

## A Performance do Isolamento Sonoro em Alvenaria de Tijolo Maciço Cerâmico

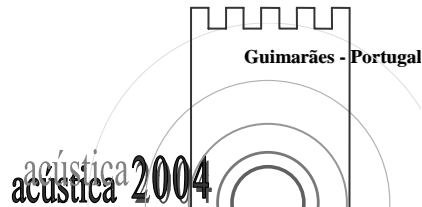
D. X. da Paixão<sup>a</sup>, S. N. Y. Gerges<sup>b</sup>, J.A. Sales<sup>b</sup> and E. Cerqueira F<sup>o</sup> <sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Laboratório de Acústica, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Av Roraima s/n – Campus/Camobi-Santa Maria –RS – BRASIL – CEP 97105-900, Telefone: (55)220-8144 – [dinaraxp@yahoo.com.br](mailto:dinaraxp@yahoo.com.br)*

<sup>b</sup> *Laboratório de Ruído Industrial/EMC/CT, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC – BRASIL – Telefone: (48)331-9227 – [gerges@mbox1.ufsc.br](mailto:gerges@mbox1.ufsc.br)*

**RESUMO:** O artigo refere-se a uma pesquisa teórico-experimental, de natureza aplicada, que executou atividades bibliográficas, analíticas, numéricas e experimentais, estudando o isolamento acústico de uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos. Discute a adaptação das teorias utilizadas, demonstrando que os conhecimentos teóricos, em geral desenvolvidos para placas finas, necessitam ajustes na área de edificações, onde os materiais, geralmente, comportam-se como placas espessas. Demonstra que a Lei da Massa e a equação da Perda de Transmissão de campo, por exemplo, resultam de simplificações, não podendo ser aplicadas, indiscriminadamente, em edificações. Cálculos analíticos localizaram os primeiros modos de ressonância e a frequência crítica de coincidência para a parede. Esses resultados foram comparados com os experimentais e numéricos. Observou-se, na curva experimental, o vale devido as ressonâncias de espessura das ondas “p”. A frequência crítica de coincidência para uma parede de alvenaria localiza-se em faixas de baixas frequências, por isso foi analisada a contribuição da resposta ressonante da parede, onde a Perda de Transmissão não é determinada pela Lei da Massa, mas pela rigidez e amortecimento. É proposta uma adaptação na figura popularmente divulgada para o isolamento em paredes simples, tornando-a mais específica para as paredes espessas empregadas nas edificações.

**ABSTRACT:** The article refers a theoretical-experimental research that performed bibliographical, analytic, numerical and experimental activities, studying the acoustic isolation of a ceramic solid bricks masonry wall. It discusses the adaptation of the theories utilized, showing that the theoretical knowledge, in general developed for thin plates, needs adjusting in the area of buildings material. It shows that the Mass Law and the equation from the Field-incidence Transmission Loss results from simplifications, not being able to be always applied in buildings. Analytic calculations located the first modes of resonance and the critical frequency in the wall. Those results were compared with the experimental and numerical results. It observed, in the experimental curve, a valley due the wall’s resonance that happened due the waves “p” relative to the wall’s thickness. The critical frequency coincidence for a wall of masonry locates-itself in the low frequency bands, by that it analyzed the contribution from the resonant response from the wall, where the transmission loss is not determined by the Mass Law, but by the stiffness and damping. It proposed an adaptation in the figure popularly used for the isolation in simple walls, becoming more specific for the thick walls used in buildings.



## 1. INTRODUÇÃO

A melhoria na qualidade de vida das pessoas depende, entre outros fatores, de níveis sonoros mais adequados à sua natureza física e psico-emocional. É importante, por isso, que os locais disponíveis para suas atividades de descanso, trabalho ou lazer sejam acusticamente cuidados. A qualidade do projeto de uma edificação está ligada à redução de ruído e vibrações, que é um problema complexo, pois as fontes geradoras são múltiplas e o som transmite-se através do ar e das estruturas.

O presente estudo visa auxiliar, disponibilizando informações detalhadas sobre o isolamento acústico de uma parede de alvenaria, executada com tijolos maciços cerâmicos. Trata-se de um material e método construtivo popularmente empregado em algumas regiões do Brasil. Apesar disso, detectou-se a inexistência de referências sobre as características desse tipo de alvenaria e seus componentes.

Busca-se, também, ampliar a divulgação das peculiaridades que envolvem a análise do isolamento acústico nas edificações, tendo em vista que a maioria dos estudos teóricos realizados na área de acústica referem-se a “placas finas”, que permitem simplificações e apresentam respostas diferentes das “placas espessas” encontradas nas edificações.

Os aspectos teóricos, experimentais e numéricos abordados são relativos a uma parcela do estudo realizado em [1], onde podem ser detalhadamente observados.

## 2. ASPECTOS ESTUDADOS

A análise da performance do isolamento sonoro em alvenaria de tijolo maciço cerâmico foi realizada através da construção, entre Câmaras Acústicas Reverberantes, de uma parede de 4,10 metros de largura por 3,20 metros de altura. As referidas Câmaras pertencem ao Laboratório de Acústica da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM - e obedecem a Norma ISO 140.

Além dos ensaios de Perda de Transmissão Sonora, foram realizados cálculos teóricos e simulações numéricas, a fim de que os resultados e conclusões fossem comparados e comprovados. Definiram-se os parâmetros físico-mecânicos da parede de alvenaria, para a implementação dos cálculos e simulações.

### 2.1 Aspectos Teóricos e Analíticos

A ortotropia das paredes das edificações tem sido detectada por pesquisadores da área de acústica[2] e [3], que trabalham com alvenarias diversas. Entre suas conclusões destacam-se as diferenças observadas nas medições de velocidade das ondas longitudinal e de flexão.

O isolamento para uma parede simples depende, entre outros fatores, do espectro do ruído, importante na escolha do material, sob o ponto de vista dos mecanismos de controle (rigidez, ressonância, massa e coincidência). É interessante lembrar que a propagação das ondas sonoras no ar é apenas longitudinal, mas na estrutura existem, também, ondas de cisalhamento, torção e de flexão.

A Perda de Transmissão (PT) é calculada em função do Coeficiente de Transmissão Sonora ( $\alpha$ ). A Equação (1) mostra esse coeficiente para a transmissão entre três meios. [4]



$$\alpha_t = \frac{4\rho_3 c_3 \rho_1 c_1}{(\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1)^2 \cos^2 k_2 \ell + \left( \rho_2 c_2 + \frac{\rho_3 c_3 \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \right)^2 \sin^2 k_2 \ell} \quad (1)$$

Onde:  $\rho$  = densidade;  $\ell$  = espessura da parede;  $c$  = velocidade do som no meio;  $k = \omega/c$  = número de onda do meio.

Para a maioria dos casos práticos, existe ar em ambos os lados da parede, por isso, tem-se a relação entre impedâncias características ( $Z = \rho \cdot c$ ) mostrada em (2).

$$Z_1 = Z_3 \text{ e } Z_2 \gg \gg Z_1 \quad (2)$$

Onde  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  são, respectivamente, as impedâncias características dos meios I, II e III. Quando as paredes possuem espessura menor do que o comprimento da onda incidente, é possível considerar uma série de simplificações, como por exemplo: que o número de onda do meio II multiplicado pela espessura é muito menor do que a unidade. A partir dessas simplificações chega-se até a Lei da Massa. Tais simplificações, no caso das paredes espessas das edificações, não são válidas para toda a faixa de frequências e, além disso, a frequência crítica ocorre em baixas frequências, diminuindo a área controlada pela Lei da Massa e aumentando o controle pelo amortecimento.

Para caracterizar a performance do isolamento sonoro de uma parede, a determinação das frequências de ressonância mecânica e de coincidência são de fundamental importância, por isso foram calculadas.

Os primeiros modos de Ressonância, no caso da parede de alvenaria estudada, ocorreram em frequências abaixo da faixa de excitação (100 Hz a 8000 Hz), inclusive fora do espectro audível. Somente a partir de (0,6), (5,0) e (4,3) entrou-se na faixa de modos excitados.

Os deslocamentos gerados nos sólidos, por ondas de flexão, podem acoplar-se com os gerados no ar, por ondas acústicas longitudinais. Quando a propagação ocorre na frequência de coincidência  $f_{co}$ , o isolamento é controlado pelo amortecimento  $\eta$ . Para placas planas, uniformes e homogêneas a frequência crítica de coincidência é dada pela Equação (3).

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 \cdot c_\ell \cdot h} \quad (3)$$

Onde:  $h$  = a espessura da placa;  $c_\ell$  = a velocidade da onda longitudinal no sólido e  $c$  = a velocidade do som no ar. [4]

A Equação (3) é válida somente para casos onde o comprimento de onda de flexão é maior do que aproximadamente seis vezes a espessura do painel ( $\lambda_f > 6h$ ). [5]

Essa faixa de aplicação da Teoria Clássica de Placas Finas [6], pode ser expandida tendo como limite três vezes a espessura da parede (10,6 cm no caso estudado). [7]

Calculou-se, então, a máxima frequência de aplicação da Teoria Clássica de Placas Finas, empregando  $\lambda_f = 0,318$  e deixando a velocidade da onda de flexão em função de  $f$ , obtendo-se  $f = 2033$  Hz. Esse valor encontrado coincide com o ponto a partir do qual divergem os resultados experimentais e numéricos, como poderá ser observado na Figura 3, no item referente aos aspectos numéricos desse artigo.

A frequência crítica está localizada na região de coincidência, que é definida através do “Método do Patamar” (Plateau Method), descrito na maioria da bibliografia sobre Acústica. Verificou-se, inicialmente, a aplicabilidade do método, avaliando a razão entre a menor dimensão (altura) dividida pela espessura, cujo resultado deve ser maior do que 20, obtendo-se 30,2 para a parede em estudo. A aplicação do referido método é apresentada na Figura 1.

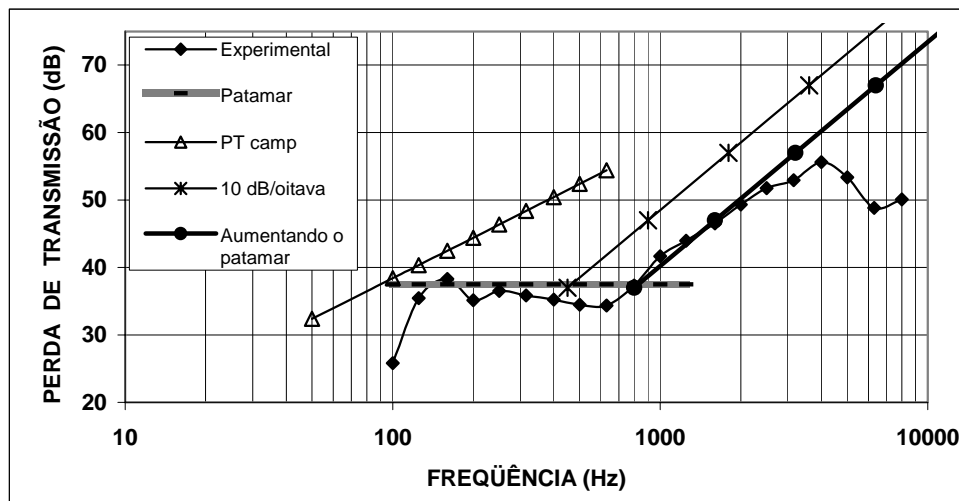


Figura 1- Método do Patamar aplicado para alvenaria de tijolos cerâmicos maciços.

Verifica-se que os valores tabelados, em diversas referências, para a construção do “Patamar” relativo ao tijolo, são: 37 (Altura) e 4,5 (Largura). Na comparação com os resultados experimentais, a concordância fica prejudicada porque o valor referido para a determinação da largura é muito pequeno, resultando um gráfico deslocado. Salienta-se 4,5 como fator de multiplicação para o estabelecimento da largura do patamar, refere-se simplesmente ao tijolo. O aumento desse fator para 8,0 melhora a concordância com as curvas experimentais. É importante lembrar, novamente, a necessidade de considerar-se as diferenças entre as respostas relativas ao tijolo isoladamente e à alvenaria, como um material composto.

## 2.2 Aspectos Experimentais

A parede construída entre as Câmaras Reverberantes recebeu, em suas bordas laterais e superior, uma borracha e acabamento em silicone, a fim de diminuir a transmissão da energia sonora pelos flancos, caracterizando-se uma fixação elástica. Executaram-se medições após 14 e 28 dias da construção (datas clássicas no estudo da secagem da argamassa). Depois desse primeiro grupo de ensaios, retirou-se o silicone e a borracha, substituindo-os por argamassa, obtendo-se uma fixação rígida. Novos ensaios foram realizados, com idênticos períodos de tempo (14 e 28 dias para secagem da argamassa).

Nas duas situações de fixação não houve significativa diferença entre 14 e 28 dias, apenas uma pequena variação em altas frequências, onde a Perda de Transmissão diminuiu com a secagem da argamassa, devido ao aumento da porosidade. A Figura 2, por isso, apresenta apenas os ensaio realizados a 28 dias, com borracha (CB) e sem borracha (SB).

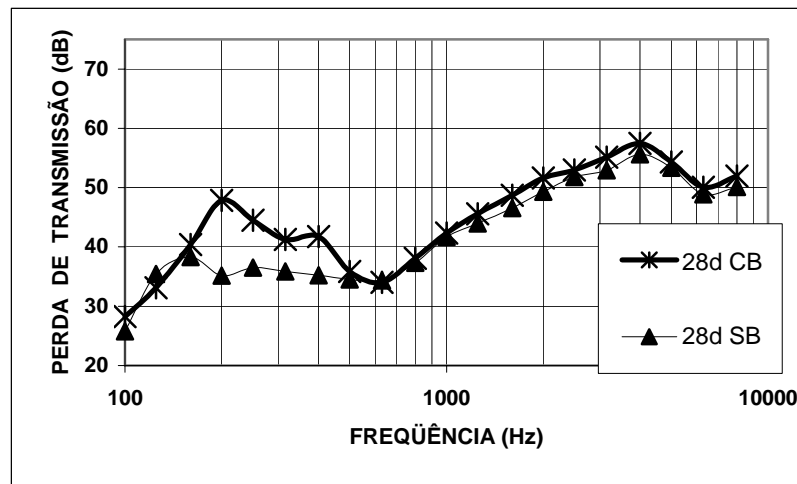


Figura 2 – Determinação experimental da Perda de Transmissão para alvenaria de tijolo maciço cerâmico, sob fixação elástica (CB) ou rígida (SB).

No comparativo das respostas obtidas sob os dois tipos de fixação (elástica e rígida) existe a perfeita localização da frequência de coincidência (630 Hz) e, no caso do emprego da argamassa, a definição do Patamar, mostrado nos aspectos teóricos e analíticos desse artigo.

A partir da frequência de 4000 Hz, aparece um vale na Figura 2. Ele está previsto em [7], explicando que nas baixas e médias frequências os resultados para Perda de Transmissão não diferem muito dos obtidos pelo cálculo de placas finas. Nas altas frequências essa diferença torna-se importante, pela presença de pronunciados vales, devido às ressonâncias de espessura das chamadas ondas “p”. As outras ondas de ressonância da espessura (ondas “s”) não ocasionam vales, pois se deslocam na direção normal à parede. [7]

O fato das medições, realizadas no Laboratório de Acústica/UFSM, terem sido executadas até 8000 Hz proporcionou a observação do primeiro vale decorrente das ressonâncias de espessura da parede, muito raramente demonstradas experimentalmente, tendo em vista que a faixa de frequências prevista na norma ISO 140-3 é de 100 a 5000 Hz. A tendência de queda da curva, foi localizada em pesquisa realizada até 5000 Hz, sem localizar o ponto em que a mesma voltava a subir. [2]

Esse comportamento da curva, em frequências maiores do que a frequência crítica, deve ser observado, devido à tendência do deslocamento desses pequenos vales na direção de frequências mais baixas (para uma região de maior sensibilidade da audição humana) quando a espessura da parede é aumentada.

### 2.3 Aspectos Numéricos

Executou-se uma análise numérica, empregando-se um software comercial, que utiliza SEA (Statistical Energy Analysis). Essa abordagem é aplicada em acústica e vibrações, para a

solução de problemas com várias fontes e trajetórias de ruído, como transmissões por vias aéreas, estruturais e/ou aquáticas. Seu uso, em edificações, está sendo enfatizado, porque pode ser empregada para diferentes espectros de médias e altas frequências, atendendo a maioria das aplicações em engenharia, que correspondem à faixa de 100 Hz a 8 KHz.

Os problemas de transmissão sonora arquitetural, em geral, têm sido abordados, teoricamente, com a “Lei da Massa”. [8] Frequentemente as teorias negligenciam elasticidade e rigidez na partição (a qual é assumida para ter extensão infinita e para responder como membrana flexível). Enfatizam que SEA prediz a amplitude de vibração do painel e o decaimento na curva de PT para a frequência de coincidência, incluindo painéis rígidos e elásticos e os efeitos do tamanho finito do painel.

SEA possibilita a predição em salas distantes do local onde está a fonte sonora. [9] Os métodos exatos ignoram a real variabilidade dos sistemas construtivos, adaptando-se mais às estruturas altamente controladas, tornando-se incompletos no caso das edificações. [10] SEA não substitui os métodos determinísticos, mas os complementa, porque possibilita um estudo estatístico. Definido o projeto, pode-se realizar um estudo mais detalhado, em especial em baixas frequências, onde a precisão de SEA é menor.

Para a realização do presente estudo, foi necessária a determinação dos parâmetros físico-mecânicos da parede, como: densidade, amortecimento, módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson, tendo em vista que os Bancos de Dados do software empregado não apresentavam nenhum tipo de alvenaria ou material similar.

A Figura 3 apresenta a Perda de Transmissão para a alvenaria de tijolos maciços cerâmicos sob dois tipos de análise, ou seja, como material isotrópico ou ortotrópico.

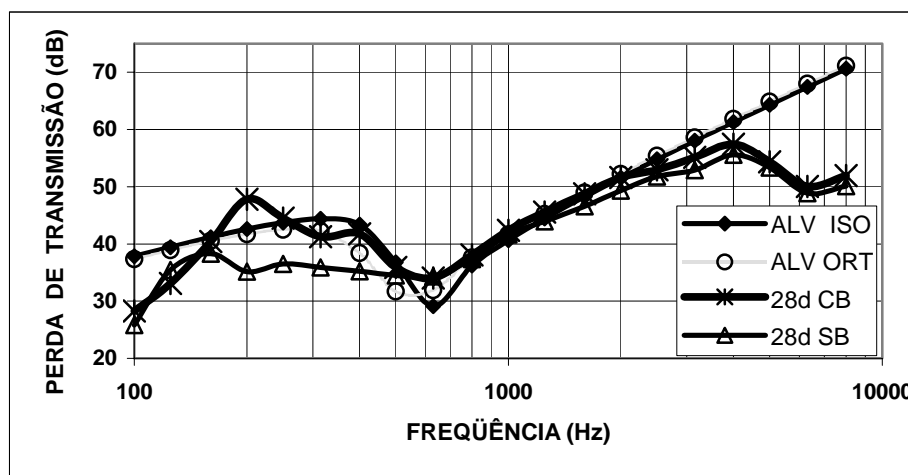


Figura 3 – PT simulada para alvenaria de tijolos maciços cerâmicos como material isotrópico e ortotrópico, comparada com ensaios sob fixação elástica (CB) ou rígida (SB).

Observa-se que não há acentuada diferença entre os comportamentos simulados para alvenaria isotrópica ou ortotrópica. Isso é importante, pois a dificuldade é bem maior na definição do Banco de Dados, quando considera-se a ortotropia da parede, tendo em vista a

necessidade de caracterização espacial (x, y e z) dos módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson.

O software localiza perfeitamente a frequência crítica (630 Hz - como nos ensaios), mas não reconhece o vale em altas frequências, fruto das ressonâncias devido a espessura do material. Pode-se afirmar, portanto, que o programa foi desenvolvido para “Placas Finas”, pois a divergência acontece a partir de 2000 Hz e a faixa de aplicação da Teoria de Placas Finas já comentada no item 2.1 (Aspectos Teóricos e Analíticos) resultou em 2033 Hz.

### 3. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos no presente estudo, propõe-se uma adaptação na figura geralmente usada para mostrar o isolamento acústico de paredes simples, tornando-a mais específica, quando referir-se às paredes espessas das edificações, como mostra a Figura 4.

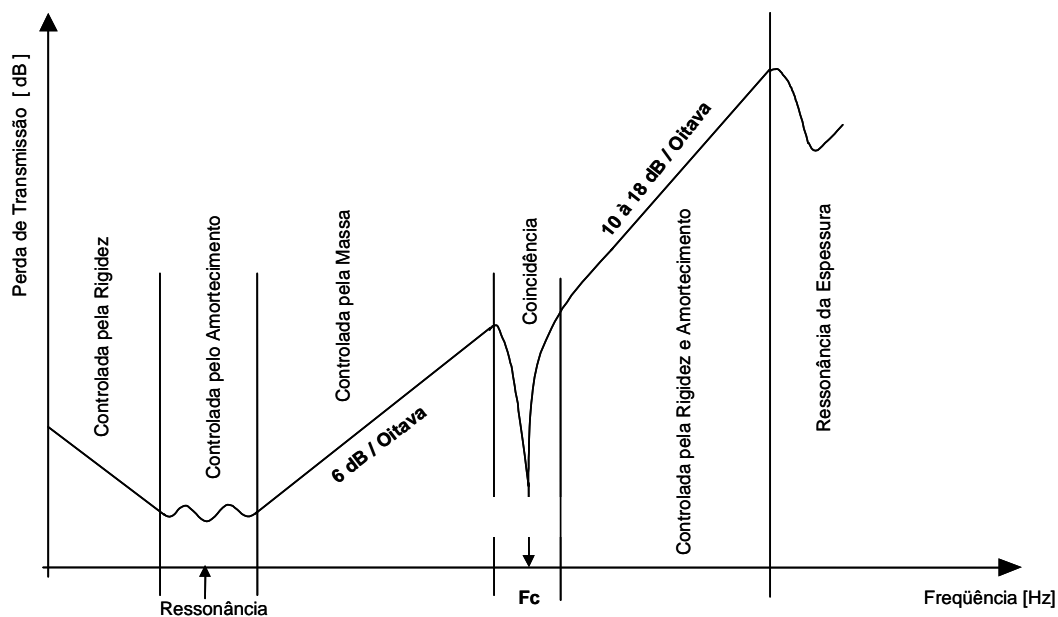


Figura 4 – Perda de Transmissão para alvenaria de tijolos maciços cerâmicos.

Podem ser identificadas seis regiões:

1. Há um decréscimo na Perda de Transmissão (PT). É uma região controlada pela rigidez;
2. PT é muito pequena, ocasionando grande transmissão sonora. É onde se localizam as primeiras ressonâncias mecânicas, estando sob grande influência do amortecimento;
3. Há um crescimento da PT da ordem de 6 dB/oitava. É a chamada Lei da Massa;
4. Região da coincidência, onde está situada a frequência crítica. No caso das paredes simples e espessas empregadas em edificações é a região mais importante, devido à faixa de frequências que abrange e a acentuada diminuição que provoca na Perda de Transmissão.



5. Há um aumento linear de 08 a 10 dB/oitava na PT, destacando-se novamente a influência da rigidez e do amortecimento;
6. Região onde a diminuição na PT é devida às ressonâncias relativas à espessura da parede. Na quarta região acima citada (coincidência) destaca-se, ainda, a necessidade de revisão nos valores tabelados para o Método do Patamar. Comprovou-se a melhor concordância do método analítico com o experimental empregando-se 8,0 em lugar de 4,5 para determinação da largura do patamar. No caso da altura, o valor tabelado (37) pode ser mantido. A forma habitual de fixação da parede (com argamassa) leva a existência de um patamar bem definido na região de coincidência, situado da frequência crítica em direção às frequências menores. Quando a conexão elástica (com borracha e silicone) é usada, ele desaparece. Salienta-se que a parede analisada (tijolo maciço cerâmico sem reboco) apresentava 10,6 cm de espessura, ou seja, um valor menor se comparado com paredes rebocadas e blocos. O aumento na espessura leva a um deslocamento da frequência crítica (mantidas as demais propriedades) para valores inferiores. Isso também acontece com o vale decorrente das ressonâncias devidas à espessura da parede. O trabalho detalha a performance do isolamento sonoro em alvenaria de tijolo maciço cerâmico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, através do programa PICDT, e aos alunos e técnicos que colaboraram na execução dos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. X. da PAIXÃO. *Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando Análise Estatística de Energia (SEA)*. 2002. 168 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. ([www.ppgep.ufsc.br](http://www.ppgep.ufsc.br))
- [2] A. SCHMITZ e A. MEIER. Total Loss Factor in Building Acoustics – Measurement and Application In: XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. *Anais...* Belo Horizonte, 15-19 abril - 2000, p.111-132
- [3] R. J. M. CRAIK. *Sound Transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis*. Hampshire, Gower, 1996, 261 p.
- [4] S.N.Y.GERGES. *Ruído: Fundamentos e Controle*. Florianópolis: NR editora, 2002, 2ed.
- [5] L. BERANEK. *Noise Reduction*. Huntington, N.Y.: Robert E. Krieger Publishing Company, 1980, 752p.
- [6] L. CREMER, M. HECKL e E. E UNGAR. *Structure-borne sound*. Berlin: Springer-verlang, 1973.
- [7] S. LJUNGGREN. Airborne sound insulation of thick walls. In: *Journal of Acoustical Society of America*, 89 (5), 1991, p.2338-2345.
- [8] M.J. CROCKER e A. J. PRICE. Sound transmission using Statistical Energy Analysis. In: *J. Sound and Vibration*, 9 (3), p. 469-486, 1969.
- [9] R. J. M. CRAIK & A.THANCANAMOOTOO. Flanking transmission through buildings. In: Inter-noise 90, Gothenburg-Sweden. *Proceedings...*, 1990, p. 75-77.
- [10] R.H. LYON e R.G. DeJONG. *Theory and Application of Statistical Energy Analysis*. Newton: Butterworth-Heinemann, 1995, 2<sup>a</sup> Ed., 277p.