



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Búzios - RJ - 2011

DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO DE SUPERFÍCIES COM CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA.

Christian dos Santos (1); Stelamaris Rolla Bertoli (2)

(1) Engenheiro, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, christian-st@uol.com.br

(2) PhD, Professora do Departamento de Arquitetura e Construção, rolla@fec.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada, Universidade Estadual de Campinas

Av. Albert Einstein, 951 - Caixa Postal: 6021 - CEP: 13083-852 - Campinas – SP(19) 3521 2306

RESUMO

O uso do coeficiente de espalhamento em simulações computacionais de salas tem mostrado como resultado uma ótima aproximação dos valores de características acústicas como TR60 e EDT calculados por simulações e valores medidos nas salas simuladas. Para obter o coeficiente de espalhamento de uma superfície um dos métodos conhecidos é o que utiliza um campo reverberante de uma câmara reverberante que é descrito na norma ISO 17497:2004. A câmara reverberante utilizada no método pode ser uma câmara em escala conforme diretrizes da norma de ensaio. O objetivo deste trabalho é mostrar a qualificação de uma câmara em escala utilizada, a medição e os detalhes da determinação do coeficiente de espalhamento de algumas superfícies. Alguns pontos importantes do método de ensaio como a colocação da amostras sobre a mesa de ensaio, as áreas das amostras utilizadas e a caracterização das superfícies de ensaio serão discutidas para elucidar dúvidas comuns nos trabalhos de determinação de coeficiente de espalhamento que utilizam câmaras reverberantes.

Palavras-chave: simulação computacional, espalhamento, câmara reverberante.

ABSTRACT

The use of the scattering coefficient in computer simulations has shown a good approximation between simulated and measured values of room characteristics like RT60 and EDT. One of the methods used to determine the scattering coefficient is the method that uses a reverberation field from a reverberation chamber described in ISO 17497:2004. The reverberation chamber described in the method can be scaled. The objective of this work is show the qualification of a scaled reverberation chamber, the measurement and the determination of the scattering coefficient of some surfaces. Some important points of the test method like the sample allocation over the test plate, the sample areas used and the characterization of the surfaces under tests will be discussed to elucidate some questions about the determination of the scattering coefficient using reverberation chambers.

Keywords: computer simulation, scattering, reverberation chamber.

1. INTRODUÇÃO

Com o advento de técnicas numéricas e o uso de processamento computacional na predição das características acústicas de espaços internos, certos programas de modelagem demonstraram a eficácia do uso de coeficientes que representassem a reflexão da energia sonora das superfícies (BORK, 2004). A técnica utilizada para a predição acústica das características dos espaços, nestes programas, normalmente utiliza-se do traçado de raios acústicos. Devido a esta técnica, o coeficiente de espalhamento mostra-se bem mais representativo da característica de difusão de uma superfície nos programas de modelagem do que outros coeficientes elaborados para o mesmo fim (GOMES et al., 2004).

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 por um método descrito na norma internacional ISO 17497:2004 – Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberant room. Esta norma foi originada a partir dos estudos realizados por Vorländer e Mommertz (2000).

Comparativos de medições reais de salas e de métodos numéricos foram realizados de forma a qualificar os programas de simulação. Os chamados “Round Robin” foram comparativos realizados entre parâmetros medidos em uma sala e os parâmetros determinados pelos programas de simulação que participavam destes comparativos (VORLÄNDER, 1995).

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 aos valores de parâmetros acústicos medidos. Estes parâmetros medidos em um ambiente utilizado para a comparação eram os valores utilizados para referência dos resultados das simulações computacionais (GOMES et al., 2004).

A determinação do coeficiente de espalhamento segundo ISO 17497:2004 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.

A validação do ensaio em câmara reverberante em escala e a medição de algumas superfícies serão apresentados neste trabalho.

Nos programas de simulação é recomendado pelos fabricantes o uso de coeficientes de espalhamento estimados para determinadas superfícies. A prática mostra que os valores obtidos experimentalmente dos coeficientes de espalhamento variam de acordo com a frequência e com o tipo de superfície do material.

Com o aumento do uso de programas de simulação computacional é necessário o conhecimento do coeficiente de espalhamento de algumas superfícies para auxiliar no projeto e simulação computacional de espaços que utilizam estas superfícies.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar a validação do método de determinação de coeficiente de espalhamento utilizando uma câmara em escala de 1:5 construído no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Faculdade de Engenharia civil da Unicamp. O coeficiente de espalhamento de algumas superfícies foram determinados e os resultados também serão apresentados neste trabalho.

3. MÉTODO

A metodologia empregada para este estudo teve como primeiro passo a determinação experimental dos coeficientes de espalhamento de uma amostra com coeficientes de espalhamento conhecidos para uma validação comparativa do método utilizado para determinação do coeficiente de espalhamento.

3.1. Câmara em Escala

O projeto da câmara reverberante em escala foi feito de acordo com as relações entre as dimensões altura, largura e comprimento, existentes na norma de ensaio de potência sonora ISO 3741:1994. Estas dimensões são recomendadas para a construção de câmaras reverberantes em escala real e são utilizadas em modelos desde que respeitados os fatores de escala para cada uma das dimensões de largura, altura e comprimento (NASCIMENTO e ZINDELUK, 2005).

De acordo com a ISO 3741:1994 as paredes da câmara reverberante devem ter um coeficiente de absorção sonora menor que 0,06 para as frequências de medição. A câmara reverberante em escala (1:5) que foi construída no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LACAF) da Faculdade de

Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Unicamp possui paredes em chapas de acrílico reforçada com perfis metálicos com dimensões finais internas de 1,52 x 1,25 x 0,92 m (SANTOS e BERTOLI, 2008). O acrílico foi escolhido devido ao seu baixo coeficiente de absorção sonora, (menor que 0,05), e pelo seu fator de isolamento ($R_w =$ de 25 dB segundo DAGOL (2007)). O aspecto final da câmara reverberante em escala pode ser visto na figura 1.



Figura 1 – Câmara reverberante em escala.

3.2. Determinação do coeficiente de espalhamento

O princípio do coeficiente de espalhamento é obter a quantidade de energia que é refletida fora da zona especular. A zona especular é aquela que representa uma reflexão com o mesmo ângulo, em relação a normal ao plano de reflexão, do ângulo da energia incidente.

A Figura mostra os componentes da energia refletida de uma superfície a partir da energia incidente representada por uma unidade. Comparando os impulsos resultantes de reflexões de energia para uma amostra com diferentes orientações, segundo Vorländer e Mommertz (2000), a parte inicial dos impulsos possui uma grande correlação entre si o que não ocorre com a parte tardia destes impulsos, como visto na Figura 3.

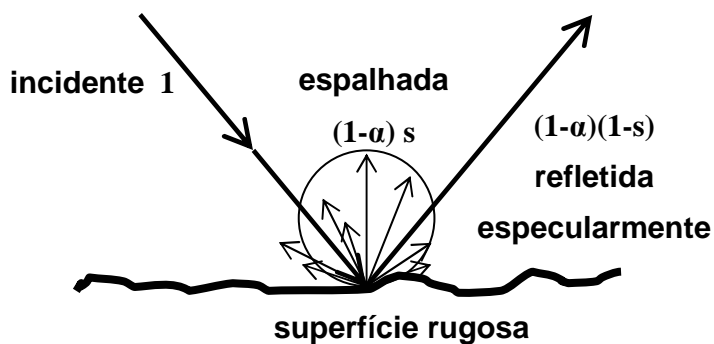


Figura 2 – Diagrama esquemático das componentes da energia espalhada sobre uma superfície rugosa. Fonte: Vorländer, M., Mommertz, E., (2000).

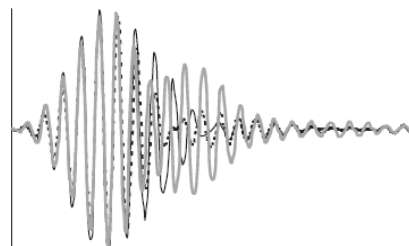


Figura 3 – Pulsos refletidos para diferentes orientações de amostra. Fonte: Vorländer, M., Mommertz, E., (2000).

Observando o conceito apresentado na Figura 3 a parte inicial dos pulsos refletidos pode ser correlacionada com a parte que reflete specularmente sobre a superfície. Utilizando uma média de várias respostas impulsivas, para várias posições de orientação da amostra, a Resposta impulsiva resultante deste ensaio poderia ser diretamente correlacionada com a parte especular da energia. A resposta impulsiva resultante pode ser considerada como a resposta impulsiva da energia especular. Na Figura 2 a energia especular refletida é dada pela Equação 1.

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

Equação 1

onde: α = coeficiente de absorção.

a = coeficiente de absorção especular.

s = coeficiente de espalhamento.

A energia total incidente pode ser representada pela Equação 2.

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

Lembrando que o coeficiente de espalhamento é a energia que é refletida fora da região especular, o coeficiente de espalhamento pode ser determinado pela Equação 3.

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

De acordo com a norma ISO 17479:2004 os ensaios de medição de coeficiente de espalhamento são realizados com a medição de tempos de reverberação a partir de respostas impulsivas obtidas em quatro situações diferentes:

- 1 – Apenas a mesa giratória parada.
- 2 – A amostra de ensaio sobre a mesa giratória parada.
- 3 – Apenas a mesa giratória em movimento (girando).
- 4 – A amostra de ensaio sobre a mesa giratória em movimento (girando).

Os tempos de reverberação medidos nas condições 1 e 2 são utilizados para obter o coeficiente de absorção sonora aleatória (α), enquanto que os tempos de reverberação obtidos com as condições 3 e 4 são utilizados para obter o coeficiente de absorção sonora especular (a).

As medições do coeficiente de espalhamento necessitam de uma preparação da amostra de ensaio. Esta deve ser disposta em formato circular com diâmetro de $3,0/N$ metros, sendo N o fator de escala. O formato circular garante, no momento da medição, que a alteração estrutural obtida durante a movimentação da amostra seja a alteração da rugosidade da amostra (COX e D'ANTONIO, 2004).

Segundo a ISO 17479:2004 a distância mínima entre corpo de prova, junto com a mesa giratória, e superfícies internas não deve ser menor que 1m. As distâncias entre microfone e qualquer superfície, tanto da amostra como da câmara, deve ser de no mínimo 1m.

Quando for utilizada uma amostra em formato quadrado, esta deve ser montada no interior de uma estrutura em formato circular conforme visto nas Figuras 4 e 5. As dimensões da amostra quadrada devem respeitar o tamanho mínimo de $2,65/N$ m de lado, sendo N o fator de escala. Para este caso o diâmetro da estrutura circular terá o diâmetro de $3,75/N$ m.

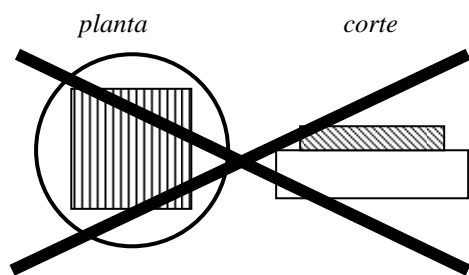


Figura 4 – Preparação de amostra quadrada para realização de ensaio de determinação de coeficiente de espalhamento, forma incorreta. Fonte: : Cox, T.J. e D'Antonio P., (2004).

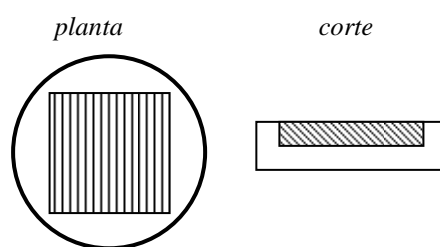


Figura 5 – Preparação de amostra quadrada para realização de ensaio de determinação de coeficiente de espalhamento, forma correta. Fonte: : Cox, T.J. e D'Antonio P., (2004).

As dimensões mínimas entre corpo de prova e superfícies internas foram respeitadas, de acordo com a ISO 17479:2004. A distância tomada como mínima foi de 20 cm, na escala 1:5, que corresponde a 1m na escala real (SANTOS e BERTOLI, 2008).

As medições acústicas de modelos em escala necessitam de cuidado na escolha dos transdutores de captação e reprodução, pois assim como as dimensões, as frequências de análise também devem respeitar o fator de escala do modelo. Por exemplo, num modelo 1:5 se a faixa de frequências estudada é de 100 a 4000 Hz, as frequências a serem consideradas no modelo seriam de 500 a 20.000 Hz. 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. No lugar dos altofalantes foram utilizados tweeters da marca Bravox modelo Neo Tech 25 A, devido a sua resposta em frequência de 4 kHz a 30 kHz (SANTOS e BERTOLI, 2008).

Para validação da metodologia utilizada foram realizados ensaios com uma amostra composta por semi-esferas de gesso e os valores encontrados foram comparados com os valores obtidos por Jeon et al. (2004) com uma amostra composta por semi-esferas de madeira.

3.3. Medição dos coeficientes de espalhamento

Ensaio com amostra de semi-esferas confeccionadas em gesso foram realizados e os resultados foram comparados aos valores dos coeficientes obtidos por Jeon et al. (2004).

Os ensaios para determinação do coeficiente de espalhamento com a câmara do LACAF-FEC foram realizados para quatro posições de microfone e duas posições de fonte num total de oito arranjos entre microfone e fonte sonora. O método utilizado foi de varredura tonal (“sweep”) linear, para uma ênfase nas altas frequências. O tamanho da varredura foi de 2,73 segundos. A mesa giratória foi utilizada para realização de medições contínuas para um tempo de 90 segundos para completar uma rotação (SANTOS e BERTOLI, 2008).

Jeon et al. (2004) definem alguns valores de coeficiente de espalhamento para semi-esferas, realizando um comparativo entre a densidade de esferas com a rugosidade da superfície e tamanhos de esferas. Este trabalho foi utilizado convenientemente para validar o método sem se preocupar com problemas de reflexões de borda.

A amostra utilizada foi composta por 171 semi-esferas maciças de gesso com 40mm de diâmetro, espalhadas aleatoriamente de forma a cobrir uma área de 44% da área da mesa giratória. A amostra utilizada pode ser observada na Figura 6.



Figura 6 – Amostra utilizada para comparação e validação do método de ensaio.

A partir destes ensaios realizados para validação da metodologia, outras superfícies tiveram seus coeficientes de espalhamento determinados.

As superfícies escolhidas para a determinação do coeficiente de espalhamento foram: uma superfície lisa; uma superfície composta por pedaços de madeira dispostos e espaçada de forma periódica; difusores QRD projetados para frequência de corte de 700 a 4kHz, dispostos de maneira diferente; difusores QRD 2D projetados para as frequências de 600 Hz a 4kHz; e superfície composta por semicilindros periódicos.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

O primeiro resultado obtido foi à determinação do coeficiente de espalhamento da amostra da Figura 6 e o comparativo com os valores obtidos por Jeon et al. (2004) com amostra equivalente.

Com o método validado, outras superfícies serão ensaiadas para determinar o coeficiente de espalhamento destas superfícies. As amostras foram escolhidas de forma a confrontar seus coeficientes de espalhamento de acordo com o comportamento do coeficiente de espalhamento descrito por Vorländer (2007)

4.1. Medição de validação do método

Os primeiros resultados obtidos foram comparados com valores publicados por Jeon et al em 2004 que utilizaram semi-esferas de vários tamanhos onde eram determinados os coeficientes de espalhamento das amostras formadas por cada tipo de semi-esferas. Os resultados utilizados para o comparativo foram de esferas com tamanho equivalente aos utilizados na amostra vista na Figura 6.

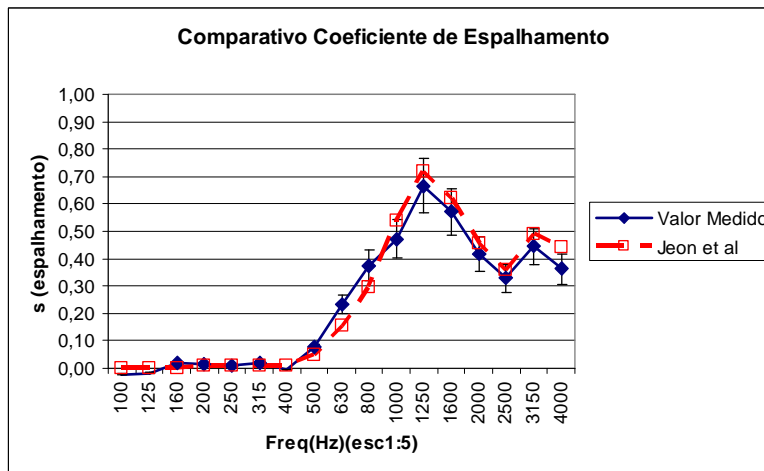


Figura 7 – Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento para amostras medidas e obtidas em publicação de Jeon et al.(2004).

Observa-se na figura 7 que os valores obtidos com as medições dos coeficientes de espalhamento da amostra composta por semi-esferas em gesso estão com valores equivalentes de acordo com os desvios calculados segundo norma ISO 17497:2004 de $\pm 10\%$.

4.2. Determinação do coeficiente de espalhamento de superfícies

As características de uma superfície lisa foram representadas por uma chapa de MDF com revestimento reflexivo em uma das faces. O material no interior da câmara reverberante e os resultados dos coeficientes de espalhamento e absorção em função da frequência são mostrados nas Figura 8 e 9.

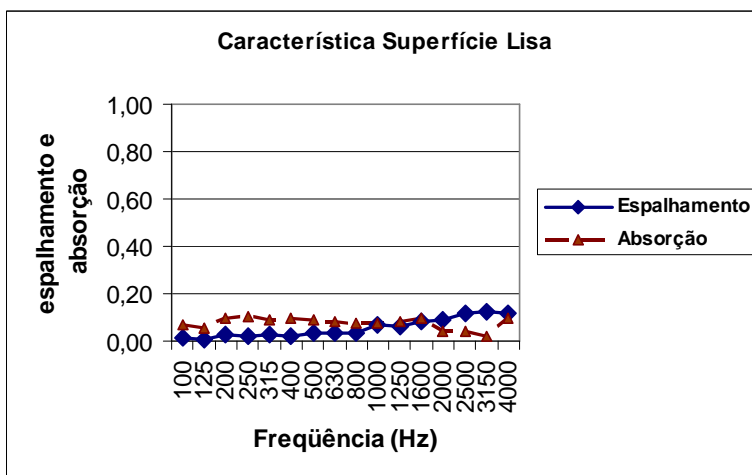


Figura 8 – Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento e de absorção para uma superfície lisa.

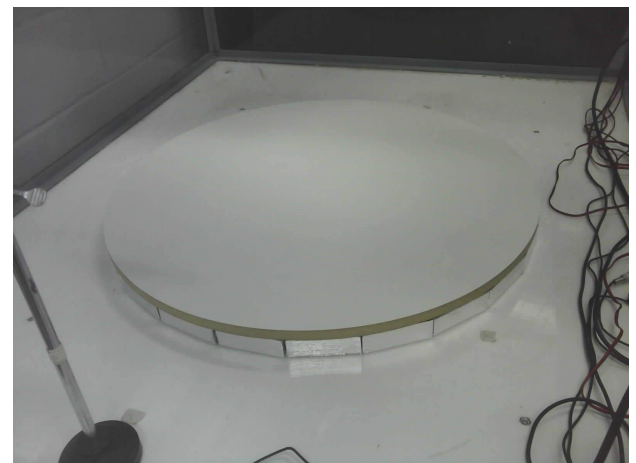


Figura 9 – Superfície lisa dentro da câmara reverberante em escala.

Uma amostra formada por madeira espaçada periodicamente foi utilizada, esta amostra foi composta por madeiras com largura e altura de 35mm, espaçadas de 35 mm.

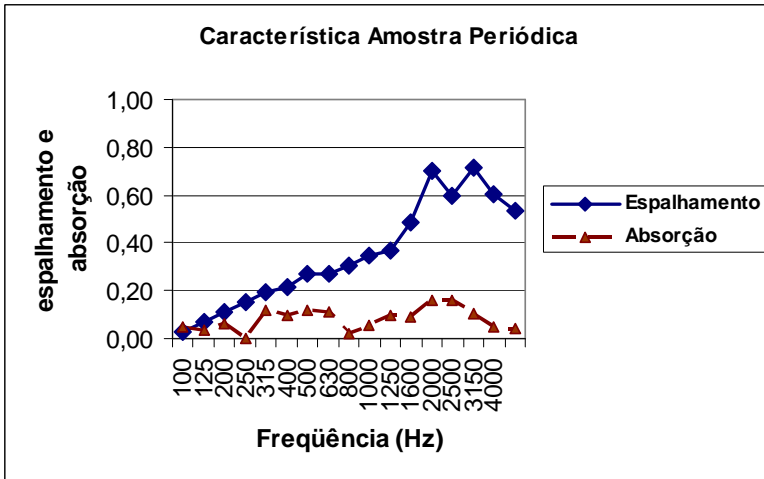


Figura 10 – Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento e de absorção para uma superfície formada por pedaços de madeira espaçados periodicamente.

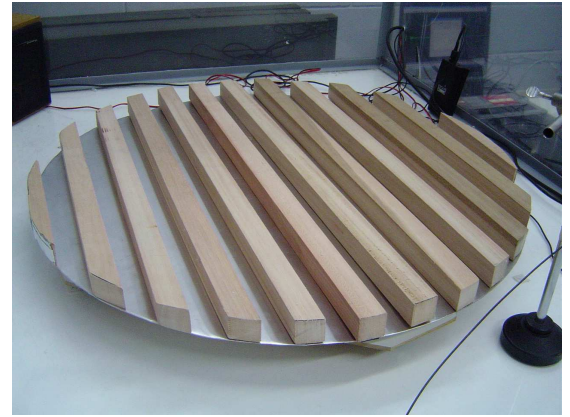


Figura 11 – Superfície periódica dentro da câmara reverberante em escala.

Uma amostra composta por difusores de resíduos quadráticos (QRD – *Quadratic Residue Diffusers*) foi construída para a determinação do coeficiente de espalhamento. Seus coeficientes de espalhamento foram determinados para dois tipos de modulação: direcionada e transversa. As figuras 12, 13, 14 e 15 mostram os coeficientes de espalhamento e de absorção determinados para estes elementos.

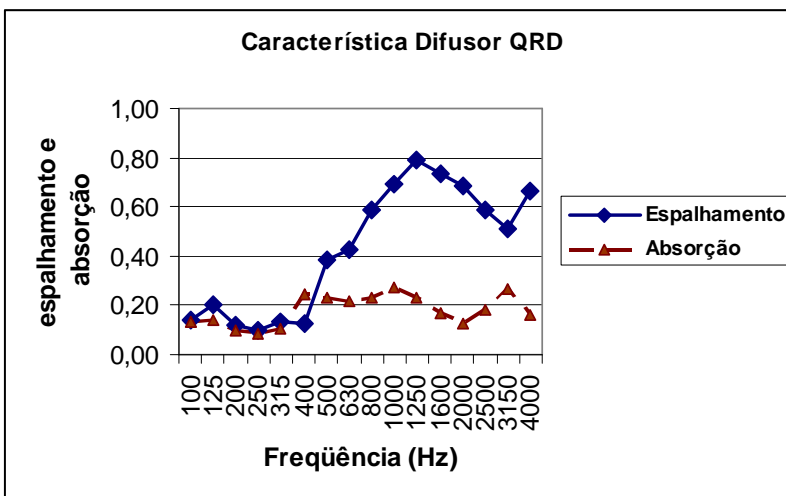


Figura 12 – Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento e de absorção para uma superfície formada por difusores QRD direcionados.

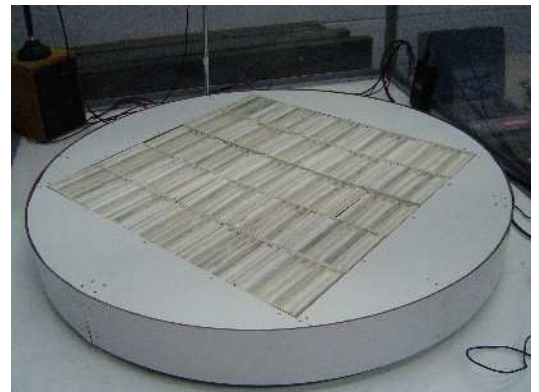


Figura 13 – Superfície de QRD's dentro da câmara reverberante em escala.

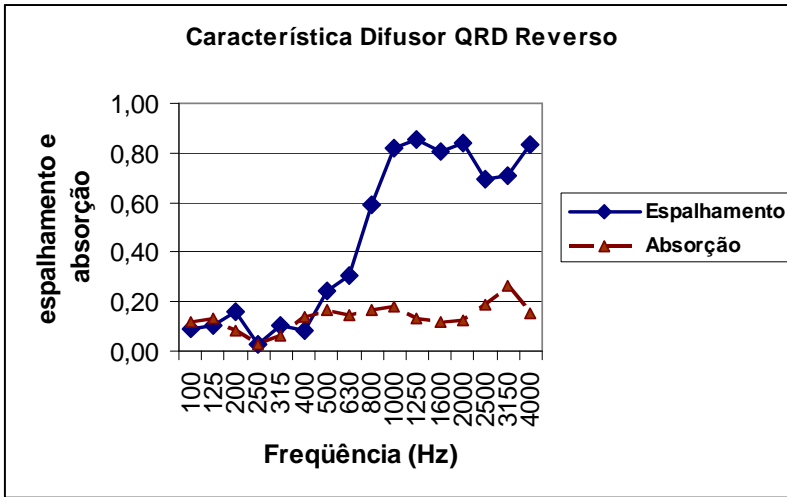


Figura 14 – Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento e de absorção para uma superfície formada por difusores transversos.

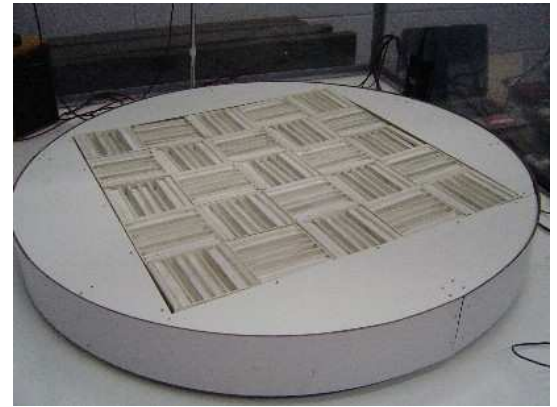


Figura 15 – Superfície de QRD's transversos dentro da câmara reverberante em escala.

Outra superfície muito utilizada em salas e estúdios é o difusor QRD 2D. Esse difusor tem como característica criar a difusão de um difusor de resíduos quadráticos, mas em duas direções de propagação e não apenas uma como os difusores QRDs convencionais. As características deste difusor e sua montagem no ensaio são mostradas nas figuras 16 e 17.

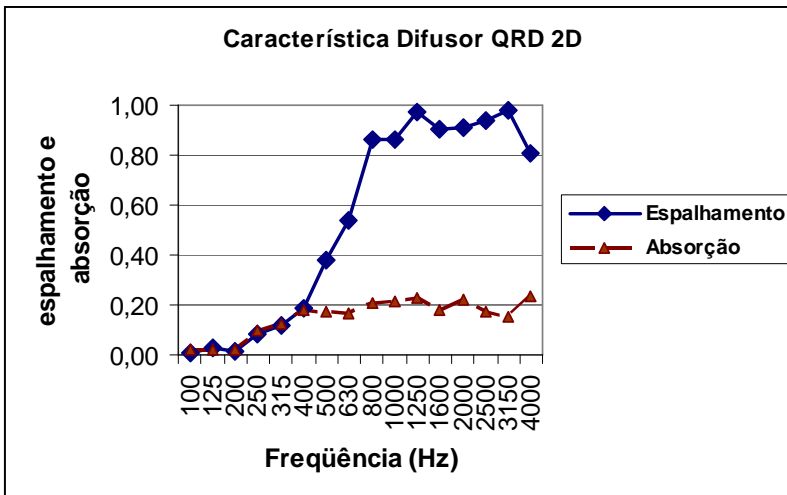


Figura 16 – Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento e de absorção para uma superfície formada por difusores QRD 2D.

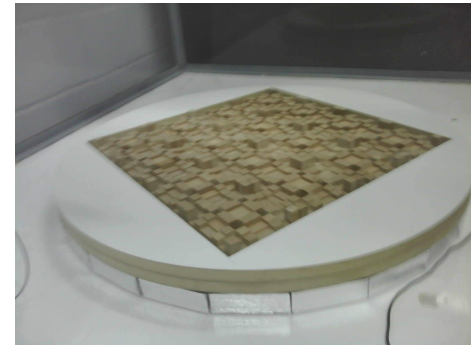


Figura 17 – Superfície de QRD 2D dentro da câmara reverberante em escala.

Uma superfície composta por semi-cilindro periódicos também foi ensaiada e o resultado pode ser observado na Figura 18, enquanto que a superfície dentro da câmara em escala pode ser observada na Figura 19.

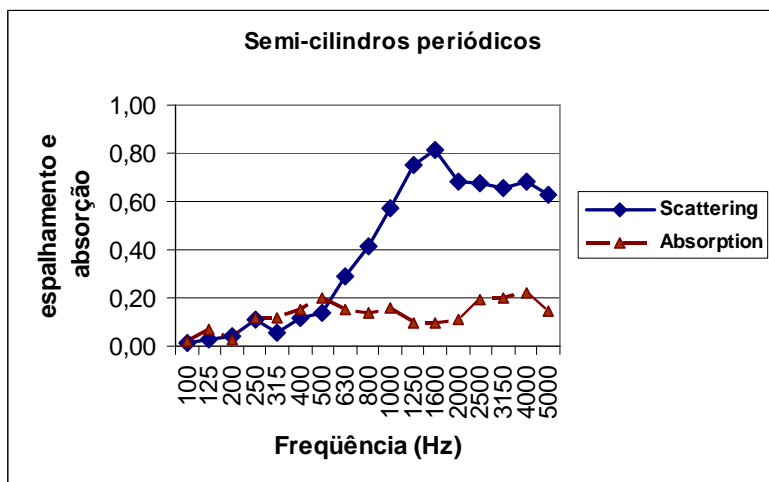


Figura 18 – Resultado de determinação do coeficiente de espalhamento e de absorção para uma superfície formada por semicilindros periódicos.

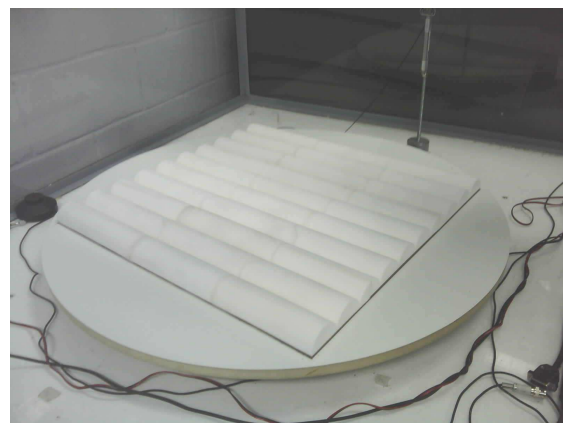


Figura 19 – Superfície de semicilindros periódicos dentro da câmara reverberante em escala.

5. CONCLUSÕES

Os resultados da validação do método de ensaio mostraram valores dentro dos desvios previstos na norma ISO 17479:2004. A realização dos ensaios para determinação do coeficiente de espalhamento de superfícies teve a importância de se obter valores de coeficiente de espalhamento.

O objetivo do uso de semi-esferas foi realizar a validação a partir de ensaios já realizados, não se preocupando com valores resultantes de efeito de borda.

A utilização de valores do software ODEON não garantem sua origem, se foram calculados ou realmente ensaiados e em que forma foram determinados. Foi visto nos ensaios que a correta correlação física das características acústicas do coeficiente de espalhamento de superfícies abrange valores diferentes para diferentes frequências.

As superfícies que tiveram seu coeficiente de espalhamento determinado demonstraram coerência nos valores de coeficiente de espalhamento previstos por Vorländer (2007). A superfície lisa mostrou valores de coeficientes de espalhamento baixos o que era esperado para este tipo de superfície.

Os difusores QRD's projetados para uma faixa de frequências de 700Hz a 4kHz, mostraram maiores valores de coeficiente de espalhamento nesta faixa de frequência. Quando utilizados como orientação reversa os valores de coeficiente de espalhamento são maiores que os valores obtidos com os difusores alocados para uma mesma orientação. Isto ocorre devido ao aumento da rugosidade ou de reentrâncias com o uso do sentido reverso.

O difusor QRD 2D mostrou um coeficiente de espalhamento maior que os difusores QRD's medidos. Este fato ocorre devido aos detalhes construtivos do difusor que possui partes de madeira de vários tamanhos, sem detalhes de redirecionamento como visto nos difusores QRD's convencionais construídos.

Os valores determinados de coeficiente de espalhamento da superfície de semicilindros periódica, mostraram valores coerentes com o aumento do coeficiente de espalhamento de acordo com a frequência. Este comportamento é verificado em valores de superfícies equivalentes em literatura publicada (Vorlander (2007); Vorländer e Mommertz (2000)), onde há um aumento do coeficiente de espalhamento com a frequência até a frequência calculada pelas reentrâncias das superfícies, depois ocorre uma ligeira queda mantendo o valor de 15% a 20% abaixo do valor de coeficiente de espalhamento máximo obtido na frequência calculada pelas reentrâncias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORK, I., Evaluation of Room Acoustic Simulation Software, **CFA/DAGA'04**, Strasbourg, 2004.
 COX, T.J., D'ANTONIO P. **Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application**. Spon Press 2004. ISBN 0-415-29649-8.
 CHOI Y-Ji., JEONG D-Up, Some issues in measurement of the random-incidence scattering coefficients in a reverberant room. *ACTA Acustica united with Acustica*. 94, 769 773 (2008).

- DAGOL, “**Características do acrílico**”, http://www.dagol.com/pt/html/prod_dibond.html, acessado em 16/09/2007.
- 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.
- 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.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3741**- Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision method for reverberations rooms. Switzerland, 1999.
- JEON, J. Y., LEE, S.C., VORLÄNDER, M., Development of scattering surfaces for concert halls. **Applied Acoustics**. 65, 341 355 (2004)
- NASCIMENTO, R. L. X., ZINDELUK, M., Scale-Model Reverberation Chamber for Teaching and Scaled Absorption Material Development. **12th International Congress on Sound and Vibration**, 2005, Lisboa. Proceedings 12th ICSV, 2005.
- SANTOS, C., BERTOLI, S. R.; Construção de câmara reverberante em escala para realização de ensaios acústicos. **Congresso Iberoamericano de Acústica . Proceedings** - FIA 2008. Nov. 2008.
- VORLÄNDER, M., MOMMERTZ, E., Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients **Applied Acoustics**. 60, 187 199 (2000).
- VORLÄNDER, M. International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. **Proceedings...** da 15a ICA, TrondHelm, Noruega, 1995, pp 943
- VORLÄNDER, M. **Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. 1st edition, Springer, Berlin, 2007.