

Câmara reverberante em modelo reduzido - validação e utilidades

Ranny Loureiro Xavier Nascimento

Moysés Zindeluk

Laboratório de Acústica e Vibrações – Departamento de Engenharia Mecânica

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

CP 68503 – 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

ranny@ufrj.br

moyses@serv.com.ufrj.br

Resumo. *Uma das abordagens para a análise do comportamento acústico de uma sala é a empírica. O método empírico abrange o uso de modelos reduzidos. Os modelos reduzidos permitem a reprodução física de fenômenos ainda limitantes na precisão dos modelos computacionais para ambientes complexos, como difusão e difração. Outra vantagem dos modelos reduzidos é sua importância didática para o ensino de acústica. Porém, ao se construir a maquete de uma sala, deve-se obedecer cuidadosamente às condições de similaridade para escolher os materiais que simularão as superfícies da sala original. Na prática, é muito difícil modelar os parâmetros acústicos dos materiais usados nas maquetes.*

O trabalho aqui reportado consiste na construção e validação de uma câmara reverberante em modelo reduzido, de acordo com os padrões e normas internacionais, desenvolvida de maneira a seguir as condições de similaridade em modelagem. Tal câmara possui custo relativamente baixo e sua configuração pode facilmente ser modificada. O volume da mini-câmara reverberante é de $0,391 \text{ m}^3$, equivalente à escala 1:8 de um volume de 200 m^3 , um tamanho adequado para câmaras reverberantes.

Construída em madeira com uma face em acrílico transparente, a mini-câmara reverberante pode ser usada para desenvolver pesquisas sobre acústica de salas assim como para testar materiais absorventes para produzir um catálogo ou tabela de equivalência de materiais absorventes em escala.

Palavras-chave: *câmara reverberante, modelos reduzidos, absorção sonora, reverberação.*

1. INTRODUÇÃO

Vários estudos em modelos reduzidos vêm sendo publicados desde a década de 1940. O principal problema na modelagem acústica é a escolha dos materiais das superfícies da sala em escala. Estes materiais devem seguir as condições de similaridade: seus coeficientes de absorção sonora devem ser os mesmos dos materiais usados nas salas originais, mas em frequências n vezes superiores às frequências reais, onde $1:n$ é o fator de escala do modelo. Portanto, no modelo, o campo sonoro similar é executado com n vezes a frequência da sala original, Makrinenko (1994).

Na prática, é muito difícil encontrar modelos para os materiais usados nas salas reais. Os modelos não são feitos geralmente do mesmo material que os originais. No laboratório, os coeficientes de absorção sonora das superfícies do modelo são escolhidos de modo a serem aproximadamente iguais aos coeficientes para a sala real nas frequências correspondentes. Esta aproximação causa problemas de distorção que vêm sendo investigados de maneira a melhorar esta técnica.

Apesar das limitações para se obterem condições exatas de similaridade no modelo, a modelagem acústica permite avaliar objetiva e subjetivamente a acústica de uma sala, pois fornece um padrão do comportamento do som muito próximo ao das salas reais, sendo eficiente para lidar com os problemas práticos de arquitetura acústica de salas a serem construídas ou já existentes. Além destes fatores, os modelos reduzidos possuem grande importância didática, atuando como uma ajuda pedagógica para demonstrar fenômenos básicos de propagação e, por isto, podem ser amplamente utilizados nos laboratórios de acústica. A grande vantagem da modelagem em escala reduzida é que se pode estudar um fenômeno físico difícil de ser modelado ou de que ainda não se tenha total conhecimento, como a difusão, difração e absorção. O modelo reduzido pode também possuir geometrias complexas, difíceis de serem modeladas computacionalmente. A complexidade do modelo aumenta o custo e o tempo gasto para a construção do mesmo, mas não altera o tempo gasto para determinar a resposta, o que ocorre em uma simulação computacional.

Brebeck (1966) mediu os coeficientes de absorção sonora de vários materiais e desenvolveu um catálogo com estes materiais e seus coeficientes de absorção em frequências correspondentes aos coeficientes de absorção dos materiais utilizados nas salas reais. Entretanto, a variedade dos materiais usados diariamente no laboratório e na arquitetura conduz à necessidade de desenvolver um catálogo próprio e uma técnica de medição que esteja à mão do modelista, para uso imediato.

No trabalho apresentado, foi realizada a construção de uma câmara reverberante em modelo reduzido. A norma internacional relativa à medição de absorção sonora em câmaras reverberantes é a norma ISO 354 (1999), que está em processo de revisão e também é o documento básico utilizado pela comissão técnica da ABNT na elaboração de uma norma nacional. Este trabalho é desenvolvido de acordo com esta norma.

2. CÂMARA REVERBERANTE - UTILIDADE

Uma câmara reverberante é uma câmara de teste, ou seja, um ambiente especializado que ajuda em medidas acústicas, cujas finalidades são: criar um campo difuso com alto tempo de reverberação e reduzir ou eliminar interferência de ruídos intrusos. Uma câmara reverberante deve possuir todas as superfícies refletoras e com baixo coeficiente de absorção sonora de maneira a reduzir a absorção sonora própria da câmara, quando não colocada a amostra de material absorvente a ser ensaiada.

O método da câmara reverberante é amplamente utilizado e tem a vantagem de considerar um campo sonoro com incidência aleatória. Neste método, o tempo de reverberação da sala é medido antes e depois de se colocar o material absorvente na sala. Com ambos os tempos de reverberação, o coeficiente de absorção sonora pode ser calculado usando a fórmula desenvolvida por Sabine (1964) ou outras, se considerado adequado.

Segundo Kuttruff (2000), este método para medir a absorção é superior ao método do tubo de impedância, pois além das medições serem feitas num campo sonoro difuso, não há limitações em relação ao tipo de construção do absorvedor. O método é bastante utilizado para medir os coeficientes de absorção de quase todo tipo de material, e também para determinar a absorção de cadeiras, únicas ou em bloco, ocupadas ou não.

A aplicação mais direta para o coeficiente de absorção de materiais está relacionada com o projeto acústico de salas, para prever os tempos de reverberação e outros detalhes da resposta impulsiva na fase de planejamento da sala e para realizar experimentos com modelos ou com simulação computacional.

Atualmente, os fabricantes de materiais absorventes acústicos fornecem os coeficientes de absorção de acordo com a banda de frequência. Sabendo os materiais de uma sala e conhecendo seus coeficientes de absorção, pode-se prever como soará esta sala em cada frequência e pode-se também saber, através das fórmulas de Sabine, Eyring, etc, o tempo de reverberação da sala.

Na literatura, são encontrados vários estudos sobre este assunto, inclusive com construção de mini-câmaras reverberantes. No departamento de pesquisa e engenharia da BBC (1970) foi construída uma

câmara reverberante em modelo reduzido como a do presente trabalho para suprir a necessidade de medir as propriedades de absorção dos materiais a serem usados nos modelos reduzidos de estúdios e salas de concertos.

Em 1983, Orlowski (1984) utilizou uma câmara reverberante similar à da BBC para determinar as propriedades acústicas de várias disposições de materiais absorventes porosos na escala 1:16. Em 2000, Barron e Coleman (2000) estudaram a absorção de modelos em escala 1:25 de assentos de teatros e auditórios numa câmara em escala 1:8 semelhante à da BBC.

Ainda em 2000, com a ajuda de Beranek, Hidaka (2000) utilizou uma câmara reverberante na escala 1:10 para medições de absorção de modelos de assentos na mesma escala, juntamente com novos algoritmos computacionais. Em 2002, uma câmara reverberante em escala 1:10 foi usada na Universidade de Aachen por Gomes (2002) para estudar o coeficiente de espalhamento.

3. CÂMARA REVERBERANTE – VALIDAÇÃO

De acordo com a ISO 354, o volume recomendado para novas câmaras é 200 m^3 . Se for necessário melhorar a difusão, o uso de difusores estáticos suspensos, placas rotativas ou mudanças na forma da sala pode ser empregado.

Sendo a sala retangular, como neste trabalho, a norma ISO 3741 (1999), relativa à determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes, estabelece que a relação de quaisquer duas dimensões não deve igualar ou aproximar um inteiro. Outra condição que também deve ser seguida de acordo com a ISO 3741 é relacionada à absorção da câmara. O tempo de reverberação para a câmara em cada banda de terço de oitava, sem considerar a fonte, deve ser numericamente maior do que a razão do volume com a área de superfície total da sala em teste (no sistema SI).

Deve-se lembrar que câmaras reverberantes em modelo reduzido estão sujeitas às mesmas restrições experimentais das salas em modelo reduzido. Em primeiro lugar, deve-se obedecer às condições de similaridade. A seguir, alguns dos requisitos da norma, já convertidos para a escala 1:8:

3.1. Posições do microfone:

As medidas devem ser feitas com posições diferentes do microfone, com pelo menos 18,75 cm entre as mesmas, 25 cm da fonte sonora e 12,5 cm de qualquer superfície da sala e da amostra em teste. A norma ISO 354 enfatiza que os sinais gravados em posições diferentes do microfone não devem ser combinados de nenhuma maneira.

3.2. Posições da fonte:

As medidas devem ser feitas com diferentes posições da fonte distando pelo menos 37,5 cm umas das outras.

3.3. Número de curvas de decaimento medidas:

O número de curvas de decaimento independentes medidas, correspondente ao número de posições do microfone vezes o número de posições da fonte, deve ser no mínimo 12. Para o número mínimo de duas posições de fonte, seriam necessárias seis posições de microfone, o que não é conseguido facilmente em um volume de $0,391 \text{ m}^3$ com doze difusores.

Este trabalho segue a suposição de Araujo de que três posições de fonte e quatro posições de microfone são uma boa saída para a mini câmara (2002). O microfone foi colocado em quatro posições diferentes, com a fonte em três cantos da sala, sendo 12 curvas de decaimento independentes.

3.4. Campo difuso:

Como indicado antes, a difusão na câmara reverberante é necessária. Um campo completamente difuso é aquele onde a densidade de energia em cada instante é a mesma em toda a sala, esta condição é chamada homogeneidade, então a distribuição direcional da propagação da energia é isotrópica em qualquer ponto do campo sonoro, o que significa que todas as direções de chegada de energia sonora em qualquer ponto são igualmente prováveis.

Num campo sonoro completamente difuso, o tempo de reverberação não dependeria da posição do microfone, porém um campo completamente difuso não é obtido na prática e o cálculo da média tem que ser feito.

Um método, que pode ser aplicado e computado para medir a difusão, é a correlação cruzada. Esta técnica, apresentada por Cook et al (1955), consiste em comparar funções de correlação espaciais teoricamente previstas com as medidas.

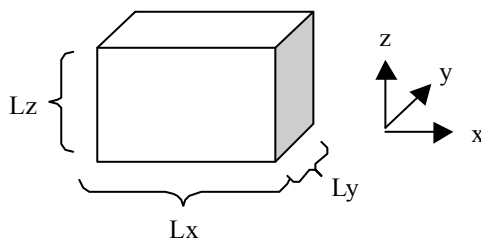
O método usado neste trabalho é o sugerido na norma ISO 354. Como já dito, para melhorar a difusão do campo sonoro, podem-se usar difusores fixos e/ou placas rotativas. Quanto à difusividade do campo sonoro, a norma ISO 354 traz no Anexo A detalhes construtivos para difusores estáticos e um procedimento para verificar a difusividade e obter um número ótimo de difusores.

O procedimento fornecido para avaliar a difusividade consiste em medir a absorção sonora numa amostra de teste adequada em três condições: sem difusores; com um pequeno número de difusores estáticos (com área aproximadamente de 5m^2); aumentando a quantidade de difusores estáticos, em conjuntos de aproximadamente 5m^2 de área.

Para cada conjunto de medições, deve-se calcular o valor médio dos coeficientes de absorção sonora, na faixa de frequência de 500 até 5000 Hz e plotar estes valores contra o número (área total) de difusores em cada caso. O valor médio do coeficiente de absorção sonora se aproximará de um máximo e depois se manterá constante com o aumento do número (área) de difusores. O número de difusores ótimo será aquele em que este valor constante for atingido.

4. CONSTRUÇÃO DA CÂMARA EM MODELO REDUZIDO

A escolha das dimensões da câmara foi feita considerando uma sala com um volume aproximado de 200 m^3 e considerando as razões entre as dimensões, $L_y/L_x = 0,78$ e $L_z/L_x = 0,61$ de acordo com a norma ISO 3741. A escala escolhida foi 1:8 e as dimensões utilizadas foram: $L_x = 0,94\text{ m}$, $L_y = 0,73\text{ m}$ e $L_z = 0,57\text{ m}$.



A câmara foi construída em madeira compensada grossa Pinho Naval, com 30 mm de espessura, com um lado de acrílico transparente com 10 mm de espessura. Para a vedação da porta de acesso, foi utilizada uma fita auto-adesiva de borracha isolante e para eliminar uma possível vibração estrutural, da mesa em que se encontra até a sua estrutura, a mini-câmara está apoiada por quatro isoladores de vibração (molas com amortecimento em borracha natural macia).

Dez difusores em chapas de acrílico, seis com $240 \times 120 \times 2\text{ mm}^3$ e quatro com $250 \times 100 \times 2\text{ mm}^3$, foram “curvados” e suspensos em vários ângulos a partir do teto. Segundo a ISO 354, os difusores

devem ser placas com baixo coeficiente de absorção sonora, ligeiramente curvados, orientados aleatoriamente e posicionados por toda a câmara. Tamanhos diferentes, variando aproximadamente de $0,0125 \text{ m}^2$ a $0,0467 \text{ m}^2$ na área (para um lado) são recomendados. A Fig. 1 ilustra a mini-câmara.

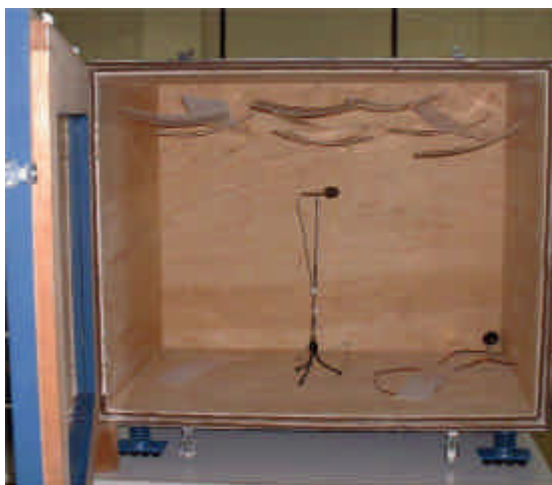


Figura 1. Vista da mini-câmara reverberante, com microfone e fonte no canto

5. MEDIÇÕES

As medidas de reverberação seguiram o método “integrated impulse response” da ISO 354. Um microfone capacitivo B&K 4135 de $\frac{1}{4}$ de polegada de diâmetro com pré-amplificador foi usado. A fonte sonora, um alto-falante tweeter, com 50 mm de diâmetro, excitou a sala com um sinal MLS (seqüência de comprimento máximo). O sinal da fonte, a aquisição e o processamento do sinal recebido foram controlados por um computador. A resposta da sala, capturada pelo microfone, foi processada com a utilização do software *Cool Edit*, e a toolbox *Aurora*, para obter a resposta impulsiva, a curva de decaimento e outros parâmetros acústicos. O tempo de reverberação na câmara foi medido na faixa de oitavas de 1 a 16 kHz, equivalente no mundo real à faixa de 125 Hz a 2 kHz.

6. PRIMEIROS RESULTADOS

As médias das respostas impulsivas da câmara reverberante com e sem os difusores são mostradas na Fig. 2.

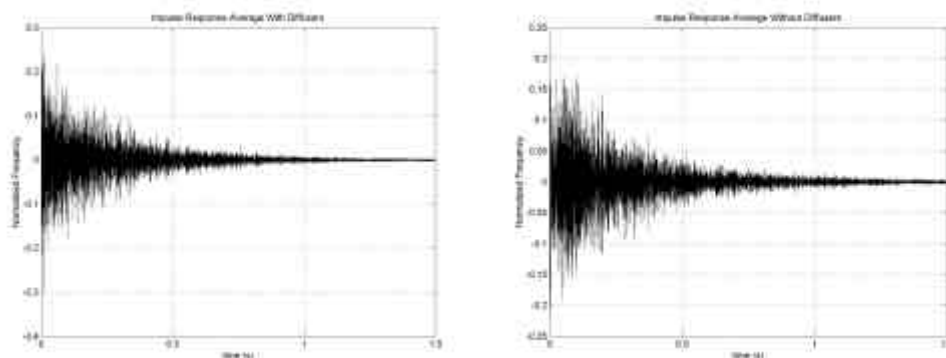


Figura 2. Respostas Impulsivas com e sem a presença dos difusores

Os valores dos tempos de reverberação \overline{T}_l e das áreas de absorção sonora equivalentes A_l da mini câmara convertidos para uma câmara reverberante em escala real (com volume de 200 m³) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros Acústicos para Câmara Reverberante em Escala Real

Frequência [Hz]	125	250	500	1000	2000	Linear
EDT [s]	2.41	3.54	2.58	2.03	1.45	2.11
\overline{T}_l [s]	3.16	2.79	2.41	2.00	1.66	2.17
A_l [m ²]	10.1	11.5	13.3	16.0	19.2	14.7

7. INCERTEZAS NAS MEDIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados das medições na câmara são afetados por vários fatores, desde as dimensões da câmara, o grau de difusão do campo sonoro na câmara, dimensões e posições das amostras de teste, até erros nas medidas dos tempos de reverberação.

Além da similaridade entre coeficientes de absorção, os transdutores devem seguir a similaridade direcional. A fonte requer uma eficiência elevada e o microfone deve ser sensível à incidência aleatória, com resposta plana na faixa de interesse. As medidas também são influenciadas pela absorção sonora do ar, que para altas frequências depende fortemente da umidade.

Como as áreas de absorção sonora A_l , apresentadas na Tabela 1, são excessivas em todas as bandas de frequência, algumas características precisam ser melhoradas. O próximo passo será modificar o material das superfícies da mini câmara, de maneira a tornar o revestimento interno da câmara mais reflexivo, para diminuir a absorção, a fim de comparar testes com diferentes configurações. Na situação inicial atual, as superfícies internas estão em madeira compensada. Revesti-las com diferentes placas, como laminado melamínico, chapas metálicas ou vidro, pode melhorar seu desempenho e será estudado.

O efeito da absorção sonora do ar também deve ser considerado, e secar o ar pode ser necessário para obter resultados mais exatos. Como o volume é pequeno, é relativamente fácil e rápido secar, mas neste caso deve ser possível mover o microfone e a fonte sem abrir a porta.

A câmara reverberante na escala 1:8 pode ser usada para testar modelos para fenômenos e dispositivos de acústica de salas, tais como difusão, coerência, assim como para testar os materiais absorventes para produzir um catálogo a ser usado em modelos específicos de projeto.

Agradecemos ao CNPq pelo auxílio a este projeto.

8. REFERÊNCIAS

- Araujo, M. A. N., 2002, "Investigation on the parameters involved in measuring sound absorption in reverberant chambers: critical review of the standard [in Portuguese]", D.Sc. Thesis, Federal University of Rio de Janeiro, COPPE.
- Barron, M., Coleman S., 2000, "Measurements of the Absorption by Auditorium Seating – A Model Study", Journal of Sound and Vibration 239 (4), pp. 573-587.
- BBC Research Department Report No 1970/13, 1970, "Acoustic Scaling: General Outline".

- Brebeck, D., 1966, "Die Schall- und Ultraschallabsorption von Materialien in Theorie und Praxis, insbesondere im Hinblick auf den Bau akustisch ähnlicher Modelle im Massstab 1:10. Dr. Ing.-Thesis, Technische Hochschule", Munich.
- Cook R.K., Waterhouse R.V., Berendt R.D., Edelman S., and Thompson M.C., Jr., 1955, "Measurements of correlation coefficients in reverberant sound fields", *Journal Acoust. Society of America*, 27, 1071 – 1077.
- Gomes, M. H. A., 2002, "Determination of the Acoustical Random-Incidence Scattering Coefficient", D. Sc. Thesis, Federal University of Santa Catarina.
- Hidaka, T., 2000, "Room Acoustics: Real and Scale Model Experiments", *Anais do XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*, pp. 38-66.
- ISO 354, Acoustics – Measurements of sound absorption in a reverberation room, International Organisation for Standardisation, 1999.
- ISO 3741, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure-precision method for reverberation rooms, International Organisation for Standardisation, 1999.
- Kuttruff H., 2000, "Room Acoustics", Fourth Edition, Spon Press.
- Makrinenko, L.I., 1994, "Acoustics of Auditoriums in Public Buildings", *Acustical Society of America*.
- Orlowski, R. J., 1984, "The Arrangement of Sound Absorbers for Noise Reduction – Results of Model Experiments at 1:16 Scale", *Noise Control Engineering Journal*, vol. 22, número 2.
- Sabine, W. C., 1964, "Collected Papers on Acoustics", Dover Publications Inc.

SCALE MODEL REVERBERATION CHAMBER - VALIDATION AND UTILITY

Ranny Nascimento

Moysés Zindeluk

Acoustic and Vibration Laboratory – Mechanical Engineering Department

Federal University of Rio de Janeiro – UFRJ

CP 68503 – 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ – Brazil

ranny@ufrj.br

moyses@serv.com.ufrj.br

Abstract. *One of the approaches to the analysis of the acoustic behaviour of a room is the experimental (empírico em inglês?). The experimental method includes the use of scale models. The scale models allow the physical reproduction of phenomena still limiting in precision in the computer models for complex environments, as diffusion and diffraction. Another advantage of the scale modeling is its importance in the academic acoustics study. However, when building a room model, the choice of materials to simulate the surfaces of the original room should follow carefully the similarity conditions. In practice, it is very difficult to model the acoustic parameters of the materials used in room scale models.*

This work consists in the construction and validation of a small-scale reverberation chamber, according to the international standards, developed in order to improve similarity conditions in scale modeling. Such a chamber is relatively low cost and its configuration can be easily modified. The volume of the model reverberation chamber is 0,391 cubic meters, equivalent at 1:8 scale to a real volume of 200 cubic meters, a standard size for reverberation chambers.

Made in wood with one transparent acrylic side, the one-eighth scale reverberation chamber can be used to test theories about room acoustics as well as to test absorbing materials to produce a catalogue to be used in specific project models.

Keywords: *reverberation chamber, scale modeling, sound absorption, reverberation.*