ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Análise de modos normais em salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina

Analysis of room modes in classrooms at Federal University of Santa Catarina

Carolina Zandavalli
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | carolinazandavalli@gmail.com
Fernando Simon Westphal
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis | Brasil | fernando.sw@ufsc.br

Resumo

A análise do comportamento sonoro em baixas frequências é um importante passo na investigação de possíveis influências na avaliação de condicionamento acústico de salas. Medidas simples como comprimento, largura e altura (do chão ao teto) em salas retangulares, com proporções adequadas, podem contribuir para uma melhor distribuição do som, demandando menos intervenções de tratamento acústico e equipamentos de amplificação. Este artigo faz parte de um estudo sobre desempenho acústico nas salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina, campus de Florianópolis, investigando influências das características de projeto na qualidade acústica nos ambientes educacionais. O objetivo do estudo é uma avaliação preliminar, com base em cálculos e fundamentos da literatura, analisando o comportamento dos modos normais, identificando potenciais problemas que ocorrem em baixas frequências. Os resultados são comparados com proporções ideais de sala, considerando referências como área de Bolt e os critérios de Bonello. Apenas uma das salas possui proporções de sala aceitáveis e todas as salas indicam desarmonia na distribuição modal.

Palavras-chave: Modos normais. Acústica de salas. Sala de aula.

Abstract

The analysis of sound behavior in low frequencies is an important step in investigating potential influences on the evaluation of acoustic conditioning in rooms. Simple measures such length, width, and height (floor to ceiling) in rectangular rooms, with appropriate proportions, can contribute to better sound distribution, requiring fewer acoustic treatment interventions and amplification equipment. This article is part of a study on acoustic performance in classrooms at the Federal University of Santa Catarina, Florianópolis campus, investigating the influence of design characteristics on acoustic quality in educational environments. The objective of the study is a preliminary assessment, based on calculations and literature fundamentals, analyzing the behavior of normal modes and identifying potential problems that occur at low frequencies. The results are compared with ideal room proportions, considering references such as the Bolt

Como citar:
ZANDAVALLI, C; WESTPHAL, F.S. Análise de modos normais em salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

area and Bonello criteria. Only one of the classrooms has acceptable room proportions, and all classrooms indicate disharmony in modal distribution.

Keywords: Normal modes. Room acoustics. Classroom.

INTRODUÇÃO

A reflexão sonora excessiva em ambiente fechados, nas paredes, teto e piso, resulta na percepção de sons repetidos e distintos do original, afetando negativamente a sua qualidade – um efeito que deve ser considerado no projeto arquitetônico, principalmente em ambientes que necessitam do uso da voz, como salas de aula.

Para compreender como o som se comporta em um ambiente, busca-se identificar como a energia sonora está distribuída em cada faixa de frequência. Diversos efeitos físicos podem influenciar com maior ou menor intensidade nos resultados e modificar a forma como o som é ouvido, como a ocorrência de ondas estacionárias, também conhecidas como os “modos da sala”, ou modos normais [1].

Em salas pequenas, a distribuição dos modos normais torna-se particularmente importante, pois identifica as frequências nas quais os modos se comportam de forma desigual, indicando perdas ou coloração sonora [2].

As dimensões da sala influenciam diretamente na ocorrência dos modos normais, assim como o aumento da frequência. Conforme essa aumenta, os modos ocorrem mais próximos, aumentando também a densidade modal, número médio de modos por hertz [3].

De acordo com Rindel [4], existe uma relação entre a tendência do aumento de coloração do som em baixas frequências devido à baixa densidade modal.

Diversos autores como Bolt [5], Bonello [6] e Cox [7] desbravaram estudos sobre proporções experimentais para um comportamento mais equilibrado dos modos, diminuindo os efeitos das ondas estacionárias e possibilitando melhor condicionamento acústico.

Com base nisso, o objetivo desse trabalho consiste em uma avaliação preliminar do comportamento acústico de salas de aula, utilizando conceitos da literatura e a análise dos modos normais, identificando potenciais problemas que ocorrem em baixas frequências e que podem se tornar possíveis contribuições para futuras correções de projeto.

O estudo foi feito com a amostra de seis salas de aula de formatos regulares localizadas na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

As salas foram escolhidas com base na capacidade de alunos, buscando amostras representativas de salas padrões que mais se repetem no campus universitário Trindade, na cidade de Florianópolis.

OS MODOS NORMAIS NO DESEMPENHO ACÚSTICO DE SALAS

A ocorrência dos modos normais, no contexto de espaços fechados, está relacionada às interferências no modo de vibração das ondas sonoras no encontro entre as superfícies rígidas da sala. Isso se traduz frequentemente na percepção de sons oscilando dentro do ambiente [8].

Além disso, Interferências sonoras também podem estar relacionados com as distâncias de fonte sonora e receptor. A chamada distância crítica é considerada o ponto em que o som direto da fonte e o som refletido ou “reverberante” são iguais [8]. Esse dado também é importante para evitar interferências ao posicionar equipamentos de amplificação sonora, por exemplo e pode ser calculado previamente no projeto. O cálculo pode ser realizado com auxílio da Equação 1:

$$\mathrm{Dc} = 0{,}057\sqrt{\frac{\mathrm{Qv}}{\mathrm{RT60}}}\,\mathrm{RT} \quad (1)$$

Em que: 0,057 é o valor da constante, convertido para o Sistema Internacional, Q é a direção da fonte sonora, aqui utiliza-se = 1; v é o volume da sala e RT60 é o tempo ótimo de reverberação, atribuído como 0,6 segundos para salas de aula.

Quando se tratam de paredes paralelas, a distância entre elas pode determinar se as ondas sonoras refletidas se alinharão de forma a reforçar ou cancelar determinadas frequências. Esse é o fenômeno das ondas estacionárias, onde certas partes da sala apresentam uma alta intensidade sonora (pontos de pressão máxima), enquanto outras exibem uma baixa intensidade sonora (pontos de pressão mínima).
A equação para identificação da quantidade de modos na mesma frequência é derivada da acústica ondulatória e pode ser expressa pela Equação 2:

$$\mathrm{Fn} = \mathrm{c}/2\sqrt{((\mathrm{Nx}/\mathrm{Lx})^2 + (\mathrm{Ny}/\mathrm{Ly})^2 + (\mathrm{Nz}/\mathrm{Lz})^2)} \quad (2)$$

Em que: c equivale a velocidade do som, geralmente 344m/s, N representa um número natural e os eixos x, y, z equivalem as medidas de largura, comprimento e altura da sala, respectivamente.

Os modos normais são classificados em três tipos: axial, tangencial e oblíquo. O primeiro ocorre ao longo do eixo de duas paredes paralelas e conforme a frequência da fonte sonora aumenta, diferentes padrões de ondas estacionárias emergem, afetando a forma como o som é distribuído no ambiente.
Já os modos tangenciais, envolvem as quatro superfícies da sala, ocorrendo quando as ondas sonoras balançam entre paredes opostas, assim como entre o encontro do chão e do teto. Consequentemente, quando essa interferência abrange todas as seis superfícies da sala os modos normais são classificados como oblíquos.
Esta investigação foca principalmente nos modos axiais, pois esses têm picos de ressonância em certas frequências, tornando-as mais dominantes na sala [9].
Isto pode ser útil no projeto e na adaptabilidade da sala de aula para melhorar a inteligibilidade da fala, por exemplo.

DIMENSIONAMENTO DE SALAS REGULARES

As salas ditas regulares, são tipicamente salas com paredes paralelas, em que se pode estabelecer três medidas: comprimento, largura e altura.
O dimensionamento e as proporções ditas como "áureas" propostas pela literatura, como a área de Bolt e os critérios de Bonello, já citados, servem como diretrizes valiosas para alcançar uma distribuição mais uniforme dos modos normais em respostas de baixa frequência.
Outro aspecto essencial é a Equação de frequência de Schroeder (3), que avalia a sala como duas regiões distintas: uma atuando como ressonador e outra como absorvedor. Em termos mais simples, representa a frequência na qual a absorção acústica dentro do ambiente começa a dominar as reflexões sonoras, resultando numa paisagem sonora menos "reverberante" e mais clara, particularmente à medida que as frequências aumentam [9].

$$Fs = 2000\sqrt{(RT60/v)} \quad (3)$$

Em que: F_s é a Frequência de Schroeder, RT60 é o tempo ótimo de reverberação e v é o volume (m^3). Para espaços de sala de aula, utiliza-se RT60 = 0,6 segundos.

O cálculo da Frequência de Schroeder é essencial pois indica um limite em que o comportamento sala, predominantemente modal, se transforma em comportamento estatístico. Isso permite concluir que acima da frequência de Schroeder os efeitos dos modos ressonantes influenciam menos no comportamento da sala [9].
A tabela 1 mostra as dimensões e proporções das seis salas analisadas e cálculos da Frequência de Shroeder (F_s) e distância crítica, obtidos a partir das equações 3 e 1, respectivamente.

Tabela 1: Exemplares de salas de aula

Sala	Dimensões (LxCxH)	Volume (m^3)	Proporções (LxCxH)	F_s (Hz)	Distância Crítica (m)
EEL010	7,12x7,11x2,99	151,36	2,38x2,38x1	126	0,91
CSE111	7,14x5,99x3,29	140,70	2,17x1,82x1	131	0,87
CSE106	7,14x4,75x3,29	111,58	2,17x1,44x1	147	0,78
CCJ003	5,93x8,20x3,13	152,19	1,89x2,61x1	126	0,91
CTC204	7,06x10,69x3,31	249,81	2,13x3,22x1	98	1,16
CFH334	7,15x7,09x3,15	159,68	2,26x2,25x1	123	0,93

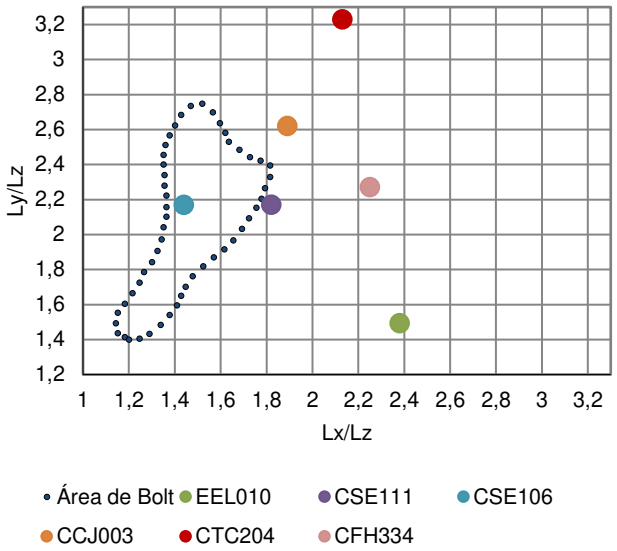
Fonte: Os autores.

PROPORÇÕES IDEAIS SEGUNDO BOLT

Com base no conhecimento da influência de atuação dos modos normais, o equilíbrio no espectro é necessário para que não haja o agrupamento de modos nem lacunas excessivas entre frequências adjacentes [10].
Para tanto, um ponto de partida para a análise de baixa frequência, em uma sala regular, pode ser a correta proporção entre as três dimensões, largura, comprimento

e altura. Um exemplo já citado é a carta de Bolt, ou “Bolt-área” que estabelece uma região de proporções com maior aceitabilidade para o equilíbrio dos modos.
As medidas das seis salas de aula foram inseridas no gráfico 1, concluindo que apenas uma sala, a CSE106, atende proporções satisfatórias. As salas CSE111 e CCJ003 aproximam-se um pouco do referencial e as demais apresentam-se consideravelmente fora das proporções ideais.

Gráfico 1. Área de Bolt X Proporções das salas de aula da UFSC



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Bolt [2]. Nota: Os eixos Lx, Ly e Lz representam a relação entre as medidas das salas de largura, comprimento e altura, respectivamente.

CRITÉRIOS DE BONELLO

Bonello cita dois critérios para avaliação de salas em baixas frequências. O primeiro estabelece que o crescimento do número de modos por banda de 1/3 de oitava deve ser monotônico, ou seja, uma banda superior deve conter número igual ou superior a quantidade de modos da banda inferior.
O segundo critério coloca que não deve haver modos coincidentes em uma mesma banda de 1/3 de oitava, com exceção se essa conter cinco ou mais modos [11].
Esses critérios auxiliam na prevenção de problemas em baixas frequências, servindo como direcionamento para indicar bons resultados e, consequentemente, estratégias de projeto.

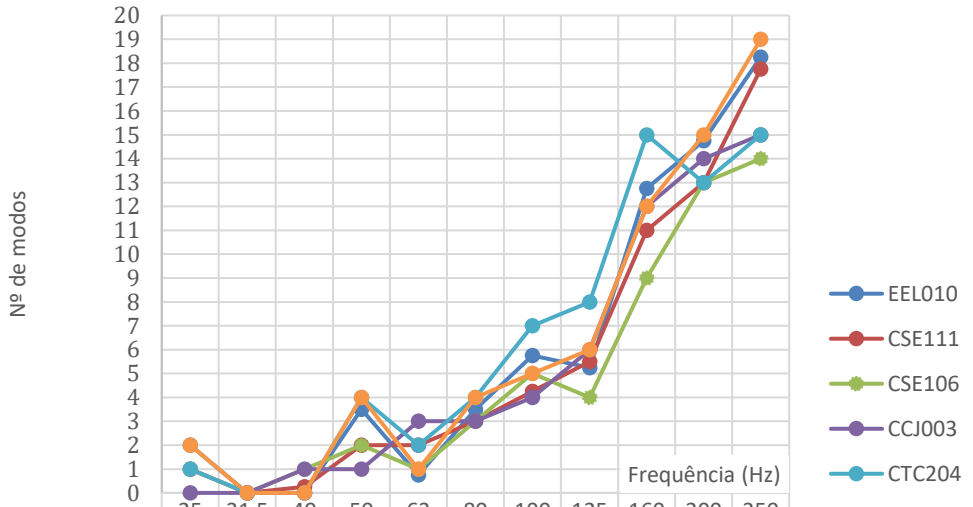
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Visto que o comportamento dos modos normais influencia diretamente na forma como a pressão sonora é distribuída no ambiente, é importante identificar os principais intervalos de frequências de ressonância da sala [11].
A contagem de modos e distribuição por faixa de frequência foi feita a partir do cálculo dos modos, Equação 2, e subsequentemente, é possível avaliar também a densidade modal, dividindo a quantidade de modos por frequência.

É importante salientar que a análise realizada nesse trabalho contempla exemplos de salas com formatos regulares, permitindo como estudo preliminar essa avaliação analítica. Além disso, salas com uso de fala, como é o exemplo de salas de aula, essa análise em baixas frequências torna-se interessante a partir das frequências de 80 Hz, mais próximas da fala humana, permitindo um pouco de flexibilidade em relação a salas de escuta crítica e estúdios de música.

A quantidade de modos por banda de 1/3 de oitava de frequência foi plotada para cada sala do estudo, e o resultado está apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2. Distribuição da quantidade de modos por faixa de frequência.



	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250
EEL010	2	0	0	4	1	4	6	5	13	15	18
CSE111	1	0	0	2	2	3	4	6	11	13	18
CSE106	1	0	1	2	1	3	5	4	9	13	14
CCJ003	0	0	1	1	3	3	4	6	12	14	15
CTC204	1	0	0	4	2	4	7	8	15	13	15
CFH334	2	0	0	4	1	4	5	6	12	15	19

Fonte: Os autores.

A partir do Gráfico 2, é possível perceber desarmonia entre a distribuição modal, como intervalos de frequências ausentes de modos e outros em que ocorrem modos em duplicidade. Apenas a sala CCJ003 apresentou crescimento linear do número de modos, porém a duplicidade de modos é menor do que 5, atendendo apenas um dos critérios de Bonello.

As demais salas não crescem monotonicamente, demonstrando picos em que os modos aumentam e diminuem, apresentando comportamento mais estável a partir de 125 Hz, em que os modos efetivamente aumentam conforme a elevação da frequência. Uma boa distribuição modal seria a distribuição de um modo por frequência, o que evita a concentração de energia em bandas muito estreitas [11].

Dessa forma, os resultados indicam a necessidade de maior controle dos modos normais para que a sala apresente bons resultados em baixas frequências e menor influência desses em médias e altas frequências.

Para tanto, é preciso fazer o correto amortecimento da sala e esse também está associado ao tempo de reverberação [11]. A adequação do tempo de reverberação também favorece a distribuição da energia sonora e uma boa estratégia é trabalhar com um valor de tempo ótimo de absorção objetivo, podendo a partir desse estimar a quantidade de absorção necessária.

Essas são análises complementares e a contagem dos modos é essencial para a avaliação, pois, como ocorre no exemplo da sala CSE111, essa se enquadra no perímetro da carta de Bolt, porém não descreve boa distribuição modal quando esses são calculados.

Outra observação é que salas com proporção iguais, como o exemplo da sala EEL010, que possui o formato próximo de um quadrado, são extremamente desaconselháveis por configurar má distribuição dos modos, e essa situação se encontra presente na universidade [11].

Com base na análise proposta, identificados problemas como dimensionamento e desarmonia dos modos, algumas alternativas de correções podem ser feitas e exploradas em trabalhos futuros. Os resultados ressaltam a carência dessas análises.

A contagem dos modos favorece a identificação das frequências modais e em seguida, a definição das zonas de pressão máxima, onde os projetos deverão priorizar a aplicação dos materiais de absorção, como exemplo, absorvedores de membrana e otimização de espaços ociosos como quinas das salas [11].

CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo a análise do comportamento acústico em baixas frequências de salas de aula da Universidade Federal de Santa Catarina, concluindo que todas as salas possuem problemas em relação a densidade modal e distribuição dos modos por bandas de 1/3 de oitava de frequência.

Os resultados dessa análise tornam-se importantes para que boas soluções de projeto possam ser alcançadas e propostas em trabalhos futuros. Essas contribuições possibilitam redução de custos e melhor desempenho dos materiais de absorção que deverão ser incluídos.

REFERÊNCIAS

[1] JACOBSEN, F. et al. **Fundamentals of Acoustics and Noise Control.** Technical University of Denmark, Department of Electrical Engineering, 2011.

[2] BOLT, R. Note on Normal Frequency Statistics for Rectangular Rooms. **J. Acoust. Soc.** Am., vol. 18 (1), 1946, pp. 130-133.

[3] WANKLING, M.; FAZENDA, B. Studies In Modal Density – Its Effect At Low Frequencies. **Proceedings [...]** Brighton: Reproduced Sound 25, 2009.

[4] RINDEL, J. H. Modal Energy Analysis of Nearly Rectangular Rooms at Low Frequencies. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 101, n. 6, p. 1211–1221, 1 nov. 2015

[5] BONELLO, O. J. A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes. **J. Audio Eng. Soc**, vol. 19, 2012, pp. 597-606.

[6] COX, T. J. Room Sizing and Optimization at Low Frequencies. **J. Audio Eng. Soc**., v. 52, n. 6, 2004.

[7] BALLOU, G. (ED.). **Handbook for sound engineers**. 4th ed. Amsterdam; Boston: Focal Press, 2008.

[8] LONG, M., 2014. **Architectural Acoustics** (Second Edition). Boston: Academic Press, 2014.

[9] Avelar, M., Bonifácio, P., Bertoti, E., Brandao, E., Catai, R., 2018. **Determinação da faixa de frequência para a abordagem estatística em acústica de salas.** Disponível em: https://doi.org/10.17648/sobrac-87073. Acesso em 9 de maio de 2024.

[10] BISTAFA et al. Adaptive control of low-frequency acoustic modes in small rooms. **The Open Acoustics Journal**, v. 5, p. 16-22, 2012. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/9e15f5c0-c0f3-4d73-8263-d1aa5b1670b8/Bistafa-2012-Adaptive%20control%20of%20low-frequency%20acoustic%20modes%20in%20small%20rooms%20ok.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

[11] BRANDÃO, E. **Acústica de Salas**: projeto e modelagem. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016. v. 1. 655p.