



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A122

## **Construção de câmara reverberante em escala para realização de ensaios acústicos**

Christian dos Santos <sup>(a)</sup>,  
Stelamaris R. Beroli <sup>(a)</sup>.

(a) Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo. Av. Albert Einstein, 951 - Caixa Postal: 6021 - CEP: 13083-852 - Campinas – SP - Brasil

### **Abstract**

Enclosure acoustic parameters such as reverberation time (RT60), early decay time (EDT), clarity (C80) and definition (D50) that influence subjective parameters such as liveness, warmth, brilliance, intimacy, clarity and spatial impression, are important for acoustic characterization and they can be calculated in an initial project phase. Based on modelling scale techniques, it is possible to create a space model and determine its impulse response. The Impulse Response of this model is used to obtain their acoustic parameters, which represent, in scale, the acoustical parameters of the space in real size. A reverberant chamber in scale of 1:5 was made in Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas to put into practice acoustical measurements in scale. This work aimed to show the constructive details of this chamber and some absorption coefficient results of measurements that were made with known acoustic materials. These measurements were accomplished to validate the chamber's reverberation field to future measurements of random incidence scattering coefficient, according to ISO 17497:2004.

### **Resumo**

Os parâmetros acústicos de ambientes fechados como tempo de reverberação (TR60), tempo de decaimento inicial (EDT), clareza (C80) e definição (D50) que influenciam diretamente parâmetros subjetivos como vivacidade, calor, brilho, intimismo, clareza e impressão espacial, são importantes para a caracterização acústica de ambientes e podem ser calculados e previstos na fase de projeto destes ambientes. A partir de técnicas de modelagem em escala é possível criar um modelo de um ambiente e determinar sua Resposta Impulsiva. A Resposta Impulsiva deste modelo é utilizada para obter seus parâmetros acústicos, estes por sua vez representam, em escala, os parâmetros acústicos do ambiente em tamanho real. Uma câmara reverberante com escala de 1:5 foi construída na Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas para realizar ensaios acústicos em escala. O presente trabalho tem o objetivo de mostrar os detalhes da construção deste dispositivo e alguns resultados obtidos de medições de coeficiente de absorção sonora realizadas com materiais cujos coeficientes já são conhecidos. Estes ensaios foram realizados com o propósito de validar o campo reverberante da câmara para a posterior realização de ensaios para determinação do coeficiente de espalhamento segundo ISO 17497:2004.

## 1 Introdução

O estudo da ambientação acústica de salas é um tema muito abordado atualmente, considerando os espaços contemporâneos utilizados para transmissão, gravação e processamento de informações áudio visuais como teatros, salas de concerto, estúdios de gravação, estúdios de transmissão. Estes espaços são projetados levando em consideração sua aplicabilidade para diferentes tipos de uso, e uma vez projetados, estes espaços precisam ser viáveis economicamente (Metha, Johnson e Rockaford, 1999). Os parâmetros acústicos de ambientes fechados como tempo de reverberação (TR60), tempo de decaimento inicial (EDT), clareza (C80) e definição (D50), que influenciam diretamente parâmetros subjetivos como vivacidade, calor, brilho, intimismo, clareza e impressão espacial, são importantes para a caracterização acústica destes ambientes e podem ser calculados e previstos na fase de projeto destes ambientes.

Para a realização destes cálculos é necessário o conhecimento das características acústicas dos materiais que compõem suas superfícies internas. As características acústicas dos materiais são determinadas a partir do uso de ambientes especiais que propiciam um 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).

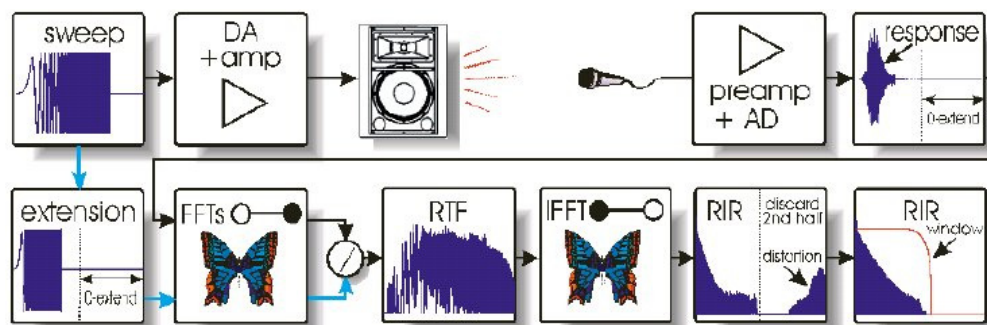
Salas especiais que possuem características físicas que propiciam um campo reverberante difuso são comumente chamadas de Câmaras Reverberantes. As Câmaras Reverberantes são utilizadas para determinação de algumas das principais características acústicas de materiais como a absorção sonora e difusidade ou espalhamento. Porém a instalação de uma Câmara Reverberante é um empreendimento oneroso devido as características físicas e construtivas exigidas para o espaço. Uma alternativa é utilizar câmaras menores e trabalhar com as diferenças de escala entre elas, respeitando o limite geométrico imposto pelo fator de escala.

As câmaras reverberantes normalmente possuem paredes rígidas e a superfície interna altamente reflexiva, com coeficiente de absorção sonora menor que 0,06 (ISO 3741,1999) para a faixa de frequências de medição desejada. As paredes de grande parte das câmaras reverberantes não são paralelas evitando assim a ocorrência de ondas estacionárias. Schultz (1971) comentou que as paredes paralelas não auxiliam muito na difusidade da câmara, pois não aumentam a quantidade de modos. Waterhouse (1955) também evidenciou elementos que realizam a sobreposição das ondas sonoras dentro da câmara. Estes elementos são conhecidos como difusores. Os difusores causam uma interferência na propagação da onda acústica, obtida como se houvesse uma variação na geometria da câmara de ensaios. Lubman (1971) comentou positivamente sobre a influência de defletores móveis na interferência da propagação indicando a efetividade destes aparatos.

A frequência de corte inferior de uma câmara reverberante delimita a frequência mínima de medição. Esta frequência foi proposta por Schroeder (1962) e depende do volume e do tempo de reverberação da câmara. Esta correlação é apresentada nas normas de ensaio ISO 3741 (1999) e ISO 3743 (1994) como referência para construção de salas reverberantes especiais.

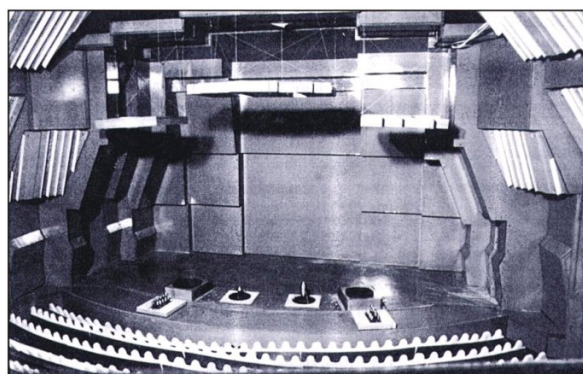
Os métodos utilizados para determinação das características acústicas de materiais como absorção sonora e difusão necessitam de medições de tempos de reverberação. Estas medições podem ser realizadas por dois métodos e estão descritos na norma ISO 3382:1997. São denominados de técnica de interrupção de ruído e técnica de integração da resposta impulsiva.

Com a medição da resposta impulsiva da sala obtém-se a função transferência da sala e a partir desta, os parâmetros correlacionados à distribuição de energia interna (MULLER e Massarani, 2001). A figura 1 descreve um dos arranjos necessários para realizar a medição da resposta impulsiva.



**Figura 1** – Deconvolução linear para a obtenção da resposta impulsiva por meio de varredura logarítmica. Fonte: Muller, S.; Massarani, P.: Transfer Function Measurements with Sweeps, Journal of Audio Engineering Society, Vol 49 (6), 2001, pp.443.

A resposta impulsiva pode ser medida em modelos de escala reduzida, o que auxilia a fase inicial de projeto dos espaços e pode ser utilizada para certos desenvolvimentos como medições de características acústicas de materiais. As propriedades físicas, e conseqüentemente as acústicas, mantêm-se com o modelo em escala desde que respeitada a escala de construção, bem como os comprimentos de onda e as características acústicas dos materiais (Metha, Johnson e Rockaford, 1999).



**Figura 4** – Modelo em escala do Segerstron Hall, Orange Conty Perform Art Center, Costa Mesa Califórnia. Fonte: M, Metha; 1999.4

As técnicas de modelagem acústicas deparam com um certo cuidado com relação à escala de um modelo, como descrito por Nascimento (2005). Quando um modelo é confeccionado para realizar estudos acústicos, as freqüências acústicas deste modelo são estudadas de acordo com a escala do modelo. Por exemplo, num modelo 1:10, se a faixa de freqüências estudada for de 100 a 1000 Hz, as freqüências a serem consideradas no modelo serão de 1000 a 10.000 Hz. As altas freqüências, acima de 10.000 Hz sofrem absorção do ar de acordo com a umidade relativa (Brüel&Kjaer, 1978).

Esse trabalho descreve as considerações e as etapas de avaliação utilizadas na construção de uma câmara reverberante em escala (1:5) para realização de ensaios acústicos de materiais na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A câmara foi projetada para realização de ensaios não apenas de absorção sonora, mas também de coeficiente de espalhamento de superfícies.

## 2 Detalhes Construtivos da Câmara em Escala

### 2.1 Escala escolhida e dimensões

O primeiro passo para a construção de uma câmara em escala é definir a escala a ser utilizada. Segundo Nascimento (2005), a similaridade geométrica encontrada na escala adotada é empregada nas medidas geométricas e as relações representativas das dimensões da câmara em escala. Numa escala de 1:n, todas as dimensões devem ser divididas pelo fator n, assim numa escala 1:10, por exemplo, uma dimensão de 1,5m é representada no modelo por uma distância de 0,15 m.

No caso desse projeto de câmara, a escala escolhida para os ensaios foi a de 1:5. Esta escolha baseou-se na faixa de captação de sinais dos microfones, na faixa de processamento dos sinais dos programas de medição a serem utilizados e que não poderiam ser superior a 20 kHz. Outro motivo é que 20kHz representa nessa escala 4kHz, sendo a maior banda de medição de 1/3 de oitava considerada para expressar resultados dos parâmetros acústicos e, segundo a ISO 3382:1997, ISO 354:1985 e ISO17497:2004, e os coeficientes de absorção e espalhamento de uma superfície.

Segundo a norma de determinação de potência sonora ISO 3741:1994, a câmara reverberante exige frequências mínimas de medição, e a norma ISO 354:1985 recomenda para o volume de uma câmara reverberante em escala real próximo a 200 m<sup>3</sup>. A norma ISO 3741:1994 também indica que as dimensões da câmara ( $l_x$ ,  $l_y$  e  $l_z$  devem, preferencialmente, satisfazer algumas relações e que são apresentadas na tabela 2.1.

**Tabela 2.1** - Relações entre dimensões ( $l_x$ ,  $l_y$  e  $l_z$  para uma sala retangular, segundo a norma ISO 3741:1994.

$l_y / l_x$	$l_z / l_x$
0,83	0,47
0,83	0,65
0,79	0,63
0,68	0,42
0,70	0,59

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  $l_z/l_x = 0,63$ . A partir destas dimensões, o volume da câmara em escala fica sendo de 1,75 m<sup>3</sup> o que em escala real representaria uma câmara de 218,9 m<sup>3</sup>.

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.

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

Nestas condições a faixa de frequência real de 500 a 20000 Hz, no modelo em escala corresponde a faixa de 100 Hz a 4000 Hz.

## 2.2 Material utilizado e detalhes de montagem

Considerando as recomendações para câmaras reverberantes contidas na norma ISO 3741:1994, as paredes da câmara reverberante devem ter um coeficiente de absorção menor que 0,06. Para a construção da câmara em escala, as paredes escolhidas foram placas de acrílico de 5 mm de espessura acrílico. .

O acrílico foi escolhido não apenas pelo seu baixo coeficiente de absorção sonora, (menor que 0,05) , mas também pela transparência e possibilidade de visualização de eventos internos à câmara e pelo seu fator de isolamento ( $R_w =$  de 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 16/09/2007).

A proposta inicial foi utilizar placas de acrílico apoiadas e coladas umas sobre as outras para formar um paralelepípedo. A resistência à flambagem das placas trouxe algumas dúvidas construtivas e exigiu a fabricação de uma estrutura metálica para auxiliar a construção da câmara. A figura 3 mostra a estrutura metálica da câmara e as placas coladas na estrutura construída.



(a)



(b)

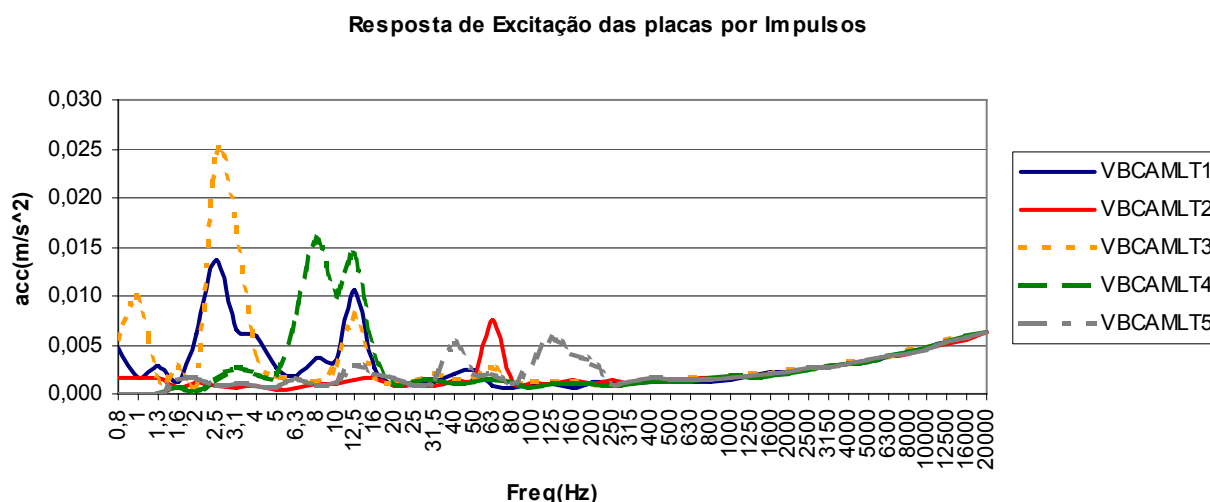
**Figura 3** – a: estrutura metálica da câmara reverberante em escala utilizada como reforço estrutural. b: placas de acrílico coladas na estrutura formando as paredes da câmara.

As placas de acrílico foram coladas na estrutura metálica, externamente, de modo a encaixá-las para o faceamento das superfícies laterais das placas de acrílico, permitindo assim uma maior vedação a ruídos. A placa frontal foi furada e parafusos foram adaptados na flange de contato para que esta pudesse ser fixada. Na flange de contato com a placa frontal foi colocada uma borracha para realizar vedação entre a placa e a flange.

## 2.3 Isolação de vibração da câmara

A câmara em escala foi montada sobre uma mesa adaptada para suportar seu peso total, estimado em 82 Kg. O acoplamento da mesa com seu tampo foi realizado com coxins de borracha para quatro pontos de apoio.

A determinação dos modos de vibração das paredes da câmara foi feita para cada uma das placas de acrílico por meio de uma excitação dos modos de ressonância a partir de um impacto. Cuidados foram tomados para que não houvesse uma diferença muito grande na amplitude dos impactos dados. As médias calculadas da aceleração foram de três medições de impacto para cada placa de acrílico e os resultados estão mostrados na figura 4 para cada placa.



**Figura 4** – Resposta de excitação a impacto das placas que formam a câmara reverberante em escala.

Para a legenda da figura 1 tem-se:

- VBCAMLT1 – Lateral direita da câmara (observada à frente da câmara)
- VBCAMLT2 – Lateral traseira da câmara (oposta à placa removível frontal)
- VBCAMLT3 – Lateral esquerda da câmara (observada à frente da câmara)
- VBCAMLT4 – Teto da câmara
- VBCAMLT5 – Lateral de acesso, ou porta frontal da câmara.

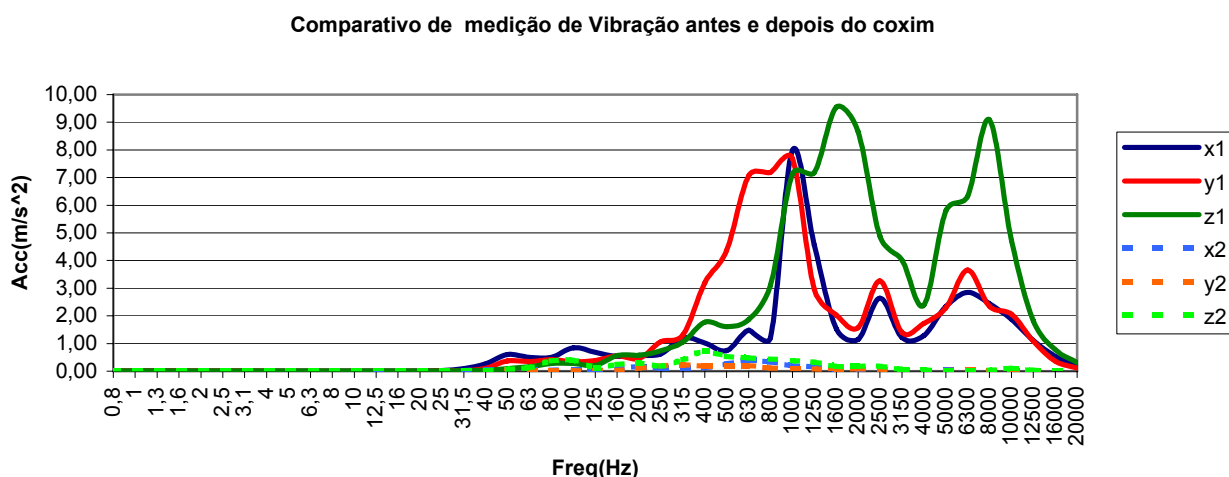
Para verificar a isolamento dos coxins utilizados para o desacoplamento da câmara à estrutura de apoio, foi utilizada uma fonte de vibração e esta foi fixada à estrutura de apoio da mesa. A fonte escolhida uma furadeira do tipo “hobby” ligada para operar na função de alto impacto, gerando assim mais vibração. A Figura 5 mostra o acoplamento da fonte de vibração na estrutura de apoio.



**Figura 5.** Acoplamento da fonte de vibração (furadeira) na estrutura de apoio.

As medições de vibração foram realizadas para um período de observação de 60 segundos e os resultados das medições, antes e depois do coxim estão mostrados na figura 6.

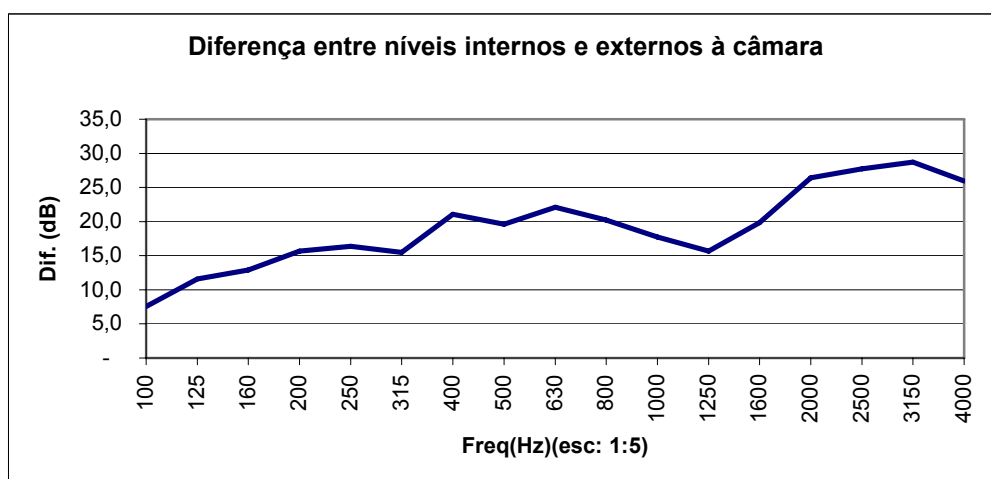




**Figura 6.** Medição de vibração realizada com fonte fixada na estrutura de apoio antes (curvas pontilhadas) e depois (curvas contínuas) do coxim de desacoplamento.

## 2.4 Isolação Sonora Aerea

Para a avaliação do isolamento sonoro aéreo das paredes da câmara foi calculado a diferença de nível de pressão sonora entre o lado interno e o lado externo das paredes, considerando uma fonte sonora em um dos lados. Como fonte foi considerado um dodecaedro emitindo ruído branco do lado externo da câmara. Foram feitas três medições para caracterização da média espacial do nível de pressão sonora do lado externo e interno da câmara em escala. As medições foram realizadas simultaneamente. Para a faixa de frequência de interesse das medições em escala, tem-se o gráfico da figura 7 mostra os resultados das diferenças de níveis de pressão sonora.



**Figura 7 -** Resultados da diferença calculada de medições de Nível de Pressão sonora interna e externamente à cabine em escala para as frequências de interesse do modelo em escala 1:5.

Na figura 7 os valores obtidos foram calculados para as frequências de bandas de terço de oitavas de 500 a 20000 Hz, o que na escala 1:5 é representado pelas frequências de 100 e 4000 Hz, respectivamente. A partir destes valores foi calculado o valor de STC para as paredes da Câmara em escala e o resultado encontrado foi **STC = 19**.

## 2.5 Difusores

As câmaras reverberantes em geral exigem difusores para promover um campo difuso uniforme. O procedimento utilizado para a colocação de difusores é descrito na norma ISO 354:1985. Este procedimento consiste em medições dos Tempos de Reverberação da câmara com e sem um material que tenha seu coeficiente de absorção conhecido. Caso os resultados da determinação do coeficiente absorção sonora diferentes dos resultados esperados, deve-se acrescentar uma certa quantidade de difusores afim de modificar o campo reverberante da câmara até que os resultados das medidas do Tempo de Reverberação fornecem os valores corretos para o coeficiente de absorção sonora.

Os difusores utilizados foram obtidos a partir do seccionamento de um tudo de PVC com 40 mm de diâmetro. A figura 8 mostra o posicionamento dos difusores dentro da Câmara.



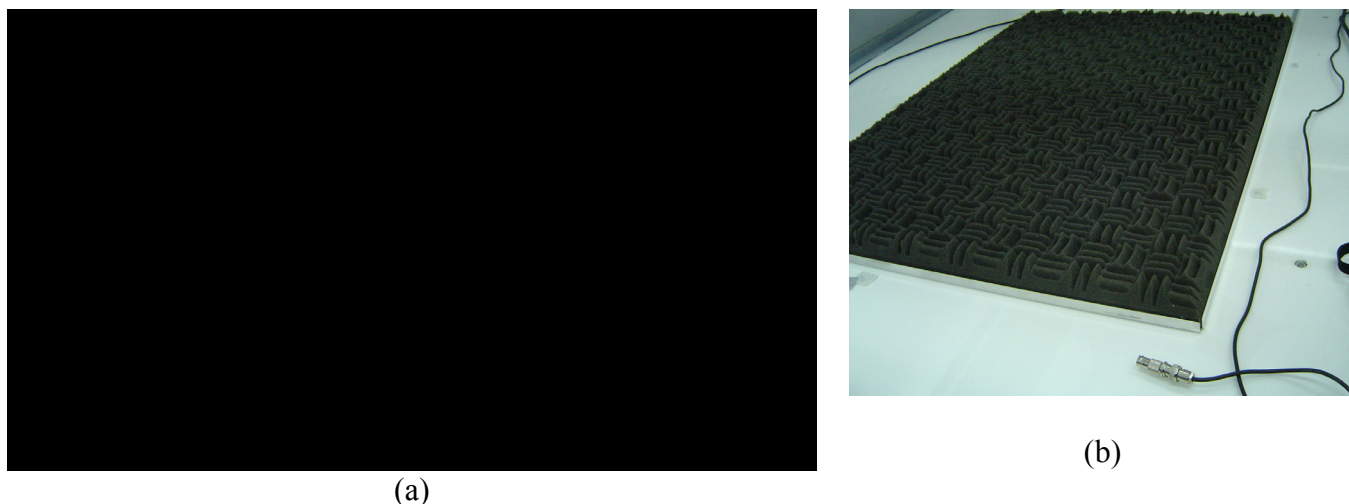
**Figura 8** – Posicionamento dos difusores na câmara reverberante em escala.

## 2.6 Validação do campo reverberante da câmara em escala.

Conforme procedimento descrito na ISO 354:1985, foram feitas medições de tempo de reverberação (TR60) para determinação do coeficiente de absorção sonora de um material que possui coeficiente conhecido. A partir destas medições foram colocados os difusores e repetidas as medições de TR60. Para as medidas de TR60 foi utilizado o método de resposta impulsiva. O sistema de medição do tempo de reverberação é composto de uma fonte sonora, amplificador, gerador de sinal. O software de avaliação acústica de salas, DIRAC da Brüel & Kjaer foi utilizado para a determinação do tempo de reverberação. O procedimento de medição de TR60 foi composto por medições para três posições de fonte sonora e seis posições de microfone, perfazendo um total de 18 arranjos de fonte-microfone.

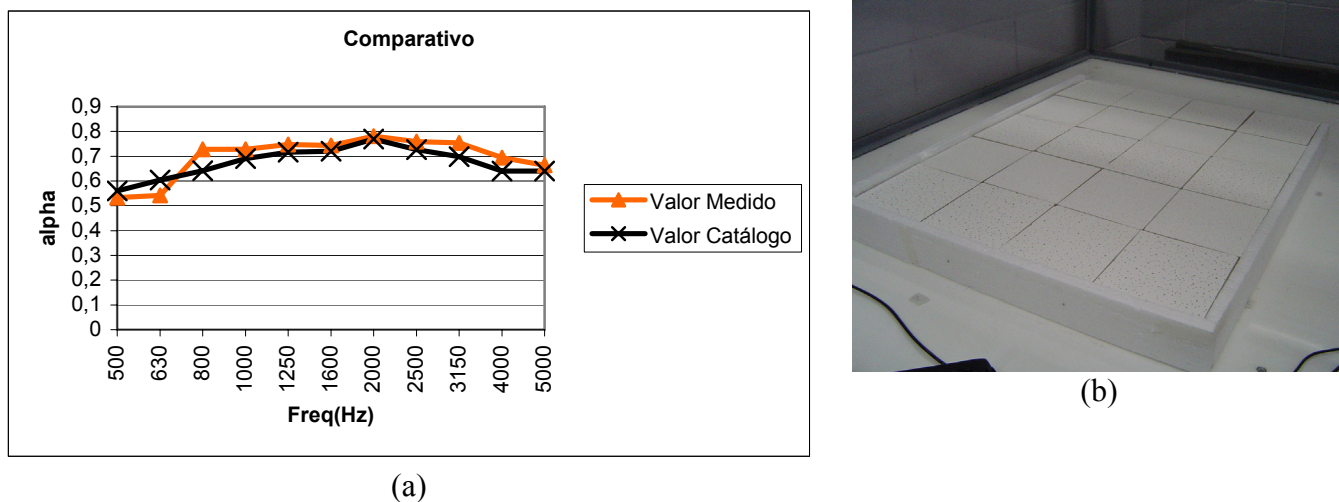
Os resultados dos coeficientes de absorção do material escolhido medidos com e sem difusores na câmara, os valores do coeficiente de absorção de catálogo do material, bem como uma foto do material instalado no interior da câmara estão apresentados na figura 9.





**Figura 9.** a: Gráfico comparativo dos resultados da determinação do coeficiente de absorção sonora com difusores, sem difusores e valores de catálogo do material medido. b: foto do material medido dentro da câmara.

Para comprovar a validação do campo acústico da câmara em escala, depois de instalados os difusores, realizou-se novo ensaio para a determinação do coeficiente de absorção sonora de outro material acústico de desempenho conhecido. Desta vez foi montado no piso da camara um forro mineral de acordo com especificações do fabricante e realizada a medição para determinação do coeficiente de absorção sonora. O resultado da comparação do coeficiente de absorção sonora do material medido e catalogado é apresentado na figura 10.



**Figura 10.** a: Gráfico comparativo dos resultados da determinação do coeficiente de absorção sonora de valores medidos e de catálogo do material. b: foto do material medido dentro da câmara.

### 3 Discussão dos Resultados e Conclusões

A Câmara reverberante em escala construída mostrou desempenho satisfatórios para as frequências apresentadas. Deve-se lembrar que as bandas de 1/3 de oitava apresentadas nos resultados de determinação de coeficiente de absorção sonora correspondem a valores reais, sem a aplicação do fator de escala. Os valores obtidos nos catálogos dos fabricantes possuem

uma frequência máxima, para banda de terço de oitava, de 5000 Hz. Por esse motivo os gráficos comparativos foram mostrados de 500 Hz (frequência mínima de medição) até 5000 Hz (frequência máxima obtida em catálogo do fabricante).

Os valores acima de 5000 Hz foram medidos, mas um comparativo com materiais em toda a faixa de frequência de medição disponível no aparato de ensaio só seria possível se houvesse um material similar, não apenas geométricamente mas em densidade e porosidade que pudesse proporcionar o mesmo efeito acústico que um material com suas características acústicas conhecidas.

Pretende-se, como continuidade do trabalho, realizar medições de coeficiente de absorção sonora em tijolos produzidos em escala de 1:5 e comparar seus resultados com valores obtidos em ensaio de câmara reverberante em tamanho real. Espera-se também em breve implementar ensaios de determinação do coeficiente de espalhamento de superfícies segundo ISO 17497:2004, cujo procedimento permite a determinação de coeficiente de espalhamento utilizando câmaras reverberantes em escala.

## Referencias

- Santos, Christian. (2004). “Investigação dos metodos de determinação de potencia sonora visando programas para etiquetagem de furadeiras eletricas de uso domestico”. Tese de Mestrado, FEC/UNICAMP, Campinas, Brasil.
- 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.
- Lubman, David. (1971) “Spatial averaging in sound power measurements”, Journal of Sound and Vibration. Vol. 16, p. 43-58,.
- Metha, M.; Johnson, J.; Rockaford, J. (1999). “Architectural Acoustics Principles and Design”, Prentice-Hall Inc, ISBN:0-13-793795-4
- Brüel & Kjaer. (1978) “Aplicação de B&K equipment to acoustic noise measurements”, Denmark ed: Brüel&Kjaer,. 3rd ed. ISBN: 87 87355 16 7
- Schultz, Theodore.J.(1971).“Difusion in reverberation rooms”, Journal of Sound and Vibration.Vol.16, p. 17-28,.
- Waterhouse, Richard.V. (1955) “Interference Patterns in reverberant sound fields”,The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 27, n.2, p. 247–258.
- Schroeder, Manfred. R. (1962) “Frequency-Correlation Functions of Frequency Responses in Rooms”, The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 34, n.12, p. 1819-1825,.
- Müller, Sven.; Massarani, Paulo., (2001). “Transfer-Function Measurements with Sweeps”, Journal of Audio Engineering Society, vol. 49 (6), p. 443-471.
- DAGOL, “Características do acrílico”, [http://www.dagol.com/pt/html/prod\\_dibond.html](http://www.dagol.com/pt/html/prod_dibond.html), acessado em 16/09/2007.
- ISO 3741:1999, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision method for reverberations rooms..
- ISO 3743:1994- 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.Switzerland.
- ISO 3382:1997, Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- ISO 354: 1985, Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- ISO 17497-1:2004, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.