



Projeto acústico de auditório multiuso com dois “palcos”: análise dos parâmetros acústicos e estratégias utilizadas

Oliveira, S.¹; Bandeira, S.²; Ferreira, L. R.³; Michalski, R. L. X. N.⁴; Tenenbaum; R. A.⁵

^{1,3,4} Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, {sofiaoliveira, lucasrafael2209, rannym}@usp.br

² Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Centro de Estudos Superiores de Maceió (CESMAC), Maceió, AL, Brasil, selma.bandeira@cesmac.edu.br

⁵ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, ratenenbaum@gmail.com

Resumo

Pensar a acústica desde as fases iniciais do projeto é o meio mais adequado e eficaz de encontrar soluções para otimizar o ambiente sonoro. Contudo, a depender das condições estruturais e do senso estético que se deseja aplicar, pode se tornar um desafio. Para o projeto da nova sede, o Sindicato dos Trabalhadores em Educação do Estado de Alagoas solicitou a adequação acústica de um auditório com 359 lugares e um volume de 2.591,88 m³, com projeto arquitetônico desenvolvido pelo Arq. Pedro Cabral. Para o auditório, foram pensados dois “palcos”, um no pavimento térreo e outro no nível superior onde apresentações em coral acontecerão. Estratégias foram estudadas para a otimização da qualidade na sala, e simulações foram realizadas com o *software* de acústica de salas RAIOS 7, considerando duas fontes sonoras, uma localizada em cada palco, e oito pontos de recepção. Os resultados encontrados em simulação para o tempo de reverberação e para os parâmetros definição (D_{50}) e clareza (C_{80}) foram satisfatórios na maior parte dos pares fonte-receptor, levando-se em consideração o tipo de uso predominante e as limitações de intervenção.

Palavras-chave: condicionamento acústico, simulação, acústica de salas.

Acoustic design of multipurpose auditorium with two “stages”: analysis of acoustic parameters and adopted strategies

Abstract

Considering acoustics from the project's early stages is the most effective approach to find solutions to optimize the sound environment. However, it can pose challenges depending on structural conditions and desired aesthetics. In the case of the new headquarters project for the Sindicato dos Trabalhadores em Educação do Estado de Alagoas, the task was to acoustically adapt an auditorium with 359 seats and a volume of 2,591.88 m³, designed by architect Pedro Cabral. The auditorium was designed with two stages, one on the ground floor and the other on the upper level for choral performances. Strategies were developed to enhance room quality, and simulations were carried out with the RAIOS 7 room acoustics software. These simulations considered two sound sources, one on each stage, and eight reception points. The results, including reverberation time and the parameters definition (D_{50}) and clarity (C_{80}), were generally satisfactory for most source-receiver pairs, given the predominant type of use and constraints of the intervention.

Keywords: acoustic conditioning, simulation, room acoustics.

1. Introdução

A qualidade sonora, sobretudo em auditórios, é de extrema importância dada a função performática desses espaços, onde a escuta adequada, ou inadequada, participa diretamente do sucesso ou fracasso das apresentações. Para atingir esses objetivos, o projeto acústico de condicionamento sonoro deve levar em consideração fatores que incluem as capacidades de absorção, reflexão e difusão sonoras dos materiais escolhidos, que impactam, dentre outros parâmetros objetivos de qualidade, no tempo de reverberação do local em questão [1–3].

Aliado a isso, a tecnologia presente em programas de simulação acústica de salas, dados os limites do estado da arte, vem ganhando confiança e agilidade nos últimos anos [4–7]. Prever os resultados simulados ainda em projeto permite uma maior liberdade de ajuste com inúmeras possibilidades de solução, antes que cifras muito maiores relativas à execução da obra sejam erroneamente aplicadas.

Espaços acusticamente adequados para usos diversos refletem a demanda recebida pela maioria dos auditórios atuais. Dado o custo para a construção desses locais, levando em consideração a cultura e o poder aquisitivo no Brasil, soluções assertivas, acessíveis e flexíveis são cada vez mais necessárias. O Sindicato dos Trabalhadores em Educação de Alagoas (SINTEAL) teve sua sede, anteriormente localizada no Bairro do Mutange, na cidade de Maceió-AL (Figura 1 (a)), desapropriada devido a um desastre ambiental que afetou algumas áreas da cidade. A nova sede, localizada no Bairro do Farol, também em Maceió-AL (Figura 1 (b)), foi projetada pelo Arq. Pedro Cabral e encontra-se em fase de construção. Neste novo projeto, inclui-se um auditório para usos diversos, sobretudo programações voltadas ao uso da fala, como palestras e treinamentos. Além disso, um importante grupo composto por professores, funcionários e diretores, ativos e aposentados, integra o coral “Sinteval Em Canto”. Dessa forma, um espaço no auditório voltado para apresentações em coral foi pensado pelo arquiteto responsável.



(a) Antiga sede.



(b) Render do projeto da nova sede.

Figura 1: Sedes do Sindicato dos Trabalhadores em Educação de Alagoas.

Em vista da necessidade de assegurar uma qualidade acústica adequada para o auditório na nova sede do Sindicato, foi desenvolvido o projeto acústico correspondente. Este artigo tem como objetivo apresentar as estratégias de condicionamento acústico empregadas no referido auditório, além de analisar os parâmetros objetivos de qualidade obtidos por meio de simulações realizadas no *software* de acústica de salas RAIOS 7. O artigo segue com a descrição do método empregado (Seção 2), a apresentação dos resultados alcançados (Seção 3) e as análises das considerações finais (Seção 4).

2. Método

A sala em estudo caracteriza-se como um auditório de múltiplos usos, com 359 lugares e um volume de 2.591,88 m³. Para sua adequação acústica, levou-se em consideração o tempo de reverberação mais indicado na banda de oitava de 1 kHz, observando como ponto de partida o ábaco da Figura 2. Como o

local prioriza o uso da fala, mas comportará também apresentações com o canto do coral, o tempo de reverberação ideal flutua entre 0,9 e 1,6 segundos.

A geometria da sala também possui relação direta com o desempenho acústico do local. A proposta do projeto arquitetônico apresenta desafios particulares, onde dois palcos foram pensados pelo arquiteto, além do fato de, por questões estruturais, a altura disponível para ambos ser extremamente limitada. Para uma melhor distinção, apenas o palco do nível térreo será assim chamado, enquanto o superior será referido como coral.

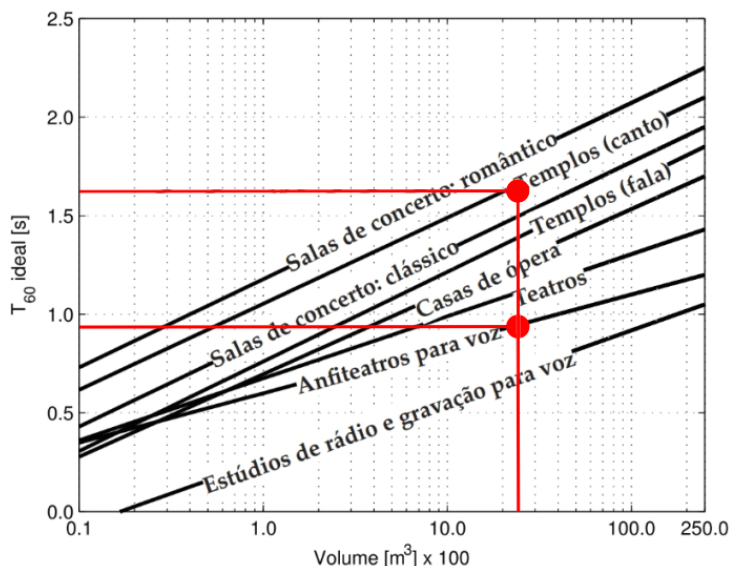


Figura 2: Ábaco do tempo de reverberação ótimo na banda de oitava de 1 kHz para diversos ambientes, com a marcação do ponto correspondente ao volume e tipo de uso predominante (adaptado de Brandão [2] *apud* Long [3]).

Para que o som chegue a todos os ouvintes de forma inteligível, a distribuição sonora pode ser otimizada com o uso de refletores estrategicamente posicionados, assim como a angulação do forro, por meio de aplicações geométricas elementares [8]. Tais refletores, fabricados em madeira laminada, estão ilustrados em corte aproximado na Figura 3. O estudo do reforço sonoro possibilitado pela configuração dos refletores pode ser observado nas Figuras 4 para o palco e 5 para o coral. Como o pé direito se tornou uma questão limitadora, os refletores foram divididos paralelamente com 30 centímetros de altura cada.

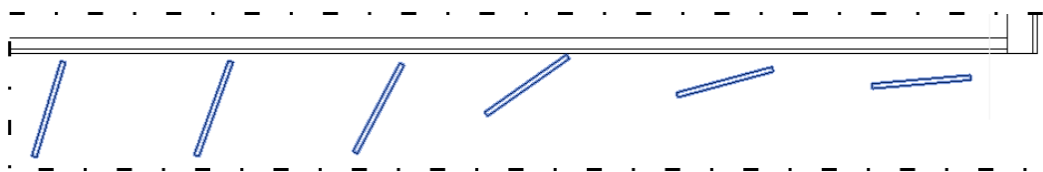


Figura 3: Corte aproximado dos refletores dispostos no palco paralelamente, com angulação adequada a um melhor reforço sonoro.

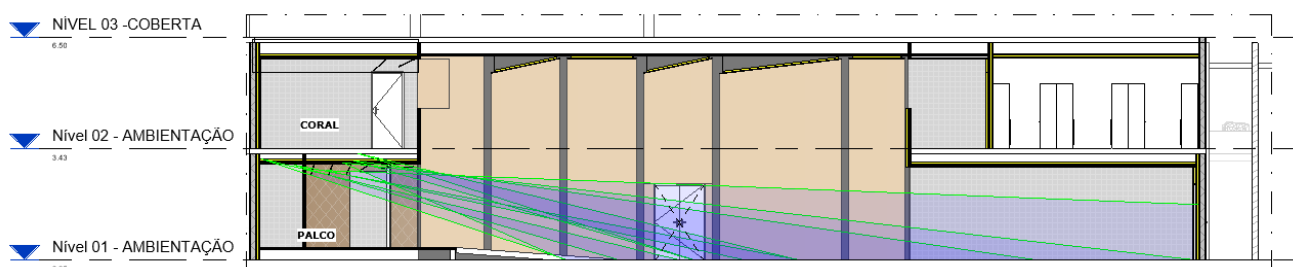


Figura 4: Corte com estudo geométrico do reforço sonoro possibilitado pelos refletores do palco.

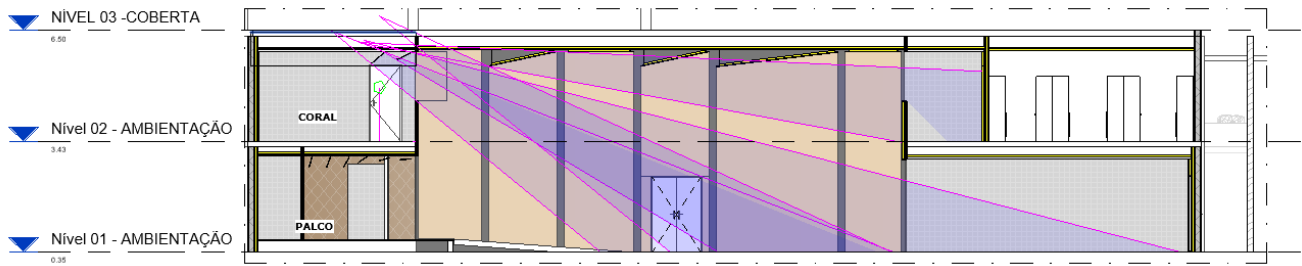


Figura 5: Corte com estudo geométrico do reforço sonoro possibilitado pelos refletores do coral.

Aliando o efeito estético solicitado pelo arquiteto à função, painéis de membrana em madeira laminada foram propostos nas laterais da sala, com o intuito de potencializar a absorção sonora nas frequências entre 63 Hz e 125 Hz, além de redirecionar o som positivamente para a plateia. Para o cálculo dos painéis, a Equação 1 foi aplicada, onde f_{res} refere-se à frequência de ressonância considerada (em Hz), m é a densidade superficial do material utilizado (em kg/m^2), e d é o afastamento da parede (em m) [9]. Na Figura 6 pode-se observar a disposição utilizada com a vista superior.

$$f_{res} = \frac{60}{\sqrt{m \times d}} \quad (1)$$

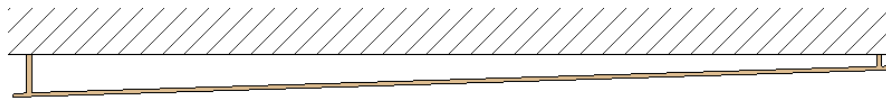


Figura 6: Vista superior da disposição utilizada para os painéis de membrana dimensionados para a sala.

A Figura 7 apresenta os coeficientes de absorção sonora dos materiais utilizados, atribuídos de acordo com a necessidade, a partir de testes de simulação acústica realizados. Os valores utilizados foram em parte disponibilizados por fabricantes a partir de ensaios realizados em laboratório, ou coletados em bancos de dados confiáveis [10, 11].

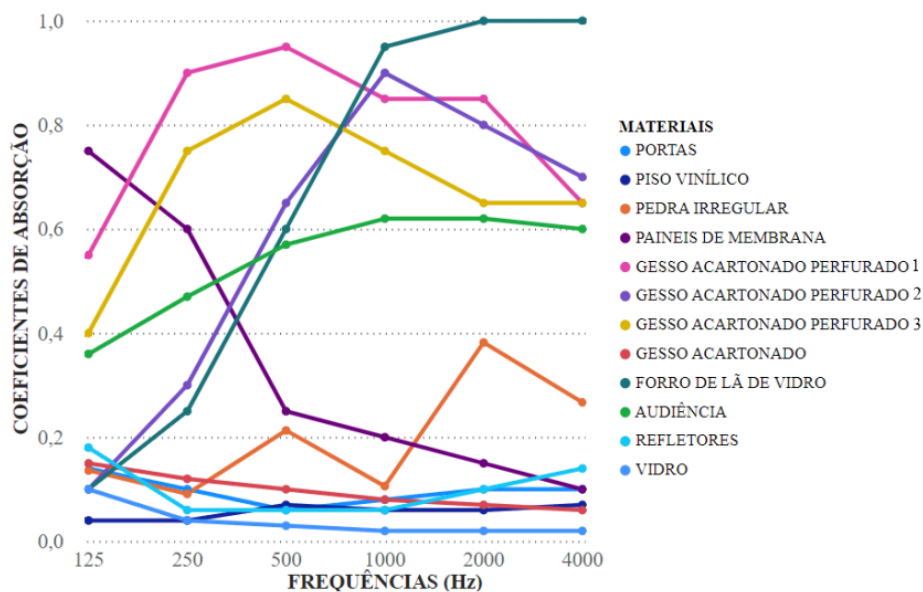


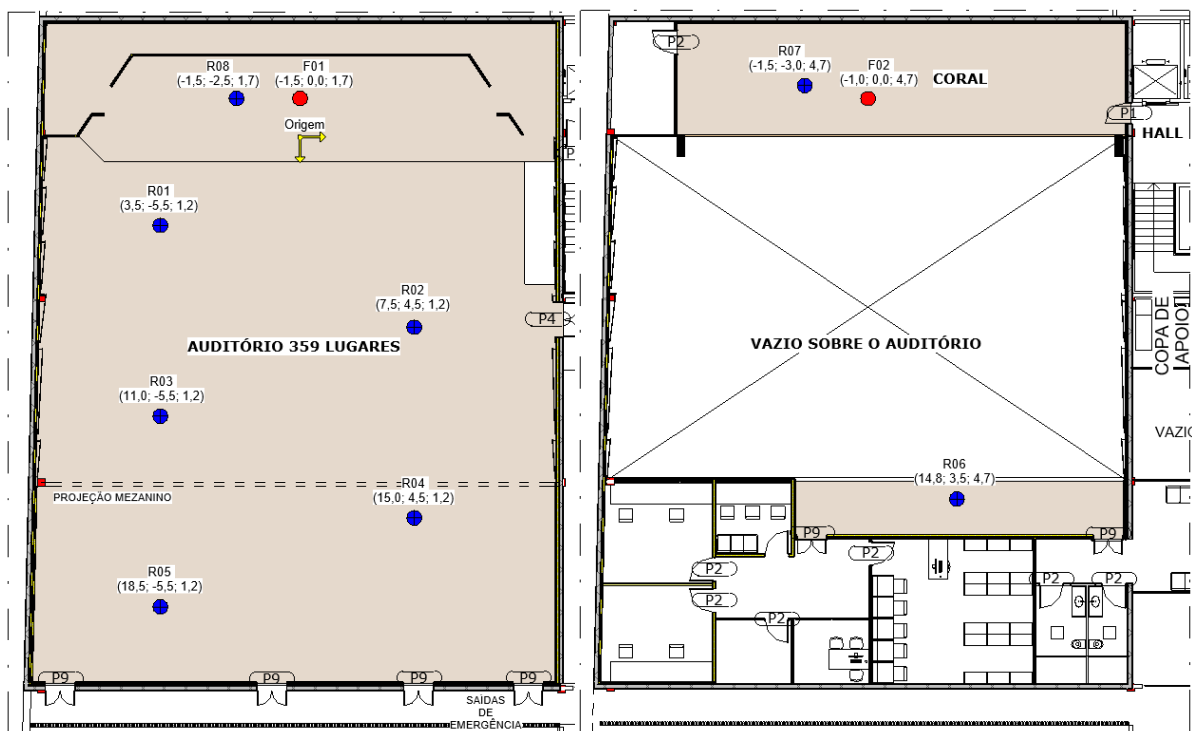
Figura 7: Coeficientes de absorção sonora considerados para os materiais utilizados na sala.

2.1 Simulação acústica de salas

Para predição dos parâmetros acústicos objetivos, a sala foi simulada no *software* de acústica de salas RAIOS 7 [12, 13]. As configurações utilizadas foram:

- 100 mil raios utilizados para cada ponto de fonte;
- Temperatura do ar de 25°C;
- Umidade relativa do ar de 55%;
- Número de elementos triangulares de superfície igual a 800;
- Decaimento considerado de cada raio de -60 dB;
- Comprimento da resposta impulsiva de 2 segundos / 88.200 amostras.

Foram utilizados dois pontos de fonte e oito pontos de recepção que podem ser observados na Figura 8, assim como a volumetria da sala no programa de simulação, na Figura 9.



(a) Distribuição dos pontos na planta térrea.

(b) Distribuição dos pontos na planta do pavimento superior.

Figura 8: Pontos de fonte-recepção distribuídos em planta com suas respectivas coordenadas.

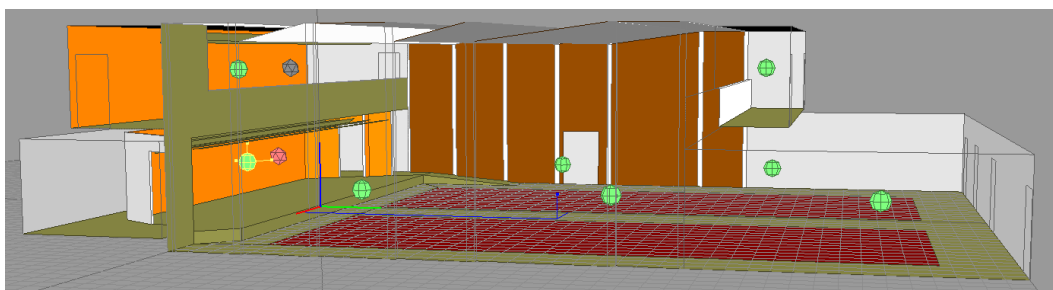


Figura 9: Volumetria da sala no *software* RAIOS 7.

3. Resultados

Considerando os fatores limitantes ao projeto, os resultados observados para o tempo de reverberação (T_{30}) mostraram-se próximos na maior parte dos pares fonte-receptor (Figura 10). Nos gráficos, as médias espaciais dos valores encontrados por frequência foram destacadas em preto. É possível notar que, para a fonte F01, localizada no palco, os receptores R07 Coral e R08 Palco apresentaram valores mais afastados. Uma característica em comum entre eles é o fato de estarem localizados nos pontos mais extremos do auditório. Para a fonte F02 localizada no coral, os valores mostraram-se mais distantes entre si, sobretudo para os receptores localizados nos pontos R06 Mezanino, R07 Coral e R05. Os resultados flutuaram próximo ou abaixo dos valores para o tempo de reverberação indicado para a sala (entre 0,9 e 1,6 segundos).

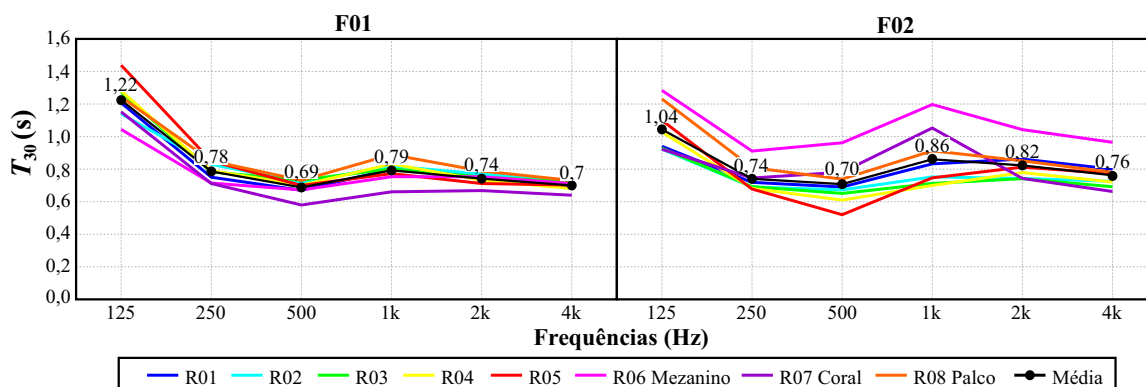


Figura 10: T_{30} calculado na sala para os 16 pares fonte-receptor.

Os parâmetros definição (D_{50}) e clareza (C_{80}) fornecem informações relevantes quanto às características da sala, cuja distribuição de energia é analisada para os primeiros 50 ms e 80 ms, respectivamente. Para D_{50} , valores maiores que 50 indicam haver uma quantidade maior de energia nas reflexões iniciais, o que é preferível para salas voltadas à fala, por caracterizar uma melhor inteligibilidade [14]. Uma consequência dessa característica relacionada ao D_{50} , são valores maiores para o C_{80} [15, 16], indicando um ambiente mais "seco", pelo fato do aumento da absorção sonora provocar um decaimento mais rápido da energia sonora na sala [2]. O C_{80} é um parâmetro comumente observado para ambientes cujo uso é voltado para fins musicais, em que valores próximos a 0 dB são preferíveis. Como o uso preferencial neste cenário é a fala, o atendimento a este quesito não foi priorizado.

Na Figura 11, é possível notar que, em quase todos os pares fonte-receptor, os resultados excedem 50 em todas as faixas de frequência, com exceção dos pares fonte-receptor F01-R07 e F02-R08. Isso ocorre devido às posições desses pontos, que recebem principalmente o conteúdo sonoro refletido e contido na cauda reverberante das respostas impulsivas. Portanto, as médias calculadas e apresentadas nas Figuras 11 e 12 foram determinadas excluindo os valores destes pares.

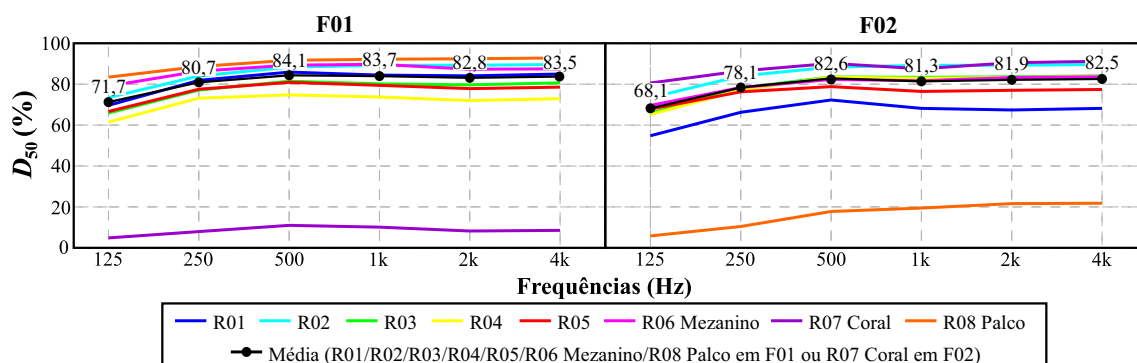


Figura 11: D_{50} calculado na sala para os 16 pares fonte-receptor.

Na Figura 12, o C_{80} reafirma o apresentado anteriormente pelo D_{50} , em distinção dos pares F01-R07 e F02-R08, que retornaram por vezes valores negativos. Os valores encontrados entre os pares fonte-receptor para o D_{50} e C_{80} mostraram maiores distinções de acordo com a localização, o que demonstra diferentes sensações observadas em relação à fonte sonora mesmo com um tempo de reverberação similar.

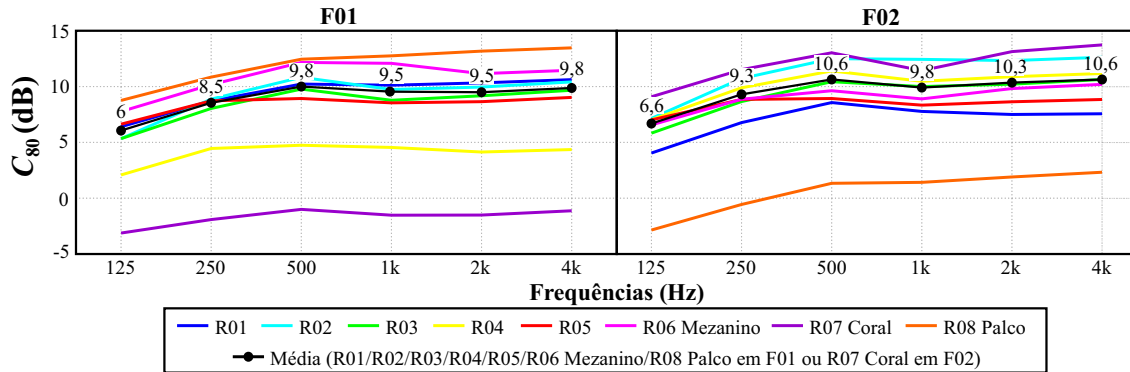


Figura 12: C_{80} calculado na sala para os 16 pares fonte-receptor.

A frequência de Schroeder [17], f_s , da sala é dada por

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}, \quad (2)$$

em que T_{60} é o tempo de reverberação e V o volume do ambiente, em unidades do SI. Considerando o T_{30} médio aproximadamente 0,9 s, e o volume da sala 2.591,88 m³, tem-se um valor aproximado de $f_s = 37$ Hz. Portanto, a sala contempla os condicionantes da Acústica Geométrica e não se faz necessária uma análise de seu comportamento modal.

Nas perspectivas apresentadas nas Figuras 13 e 14, o auditório pode ser observado com as configurações até aqui analisadas.

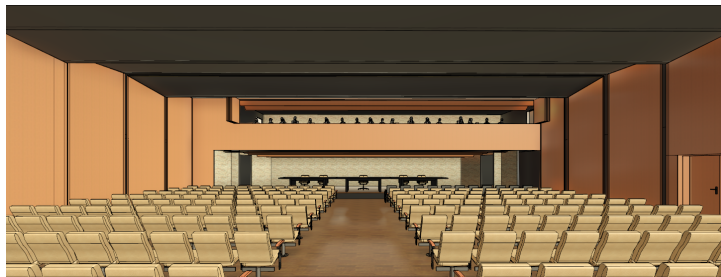


Figura 13: Vista em perspectiva do palco e do coral.



Figura 14: Vista em perspectiva da lateral do auditório.

4. Considerações finais

Este estudo apresentou o processo utilizado no desenvolvimento do projeto acústico de um auditório para o Sindicato dos Trabalhadores em Educação de Alagoas – SINTEAL, com o objetivo de adequá-lo aos usos esperados para o espaço. Para isso, foram realizadas simulações no programa de acústica de salas RAIOS 7, com foco na análise dos principais parâmetros de qualidade acústica.

Um dos maiores desafios foi tornar os resultados encontrados semelhantes entre os pares fonte-receptor, além de traçar um equilíbrio adequado para os parâmetros acústicos T_{30} , D_{50} e C_{80} , de modo a satisfazer as necessidades específicas do espaço. Foram distribuídos oito receptores localizados na plateia, mezanino, coral e palco, e duas fontes, uma no palco e outra no coral.

Os resultados demonstraram que o tempo de reverberação (T_{30}) se manteve adequado em todos os pares fonte-receptor avaliados, levando-se em consideração os usos observados para cada palco. Maiores diferenças entre os resultados foram observadas em pontos extremos da sala.

A definição (D_{50}) calculada foi superior à 50 em quase todos os casos, indicando maior energia nas reflexões iniciais, o que caracteriza uma boa inteligibilidade. A clareza (C_{80}) indica um ambiente pouco reverberante, com valores altos apresentados para a maior parte dos pares fonte-receptor.

Resultados com maior qualidade poderiam ser observados para características arquitetônicas distintas, sendo estes fatores limitantes ao desempenho do ambiente. Diante disso, a solução adotada torna o espaço apto aos usos aos quais se propõe. Por se tratar de um espaço ainda não construído, a simulação acústica de salas torna-se um recurso válido, apesar de não ser capaz de exprimir por completo a realidade [7]. Medições realizadas no espaço após a construção são recomendadas para uma melhor visualização do campo acústico e execução de possíveis ajustes.

A abordagem utilizada proporcionou um embasamento técnico sólido para as decisões tomadas durante o processo de projeto, visando atender às demandas acústicas específicas do local.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – bolsa n° 301024/2018-9 e 140771/2023-9), e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – bolsa n° 88887.704300/2022-00), pelo apoio financeiro parcial a esta pesquisa.

Referências

1. BARRON, Michael. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. 2. ed. New York: Spon Press, 2010. ISBN 0-203-87422-6.
2. BRANDÃO, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1 (rev). ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
3. LONG, M. *Architectural Acoustics*. 1. ed. New York: Elsevier Academic Press, 2006. ISBN 0-12-455551-9.
4. VORLÄNDER, Michael. Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 133, n. 3, p. 1203–1213, 2013. doi: [10.1121/1.4788978](https://doi.org/10.1121/1.4788978).
5. BRINKMANN, F.; ASPÖCK, L.; ACKERMANN, D.; LEPA, S.; VORLÄNDER, M.; WEINZIERL, S. A round robin on room acoustical simulation and auralization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 145, n. 4, p. 2746–2760, 2019. doi: [10.1121/1.5096178](https://doi.org/10.1121/1.5096178).
6. BRANDÃO, E.; SANTOS, E. S. O.; MELO, V. S. G.; TENENBAUM, R. A.; MAREZE, P. H. On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation. *Applied Acoustics*, v. 187, p. 484–495, 2022. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2021.108484](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108484).
7. OLIVEIRA, Sofia. *Comparação entre medição e simulação utilizando distintos programas de simulação acústica de salas para dois ambientes diferentes*. Dissertação de Mestrado: UFSM/PPGEC. Santa Maria, RS, Brasil, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/24209>.
8. RINDEL, J. H. Acoustic design of reflectors in auditoria. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, v. 14(2), p. 119–128, 1992.

9. INGARD, U. On the theory and design of acoustic resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 25, p. 1037–1061, 1953.
10. ACKERMANN, D.; ILSE, M.; GRIGORIEV, D.; LEPA, S.; PELZER, S.; VORLÄNDER, M.; WEINZIERL, S. *A Ground Truth on Room Acoustical Analysis and Perception*. Berlin: [s.n.], 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-7003.4>.
11. WEINZIERL, S.; LEPA, S.; ACKERMANN, D. A measuring instrument for the auditory perception of rooms: The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI). *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 144, p. 1245–1257, 2018.
12. TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES, J. C. B.; GERGES, S. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustic: Part 1 – theoretical and numerical aspects. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engin.*, v. 29, n. 2, p. 211–221, 2007a.
13. TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES, J. C. B.; GERGES, S. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 – Validation of the computational code RAIOS 3. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Engin.*, v. 29, n. 2, p. 222–231, 2007b.
14. KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. 5. ed. Madison Avenue, New York, USA: Spon Press, 2009. ISBN 978-0-07-160333-1.
15. REICHARDT, W.; ALIM, O. A.; SCHMIDT, W. Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 32, n. 3, p. 126–137, 1975.
16. HAK, C. C. J. M.; WENMAEKERS, R. H. C.; LUXEMBURG, L. C. J. van. Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 98, p. 907–915, September 2012. doi: [10.3813/AAA.918574](https://doi.org/10.3813/AAA.918574).
17. SCHRÖEDER, M. Die statistischen Parameter der Frequenzkurven von großen Räumen. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 4, p. 594–600, 1954. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaua/1954/00000004/a00205s2/art00006>.