

Adequação acústica do Teatro Armando Gonzaga por meio de simulação computacional

Fagerlande, G.¹ ; Niemeyer, M. L.² ; Torres, J. C. B.³ 

^{1,2}Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, {guilhermefagerlande, dobarulhoproarj}@gmail.com

³Programa de Engenharia Elétrica/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, julio@poli.ufrj.br

Resumo

Raramente os teatros são projetados para uso múltiplo, entretanto aqueles situados em áreas carentes de equipamentos culturais acabam por ser usados para abrigar múltiplos usos, nem todos previstos em projeto. Porém, cada uso demanda características acústicas ideais distintas. O Teatro Armando Gonzaga foi projetado pelo arquiteto Affonso Eduardo Reidy e é o único equipamento cultural no bairro de Marechal Hermes. Desde sua inauguração em 1954 tem sido utilizado para diferentes finalidades, como peças de teatro, dança, música acústica e música amplificada. O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar a qualidade acústica e propor adequações no Teatro Armando Gonzaga, por meio de simulação computacional. Foram realizadas medições acústicas e geométricas no interior do teatro para a elaboração e validação de um modelo de simulação acústica. As medições acústicas realizadas no teatro mostram que as características atuais não atendem, totalmente, ao desempenho acústico requisitado para as apresentações neste equipamento cultural. Após validação do modelo, foram investigadas soluções que adequassem o teatro a dois tipos de uso: da música acústica e da palavra. Como os parâmetros acústicos requisitados para cada finalidade não são os mesmos, propôs-se a utilização de elementos arquitetônicos flexíveis para a sala. Cada cenário foi então simulado e os resultados mostram que estas adequações são possíveis e podem melhorar o condicionamento acústico da edificação, tanto para palavra quanto para música acústica, atendendo aos parâmetros acústicos requeridos, mas respeitando as suas características originais.

Palavras-chave: acústica de salas, simulação acústica, parâmetros de qualidade acústica.

PACS: 43.20.Dk, 43.55.-n, 43.55.Br, 43.55.Fw, 43.55.Ka.

Acoustic adequacy of Armando Gonzaga Theater through computer simulation

Abstract

Theaters are rarely designed for multiple uses, however those located in areas lacking other cultural facilities invariably end up being used to house varied artistic presentations, not all of which were foreseen in the building's original design and construction. However, each use demands different ideal acoustic characteristics. In most cases, such rooms have a fixed configuration which only serves one type of use or does not perfectly fit any type of use. The Armando Gonzaga Theater was designed by the architect Affonso Eduardo Reidy and is the only cultural facility in the neighborhood of Marechal Hermes, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Since its inauguration in 1954, it has been used for different purposes, such as plays, dances, acoustic music and amplified music. The general objective of this work is to evaluate through computer simulation the acoustic quality to Teatro Armando Gonzaga and propose respective adjustments. Acoustic and geometric measurements were made inside the theater for the elaboration and validation of an acoustic simulation model. The acoustic measurements carried out in the theater demonstrate that the current characteristics do not fully meet the acoustic demands required for the performances in this cultural environment. After validating the model, solutions were investigated to adapt the theater for two types of use: acoustic music and speech. As the acoustic parameters required for each purpose are not the same, flexible architectural elements were proposed for the room. Each scenario was then simulated and the results show that these adjustments are both possible and should improve the building's acoustic conditioning both for speech and for acoustic music, thus meeting the required acoustic parameters while respecting their original characteristics.

Keywords: room acoustics, acoustic simulation, acoustic quality parameters.

1. INTRODUÇÃO

O Rio de Janeiro é uma capital brasileira com significativa concentração de atividades artísticas. Em função disso, possui diversos equipamentos culturais destinados à música, teatro, cinema etc. Muitos destes equipamentos possuem não só relevância cultural, mas também reconhecimento histórico. Um dos representantes da arquitetura carioca e brasileira foi o arquiteto Affonso Eduardo Reidy, com projetos de reconhecida excelência como o Museu de Arte Moderna do Rio, o Parque do Flamengo, o Conjunto Habitacional do Pedregulho e o Conjunto Habitacional Marquês de São Vicente.

Enquanto todos os equipamentos culturais encontravam-se no centro e na zona sul da cidade, Reidy, funcionário da prefeitura, projetou um pequeno teatro para uma população com menor oferta de lazer e cultura: o Teatro Armando Gonzaga. O teatro, inaugurado em 1954 no bairro de Marechal Hermes, zona norte do Rio de Janeiro, teve também paisagismo de Burle Marx e painéis das fachadas de Paulo Werneck [1]. O teatro pertencia à Prefeitura do Rio de Janeiro e, após a fusão do Estado da Guanabara com o Estado do Rio de Janeiro, passou a pertencer ao Estado, hoje sob a direção da Fundação de Artes do Estado do Rio de Janeiro (FUNARJ) [2]. Pela sua importância histórica, o teatro foi tombado em 1989 pelo Instituto Estadual de Patrimônio Cultural (INEPAC). Em 2015 os painéis da fachada foram tombados pela Prefeitura do Rio de Janeiro. A Figura 1 apresenta uma a vista externa atual do teatro.



Figura 1: Vista do Teatro Armando Gonzaga.

Sendo o Teatro Armando Gonzaga uma obra arquitetônica de importância histórica, e ao mesmo tempo utilizada para diversas finalidades, este trabalho tem por objetivo apresentar o estudo para adequação acústica do teatro, considerando o uso tanto para música quanto para palavra. Contudo, o principal desafio de adequações consiste em respeitar as exigências do tombamento do edifício e elaborar soluções de baixo custo, considerando que trata-se de investimento público.

Para analisar se o teatro encontra-se acusticamente adequado para uso simultâneo de música e de palavra, primeiramente foram levantadas suas características acústicas, por meio de medições de respostas impulsivas no interior do teatro. Em seguida, os valores dos parâmetros de qualidade acústica foram comparados com aqueles considerados na literatura como ideais. Ao se verificar a inadequação do teatro, passou-se a uma etapa de elaboração de projeto por simulação acústica, que consistiu de uma modelagem acústico-geométrica do espaço, com validação de modelo e simulação de resultados para cada cenário.

2. AVALIAÇÃO DO ESTADO ATUAL DA SALA

A fim de analisar as características acústicas atuais do teatro, foram realizadas medições de nível de pressão sonora e de respostas impulsivas. As medições foram realizadas com equipamentos classe 2 (calibrador e sonômetro).

Durante a sessão de medição, verificou-se que o sistema de ar condicionado Split piso-teto era ruidoso e optou-se por medir o ruído residual a fim de determinar o nível de potência sonora da fonte para as medições das respostas impulsivas. O ruído residual foi medido em duas situações: com o sistema de ar ligado e desligado. O descritor acústico utilizado foi o L_{Aeq} (nível de pressão sonora equivalente ponderada em "A"), medido em dois pontos no auditório: um próximo ao palco e outro no fundo do auditório, com duração de 5 minutos cada. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos para cada caso e local de medição. O valor indicado pela ABNT

NBR 10.152: 2017 para o ruído residual no caso de um teatro deve ficar abaixo de 35 dB. Contudo, com o sistema de ar ligado, esse valor encontra-se aproximadamente 20 dB acima do recomendado. Por esse motivo, optou-se por realizar o levantamento das respostas ao impulso com a sala desocupada e com o sistema de ar-condicionado desligado, a fim de se obter melhor relação sinal/ruído nas medições.

Tabela 1: Medições ruído de fundo.

Ponto	AC	$L_{Aeq,5min}$
Próximo palco	Desligado	36 dB
	Ligado	58 dB
Fundo plateia	Desligado	38 dB
	Ligado	58 dB

Foram selecionados 6 locais no auditório (receptores R1 a R6) para a medição de respostas impulsivas, com a fonte sonora (F) no centro do palco, conforme Figura 2. Os parâmetros acústicos foram obtidos em função dessas respostas ao impulso medidas, para cada par fonte-receptor, em conformidade com a norma ISO-3382-1 - Acústica — Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 1: Salas de espetáculos [3]. Foi utilizada placa de áudio ASIO M-AUDIO M-TRACK, o software REW V5.20, microfone ECM-8000 e caixa de som Behringer modelo B212. A fonte sonora utilizada foi direcional devido à indisponibilidade de fonte omnidirecional. O sistema foi calibrado utilizando calibrador classe 2. A fonte foi ajustada para proporcionar nível de pressão sonora ponderada em “A” (*Sound Pressure Level - SPL_A*) de 94 dB a 1 metro do eixo da caixa de som. Dessa forma, com o ruído residual abaixo de 40 dB foi possível uma faixa dinâmica de 54 dB para a medição das respostas impulsivas.

Os parâmetros acústicos obtidos foram o T_{30} , EDT (Tempo de Decaimento Inicial), C_{80} (Clareza) e D_{50} (Definição) em relação a cada faixa de frequência medida. As Figuras 3 a 6 apresentam os gráficos para cada parâmetro acústico para cada receptor por bandas de oitava (de 125 Hz a 4 kHz).

Analisando a Figura 3 é possível observar que há pouca variação do tempo de reverberação

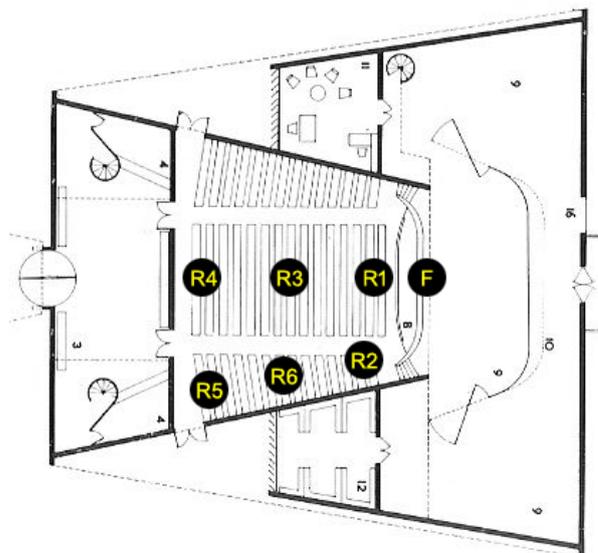


Figura 2: Pontos de medição das respostas impulsivas.

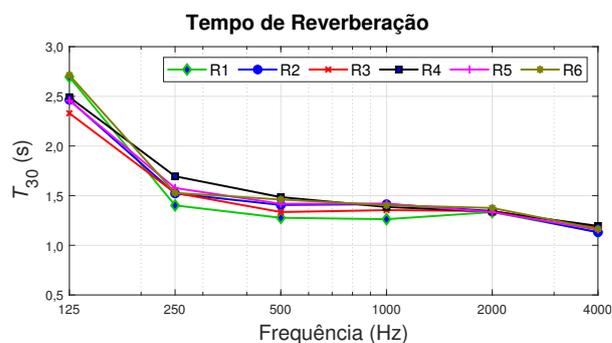


Figura 3: Parâmetro T_{30} medido.

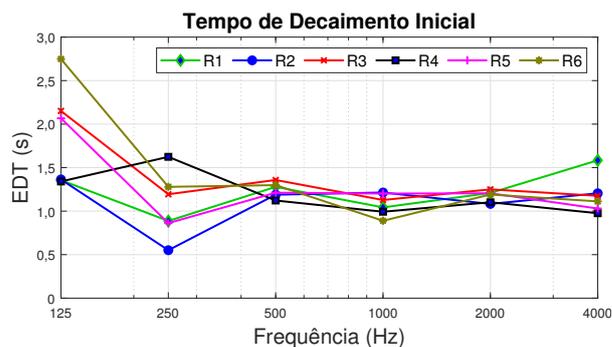


Figura 4: Parâmetro EDT medido.

entre os locais medidos, sendo o T_{30} aproximadamente constante em 1,5 s para a faixa de 250 Hz a 2 kHz, com grande elevação para faixa de 125 Hz e decréscimo para altas frequências. Comportamento similar é observado para o parâmetro EDT (Figura 4), com maior variação na faixa de 250 Hz. Isso mostra que a reverberação é homogênea na plateia, com decaimento inicial de energia também similares.

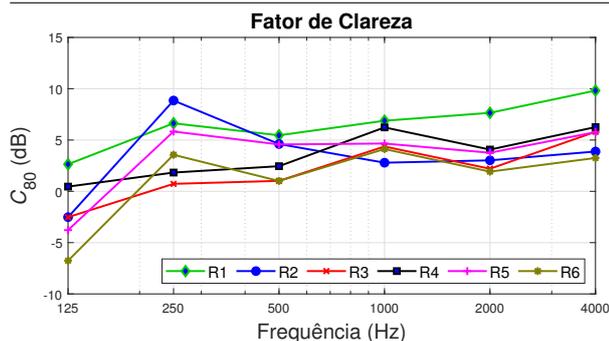


Figura 5: Parâmetro C_{80} medido.

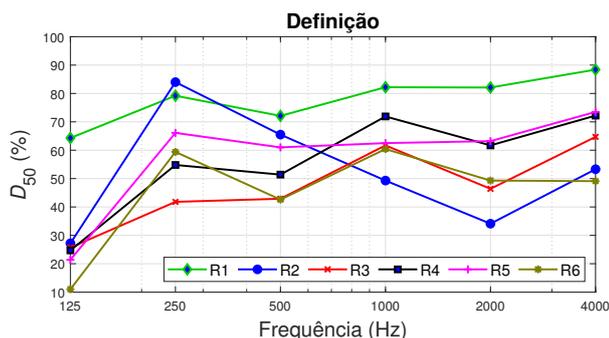


Figura 6: Parâmetro D_{50} medido.

Ao analisar os demais parâmetros relacionados à distribuição temporal de energia nas respostas impulsivas, observa-se que o comportamento em cada receptor varia consideravelmente. Em teatros, geralmente, espera-se que quanto mais próximo à fonte, maior seja o nível de energia direta em relação à energia do campo reverberante, se as durações das respostas impulsivas forem aproximadamente iguais (decaimentos de energia). Contudo, nesse teatro esse padrão não é observado. Na Figura 3 pode-se observar que o decaimento no R4 é mais lento do que no R1, o que contribui para uma variação também dos parâmetros C_{80} e D_{50} . O R1, mais próximo à fonte, é o que possui maiores valores de Clareza e Definição. Os receptores R4 e R5 (mais distantes da fonte) possuem valores intermediários, sendo os receptores R3 (centro da plateia) e R6 (lateral/meio) os de menor valor. Isso mostra que o fator de clareza e a definição no centro da plateia são menores ou “piores” do que no fundo. Por outro lado, é esperado que os receptores próximos às paredes possuam um acréscimo nos valores de Clareza e Definição, devido à incidência de reflexões primárias, que elevam a energia na parte inicial da resposta ao impulso. Esse padrão é observado para os recep-

tores R2, R5 e R6. Dessa forma, em função de uma variação ampla nos parâmetros Clareza e Definição, observa-se que há uma necessidade de adequação acústica no teatro.

A adequação também depende do tempo de reverberação do teatro. Porém, o teatro não foi medido nas suas condições de uso normal, ou seja, com a presença de plateia. Em uma situação de projeto, procura-se fazer com que os assentos possuam um coeficiente de absorção aproximado de uma pessoa. Isso evita a necessidade da presença de público durante a medição e a variação na ocupação do local não trará consequências significativas para o desempenho acústico. No caso do teatro Armando Gonzaga, os assentos são de couro, cujas características de absorção diferem das de um assento ocupado. Dessa forma, os tempos de reverberação medidos e os ideais, segundo as normas, não são comparáveis. Como alternativa, utilizam-se programas de simulação acústica, que possibilitam avaliar a influência da taxa de ocupação na plateia.

2.1 Simulação acústica

A fim de avaliar as características acústicas do teatro considerando uma ocupação de 2/3 da plateia, foi utilizado um simulador acústico BRASS (*Brazilian Room Acoustic Simulator*), em desenvolvimento na Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro [4]. O BRASS utiliza o método de traçado de raios [5] para obtenção das respostas impulsivas, mono e biauriculares, nos receptores, e permite obter os principais parâmetros acústicos de qualidade da sala, com audibilização. O *software* calcula T_{60} , T_{30} , T_{20} , EDT, C_{80} , D_{50} , TC, Nível de Pressão Sonora Global (SPL) e Ponderado em A, para 9 faixas de frequência nas oitavas de 63 Hz a 16 kHz. A audibilização no BRASS é obtida pela convolução das respostas ao impulso biauriculares simuladas com arquivos de áudio anecoicos. As respostas biauriculares são geradas associando aos receptores padrões de direcionalidade de cabeças artificiais contendo Funções de Transferência Relativas à cabeça (HRTFs - *head-related transfer function*).

A primeira etapa para obter um modelo acústico, que corresponda ao teatro com dada taxa de ocupação, consiste no levantamento geométrico do Teatro. Em seguida, é necessário verificar se o modelo da sala vazia produz resultados similares aos medidos nas mesmas condições (validação do modelo). Finalmente, sobre esse modelo validado, são realizadas propostas de alterações geométricas e/ou acústicas para adequar o Teatro aos usos propostos, considerando a taxa indicada de ocupação.

2.1.1 Levantamento geométrico

Foi realizado então o levantamento com trena eletrônica em visita ao Teatro Armando Gonzaga, conferidas as medidas com as plantas encontradas no INEPAC, e realizados os desenhos em Autocad. No levantamento foram também identificados os materiais de revestimento interno da sala.

O modelo geométrico inicial, usado para validação, foi construído a partir dos desenhos em Autocad, produzidos na etapa inicial. Todas as superfícies internas do auditório (paredes, piso, teto, palco) foram representadas por polígonos (por meio do comando *3dpolyline* do Autocad), nos quais a normal do plano define a face refletora da superfície [6].

2.1.2 Validação do modelo

O simulador acústico BRASS possibilita converter dados dos arquivos em formato DXF (CAD) para um formato próprio, que pode ser lido em editores de texto. No processo de conversão, as informações geométricas, tais como os planos, fontes e receptores são separadas conforme as camadas (*layers* do arquivo DXF. No arquivo de configuração do BRASS, os coeficientes de absorção de cada material foram associados por camadas, para nove bandas de oitava (de 63 Hz a 16 kHz), conforme descrito na Tabela 2. Os valores da tabela foram obtidos da norma ABNT NBR 12.179: 1992 [7] e de Carvalho [8]. Os valores das bandas não existentes nas referências foram repetidos das bandas adjacentes. Foram também definidas as características de direcionalidade das fontes e dos receptores. Os mi-

crofones foram definidos com captação omnidirecional, enquanto a fonte sonora foi definida com a direcionalidade de uma caixa acústica de dois alto-falantes [9].

A potência da fonte foi ajustada para produzir um nível de pressão sonora (SPL) de 94 dB a um metro de distância, no eixo da caixa, que ficou direcionado para o centro geométrico da sala, conforme o procedimento de medição. A simulação foi realizada emitindo 20.000 raios acústicos da fonte, valor adequado para as características da sala [10]. A versão atual do BRASS não conta com método para cálculo da difusão. Portanto, foram utilizados apenas os coeficientes de absorção, sem considerar o espalhamento.

A Figura 7 apresenta a visualização do modelo tridimensional da sala no BRASS, em que cada material está associado a uma cor, a fonte sonora S01 está representada como um ponto vermelho e os receptores R1 a R6 representados por esferas verdes. A direção do eixo da fonte está representada numa linha azul.

A partir das respostas impulsivas, é possível calcular os parâmetros de qualidade acústica e realizar uma comparação entre os resultados de medição e de simulação. Todos os parâmetros foram calculados sobre as respostas impulsivas, utilizando o pacote de rotinas de acústica fornecidos pelo Instituto de Acústica Técnica (ITA-Aachen) para Matlab [11]. Dessa forma, evita-se a possibilidade de usar diferentes algoritmos para o cálculo dos parâmetros entre respostas medidas e simuladas [12].

Outro fator que influencia nos resultados das simulações é a escolha dos materiais. Como existem diversos tipos de cortinas e pisos de madeira nas referências, com diferentes coeficientes de absorção α por banda, foi necessário realizar um ajuste para avaliar qual dos tipos de materiais correspondiam aos existentes na sala real.

Após os ajustes dos materiais e respectivos coeficientes de absorção, os resultados do Tempo de reverberação T_{30} obtidos por simulação e por medição ficaram semelhantes. A Figura 8 apresenta um exemplo da comparação entre os

Tabela 2: Materiais da sala no estado atual.

Material	Ref.	Elemento	Coeficientes de absorção por banda de oitava					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Cortiça 8mm	[8]	Paredes	0,08	0,23	0,37	0,34	0,30	0,47
Cortina	[7]	Palco	0,25	0,33	0,40	0,50	0,60	0,60
Emboço parede	[7]	Paredes	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Emboço teto	[7]	Teto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Piso madeira	[8]	Palco	0,20	0,15	0,13	0,12	0,09	0,06
Piso vinílico	[7]	Piso aud.	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Poltronas couro	[8]	Auditório	0,09	0,12	0,15	0,15	0,11	0,07
Porta madeira	[7]	Aud. / palco	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10

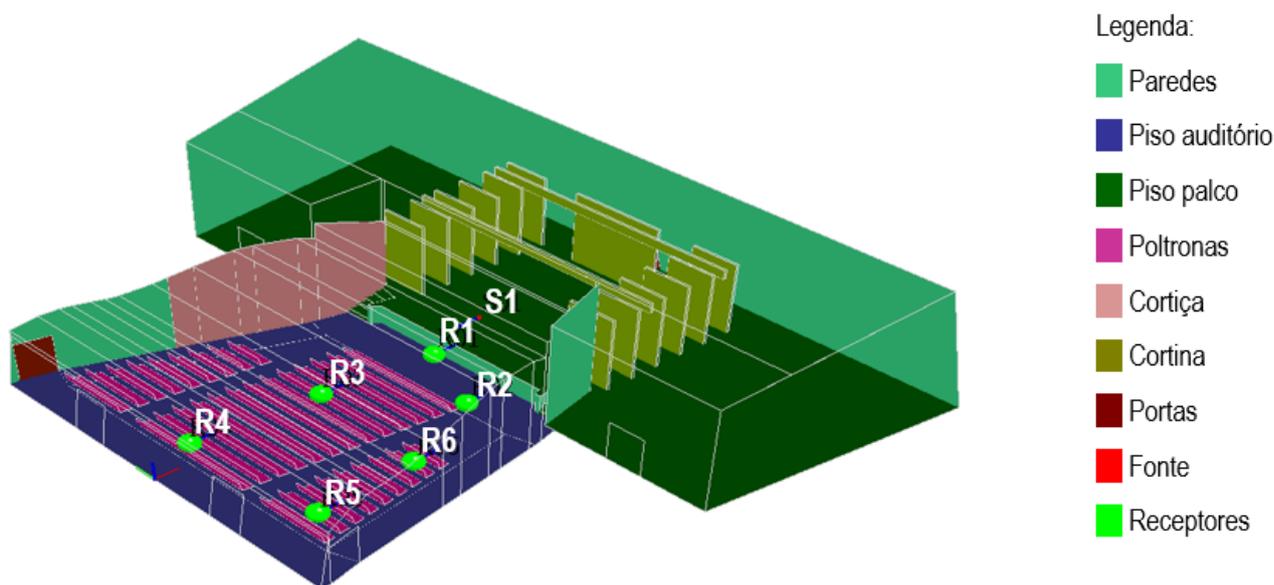


Figura 7: Modelo da sala existente no BRASS.

valores medidos e simulados do Tempo de reverberação (T_{30}) nas bandas de oitava, para os receptores R1 e R3, que apresentaram as maiores discrepâncias de Clareza. Em geral, todos os valores simulados ficaram abaixo dos valores medidos para a faixa de 125 Hz, enquanto os valores simulados em 250 Hz ficaram ligeiramente superiores aos valores medidos. Isso ocorre devido à menor precisão do método de traçado de raios para baixas frequências, por não considerar os efeitos ondulatorios. Para as médias e altas frequências os valores simulados ficaram, na maioria dos casos, dentro da faixa de $\pm 5\%$ da “diferença apenas perceptível” (*Just Noticeable Difference - JND*) para o Tempo de reverberação [13].

As Figuras 9 e 10 apresentam as comparações

entre os valores medidos e simulados para os parâmetros EDT e C_{80} , respectivamente, nos receptores R1 e R3.

A título de ilustração, a Figura 11 apresenta a comparação dos módulos das Respostas ao Impulso medida e simulada para os receptores R1 e R4, em dB (módulo, ref. $20\mu\text{Pa}$), podendo ser observado o mesmo padrão de decaimento global de energia.

Dessa forma, considerou-se que o modelo acústico encontra-se validado e representativo do cenário atual do Teatro.

2.2 Simulação da sala ocupada

Para avaliar a adequação do Teatro aos usos propostos de música e de palavra, foi realizada

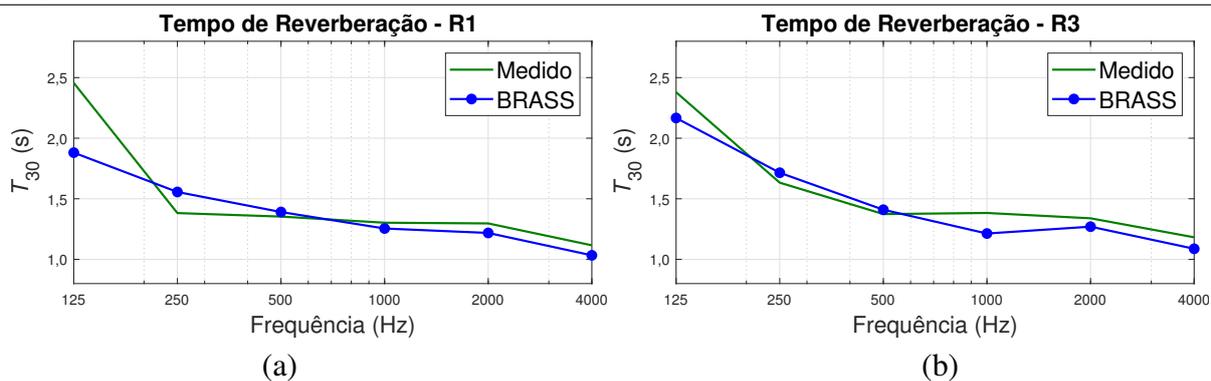


Figura 8: T_{30} - (a) R1 e (b) R3.

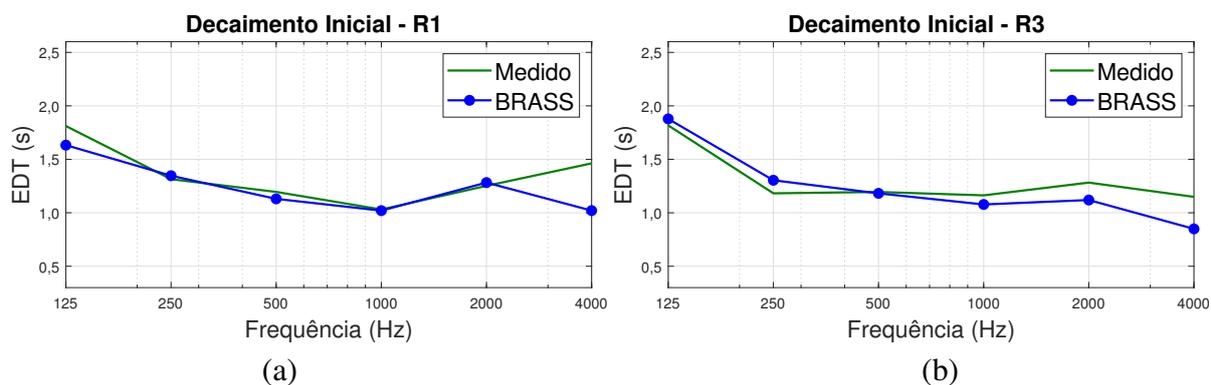


Figura 9: EDT - (a) R1 e (b) R3.

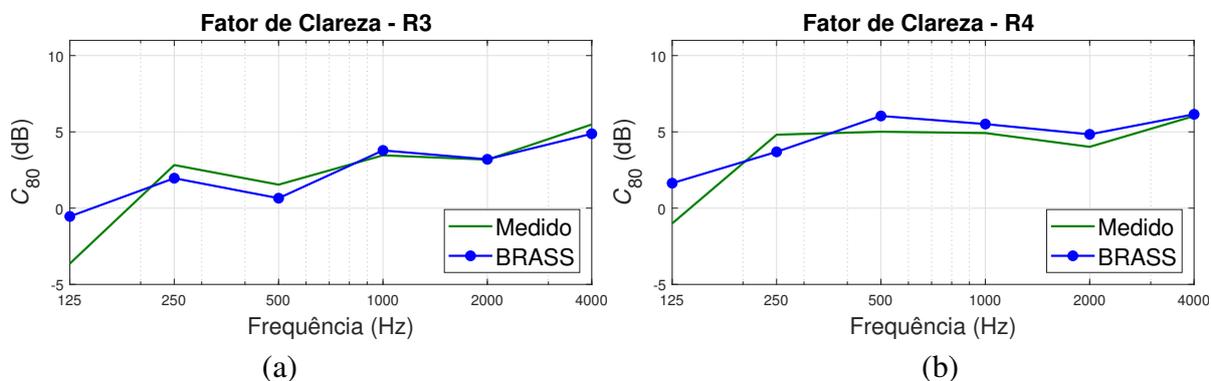


Figura 10: C_{80} - (a) R3 e (b) R4.

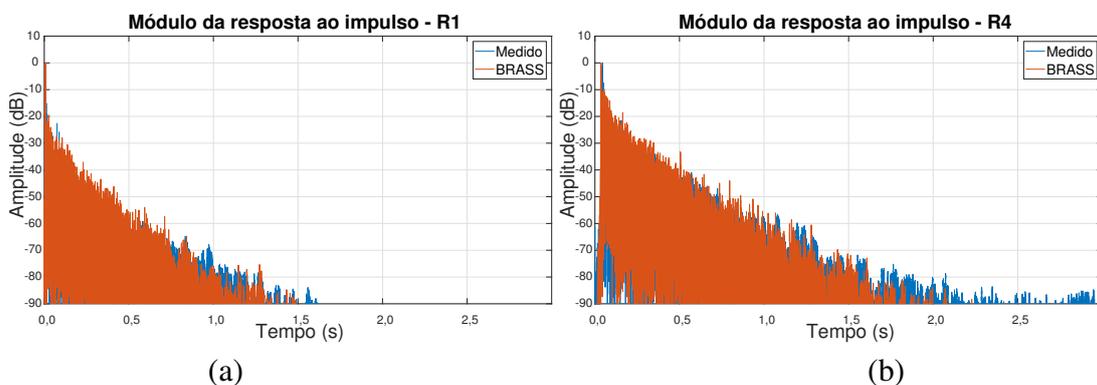


Figura 11: Módulo da resposta ao impulso - (a) R1 e (b) R4.

Tabela 3: Coeficientes de absorção para plateia.

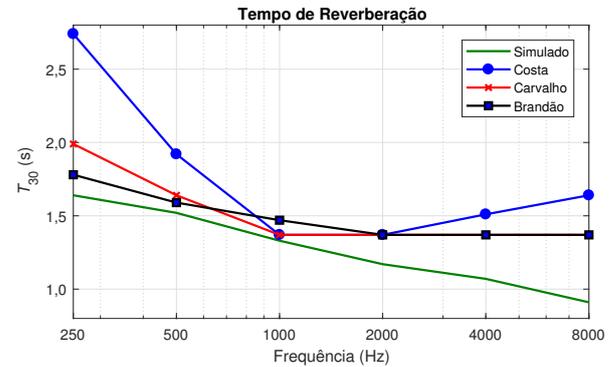
Material	Referência	Taxa de ocupação	Coeficientes de absorção por banda de oitava					
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Poltronas couro vazias	[8]	1/3	0,09	0,12	0,15	0,15	0,11	0,07
Poltronas ocupadas	[7]	2/3	0,33	0,39	0,44	0,45	0,46	0,46
Ocupação 2/3	—	3/3	0,25	0,30	0,34	0,35	0,34	0,33

nova simulação considerando a plateia com 2/3 de ocupação, buscando reproduzir uma situação da sala em funcionamento. A Tabela 3 apresenta os coeficientes de absorção utilizados para produzir uma combinação de materiais que corresponde a 2/3 de poltronas ocupadas e 1/3 de poltronas vazias. Os coeficientes obtidos com essa ponderação (“Ocupação 2/3”) foram então usados na simulação.

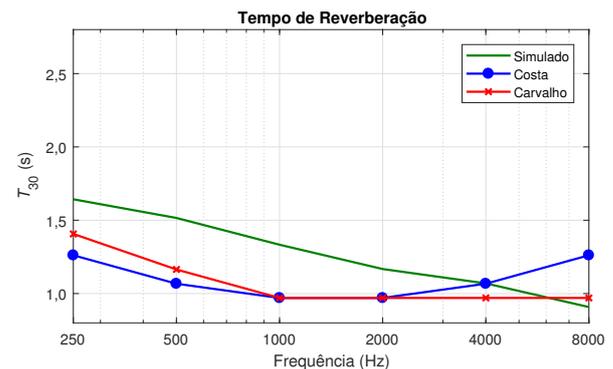
O parâmetro utilizado para essa avaliação foi o tempo de reverberação, por ser o mais amplamente utilizado e estar diretamente relacionado com o fator de clareza [14]. Na Figura 12(a) são comparados os valores de tempo de reverberação considerados “ideais” – segundo Costa [15], Carvalho [8] e Brandão [16], com os obtidos da simulação, para uso musical. Nesse caso, a sala deveria ter um tempo de reverberação maior, principalmente nas baixas e altas frequências. A mesma análise foi realizada para palavra, cujos valores simulados podem ser comparados com valores ideais para fala na Figura 12(b), segundo Costa [15] e Carvalho [8]. Para o uso da palavra, o tempo de reverberação deveria ser menor para as baixas e médias frequências. Dessa forma, verifica-se que o Teatro não possui características de reverberação adequadas nem para música nem para palavra.

3. PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO

Nessa etapa, o principal objetivo é propor intervenções que adéquem a sala aos dois usos. Sendo um edifício tombado, as propostas devem considerar intervenções independentes e removíveis, se necessário, de forma a preservar a arquitetura do teatro. Nesse sentido, o uso de painéis deslizantes nas paredes laterais possibilitaria duas configurações: uma com maior absorção da energia sonora, para uso para pa-



(a)



(b)

Figura 12: Comparação entre o T_{30} obtido para uma ocupação de 2/3 da plateia, com os tempos de reverberação considerados ideais para (a) música e (b) palavra.

lavra, e outra com maior reflexão, para uso em espetáculos musicais. Este sistema de painéis duplos possui para cada módulo um painel fixo e outro móvel que, de acordo com a finalidade, proporcionam baixa absorção sonora (com duas placas de gesso para música acústica), ou maior absorção sonora (com uma placa de gesso e outra de madeira perfurada, para o caso da palavra). A Figura 13 mostra o detalhe de um módulo deste sistema. A montagem dos painéis com inclinação em relação à parede visa diminuir o caminho percorrido pelo som até os espectadores, principalmente os que ficam no

fundo.

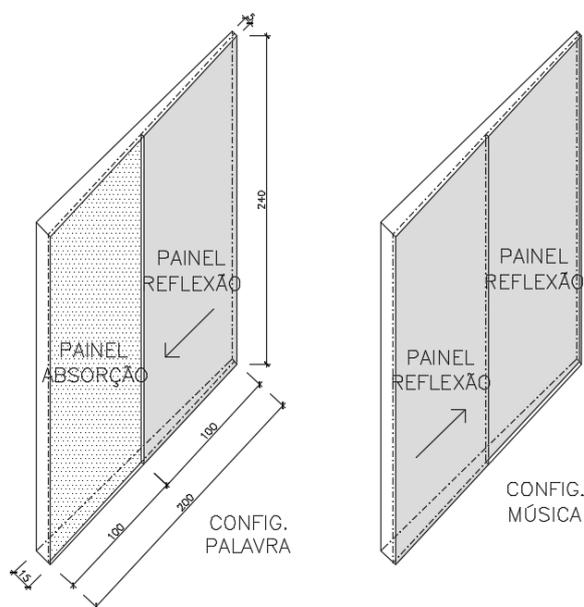


Figura 13: Módulo de painéis de parede.

Para as paredes do fundo do auditório também foram propostos painéis perfurados, absorven-

tes, com uma configuração fixa, tanto para música quanto palavra. No fundo do palco foi proposto painel refletor de placas de gesso, para projetar o som para o auditório, podendo estas serem com relevos que ajudam na difusão do som além da reflexão.

Para palavra, além dos painéis laterais configurados para absorção, foi proposto um sistema de forro removível com tecido de poliéster translúcido resistente ao fogo, que poderá ser esticado sobre o auditório através de estrutura independente, assim como duas cortinas que deverão ser abertas nas coxias do palco, e fechadas para uso da música.

A Tabela 4 apresenta os coeficientes de absorção destes materiais, locais de aplicação e referência.

Na Figura 14 são ilustradas as propostas de configurações do teatro para música e para palavra.

Tabela 4: Coeficientes de absorção dos materiais propostos.

Material	Local de aplicação	Coeficientes de absorção por banda de oitava					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Painel OWA Nexacustic 500	Laterais plateia	0,40	0,95	1,00	0,80	0,45	0,25
Painel OWA Nexacustic MI188	Fundo plateia	0,17	0,78	0,89	0,39	0,21	0,18
Painel reflexão (NBR 12179)	Lat.Plat./Fundo Palco	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
Tecido poliéster (Vescom Marmara)	Teto (palavra)	0,04	0,19	0,45	0,47	0,44	0,41

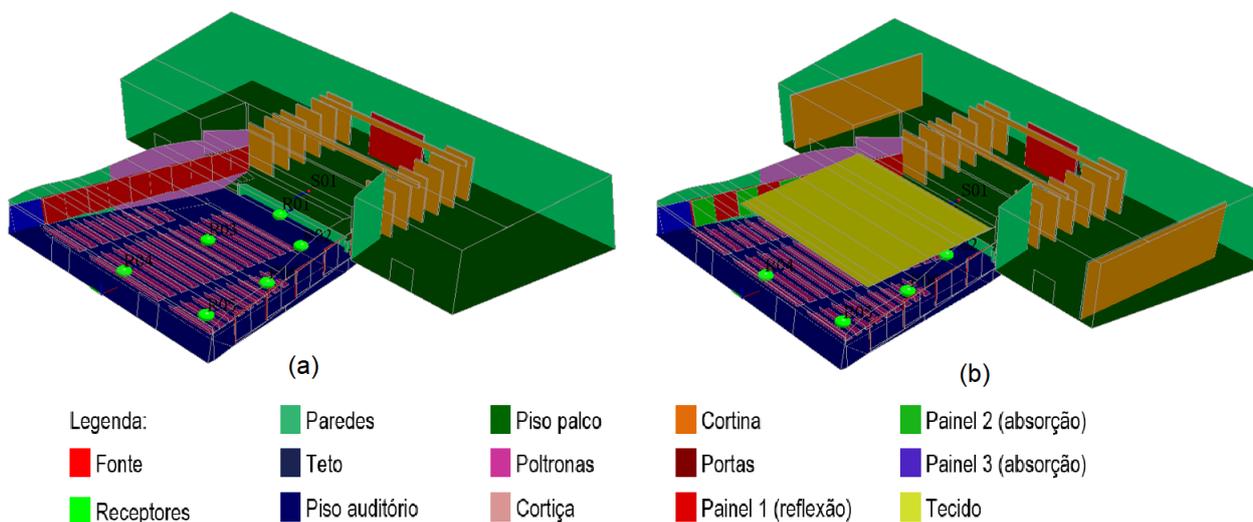


Figura 14: Propostas de intervenção para (a) música e (b) palavra no BRASS.

4. RESULTADOS DA INTERVENÇÃO

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos da simulação para os dois cenários simulados e comparados com o cenário antes da intervenção, ou seja, estado atual, porém considerando uma ocupação de 2/3 da plateia.

4.1 Tempo de reverberação

Uma visão geral da intervenção sobre o tempo de reverberação é apresentada na Figura 15, na qual são comparados os valores médios de T_{30} dos 6 receptores para música e palavra, com os médios da sala existente (ocupação de 2/3). Pode-se observar que o tempo de reverberação “da sala” foi pouco alterado para o caso da música, mas sofre uma redução considerável para a configuração para palavra.

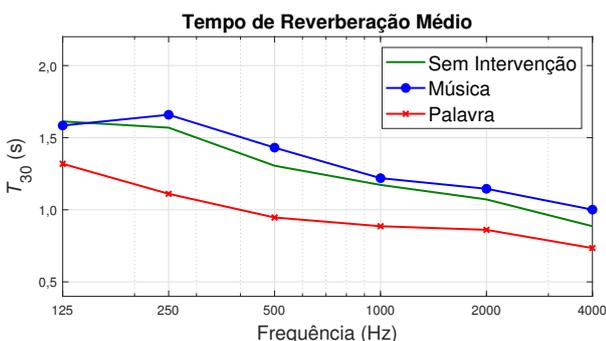


Figura 15: Comparação dos valores médios de T_{30} antes e após proposta de intervenção, para música e palavra.

Para os receptores individuais, são apresentados apenas os resultados dos receptores R1 (frente da plateia), R3 (centro) e R4 (fundo do auditório), considerados os mais relevantes, em função da localização. Nas Figuras 16, 17 e 18 são comparados os valores de T_{30} , simulados nos receptores R1, R3 e R4, respectivamente, com os valores ideais, segundo Carvalho [8] e o valor para o Teatro com 2/3 de ocupação e sem intervenção.

Da Figura 16, pode-se observar que no R1, na proposta para música, o T_{30} teve um aumento de reverberação de aproximadamente 0,5 s, em relação à sala atual, tendendo ao TR recomendado, ficando abaixo apenas nas altas frequências. No mesmo receptor, na proposta para palavra, o T_{30}

teve queda nas baixas e médias frequências, sofrendo aumento nas altas frequências, portanto se aproximando muito do TR recomendado.

No R3 (Figura 17), na proposta para música, houve um aumento geral do T_{30} , aproximando os valores do TR recomendado, ficando as frequências médias mais próximas do ideal, e as frequências de 125, 2 e 4 kHz ainda abaixo do indicado. Na proposta para palavra, no mesmo receptor, houve uma diminuição do T_{30} em todas as frequências exceto 4 kHz, ficando todas muito próximas do recomendado, exceto 125 e 4 kHz, que ficaram ligeiramente abaixo.

Na Figura 18 (R4), a situação atual encontra-se com o T_{30} abaixo do ideal, exceto para as frequências de 250 e 500 Hz. A proposta para música aumentou o T_{30} de maneira geral, exceto na frequência de 125 Hz, e os valores de T_{30} ficaram mais próximos do recomendado nas médias frequências. Nas altas frequências os valores se aproximaram do indicado, apesar de ficarem ainda inferiores. Já no cenário para palavra neste receptor, houve uma queda do T_{30} em todas as frequências, aproximando os valores das frequências médias dos valores recomendados, e tendo os valores das baixas e altas frequências ficando abaixo dos valores indicados. A queda das baixas frequências foi importante, pois estavam muito acima do recomendado.

4.2 Tempo de decaimento inicial

As Figuras 19 e 20 mostram os valores do parâmetro EDT médio, e nos receptores R1, R3 e R4.

No R1 (Figura 20 (a)), na proposta para música, é possível concluir que o EDT apresentou queda nas frequências, 125 Hz, 500 Hz, 500 Hz e 2 kHz, e se manteve o mesmo em 1 kHz e 4 kHz. Nesta configuração, o maior valor deste parâmetro se manteve na frequência de 1 kHz, enquanto o menor valor passou a ser na frequência de 500 Hz. Para palavra, houve queda em todas as frequências no R1, ficando o maior valor na frequência de 125 Hz. As frequências médias e altas ficaram com valores semelhantes. No R3 (Figura 20 (b)), no cená-

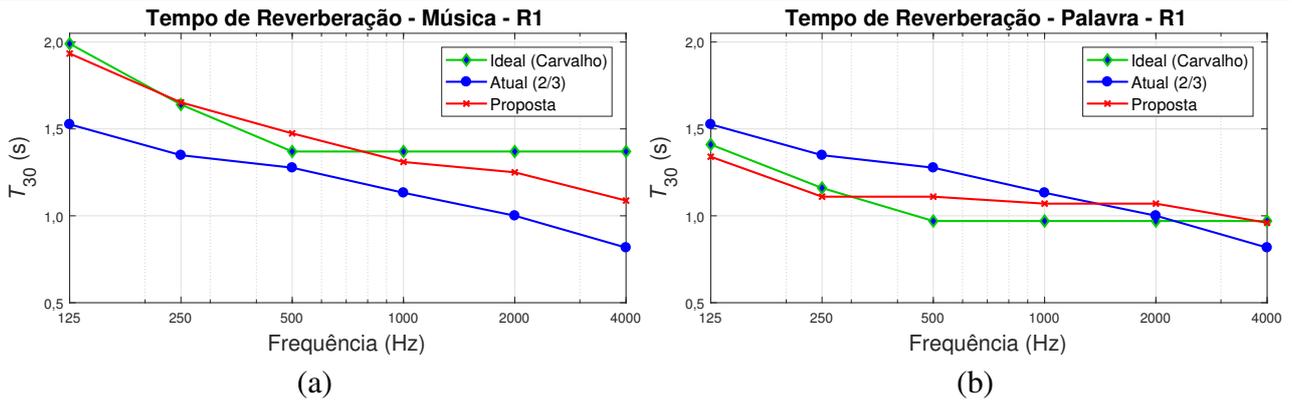


Figura 16: Comparação dos tempos de reverberação antes e após proposta de intervenção, e ideais para (a) música e (b) palavra, no R1.

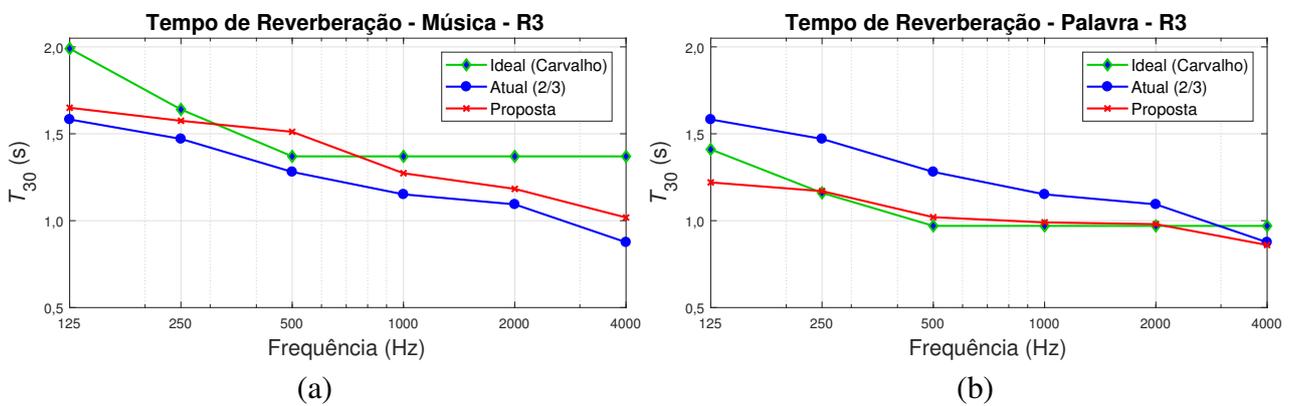


Figura 17: Comparação dos tempos de reverberação ideais, antes e após proposta de intervenção, para (a) música e (b) palavra, no R3.

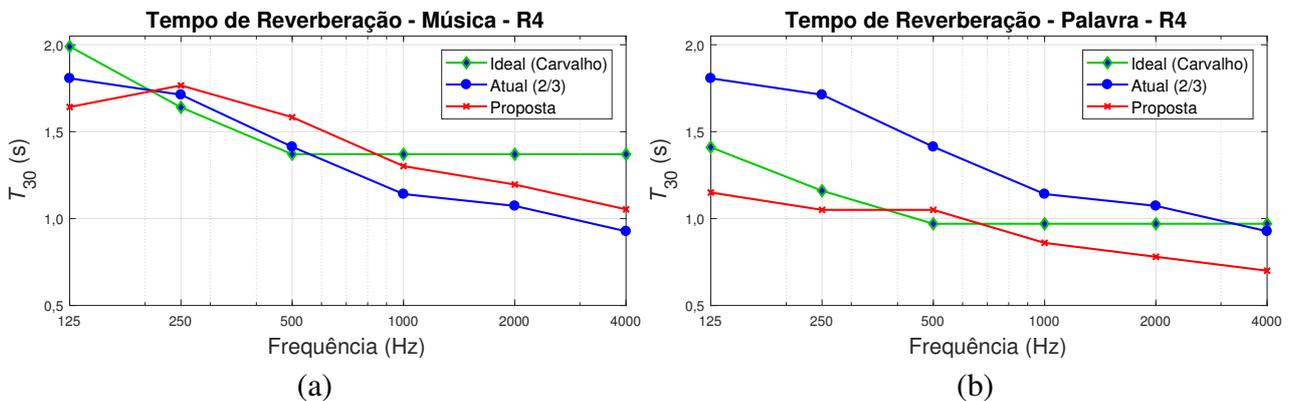


Figura 18: Comparação dos tempos de reverberação ideais, antes e após proposta de intervenção, para (a) música e (b) palavra, no R4.

rio para música, é possível visualizar queda do EDT nas frequências 250, 500 e 1 kHz, aumento na frequência de 125 Hz, enquanto os valores permaneceram os mesmos nas altas frequências. Na configuração para palavra, observa-se diminuição deste parâmetro em todas as frequências, havendo maior diminuição em 250, 500 e 1 kHz.

Para o R4 (Figura 20 (c)), na proposta para música, houve diminuição do EDT em todas as frequências exceto 4 kHz, que se manteve. A maior queda deste parâmetro nesta configuração foi na frequência de 250 Hz. Na configuração para palavra o EDT sofreu queda nas mesmas frequências que no cenário para música, sendo

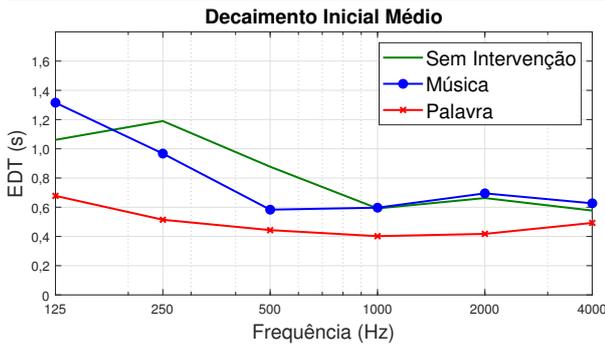
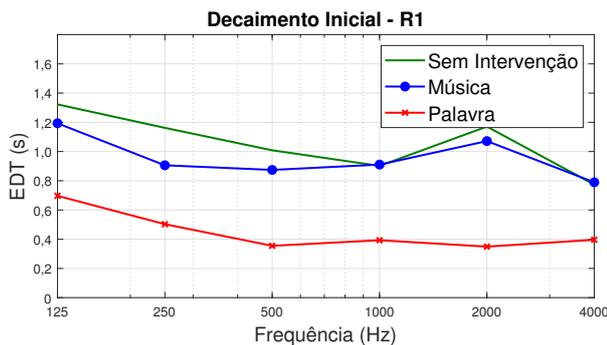
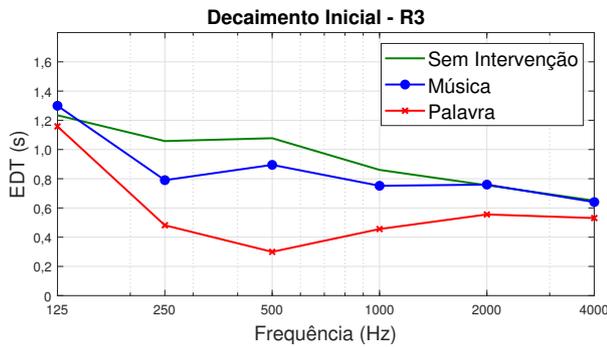


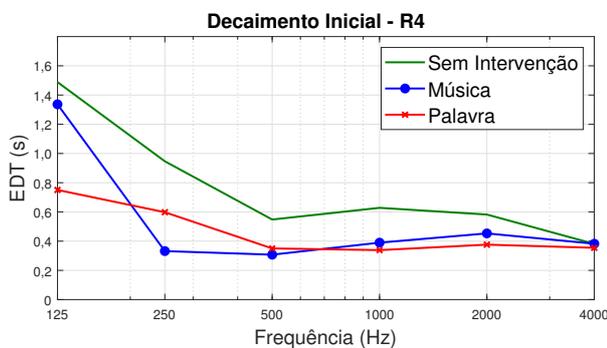
Figura 19: Comparação do decaimento inicial entre o estado atual do teatro e com as intervenções propostas.



(a)



(b)



(c)

Figura 20: EDT na proposta de intervenção para música, na intervenção para palavra, e da sala atual em a) R1 b) R3 c) R4.

o maior decréscimo na frequência de 125 Hz. Na frequência de 4 kHz o EDT se manteve igual ao da sala atual sem intervenção.

4.3 Fator de clareza

As Figuras 21 e 22 mostram os valores do parâmetro C_{80} médio, e nos receptores R1, R3 e R4.

De maneira geral a Clareza aumentou para todos os receptores nos 2 cenários, principalmente para palavra, em que o TR ficou menor. O Fator de Clareza médio para música teve aumento nas baixas frequências e em 500 Hz, enquanto se manteve nas frequências de 1 kHz e 2 kHz, com pequeno decréscimo em 4 kHz. Este parâmetro teve seus valores médios entre 6 e 8 dB, atendendo aos usos de instrumentos de cordas dedilhadas, música pop, música religiosa mais moderna, jazz leve, estilos com notas mais rápidas, instrumentos de percussão, rock n' roll e música atual [17]. Os valores médios de C_{80} nas frequências médias ficaram superiores aos valores nas baixas frequências e altas frequências.

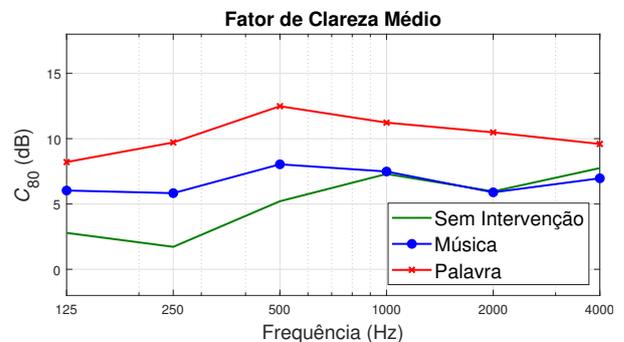


Figura 21: C_{80} médio: sem intervenção, com intervenção para música e com intervenção para palavra.

O R1, na proposta para música, teve todos os valores de C_{80} mantidos, exceto nas baixas frequências, nas quais houve ligeiro aumento. Para palavra, houve um significativo aumento deste parâmetro em todas as frequências.

No R3, no cenário para música, houve aumento deste parâmetro em todas as frequências, exceto em 4 kHz, que se manteve igual ao da sala atual. Para palavra, houve aumento do Fator de Clareza em todas as frequências, sendo mais

significativo em 500 Hz.

No R4, na configuração para música, o comportamento foi semelhante ao R3, havendo aumento em todas as frequências exceto 4 kHz, que se manteve. Na proposta para palavra houve aumento em todas as frequências, sendo mais expressivo em 1 kHz.

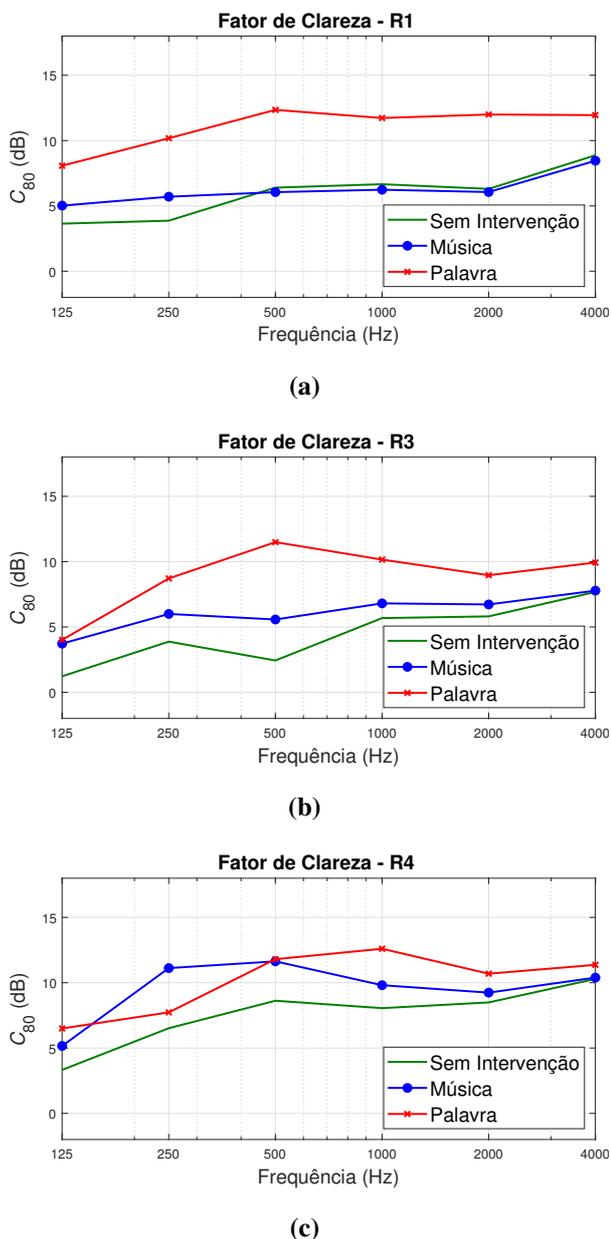


Figura 22: C_{80} na proposta de intervenção para música, na intervenção para palavra, e da sala atual em a) R1 b) R3 c) R4.

4.4 Calor ou razão de graves (*Bass Ratio*)

A Tabela 5 apresenta os valores do Calor (Razão de graves), na configuração para música,

calculados em função dos tempos de reverberação das principais bandas [14] e classificados para música em função dos seus valores [8]. A Tabela 6 apresenta os valores do Calor na configuração para palavra.

Os receptores com os melhores resultados do parâmetro Calor, na configuração para música, são R5 e R6, com todos os valores “excelentes”; em seguida R1, R4, R3 e R2. O resultado menos favorável foi para o R2, que teve a única classificação “regular”, para o BR_{125} . A média teve um resultado muito favorável, com duas classificações de Calor “excelente” e uma classificação de calor “bom”.

Os receptores com os melhores resultados para Calor na configuração para palavra são R2, R5 e R6, todos com classificação “excelente” nos três valores. A média também teve classificação dos três valores como “excelente”. O resultado menos favorável foi no R1, que teve classificação “regular” no BR_{250} .

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, de maneira geral, o T_{30} na configuração para música aumentou sensivelmente (aproximadamente 0,1s na média dos 6 receptores nas 6 bandas de oitava), e no cenário para palavra diminuiu significativamente (entre 0,15s e 0,5s na média dos 6 receptores nas 6 bandas de oitava), aproximando os valores simulados nas intervenções aos valores recomendados.

O parâmetro EDT teve uma redução mais expressiva para o uso da palavra do que para a música, sendo esta diminuição menor nas altas frequências.

O Fator de Clareza C_{80} e a Definição D_{50} tiveram um aumento significativo de maneira geral na configuração para palavra, aumentando a inteligibilidade para esta finalidade. Para o uso de música houve um aumento sensível dos dois parâmetros acústicos, atendendo aos usos de instrumentos de cordas dedilhadas, música pop, música religiosa mais moderna, jazz leve, estilos com notas mais rápidas, instrumentos de percussão, rock n’roll e música atual.

Tabela 5: Calor - configuração para música.

Parâmetro / Classificação	Valor Médio	Receptores					
		R1	R2	R3	R4	R5	R6
BR _{global}	1,19	1,28	1,13	1,15	1,18	1,30	1,25
	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente	Excelente
BR ₁₂₅	1,16	1,38	1,21	1,16	1,13	1,43	1,36
	Bom	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente	Excelente
BR ₂₅₀	1,27	1,18	1,05	1,13	1,23	1,18	1,14
	Excelente	Bom	Regular	Bom	Excelente	Excelente	Excelente

Tabela 6: Calor - configuração para palavra.

Parâmetro / Classificação	Valor Médio	Receptores					
		R1	R2	R3	R4	R5	R6
BR _{global}	1,33	1,68	1,59	1,15	1,16	1,48	1,47
	Excelente	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Excelente	Excelente
BR ₁₂₅	1,43	1,21	1,89	1,15	1,20	1,69	1,53
	Excelente	Bom	Excelente	Bom	Bom	Excelente	Excelente
BR ₂₅₀	1,22	1,02	1,28	1,14	1,12	1,27	1,42
	Excelente	Regular	Excelente	Excelente	Bom	Excelente	Excelente

Já a Razão de graves teve valores médios excelentes no cenário para palavra, e muito bons para música.

Os resultados dos parâmetros apresentados para música e palavra são “extremos” máximos e mínimos, com os painéis totalmente abertos ou totalmente fechados. Cabe ressaltar a possibilidade de ajustes destes painéis para obtenção de valores intermediários.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o estado da arte da pesquisa em acústica de salas, a simulação computacional vem assumindo um papel importante no projeto de auditórios, teatros e salas de concerto. Programas de simulação permitem integrar a avaliação de desempenho ao processo de concepção e desenvolvimento de projetos tanto para modelagem da forma quanto para especificação e detalhamento de elementos de controle da distribuição sonora (reflexão, difusão e absorção). Tais benefícios aumentam nos países em desenvolvimento pela possibilidade de avaliação e desenvolvimento de alternativas para correção de acústica com baixo custo de implantação e manutenção, compatíveis com as limitações

econômicas.

É essencial, entretanto, que disciplina de acústica seja considerada desde o início do processo, quando o universo de soluções projetuais ainda está em aberto. Decisões relativas à implantação, setorização e volumetria de salas de espetáculo e espaços de apoio devem ser discutidas com o projetista, evitando a criação de problemas de correção complexa ou de custo elevado.

Um dos maiores desafios enfrentados pelo projetista de acústica no âmbito da revitalização de bens de valor patrimonial, histórico ou arquitetônico é a dificuldade técnica para compatibilização das intervenções necessárias para adequação aos padrões de desempenho acústico com as restrições, formais e construtivas, impostas pelos órgãos de tutela.

Apesar de ser uma ferramenta ainda em desenvolvimento, o BRASS revelou grande potencial para aplicação em projetos de arquitetura, tanto pela interface com programas familiares aos profissionais da área, como Autocad, quanto pela apresentação de resultados com os parâmetros acústicos e arquivos de áudio da sala. Como os arquivos gerados pelo BRASS são todos em

formato texto, com formatação e organização de dados simples, a utilização de programas como o Matlab, ou outras ferramentas, permite elaborar gráficos de análise comparativa dos resultados das medições e das simulações das intervenções para diferentes configurações da sala.

Neste contexto, acreditamos que a metodologia aplicada ao Teatro Armando Gonzaga possa ser aplicada a teatros de pequeno ou médio porte, onde seja necessário obter um compromisso satisfatório para o desempenho de música e fala.

7. AGRADECIMENTOS

À CAPES e à FAPERJ pelo apoio financeiro para a pesquisa de mestrado; à FUNARJ e ao INEPAC, pela cortesia nas visitas no Teatro Armando Gonzaga e na obtenção de documentação sobre sua construção.

REFERÊNCIAS

1. BONDUKI, N. *Affonso Eduardo Reidy*. 1. ed. Lisboa: Blau, 2000. ISBN 972831146X.
2. LIMA, A. J. R. *A arquitetura social de Affonso Eduardo Reidy: O Teatro Armando Gonzaga em Marechal Hermes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 3382-1 - Acústica — Medição de parâmetros de acústica de salas Parte 1: Salas de espetáculos*. [S.l.], 2017.
4. TORRES, Julio Cesar B. Brass - brazilian room acoustic simulator. *XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Porto Alegre, Brasil., XXVIII*, 2018. ISSN 2238-6726. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17648/sobrac-87152>.
5. KROKSTAD, S. Strom A.; SORSDAL, S. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, v. 8, p. 118–125, 1968. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(68\)90198-3](https://doi.org/10.1016/0022-460X(68)90198-3).
6. TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES, J. C. B.; GERGES, S. N. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: Part 2 - validation of the computational code raios 3. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, p. 222–231, 2007. ISSN 1806-3691. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.078](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.078).
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12179 - Tratamento acústico em recintos fechados - procedimento*. [S.l.], 1992.
8. CARVALHO, Régio Paniago. *Acústica Arquitetônica*. 2. ed. Brasília: Thesaurus, 2010. ISBN 9788570628770.
9. PELZER S.AND ARETZ, M.; VORLÄNDER, M. Quality assessment of room acoustic simulation tools by comparing binaural measurements and simulations in an optimized test scenario. *Forum Acusticum 2011: 27 June - 01 July, Aalborg, Denmark, 2011.*, p. 1529–1534, 2011. ISSN 221-3767.
10. VORLÄNDER, M. Die genauigkeit von berechnungen mit dem raumakusti-schen schallteilchenmodell und ihre abhängigkeit von der rechenzeit("the accuracy of calculations using the room acoustical ray-tracing-model and its dependence on the calculation time"). *international journal on acoustics*, v. 66(2), p. 90–96, 1988. ISSN 0001-7884.
11. BERZBORN, Marco; BOMHARDT, Ramona; KLEIN, Johannes; RICHTER, Jan-Gerrit; VORLÄNDER, Michael. The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing. In: 43TH ANNUAL GERMAN CONGRESS ON ACOUSTICS, KIEL (GERMANY), 6 MAR 2017 - 9 MAR 2017. 2017. Disponível em: <http://publications.rwth-aachen.de/record/687308>.
12. KARJALAINEN M.AND ANTSALO, P.; MÄRKIVIRTA, A.; PELTONEN, T.; V., VÄLIMÄKI. Estimation of modal decay parameters from noisy response measurements. *Journal of Audio Eng. Soc.*, v. 50(11), p. 867–878, 2002. Disponível em:

http://www.aes.org/journal/sample_issue/JAES_V50_11_PG867.pdf.

13. HAK R. H. C. WENMAEKERS, L. C. J. van Luxemburg C. C. J. M. Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 98(6), p. 907–915, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3813/AAA.918574>.

14. FIGUEIREDO, F. L. *Parâmetros acústicos subjetivos: critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

15. COSTA, Ennio Cruz. *Acústica Técnica*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2003. ISBN 9788521203346.

16. BRANDÃO, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 9788521210061.

17. DOVALLE, S. *Manual Prático De Acústica*. 3. ed. Rio de Janeiro: Música e Tecnologia, 2009. ISBN 9788589402149.