



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

FIA2008- A139

Estudo paramétrico da perda de transmissão sonora em paredes de alvenaria de bloco cerâmico maciço

Marco A. S. Pinheiro ^(a),
Erasmu F. Vergara ^(b),
Dinara X. da Paixão ^(b).

(a) Unijui – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Prédio da Engenharia Civil, Campus, Rua do Comércio 3000, Bairro Universitário, Ijuí/RS, 98700-000, Brasil. E-mail: marco.pinheiro@unijui.edu.br.

(b) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Av. Roraima 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria/RS, 97105-900. E-mail: efvergara@gmail.com, dinaraxp@yahoo.com.br.

Abstract

The transmission loss (TL) of the constructive elements is the most important measure in the buildings acoustics research. The TL evaluation through the experimental tests is function of the frequency and these tests present fundamental data of the building elements. The theoretical study of the TL performance is complex and allows that the physical parameters can be analyzed. In this work are presented the results of a physical parametric study that influence the relative response of the sound transmission loss of the masonry wall: Poisson coefficient, specific mass, loss or damping factor and elasticity modulus. The numerical simulation considered the analytical expression for thick walls. The parametric evaluation identified changes in the natural frequency of the wall as well as in the sound transmission loss due to the loss factor damping. The analytic results present adequate correlation when compared to the experimental transmission loss. However, the experimental and analytical evaluation of the damping should be very careful.

Resumo

A perda de transmissão (*TL*) é uma medida acústica de grande importância em edificações. Sua avaliação se dá, principalmente, por meio de ensaios experimentais, resultando numa variação de *TL* em função de frequências de excitação. Tais ensaios mostram dados importantes da parede avaliada. A avaliação analítica do comportamento da *TL* é bastante complexa. Neste trabalho são apresentados resultados de um estudo paramétrico dos principais elementos que influenciam a resposta relativa à perda de transmissão sonora - coeficiente de Poisson, massa específica, módulo de elasticidade e fator de perda ou amortecimento da parede - realizados numericamente de acordo com expressão analítica extraída da literatura aplicada para placas de paredes espessas. A partir da avaliação paramétrica identificaram-se alterações na frequência natural da parede, bem como na perda de transmissão sonora, principalmente promovida pelo amortecimento, o qual é de difícil avaliação experimental. Os resultados analíticos apresentam-se adequados ao comportamento previsto. Quando comparados com resultados de perda de transmissão obtidos experimentalmente, a correlação mostrou-se excelente. Os resultados mostram ainda que a avaliação do amortecimento deve ser bastante cuidadosa.

1 Introdução

A avaliação de índices de transmissão sonora entre duas regiões separadas por um obstáculo tem se tornado cada vez mais importante, tanto nos aspectos de conforto como em termos de saúde das pessoas. A partir de uma avaliação precisa, pode-se identificar propriedades acústicas de materiais normalmente empregados nos diversos tipos de construções e, conseqüentemente, propor métodos de atenuação de ruídos com a diminuição da transmissão sonora.

Um índice importante na avaliação de ruídos ou qualquer tipo de onda sonora é conhecido como Perda de Transmissão Sonora (*Sound Transmission Loss – TL*), que representa uma relação entre energia incidente e energia transmitida, Gerges (2000). Quando valores de *TL* são altos, significa a existência de uma baixa transmissão da energia acústica, resultando um alto isolamento, Paixão (2002).

A avaliação de *TL* pode ser feita em campo ou em laboratório, a partir de ensaios normalizados. Devido à influência de diversos parâmetros, a avaliação analítica de *TL* não é simples.

Ljunggren (1990) propõe uma formulação teórica para a avaliação da perda de transmissão sonora, para um campo difuso de incidência sonora, calculada como uma média dos valores do fator de transmissão sonora τ , aplicadas em paredes espessas.

Este trabalho tem como objetivo principal, investigar a aplicação da formulação citada para *TL*, em paredes de alvenaria, correntemente empregadas na construção civil. Em vista disso, recorreu-se a um estudo paramétrico de identificação dos principais parâmetros que interferem na transmissão sonora, gerando resultados teóricos para posterior comparação com resultados experimentais.

Como objetivo decorrente do principal, intenta-se adotar o modelo analítico para prognosticar respostas de *TL* em diferentes tipos de paredes de alvenaria, desde que os parâmetros físicos e mecânicos da parede sejam avaliados precisamente.

Justifica-se, então, o trabalho pela economia de material na construção de paredes quando do ensaio experimental ou ainda quando não for possível a construção de tais paredes em laboratório. Também pelo ganho de tempo para se pré-avaliar índices de redução sonora.

Os parâmetros tratados no estudo paramétrico são o módulo de elasticidade E , a massa específica ρ , o coeficiente de Poisson ν e o fator de perda ou amortecimento η , além de propriedades como densidade do ar, velocidade de propagação do som, embora estes relativos ao meio tenham sido considerados constantes.

O fator de perda tem influência importante na resposta de *TL*. Em razão disso, são estudadas distintas condições de amortecimentos, ora considerados constantes para diferentes frequências de excitação sonora ω , ora considerados variando com a frequência, com curvas do fator de perda propostas por Craik (1996), Fischer (2001) e Schmitz & Meier (2000), ou avaliados experimentalmente por Paixão (2002).

2 Modelo analítico para isolamento sonoro de placas infinitas com espessura qualquer

2.1 Expressão geral

Uma solução analítica para a perda de transmissão sonora *TL*, dada pela equação (1), de uma parede infinita com espessura qualquer, mas uniforme, é apresentada em Ljunggren (1998).

$$TL = -10 \log \left(\int_0^1 -2\tau \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \right), \quad (1)$$

Para um campo sonoro difuso, a perda de transmissão pode ser calculada pelo valor médio do fator de transmissão τ , apresentado em Ljunggren, (1990).

$$\tau = \left| \frac{1 - \frac{Y_S}{Y_A}}{1 + \frac{1}{2} \frac{\cos(\theta)}{Y_A \rho_a c_a} + \frac{Y_S}{Y_A} + \frac{2 Y_S \rho_a c_a}{\cos(\theta)}} \right|^2, \quad (2)$$

Na equação (2), θ é o ângulo de incidência (com relação à placa) e $\rho_a c_a$ é a impedância característica do ar. Y_A e Y_S são admitâncias da placa com relação ao movimento anti-simétrico e simétrico, respectivamente. São dadas pelas equações (3) e (4).

$$Y_A = \frac{1}{2} \frac{\omega \alpha k^2 i}{\mu ((kx^2 + \beta^2)^2 \tanh(\alpha g) - 4 \alpha \beta kx^2 \tanh(\beta g))}, \quad (3)$$

$$Y_S = \frac{1}{2} \frac{\omega \alpha k^2 i}{\mu ((kx^2 + \beta^2)^2 \coth(\alpha g) - 4 \alpha \beta kx^2 \coth(\beta g))}, \quad (4)$$

Os fatores α e β são dados por:

$$\alpha = \sqrt{kx^2 - h^2}, \quad \beta = \sqrt{kx^2 - k^2}, \quad (5)$$

Na equação (5), h e k são o número de ondas P e S, respectivamente, e podem ser escritos em função das constantes elásticas de Lamé, λ e μ , conforme as equações (6).

$$h = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{\lambda + 2\mu}}, \quad k = \sqrt{\frac{\rho \omega^2}{\mu}} \quad (6)$$

As relações entre λ , μ e as constantes físicas módulo de elasticidade ou módulo de Young $E = E_r (1 + \eta i)$ e ν (coeficiente de Poisson), normalmente utilizadas no estudo de placas, são escritas como:

$$\lambda = -\frac{E_r \nu (1 + \eta i)}{2(2\nu^2 + \nu - 1)}, \quad \mu = \frac{E_r (1 + \eta i)}{4(\nu + 1)} \quad (7)$$

Nas equações (7), a parte real E_r corresponde ao módulo de elasticidade clássico e a parte imaginária corresponde ao fator de perda ou amortecimento, representado por η .

3 Metodologia

O estudo paramétrico desenvolvido a partir da equação (1) de perda de transmissão abrange uma variação nos principais parâmetros que possam interferir nas respostas, devido a alterações nas propriedades de rigidez e dinâmicas da parede de alvenaria.

Os parâmetros envolvidos são o módulo de elasticidade E , a massa específica ρ , o fator de perda ou amortecimento η e o coeficiente de Poisson ν da parede de alvenaria, bem como a o termo Y_S da expressão analítica da perda de transmissão. O termo Y_S , quando diferente de zero, interfere nos valores de TL apenas para frequências mais altas.

Basicamente, foram avaliadas respostas para uma pequena variação em torno de valores das grandezas obtidas experimentalmente por Paixão (2002), com o objetivo de identificar qual conjunto de parâmetros melhor se ajusta aos valores experimentais de TL . O principal parâmetro decisivo para escolha do conjunto de valores é a primeira frequência de coincidência, onde se tem um vale na curva de TL em função de ω (ver Figura 2).

Uma avaliação prévia permitiu definir o conjunto de valores do módulo de elasticidade usados no estudo. Em seguida, variações na massa específica da parede foram consideradas na investigação.

Duas considerações são identificadas em relação à equação (1): $Y_S = 0$ e $Y_S \neq 0$. Em razão disso, a variação dos parâmetros distribui-se em dois grupos, conforme mostrados na Tabela 1. Nesta tabela, os valores indicados por * foram obtidos experimentalmente. Maiores detalhes da obtenção desses valores podem ser encontrados em Paixão (2002).

Tabela 1. Conjunto de dados usados no estudo paramétrico.

$Y_S = 0$ e $Y_S \neq 0$			
E (GPa)	2,02	2,26*	3,00
ρ (kg/m ³)	$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$	$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$	$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$
ν	$\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4,$	$\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4,$	$\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4,$
η constante	$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5,$	$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5,$	$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5,$
	Paixão (2002) com borracha		
	Paixão (2002) sem Borracha		
η variável	Craik (1996) Fischer (2001) Meier (2000)		

$\rho_1 = 1400$; $\rho_2 = 1600$; $\rho_3 = 1839^*$; $\rho_4 = 2000$; $\nu_1 = 0,10$; $\nu_2 = 0,20^*$; $\nu_3 = 0,40$; $\nu_4 = 0,60$;
 $\eta_1 = 1\%$; $\eta_2 = 2\%$; $\eta_3 = 3\%$; $\eta_4 = 4\%$; $\eta_5 = 5\%$;

Em cada um dos grupos ($Y_S = 0$ e $Y_S \neq 0$) há uma variação discreta do módulo de elasticidade. Neste trabalho, são apresentados apenas resultados quando $Y_S = 0$.

Para cada valor de E , têm-se quatro valores da massa específica, conforme indicado na Tabela 1, sendo que, para cada valor de ρ , quatro considerações do coeficiente de Poisson foram feitas.

Finalmente, tem-se uma variação na taxa de amortecimento da parede, para cada valor estudado do coeficiente de Poisson. Dentre as avaliações realizadas com o fator de perda, são consideradas duas condições distintas: uma taxa constante do amortecimento para todas as frequências de excitação sonora, cujos valores estão indicados na Tabela 1; e taxas de amortecimento da parede variáveis em função da frequência de excitação sonora, conforme expressões de Craik (1996), Fischer (2001), Meier (2000) e resultados experimentais de

Paixão (2002), que considerou em seu trabalho valores de amortecimento da parede de alvenaria com condições de contorno rígidas (sem borracha) e semi-rígidas (com borracha). A variação do fator de perda com a frequência é mostrada na Figura 1.

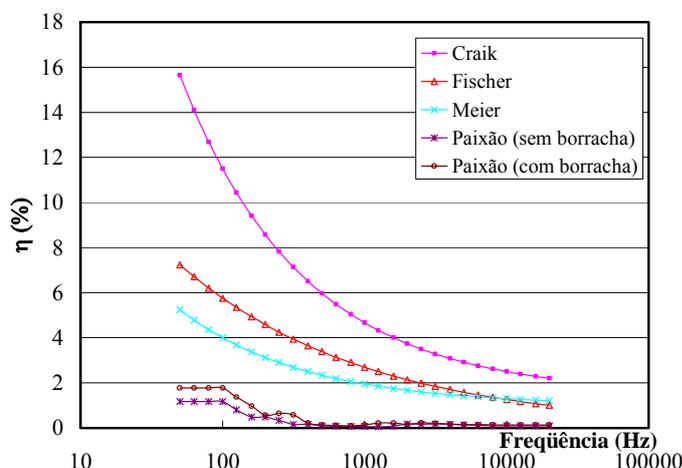


Figura 1. Variação do fator de perda (amortecimento) em função da frequência f .

Os resultados experimentais obtidos por Paixão (2002) são as bases para comparação com os resultados encontrados por integração numérica da expressão de TL .

A integração que aparece em (1) foi avaliada numericamente. Com um valor de $\omega = 2\pi f$, calcula-se a função $(-2 \tau \cos\theta \sin\theta) \times \Delta\theta$, para θ inicial. Repete-se esta avaliação para cada acréscimo de θ , até o limite de $\pi/2$. A soma de todos os valores obtidos representa a integral da função naquele ponto (ω). A perda de transmissão é obtida aplicando-se $[-10\log_{10}(\text{função avaliada no ponto})]$. Aqui, $\Delta\theta$ é o intervalo de integração.

A influência de cada um desses parâmetros na resposta de TL é descrita a seguir.

4 Resultados analíticos e comparação com resultados experimentais

4.1 Identificação do módulo de elasticidade

A avaliação de TL em função dos principais parâmetros físicos e mecânicos da parede de alvenaria seguiu a metodologia de atribuição de variações em uma determinada grandeza, enquanto mantinham-se constante as demais.

O objetivo seria verificar o quanto os resultados teóricos obtidos pela equação (1) são próximos dos resultados experimentais obtidos por Paixão (2002).

Conforme tabela apresentada anteriormente, foram feitas variações em torno dos parâmetros experimentais, módulo de elasticidade E , densidade ρ e coeficiente de Poisson ν da parede de alvenaria.

Como primeira investigação, adotou-se, para o conjunto de parâmetros, valores constantes de densidade, coeficiente de Poisson e taxa de amortecimento da parede, fazendo-se uma comparação dos resultados de TL obtidos com a primeira frequência de coincidência $f = 630$ Hz, que se identifica nos resultados experimentais de Paixão (2002).

Para uma série de valores do módulo de elasticidade, os resultados são apresentados na Figura 2.

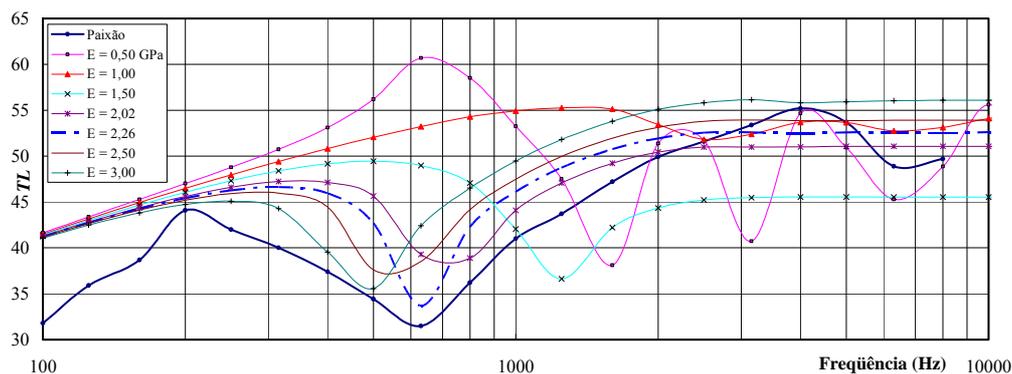


Figura 2. Variação de TL para diferentes valores de E (em GPa).

Da Figura 2, observa-se que módulos de elasticidade baixos geram uma resposta oscilatória em frequência, indicando uma estrutura flexível. À medida que se têm valores maiores de E , os vales são mais definidos, bem como há uma defasagem na frequência do vale, passando pela frequência de coincidência, medida experimentalmente. Observa-se ainda que a curva teórica cujo vale coincide com aquele da primeira frequência natural experimental da parede corresponde aquela com $E = 2,26$ GPa, coincidentemente o valor do módulo de elasticidade obtido em ensaio experimental.

4.2 Identificação da massa específica da parede

A partir dos resultados apresentados na Figura 1, foram adotados três valores do módulo de elasticidade ($E_1 = 2,02$ GPa, $E_2 = 2,26$ GPa e $E_3 = 3,0$ GPa) para avaliação das respostas de TL , agora com alterações dos valores da massa específica da parede. Os resultados são mostrados nas figuras seguintes.

O estudo da massa específica da parede limitou-se a valores em torno daquele correspondente a massa específica obtida experimentalmente (1839 kg/m^3). Para cada módulo de elasticidade considerado, foram avaliadas as respostas com massa específica igual a 1400, 1600, 1839 e 2000 kg/m^3 .

Quando se considerou $E = 2,02$ GPa, a curva que melhor correlacionou a frequência de coincidência corresponde ao valor de $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$, conforme se identifica na Figura 3.

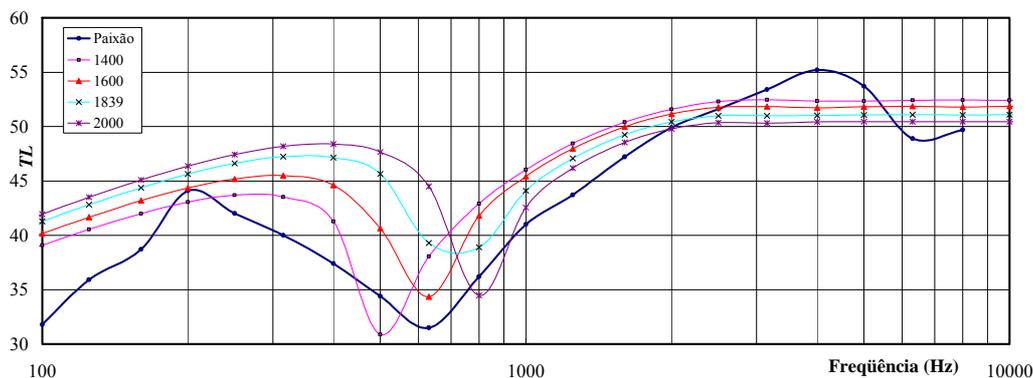


Figura 3. Perda de transmissão para diferentes valores de ρ (em kg/m^3) e $E = 2,02$ GPa.

Para $E = 2,26$ GPa, o melhor valor da massa específica que identificou a frequência natural de 630 Hz é 1839 kg/m^3 , conforme se observa na Figura 4.

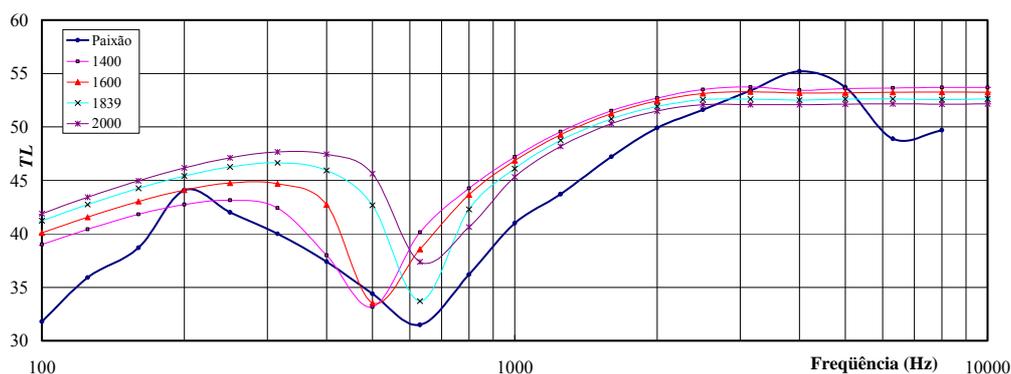


Figura 4. Perda de transmissão para diferentes valores de ρ (em kg/m^3) e $E = 2,26$ GPA.

Na Figura 5 notam-se que todas as frequências de coincidência na curva de TL ficam abaixo de 630 Hz.

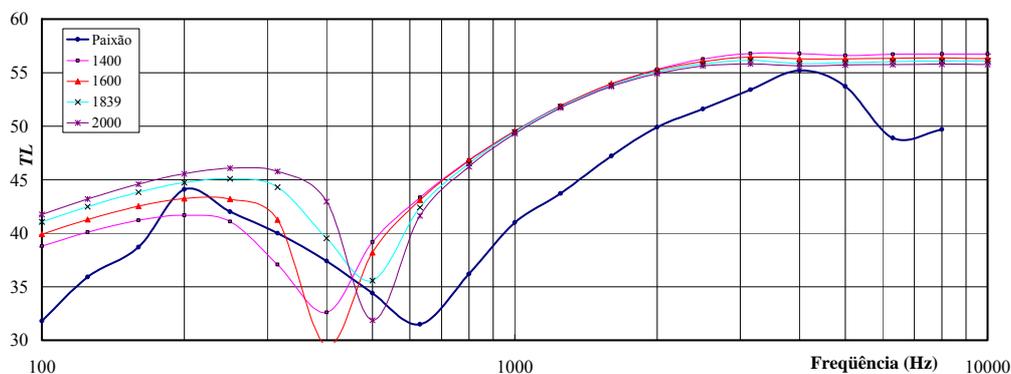


Figura 5. Perda de transmissão para diferentes valores de ρ (em kg/m^3) e $E = 3,0$ GPA.

Infere-se dos resultados apresentados que, tanto o conjunto de dados $E = 2,26$ GPa e $\rho = 1839$ kg/m^3 , como $E = 2,02$ GPa e $\rho = 1600$ kg/m^3 correspondem aos valores experimentais apresentados por Paixão (2002) quanto a frequência de coincidência. Considerando que o primeiro conjunto de dados corresponde exatamente àqueles utilizados na referência citada, adotaram-se estes como parâmetros na investigação subsequente dos resultados de TL , para variações de ν e do fator de perda η .

Considerando $Y_S = 0$, $E = 2,26$ GPa e $\rho = 1839$ kg/m^3 , obtém-se curvas com vale em frequência exatamente igual a experimental ($f = 630$ Hz).

4.3 Estudo do coeficiente de Poisson ν

Não tanto quanto o amortecimento, uma variação crescente de ν aumenta os valores de TL , conforme se observa na Figura 6b, considerando uma taxa de amortecimento constante e igual 2%. Este mesmo comportamento é obtido quando se emprega amortecimento variável com a frequência. Amortecimento nulo gera uma curva com oscilação muito grande dos valores de TL , bem diferente dos padrões das demais (Figura 6a).

Valores altos de ν ($\nu = 0,60$), embora não correspondam a um caso real, levam a frequência do vale para uma posição ligeiramente menor que 630 Hz (Figura 6b).

A variação de TL ocorre significativamente na região após o vale.

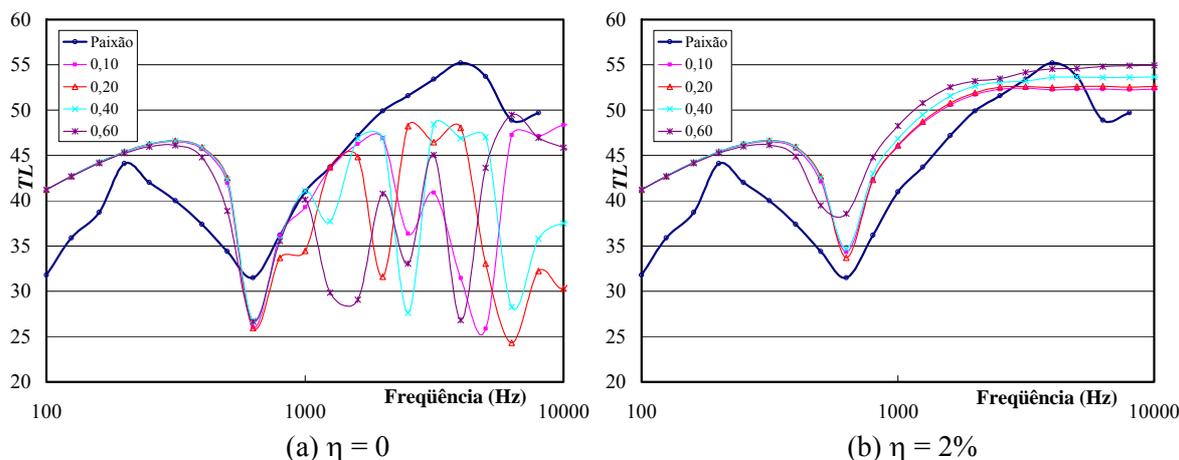


Figura 6. Perda de transmissão para diferentes valores de ν e η ($E = 2,26$ GPA, $\rho = 1839$ kg/m³).

4.4 Estudo do fator de perda

4.4.1 Fator de perda considerado constante

Para $\nu = 0,20$, o acréscimo do amortecimento aumenta a perda da transmissão. Isso se repete quando ν é igual a 0,10, 0,40 ou 0,60.

Observa-se, no entanto que, após certo valor de amortecimento (cerca de 3%), acréscimos deste não fazem aumentar TL significativamente.

É coerente, pois quanto maior o amortecimento, mais rápido a estrutura tende a reduzir suas amplitudes de vibração e, conseqüentemente, não transfere ou transmite para outra região.

Valores de amortecimento nulo fazem com que a resposta de TL seja oscilatória (inconstante) com a frequência.

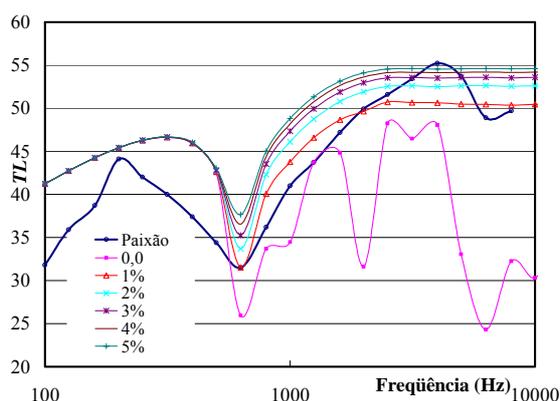


Figura 7. Perda de transmissão para diferentes valores de η e $\nu = 0,2$ ($E = 2,26$ GPA, $\rho = 1839$ kg/m³).

4.4.2 Estudo do fator de perda considerado variável com a frequência

O amortecimento também foi considerado variável com a frequência. As curvas de amortecimento com a frequência são mostradas anteriormente na Figura 1.

Para os valores do fator de perda presentes em Paixão (2002), os resultados são apresentados na Figura 8a e Figura 8b. Notam-se, devido aos baixos valores de η , uma oscilação grande nos valores de TL teóricos.

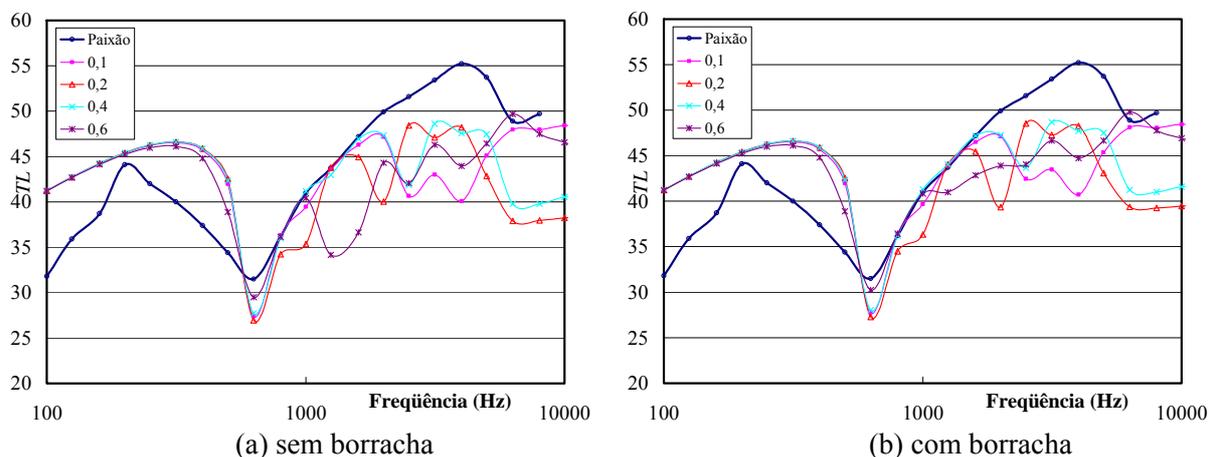


Figura 8. Perda de transmissão para diferentes valores de ν e fator de perda variável (Paixão, 2002) ($E = 2,26$ GPA, $\rho = 1839$ kg/m³).

Usando variações do fator de perda com a frequência, sugeridas por Craik, Fischer e Meier, os valores de TL (eixo vertical esquerdo da Figura 9) são maiores que os obtidos experimentalmente. Observa-se ainda que TL diminui para valores menores do fator de perda, cuja variação com f em diferentes relações é mostrada em linhas tracejadas e os valores são correspondentes ao eixo vertical direito.

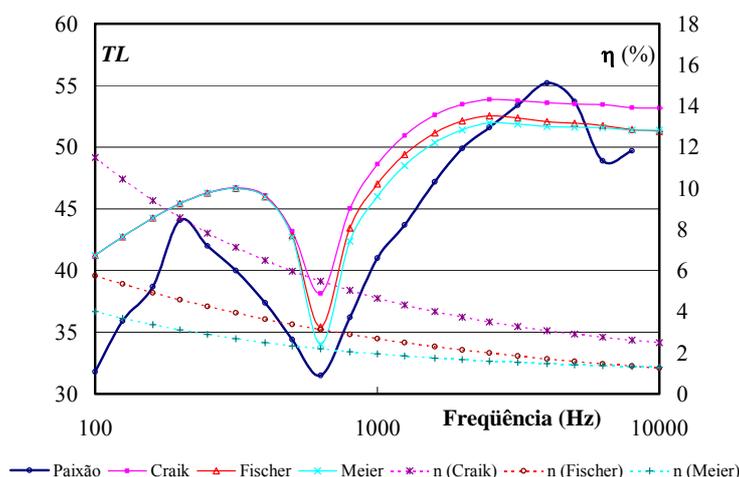


Figura 9. Perda de transmissão para $\nu = 0,2$ e fator de perda variável ($E = 2,26$ GPA, $\rho = 1839$ kg/m³).

5 CONCLUSÕES

Os resultados numéricos deste trabalho mostram que alterações nas propriedades mecânicas da parede são condizentes com modificações teóricas na frequência de

coincidência, nesta ordem de importância: módulo de elasticidade, massa específica e, com pequena influência, o coeficiente de Poisson.

Por outro lado, o fator de perda tem significativa importância sobre a intensidade da perda de transmissão TL . É coerente também a correlação entre valores altos de amortecimento corresponder a maior perda de transmissão, pois a energia nestes casos é rapidamente dissipada.

Identificou-se que o amortecimento é o parâmetro de grande influência nos valores de TL para uma determinada frequência, de onde se conclui que deve ser feita uma avaliação criteriosa de fatores de perda de alvenaria, para uma precisa obtenção de TL . Alterações no amortecimento em frequência menores que a de coincidência não modificam os valores de TL . Neste caso, a lei da massa rege o comportamento de TL .

Finalmente, a formulação teórica para o cálculo de TL em paredes espessas de alvenaria apresenta-se bastante adequada para avaliação da frequência de coincidência mais baixa e da correspondente intensidade de perda de transmissão.

Para frequências mais altas, o parâmetro $Y_S \neq 0$ tem influência que merece uma investigação detalhada.

Referências

- Craik, R. J. M. (1996). "Sound Transmission Through Buildings using Statistical Energy Analysis". Hampshire, Gower, 261p.
- Fischer, H.M.; Schneider, M.; Blessing, S. (2001). Einheitliches Konzept zur Berücksichtigung des Verlustfaktors bei Messung und Berechnung der Schalldämmung massiver Wände, Fortschritte der Akustik (DAGA 2001), Hamburg, Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Akustik DEGA e.V. 2001
- Gerges, S. N. Y. (2000). "Ruído – Fundamentos e Controle". Florianópolis: NR Editora, 2ª Ed. Revista e Ampliada, 675p.
- Ljunggren, S. (1988). "Forced Vibrations of Infinite Plates". Journal of Sound and Vibration, 121, 221-236.
- Ljunggren, S. (1990). "Airborne Sound Insulation of Thick Walls". Journal Acoustic Soc. Am., Vol. 89, no. 5, 2338-236.
- Paixão, D. X. (2002). "Aplicação de SEA (Statistical Energy Analysis) na Caracterização Acústica de Parede de Alvenaria". Tese de Doutorado, UFSC, Brasil.
- Schmitz, A. & Meier, A. (2000) "Total Loss factor in Buildings Acoustics – Measurement and Application", XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Anais. Belo Horizonte, 111-132.