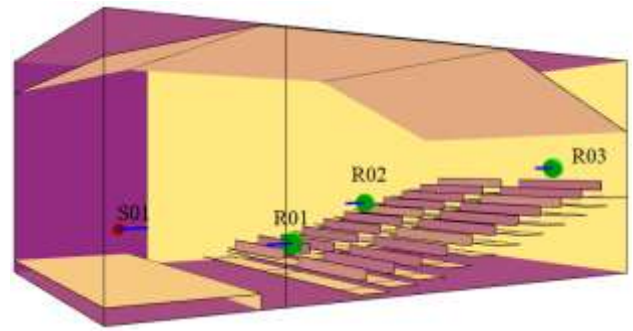


Figura 8: Perspectiva da Sala italiano com refletores de teto e absorção nas paredes.

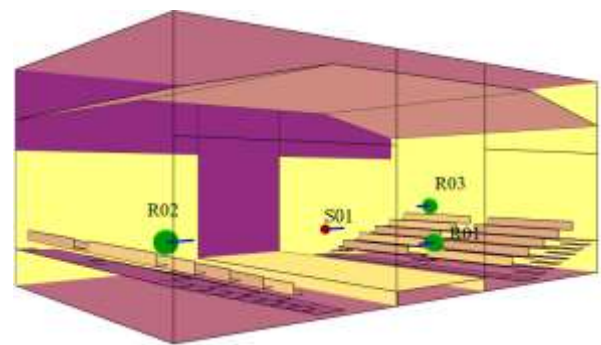


Figura 9: Perspectiva da Sala passarela com refletores de teto e absorção nas paredes.

Tabela 2: Relação das superfícies, materiais e coeficientes de absorção utilizados nas simulações.

Layer	Material	Coeficientes de absorção de acordo com a frequência								
		62Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz	8KHz	16KHz
PALCO	Madeira	0.04	0.04	0.04	0.06	0.12	0.10	0.17	0.17	0.17
PAREDES, TETO E PISO (Sem tratamento)	Concreto rebocado pintado	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.07	0.07
PAREDES (Com correção de TR)	Madeira compensada 3mm a 50mm da parede	0.25	0.25	0.34	0.18	0.10	0.10	0.06	0.06	0.06
PISO CARPETE	Carpete de 5mm de espessura	0.04	0.04	0.04	0.15	0.29	0.52	0.59	0.59	0.59
POLTRONAS OCUPADAS	Tecido acolchoado	0.28	0.28	0.28	0.28	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
POLTRONAS VAZIAS	Tecido e pessoa	0.33	0.33	0.33	0.44	0.44	0.46	0.46	0.46	0.46
PAINEL DE ABSORÇÃO	Madeira mineralizada	0.06	0.06	0.17	0.65	0.67	0.43	0.72	0.72	0.72
REFLETORES	MDF 16mm revestido de melamina	0.18	0.18	0.06	0.06	0.06	0.10	0.14	0.18	0.18

Fonte: ABNT NBR 12.179/1992 e IPT, 2021.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações descritos abaixo podem ser observados no gráfico síntese que condensa os valores obtidos dos parâmetros avaliados (Tabela 3).

4.1 Tempo de Reverberação (T60)

Para a análise dos resultados tomou-se por base o valor de Tempo de Reverberação (T60) de 0,9s recomendado por Tisseyre [14] para a frequência de 1000Hz, avaliando uma faixa média correspondente à fala humana.

As salas cruas apresentaram comportamento semelhante com T60 variando entre 3,9 e 4,5s, independente do layout e posição dos receptores, o que caracteriza uma sala com muita reverberação.

Todas as salas onde foram inseridos apenas os refletores de teto em madeira lisa apresentaram redução no T60, mas a maioria ainda distante do valor ideal de 0,9s. Isto se dá, em parte, pela redução do volume interno, visto que a camada de refletores cria uma espécie de segundo teto mais baixo que o pé-direito de 8m com teto em concreto, segundo a especificação na construção do modelo. Além disso, o coeficiente de absorção utilizado para o material dos refletores (0,06) é um pouco superior ao do concreto liso (0,03), o que provoca maior absorção da energia sonora refletida no interior das salas.

Com a inserção da absorção conseguiu-se chegar a valores de T60 bem próximos do valor ideal de 0,9s. Em todas as salas variou-se o local de aplicação das placas sonoabsorventes, de acordo com o melhor desempenho para o layout. Buscou-se usar uma área aproximada de placas de madeira mineralizada, logo de absorção, o que justifica a chegada a valores de T60 próximos, independente do layout.

A seguir, os cenários comparados levaram em consideração apenas as salas com correção de tempo de reverberação (inserção de refletores no teto e absorção nas paredes). Todos os tempos de reverberação ficaram próximos do valor ideal de 0,9s. Os receptores 1 e 2 do *layout* italiano apresentaram tempo de reverberação um pouco superior (1,1s) em relação ao receptor 3 (0,9s). Isto se justifica pelo receptor 3 estar mais próximo das superfícies com material sonoabsorvente, enquanto o 1 e 2 estão um pouco mais distantes dessas superfícies, recebendo maior influência das reflexões sonoras das paredes.

Neste caso, as variações não são muito significativas e não representam um problema na acústica desta sala, mas demonstram como a posição dos espectadores na plateia influenciam na percepção do tempo de reverberação. A avaliação deste parâmetro é importante pois ele se relaciona com as experiências subjetivas do ouvinte na sala. É o parâmetro ao qual se dá mais importância e sua variação de acordo com a frequência está relacionada a outros aspectos como a inteligibilidade sonora.

4.2 Clareza (C80)

Nas salas cruas todos os valores são negativos, o que indica predominância de energia sonora nas reflexões secundárias e sucessivas. Nas salas com a correção da forma se obteve um aumento nos valores de C80. Nos *layouts* arena e passarela ainda se encontram valores negativos. No *layout* italiano os valores com correção já são positivos (entre 0,34 e 0,9dB), o que indica maior energia sonora nas primeiras reflexões.

As salas cruas apresentaram C80 entre -6,88 e -2,19dB, enquanto as salas com refletores apresentaram resultados entre -3,35 e 0,9dB.

Em todos os cenários avaliados a Clareza se mostrou maior nas salas onde foi aplicado



também material sonoabsorvente nas paredes, em relação às salas apenas com refletores de teto, apresentando valores entre 6,6 e 12,6dB.

Essa faixa de valores é favorável para situações que requerem um ambiente sonoramente mais “seco”, ou de maior inteligibilidade. O conceito de inteligibilidade, ou seja, a facilidade para se entender as palavras dentro da sala, também se aplica à música, onde se requer que soe com articulações límpidas. Dessa forma, cada tipo de instrumento ou gênero musical requer uma especificidade acústica do ambiente que pode ser aplicada aos diferentes valores de clareza, conforme observado nos resultados.

Na análise seguinte houve uma variação do C80 em relação à posição do receptor, de acordo com o *layout*. No *layout* arena os resultados para os três receptores foram bem semelhantes. Os três receptores neste *layout* encontram-se espacialmente distribuídos aproximadamente equidistantes em relação à fonte, embora os receptores 2 e 3 encontrem-se nas laterais da fonte direcional e o receptor 1 de frente para ela.

O *layout* italiano apresentou C80 maior para o receptor 3, mais próximo da superfície com absorção, em comparação aos outros dois receptores que se encontram mais próximos da fonte sonora. Já no *layout* passarela os receptores 2 e 3 apresentaram valores maiores, em relação ao receptor 1. Neste caso, o receptor 1 encontra-se mais próximo da fonte sonora, o receptor 2 no meio da plateia e atrás da fonte sonora direcional, e o receptor 3 mais distante da fonte sonora e mais próximo da superfície com absorção.

4.3 Definição (D50)

A partir da análise comparativa do parâmetro D50 entre as salas cruas e as salas com correção da forma, observa-se que houve aumento da definição em todas as salas com refletores. As

salas cruas apresentaram valores entre 13 e 31%, enquanto as salas com refletores valores entre 21 e 46% para a frequência de 1000 Hz.

Isto se justifica porque a redução do tempo de reverberação geralmente está associada ao aumento dos parâmetros C80 e D50. Estes parâmetros estão correlacionados e diretamente ligados ao aumento da quantidade de absorção na sala, gerando uma concentração maior de energia nas primeiras reflexões.

Com o acréscimo de absorção nas paredes das salas, observa-se um aumento geral da definição em relação às salas só com os refletores de teto. As salas com correção no tempo de reverberação (refletores + absorção) apresentaram valores de D50 predominantemente entre 65 e 91%. Este aumento implica também no aumento da inteligibilidade da fala nestas salas.

Na comparação entre os diferentes *layouts* e posições dos receptores nas salas, o receptor 3 do *layout* italiano apresentou D50 um pouco superior em relação aos outros 2 receptores, o que se justifica pelo tempo de reverberação um pouco mais baixo, por estar mais próximo das superfícies com material sonoabsorvente. Em contraste, o receptor 1 do *layout* passarela apresentou D50 um pouco inferior em relação aos receptores 2 e 3, o que se justifica por ser o receptor mais distante das paredes da sala.

4.4 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

Os *layouts* italiano e passarela apresentaram comportamento bem semelhantes, tanto para as salas cruas quanto para as com correção na forma. Já o *layout* arena apresenta maior diferença de comportamento para as salas cruas, com valores maiores de EDT em relação aos outros *layouts*.

Nesta etapa, o *layout* arena é o que mais difere dos demais, apresentando para os receptores 2 e 3 valores ainda bem altos em relação ao receptor

1 e em relação aos outros *layouts* que apresentaram redução semelhante de EDT.

A inserção dos refletores com inclinações que geram um formato de teto projetado para melhor distribuição dos raios sonoros refletidos no interior da sala proporciona a redução nos valores de EDT.

Em todos os cenários avaliados os valores de EDT se mostraram menores nas salas com correção de tempo de reverberação, em relação às salas cruas. Como o EDT é um parâmetro que está diretamente relacionado ao tempo de reverberação, o aumento de absorção nas superfícies que reduz o tempo de reverberação, consequentemente reduz também os valores de EDT. Neste caso, os valores para as salas com refletores + absorção ficaram bem abaixo de 1, em média 0,57. Este resultado gera a percepção de maior proximidade dos receptores à fonte sonora das salas, e como o foco da acústica destas salas é a fala humana esta característica é positiva e não seria um problema.

Analizando apenas as salas com correção de TR (refletores + absorção), a figura 81 mostra especificamente como a configuração fonte-receptor influencia no valor do EDT, variando ao longo da sala.

Aqui cabe destacar os resultados dos receptores 2 do *layout* passarela e do receptor 3 do italiano que apresentaram valores de EDT um pouco inferiores à média. O receptor 2 (passarela) é o único dos três *layouts* que está posicionado atrás da fonte sonora, que possui direcionalidade para o sentido oposto. O receptor 3 do italiano encontra-se mais próximo das superfícies com absorção e tempo de reverberação ligeiramente inferior aos outros receptores deste *layout*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fundamentação teórica deste trabalho justificou a escolha de trabalhar com as salas multiconfiguracionais, a partir do entendimento que na arquitetura teatral são as tipologias bastante exploradas no contexto atual brasileiro.

Nos resultados sintetizados na Tabela 5 observa-se que os valores de tempo de reverberação (T60) reduziram quanto mais próximo das superfícies de absorção os receptores estavam. Os valores de Clareza (C80) e Definição (D50) aumentaram quanto mais próximos os receptores se localizavam das superfícies de absorção. No caso da Clareza isso indica salas com o som mais “seco” e maior inteligibilidade sonora. Para a Definição indica melhor compreensão do som falado, com mais nitidez nas sílabas. O tempo de decaimento inicial (EDT) apresentou valores menores para os receptores posicionados atrás da fonte sonora e próximo das superfícies com absorção. Esta redução indica a percepção de maior proximidade do receptor à fonte sonora e alta inteligibilidade.

A análise por meio das simulações que envolveu a volumetria e dimensões do espaço, a inserção de planos refletores, ajustando a forma das superfícies refletoras e o acréscimo de absorção, demonstrou o desempenho acústico em cada cenário chegando a um resultado satisfatório dos parâmetros na comparação ao que a bibliografia consagrada recomenda.

O simulador BRASS apresentou fácil operacionalidade e custo computacional, gerando as simulações em poucos minutos, variando de acordo com o nível de complexidade da sala simulada. A simplificação dos modelos geométricos contribuiu para este desempenho.

Pode-se concluir que o projeto de arquitetura que exige soluções acústicas deve ser pensado desde a sua concepção volumétrica. O condicionamento acústico que usualmente se dá no tratamento das superfícies internas, pode se dar desde o projeto da forma e das dimensões, que também influenciam no desempenho sonoro do espaço, conforme demonstrado aqui através da acústica geométrica e dos cenários simulados nos modelos virtuais.

**Tabela 3:** Síntese dos resultados.

Etapas de simulação	Parâmetro	
	T60 - Tempo de reverberação	
1ª etapa	Salas cruas (sem tratamento)	entre 3,9 e 5,4s
	Com correção de forma (refletores)	entre 2,7 e 4,4s
2ª etapa	Com correção de forma (refletores)	entre 2,7 e 4,4s
	Com correção do T60 (com absorção)	entre 0,81 e 1,1 s
3ª etapa	Análise do layout (salas com reflexão + absorção)	Menor TR em receptores mais próximos das superfícies de absorção
	Posição dos receptores	
C80 - Clareza		
1ª etapa	Salas cruas (sem tratamento)	entre -6,9 e -2,2dB
	Com correção de forma (refletores)	entre -3,4 e 0,9dB
2ª etapa	Com correção de forma (refletores)	entre -3,4 e 0,9dB
	Com correção do T60 (com absorção)	entre 6,6 e 12,6dB
3ª etapa	Análise do layout (salas com reflexão + absorção)	Maior C80 em receptores mais próximos das superfícies de absorção
	Posição dos receptores	
D50 - Definição		
1ª etapa	Salas cruas (sem tratamento)	entre 13 e 31%
	Com correção de forma (refletores)	entre 21 e 46%
2ª etapa	Com correção de forma (refletores)	entre 21 e 46%
	Com correção do T60 (com absorção)	entre 65 e 91%
3ª etapa	Análise do layout (salas com reflexão + absorção)	Maior D50 em receptores mais próximos das superfícies de absorção
	Posição dos receptores	
EDT - Tempo de decaimento inicial		
1ª etapa	Salas cruas (sem tratamento)	entre 4,9 e 6,8
	Com correção de forma (refletores)	entre 2 e 6,5
2ª etapa	Com correção de forma (refletores)	entre 2 e 6,5
	Com correção do T60 (com absorção)	em média de 0,57
3ª etapa	Análise do layout (salas com reflexão + absorção)	Receptores posicionados atrás da fonte sonora e próximo de superfícies com absorção apresentaram menor EDT
	Posição dos receptores	



9. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento PROBRAL-2018918853P.

REFERÊNCIAS

- [1] LONG, Marshall. Architectural Acoustics. California: Elsevier, 2006.
- [2] D’ORAZIO, Dario et al. The aesthetics of the Bayreuth Festspielhaus explained by means of acoustic measurements and simulations. Science Direct, Bologna, 8 mar. 2018.
- [3] JORGE, Robson. Teatros multiconfiguracionais: o espaço cênico experimental como um jogo de armar. Rio de Janeiro: FUNARTE, 2017.
- [4] EVEREST, F. Alton & POHLMANN, Ken C., Master Handbook of Acoustics. 5 ed – McGraw-Hill, 2009.
- [5] CARVALHO, Bianca Q. Afinação da forma: a metamorfose acústica no espaço cênico experimental. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 123. 2022.
- [6] TORRES, J. C. B. BRASS - Brazilian Room Acoustic Simulator. XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Porto Alegre, 2018.
- [7] SERRONI, José Carlos. Oficina arquitetura cênica. 3 ed – Rio de Janeiro: Funarte, 1997.
- [8] BOLT, R. Normal frequency statistics for rectangular rooms. The journal of the Acoustical Society of America, 19(1):79-90, 1947.
- [9] BOLT, R. Note on normal frequency statistics for rectangular rooms. The journal of the Acoustical Society of America, 18(1):130-133, 1946.
- [10] BRANDÃO, Eric. Acústica de Salas: Projeto e Modelagem. 1a ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) NBR 12.179: Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.
- [12] INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, 2021. Disponível em:< <https://portal.inmet.gov.br/>> Acesso em: Out de 2021.
- [13] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION (2009) ISO 3382-1:Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces. Suíça, 2009.
- [14] TISSEYRE, Alain. Concert Halls and Opera Houses Acoustic Design. França: planete-acoustique, 2009.