



A simulação acústica como ferramenta de projeto e adequação de espaços performáticos

Castro, L. E.¹; Takahashi, V. F. M.²; Bertoli, S. R.³

^{1,3} ,PPGFECFAU, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, [l171561@dac, rolla@fec].unicamp.br

² Unip, São Paulo, SP, Brasil, takahashi.van@gmail.com

Resumo

Salas destinadas a apresentações musicais são espaços em que a qualidade acústica é influenciada por diversos parâmetros acústicos, sendo o projeto de tais espaços mais complexo por envolver tantas variáveis. A simulação computacional, em contrapartida, permite que se preveja o comportamento da sala em seus mais diferentes parâmetros, sendo ferramenta de grande importância para se ter à disposição enquanto projetista, uma vez que permite inúmeras alterações para se chegar ao resultado desejado. O presente estudo visa mostrar as semelhanças entre os parâmetros acústicos da sala real e a sua simulação computacional, com base nos valores de *Just Noticeable Difference* (JND) dos parâmetros analisados, usados na validação do modelo. O espaço usado para o estudo foi o Anfiteatro Camargo Guarnieri da Universidade de São Paulo. Os parâmetros acústicos medidos no local com o software Dirac foram Tempo de Reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}) e Índice de Transmissão de Fala (STI). A simulação do espaço foi executada com o *software* Odeon a partir de um modelo virtual da sala em SketchUp. Os resultados da comparação dos parâmetros acústicos da sala real e a simulação acústica do modelo virtual mostraram a potencialidade da ferramenta de simulação no processo de projeto acústico.

Palavras-chave: Simulação acústica, acústica de salas, projeto acústico.

Acoustic simulation as a design tool and the adjustment of performance spaces

Abstract

Rooms intended for musical performances are spaces where acoustic quality is influenced by various acoustic parameters, making the design of such spaces more complex due to the involvement of so many variables. In contrast, computer simulation allows the prediction of the room's behavior in its various parameters, serving as a crucial tool for designers as it enables numerous alterations to achieve the desired result. The present study aims to demonstrate the similarities between the acoustic parameters of the actual room and its computer simulation, based on the values of Just Noticeable Difference (JND) of the analyzed parameters used in the model validation. The space used for the study was the Camargo Guarnieri Amphitheater at the University of São Paulo. The acoustic parameters measured on-site using Dirac software included Reverberation Time (RT), Early Decay Time (EDT), Clarity (C_{80}), Definition (D_{50}), and Speech Transmission Index (STI). The simulation of the space was performed using Odeon software based on a virtual model of the room in Sketchup. The results of comparing the acoustic parameters of the actual room and the acoustic simulation of the virtual model demonstrated the potential of simulation tools in the acoustic design process.

Keywords: Acoustic simulation, room acoustics, acoustic design.

1. Introdução

A qualidade acústica deve ser observada e considerada no projeto e na execução dos espaços, independentes das diferentes finalidades a que se destinam. O conhecimento dos fenômenos acústicos que regem a propagação sonora em espaços fechados, a aplicação correta desses conceitos e as propriedades acústicas dos materiais empregados na elaboração dos projetos fazem parte dos desafios dos projetistas desses espaços.

Os requisitos acústicos indicados para as salas destinadas à fala são bem diferentes dos requisitos indicados para as salas destinadas a apresentações musicais. O atendimento de diferentes requisitos numa sala está associado à possibilidade de implantação de sistemas de variabilidade acústica que nem sempre é economicamente viável de ser implementado.

A motivação dessa pesquisa começou com o questionamento de maestro e músicos de uma orquestra sinfônica universitária sobre a qualidade de um teatro que estava sendo usado como sala de concerto. Um levantamento inicial sobre o espaço indicou que se tratava de um auditório em um Centro Cultural usado para palestras e seminários da universidade e sem nenhum projeto acústico preliminar. O uso do Centro Cultural foi revisto para atender não somente para a comunidade acadêmica, mas também abarcar a comunidade externa, com espaços destinados às diversas atividades culturais promovidas pela universidade. Para isso, no edifício foram criados novos espaços e o antigo auditório foi indicado para receber atividades musicais, como música de câmara. Para essa nova finalidade foi contratado o um consultor acústico, que realizou um projeto para a adequação do espaço às novas finalidades.

Em visita ao local observou-se que o projeto acústico proposto pelo consultor sofreu algumas modificações ao longo do processo de execução da obra, não sendo executado totalmente o projeto idealizado. Essas alterações provavelmente impactaram na resposta acústica da sala. Assim foi proposta uma investigação sobre a atual condição acústica do auditório. A pesquisa apresentada neste artigo teve com objetivo geral mostrar como a simulação acústica pode ser uma ferramenta útil para projeto e diagnóstico acústico de ambientes, entre eles um teatro.

2. Desenvolvimento da pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida em etapas, a saber: levantamento do projeto arquitetônico do teatro, visita ao local para verificação do projeto executado, medições de parâmetros acústicos no teatro, criação do modelo virtual da sala, simulação acústica com o modelo virtual, comparação entre resultados das medições acústicas com os resultados simulados.

2.1 Levantamento do projeto arquitetônico

A primeira etapa da pesquisa foi buscar o projeto acústico original do auditório proposto pelo consultor, que foi projetado para a finalidade de uso do local para apresentações de música de câmara, além de verificar *in loco* as dimensões dos elementos e o que foi modificado em relação ao projeto original, com a incorporação dessas alterações ao modelo. Esse levantamento permitiu ter acesso ao projeto arquitetônico da sala que foi usado para o cálculo do Tempo de Reverberação necessário para a sala e a especificação dos materiais a serem empregados.

2.2 Medição dos parâmetros acústicos

Para a medição acústica foram escolhidos os parâmetros Tempo de Reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Índice de Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}) e Índice de Transmissão da Fala (STI). A técnica de medição utilizada foi a de resposta impulsiva com o emprego do *software* Dirac. O sistema de medição utilizado é formado pelos equipamentos: fonte omnidirecional Brüel & Kjær modelo 4292-L, amplificador Brüel & Kjær modelo 2734, microfones Behringer modelo ECM80000 e uma interface de áudio PreSonus modelo Audiobox 44USL. O procedimento de medição seguiu as recomendações da norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017[1]. Os parâmetros acústicos TR, EDT, C_{80} , D_{50} foram obtidos em função de frequência em bandas de 1/1 oitava entre 125 e 4000Hz.

Como pontos receptores para as medições acústicas, foram escolhidos dez pontos distribuídos na audiência, sendo oito pontos para receptores (microfones) (P1 a P8) localizados na plateia e dois pontos para receptores (C1 e C2) localizados nos camarotes. Para fonte sonora (F) foi adotado um ponto no centro do palco. No estudo completo, foram adotadas outras posições de fonte, mas para fins deste artigo, é mostrada somente a posição de fonte no centro do palco. As posições de fonte sonora e receptores escolhidas são apresentadas na Figura 1.



Figura 1: Localização do posicionamento dos pontos de fonte sonora (em azul) e de receptores (em vermelho) utilizados na sala

2.3 Modelo virtual e simulação acústica

O projeto acústico proposto pelo consultor foi baseado no cálculo do Tempo de Reverberação do auditório e na especificação de materiais que atendessem o critério de uso de música de câmara para o volume da sala.

O Tempo de Reverberação é sem dúvida um dos mais importantes parâmetros acústicos para qualificar a acústica de uma sala e pode ser obtido por equações bem definidas. Com a evolução dos sistemas de medição outros parâmetros acústicos foram definidos e desenvolvidos como Tempo de Decaimento Inicial(EDT), Índice de Clareza (C_{80}) e Definição(D_{50}). Estes parâmetros podem ser mais facilmente obtidos por meio de cálculos efetuados em programas computacionais que simulam o comportamento sonoro em uma sala.

Para um diagnóstico mais rigoroso sobre a qualidade acústica da sala objeto de estudo foi, portanto, proposto criar o modelo virtual para usá-lo num programa de simulação acústica de salas e obter outros parâmetros acústicos além do Tempo de Reverberação.

A simulação acústica do auditório foi realizada empregando o *software* Odeon. Segundo o seu manual, o Odeon é um programa de simulação, com sua base de cálculo baseada em modelos de cálculo energético, simulando a propagação das ondas sonoras como raios, diminuindo o tempo computacional[2]. O Odeon importa, por meio de um *plugin*, o modelo virtual da sala gerado em SketchUp.

2.4 Validação do modelo virtual

Para que os resultados dos parâmetros acústicos obtidos pela simulação acústica representem acusticamente o ambiente estudado, é preciso garantir que o modelo virtual represente efetivamente o ambiente. Para que isso seja garantido efetuou-se a validação do modelo. Os coeficientes de absorção dos materiais usados no modelo foram obtidos da própria base de dados do programa. A validação do modelo se deu pela comparação dos resultados dos Tempos de Reverberação em função de frequência em bandas de oitava obtidos pela simulação acústica com os resultados obtidos por medição acústica *in loco*. A

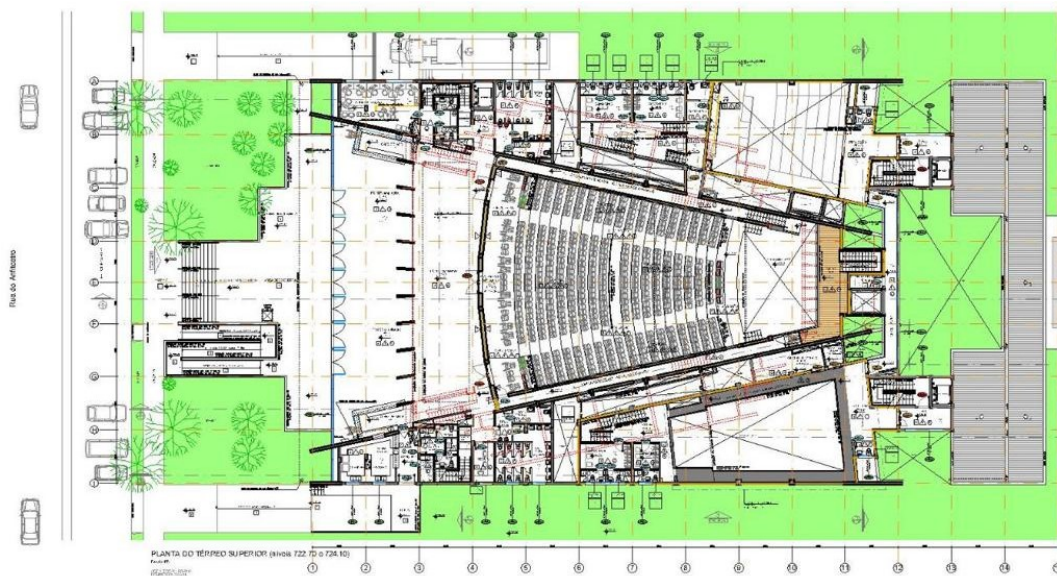
validação do modelo foi considerada aceita quando a diferença entre o tempo de reverberação simulado e medido ficou dentro do intervalo do *Just Noticeable Difference*(JND) indicado na norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017[1], que é de 5% para este parâmetro.

3. Resultados e Discussões

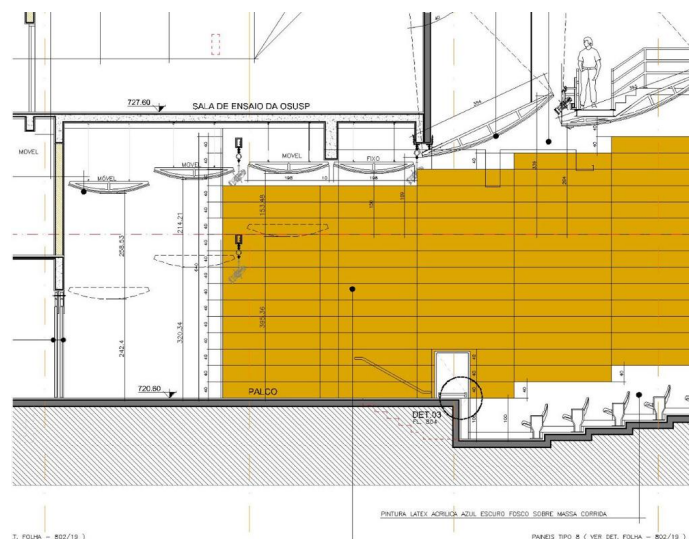
Os resultados dos parâmetros acústicos obtidos na medição acústica da sala e subsequente validação do modelo virtual do ambiente são apresentados nos itens subsequentes.

3.1 Tempo de Reverberação (TR)

O projeto acústico original do auditório foi obtido juntamente com as informações sobre as metas de Tempo de Reverberação que foram calculadas e previstas pelo consultor. A planta baixa e o corte longitudinal do projeto original são apresentados nas Figuras 2a e 2b. Na Figura 3 são apresentadas as metas de Tempo de Reverberação previstas pelo consultor por meio de cálculos utilizando expressões consagradas na literatura.



(a) Planta baixa 2 (a).



(b) Corte 2 (b).

Figura 2: Planta e corte do auditório.

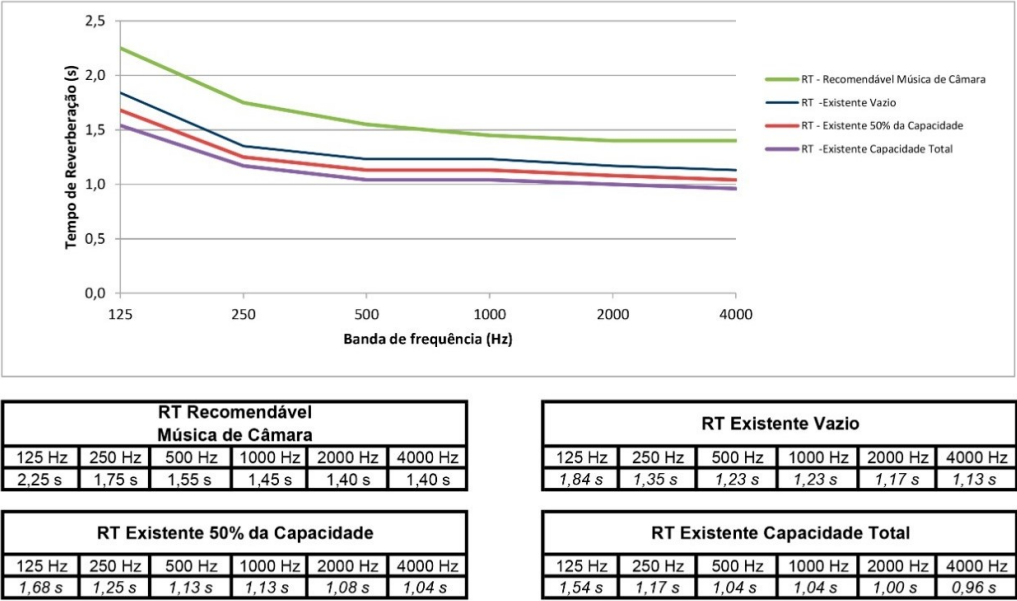


Figura 3: Previsão do Tempo de Reverberação proposto pelo consultor para diferentes taxas de ocupação.

Antes da criação do modelo virtual, foi programada uma visita ao auditório para verificar se as plantas e cortes correspondiam à situação atual do espaço. Várias alterações foram observadas no projeto original. As modificações observadas foram incorporadas na elaboração do modelo virtual. A Figura 4 apresenta o modelo virtual da sala gerado em SketchUp e importado pelo Odeon. Observou-se também na visita ao auditório que, no palco, algumas das superfícies refletoras de fechamento superior (painel refletor acústico convexo) podem se movimentar verticalmente, cada um com alturas máximas e mínimas que variam entre os painéis refletores distintos (conforme figura 2b), deixando o palco com alturas diferentes. As medições dos parâmetros acústicos foram realizadas com a painel refletor acústico convexo na posição mais alta. A Figura 5 apresenta os resultados dos tempos de reverberação obtidos em função de frequência para os pontos receptores adotados na audiência, na condição de painel refletor acústico convexo posição alta.

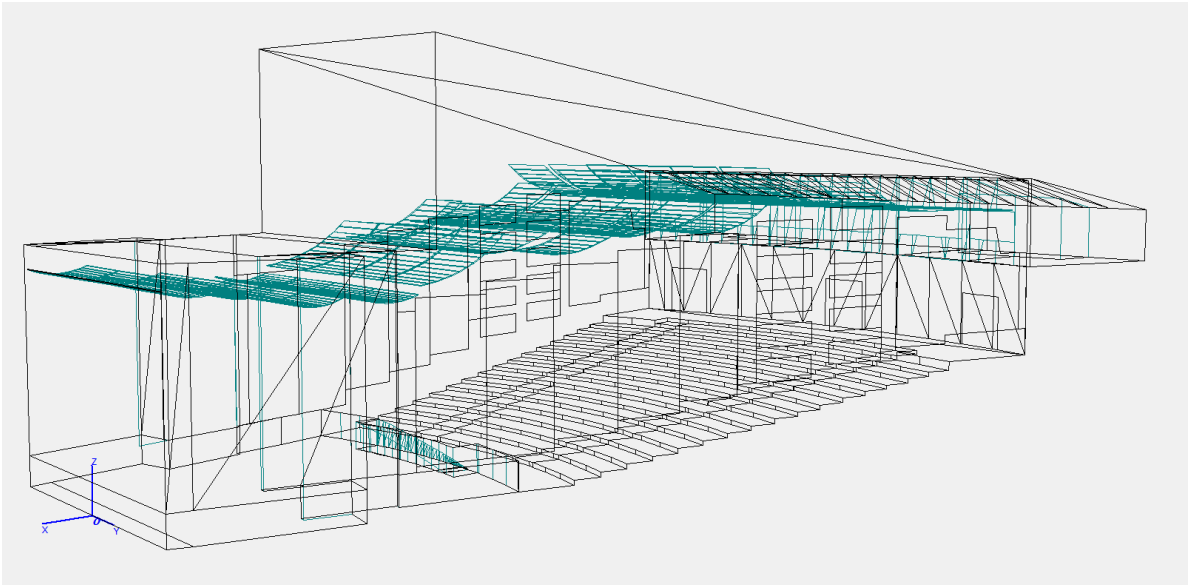


Figura 4: Modelo virtual do teatro.

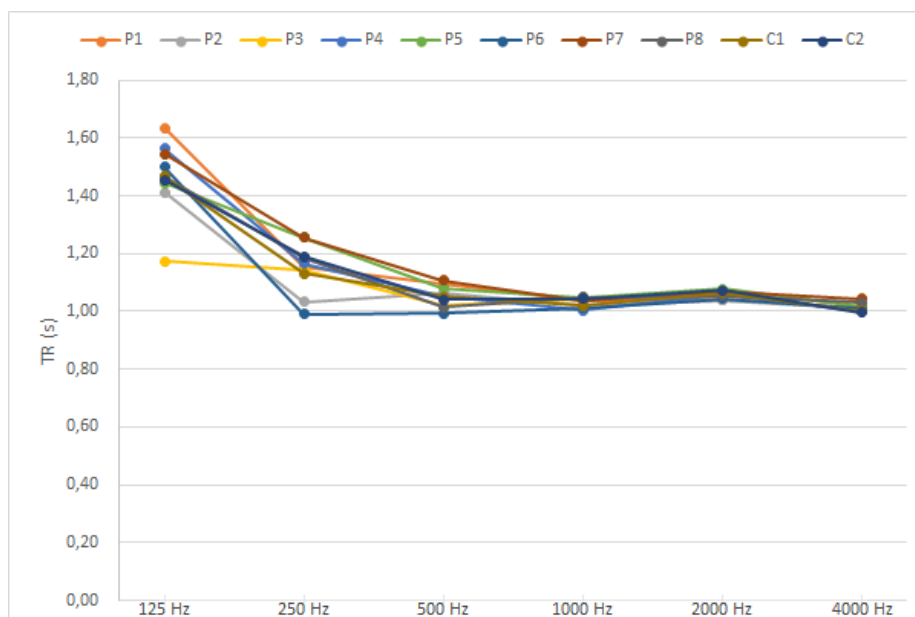


Figura 5: Tempo de reverberação em função de frequências com painel refletor acústico convexo na posição alta.

Os valores dos Tempos de Reverberação em 500Hz variaram de 0,99 a 1,11s em relação aos pontos receptores e atendem o valor de referência para atividade de fala, mas são considerados baixos para atividade de música de câmara (Johnson, 1962; Cooper, 1978; Egan, 1988)[3–5]), mesmo considerando JND de 5%. Observa-se também que os valores são inferiores aos calculados pelo consultor, o que demonstra que as alterações realizadas no projeto inicial foram prejudiciais para a finalidade indicada para a sala. A Figura 6 apresenta os valores médios de Tempos de Reverberação (TR) em função de frequência para os resultados medidos (em verde) e os valores de TR simulados (em azul) com seus respectivos JND, para o modelo validado.

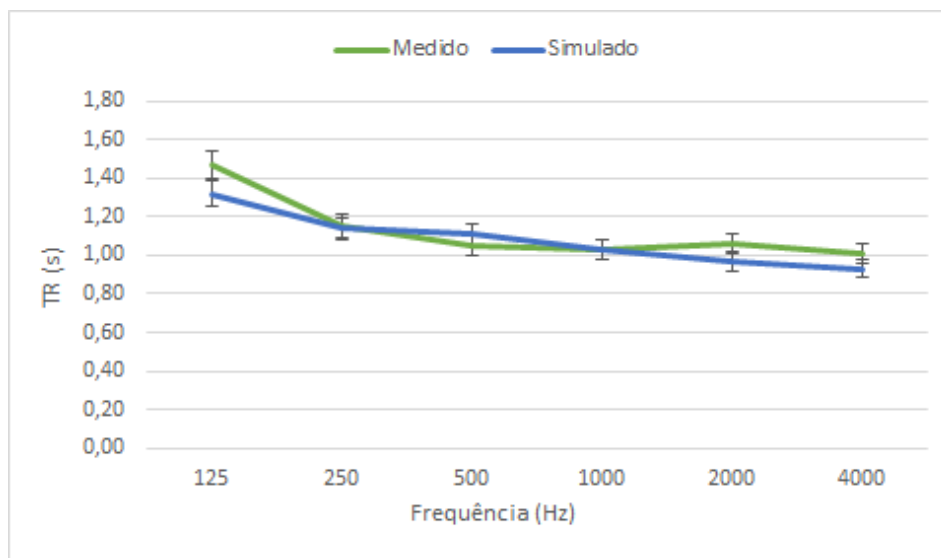


Figura 6: Tempo de reverberação para validação do modelo

3.2 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

A Figura 7 apresenta os valores do Tempo de Decaimento Inicial (EDT) em função de frequência para os valores medidos (em verde) e os valores simulados (em azul), com seus respectivos JND.

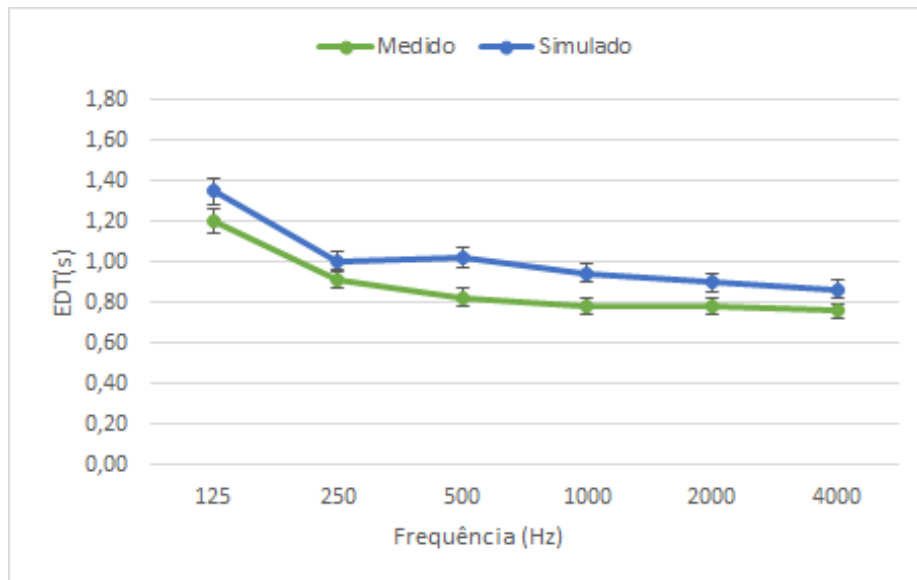


Figura 7: Comparação entre os valores de EDT.

Percebe-se que o comportamento das curvas de EDT em função de frequência são semelhantes entre si. Entretanto, aplicados os valores de JND aos resultados de EDT medidos e simulados, observa-se claramente que não há sobreposição dos valores ao se considerar JND das duas curvas. Também pode-se perceber que os valores encontrados de EDT foram menores do que os valores encontrados para TR, podendo-se inferir que a sensação de reverberância percebida é menor do que o tempo de reverberação de acordo com Kuttruff (2000)[6].

3.3 Clareza (C_{80})

A Figura 8 apresenta os valores médios de Clareza (C_{80}) encontrados na medição acústica da sala (em verde) e os valores médios encontrados na simulação computacional (em azul), com a aplicação do JND de 1dB[1]. Os valores de C_{80} medidos estão ligeiramente superiores aos valores recomendados para frequência acima de 500 Hz. Segundo Mehta (1999)[7], valores de C_{80} entre -4 a 1 dB são considerados aceitáveis, enquanto Long (2014)[8] considera valores de C_{80} entre -4 a 0 dB como aceitáveis para salas para música. Cabe ressaltar que os resultados medidos e simulados variaram entre 1 e 6 dB para C_{80} , estando fora do intervalo previsto nas referências acima citadas.

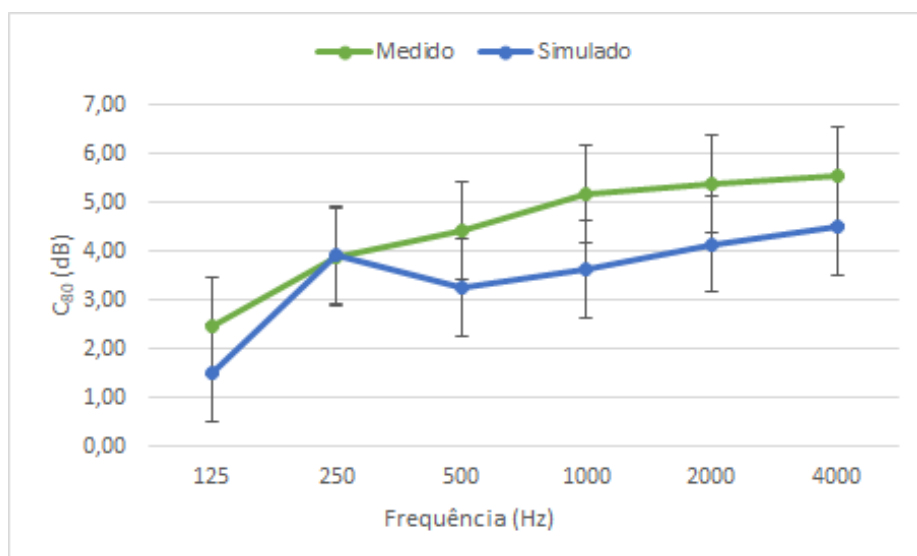


Figura 8: Comparação entre os valores de C_{80} .

Percebe-se que, levando em consideração o valor de JND, os valores de C_{80} simulado se interceptam com os valores medidos. Nesse caso, pode-se dizer que o modelo validado a partir do TR também permitiu a validação do parâmetro C_{80} . Segundo Brandão (2016)[9], valores positivos desse parâmetro indicam que a região das primeiras reflexões possui mais energia que a região da cauda reverberante e valores negativos representa a região em que as primeiras reflexões possuem menos energia que a região da cauda reverberante. Então pode-se dizer que a sala na totalidade possui uma região de primeiras reflexões maior que a cauda reverberante.

3.4 Definição (D_{50})

A Figura 9 apresenta os valores médios de D_{50} encontrados para a medição acústica da sala (em verde) e os valores encontrados na simulação computacional da sala (em azul), com os respectivos valores de JND que é de 0,05[1].

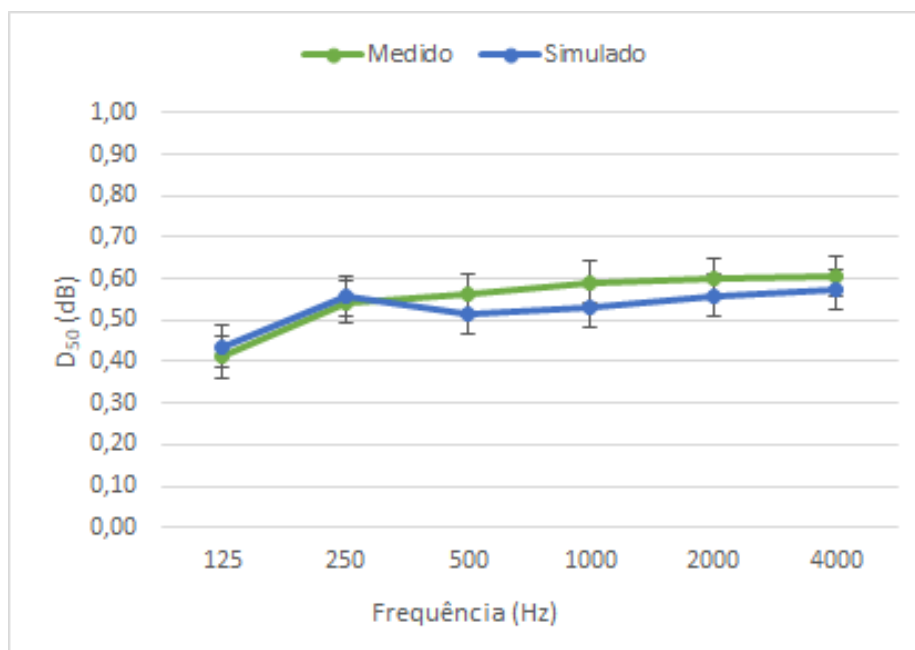


Figura 9: Comparação entre os valores de D_{50} .

Percebe-se que, levando em consideração os valores de JND aplicados, os valores de D_{50} simulados interceptam com os valores de D_{50} medidos, indicando que a validação do modelo por TR também validou o modelo para D_{50} . De acordo com Brandão (2016)[9], os valores apropriados para inteligibilidade de fala são para D_{50} superiores a 0,5, enquanto os valores ideais são superiores a 0,7. Dentre os pontos receptores analisados, 73,4% apresentaram valores de D_{50} superiores a 0,5.

3.5 Índice de transmissão da fala acústica em sala (STI)

A análise da inteligibilidade da fala pode ser feita por meio dos valores de STI e pela associação do parâmetro com a qualidade da transmissão da fala. Na Tabela 1 são apresentados os valores de STI e a respectiva qualificação da transmissão da fala, conforme a norma NBR IEC 60268-16:2018[10].

Tabela 1: Qualificação da transmissão de fala em função do STI.

Intervalos	STI < 0,3	0,3 < STI < 0,45	0,45 < STI < 0,60	0,6 < STI < 0,75	STI > 0,75
Qualificação	Ruim	Pobre	Razoável	Boa	Excelente

Na Figura 10 são apresentados os valores de STI medidos (em verde) e os valores de STI simulados (em

azul). Um estudo de Bradley (1999)[11] encontrou JND de 0,03 para STI.

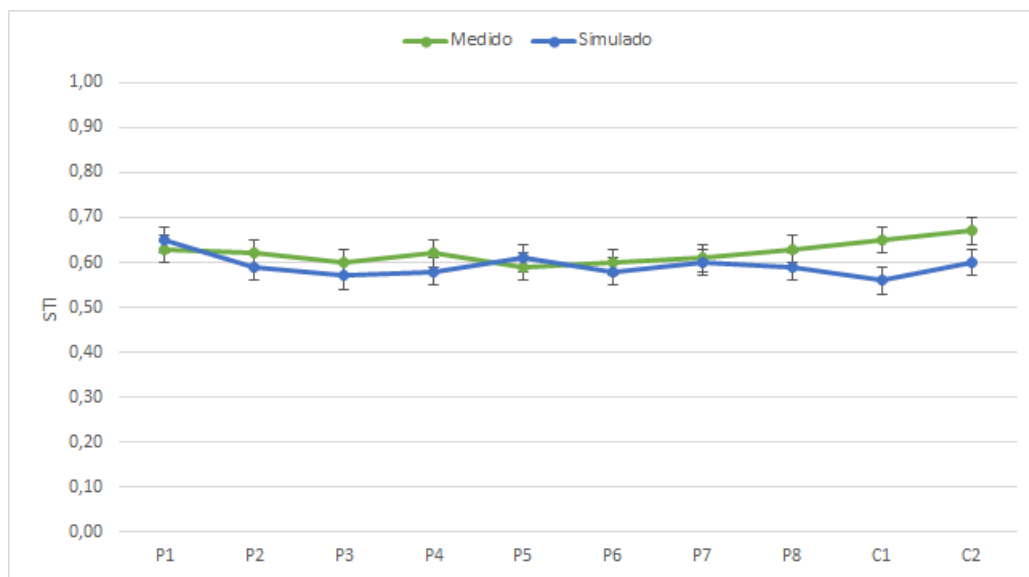


Figura 10: Comparação entre os valores de STI

Aplicados os limites de JND, os valores de STI medidos e simulados se interceptam, indicando que a simulação pode prever de forma satisfatória o comportamento da sala para a sala estudada na região da audiência. Se forem considerados o limite de 2 JND os resultados de STI para os pontos C1 e C2 os valores de SI medidos e simulados se aproximam. Considerando a qualificação da fala na sala, observa-se que todos os valores de STI encontrados estão acima da faixa razoável, com alguns pontos na faixa considerada boa.

4. Conclusões

De maneira geral, observa-se que a simulação se aproxima, em menor ou maior grau, a depender do parâmetro, do comportamento real da sala (obtido por medição de parâmetros acústicos), estando dentro de seus respectivos valores de JND para a maioria dos parâmetros. O projeto inicial proposto para a sala estava baseado no Tempo de Reverberação, sem a possibilidade de calcular, manualmente, outros parâmetros, como o C_{80} , D_{50} , EDT e STI. A partir da validação, pode-se testar algumas sugestões de adequação para a sala, pensado para melhoria de projeto e remediar as alterações não sancionadas no projeto do consultor, e que serão provavelmente apresentadas em um futuro artigo. As sugestões de adequação para a sala podem ser cuidadosamente consideradas com base nos resultados da simulação e na análise dos parâmetros acústicos. Além disso, é importante ressaltar que a obtenção desses resultados por meio da simulação acústica permite uma abordagem mais precisa e detalhada em comparação com a simples estimativa baseada em cálculos apenas do Tempo de Reverberação. Também é importante notar que a simulação acústica como ferramenta permite que sejam previstas alterações nas características da sala sem que se façam alterações reais, diminuindo o uso de recursos financeiros, materiais e de mão de obra, uma vez que se pode simular as propriedades acústicas até que a mesma se encontre no que é desejado para atender as expectativas do projetista e, a partir da simulação, executar as intervenções necessárias.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 3382-1*: Acústica - medição de parâmetros de acústica de salas. Rio de Janeiro, 2017. 28 p.
2. ODEON A/S. *ODEON Room Acoustics Software User's Manual*. Lyngby, 2018. 224 p. Disponível em: https://odeon.dk/download/Version14/ODEON_Manual.pdf.
3. JOHNSON, Russell. Considerations of reverberation, variable by nonelectronic means, in the design of small concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 34, n. 5, p. 726, 1962.
4. COOPER, Jeff. *Building a Recording Studio*. 1. ed. Los Angeles: Synergy Group, 1978.
5. EGAN, M. David. *Architectural Acoustics*. 1. ed. Nova Iorque: McGraw Hill, 1988. ISBN 9780070191112.
6. KUTTRUFF, Heinrich. *Room Acoustics*. 4. ed. Londres: Spoon Press, 2000. ISBN 0-419-24580-4.
7. MEHTA, Madan; JOHNSON, James; ROCAFORT, Jorge. *Architectural Acoustics: Principles and Design*. 1. ed. Nova Jérsei: Prentice Hall, 1999. ISBN 0-13-793795-4.
8. LONG, Marshall. *Architectural Acoustics*. 2. ed. Cambridge: Elsevier Science, 2014. ISBN 9780123982650.
9. BRANDÃO, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1 (rev). ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR IEC 60268-16*: Equipamentos de sistemas de som parte 16: Avaliação objetiva da inteligibilidade da fala pelo índice de transmissão da fala. Rio de Janeiro, 2018. 69 p.
11. BRADLEY, John S.; REICH, Rebecca; NORCROSS, Scott G. A just noticeable difference in c50 for speech. *Applied Acoustics*, v. 58, n. 2, p. 99–108, 1999. ISSN 0003-682X. doi: [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(98\)00075-9](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00075-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X98000759>.