POTENCIALIDADE ACÚSTICA DE TEATRO EM INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR

Stelamaris R. Bertoli (1); Samira M. Alves (2)
(1) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Construção, rolla@fec.unicamp.br, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP – Cidade Universitária Zeferino Vaz – Campinas – SP 13083-852 Campinas - SP
(2) Engenheira Civil, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, samiraeng@outlook.com, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP – Cidade Universitária Zeferino Vaz – Campinas – SP 13083-852 Campinas - SP

RESUMO

A análise do potencial acústico de espaços de uso multidisciplinar, como o caso dos auditórios em ambientes acadêmicos, é fundamental para traçar um panorama do comportamento acústico do espaço, tendo em vista a complexidade de atividades realizadas que vão desde palestras a apresentações musicais. A avaliação acústica envolve a medição e análise de parâmetros acústicos que permitem identificar a qualidade acústica para a atividade desejada. Esse trabalho apresenta um estudo realizado no auditório da Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Estadual de Campinas (FCM/UNICAMP), onde foram avaliados os parâmetros: tempo de reverberação (TR), tempo de decaimento inicial (EDT), clareza (C80), definição (D50) medidos em função de frequência em bandas de 1/1 oitava entre 125 e 4000 Hz e índice de transmissão da fala (STI), obtidos pelo método de resposta impulsiva. De acordo com a análise dos resultados, verificou-se que o tempo de reverberação do auditório é adequado para atividades musicais leves, porém, é considerado elevado para atividades de fala e reduzido para apresentações de música orquestral. Em relação aos valores de EDT, constatou-se que o auditório proporciona maior sensação de reverberância. Já os valores de C80 confirmam a sensação de clareza para música. A qualidade da fala segundo os valores de STI é razoável e coincide com os resultados de D50. O som residual do auditório está adequado e reflete o bom isolamento sonoro proporcionado pelas paredes envoltórias do ambiente.

Palavras-chave: acústica de salas, qualidade acústica de auditórios, acústica de teatros.

ABSTRACT

The analysis of the acoustic potential of multidisciplinary use spaces, such as auditoriums in academic environments, is essential to draw a panorama of the acoustic behavior of the space, considering the complexity of activities carried out, ranging from lectures to musical performances. The acoustic evaluation involves the measurement and analysis of parameters that allow identifying the acoustic quality for the desired activity. This work presents a study carried out in the auditorium of the Faculty of Medical Sciences of the State University of Campinas (FCM/UNICAMP), where the following parameters were evaluated: where parameters such as reverberation time (TR), early decay time (EDT), clarity (C80), definition (D50) measured according to frequency in 1/1 octave bands between 125 and 4000 Hz, and speech transmission index (STI), obtained through the impulse response method, were evaluated. According to the analysis of the results, it was found that the reverberation time of the auditorium is suitable for light musical activities, but considered high for speech activities and low for orchestral music presentations. In relation to the values of EDT, it was found that the auditorium provides a greater sensation of reverberance. C80 values confirm the sensation of clarity for music. The quality of speech according to the STI values is reasonable and coincides with the results of D50. The residual sound of the auditorium is appropriate and reflects the good sound isolation provided by the surrounding walls of the environment.

Keywords: room acoustics, acoustic quality, theater acoustics.

1. INTRODUÇÃO

Instituições de ensino superior contam no conjunto de suas edificações, além das salas de aulas, de espaços designados de anfiteatros, auditórios ou teatros. Na grande maioria, esses espaços têm com função abrigar eventos como palestras, isto é, espaços destinados à palavra falada, com ou sem amplificação sonora. No entanto, observa-se cada vez mais a expansão desse uso para outras atividades como apresentações musicais, tornando-os espaços de múltiplo uso. Para garantir essa diversidade de funcionalidade, do ponto de vista acústico, é necessário que o espaço tenha variabilidade acústica.

Uma das faculdades de Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), a Faculdade de Ciências Médicas (FCM), possui um auditório que foi construído originalmente para receber palestras, simpósios, congressos e formaturas. Mais recentemente vem recebendo eventos como apresentações de grupos musicais, orquestras e corais. Em várias oportunidades a qualidade acústica do espaço foi questionada.

Motivados por essas mudanças de uso e pelos questionamentos sobre o espaço foi proposto um estudo do auditório para levantar a potencialidade acústica do espaço a fim de identificar a melhor finalidade de uso. Eventualmente a depender dos resultados da análise acústica poderiam ser propostas alterações do espaço para uma possível variabilidade acústica visando os diferentes usos do ambiente

2. OBJETIVO

O objetivo geral desse trabalho é apresentar os resultados da avaliação e análise do potencial acústico de um auditório de uma instituição de ensino superior para identificar a melhor finalidade de seu uso.

3. MÉTODO

Os procedimentos metodológicos empregados na avaliação e na análise do potencial acústico do auditório da instituição de ensino superior, objeto de estudo, foram baseados em medidas de parâmetros acústico do espaço e comparação com resultados de estudos similares encontrados na literatura científica para esse tipo de ambiente.

3.1. Descrição do ambiente

O Auditório da Faculdade de Ciências Médicas da UNICAMP faz parte do complexo de prédios da faculdade e é usado para eventos acadêmicos, científicos e apresentações artísticas. Ocupa uma área de aproximadamente três mil metros quadrados, altura interna de 9m e capacidade para um público de 327 pessoas. O prédio foi construído com bloco de concreto e o telhado em estrutura metálica. A Figura 1 mostra a vista externa no Auditório.



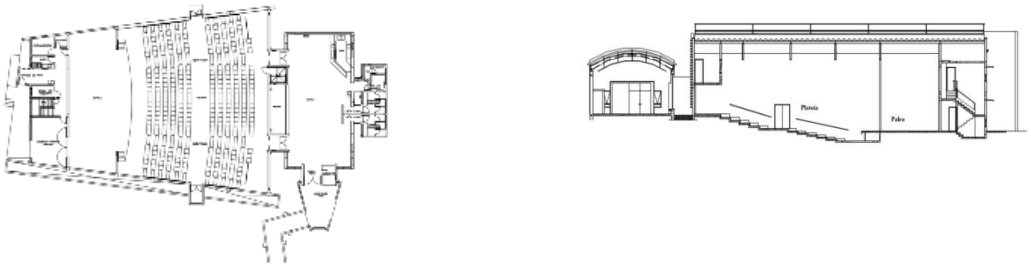
Figura 1 – Vista externa do auditório. Fonte: https://www.google.com.br/maps. Acesso em: 07 mai. 2022.

O formato do Auditório é em leque, possui palco elevado de 10m por 7m. A plateia é inclinada e dividida em sessões, sendo duas ao longo do comprimento e três ao longo da largura. O teto é formado por placas refletoras com diferentes inclinações. Uma cabine de som está localizada ao fundo do auditório. As vistas internas do auditório em diferentes sentidos são apresentadas na Figura 2. Uma tela de projeção cobre a parede no fundo do palco, lateralmente existem biombos que permanecem em posições fixas. O acesso do público para o Auditório é feito por um hall de entrada que está no fundo da área da plateia do auditório. O hall é devidamente isolado do auditório por meio de uma parede espessa e portas de madeira recobertas por cortinas que permanecem fechadas durante os eventos. As Figuras 3 mostram (a) a planta e (b) o corte transversal do auditório.



(a) (b)

Figura 2 – Vista interna do auditório (a) em direção ao palco (b) em direção ao fundo. Fonte: https://www.google.com.br/maps. Acesso em: 07 mai. 2022.



(a) (b)

Figura 3 – (a) planta e (b) corte transversal do auditório. Fonte: os autores.

3.2. Procedimento de Medição

Os parâmetros acústicos adotados para a avaliação do auditório foram: Tempo de reverberação (TR), Tempo de decaimento inicial (EDT), Clareza (C80), Definição (D50) e Índice de transmissão da fala (STI) obtida pelo método de resposta impulsiva empregando o programa Dirac de medição acústica de salas. O som residual também foi medido no local.

Para a medição dos parâmetros acústicos TR, EDT, C80, D50 e STI foram empregados os equipamentos: fonte omnidirecional Brüel & Kjær modelo 4292-L, amplificador Brüel & Kjær modelo 2734, microfones Behringer modelo ECM80000, uma interface de áudio PreSonus modelo Audiobox 44USL. Para a medição do som residual foi usado o medidor de nível de pressão sonora BK 2238 da Bruel &Kjaer. O procedimento de medição adotado foi o recomendado pela norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017. Os parâmetros TR, EDT, C80, D50 foram medidos em função de frequência em bandas de 1/1 oitava entre 125 e 4000 Hz.

O número de posição de fontes e de receptores (microfones) adotados foi bem maior que o número mínimo indicado pela norma ABNT NBR ISO 3382-1:2017 para permitir uma análise acústica mais refinada do local. Foram adotadas quatro posições de fontes sonoras no palco e 28 posições de receptores distribuídos na plateia. As Figuras 4a e 4b mostram o posicionamento da fonte sonora (em vermelho) e dos receptores (em azul), respectivamente. A medição acústica foi realizada na condição de auditório vazio.



(a) (b)

Figura 4 – Posicionamento dos pontos (a) de fonte sonora e (b) de receptores.

3.3. Valores de referência para análise dos dados

Para a análise dos parâmetros acústicos adotados para a avaliação do auditório foi necessário levantar na literatura valores de referência para cada parâmetro acústico.

O tempo de reverberação de um ambiente depende do volume e do uso do espaço. Na literatura, o tempo ótimo de reverberação em geral é indicado para a frequência de 500 Hz. Mehta (1999) indica um gráfico de tempo ótimo de reverberação a 500 Hz em função do volume para diferentes tipos de ambientes. Utilizando essa referência bibliográfica e o volume do auditório de 3184 m^3, estima-se que os valores de tempo ótimo de reverberação adequados para o ambiente sejam os valores indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tempos de reverberação estimado para o volume do Auditório.

Tipo de uso	**Tempo de reverberação (s)**
Música de igreja	2,2
Sala de Concertos para música orquestral	1,8
Sala de Concertos para música leve	1,5
Teatros de Ópera	1,2
Auditórios para fala	0,8

O parâmetro tempo de decaimento inicial (EDT) não tem valor específico para os ambientes, mas como representa a sensação de reverberância do espaço, ele geralmente é comparado com o valor de TR. Se seu valor é superior ou inferior aos valores de TR, significa que o ambiente apresenta maior ou menor sensação de reverberância, respectivamente.

O parâmetro acústico clareza (C80) é indicado para avaliação de clareza para espaços destinados a apresentações musicais. Segundo a norma ABNT NBR 3328-1:2017 os valores típicos variam de -5 dB a +5dB, entretanto Beranek (2004) é um pouco mais restritivo e indica valores adequados para C80 o intervalo entre -4dB e +4dB.

A definição (D50) é um parâmetro acústico usado para avaliar ambientes destinados à fala, podendo variar entre zero (0) e um (1). Quanto mais próximo de 1 o valor de D50, melhor é a qualidade da fala no ambiente. A norma ABNT NBR 3328-1:2017 indica valores típicos para a definição entre 0,3 e 0,7.

A inteligibilidade da fala num ambiente também pode ser avaliada pelo parâmetro índice da transmissão da fala (STI – *Speech Transmission Index*). A qualidade da fala pode ser classificada de acordo com a faixa de STI observada, conforme indica a Tabela 2

Tabela 2 – Qualificação da transmissão da fala em função do STI.

Intervalos	STI < 0,3	0,30 < STI < 0,45	0,45 < STI < 0,60	0,60 < STI < 0,75	STI > 0,75
Qualificação	Ruim	Pobre	Razoável	Boa	Excelente

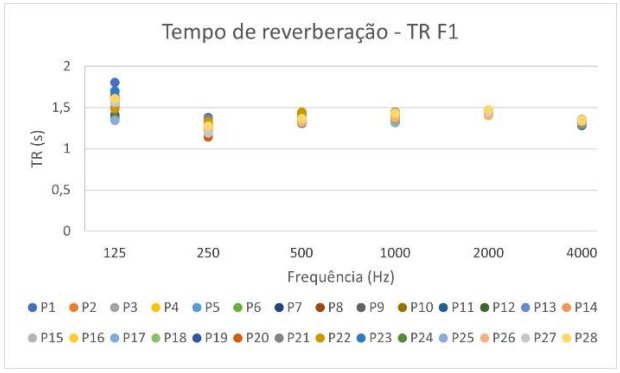
Fonte IEC 60.268-16:2011

4. RESULTADOS

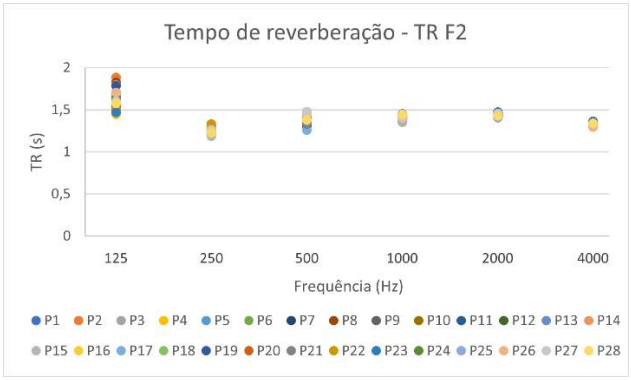
Os resultados das medições, análise e discussões são apresentados por parâmetro acústico medido.

4.1. Tempo de reverberação (TR)

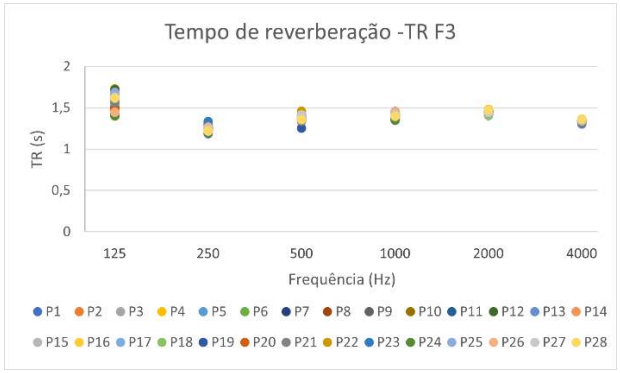
Os resultados do tempo de reverberação (TR) em função de frequência em banda de 1/1 oitava entre 125 e 4000 Hz obtidos para os pontos receptores adotados são apresentados para cada fonte separadamente. As Figuras 5 de (a) a (d) apresentam os resultados de TR para as fontes de 1 a 4, respectivamente.



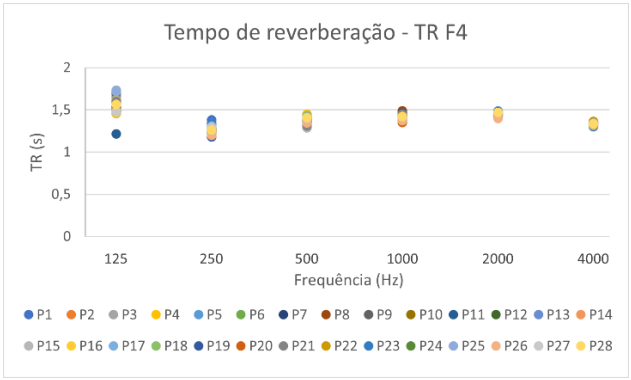
(a) Fonte 1



(b)Fonte 2



(c) Fonte 3



(d) Fonte 4

Figura 5 – Tempo de reverberação em função de frequência. (a) Fonte 1, (b) Fonte 2, (c) Fonte 3 e (d) Fonte 4

Observa-se que o comportamento do tempo de reverberação em função de frequência é o mesmo para as quatro posições de fonte sonora. A dispersão dos valores de TR em relação aos pontos receptores é maior nas baixas frequências. A Figura 6 apresenta a média espacial de TR em função das fontes. A média espacial dos valores de TR para a frequência de 500 Hz encontrados para as quatro posições de fonte foi de 1,38s. Para o volume da sala o valor de TR adequado para atividades musicais se o tipo de música é orquestral deve ser de 2,2s, se o tipo de música é leve deve ser 1,5s e para atividades de fala o valor é de 0,8s (Tabela 1). Observa-se que a sala atende os requisitos de TR para música leve já que o valor da diferença mínima perceptível (JND – Just Noticiable Difference) para esse parâmetro é de 5%, e, portanto pode variar de 0,07s.

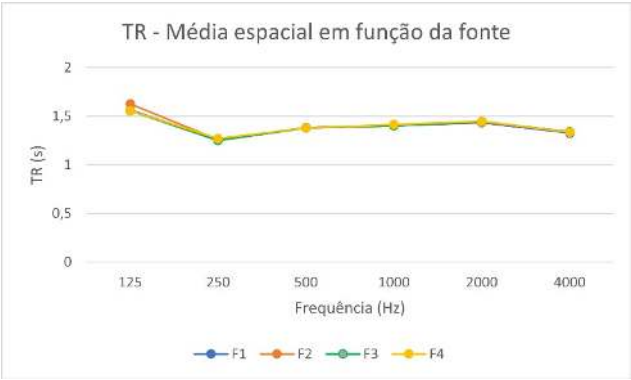
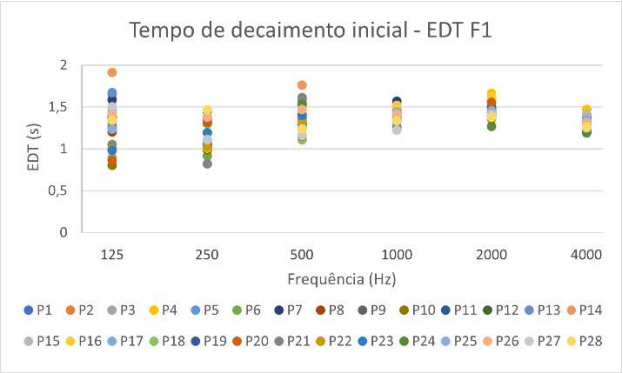


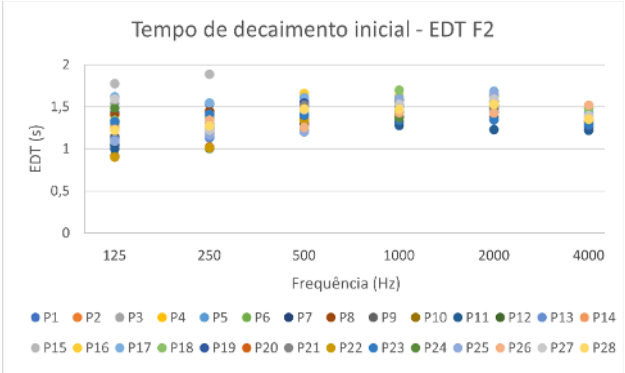
Figura 6 – Média espacial de Tempo de reverberação em função das posições das fontes sonoras.

4.2 . Tempo decaimento inicial (EDT)

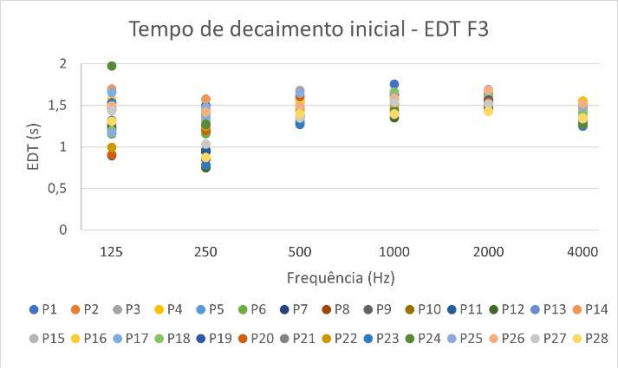
Os resultados do tempo de decaimento inicial (EDT) em função de frequência em banda de 1/1 oitava entre 125 e 4000 Hz obtidos nos pontos receptores adotados são apresentados para cada fonte separadamente. As Figuras 7 de (a) a (d) apresentam os resultados de EDT para as fontes de 1 a 4, respectivamente.



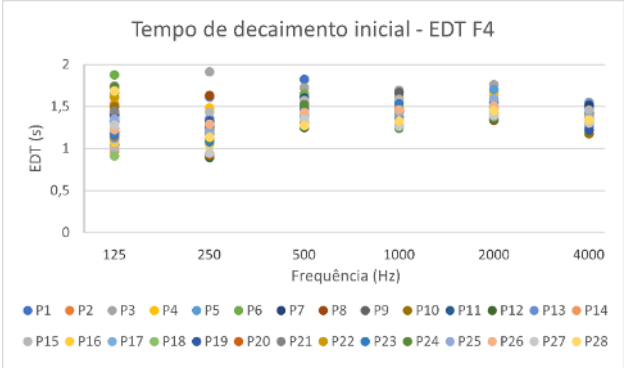
(a) Fonte 1



(b)Fonte 2



(c) Fonte 3



(d) Fonte 4

Figura 7 – Tempo de decaimento inicial em função de frequência. (a) Fonte 1, (b) Fonte 2, (c) Fonte 3 e (d) Fonte 4.

Observa-se que a comportamento de EDT em função de frequência é semelhante ao comportamento de TR. A dispersão dos valores de EDT para as diferentes posições de receptores em função de frequência são maiores que os valores encontrados para TR. A Figura 8 apresenta a média espacial de EDT para cada fonte e indica que os resultados de EDT são sensíveis a posição da fonte.

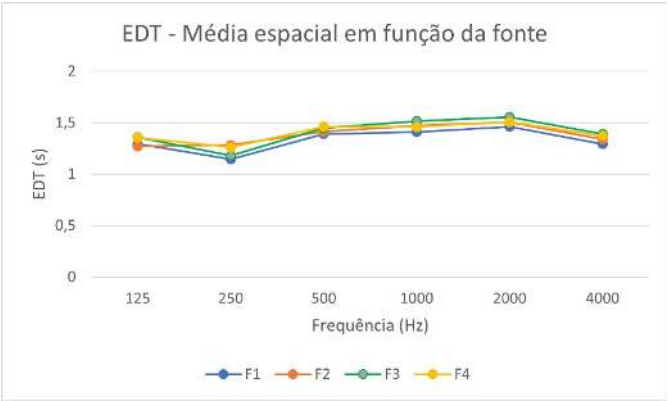
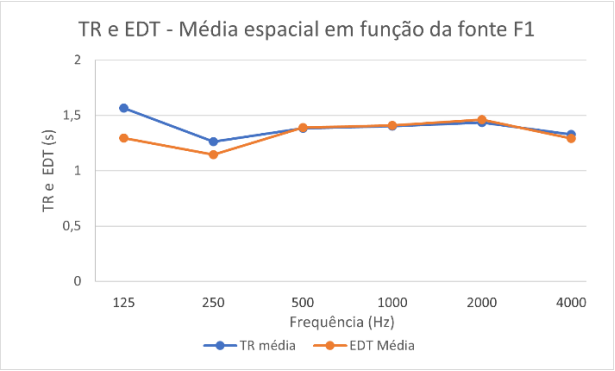


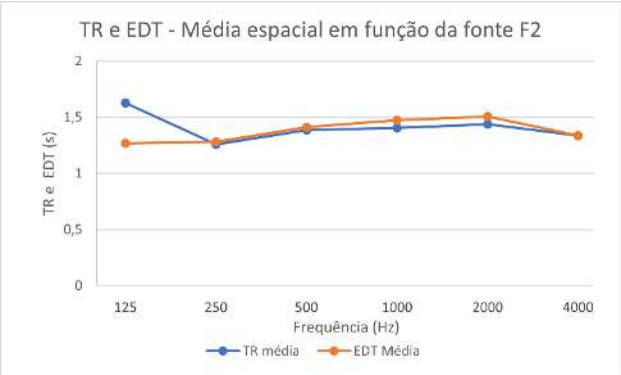
Figura 8 – Média espacial de Tempo de decaimento inicial em função das fontes sonoras.

Os gráficos da Figura 9 foram elaborados para a comparação do comportamento entre o tempo de reverberação e tempo de decaimento inicial em função da fonte. Observa-se que independentemente da posição

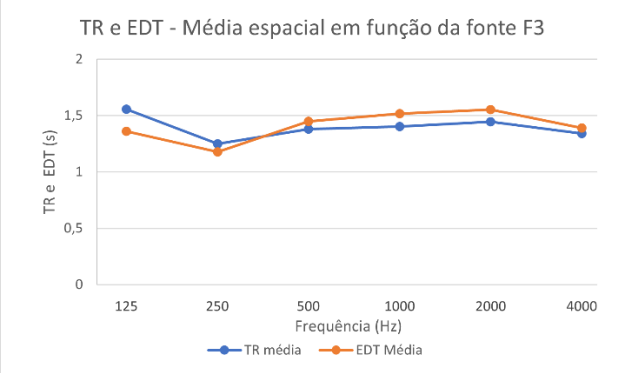
da fonte o TR é superior a EDT nas frequências de 125 e 250 Hz e depois este comportamento se inverte. Esses resultados indicam que a sensação de reverberação na sala é maior para as médias e altas frequências. Os valores de EDT para a frequência de 500 Hz variaram de 1,39s a 1,46s.



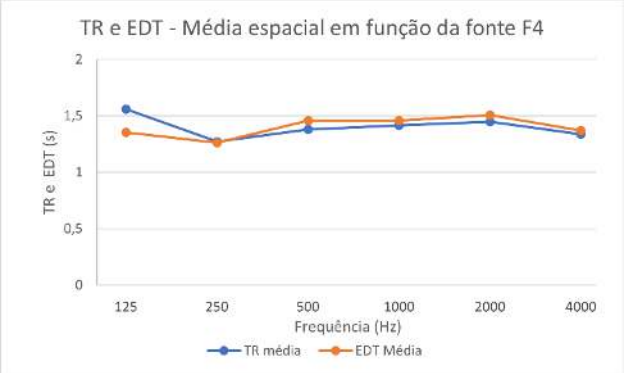
(a) Fonte 1



(b)Fonte 2



(c) Fonte 3



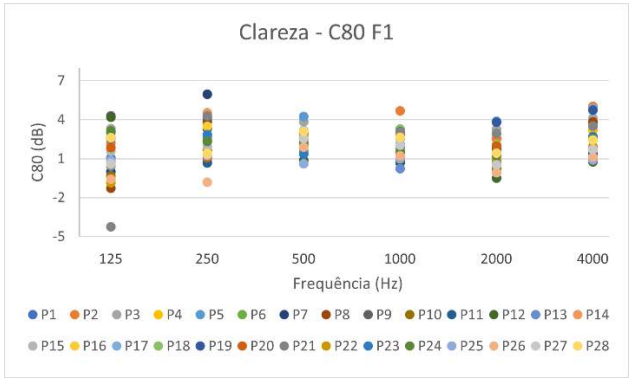
(d) Fonte 4

Figura 9 – Comparação entre Tempo de decaimento inicial e tempo de reverberação em função de frequência para (a) Fonte 1, (b) Fonte 2, (c) Fonte 3 e (d) Fonte 4

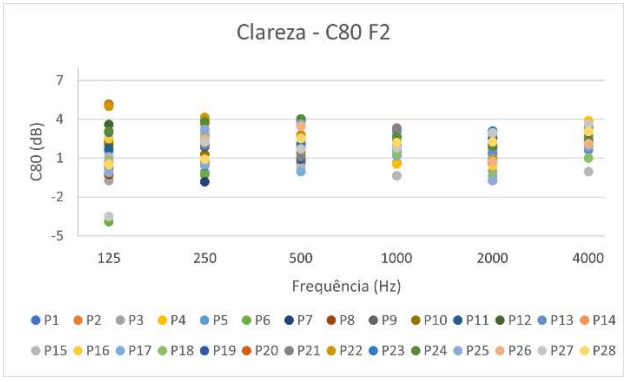
4.3. Clareza (C80)

Os resultados de clareza (C80) obtidos em função de frequência em banda de 1/1 oitava entre 125 e 4000 Hz para os pontos receptores adotados são apresentados para cada fonte separadamente. As Figuras 10 de (a) a (d) apresentam os resultados de C80 para as fontes de 1 a 4, respectivamente.

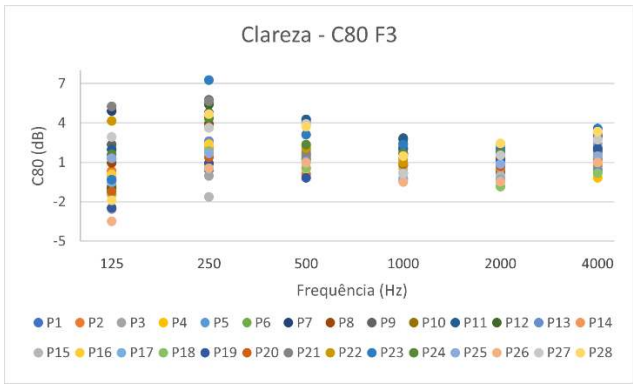
Os valores de C80 apresentam variação significativa em relação às posições de fontes sonoras e de receptores. Os valores de C80 positivos são a maioria entre os resultados indicando a prevalência de energia sonora nos primeiros 80ms o que está associado ao redirecionamento das reflexões pelas placas inclinadas do teto. A Figura 11 apresenta a média espacial dos valores C80 em função da frequência e da posição de fonte sonora. Considerando a linha central do palco, observa-se para médias e altas frequências que o aprofundamento da fonte sonora (F3) em relação à frente de palco gera valores menores de C80 enquanto a movimentação lateral da fonte gera valores de C80 intermediários. Os a média do valores de C80 para as frequências de 500Hz e 1000Hz variaram entre +1,39dB a +2,30 dB, portanto estão de acordo com a indicação da norma ABNT NBR 3328-1:2017 para valores típicos de C80. Observa-se que os menores valores ocorreram para a fonte 3 localizada no fundo do palco para a média das frequências de 500Hz e 1000Hz. A variação de C80 encontrado é superior a 1 dB que corresponde ao JND desse parâmetro indicando que o ouvinte pode ter sensação de clareza para as execuções musicais executadas no auditório.



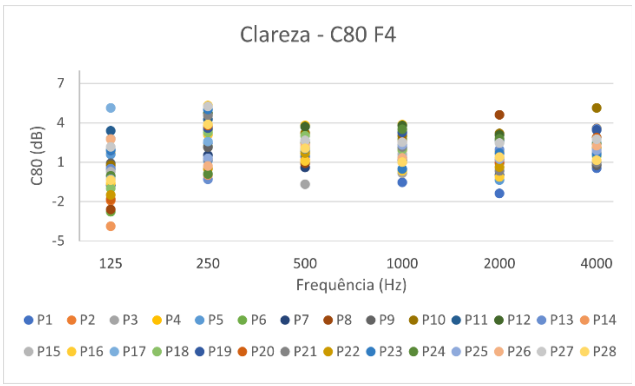
(a) Fonte 1



(b)Fonte 2



(c) Fonte 3



(d) Fonte 4

Figura 10 – Clareza em função de frequência. (a) Fonte 1, (b) Fonte 2, (c) Fonte 3 e (d) Fonte 4

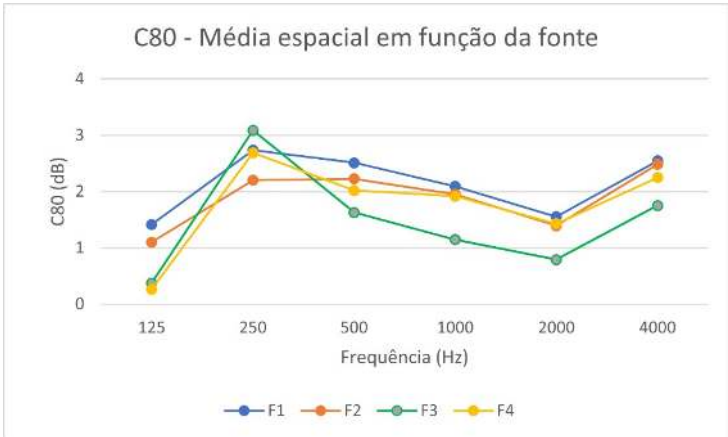
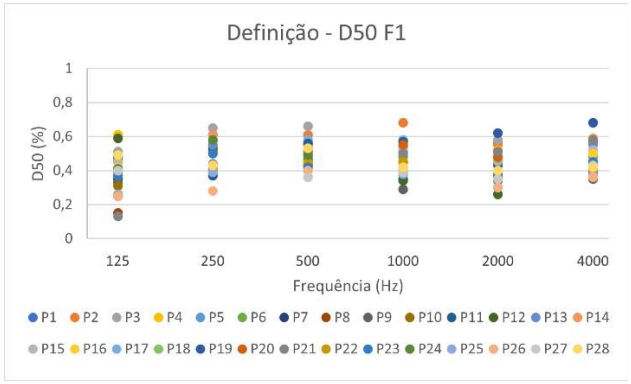


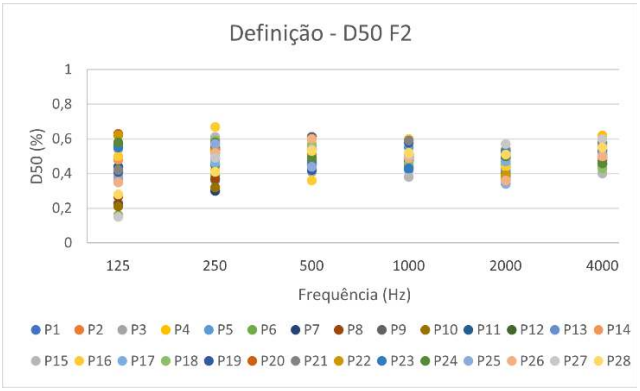
Figura 11 – Média espacial da clareza em função das fontes sonoras.

4.4. Definição (D50)

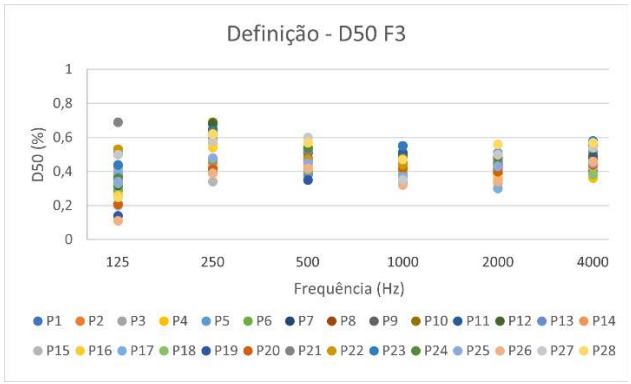
Os resultados de definição (D50) obtidos em função de frequência em banda de 1/1 oitava entre 125 e 4000 Hz para os pontos receptores adotados são apresentados para cada fonte separadamente. As Figuras 12 de (a) a (d) apresentam os resultados de D50 para as fontes de 1 a 4, respectivamente.



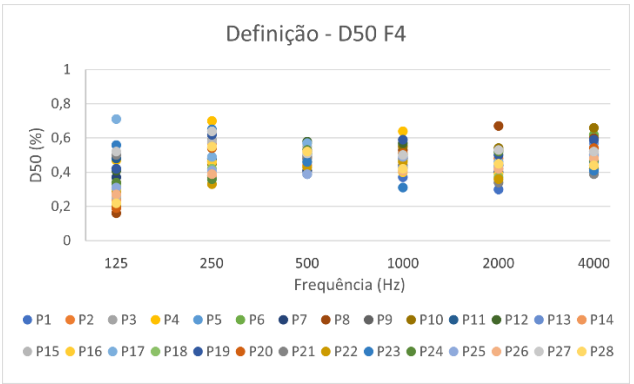
(a) Fonte 1



(b)Fonte 2



(c) Fonte 3



(d) Fonte 4

Figura 12 – Definição (D50) em função de frequência para (a) Fonte 1, (b) Fonte 2, (c) Fonte 3 e (d) Fonte 4

Observa-se que os comportamentos de D50 em função da frequência para os receptores considerando as posições de fontes são os mesmos. A maior dispersão de valores de D50 ocorreu para a frequência de 125Hz. A média espacial de D50 por fonte apresentada na Figura 13 indica que a variação entre fontes é relativamente pequena e menor que a incerteza da medição. Todos os valores de D50 estão acima de 0,4s, exceto para a frequência de 125 Hz. A média de D50 entre as frequências de 500 Hz e 1000 Hz considerando as quatro posições de fonte variou de 0,45 a 0,50 e ficou dentro do JND desse parâmetro que é de 0,05. Observa-se, portanto, que a o auditório tem em toda a área de audiência a mesma qualidade para atividades para fala. A análise considerou a condição de fala sem amplificação.

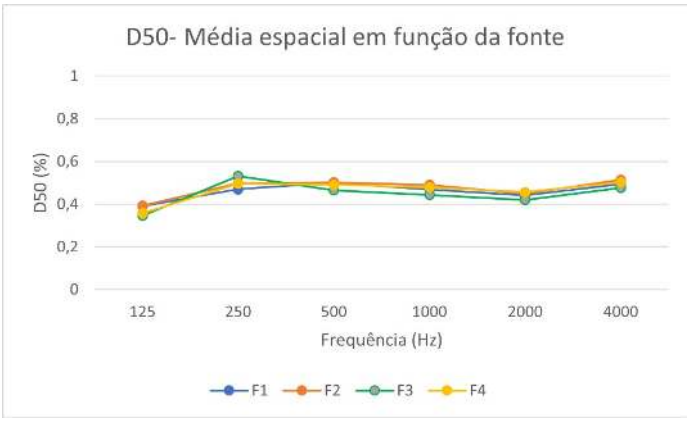


Figura 13 – Média espacial da definição (D50) em função das fontes sonoras.

4.5. Índice de transmissão da fala (STI)

Os resultados do índice de transmissão da fala (STI) obtidos em função da posição dos pontos receptores e da posição das fontes são apresentados na Figura 14. Observa-se que todos os pontos receptores apresentam valores de STI no intervalo de 0,45 e 0,60 que representa a qualidade da fala razoável. Essa análise levou em conta a condição de sala vazia e sem reforço sonoro.

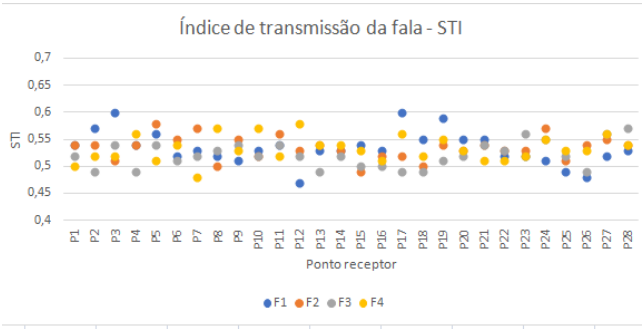


Figura 14 – Índice de transmissão da fala para diferentes posições de fonte sonora e de receptores.

4.6. Nível de pressão sonora

Os resultados dos níveis de pressão sonora (som residual) medidos no interior foram inferiores a 27 dB ponderados em A e os valores correspondentes do nível NC foram inferiores a NC 25. Esses resultados atendem os valores recomendados pela norma NBR 10152:2017.

5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou os resultados e análise da avaliação acústica do Auditório da Faculdade de Ciências Médicas (FCM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Este espaço recebe eventos como palestras, seminários, mas também tem recebido apresentações musicais. Acusticamente os requisitos exigidos para as diferentes atividades são distintos, por isso, a avaliação acústica do espaço foi importante para entender a potencialidade de uso do espaço e permitir possíveis estudos para aplicação de variabilidade acústica.

O tempo de reverberação encontrado indica que a sala tem qualidade para atividades musicais leves, mas tem valor elevado para atividades de fala e reduzido para música orquestral. O tempo de decaimento inicial revela uma maior sensação de reverberância para o auditório. A sensação de clareza para a música é confirmada pelos valores de C80 e revelam a importância das primeiras reflexões das superfícies do Auditório. Os valores de D50 e STI concordam com a indicação do TR de que a sala é razoável para fala, mas precisaria diminuir o tempo de reverberação para melhorar os resultados dos parâmetros D50 e STI. O som residual está adequado para esse espaço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152**: Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 3382-1**: Acústica – Medição de parâmetros acústicos de salas – Parte 1: Salas de espetáculos. Rio de Janeiro, 2017.

BERANEK, L. L. **Concert Halls and Opera Houses**. New York, Springer, 2004.

MEHTA, M; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural Acoustics: Principles and Design**, New Jersey, Prentice Hall, 1999.