

Influência da sala na percepção do som: experimentos em câmara anecoica e câmara reverberante

Influence of the room on sound perception: experiments in an anechoic chamber and reverberant chamber

Maria Lúcia Netto Grillo^{*1}, Luiz Roberto Perez Lisbôa Baptista¹

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Física Armando Dias Tavares, Departamento de Eletrônica Quântica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 14 de dezembro de 2023. Revisado em 18 de janeiro de 2024. Aceito em 29 de fevereiro de 2024.

A percepção do som não depende apenas da fonte sonora, há muitas interações das ondas acústicas com o ambiente, de forma que, no caso de instrumentos musicais, a sala funciona como um prolongamento do instrumento. Fatores como geometria, materiais, posição, são determinantes para a percepção do som. A inteligibilidade e o nível de pressão sonora podem variar drasticamente conforme a acústica da sala. Há parâmetros adequados para cada tipo de atividade em uma sala. Uma sala pode ser adequada para determinado tipo de música e para outro tipo não. O tempo de reverberação é um dos parâmetros acústicos a serem observados e, se possível, adaptados para a atividade a ser realizada. Os extremos desse parâmetro, muito alto e muito baixo, estão presentes em uma câmara reverberante e uma câmara anecoica, respectivamente. Fizemos alguns experimentos nesses dois tipos de sala e obtivemos valores muito diferentes do nível de pressão sonora para cada sala, comprovando como a percepção do som varia e evidencia a necessidade de adaptar a sala conforme o tipo de fonte sonora. Se não for possível adaptar a sala, pode-se então variar o tipo de música e a forma de execução, a fim de produzir uma boa percepção sonora.

Palavras-chave: Acústica de salas, acústica musical, sala para música, tempo de reverberação.

The perception of sound does not depend only on its source, there are many interactions between acoustic waves and the environment, so that, in the case of musical instruments, the room functions as an extension of the instrument. Factors such as geometry, materials, position, are decisive for the perception of sound. Intelligibility and sound pressure level can vary drastically depending on the acoustics of the room. There are appropriate parameters for each type of activity in a room. The reverberation time is one of the acoustic parameters to be observed and, if possible, adapted to the activity to be carried out. The extremes of this parameter, very high and very low, are present in a reverberant chamber and an anechoic chamber, respectively. We carried out some experiments in these two types of rooms and obtained very different values of the sound pressure level for each room, proving how the perception of sound varies and highlighting the need to adapt the room depending on the type of sound source. If it is not possible to adapt the room, you can vary the type of music and the way it is played, in order to produce a good sound perception.

Keywords: Room acoustics, musical acoustics, music room, reverberation time.

1. Introdução – Câmara Anecoica e Câmara Reverberante

Segundo Brandão [1] uma câmara anecoica é um ambiente laboratorial projetado de forma que às paredes, ao teto e ao piso sejam aplicados materiais sonoabsorventes. Idealmente as superfícies devem absorver completamente a energia sonora que incide sobre elas. Dessa forma apenas o som direto emitido pela fonte é recebido pelo receptor, ou seja, como não há reflexões, não há reverberação ou eco. Essa situação é denominada campo livre. Bezerra, Melo e Silva [2] lembram que a câmara anecoica deve ser isolada contra ruídos externos e vibrações.

Em oposição à câmara anecoica, a câmara reverberante é um ambiente cujas paredes, o teto e o piso são superfícies rígidas e reflexivas. Segundo Brandão [1] o campo em seu interior é denominado difuso, em que a pressão sonora é uniformemente distribuída no espaço com condições acústicas controladas. A tinta usada, para pintar as superfícies, tem propriedades tais, que, ao cobrir os poros do concreto ou tijolo, o deixa mais reflexivo. Além disso, podem ser adicionados materiais absorvedores em alguma das superfícies, para conformar a câmara às normas internacionais.

Como nos lembra Henrique [3], numa sala existe o som direto e o som reverberante (provenientes dos campos livre e difuso, ou reverberante, respectivamente). A acústica de uma sala é então definida pela relação entre os dois campos. A Figura 1 apresenta a relação

*Endereço de correspondência: marialucia@grillo.com.br

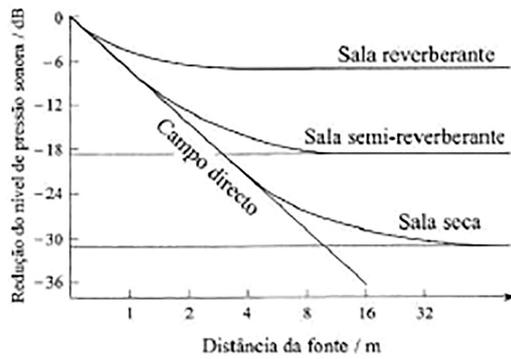


Figura 1: A relação entre campo direto e campo reverberante caracteriza o comportamento acústico de uma sala [4].

entre campo direto e campo reverberante para três tipos de salas.

“Quando nos aproximamos de um instrumentista, sentimos o som do instrumento exatamente como ele o produz. O que ouvimos é basicamente o som direto. À medida que nos afastamos do instrumento ouvimos cada vez mais o som reverberante” [3]

Eargle [5] define a distância crítica ou raio de reverberação (D_c), que é a distância da fonte omnidirecional em que o campo direto e o campo reverberante são praticamente iguais. D_c é expressa como:

$$D_c = 0,14\sqrt{S\bar{\alpha}}, \tag{1}$$

onde D_c é a distância crítica, $\bar{\alpha}$ o coeficiente médio de absorção e S a área da superfície do espaço.

Conforme Perez e Grillo [6] uma sala pode ser caracterizada através de parâmetros objetivos e subjetivos. O tempo de reverberação é talvez um dos mais evidentes e importantes parâmetros objetivos dentro de um ambiente de concerto e está ligado ao parâmetro subjetivo reverberância. Ligados ao tempo de reverberação são definidos os parâmetros T_{60} , T_{30} , T_{20} e EDT. Segundo Henrique [3], T_{60} é o tempo que o som reverberante leva para decair 60 dB após a extinção da fonte sonora; T_{30} e T_{20} correspondem a extrapolações para 60 dB de tempos de decaimento medidos respectivamente para 30 e 20 dB; EDT (early decay time) é a taxa de decaimento relativo apenas aos primeiros 10 dB, medido entre 0 e -10 dB.

Na equação (1), quanto mais reverberante for a sala, ou seja, quanto maior o tempo de reverberação (menor $\bar{\alpha}$), menor será a distância crítica e maior será o campo difuso. Em distâncias maiores que D_c o som reverberante é o dominante.

As Figuras 2 e 3 apresentam a variação do tempo de reverberação médio com a frequência para cada uma das câmaras reverberantes utilizadas para as medidas. Na Tabela 1 vemos os valores correspondentes às Figuras 2 e 3. A câmara anecoica possui o tempo de reverberação tendendo a zero.

Podemos observar que os tempos de reverberação da câmara reverberante de potência são quase todos

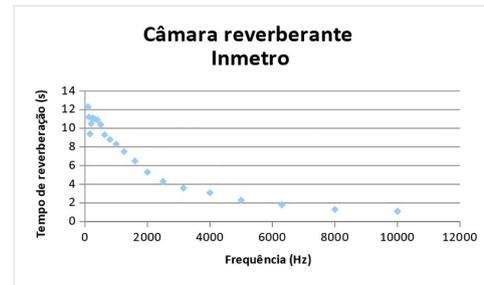


Figura 2: Tempos de reverberação × Frequência de uma das câmaras reverberantes do Inmetro. Fonte: dos autores.

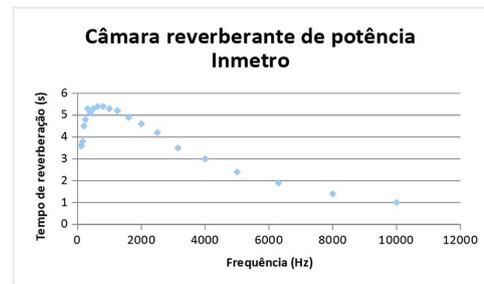


Figura 3: Tempos de reverberação × Frequência da câmara reverberante de potência do Inmetro. Fonte: dos autores.

Tabela 1: Tempos de reverberação médios das câmaras reverberantes do INMETRO. Valores fornecidos por um funcionário da instituição (ver Figs. 3 e 4).

| Freq. (Hz) | Câmara reverberante de potência TR (s) | Câmara reverberante TR (s) |
|------------|--|----------------------------|
| 100 | 3,6 | 12,3 |
| 125 | 3,8 | 11,2 |
| 160 | 4,5 | 9,4 |
| 200 | 4,8 | 10,5 |
| 250 | 5,3 | 11,1 |
| 315 | 5,1 | 11 |
| 400 | 5,3 | 10,9 |
| 500 | 5,4 | 10,4 |
| 630 | 5,4 | 9,3 |
| 800 | 5,3 | 8,8 |
| 1000 | 5,2 | 8,3 |
| 1250 | 4,9 | 7,5 |
| 1600 | 4,6 | 6,5 |
| 2500 | 4,2 | 4,3 |
| 3150 | 3,5 | 3,6 |
| 4000 | 3 | 3,1 |
| 5000 | 2,4 | 2,3 |
| 6300 | 1,9 | 1,8 |
| 8000 | 1,4 | 1,3 |
| 10000 | 1 | 1,1 |

menores que os da outra câmara reverberante. Isso se deve ao fato de que a câmara reverberante de potência é menor e suas superfícies (paredes, teto e chão) possuem coeficientes de reflexão menores.

2. Origem da Câmara Anecoica e da Câmara Reverberante

Segundo Kopperschmidt [7], o criador da câmara reverberante foi Wallace Clement Sabine (1868–1919). Era “uma sala da Universidade de Harvard que não possuía janelas, tinha paredes duplas de tijolos, com piso e teto de alvenaria”. Os primeiros testes buscavam medir o tempo de decaimento do som de um órgão, que era acionado a distância por um ouvinte que ficava dentro de uma caixa de madeira, apenas com a cabeça do lado de fora, a fim de que suas roupas não influenciassem na medida. O órgão era sincronizado a um cronômetro, que indicava o momento em que a nota parava de ser emitida e o momento em que acabava a percepção do som. Buscava-se o desempenho acústico dos mais diversos materiais, que eram introduzidos na câmara. Com o tempo os ensaios foram sendo aprimorados, com o uso de diferentes frequências e repetições de medidas. Vários laboratórios passaram a usar o mesmo método. Naturalmente com o desenvolvimento da eletrônica e da informática, os métodos de medidas foram ficando cada vez mais precisos. As câmaras foram então sendo aprimoradas, permitindo o estudo de materiais a serem utilizados em isolamento acústico e controle da acústica no interior de um ambiente. Parâmetros importantes a serem medidos são o coeficiente de absorção sonora e a perda de transmissão sonora.

As câmaras reverberantes, em geral, possuem cerca de 200 m³, porém têm sido construídas câmaras menores, o que facilita a medida de amostras pequenas e a torna bem mais barata, como no trabalho de Kopperschmidt [7], que construiu uma câmara reduzida de 0,96 m³.

A câmara anecoica foi criada, na década de 1940, pelo engenheiro americano Leo Beranek (1914–2016), em um trabalho com Sleeper, na Universidade de Harvard, com fundos de pesquisa criados pelo governo dos Estados Unidos, para resolver problemas militares, durante a Segunda Guerra.

Durante a 2^a Guerra Mundial o Comitê Nacional de Defesa dos Estados Unidos da América, organizado pelo exército, por meio do Conselho Nacional de Pesquisa, criou dois projetos em Harvard para ver o que poderia ser feito sobre o ruído em veículos militares, particularmente na aeronave. Sleeper foi encarregado do grupo para investigar os efeitos fisiológicos e psicológicos do ruído no pessoal, e Beranek foi colocado no comando de um grupo para medir o ruído e ver como poderia ser controlado [8].

Segundo Beyer e Sayles [9] Beranek procurava identificar a origem dos ruídos no ambiente militar, considerado então como sendo proveniente das comunicações, feitas através do código Morse.

O grupo de Beranek trabalhava então para criar novo critério de aceitabilidade para os ruídos de fundo quando a comunicação é importante e passou a estudar meios de arquitetar cabines de avião para satisfazer esses critérios [8].

Nesses estudos Beranek criou a primeira câmara anecoica, com o uso de peças de fibra de vidro, material capaz de absorver 99% do som incidente, para uma grande variação de frequências. Na época a câmara ficou conhecida como caixa de Beranek [9].

Larson [10] narra que em 1947 Beranek foi trabalhar no MIT (Massachusetts Institute of Technology), onde permaneceu até 1958.

Sócio fundador da Bolt, Beranek and Newman, Inc., é uma autoridade respeitada internacionalmente em acústica de salas de concerto. Ele trabalhou no projeto acústico original do Auditório Kresge do MIT em 1955 e prestou consultoria em salas de concerto e casas de ópera em todo o mundo. Ele foi membro fundador do Council for the Arts do MIT. Sua formação musical inclui trabalhos como baterista de banda de dança no final da década de 1930 e como timpanista de orquestra na década de 1940 [10].

O tamanho de uma câmara anecoica pode variar muito. A câmara da Universidade Técnica de Berlin, segundo Ackermann e outros [11], possui 1.070 m³ e a câmara reduzida, criada por Bezerra, Melo e Silva [2], apenas 1,617 m³.

3. Níveis de Pressão Sonora (NPS) e Ponderações

As medidas feitas nas câmaras foram de níveis equivalentes (médios no intervalo de tempo escolhido, que foi de 1 min) de pressão sonora. Normalmente não medimos intensidade (W/m²), mas níveis de intensidade sonora (NIS) ou níveis de pressão sonora (NPS). A expressão matemática do NIS ou do NPS é uma representação adimensional de uma grandeza sonora em escala logarítmica, expressa em decibels (dB, a décima parte do Bel). Conforme Henrique [3], a pressão sonora, bem como a intensidade sonora e a potência sonora, apresentam uma variação muito extensa entre os sons máximo e mínimo audíveis, o que torna a utilização dessas grandezas pouco prática, por isso são usadas escalas logarítmicas. Além disso a resposta dos nossos ouvidos às perturbações acústicas é do tipo logarítmico e não linear. O nível de pressão sonora pode ser expresso pela equação 2:

$$NPS = 20 \log p/p_o \quad (2)$$

onde p_o é a pressão sonora de referência $2 \times 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$ ($\text{Nm}^{-2} = \text{Pa}$), correspondente ao limiar de audição.

Podemos ver que se $p < p_o$, o NPS será negativo. Vale ainda lembrar que o conceito de decibel é utilizado também em outras grandezas não acústicas, como as grandezas elétricas. Conforme Bistafa [12], o decibel surgiu na Bel Telephone Laboratories, nos Estados Unidos, para comparação entre potências de sistemas de telefonia utilizando sinais elétricos.

O aparelho que mede o NPS é o sonômetro. Segundo Henrique [3] o sonômetro é um instrumento de medida constituído por um microfone calibrado, um circuito eletrônico integrador, filtros de ponderação e um mostrador. Os filtros de ponderação fazem com que as frequências recebam pesos diferentes nas medições, ou seja, algumas frequências têm seu nível de pressão sonora reduzido enquanto outras têm o seu nível mantido. Essa necessidade tem origem no fato de nossos ouvidos terem sensibilidade ao som variável conforme a frequência. Para sons de mesma intensidade, escutamos melhor os sons de frequências médias, por isso utilizamos, em geral, a ponderação A, que é a que mais se aproxima da ponderação realizada pelo sistema auditivo humano. Outras ponderações que o sonômetro pode apresentar são a C e a Z [13]. A ponderação C é a curva de ponderação A com uma faixa de sensibilidade um pouco maior, dessa forma em frequências mais baixas e em frequências mais altas o nível sonoro será maior. A ponderação Z é pouco usada para avaliação de ruído ambiental, interessa a medidas de resposta de equipamentos de áudio. A curva de ponderação Z tem uma resposta totalmente plana, o que significa que ela atribui pesos iguais para todas as frequências e por isso geralmente apresenta níveis maiores que aqueles medidos utilizando as curvas A e C.

4. Resultados Experimentais e Análises

Os experimentos foram feitos com o uso de um sonômetro ITDEC 4020, em ponderação A, no modo L_{eq} (nível equivalente) em duas câmaras reverberantes e uma câmara anecoica, no Instituto Nacional de Metrologia,

Qualidade e Tecnologia (Inmetro). Utilizamos um violino, um tarol, uma flauta doce soprano e um agogô.

O local dos experimentos foi o Laboratório de Ensaios Acústicos (Laena), onde há duas câmaras reverberantes, de 226 m³ e de 196 m³, ambas isoladas contra vibração com molas de aço e uma câmara anecoica de 70 m³, isolada contra vibração com sistema pneumático. O laboratório é usado para diferentes tipos de medidas, e um exemplo, retirado do site do INMETRO, está citado a seguir.

“Os coeficientes de absorção de grandes amostras de materiais e painéis são medidos pelo Laena (Laboratório de Ensaios Acústicos) na câmara reverberante de 226 m³ pela comparação do tempo de reverberação na câmara com e sem o material de absorção. Para medições *in situ*, um dispositivo de medição especial feito no próprio laboratório é usado e a técnica de subtração de reflexão é aplicada. A faixa de frequência coberta pelo sistema vai de 100 Hz a 5 kHz” [14].

Os testes foram repetidos em cada câmara para comparação das medidas. A Tabela 2 apresenta as medidas de L_{eq} obtidas.

Podemos avaliar os resultados obtidos para os níveis de pressão sonora (NPS), nas três câmaras, considerando os tempos de reverberação (TR). Observamos que quanto maior o tempo de reverberação, maior será o nível de pressão sonora. Este resultado foi observado em praticamente todas as medidas. Apenas no som do agogô, o NPS medido foi praticamente o mesmo nas duas câmaras reverberantes (89,9 dB e 89,8 dB). Na câmara anecoica foi medido 67,9 dB, valor bem inferior. Os outros sons produzidos apresentaram os valores esperados de NPS, maiores para maiores TR. Considerando que TR depende da frequência, podemos atribuir a semelhança dos valores às frequências emitidas pelo agogô utilizado, que são bem agudas. Na Tabela 1

Tabela 2: NPS em cada câmara do INMETRO.

| Instrumento | Distância à fonte (m) | Emissão | NPS (dB) | | |
|---------------------|-----------------------|---|--------------------------|--|------------------------------|
| | | | NPS (dB) Câmara anecoica | NPS (dB) Câmara reverberante de potência | NPS (dB) Câmara reverberante |
| Violino | 2 | Sol 2 forte 196 Hz | 55,9 | 81,4 | 82,3 |
| | 2 | Estudo em arpejos 196 Hz a 1.318 Hz | 65,1 | 74,7 | 84,4 |
| Flauta doce soprano | 1 | Greensleeves 880 Hz a 1.568 Hz | 74,8 | 81,5 | 86,6 |
| | 4 | Greensleeves | 66,7 | 80,4 | 86 |
| | 5 | Jesus Alegria dos Homens (Bach) 784 Hz a 1.568 Hz | 63,4 | 79,4 | 87,2 |
| Tarol | 4 | Bolero (Ravel) frequência indeterminada constante | 65,7 | 85,2 | 90,3 |
| | 4 | Rufo | 72,3 | 87,4 | 89,8 |
| Agogô | 4 | 3ª menor 2.637 Hz a 3.322 Hz | 67,9 | 89,9 | 89,8 |



Figura 4: Câmara anecoica do INMETRO.



Figura 5: Câmara reverberante de maior TR do INMETRO, onde aparecem alguns estudantes que acompanharam as medidas, o músico (um dos autores do artigo) (à esquerda) que executou os instrumentos e o físico (ao centro) que guiou a visita e forneceu os dados das câmaras da Tabela 1.

podemos ver que a partir de 2.500 Hz as duas câmaras reverberantes são praticamente iguais.

Nas Figuras 4 e 5 podem ser vistas as câmaras onde foram feitas as medidas de NPS.

5. Conclusões

As fontes sonoras utilizadas para as medidas nas três câmaras (uma anecoica e duas reverberantes) foram as mesmas, com os mesmos sons emitidos (conforme Tabela 2), com as mesmas intensidades. Os sons foram emitidos pelo mesmo músico (um dos autores). Confirmamos então que o som percebido não depende apenas da fonte, como muitas vezes é suposto, porém o ambiente exerce grande influência, não apenas com sons musicais, mas qualquer som, como uma pessoa falando, por exemplo. A grande diferença medida no NPS, especialmente entre a câmara anecoica e as reverberantes, chama atenção para a necessidade de se levar em conta a

acústica da sala, conforme a atividade a ser desenvolvida. Por exemplo, em salas de aula com TR muito baixo, semelhante a uma câmara anecoica, o professor será ouvido sempre como se estivesse falando com menor intensidade (baixo NPS). Um baixo ou alto TR pode levar a uma baixa inteligibilidade, da fala ou da música. Se o local, como um teatro, um auditório ou uma sala de aula, for utilizado para atividades diversas (aulas, palestras, apresentações musicais), o ideal é que possam ser feitas mudanças no ambiente, como a colocação de refletores ou abafadores, isto é, materiais capazes de aumentar ou reduzir TR respectivamente. A colocação de microfones pode contornar o problema, porém o melhor é contar com uma boa acústica no ambiente a fim de garantir uma boa inteligibilidade, tanto para fala quanto para música. Os valores adequados de TR dependem do volume do ambiente.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pelos auxílios recebidos, possibilitando essa e outras pesquisas. Agradecemos também à equipe de pesquisadores dos Laboratórios de Acústica e Vibrações do INMETRO, que tão bem nos receberam e orientaram para a realização das medidas, especialmente o pesquisador Thiago Milhomem.

Referências

- [1] E. Brandão, *Acústica de salas: projeto e modelagem* (Editora Blucher, São Paulo, 2016).
- [2] A.L.M. Bezerra, M.K. Melo e V.H.S. Silva, *Estudo da viabilidade técnica de uma câmara de pequeno porte para testes acústicos*. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Tecnologia, Santo André (2016).
- [3] L.L. Henrique, *Acústica musical* (Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2007), 2 ed.
- [4] K.B. Ginn, *Architectural Acoustics* (Brüel & Kjaer, Naerum, 1978).
- [5] J.M. Eargle, *Music, sound and technology* (Springer, New York, 1995), 2 ed.
- [6] L.R. Perez e M.L. Grillo, *A Física e a Música do Quarteto de Cordas: 2 violinos, 1 viola e 1 violoncelo* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2019).
- [7] C.E.P. Kopperschmidt, *Desenvolvimento de Câmara Reverberante em Escala Alternativa para Determinação de Qualidade Acústica de Materiais*. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus (2017).
- [8] D.L.B. Krempel, *Câmaras anecoicas – princípios de projeto*, disponível em: https://poli-integra.poli.usp.br/wp-content/uploads/2022/11/2015_Daniel-Luiz-d-e-Barros-Krempel.pdf, acessado em: 09/10/2023.
- [9] R. Beyer e E. Sayles, *The Ghost Army of the World War* (Princeton Architectural Press, New York, 2015).

- [10] F. Larson, *Leo Beranek Interviewed by Forrest Larson. Music at Oral History Project*, disponível em: <https://libraries.mit.edu/app/uploads/sites/9/2013/05/BER20081009.pdf>, acessado em 11/10/2023.
- [11] D. Ackermann, J. Domann, F. Brinkmann, J.M. Arend, M. Schneider, C. Pörschmann e S. Weinzierl, *J. Audio Eng. Soc.* **71**, 62 (2023).
- [12] S.R. Bistafa, *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído* (Editora Blucher, São Paulo, 2018), 3 ed.
- [13] M. Long, *Architectural acoustics* (Elsevier, Califórnia, 2005).
- [14] INMETRO, *Laboratório de Ensaios Acústicos – Laena*, disponível em: <http://inmetro.gov.br/metcientifica/acustica/Laena.asp>.