

## PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA EM ALVENARIA DE TIJOLO MACIÇO CERÂMICO

**Dinara Xavier da Paixão (1); Samir N. Y. Gerges (2)**

(1) Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Av Roraima s/ -Campus - Camobi,  
Telefone: (055) 220-8313 ou 220-8144, fax : (055) 220-8313

e-mail: [dinaraxp@yahoo.com.br](mailto:dinaraxp@yahoo.com.br)

(2) Universidade Federal de Santa Catarina – LARI/EMC/CT –Telefone: (048)331-9227

e-mail: [gerges@mbox1.ufsc.br](mailto:gerges@mbox1.ufsc.br)

### RESUMO

O trabalho analisa os conceitos atualmente empregados na determinação do isolamento acústico de edificações. Mostra resultados experimentais, numéricos e analíticos, relativos a uma alvenaria de tijolos maciços cerâmicos, os quais fundamentam as discussões sobre a necessidade de adaptação das teorias utilizadas. Demonstra que, em geral, os conhecimentos teóricos desenvolvidos para placas finas necessitam ajustes, pois na área de construção civil trabalha-se, na maioria das vezes, com materiais que se comportam como paredes espessas.

### ABSTRACT

This work analyses the currently concepts used during the the determination of the acoustic isolation of constructions. Experimental, numerical and analytical results, relative to a ceramic massive bricks used in masonry, demonstrates the necessity of adaptation of the used theories. The results show that, the developed theoretical concepts used for airborne sound insulation of thin walls need adjustments because, most of the times, building materials behave as thick walls.

### 1. INTRODUÇÃO

Edifícios residenciais, escolas, hotéis e hospitais são exemplos de edificações onde: passos, vozes, elevadores, vento, instalações hidro-sanitárias e ruído de trânsito comprometem o conforto. É necessário, por isso, aprofundar os estudos para a atenuação dos ruídos – cada vez mais intensos.

Para diminuir a transmissão da energia sonora, que pode ocorrer por via aérea e/ou estrutural, busca-se conhecer a natureza dos ruídos, sua forma de transmissão e a performance dos materiais empregados. No ar, as ondas são apenas do tipo longitudinal e a vibração das partículas acontece na mesma direção da propagação da onda. Na via estrutural, podem ser encontradas, também, ondas de cisalhamento, de torção e de flexão. Na prática, os dois caminhos (ar e estrutura) precisam ser observados e tratados.

Procurou-se reunir a bibliografia sobre acústica, vibrações e edificações, estabelecendo uma interface de entendimento fácil, prática e objetiva para profissionais de distintas formações. Assim, foi possível re-interpretar conceitos acústicos básicos, identificando equívocos, decorrentes de características próprias dos materiais empregados na construção civil.

O presente artigo baseia-se numa pesquisa teórico-experimental de natureza aplicada que, através de uma abordagem quantitativa, executou atividades bibliográficas, analíticas, numéricas e experimentais.

Apresenta-se, inicialmente, uma síntese da teoria que permite a dedução da Lei da Massa, largamente utilizada na avaliação da Perda de Transmissão Sonora, bem como o gráfico indicativo do isolamento de paredes simples. A seguir, analisam-se resultados experimentais, analíticos e numéricos obtidos na pesquisa. Algumas considerações e conclusões finalizam o artigo.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS DA TRANSMISSÃO E ISOLAMENTO DO SOM

O isolamento de uma parede simples depende, entre outros fatores, do espectro do ruído e dos seus mecanismos de controle (rigidez, ressonância, massa e coincidência).

Gerges (2000) enfatiza que, para definir os materiais ou dispositivos a serem utilizados num isolamento, é importante conhecer a Perda de Transmissão (PT) e a Diferença de Nível (D). O autor define Perda de Transmissão (PT) como a relação logarítmica entre as energias transmitida e incidente, enquanto denomina Diferença de Nível de Pressão Sonora, ao resultado da subtração entre os Níveis de Pressão Sonora (antes e depois da colocação do dispositivo isolador).

Quando os valores obtidos para PT são altos, significa uma baixa transmissão da energia acústica, resultando um alto isolamento. Alta transmissão resulta valores baixos de PT (ou baixo isolamento).

A Perda de Transmissão, representada pela Equação 1, é determinada a partir da relação  $\alpha_t =$  (energia transmitida) / (energia incidente), onde  $\alpha_t$  é o Coeficiente de Transmissão Sonora.

$$PT = 10 \log \left( \frac{1}{\alpha_t} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Fahy (1985) e Recuero & Gil (1993) esclarecem que a Perda de Transmissão (PT) pode ser, também, referida por Sound Reduction Index – R (Índice de Redução Sonora), como nas normas ISO (International Standard Organization) e que, em alguns países (como nos Estados Unidos) a denominação mais empregada é Sound Transmission Loss – TL (Perda de Transmissão Sonora).

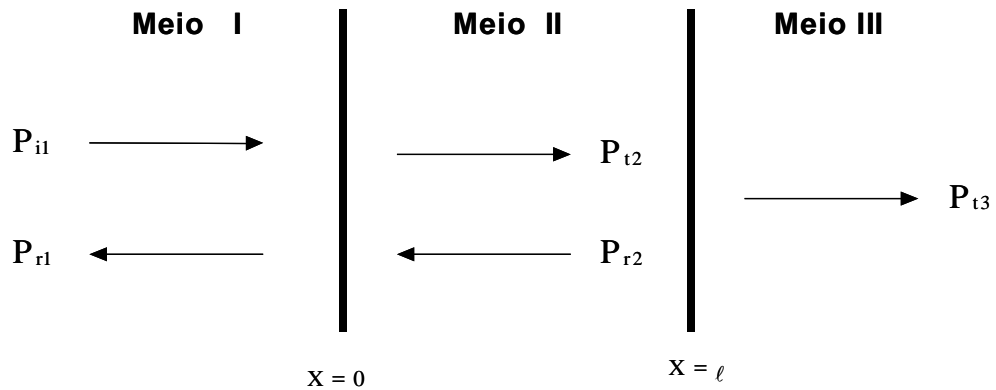
A Diferença de Nível de Pressão Sonora, ao contrário da Perda de Transmissão, não está baseada, somente, em características inerentes aos materiais. Sofre a interferência dos locais onde são medidos os níveis de pressão, portanto depende de fatores relativos ao ambiente, como o volume e a absorção.

### 2.1 Modelo genérico para Perda de Transmissão

Na análise do isolamento acústico, o modelo mais genérico é o estudo de uma onda plana longitudinal, com propagação unidirecional e incidência normal, atuando sobre três meios. O primeiro e o terceiro são o ar e o segundo é um material, cuja impedância característica ( $Z = \rho \times c$ ) é bem maior que a do ar. Uma parcela da energia gerada no meio **I** passa ao **II**, enquanto outra é refletida. O mesmo acontece entre os meios **II** e **III**. Nesse modelo ideal, ignora-se a absorção nos três meios. A propagação da onda ocorre no sentido positivo do sistema, cuja origem ( $x = 0$ ) apresenta-se entre os meios **I** e **II**. A linha limítrofe entre os meios **II** e **III** identifica o valor de  $x = \ell$ .

A Figura 1, elaborada a partir de Kinsler & Frey (1967), Reynolds (1981) e Gerges (2000), esquematiza a onda incidente, as transmitidas e as refletidas, em cada meio estudado.

As ondas: incidente, transmitidas e refletidas, visualizadas na Figura 01, são representadas pelas Equações 2 até 6. Onde:  $A_1$  é uma constante real, enquanto  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$  e  $B_2$  são constantes complexas. Elas representam a amplitude de pressão das ondas.



**Figura 1 : Comportamento das ondas sonoras através de três meios**

Fonte: Adaptada de Kinsler & Frey (1967), Reynolds (1981) e Gerges (2000)

$$P_{i1} = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad \text{Equação 2}$$

$$P_{r1} = B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)} \quad \text{Equação 3}$$

$$P_{t2} = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad \text{Equação 4}$$

$$P_{r2} = B_2 e^{i(\omega t + k_2 x)} \quad \text{Equação 5}$$

$$P_{t3} = A_3 e^{i[\omega t - k_3 (x-l)]} \quad \text{Equação 6}$$

São duas condições de contorno: a continuidade das pressões (P) e das velocidades (U) das partículas. A pressão e a velocidade permanecem iguais em ambos os lados da superfície, que separa dois meios.

Para a primeira superfície, ou seja, em  $x=0$ , tem-se:

$$\underline{P}_{i1} + \underline{P}_{r1} = \underline{P}_{t2} + \underline{P}_{r2} \quad \text{Equação 7}$$

$$\underline{U}_{i1} + \underline{U}_{r1} = \underline{U}_{t2} + \underline{U}_{r2} \quad \text{Equação 8}$$

Para a segunda superfície, em  $x = \ell$ , obtém-se :

$$P_{t2} + P_{r2} = P_{t3} \quad \text{Equação 9}$$

$$U_{t2} + U_{r2} = U_{t3} \quad \text{Equação 10}$$

Trabalhando-se com esse conjunto de equações, define-se o Coeficiente de Transmissão Sonora,  $\alpha_t$ , para a onda que passa do meio I para o II e, posteriormente, para o meio III. Onde:  $\rho$  = densidade;  $\ell$  = espessura da parede;  $c$  = velocidade do som no meio;  $k = \omega/c$  = número de onda do meio.

$$\alpha_t = \frac{4\rho_3 c_3 \rho_1 c_1}{\left(\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1\right)^2 \cos^2 k_2 \ell + \left(\rho_2 c_2 + \frac{\rho_3 c_3 \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}\right)^2 \sin^2 k_2 \ell} \quad \text{Equação 11}$$

Para o caso que orienta a presente demonstração, assim como a maioria dos casos práticos, existe ar em ambos os lados da parede, por isso tem-se a seguinte relação entre as impedâncias características:

$$Z_1 = Z_3 \text{ e } Z_2 \gg Z_1 \quad \text{Equação 12}$$

Quando as paredes possuem espessura menor do que o comprimento da onda incidente, considera-se:

$$k_2 \ell \lll 1 \quad \text{Equação 13}$$

e:

$$\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \sin k_2 \ell \gg 2 \cos k_2 \ell \quad \text{Equação 14}$$

ou:

$$\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \sin k_2 \ell \gg 2 \quad \text{Equação 15}$$

Onde:  $K_2 = \frac{\omega}{c_2}$  é o número de onda do meio II.

A Equação 11, a partir do emprego das simplificações resultantes das Equações 12 a 15, resume-se a Equação 16, onde  $M = \rho_2 \ell$  é a densidade de área do meio II.

$$\alpha_t = \left( \frac{\rho_1 c_1}{\pi} \right)^2 \frac{1}{M^2 f^2} \quad \text{Equação 16}$$

A Perda de Transmissão, anteriormente definida pela Equação 1 passa a ser dada pela Equação 17.

$$PT = 20 \log \frac{\pi}{\rho_1 c_1} + 20 \log M \cdot f \quad \text{Equação 17}$$

Como os meios I e III são o ar, verifica-se que a equação anterior depende, apenas, da densidade de área do meio II e da frequência da onda incidente. Substitui-se, então os valores de  $\rho_1 c_1 = 415 \text{ rayls}$  (para o ar a 20°C). Com isso, chega-se a chamada Lei da Massa, identificada por:

$$PT = -42,4 + 20 \log M \cdot f \quad \text{Equação 18}$$

Pela Lei da Massa, a Perda de Transmissão (PT) aumenta 6 dB, com a duplicação da massa por unidade de área (M) ou da frequência (f). Por isso, as altas frequências são mais fáceis de isolar. Além disso, a alta densidade superficial do material é importante para caracterizá-lo como isolante.

É importante lembrar que a Lei da Massa e a equação da Perda de Transmissão de campo resultam de simplificações, que não podem ser aplicadas, indiscriminadamente, ao trabalhar-se com edificações. Considerando-se, por exemplo, uma parede com um mínimo de 15 cm de espessura as simplificações, a partir da Equação 12, não são verdadeiras, para o espectro necessário numa avaliação sonora. Precisa-se aplicar a Equação 11, para calcular a Perda de Transmissão identificada na Equação 1.

## 2.2 O estudo da parede vibrante

A parede de separação de dois recintos, sob a ação de uma onda sonora, pode ser levada a um estado vibratório. Segundo Recuero & Gil (1993) tais vibrações, apesar de possuírem amplitudes muito pequenas, se transmitem ao recinto receptor, podendo ser facilmente ouvidas.

O isolamento acústico diminui devido à vibração da parede, principalmente quando existe uma similaridade (ou proximidade) dos valores das velocidades do som no ar e das ondas livres de flexão na parede. Uma queda brusca da Perda de Transmissão ocorre na chamada condição de coincidência.

Lembrando-se da definição da Perda de Transmissão a partir do Coeficiente de Transmissão Sonora (Equação 1), e sabendo-se que  $A_1$  e  $A_2$  são as amplitudes das pressões acústicas incidente e transmitida, respectivamente, pode-se chegar a Equação 19, onde:  $\alpha_t = |A_2/A_1|^2$ .

$$PT = 20 \log \left| \frac{A_1}{A_2} \right| \quad \text{Equação 19}$$

A condição de coincidência ocorre com a igualdade de dois termos da relação entre as amplitudes  $A_1$  e  $A_2$ , mostrada na Equação 20, ou seja:  $M = \frac{B}{\omega} k^4 \sin^4 \phi$ .

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{2\rho c \sec \phi}{\left( 2\rho c \sec \phi + \frac{B}{\omega} \eta k^4 \sin^4 \phi \right) + i \left( \omega M - \frac{B}{\omega} k^4 \sin^4 \phi \right)} \quad \text{Equação 20}$$

Conhecendo-se a chamada condição de coincidência, é possível considerar-se três casos especiais:

a) Quando a frequência é maior do que a de ressonância e muito menor do que a de coincidência, a rigidez e os amortecimentos mecânico e acústico podem ser ignorados. Se:  $f_{res} < f \ll f_{coin}$

$$PT \cong 20 \log f M \cos \phi - 42,4 \quad \text{Equação 21}$$

Observa-se que para  $\phi = 0^\circ$  (incidência normal) a Perda de Transmissão é máxima e a Equação 21 descreve a Lei da Massa, mostrada pela Equação 18.

b) Quando a frequência é igual a crítica (existe uma coincidência entre o comprimento da onda incidente ( $\phi = 90^\circ$ ) e o comprimento da onda de flexão livre da parede), o isolamento acústico é controlado pelo amortecimento  $\eta$ . Gerges (2000) destaca que PT na coincidência, é aproximadamente  $20 \log \eta$  menor do que a calculada pela Lei da Massa. Cita que para valores de  $\eta$  da ordem de  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  a diferença pode ser de 40 a 60 dB. A Equação 22 aponta a Perda de Transmissão na coincidência.

$$PT = 10 \log \left( 1 + \frac{M \omega \eta}{2\rho c \sec \phi} \right)^2 \quad \text{Equação 22}$$

c) Nas frequências maiores do que a de coincidência, o isolamento sonoro é controlado pela rigidez, resultando um aumento da Perda de Transmissão (calculada pela Equação 23) da ordem de 10 a 18 dB por oitava (dependendo do tamanho do painel, seus contornos e seu amortecimento interno).

$$PT = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{D k^4 \sin^4 \phi \cos \phi}{2\rho c \omega} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 23}$$

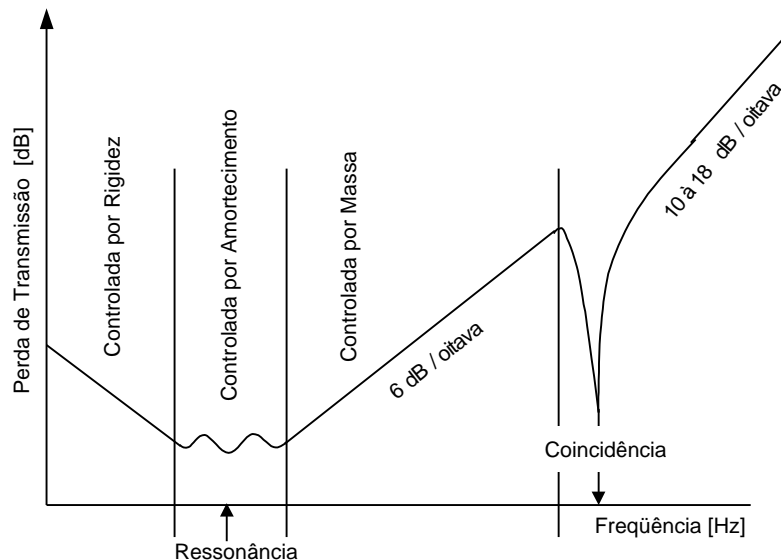
Para o isolamento de uma parede simples vibrante, observa-se a banda de frequências de interesse. Gerges (2000), destaca cinco bandas de frequências mostradas na Figura 02 e citadas a seguir.

- Abaixo da frequência de ressonância mecânica da parede, a Perda de Transmissão aumenta 6 dB a cada duplicação da rigidez e diminui 6 dB a cada duplicação da frequência.
- Na frequência de ressonância mecânica da parede, a Perda de Transmissão depende da razão de amortecimento do sistema ( $C$ ), sendo dada pela Equação 24. Geralmente, a transmissão da energia sonora, de um lado para outro da parede, é total, pois  $C \ll 2\rho c$ , fazendo com que  $PT \rightarrow 0$ .

$$\text{Equação 24}$$

$$PT = 20 \log \left( \frac{C}{2\rho c} \right)$$

- Acima da frequência de ressonância mecânica e abaixo da frequência crítica, PT é controlada pela densidade de área, utilizando-se a Equação da Perda de Transmissão de Campo.
- Acima da frequência de coincidência a Perda de Transmissão é controlada pela rigidez. O aumento de PT depende do tamanho do painel, dos seus contornos e do seu amortecimento interno, podendo chegar a 10 ou 18 dB por oitava.
- Na coincidência, o modelamento matemático é dificultado pela complexidade do mecanismo de transmissão. Emprega-se, por isso, o chamado Método do Patamar (Plateau Method), descrito por Reynolds (1981), Beranek (1988) e Gerges (2000).



**Figura 2 : Perda de Transmissão em paredes simples**  
 Fonte: Adaptada de Méndez (1994) e Gerges (2000)

### 3. A PESQUISA REALIZADA

A pesquisa, que constitui-se numa parte do trabalho de PAIXÃO (2002), complementou os aspectos teóricos estudados, através da execução de ensaios de isolamento acústico nas Câmaras Reverberantes da UFSM. Executou-se a determinação experimental dos parâmetros físico-mecânicos relativos a alvenaria de tijolos maciços cerâmicos. Realizaram-se simulações numéricas com um software comercial (que emprega a Análise Estatística de Energia - SEA). Com isso, buscaram-se elementos para comparar o comportamento esperado teoricamente e o obtido experimental e numericamente.

### 4. OS RESULTADOS OBTIDOS

Cálculos analíticos localizaram os primeiros modos de ressonância da parede estudada em frequências entre 3 e 8 Hz, portanto muito abaixo da faixa de excitação de 100 a 8000 Hz.

A frequência crítica de coincidência, calculada pela Equação 25 (onde:  $c$  = velocidade do som no ar;  $h$  = espessura da parede;  $c_\ell$  = velocidade da onda longitudinal no sólido), foi de 576 Hz (horizontal) e 475 Hz (vertical). Segundo Beranek (1980) essa equação é válida somente onde o comprimento de onda de flexão é maior do que aproximadamente seis vezes a espessura do painel ( $\lambda_f > 6h$ ). Ljunggren (1991a) demonstrou que a faixa de aplicação dessa equação (teoria de placas finas) pode ser ampliada e, no caso em questão, chega até 2033 Hz.

Equação 25

$$f_c = \frac{c^2}{6h}$$

Nas atividades experimentais obteve-se frequência crítica de 630 Hz, ratificada pelas simulações numéricas, conforme mostra a Figura 3. A mesma figura mostra que a principal divergência das curvas experimental e numérica acontece após 2000 Hz, quando perde validade a teoria de placas finas.

Outro fator observado é o vale surgido, na curva experimental, a partir de 4000 Hz. Ele está previsto por Ljunggren (1991b) ao afirmar que, em altas frequências, aparecem pronunciados vales devido as ressonâncias de espessura das ondas “p”. O autor salienta que as outras ondas de ressonância da espessura (ondas “s”) não ocasionam vales, pois se deslocam na direção normal à parede.

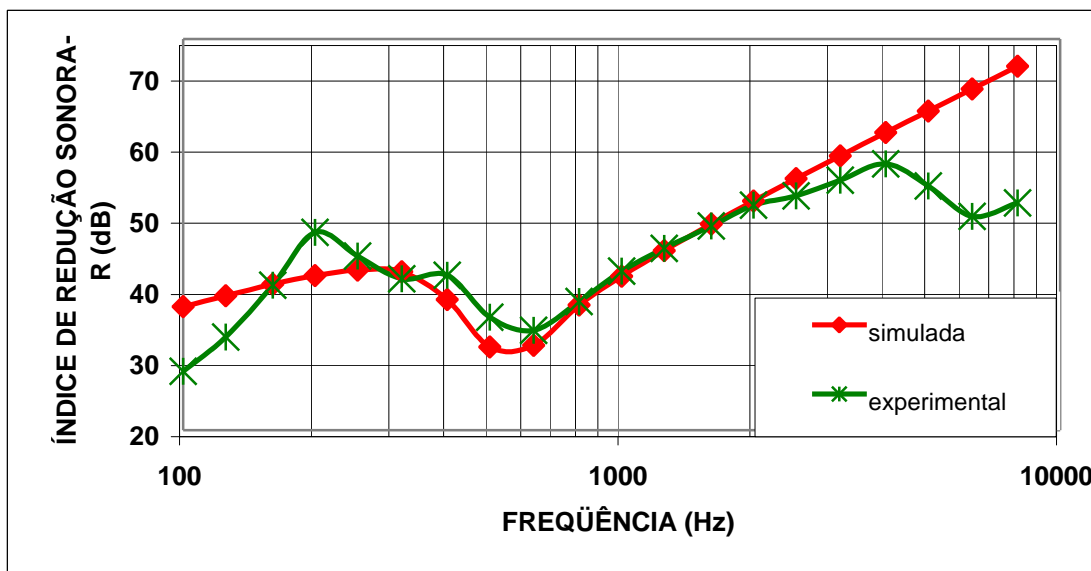


Figura 3: Comparação da alvenaria simulada com a experimental

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo da pesquisa, observou-se uma dissociação que se reflete em fatores que vão desde a terminologia até a aplicação equivocada de conceitos.

As três áreas envolvidas (Acústica, Vibrações e edificações) apresentam termos técnicos específicos muitas vezes desconhecidos nas demais. Em acústica arquitetônica, por exemplo, trabalha-se com dois tipos de ruído: aéreo e de impacto. Sabe-se, no entanto, que o “ruído transportado pela estrutura” não é, necessariamente, de impacto. Estudos na área de vibrações são pouco enfatizados, mas muito importantes na determinação do isolamento sonoro em edificações.

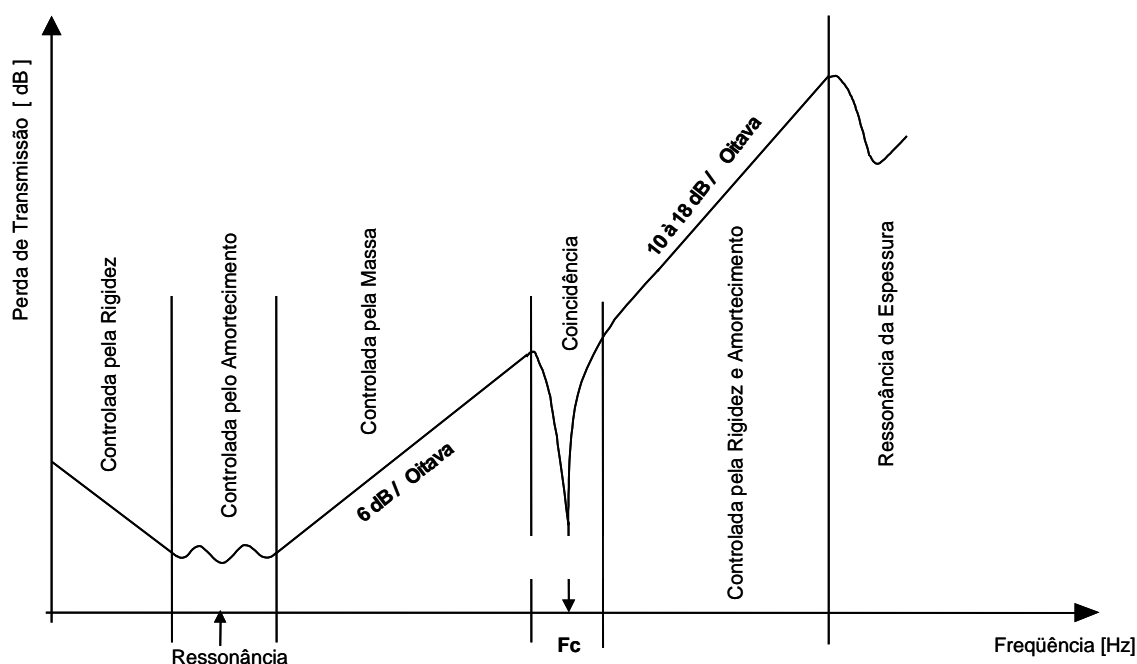
A frequência crítica de coincidência para uma parede de alvenaria localiza-se em faixas de baixas frequências, por isso torna-se fundamental a análise da contribuição da resposta ressonante da parede (acima da frequência crítica de coincidência), onde a Perda de Transmissão não é determinado pela Lei da Massa, mas pela rigidez e amortecimento. Além disso, a amplitude da resposta não-ressonante (dada pela Lei da Massa) é geralmente pequena, tanto que o erro na vibração total da parede é insignificante quando essa vibração é negligenciada, segundo afirma Craik (1996).

A Lei da Massa é derivada de simplificações que nem sempre podem ser consideradas em edificações, como foi demonstrado no presente texto. Além disso, a localização da frequência crítica de coincidência numa região de baixas frequências (630 Hz), aliada à presença dos vales referentes às ressonâncias de espessura das paredes, tem levado a interpretações equivocadas, onde, por exemplo, modelam-se tendências, aplicando a Lei da Massa, em regiões acima da frequência crítica.

A partir dos resultados obtidos no presente estudo, propõe-se uma adaptação na Figura 2, tornando-a mais específica para as paredes espessas empregadas nas edificações. 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 (mantidas as demais propriedades) desloca a frequência crítica e os vales de ressonância da espessura para valores inferiores, aumentando a necessidade de emprego de um modelo diferenciado, como o da Figura 4.

Acredita-se ter contribuído, dirimindo dúvidas conceituais e facilitando o estudo do desempenho acústico das edificações e, em decorrência, contribuindo na melhoria na qualidade de vida das pessoas.



**Figura 4: Perda de transmissão em paredes simples espessas – caso da alvenaria.**

## 6. BIBLIOGRAFIA

- BERANEK, Leo Leroy. **Noise Reduction**. Huntington, New York: Robert E. Krieger Publishing Company, 1980, 752 p.
- \_\_\_\_\_. **Noise and Vibration Control**. Revised Edition. Washington, DC: Institute of Noise Control Engineering, 1988, 672 p.
- CRAIK, Robert J. M. **Sound Transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis**. Hampshire, Gower, 1996, 261 p.
- FAHY, Frank. **Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response**. London: Academic Press Inc., 1985, 309p.
- GERGES, S. N. Y. **Ruído – Fundamentos e Controle**. Florianópolis: NR Editora, 2a Ed. Revista e Ampliada, 2000, 675p.
- KINSLER, Lawrence E. & FREY, Austin R. **Fundamentals of Acoustics**. Monterey: John Wiley & Sons Inc., 1967, 2ª Edição, 5ª Printing, 524p.
- LJUNGGREN, Sten. Airborne sound insulation of thin walls. In: **Journal of Acoustical Society of America**, 89 (5), 1991a, p.2314-2337.
- \_\_\_\_\_. Airborne sound insulation of thick walls. In: **Journal of Acoustical Society of America**, 89 (5), 1991b, p.2338-2345.
- MÉNDEZ, Antonio Miguel et al. **Acustica Arquitectonica**. Buenos Aires: Universidad del Museo Social Argentino, 1994, 238 p.
- RECUERO, Manuel & GIL, Constantino. **Acustica Arquitectonica**. Madrid: Ártica, 1993, 784p.
- REYNOLDS, Douglas D. **Engineering Principles of Acoustics**. Boston: Alliynd and Bacon Inc., 1981, 641p.
- PAIXÃO, Dinara X. da. **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.