



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Medição de coeficiente de espalhamento de superfícies contínuas em escala

Santos, C.¹; Bertoli, S.R.²

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, christian.santos@eac.ufsm.br

² Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, rola@fec.unicamp.br

Resumo

A determinação prévia das características dos projetos de espaços acústicos é uma atividade que se torna cada vez mais comum e necessária. Para realizar essa determinação prévia a forma mais viável é simular acusticamente esses espaços empregando programas computacionais para a verificação de seu desempenho. Além das características de absorção sonora das superfícies de um espaço, as características de difusão sonora também são informações importantes que influenciam em seu desempenho acústico. A difusão sonora de uma superfície pode ser diretamente correlacionada nos programas de simulação com o coeficiente de espalhamento sonoro. Obter experimentalmente esses coeficientes de espalhamento sonoro é uma atividade muito importante para a criação de um banco de dados de materiais difusores. Neste trabalho são apresentados os resultados da determinação dos coeficientes de espalhamento sonoro de três superfícies contínuas realizadas em uma câmara reverberante em escala 1:5 do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LACAF) da UNICAMP. Estas amostras serão utilizadas em um comparativo de determinação de coeficientes de espalhamento sonoro em câmaras reverberantes em escala utilizando as câmaras do LACAF-UNICAMP, do Laboratório de Engenharia Civil da UTFPR e do Laboratório de Engenharia Acústica da UFSM.

Palavras-chave: coeficiente de espalhamento; câmara reverberante em escala; comparativo interlaboratorial
PACS:43.55.-n.

Measurement of scattering coefficient of scaled continuous surfaces.

Abstract

The early determination of the characteristics of the acoustic projects is an activity that becomes increasingly common and necessary. For this early determination the most viable way is computationally simulating these spaces to verify their performance. In addition to the surfaces sound absorption of a space, the sound diffusion characteristics are also an important information that influences its acoustical performance. The sound diffusion of a surface can be directly correlated on the simulation programs with the sound scattering coefficient. Experimentally obtaining these sound scattering coefficients is a very important activity for creating a database of diffuse materials. In this work the results from the sound scattering coefficient determination of three continuous surface were determined in a 1:5 scaled reverberant room from LACAF of UNICAMP. These samples will be used for a scattering coefficient determination comparative using scaled rooms from the LACAF-UNICAMP; from Civil Engineering Laboratory of UTFPR and the Acoustical Laboratory from UFSM.

Keywords: scattering coefficient; scale reverberant chamber; laboratory intercomparison

1. INTRODUÇÃO

A modelagem computacional é uma forma de aproximar o projeto arquitetônico das reais características dos espaços a serem construídos. Os programas usados em modelagem acústica demonstram uma grande eficácia em realizar a predição dos espaços, principalmente quando as

características das superfícies são corretamente representadas. Quando utilizam características que vão além da absorção da energia sonora de uma superfície, contemplando também a reflexão da energia sonora por uma superfície, o resultado da modelagem realizada pelo programa demonstra características muito



próximas dos espaços construídos [1]. A reflexão de energia sonora é representada por coeficientes de espalhamento sonoro, uma vez que os *softwares* de modelagem acústica se utilizam da técnica de traçado de raios acústicos [2].

O coeficiente de espalhamento representa a capacidade de uma superfície de redirecionar a energia acústica incidente fora da zona de reflexão especular. O coeficiente de espalhamento de uma superfície pode ser determinado pelo método descrito na norma internacional ISO 17497:2004 – *Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberant room* [3]. Esta norma foi originada a partir dos estudos realizados por Vorländer e Mommertz (2000) [4].

Comparativos de resultados de medições acústicas reais de salas e de métodos numéricos foram realizados de forma a qualificar os programas de simulação acústica. Os chamados “Round Robin” foram comparativos realizados entre parâmetros acústicos medidos em uma sala e os parâmetros acústicos determinados pelos programas de simulação que participavam destes comparativos [5].

Estes comparativos mostraram que programas que utilizavam em seu algoritmo os coeficientes de espalhamento acústico das superfícies, tinham seus valores de parâmetros acústicos simulados mais próximos dos valores de parâmetros acústicos medidos. Estes parâmetros medidos em um ambiente utilizado para a comparação eram os valores utilizados como referência dos resultados das simulações computacionais [2].

Determinar o coeficiente de espalhamento sonoro de superfícies é um trabalho importante para se obter um banco de dados de coeficientes de espalhamento para utilização em softwares de modelagem, analogamente aos bancos de dados de coeficientes de absorção sonora.

A determinação do coeficiente de espalhamento segundo ISO 17497:2004 [3] possui alguns detalhes de implementação que devem ser considerados para a realização dos ensaios. Cuidados com a colocação da amostra sobre a base móvel de uma mesa giratória devem ser

considerados, bem como distanciamento de dispositivos utilizados para ensaio e os sinais de excitação utilizados. Dentro destas especificidades é importante realizar a determinação do coeficiente de espalhamento em mais de um sistema de medição para verificar a reprodutibilidade do método utilizado.

Este trabalho tem o objetivo de apresentar os resultados da determinação do coeficiente de espalhamento sonoro de três superfícies difusoras e que serão utilizados em um comparativo laboratorial entre câmaras reverberantes. O ensaio foi realizado na câmara reverberante de escala 1:5 do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada em escala (LACAF) da UNICAMP e a comparação será realizada em breve com os resultados obtidos nas câmaras do Laboratório de Engenharia Civil da UTFPR e do Laboratório da Engenharia Acústica da UFSM.

2. COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO

A definição do coeficiente de espalhamento sonoro de uma superfície considera a quantidade de energia sonora que é refletida fora da zona especular. A zona especular é aquela formada pelo ângulo de incidência da energia sonora, em relação a normal ao plano de reflexão, e o mesmo ângulo da energia sonora refletida.

Para compreender melhor a definição do coeficiente de espalhamento a Figura 1 mostra os componentes da energia refletida de uma superfície a partir da energia incidente representada por uma unidade.

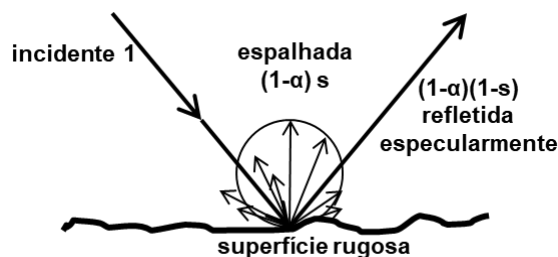


Figura 1 – Diagrama esquemático das componentes da energia espalhada sobre uma superfície rugosa. Fonte: Vorländer, M., Mommertz, E., (2000) [4].

Quando a amostra é submetida a energia sonora em várias orientações, pode-se observar que o seu comportamento perante a resposta impulsiva tem uma coerência para os intervalos iniciais da resposta. Conforme figura 2b

A parte inicial dos impulsos, que possui maior coerência entre si, é decorrente da parte especular das reflexões e as outras partes decorrentes da reflexão não especular [4].

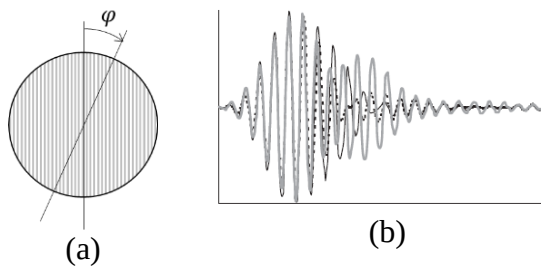


Figura 2 – Pulsos refletidos para diferentes orientações de amostra. a: amostra representada em posições diferenciadas; b: respostas impulsivas para as posições angulares. Fonte: Vorländer, M., Mommertz, E., (2000) [4].

Ao realizar uma média das respostas impulsivas para as várias orientações de amostra, obtém-se uma resposta impulsiva que pode ser correlacionada diretamente com a parte especular da energia refletida.

Para determinar o coeficiente de espalhamento é necessário que a amostra possa girar em um eixo central, perpendicular ao seu plano, para isso se faz necessário o uso de uma mesa giratória para movimentar a amostra.

A energia especular (E_{spec}) pode ser representada pela resposta impulsiva resultante da média das respostas para várias posições. A partir desta definição, e observando a Figura 1, pode-se determinar energia especular (E_{spec}) pela Equação (1).

$$E_{spec} = (1 - \alpha)(1 - s) = (1 - a), \quad (1)$$

em que α é o coeficiente de absorção sonora da amostra; a é o coeficiente de absorção sonora na região especular; e s é o coeficiente de espalhamento.

Pode-se considerar que a energia total (E_{total}) incidente é representada pela Equação (2).

$$E_{total} = (1 - \alpha), \quad (2)$$

O coeficiente de espalhamento sonoro s é determinado a partir da energia sonora que é refletida fora de região especular e pode ser obtido segundo a Equação (3).

$$s = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} = \frac{1-a}{1-\alpha} = \frac{a-\alpha}{1-\alpha}, \quad (3)$$

em que α é o coeficiente de absorção sonora da amostra; a é o coeficiente de absorção sonora na região especular

Em termos práticos a determinação do coeficiente de espalhamento sonoro pode ser realizada a partir de medições do coeficiente de absorção de uma amostra com posição fixa, determinando o coeficiente de absorção sonora da amostra α , conforme procedimento conhecido e o coeficiente de absorção sonora na região especular a partir da média de várias respostas impulsivas obtidas de diferentes posições da amostra.

A norma utilizada para determinação do coeficiente de espalhamento sonoro ISO 17479:2004 [3] indica que os ensaios de medição de coeficiente de espalhamento sonoro são realizados com a medição de tempos de reverberação a partir de respostas impulsivas obtidas em quatro situações diferentes:

1. Com a mesa giratória parada e sem amostra. (T_1)
2. Com a amostra de ensaio sobre a mesa giratória parada. (T_2)
3. Com a mesa giratória em movimento (girando) sem amostra. (T_3)
4. Com a amostra de ensaio sobre a mesa giratória em movimento (girando). (T_4)

Os tempos de reverberação (T_1 e T_2) medidos nas condições 1 e 2 são utilizados para obter o coeficiente de absorção sonora aleatória (α),



enquanto os tempos de reverberação (T_3 e T_4) obtidos com as condições 3 e 4 são utilizados para obter o coeficiente de absorção sonora especular (a). Os coeficientes de absorção sonora aleatória e especular são determinados a partir da Equação (4) e Equação (5), respectivamente.

$$\alpha = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1), \quad (4)$$

em que α é o coeficiente de absorção obtido com incidência aleatória; V é o volume da câmara de ensaio em metros cúbicos (m^3); S é a área da amostra em metros quadrados (m^2); T_1 tempo de reverberação sem a amostra em segundos (s); T_2 tempo de reverberação com a amostra em segundos (s); c_1 é a velocidade do som no ar durante a medição de T_1 em metros por segundo (m/s); c_2 é a velocidade do som no ar durante a medição de T_2 em metros por segundo (m/s); m_1 é o coeficiente de atenuação de energia do ar, calculado utilizando a temperatura e umidade relativa durante a medição de T_1 dado em metros elevado a menos um (m^{-1}); m_2 é o coeficiente de atenuação de energia do ar, calculado utilizando a temperatura e umidade relativa durante a medição de T_2 dado em metros elevado a menos um (m^{-1});

$$a = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3), \quad (5)$$

em que a é o coeficiente de absorção obtido com incidência aleatória; V é o volume da câmara de ensaio em metros cúbicos (m^3); S é a área da amostra em metros quadrados (m^2); T_3 tempo de reverberação sem a amostra com a mesa em movimento em segundos (s); T_4 tempo de reverberação com a amostra em movimento em segundos (s); c_3 é a velocidade do som no ar durante a medição de T_3 em metros por segundo (m/s); c_4 é a velocidade do som no ar durante a medição de T_4 em metros por segundo (m/s); m_3 é o coeficiente de atenuação de energia do ar, calculado utilizando a temperatura e umidade relativa durante a medição de T_3 dado em metros elevado a menos um (m^{-1}); m_4 é o coeficiente de atenuação de energia do ar, calculado utilizando a temperatura e umidade relativa durante a

medição de T_4 dado em metros elevado a menos um (m^{-1});

As amostras submetidas a determinação do coeficiente de espalhamento podem ser de formato quadrado ou circular. No caso de amostra circular, esta deve ter um diâmetro mínimo de $3,0/N$ metros, sendo N o fator de escala. O formato circular garante, no momento da medição, que a única alteração estrutural obtida durante a movimentação da amostra seja a alteração da rugosidade da amostra [6].

3. AMOSTRAS UTILIZADAS

As amostras utilizadas para o ensaio são amostras circulares com 0,64m de diâmetro em três modelos diferentes de superfícies, uma denominada de QRD 7 períodos; outra como Wave; e outra como QRD 11 períodos. As amostras podem ser observadas nos itens (a), (b) e (c) da Figura 2, respectivamente

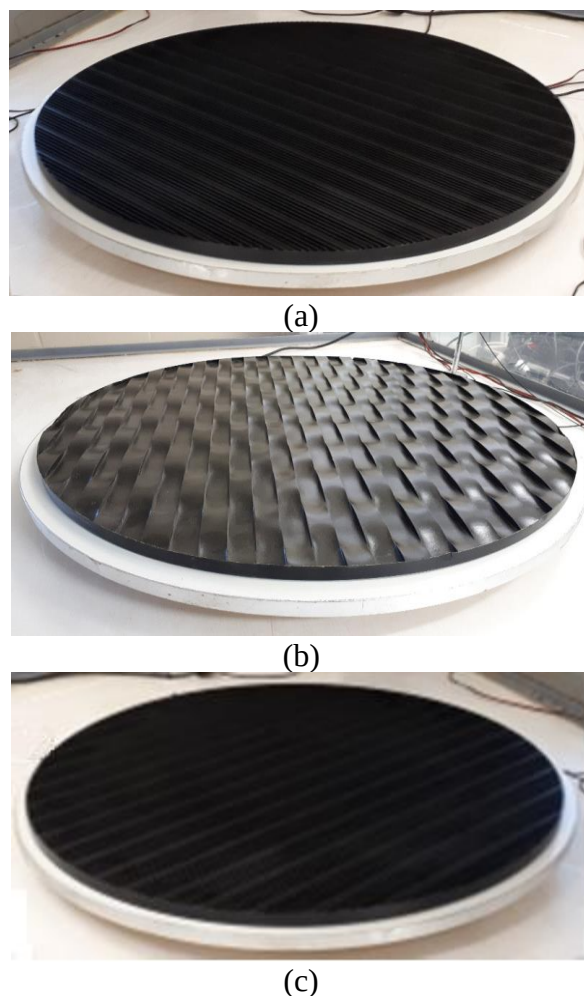


Figura 2 – Amostras utilizadas no ensaio: a) difusor QRD 7 períodos contínuo por toda superfície; b) superfície sinuosa entrelaçada

denominada Wave; c) QRD 11 períodos contínuo por toda a superfície.

Um detalhe importante a ser observado pelas amostras utilizadas é que estas possuem a superfície contínua, sem modulações. Os detalhes de modulações podem trazer um espalhamento não esperado e indicar de modo incorreto o coeficiente de espalhamento, principalmente em altas frequências [7].

Outro detalhe importante é o fato de que as bordas das amostras possuem uma estrutura lisa em todo o seu contorno o que diminui o efeito das arestas como verificado por KIM et al (2012)[8].

4. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

A medição para a determinação do coeficiente de espalhamento sonoro das amostras foi realizada no LACAF da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP utilizando uma câmara reverberante em escala 1:5. Para a medição dos tempos de reverberação foram escolhidas quatro posições de microfone e duas posições de fonte num total de dezoito arranjos entre microfone e fonte sonora. O método utilizado para a medida dos tempos de reverberação foi o de técnica de resposta impulsiva com sinal sonoro de varredura tonal (“sweep”) linear, para uso conjunto com a movimentação da mesa [9]. O tamanho da varredura foi de 1,52 segundos. A mesa giratória foi utilizada para movimentar angularmente a amostra e realizar medições

contínuas para um tempo de 90 segundos para completar uma rotação [10]. Considerando a possibilidade de se trabalhar com frequências maiores que 20 kHz, o microfone escolhido foi o modelo 40 BE da G.R.A.S. de ¼ de polegada pré polarizado que possui a resposta em frequência plana de 100 a 40 kHz. Em conjunto com o microfone, o pré-amplificador modelo 26 CB foi escolhido, conforme recomendação do fabricante. A fonte sonora é composta por tweeters da marca Bravox modelo Neo Tech 25 A, devido a sua resposta em frequência de 4 kHz a 30 kHz [9].

As medições acústicas de modelos em escala necessitam de análise em escala. No modelo da câmara reverberante do LACAF a escala é de 1:5, portanto se a faixa de frequências estudada é de 100 a 4000 Hz, as frequências a serem consideradas no modelo são de 500 a 20.000 Hz.

5. RESULTADOS

A partir dos resultados das medições de tempo de reverberação em função de frequência, os coeficientes de espalhamento sonoro foram calculados. Os resultados dos coeficientes de espalhamento sonoro em função de frequência em banda de 1/3 de oitava de 100 a 4000Hz das três amostras estudadas são apresentados na Figura 3. Os cálculos para as incertezas de medição foram realizados de acordo com a Anexo A da norma ISO 17497:2004 [3] e demonstrados em forma de linhas de barra no gráfico da Figura 3.

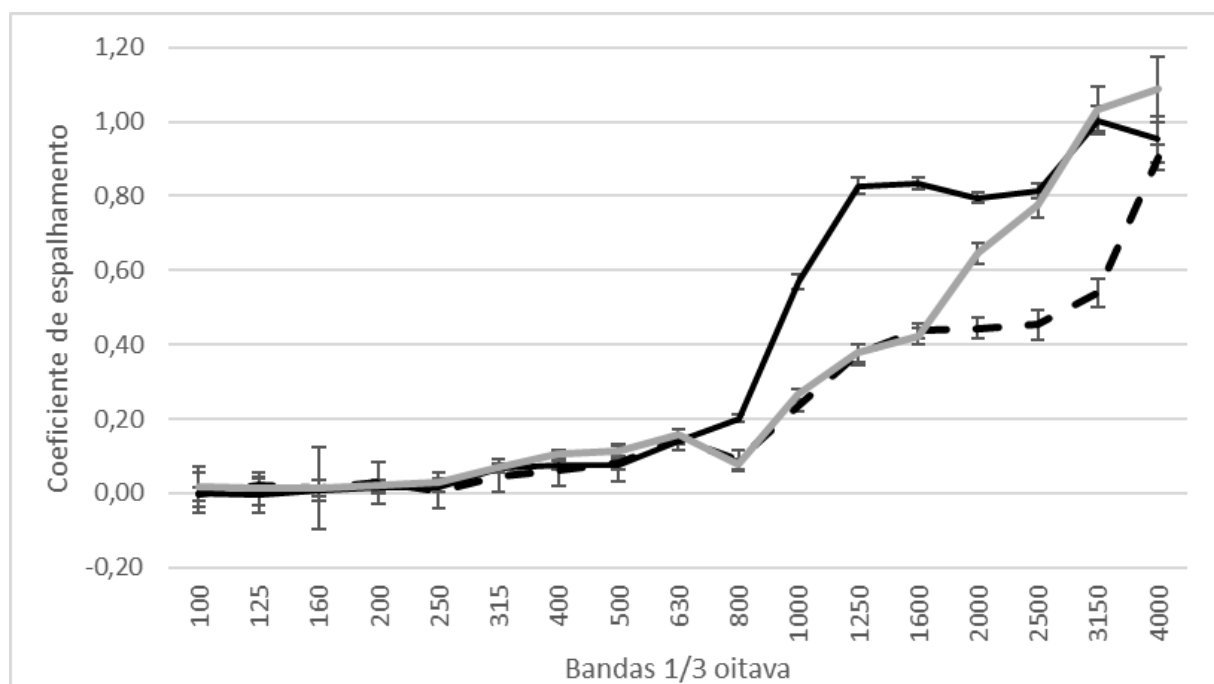


Figura 3 – Resultados do coeficiente de espalhamento: linha cheia cinza: difusor QRD 7 períodos contínuo; linha preta contínua: superfície sinuosa entrelaçada denominada Wave; linha preta tracejada QRD 11 períodos contínuo por toda a superfície.

6. DICUSSÕES

Os fatores que influenciam diretamente a acurácia dos resultados, principalmente medições em escala, como posição de fonte e receptor, sinal de excitação, recaem sobre a metodologia e as variâncias dos métodos envolvidos. Os erros que em escala real (1:1) não teriam muita influência, se tornam preocupantes para metodologias que utilizam determinação de coeficientes em escala reduzida. Mostra-se, então, necessário o uso de mais posições de fonte e microfone para diminuir as interferências no campo acústico provocadas por variações do ar com a abertura e fechamento das câmaras em escala reduzida [11]. Os ensaios realizados neste trabalho utilizaram três posições de fonte e seis posições de microfone totalizando dezoito arranjos entre fonte e microfone.

Os valores mostrados no gráfico da figura 3 já foram ajustados para a escala referenciada. Os valores apresentados nas bandas de terço de oitava de 100 a 4000 Hz, foram medidos no modelo em escala nas bandas de 500 a 20000 Hz.

Os resultados encontrados para os coeficientes de espalhamento sonoro das estruturas estudadas indicam comportamentos semelhantes para as frequências centrais inferiores 630 Hz.

Ainda analisando a Figura 3 observar os resultados das estruturas de QRD medidas possuem uma resposta semelhantes entre as bandas 1/3 de oitava entre as frequências centrais de 630 a 1600 Hz. Estruturalmente estas superfícies iriam se diferenciar para frequências mais altas devido aos períodos diferenciados entre os difusores QRD's. Essa alteração pode ser observada a partir de 2000 Hz e se estende até o final do gráfico na banda de 4000 Hz. Os perfis das superfícies possuem perfis de difusores QRD's, porém a escala não foi determinada. Ao comparar os perfis destes difusores com difusores já manufaturados anteriormente [7] é possível verificar que a escala é menor que um difusor comumente utilizado em estúdios, modulado em 600x600 mm (o que equivaleria a uma modulação de 120x120 mm para ser usado na câmara em escala 1:5).

Os valores dos coeficientes de espalhamento sonoro da amostra de superfície sinuosa, representados pela curva preta sólida da Figura 3, mostram valores de coeficientes de espalhamento maiores que 0,8 a partir da banda de 1/3 de oitava de 1250 Hz. É verificada um aumento dos valores de espalhamento a partir de 500 Hz que se torna mais acentuado a partir de 800 Hz para esta amostra. Devido ao seu formato, essa amostra sinuosa causa reentrâncias que podem ser responsáveis pelo espalhamento observado conforme descrito por Vorlander (2007) [12].

Valores de coeficiente de espalhamento sonoro acima de 1 são observados para a amostra QRD com 7 períodos, representado pela curva cinza no gráfico da Figura 3. Verificações dos valores obtidos podem ser realizadas, uma vez que a incerteza de medição se apresenta alta, conforme barra de erro pronunciada no mesmo ponto. Valores do coeficiente de absorção aleatório já apresentavam coeficientes de absorção acima de 1,0 para essa amostra nesta frequência. Um estudo de valores discrepantes e quais posições levaram a esses valores é recomendado para medições futuras, principalmente levando em consideração medições comparativas entre laboratórios.

Os próximos passos consistem em medições para determinação do coeficiente de espalhamento sonoro das mesmas amostras descritas neste trabalho e que deverão ser realizadas nos laboratórios da UTFPR e UFSM. Em seguida um estudo das variações encontradas será o ponto principal do inter comparativo proposto.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer os professores William D'Andrea Fonseca, da Engenharia Acústica (EAC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o Professor Marcio Avelar Gomes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela iniciativa de realizar o comparativo entre os laboratórios.

REFERÊNCIAS

- [1] BORK, I., Evaluation of Room Acoustic Simulation Software, CFA/DAGA'04, Strasbourg, 2004.
- [2] Gomes, M. H. A., Vorländer, M., Gerges, S.N.Y. Measurement and use of scattering coefficients in room acoustic computer simulations. *Acustica 2004* – Guimarães, Portugal, 2004, paper ID: 061.
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: 17497-1, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room. 2004.
- [4] Vorländer, M., Mommertz, E., Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics*. 60, 187 199 (2000)..
- [5] Vorländer, M. International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. *Proceedings...* da 15a ICA, Trond Helm, Noruega, 1995, pp 943.
- [6] Cox, T.J., D'Antonio P. *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application*. Spon Press 2004. ISBN 0-415-29649-8.
- [7] Santos, C. Bertoli, S. R. Determinação do coeficiente de espalhamento de superfícies com câmara reverberante em escala. XI ENCAC. Buzios RJ, 2011.
- [8] Kim, J. Lee, J. Choi, Y. Jeong, D. The Effect of fan Edge on the Measured Scattering Coefficients in a Reverberation Chamber based on ISO 17497-1. *Building Acoustics*. V.19. N. 1. 2012.
- [9] Kamisiński, T. Brawata, K. Pilch, A. Rubacha, J. Zastawnik, M. Test Signal Selection for Determining the Sound Scattering Coefficient in a Reverberation Chamber. *Archives of Acoustics*. Vol. 37, No. 4, pp. 405–409 (2012).
- [10] Santos, C., Bertoli, S. R.; Construção de câmara reverberante em escala para realização de ensaios acústicos. *Congreso Iberoamericano de Acústica*. Proceedings - FIA 2008. Nov. 2008.
- [11] Pan, L. Zhao, Y. Gao, J. Factors influencing scattering coefficient measurement accuracy in scaled reverberation room. *Applied Acoustics*. 159 (2020)
- [12] Vorländer, M. *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. 1st edition, Springer, Berlin, 2007.