

## **TÓPICOS CONSTRUTIVOS DE CÂMARA REVERBERANTE EM ESCALA E PROBLEMAS ENCONTRADOS EM ENSAIOS DE ABSORÇÃO.**

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

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

(2) PhD, Professora do Departamento de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, rolla@fec.unicamp.br  
Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo,  
Laboratório de Conforto, Av. Albert Einstein, 951 - Caixa Postal: 6021 - CEP: 13083-852 - Campinas – SP -  
BRASIL

### **RESUMO**

O aperfeiçoamento das características acústicas dos espaços contemporâneos é um tópico muito estudado principalmente os parâmetros mensuráveis que representam a distribuição de energia sonora dentro do ambiente. Este trabalho tem como objetivo mostrar tópicos construtivos de uma câmara reverberante em escala de 1:5 e problemas encontrados em medições de coeficiente de absorção. A colocação de difusores de PVC trouxe valores não esperados nas medições em frequências maiores que 5000 Hz. Depois de realizada a substituição de tais difusores por difusores metálicos, novos ensaios para a validação de campo reverberante foram realizados. Ensaios de absorção sonora de tijolos ressoadores em escala foram realizados para comprovar a equivalência de ensaios realizados em escala reduzida com resultados obtidos em tamanho real.

Palavras-chave: acústica de salas, modelos em escala, absorção sonora.

### **ABSTRACT**

The improvement of the acoustical characteristics from spaces is a topic studied, mainly the measured parameters that represent the sound energy distribution in the ambient. This paper shows constructive topics of a 1:5 scaled reverberation chamber and the problems found in scaled absorption coefficients measurements. The PVC diffusers installation carries unexpected values in the measurements in frequencies higher than 5000 Hz. After the substitution of these diffusers by metallic diffusers, new measurements for reverberation field validation were made. Measurements of sound absorption coefficients for scaled resonant bricks were made to show the equivalency of the measurements made in the real scale and the reduced scale.

Keywords: room acoustics, scale models, sound absorption.

# 1. INTRODUÇÃO

O aperfeiçoamento das características acústicas dos ambientes contemporâneos se faz cada vez mais presente diante das necessidades de espaços para múltiplo uso. Estas características são estudadas a partir de parâmetros mensuráveis e que representam a distribuição de energia sonora dentro do ambiente. Esta distribuição é dependente, em grande parte, das características acústicas das superfícies internas deste ambiente.

As características acústicas dos materiais podem ser determinadas a partir de medições em condições nas quais é possível conhecer o comportamento da distribuição de energia sonora. Uma destas condições é o campo difuso. O campo difuso ou reverberante é aquele em que as reflexões das ondas sonoras no ambiente influenciam diretamente as ondas emitidas pela fonte sonora. Com o aumento das reflexões das ondas sonoras em um campo reverberante, sem a presença considerável de ondas estacionárias, pode-se criar um campo uniforme em que o nível de pressão sonora não varia com a posição da fonte sonora ou do microfone (Santos, 2004).

Os campos difusos podem ser produzidos em ambientes especiais denominados câmaras reverberantes. As Câmaras Reverberantes são utilizadas para a determinação de algumas das principais características acústicas de materiais como a absorção sonora, isolamento sonora, difusão ou espalhamento. A instalação de uma Câmara Reverberante é um empreendimento oneroso devido às características físicas e construtivas exigidas. Uma alternativa é utilizar câmaras menores e trabalhar com as diferenças de escala entre elas, respeitando o limite geométrico imposto pelo fator de escala.

Quando um modelo em escala é confeccionado para realizar estudos acústicos, as frequências acústicas deste modelo são estudadas de acordo com a escala proposta (Nascimento e Zindeluk, 2005). Por exemplo, num modelo em escala 1:10 se a faixa de frequências a ser estudada for de 100 a 1000 Hz, as frequências a serem consideradas no modelo serão de 1000 a 10.000 Hz. O comportamento sonoro para altas frequências, acima de 10.000 Hz sofre influência da absorção do ar de acordo com a umidade relativa (Brüel&Kjaer, 1978). Na figura 1 são apresentados dois exemplos de câmaras em escala reduzida. A primeira é a câmara em escala 1:10 para realização de ensaios acústicos pertencente ao Laboratório de Acústica e Vibração da UFRJ e a segunda é uma câmara construída para ensaios descrita em catálogo do software DIRAC da Brüel & Kjaer.



Figura 1 – (a) Modelo em escala de câmara reverberante para medições em escala 1:10. Fonte: Nascimento, Rany, L. X.; (2005). “Medição dos coeficientes de absorção sonora de materiais utilizados em modelos reduzidos”. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. (b) câmara reverberante em acrílico para medições em escala reduzida. Fonte: <http://www.bksv.com/doc/bp1974.pdf>

Máquinas de prototipagem rápida são muito utilizadas para a confecção de modelos em escala (Netto et al., 2003). Com estas máquinas torna-se possível a visualização em três dimensões de projetos, de peças mecânicas, de próteses médicas (Souza, Centeno e Pedrini, 2003) e modelos construtivos. A prototipagem rápida permite trabalhar com extrema precisão nas peças confeccionadas a partir de desenhos em plataformas computacionais como o AutoCad da Autodesk Inc.

Medidas acústicas podem ser feitas em ambientes de escala reduzida de modo similar aos espaços reais, como por exemplo, a técnica de resposta impulsiva. A resposta impulsiva de um ambiente pode ser medida em modelos de escala reduzida, pois as propriedades físicas, e conseqüentemente as acústicas,

mantêm-se com o modelo desde que respeitada a escala de construção, os comprimentos de onda e as características acústicas dos materiais (Metha, Johnson e Rockaford, 1999). Com a medição da resposta impulsiva de uma sala obtém-se sua função transferência e desta os parâmetros correlacionados à distribuição de energia interna (Muller e Massarani, 2001).

Todos os cuidados e condições exigidas na construção de uma câmara reverberante em tamanho real devem ser considerados quando construída uma câmara reverberante em escala. As dimensões, o material utilizado e os transdutores para os ensaios devem respeitar o fator de escala e as características acústicas para a faixa de frequência compreendida nos ensaios a serem realizados.

É importante lembrar que numa escala de 1:n, todas as dimensões devem ser divididas pelo fator n, isto é, numa escala 1:10, por exemplo, a dimensão de 1,5 m é representada no modelo por uma distância de 0,15 m. A similaridade geométrica encontrada na escala adotada é empregada nas medidas geométricas e as relações representativas das dimensões no modelo em escala (Nascimento, 2005).

Santos e Bertoli (2008) construíram uma câmara reverberante em escala de 1:5 do Laboratório de Conforto da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Nesse trabalho são apresentados, além de alguns detalhes de projeto de construção daquela câmara, os problemas encontrados com o ajuste do campo reverberante para ensaios de determinação de absorção sonora de superfícies, as soluções encontradas e resultados de ensaios comparativos de validação realizados.

## 2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar tópicos construtivos e problemas encontrados em medições de modelos em escala 1:5, bem como suas soluções específicas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. Câmara reverberante

O ponto de partida do projeto da câmara é a escolha da escala. A escala escolhida para os ensaios foi a de 1:5, devido às faixas de captação de sinais dos microfones e de processamento dos sinais dos programas de medição a serem utilizados, que não poderiam ser superiores a 20 kHz. Outro motivo é que 20 kHz representa na escala da câmara a frequência de 4 kHz, que é a maior banda de medição de 1/3 de oitava considerada para expressar resultados dos parâmetros acústicos e, também segundo a ISO 3382:1997, ISO 354:2003 e ISO 17497:2004, a dos resultados de coeficientes de absorção e espalhamento de uma superfície.

A descrição detalhada do projeto e construção da câmara reverberante foi apresentada no artigo do VI Congresso Ibero Americano de Acústica de 2008, realizado em Buenos Aires (Santos e Bertoli, 2008). A figura 2 mostra a câmara em escala construída.

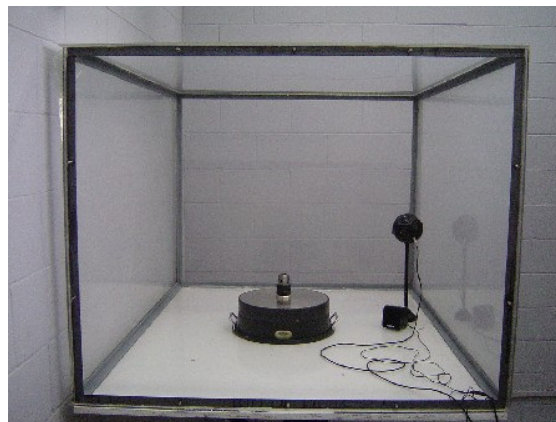


Figura 2 – Câmara reverberante em escala de 1:5 do Laboratório de Conforto da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

A câmara foi construída em acrílico devido ao seu baixo coeficiente de absorção sonora, (menor que 0,05), pelo seu fator de isolamento ( $R_w = 25$  dB, segundo a empresa especializada DAGOL, [http://www.dagol.com/pt/html/prod\\_dibond.html](http://www.dagol.com/pt/html/prod_dibond.html), acessado em 20/12/2008).

As dimensões internas adotadas no projeto da câmara foram de 1,20 m de largura ( $l_y$ ), 1,52 m de profundidade ( $l_x$ ) e 0,96 m de altura ( $l_z$ ), resultando nas relações de:  $l_y/l_x = 0,79$  e  $l_z/l_x = 0,63$  e dentro da recomendação da norma ISO 3741:1999. Com essas dimensões, o volume da câmara em escala fica sendo de  $1,75 \text{ m}^3$ , o que em escala real representaria uma câmara de  $218,9 \text{ m}^3$ .

A relação entre a frequência na escala real ( $f_r$ ) e a frequência do modelo em escala ( $f_m$ ) é determinada pela equação 1, onde  $n$  é o fator de escala. Nestas condições a faixa de frequência real de 500 a 20000 Hz, no modelo em escala corresponde à faixa de 100 Hz a 4000 Hz.

$$f_r = f_m / n \quad (1)$$

Para a isolamento de vibrações foram colocados coxins de borracha para desacoplar a base da câmara da estrutura de suporte. Medições foram realizadas para avaliar o isolamento destes coxins e os modos de vibração das paredes da câmara. Os resultados podem ser conferidos no artigo publicado por Santos e Bertoli (2008).

### 3.2. Fontes Sonoras

As fontes sonoras utilizadas para os ensaios devem permitir a reprodução satisfatória de sons na faixa de frequências de interesse. Para os ensaios a serem realizados na câmara foi necessário construir também uma fonte sonora omnidirecional em escala 1:5, com transdutores capazes de reproduzir sons em altas frequências.

O material utilizado para a fabricação da fonte foi uma placa de aglomerado de madeira. O formato utilizado para a manufatura da fonte foi o dodecaedro seguindo a distribuição espacial conseguida com a fonte sonora da marca Brüel & Kjaer em escala real. O material foi cortado em cortador Laser do Laboratório de Maquetes da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

O dodecaedro foi construído em duas partes, cada uma com seis alto-falantes o que facilita o acesso interno para a realização de uma futura manutenção. O alto-falante utilizado foi um *tweeter* da marca Bravox modelo Neo Tech 25 A, devido a sua resposta em frequência que vai de 4 kHz a 30 kHz. A figura 3 mostra a montagem dos *tweeters* no corpo do dodecaedro em escala e o aspecto final da fonte sonora.



(a)



(b)

Figura 3 – Montagem dos tweeters no corpo do dodecaedro em escala (a) e aspecto final do dodecaedro (b).

A direcionalidade da fonte sonora foi verificada por meio da medição da diretividade, com o auxílio da mesa giratória, a uma distância de 40 cm resultando no gráfico apresentado na figura 4.

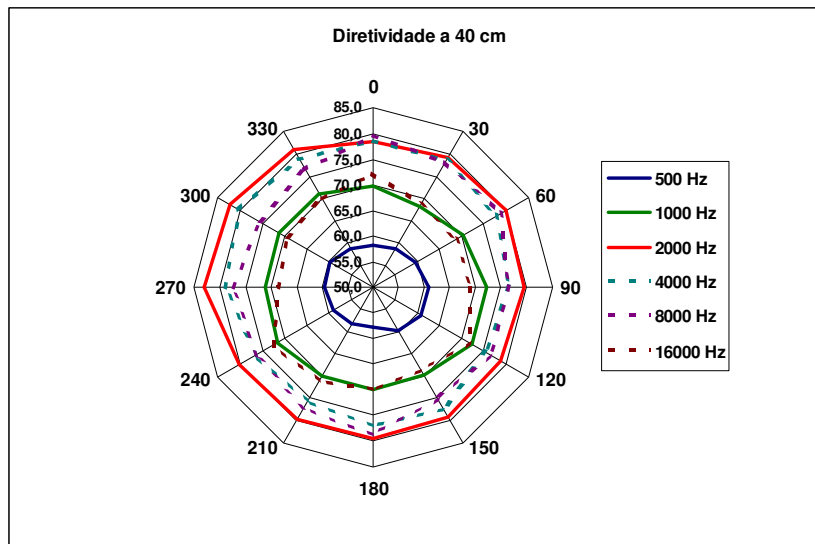


Figura 4 – Diretividade do dodecaedro para bandas de frequência de medição e níveis de pressão sonora no eixo y.

Para complementar a faixa de frequência necessária para os ensaios, considerando que os transdutores utilizados tem limitações abaixo de 4 kHz (em escala 800 Hz), foi acoplada uma pequena caixa acústica representando um reproduzidor de baixas frequências para a realização dos ensaios. O sistema pode ser visualizado na figura 5.



Figura 5 – Reprodutores sonoros utilizados nos ensaios.

O sinal utilizado para a reprodução necessita de uma pré-ênfase para que os níveis sejam equivalentes em amplitude para todas as frequências. Para separar as frequências dos reprodutores e realizar a pré-ênfase do sinal foi utilizado um equalizador (figura 6).

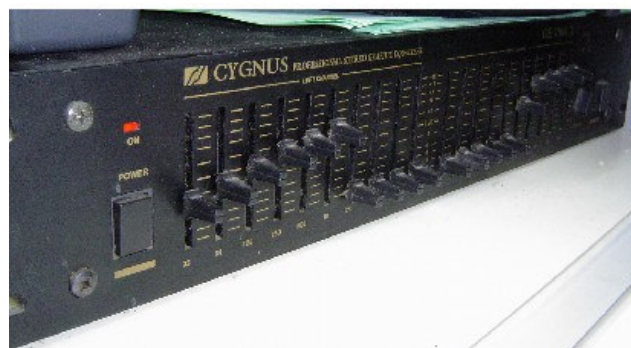


Figura 6 – Equalizador gráfico utilizado para separar os sinais dos reprodutores e equalizar o sinal de saída.

### 3.3. Método de medição e absorção sonora em altas frequências

Para a determinação dos coeficientes de absorção e de espalhamento é necessário realizar medições de Tempo de Reverberação (TR). Para as medidas de TR foi utilizado o programa computacional para avaliação acústica de salas DIRAC da Brüel & Kjaer. Com o programa DIRAC é possível obter a resposta impulsiva de um ambiente usando diferentes tipos de sinais de excitação (MLS, varredura de senos ou sinal externo).

Os ensaios foram realizados utilizando uma varredura linear de senos. Para as medições foram escolhidas três posições de fonte e seis posições de microfone, perfazendo um total de 18 pontos de medição. A cadeia de medição utilizada está especificada na figura 7.



Figura 7 – Aparelhagem da cadeia de medição Fonte: <http://www.gras.com>.

Como descrito anteriormente, a absorção sonora do ar influencia fortemente as medições de parâmetros acústicos em escala. Gráficos com coeficientes de atenuação do som no ar, dependendo da temperatura e umidade relativa foram elaborados por Harris (1966). O software DIRAC possui um módulo para tratamento de medições em escala que implementam as correções de atenuação pelo ar.

### 3.4. Difusores

A câmara precisa produzir um campo difuso que deve ser ajustado pela inserção de difusores. O procedimento utilizado para a colocação de difusores é descrito na norma ISO 354:2003. Consiste na comparação do valor medido com valor conhecido do coeficiente de absorção de um material. O coeficiente de absorção é calculado com os resultados dos Tempos de Reverberação da câmara medidos com e sem o material. Caso os resultados da determinação do coeficiente de absorção sonora sejam diferentes dos resultados esperados, deve-se acrescentar uma certa quantidade de difusores na câmara, afim de modificar o seu campo reverberante até que os resultados das determinações de coeficiente de absorção sonora fiquem o mais próximo possível do coeficiente conhecido do material.

Conforme apresentado por Santos e Bertoli (2008) foram instalados difusores construídos a partir de tubos de PVC com 40 mm de diâmetro. Ensaio realizados em escala mostraram que para frequências acima de 5000 Hz os difusores de PVC influenciavam os resultados. Por este motivo os difusores foram trocados por difusores metálicos. A disposição final dos difusores metálicos implementados na câmara pode ser observada na figura 8.



Figura 8 – Foto dos difusores metálicos dentro da câmara.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Substituição dos difusores

A comparação dos resultados do coeficiente de absorção do material, em função da frequência, obtidos na câmara reverberante, com e sem a presença dos difusores, é mostrado na figura 9. Por este comparativo, pode-se observar a deficiência apresentada pelos difusores de PVC, representados na linha verde, para frequências acima de 5000 Hz.

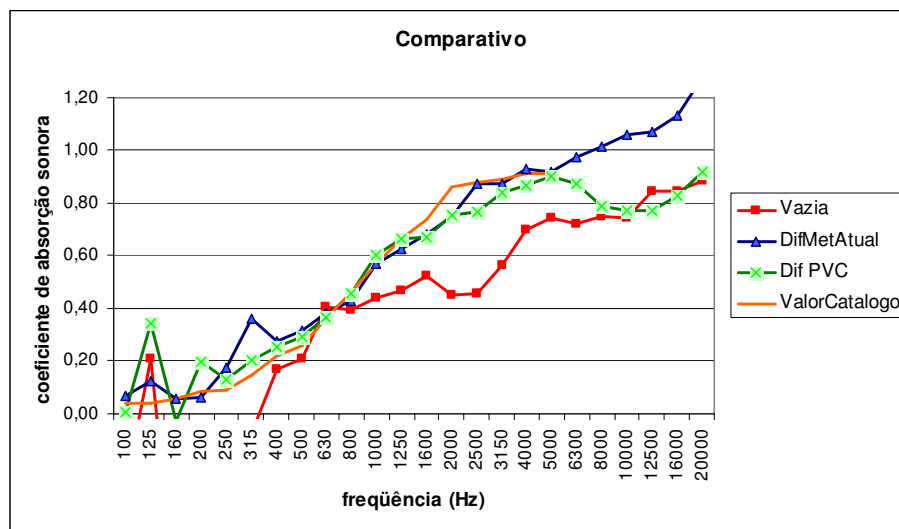


Figura 9 – Gráfico comparativo dos resultados da determinação do coeficiente de absorção sonora com difusores, sem difusores e valores de catálogo do material medido para todo o espectro de frequência de medição.

Observando a linha laranja, que corresponde ao valor de catálogo do material ensaiado, a tendência da curva era de que esta alcançasse valores próximos a 1,00. A adequação anterior e os resultados apresentados por Santos e Bertoli (2008), não compreendiam as frequências acima de 5000 Hz por não haver valores de catálogo, mas tendências de comportamento poderiam ser observadas por se tratar de uma espuma porosa. O mesmo comportamento aconteceu com outros materiais ensaiados, como um forro mineral, onde os valores poderiam ser comparados para frequências de 500 Hz, devido à frequência de corte da câmara, até 5000 Hz, frequência máxima encontrada no catálogo do produto.

Com a colocação dos difusores metálicos foi possível observar, pela curva azul demarcada por triângulos na figura 9, uma aproximação maior da curva dos valores de catálogo e a tendência de alcançar valores próximos a 1,00 em altas frequências.

Esta adequação foi importante, pois com o trabalho em escala, as frequências a serem analisadas de 5000 a 20000 Hz representam valores de 1000 a 4000 Hz nos modelos reais, que é uma faixa que define boa parte das características dos materiais.

#### 4.2. Ensaios de amostra em escala

Um dos primeiros ensaios realizados na câmara para a determinação de coeficiente de absorção de materiais foi o ensaio de absorção sonora dos tijolos construídos em escala 1:5 para os pesquisadores da Universidade Estadual de Maringá. Os tijolos foram criados para funcionarem como ressonadores em baixa frequência (Lisot e Soares 2008). O detalhe de um dos tijolos e a área de tijolos usada nos ensaios podem ser observados na figura 10.

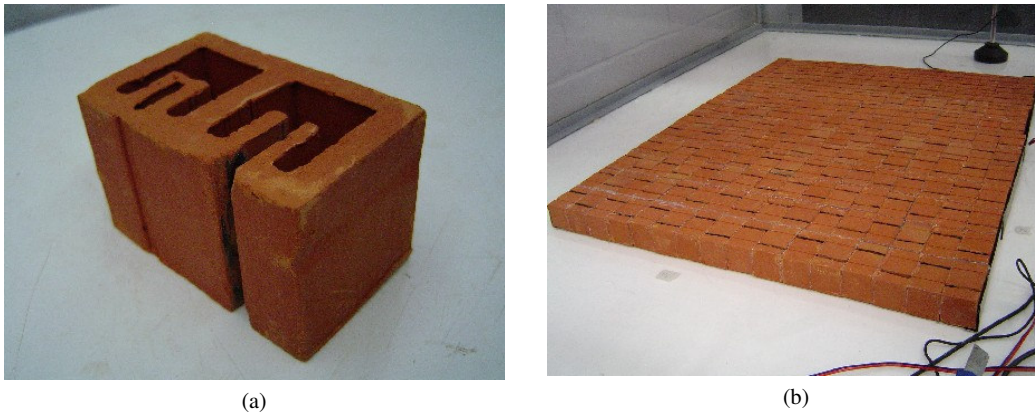


Figura 10 – (a) Tijolo sintonizado (ressonador); (b) Arranjo para ensaio de absorção na câmara em escala.

O coeficiente de absorção dos tijolos em escala real também foi medido. Os resultados dos ensaios de determinação do coeficiente de absorção sonora dos tijolos em escala 1:5 comparados com os ensaios realizados em escala real são apresentados no gráfico da figura 11. Os ensaios em escala foram realizados considerando as correções necessárias de temperatura e umidade medidos no momento do ensaio. Esta correção se torna necessária para que os resultados representem resultados obtidos em escala real.

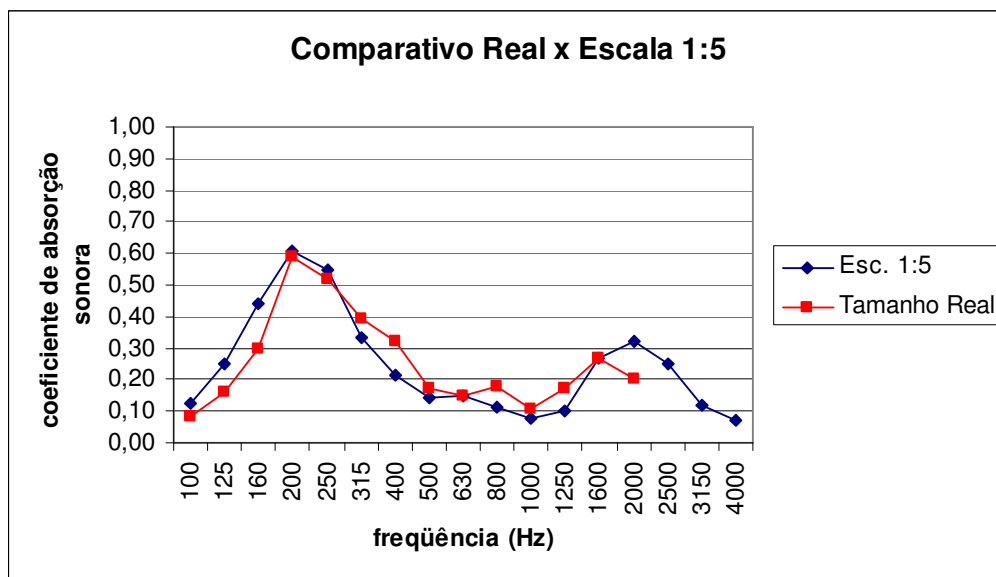


Figura 11 – Comparativo de determinação do coeficiente de absorção sonora de tijolo sintonizado em tamanho real e em escala 1:5.



Pode-se observar o mesmo comportamento do coeficiente de absorção em função da frequência nos resultados dos modelos em escala e no modelo real, inclusive com relação ao alto valor de absorção na frequência de ressonância de 200 Hz.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que é preciso critério na escolha da escala e dimensões na construção de uma câmara reverberante em escala. Demonstrou também que são necessários ajustes para a resolução de problemas encontrados na realização de ensaios de absorção em escala, como o ajuste do campo difuso, a influência da umidade e temperatura na absorção do ar principalmente nas altas frequências. A caracterização da diretividade da fonte sonora também é um fator importante.

A equivalência de características acústicas de materiais construídos em tamanho real e em escala mostrou-se verdadeira com os resultados apresentados. Essa constatação permitirá reduzir custos no desenvolvimento de novos materiais de absorção, pois representa menor quantidade de material a ser produzido.

Não apenas para absorção sonora, mas ensaios investigativos para determinação de coeficiente de espalhamento poderão ser realizados na câmara descrita, a fim de possibilitar a elaboração de tabelas de coeficientes de espalhamento de diferentes materiais. O coeficiente de espalhamento é um parâmetro requerido em programas de simulação computacional de ambientes e pouco conhecido.

## 6. REFERÊNCIAS

- BRÜEL & Kjaer , **Dirac Application Notes**, disponível em: <[www.bksv.com/doc/bp1974.pdf](http://www.bksv.com/doc/bp1974.pdf)>. Acessado em Jan 2009.
- BRÜEL & Kjaer. **Application of B&K equipment to acoustic noise measurements**, Denmark ed: Brüel&Kjaer., 3rd ed. ISBN: 87 87355 16 7, 1978.
- DAGOL, **Características do acrílico**, [http://www.dagol.com/pt/html/prod\\_dibond.html](http://www.dagol.com/pt/html/prod_dibond.html), acessado em dez. 2008
- G.R.A.S. **Measurement Card of Instruments**. Disponível em: <[www.gras.com](http://www.gras.com)>. Acesso em: jun. 2008.
- HARRIS, Cyril M. Absorption of sound in air versus humidity and temperature. **Journal of the Acoustical Society of America**. Vol.1.No.1. 1966.
- ISO - International Organization for Standardization **ISO 17497-1**: Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, Geneve, 2004,
- ISO - International Organization for Standardization **ISO 3382**: Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, Geneve, 1997,
- ISO - International Organization for Standardization **ISO 354**: Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room, Geneve, 1985
- ISO - International Organization for Standardization **ISO 3741** Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision method for reverberations rooms, Geneve, 1999.
- ISO - International Organization for Standardization **ISO 3743** Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Engineering method for small, movable sources in reverberant fields – Part 2: Methods for special reverberation test rooms Geneve, 1994.
- METHA, M., JOHNSON, J., ROCKAFORD, J.; **Architectural Acoustics Principles and Design**, Prentice-Hall Inc, ISBN:0-13-793795-4. , 1999
- MÜLLER, Sven.; MASSARANI, Paulo. Transfer-Function Measurements with Sweeps. **Journal of Audio Engineering Society**, vol. 49 (6), p. 443-471,2001.
- NASCIMENTO, Rany L. X. **Medição dos coeficientes de absorção sonora de materiais utilizados em modelos reduzidos**. Tese de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005..
- NASCIMENTO, Rany 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..
- NETTO, A. C. S., OGLIARI, A., BEAL, V. E., AHRENS, C.A.; Prototipagem rápida: uma ferramenta de projeto para a redução do tempo de desenvolvimento e melhoria de qualidade de produtos. **Anais....** IV Congresso Brasileiro de Gestão e Desenvolvimento de Produtos, Gramado RS Brasil, 2003.
- SANTOS, Christian, BERTOLI, Stelamaris R.; Construção de câmara reverberante em escala para realização de ensaios acústicos. Congresso Iberoamericano de Acústica . **Proceedings** - FIA 2008. Nov. 2008.
- SANTOS, Christian. **Investigação dos métodos de determinação de potencia sonora visando programas para etiquetagem de furadeiras elétricas de uso doméstico**. Dissertação Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil FEC/UNICAMP, Campinas, 2004.
- SOUZA, M. A., CENTENO, T. M., PEDRINI, H., Integrando reconstrução 3D de imagens tomográficas e prototipagem rápida para a fabricação de modelos médicos, **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, Vol 19, n. 2, p. 103-115,. ISSN 1517 3151. 2003