

Perda de transmissão sonora em paredes de alvenaria de tijolo maciço cerâmico

Sound transmission loss in solid ceramic brick walls

Dinara Xavier Paixão
Samir Nagi Yousri Gerges

Resumo

O trabalho analisa resultados experimentais, numéricos e analíticos relativos à perda de transmissão sonora (PT) de uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos e compara estes com dados existentes na bibliografia. A determinação experimental da perda de transmissão sonora foi realizada segundo a norma ISO 140-3. Para as simulações numéricas, empregou-se um programa computacional comercial que utiliza a Análise Estatística de Energia (SEA). Os parâmetros físico-mecânicos e acústicos necessários para as simulações e os cálculos, como densidade, módulos de elasticidade, coeficientes de Poisson e amortecimento, foram determinados experimentalmente. Observou-se que a frequência de coincidência de 630 Hz obtida nos ensaios foi ratificada pelas simulações e apresentou uma divergência muito pequena em relação aos cálculos. Além disso, ficou enfatizado o vale decorrente das ressonâncias de espessura da parede. Foram comprovadas influências devidas às variações dos parâmetros físico-mecânicos e acústicos. Sugestões para a melhoria do desempenho acústico das edificações são apresentadas, como, por exemplo, um novo valor para a largura da base do Método do Patamar.

Palavras-chave: isolamento acústico, alvenaria, conforto, perda de transmissão

Dinara Xavier Paixão
Departamento de Estruturas e
Construção Civil
Universidade Federal de Santa
Maria
Av Roraima s/n. - Campus Camobi
CEP 97105-900 - Santa Maria, RS-
Brasil
Tel: (55) 220-8313
e-mail: dinaraxp@yahoo.com.br

Samir Nagi Yousri Gerges
Departamento de Engenharia
Mecânica
Universidade Federal de Santa
Catarina
CEP 88040-900 - Florianópolis, SC
- Brasil
Tel: (48) 331-9227
e-mail: gerges@mbox1.ufsc.br

Recebido em 23/06/04
Aceito em 07/11/04

Abstract

This paper analyses experimental, numeric, and analytical results concerned with the sound transmission loss (TL) of a solid ceramic brick wall, and compares those results with data from the literature. The experimental determination of the sound transmission loss was performed according to the ISO 140-3 standard. The numeric simulation was carried out using a commercial computer software that uses the Statistical Energy Analysis (SEA). The physical-mechanic and acoustic parameters for the simulations and calculations, such as density, elasticity modulus, Poisson's ratio, shear modulus, were established in experiments. The frequency of coincidence of 630 Hz obtained in the tests were confirmed by the simulations, and had only a small deviation in relation to the calculations. Moreover, the dip that results from the resonance of wall thickness was emphasized. The influences due to variations in the physic-mechanic and acoustic parameters were confirmed. Some suggestions for the improvement of acoustic performance of buildings are presented, such as, for instance, a new value for the width of the base of the Plateau Method.

Keywords: Acoustic isolation, masonry, comfort, transmission loss

Introdução

Edifícios residenciais, escolas, hotéis e hospitais são exemplos de edificações onde passos, vozes, elevadores, vento, instalações hidrossanitárias 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, precisa-se conhecer a natureza dos ruídos, sua forma de transmissão e a performance dos materiais empregados.

O presente trabalho mostra a perda de transmissão (PT) – também conhecida como Índice de Redução Sonora (R) ou *Transmission Loss (TL)* – obtida para uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos.

São apresentados resultados de medições relativas à parede em estudo, realizadas em câmaras reverberantes de transmissão sonora, segundo a Norma ISO 140 – parte 3, considerando as conexões parede/câmara sob dois aspectos: elásticas e rígidas.

Simulações numéricas utilizando SEA (*Statistical Energy Analysis*) foram executadas a partir da modelagem das câmaras reverberantes e da parede com suas diferentes formas de fixação. A alimentação do banco de dados do programa comercial empregado foi executada a partir da determinação experimental de parâmetros físico-mecânicos e acústicos, entre os quais destacam-se: densidade, módulos de elasticidade longitudinal e transversal, coeficientes de Poisson e de amortecimento.

Cálculos analíticos e dados bibliográficos complementaram a pesquisa teórico-experimental que originou o presente artigo, descrita detalhadamente na tese de Paixão (2002).

Assim, tornou-se possível comparar os resultados obtidos em todas as análises: experimental, numérica, analítica e bibliográfica, caracterizando-se a alvenaria de tijolo maciço cerâmico quanto ao seu isolamento acústico.

O artigo é finalizado com considerações gerais sobre esse tipo de estudo, conclusões decorrentes dos resultados obtidos e sugestões para a ampliação das pesquisas nesse campo, visando à melhoria da qualidade e do conforto das edificações.

Ensaio Realizados

As atividades experimentais executadas constituem quatro grandes grupos: (a) medições da perda de

transmissão (PT) ou Índice de Redução Sonora (R); (b) resposta vibroacústica da parede sob excitação de impacto; (c) resposta vibroacústica da parede sob excitação acústica; e (d) determinações de características físico-mecânicas.

Medições de Perda de Transmissão (PT)

Para a determinação da perda de transmissão construiu-se, entre duas câmaras reverberantes, uma parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico, com 4,10 m de largura por 3,20 m de altura, perfazendo uma área de 13,12 metros quadrados, com conexões elásticas, posteriormente substituídas por conexões rígidas.

As câmaras reverberantes para ensaios de transmissão sonora do Setor de Acústica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde se realizaram os ensaios, são um conjunto de duas salas especiais (60 m³ e 67 m³ de volume), separadas por um pórtico de 55 cm, cujas paredes, teto e piso estão constituídos de 30 cm de concreto armado. Cada sala possui uma porta dupla de 1,50 m de largura por 2,5 m de altura, executadas em chapa de aço de 12,7 mm de espessura, vedadas com borracha em todo o contorno e fechadas sob pressão, garantindo perfeita estanqueidade. Não há paralelismo entre as superfícies da câmara (paredes e teto/piso) para a existência de campo difuso. A estrutura não está apoiada diretamente no solo. As cargas são descarregadas em isoladores (neoprene), passando aos pilares e, deles, às fundações. As instalações e os procedimentos de ensaio estão qualificados segundo a Norma ISO 140, partes 1 e 2. A Figura 1 mostra um esquema das referidas câmaras.

A parede foi cuidadosamente executada, a partir da limpeza da superfície das Câmaras para retirada de restos de outros materiais testados anteriormente e a regularização da superfície. Uma borracha de 7,5 centímetros de largura e 5,0 milímetros de espessura foi colocada nas bordas laterais e superior da parede para minimizar o vazamento da energia sonora da parede de tijolos para as superfícies de concreto das Câmaras. A borracha foi levemente colada com o auxílio de uma guia de madeira. Na borda inferior permaneceu a argamassa de assentamento, com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), a fim de garantir a estabilidade da parede, que foi levantada até o teto, com juntas de 1,0 cm de espessura, sem encunhamento. As bordas laterais receberam um acabamento, fechando as aberturas deixadas por pregos utilizados na amarração da linha de nivelamento.

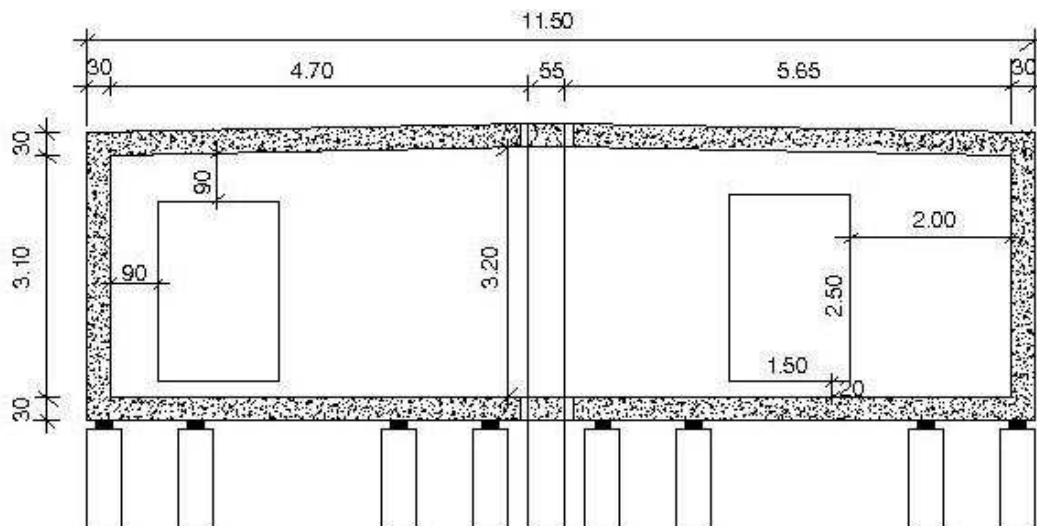


Figura 1 - Câmaras reverberantes para ensaios de transmissão sonora da UFSM

A diferença de largura da borracha (7,5 cm) e do tijolo (10,6 cm) foi preenchida com silicone, a fim de obter-se uma melhor vedação. A borracha ficou centralizada em relação à espessura da parede.

Realizou-se um primeiro grupo de ensaios vibroacústicos com essas conexões elásticas (borracha e silicone), executados em três períodos distintos: 14, 28 e 130 dias após a construção da parede. Os dois primeiros períodos são padronizados nos ensaios de construção civil e devem-se, basicamente, à secagem da argamassa e à estabilização da estrutura. Os 130 dias foram resultado da demora no início do segundo grupo de ensaios.

Esse segundo grupo de ensaios ocorreu após a substituição das conexões elásticas (borracha e silicone) por conexões rígidas (argamassa). O preenchimento da borda foi, então, executado com argamassa no mesmo traço do levantamento (1:1:6), caracterizando uma situação mais próxima da existente nas edificações, onde acontece um vazamento de energia sonora através do acoplamento das paredes e estruturas.

Os novos ensaios respeitaram o tempo de secagem da argamassa, sendo realizados aos 14 e 28 dias. A inspeção visual não identificou fissuras decorrentes dessa secagem capazes de influenciar os testes. Poucas microfissuras foram detectadas após os 28 dias.

As condições de temperatura e umidade relativa do ar foram determinadas durante todos os ensaios executados nas câmaras. Empregou-se o Analisador Climático (*Indoor Climate Analyzer – 1213 – serial n° 1464641*) com os Transdutores de Temperatura do Ar (*Air Temperature Transducer - MM0034*) e de umidade (*Humidity Transducer -*

MM0037), os quais são fabricados pela empresa Brüel & Kjaer (B&K).

Os ensaios para a determinação do Índice de Redução Sonora (R) seguiram a ISO 140-3. Resumidamente, pode-se dizer que são cinco as atividades básicas:

- aferir o sistema de medição com o calibrador (4230) e o analisador (4418);
- gerar o ruído e medir o nível de pressão sonora (NPS1) na câmara de emissão;
- medir o nível de pressão sonora (NPS2) na câmara de recepção, a partir do ruído gerado na câmara de emissão;
- medir o tempo de reverberação (TR) na câmara de recepção. É necessário digitar no analisador (4418) o volume da câmara de recepção ($V=71 \text{ m}^3$) e a área da parede de alvenaria ($S=13,1 \text{ m}^2$); e
- medir o ruído de fundo (RF) na câmara de recepção.

Todos os valores são registrados na memória do analisador (4418), podendo ser impressos pelo registrador gráfico e/ou ser empregados nos cálculos. Nos ensaios realizados, optou-se pelo registro dos valores medidos (NPS1, NPS2, TR e RF) e dos calculados com o emprego das equações 1 a 3.

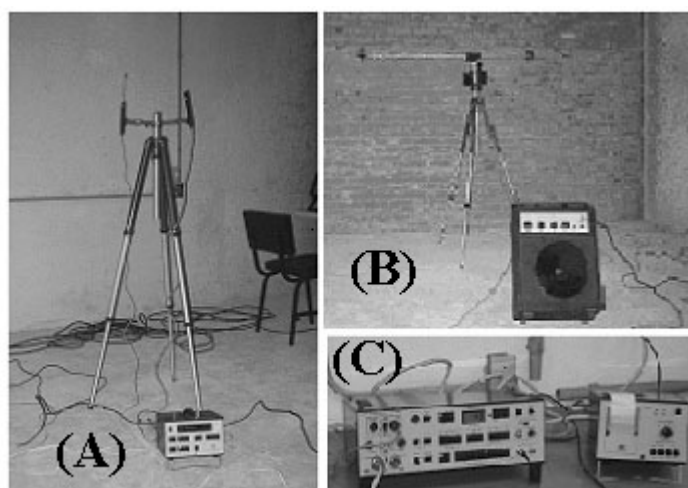
$$D = NPS_1 - NPS_2 \quad (1)$$

onde,

D: diferença de nível

NPS₁: registro dos valores medidos

NPS₂: registro dos valores medidos



Legenda:
 (A) verificação da temperatura e umidade;
 (B) microfone e caixa geradora;
 (C) analisador e impressora

Figura 2 - Equipamentos utilizados

$$D_{nT} = D + 10 \log \left(\frac{TR}{0,5} \right) \quad (2)$$

onde:

D_{nT} : diferença de nível padrão (pela ISO 140 – parte 3)

TR: tempo de reverberação na câmara de recepção

$$R = D + 10 \log \left(\frac{6,15 \cdot A \cdot TR}{V} \right) \quad (3)$$

onde,

R: diferença de nível normalizada ou índice de redução sonora

V: volume da câmara de recepção

Os equipamentos empregados, mostrados na Figura 2, são todos da empresa Brüel & Kjær. São eles: Fonte Sonora (*Sound Source* – 4224 – serial n° 1491240), Microfone Rotativo (*Rotating Microphone Boom* – 3923 – serial n° 1419777), Pré-amplificador (*Preamplifier* – 2619 – serial n° 1475114), Microfone de ½” (*Condenser Microphone* - 4166 – serial n° 1485447), Calibrador (*Sound Level Calibrator* – 4230 – serial n° 1351791) e Analisador (*Building Acoustics Analyzer* – 4418 – serial n° 879492).

A fonte geradora (4224) operou ligada ao analisador (4418). Com isso, trabalhou-se com ruído rosa, filtrado em terços de oitava. Utilizou-se difusor e inclinação de 30°. Essa forma combinada dos dois equipamentos é recomendada para medições acústicas em edificações por Brüel & Kjær (1982, p.

35) no manual do referido analisador. Assim, a fonte atua como um amplificador de potência e alto-falante, com o sinal do ruído vindo do analisador.

O analisador 4418 trabalha na faixa de 20 dB a 120 dB, emitindo ruído rosa, que passa através de uma série de 20 filtros em bandas de terços de oitava, cobrindo uma faixa de frequências de 100 Hz a 8.000 Hz. Esse equipamento pode ser usado para medições e cálculos de acordo com a ISO 140, ISO R 717, ISO R 354 e ISO 3382.

A fonte, utilizada com difusor, ficou posicionada no encontro de duas paredes de concreto da câmara (de emissão para medições de NPS e de recepção para TR), voltada para o canto, a fim de excitar o maior número de modos da sala. A distância foi de 1,0 m entre a fonte e cada uma dessas paredes.

Atendendo às determinações do item 6.2 da Norma ISO 140-3 (1995, p. 6), o raio de varredura do microfone rotativo (tipo 3923) foi ajustado para 1,0 m, com trajetória inclinada e tempo de média de 16 segundos. Observou-se o afastamento de 1,0 m entre o microfone e todas as superfícies (paredes adjacentes, de teste e fonte geradora).

Quantificou-se o ruído de fundo a fim de assegurar que as medições realizadas na câmara de recepção não estivessem afetadas por ruídos estranhos, como os oriundos de outras salas ou dos sistemas elétricos. Segundo o item 6.5 da Norma ISO 140-3 (1995, p. 7), o nível de ruído de fundo deve ser no mínimo de 6,0 dB (preferencialmente mais que 15,0 dB), abaixo do nível resultante da combinação do NPS com o ruído de fundo.

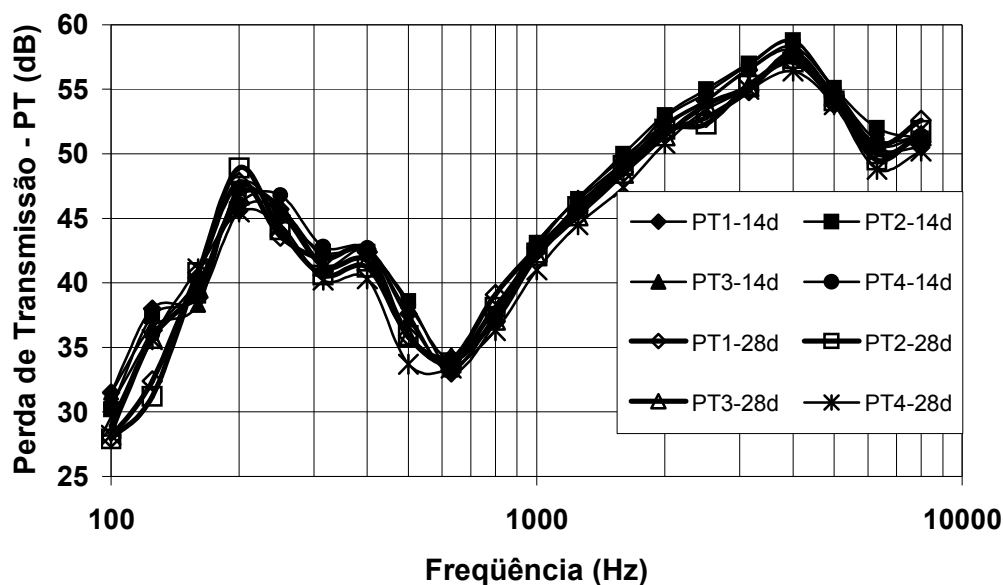


Figura 3 - Perda de transmissão para parede com conexões elásticas aos 14 e aos 28 dias

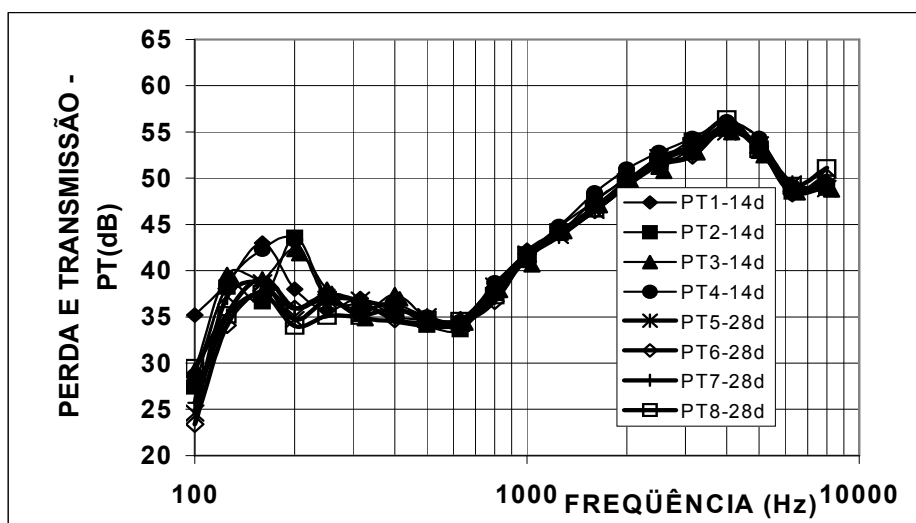


Figura 4 - Perda de transmissão para parede com conexões rígidas aos 14 e aos 28 dias

O tempo de média empregado no microfone foi de 16 segundos, conforme indicação do fabricante (BRÜEL; KJAER, 1982, p. 25), que recomenda para ambientes altamente reverberantes menor média temporal. Para as medições de TR usaram-se três amostras, ou seja, uma diferença de 120° entre cada amostra. Optou-se pelo nível de 30 dB. Assim, o tempo total foi multiplicado por 60 (da definição de TR) e dividido pela faixa (30 dB) para se chegar ao resultado em segundos. A medição inicia-se após o caimento dos primeiros 5,0 dB.

O resultado dos ensaios apresentou uma ótima replicabilidade, tanto para as conexões elásticas quanto para as rígidas, nos diferentes períodos (14 e 28 dias), como mostram as Figuras 3 e 4.

Identifica-se, também, nos gráficos o destacado posicionamento da frequência de coincidência em 630 Hz. A principal diferença nos dois conjuntos de gráficos é a caracterização de um “patamar” no caso das conexões rígidas (entre 160 Hz e 630 Hz), devido à transferência da energia sonora para as paredes das câmaras. É interessante lembrar que o cálculo da

perda de transmissão na região da coincidência é executada pelo Método do Patamar (*Plateau Method*).

Há, portanto, uma redução na perda de transmissão na faixa de 160 Hz até 500 Hz, decorrente das perdas por acoplamento da alvenaria com o concreto das câmaras reverberantes. A divergência de resultados em frequências abaixo de 200 Hz era esperada, pois Osipov et al (1997) enfatizaram a influência da geometria e do volume da sala na perda de transmissão em baixas frequências. Schmitz e Meier (2000) também mostraram que a baixa densidade modal em baixas frequências aumenta a incerteza.

Outra questão importante é a presença de um pronunciado vale (nesse caso em 6.300 Hz), previsto por Ljunggren (1991a), devido às ressonâncias de espessura das ondas “p”. Segundo o mesmo autor, as outras ondas de ressonância da espessura (ondas “s”) não ocasionam vales.

Resposta vibroacústica da parede sob excitação de impacto

As atividades experimentais contemplaram, ainda, a execução de ensaios para o conhecimento da resposta vibroacústica da parede (com conexões elásticas e rígidas), quando submetida a uma excitação de impacto e, posteriormente, acústica.

Para quantificar o amortecimento da parede, sob excitação de uma batida com um martelo, realizaram-se medições do tempo de decaimento da energia sonora, também conhecido como tempo de reverberação da parede (TR).

Essas medições obedeceram às prescrições do Anexo E da Norma ISO 140-3. Nesse tipo de ensaio, excita-se a parede com um martelo e mede-se a aceleração em outro ponto, com o uso de um acelerômetro. O sinal é recebido num analisador, gravado e transportado ao computador, para ser visualizado como o TR da parede, com o emprego de um programa computacional. A análise aconteceu em bandas de terços de oitava.

Nos ensaios realizados empregou-se: martelo; acelerômetro (4378 da B&K, com 30 mm de diâmetro por 38 mm de altura e peso de 175 g); analisador (*Dual Channel Real-Time Frequency Analyzer-2144* da B&K) e programa (*Building Acoustics Program-5305* da B&K).

A massa do martelo, segundo a ISO 140-3, deve ser de aproximadamente 100 cm² da parede excitada. Empregou-se, por isso, um martelo com 1,5 kg, com uma das faces de sua cabeça revestida por borracha, conforme solicitação da mesma norma. Não foram encontradas outras informações sobre esse tipo de equipamento.

O analisador usado possui filtro digital, é portátil e indicado para medições de acústica, eletroacústica e vibrações, com uma precisão semelhante a dos instrumentos de laboratório. Nele foram gravados os resultados (em disquetes) e, posteriormente, repassados a um microcomputador, onde o programa (5305) calculou a isolamento a som aéreo e de impacto, tempo de reverberação e nível de ruído.

O Anexo E da Norma ISO 140-3 sugere que o TR deve ser calculado de uma curva de decaimento entre 5 dB e 20 dB abaixo do nível máximo. Destaca, ainda, que para uma parede típica (10 m² a 20 m²) é necessário o emprego da média de 12 curvas (dois pontos de medição por três pontos de excitação por dois pontos por decaimento).

Marcou-se, por isso, na parede construída no Setor de Acústica sete pontos, dos quais dois destinavam-se à colocação do acelerômetro e os outros cinco eram pontos de excitação. Na marcação dos pontos evitou-se simetria (1/2, 1/3 e 1/4), a fim de que não fossem perdidas famílias inteiras de modos. A ISO 140-3 não menciona qualquer observação referente à distância entre o ponto de excitação e as posições do acelerômetro. Schmitz e Meier (2000, p. 114) recomendam uma distância mínima de um metro, baseando-se em cálculos teóricos, em medições realizadas no PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) da Alemanha e em dados obtidos no texto “*Nordtest Method NT ACOU 090*” (1994). Optou-se por respeitar a distância mínima de um metro entre o acelerômetro e os pontos de batida do martelo.

A Figura 5 identifica os sete pontos marcados na parede, com destaque para o 5(A) e o 6(A), que receberam o acelerômetro durante as medições. A fim de respeitar a distância mínima adotada, quando o acelerômetro estava em 5, os demais pontos eram utilizados para o impacto, exceto o 4. Para o acelerômetro em 6, não se excitava o ponto 7.

É interessante lembrar que esses ensaios também foram realizados em três épocas distintas: parede com borracha e silicone; 14 dias após a substituição da borracha e silicone pela argamassa e, finalmente, 28 dias depois que as bordas estavam argamassadas.

As medições para determinação do decaimento (TR) foram executadas nos dois lados da parede. A face voltada para a câmara de emissão recebeu a denominação de lado 1 (L1), enquanto a voltada para a câmara de recepção ficou sendo o lado 2 (L2).

A partir dos resultados obtidos, calculou-se o fator de perda total para uma parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico, conforme mostra a Figura 6, onde a replicabilidade é muito boa para frequências acima de 400 Hz.

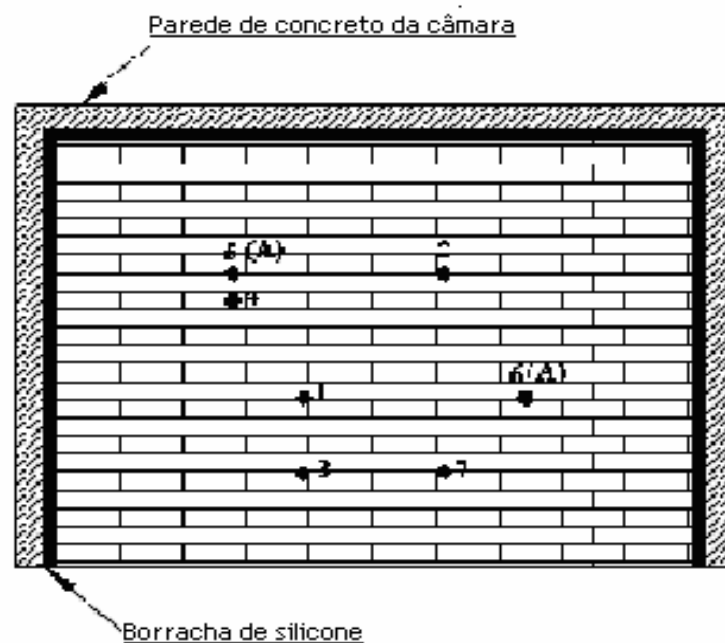


Figura 5 - Pontos de excitação e de colocação do acelerômetro

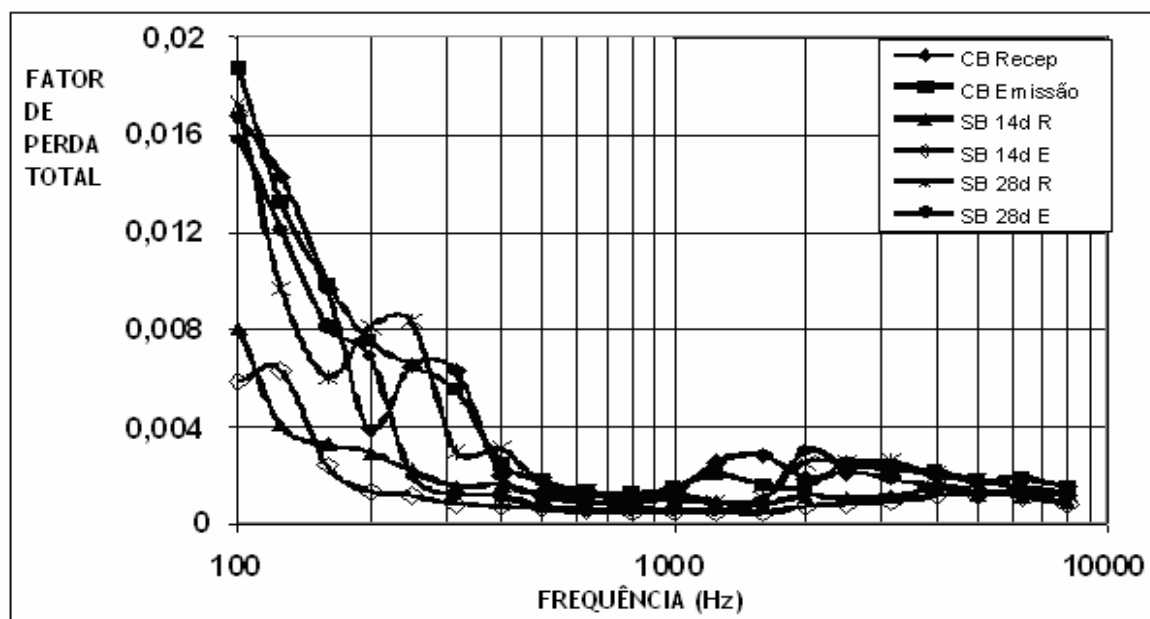


Figura 6 - Fator de perda total para parede de tijolo maciço cerâmico com conexões elásticas (CB) e rígidas (SB)

Resposta vibroacústica da parede sob excitação acústica

O comportamento vibracional da parede, decorrente de uma excitação com ruído aéreo, foi avaliado com a finalidade de localizar as frequências que possuem maior amplitude na resposta, ou seja, onde a frequência de excitação coincide com a frequência natural da parede.

Empregou-se a mesma fonte geradora (B&K tipo 4224) utilizada nos ensaios de perda de transmissão. Trabalhou-se com ruído rosa gerado em faixas de terços de oitava. A fonte geradora permaneceu na mesma posição para as medições realizadas em ambos os lados, de forma a excitar o maior número de modos da sala. O ruído aéreo foi gerado na câmara de emissão pelo conjunto 4418/4224. O acelerômetro captou a aceleração da vibração na parede e transmitiu ao analisador 2144 para gravação do sinal em mídia magnética (disquete). A seguir, os dados foram transferidos para o computador, onde, através do programa 5305, obteve-se o nível de aceleração na parede em dB.

Com o acelerômetro localizado nos pontos 5(A) e 6(A) descritos no item anterior, mediu-se a aceleração, a partir da qual se obteve o nível de aceleração em dB (ref. 10^{-7} m/s^2). Utilizaram-se dois pontos de medição no lado 1 (parede voltada para a câmara de emissão) e mais dois no outro lado da parede (lado 2, voltado para a câmara de recepção).

A Norma ISO 140-3 não menciona esse tipo de experimento e não foram encontradas referências bibliográficas sobre resultados oriundos de estudos semelhantes para materiais de construção civil. Acredita-se que isso decorre da dificuldade de execução, aliada ao fato de que esse ensaio não visa a determinar nenhum parâmetro específico, mas apenas orientar a análise de uma tendência do comportamento vibracional da parede.

A Figura 7 reúne os resultados das três fases de ensaios: com borracha (CB) e sem borracha (SB) aos 14 e 28 dias. Estão apresentados, separadamente, os níveis de vibração obtidos nas duas posições de acelerômetro (A5 e A6) e nos dois lados da parede: L1 e L2.

Observa-se uma grande concordância das curvas, independentemente de o tipo de junção ser elástico ou rígido. O gráfico aponta um pico bem definido para todas as curvas em 630 Hz. O maior pico, no entanto, não se apresenta numa única frequência, mas para três diferentes valores: 1.250 Hz, 1.600 Hz e 2.000 Hz, variando segundo as distintas

condições de junção entre a parede em estudo e o tipo de câmara reverberante.

Num comparativo com os resultados dos ensaios apresentados no item anterior, observa-se que 630 Hz está dentro da faixa de frequências na qual existe a principal resposta da parede, ou seja, onde se localizam os maiores valores de tempo de decaimento (TD).

O gráfico mostrado na Figura 7 destaca a faixa de frequências entre 1.250 e 2.000 Hz como as principais respostas da parede à excitação por ruído aéreo. Observando, no entanto, os resultados das medições de TD, verifica-se o decaimento das curvas nessas frequências, salvo poucas exceções, quando um pequeno pico é detectado. Acima de 2.000 Hz, não há qualquer elevação no nível de aceleração da parede em nenhuma das situações estudadas.

Determinação de parâmetros físico-mecânicos

Esses ensaios referem-se às propriedades dos elementos (tijolo e argamassa) e do conjunto (alvenaria). Os experimentos relativos à alvenaria foram realizados com o emprego de miniparedes (60 cm de largura x 63 cm de altura), construídas com o mesmo traço de argamassa empregado na execução da parede e com a trabalhabilidade ajustada pelo mesmo pedreiro.

Buscou-se utilizar tijolos compatíveis com a NBR 8041. Retiraram-se do lote, aleatoriamente, cinco tijolos para realizar os ensaios de caracterização física. Iniciou-se pela medição das três dimensões. A seguir, cada exemplar foi pesado seco (após três dias dentro das instalações do laboratório), para cálculo de sua densidade, e úmido (imerso em água por 24 horas, quatro dias após sua chegada no laboratório), para determinação da absorção d'água, cuja média foi 8,5%.

Atendendo à NBR 6460/83, cada tijolo foi cortado ao meio e suas metades unidas com argamassa. Executou-se o capeamento em ambas as faces com traço 1:1 (cimento:areia). Deixou-se secar ao ar por sete dias e, após a imersão em água durante 24 horas, houve o rompimento dos corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão dos tijolos.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios, destacando o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

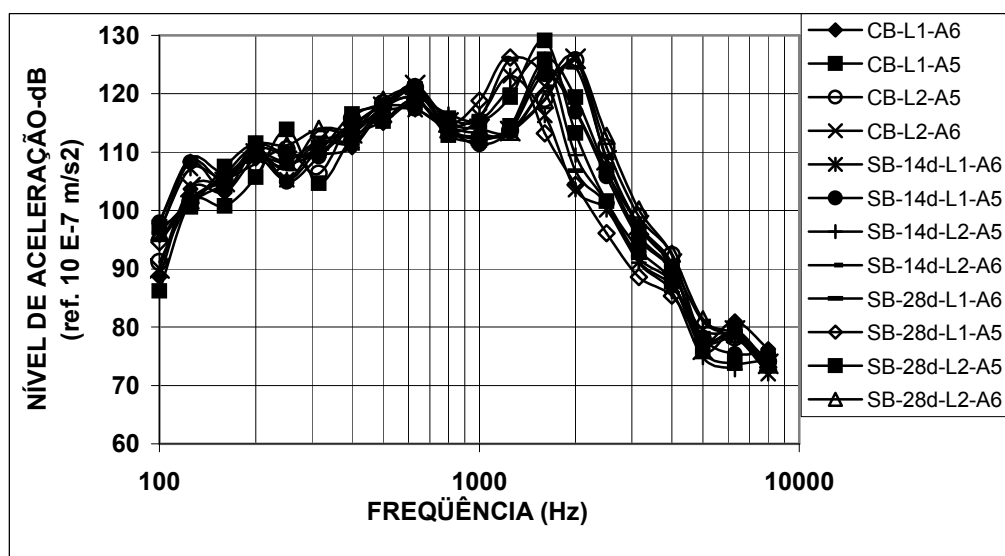


Figura 7 - Comparativo do nível de aceleração para a parede de tijolos maciços cerâmicos

Característica	Valor Médio	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Densidade [kg / m ³]	1846,64	63,41	3,4
Comprimento [cm]	22,61	1,31	0,6
Largura [cm]	10,59	1,45	1,4
Altura [cm]	5,13	1,35	2,6
Absorção d'água [%]	8,5	7,62	89,6
Resistência à compressão [MPa]	10,33	17,71	17,15

Tabela 1 - Características dos tijolos maciços cerâmicos

Idade (dias)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
07	1,1065	0,0045	0,40
14	1,3455	0,0017	0,12
28	1,6428	0,0142	0,83

Tabela 2 - Resistência à compressão da argamassa

Procurou-se empregar uma argamassa com características similares às da encontrada comumente em obras, por isso optou-se por não peneirar a areia e não controlar o fator água/cimento, deixando que a trabalhabilidade fosse ajustada pelo pedreiro. Utilizou-se o traço 1:1:6 (cimento:cal:areia) na construção da parede e das 12 miniparedes, pois ele é um dos mais usados nos estudos envolvendo argamassa e/ou alvenaria. O ensaio de abatimento resultou em 22,95 cm. Foram moldados 18 corpos-de-prova cilíndricos (5,0 cm de diâmetro por 10 cm de altura), cujo rompimento, em grupos de seis, ocorreu aos 7, 14 e 28 dias, após a cura em câmara úmida. Empregou-se a norma NBR 7215. A resistência à compressão média, o desvio padrão e o coeficiente de variação estão apresentados na Tabela 2.

Para a execução dos ensaios relativos à alvenaria, construíram-se oito miniparedes de dois tijolos e meio de largura, por nove fiadas de altura, com juntas de um centímetro de espessura, perfazendo dimensões médias de 60 cm de largura por 63 cm de altura. Após 28 dias, quatro miniparedes foram ensaiadas à compressão com carregamento perpendicular às juntas de argamassa. Outras quatro miniparedes permitiram medições de tensão e deformação para carregamento paralelo às juntas de argamassa.

Por meio de ensaios de compressão axial, determinou-se a relação entre tensão e deformação. As miniparedes receberam carregamento uniaxial contínuo para a determinação do módulo de elasticidade, resistência à compressão e coeficientes de Poisson nas direções perpendicular e paralela às juntas horizontais de argamassa. Curvas de tensão/deformação foram definidas utilizando-se regressão linear com o método dos mínimos quadrados (SOARES et al 1991, p. 266). Os módulos de elasticidade tangentes são dados como a inclinação da reta tangente a cada uma das curvas, passando pela origem do sistema de eixos coordenados. A Figura 8 ilustra um dos ensaios realizados.

Atividades Numéricas

As duas câmaras reverberantes e a parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos foram modeladas utilizando-se um software comercial (AutoSEA), alimentado com valores específicos para os parâmetros necessários à simulação. Após, houve a análise dos resultados obtidos e o tratamento estatístico desses dados.

Em linguagem de SEA, construiu-se um sistema com três subsistemas, ou seja, cavidade 01 / parede / cavidade 02. A opção por esse modelo simplificado atende a duas razões. A primeira é a

difículdade na determinação dos parâmetros referentes aos materiais de edificações como, por exemplo, a alvenaria. A segunda é seguir as recomendações dos pesquisadores que trabalham com SEA, os quais enfatizam que o modelo inicial deve ser simples, e, posteriormente, agregar outros subsistemas.

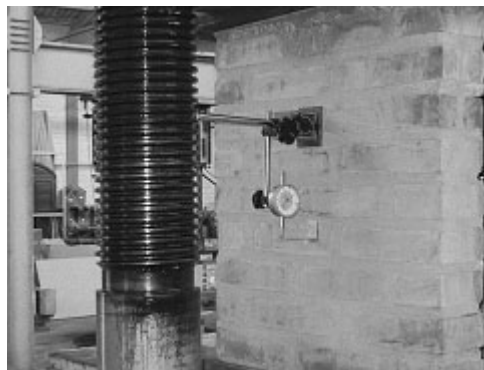


Figura 8 - Medição das deformações verticais das miniparedes

As simulações computacionais foram divididas em dois grupos, considerando a parede como um material isotrópico ou ortotrópico. Em geral, os trabalhos sobre transmissão sonora em edificações referem-se à alvenaria somente como isotrópica, pois é difícil obterem-se dados que permitam o seu tratamento como ortotrópica e, por isso, houve a determinação experimental desses parâmetros.

Para identificar a aplicabilidade de SEA, verificou-se o número de modos e a superposição modal dos subsistemas, para todos os casos, tendo em vista que tais características são sensíveis às alterações das características da parede.

Diversas combinações de valores foram realizadas para o estudo dos diferentes fatores independentemente. As principais simulações consideraram alterações nos seguintes parâmetros: amortecimento das salas; amortecimento da parede; módulos de elasticidade; coeficiente de Poisson; e densidade.

As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, a influência da alteração na densidade e nos módulos de elasticidade longitudinal e transversal.

Observam-se os comportamentos diferenciados com o aumento para o dobro e a diminuição para a metade dos valores da densidade e do módulo de elasticidade longitudinal. No primeiro caso, quanto maior a densidade, maior é o valor numérico da perda de transmissão na frequência crítica, havendo o deslocamento dessa frequência para valores maiores. No segundo caso, a perda de transmissão na frequência crítica é maior para valores menores do módulo de elasticidade,

ocorrendo o deslocamento dessa frequência para valores mais baixos.

Determinação Analítica

Na análise do isolamento acústico de uma parede é importante a determinação de duas regiões onde as perdas de transmissão são mínimas, ocasionando a transferência de uma significativa parcela da energia sonora. São elas: a coincidência; e as

ressonâncias mecânicas. Executou-se, por isso, a determinação analítica dessas duas regiões.

A Tabela 3 apresenta os valores obtidos nos cálculos das características da alvenaria, que são diferentes nas direções horizontal e vertical, mantendo-se a densidade constante e igual a 1.839 kg/m^3 (valor do ensaio). Uma diferença entre a resposta experimental e a analítica era esperada, tendo em vista a ortotropia da alvenaria.

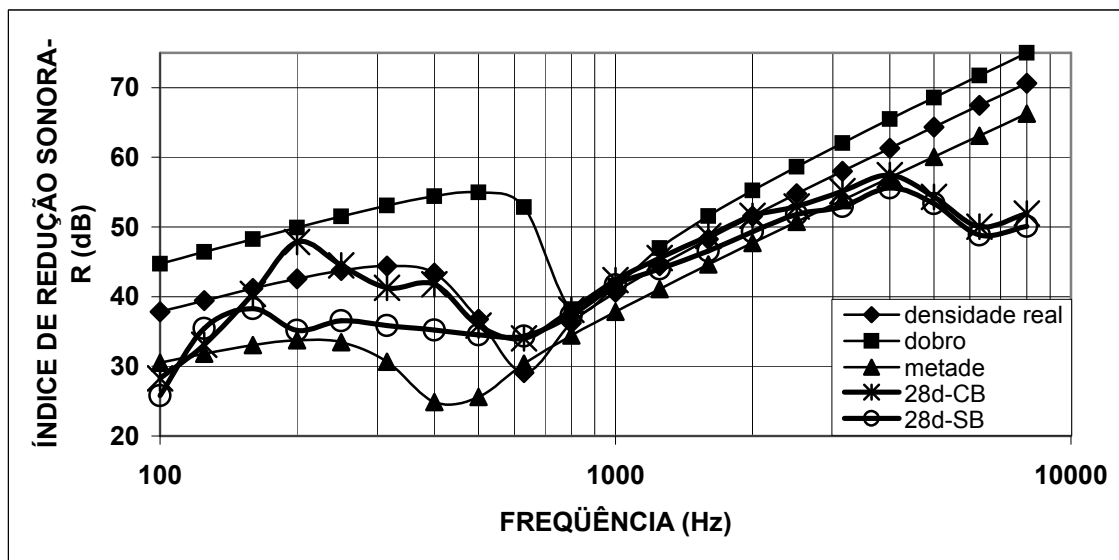


Figura 9 - Influência da alteração da densidade da parede na PT

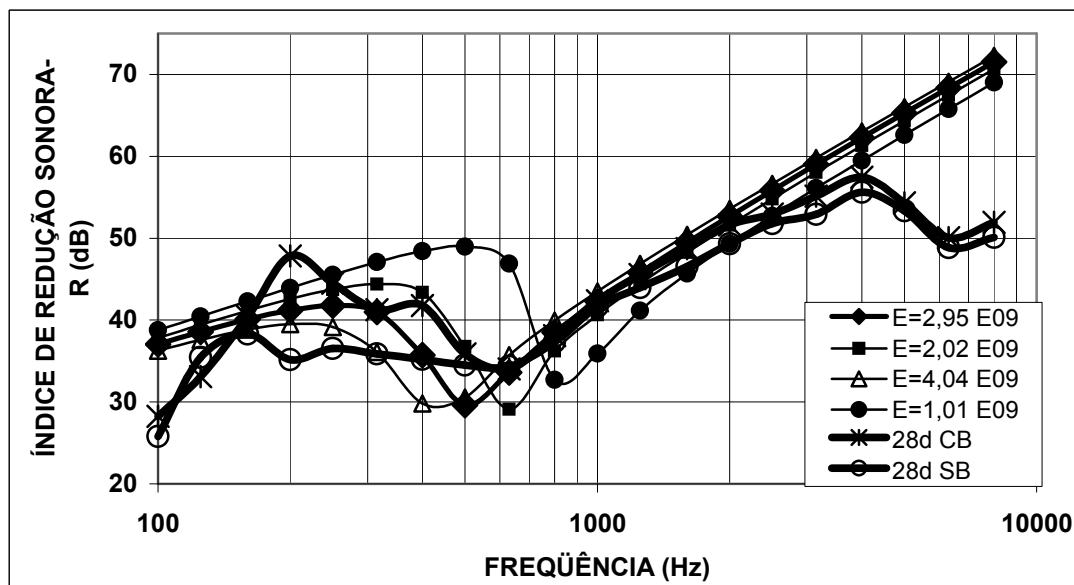


Figura 10 - Influência da alteração do módulo de elasticidade longitudinal da parede na PT

Direção	E × 10E9 (N/m ²)	v	cℓ (m/s)	Fc(Hz)
Horizontal (X)	2,02	0,20	1070	576
Vertical (Y)	2,95	0,22	1298	475

Tabela 3 - Características da parede estudada

A frequência crítica foi calculada pela Equação 04, a qual é válida somente para casos cujo comprimento de onda de flexão é maior do que aproximadamente seis vezes a espessura do painel ($\lambda f > 6h$), segundo Beranek (1980, p. 293).

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 \cdot c_\ell \cdot h} \quad (4)$$

Tendo em vista que a espessura da parede é 10,6 cm, verifica-se que a condição ($\lambda f > 6h$) expressa por Beranek (1980, p. 293), acima referida, alcança no máximo a igualdade, ou seja:

$$\lambda_f = \frac{c_B}{f_c} \quad (5)$$

Ljunggren (1991b, p. 2338) enfatiza, porém, que essa faixa de aplicação da Teoria Clássica de Placas Finas (CREMER et al., 1973) pode ser expandida, tendo como limite três vezes a espessura da parede. Considera-se, portanto,

$$\lambda_f = \frac{c_B}{f_c} = 0,57 > 3 \cdot 0,106 = 0,318 \text{ m.} \quad (6)$$

A partir dessa opção, pode-se calcular a máxima frequência de aplicação da Teoria Clássica de Placas Finas, empregando $\lambda f = 0,318$ e deixando CB em função de f . Obtém-se, então, $f = 2033$ Hz. Esse valor encontrado reforça os resultados obtidos, em que se observa, na comparação das curvas experimentais e numéricas, uma ótima concordância na faixa de frequências entre a crítica e 2.000 Hz. A partir daí, surge uma divergência maior entre as curvas, como pode ser observado na Figura 11.

É importante lembrar que a frequência crítica está localizada na região de coincidência, a qual é definida pelo Método do Patamar (*Plateau Method*), descrito por muitos autores, entre os quais Beranek (1980, p. 300), Reynolds (1981, p. 311), Beranek (1988, p. 305) e Gerges (2000, p.

217). Verificou-se, inicialmente, a aplicabilidade desse método, a partir da avaliação da razão entre a menor dimensão (altura) dividida pela espessura, cujo resultado deve ser maior do que 20. Obteve-se o valor 30,19 para a parede em estudo. Assim, pode-se aplicar o Método do Patamar.

Observa-se que, na aplicação do Método do Patamar sobre as curvas experimentais, a concordância fica prejudicada porque o valor referido para a determinação da largura é muito pequeno, resultando um gráfico deslocado. Salienta-se que as referências bibliográficas, como Beranek (1980, p. 300), Reynolds (1981, p. 311), Beranek (1988, p. 305) e Gerges (2000, p. 217), citam 4,5 como fator de multiplicação para o estabelecimento da largura do patamar, referindo-se simplesmente ao tijolo. Verifica-se que o simples aumento desse fator, para um valor em torno de 8,0, levaria a uma melhor concordância com as curvas experimentais. É importante lembrar, novamente, a necessidade de considerar as diferenças entre as respostas relativas ao tijolo isoladamente e a alvenaria, como um material composto.

A análise dos valores obtidos nas curvas experimentais, na região posterior à frequência crítica, apresentou os resultados referidos na Tabela 4, ou seja, tem-se 9,09 dB/oitava para a parede com conexões elásticas e 8,44 dB/oitava para a parede com conexões rígidas.

O cálculo das frequências de ressonâncias, no caso em estudo, refere-se a uma parede simplesmente apoiada. Essa condição é geralmente aceita, exceto nos casos onde há amarração executada por ferros argamassados. Autores como Szilard (1974, p. 415), Beranek (1980, p. 286) e Méndez (1994, p. 110) recomendam a Equação 7 (ou suas variantes) para o cálculo das frequências de ressonância.

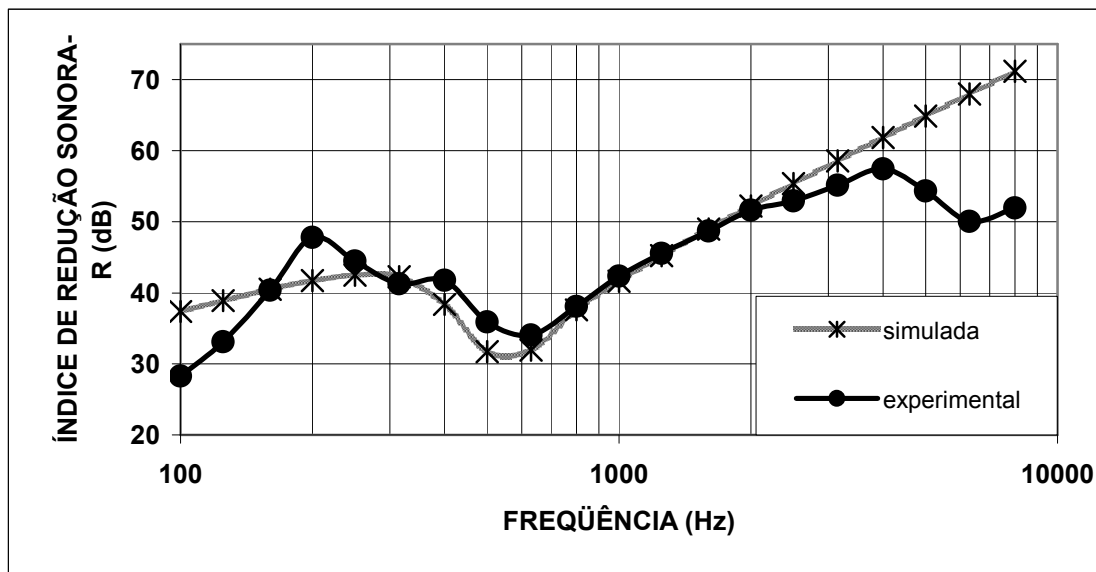


Figura 11 - Comparação da alvenaria simulada com a experimental

Curva	Equação	dB/oitava
28d – CB	$30,2163 \log (x) - 48,6352$	9,09
28d – SB	$28,0383 \log (x) - 43,2267$	8,44

Tabela 4 - Inclinação da reta na parte posterior do Método do Patamar

Considera-se que m e n são números inteiros (0, 1, 2, ...) e, também, que a , b e h correspondem às dimensões da parede (largura, altura e espessura, respectivamente).

$$f_{m,n} = \frac{\pi}{2} \left[\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right] * \sqrt{\frac{B}{\rho * h}} \quad (7)$$

Os resultados obtidos para as primeiras frequências de ressonância da parede de alvenaria estudada estão na Tabela 5, considerando-se que a rigidez B é função do módulo de elasticidade ($2,01 \times 10^9$ N/m²) e do Coeficiente de Poisson (0,2) e que a densidade empregada foi de 1.839 kg/m³.

Os primeiros modos localizam-se em frequências bem abaixo da faixa de excitação (100 Hz a 8.000 Hz), portanto os modos cujas frequências estão assinaladas em cinza não participam da análise. Somente a partir dos modos (0,6), (5,0) e (4,3) encontram-se os modos excitados durante a análise da parede.

Assim, observa-se que a frequência de ressonância fundamental bem como suas primeiras harmônicas, para a parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos, pertencem a uma faixa de frequências

muito abaixo da estudada em acústica arquitetônica, ou seja, de 100 Hz a 5.000 Hz, conforme recomenda a norma ISO 140.

Comparação dos Resultados

A frequência crítica de coincidência, calculada pela Equação 04 (onde: c = velocidade do som no ar; h = espessura da parede; e c_ℓ = velocidade da onda longitudinal no sólido), foi de 576 Hz (horizontal) e 475 Hz (vertical). Esses valores são considerados próximos ao encontrado experimentalmente, o qual coincidiu com o obtido na simulação numérica, ou seja, 630 Hz.

Os resultados da simulação numérica alcançaram valores muito próximos dos experimentais. Isso se deveu, em grande parte, à determinação específica para a alvenaria dos dados de entrada no programa. Observou-se, também, que o programa foi desenvolvido seguindo a Teoria de Placas Finas e, por isso, não reconheceu a existência do vale devido à ressonância de espessura da parede.

Outra constatação foi a pequena diferença entre os resultados referentes à alvenaria isotrópica e a ortotrópica, mostrada na Figura 13, que apresenta curvas experimentais, com conexões elásticas (CB)

e rígidas (SB), comparadas com as simuladas. Constatase que, para o caso de utilização do AutoSEA, deve-se optar pelo emprego do modelo isotrópico, devido às dificuldades inerentes à consideração da alvenaria como material ortotrópico e a pequena diferença obtida nas curvas de resposta. Ressalta-se, no entanto, que a ortotropia da alvenaria é uma realidade. Precisa ser

levada em conta, na análise do isolamento acústico das edificações, pois influencia, por exemplo, a diferença detectada na velocidade das ondas que se deslocam em diferentes direções na parede.

Os 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 Hz a 8.000 Hz.

n	0	1	2	3	4	5	6
m							
0		3,1	12,2	27,5	49,0	76,5	110,1
1	5,0	8,1	17,3	32,6	54,0	81,5	115,2
2	20,1	23,1	32,3	47,6	69,0	96,6	130,2
3	45,2	48,3	57,4	72,7	94,2	121,7	155,3
4	80,4	83,4	92,6	107,9	129,3	156,8	190,5
5	125,6	128,6	137,8	153,1	174,5	202,0	235,7
6	180,8	183,9	193,0	208,3	229,8	257,3	291,0

Tabela 5 - Primeiros modos da parede de alvenaria estudada

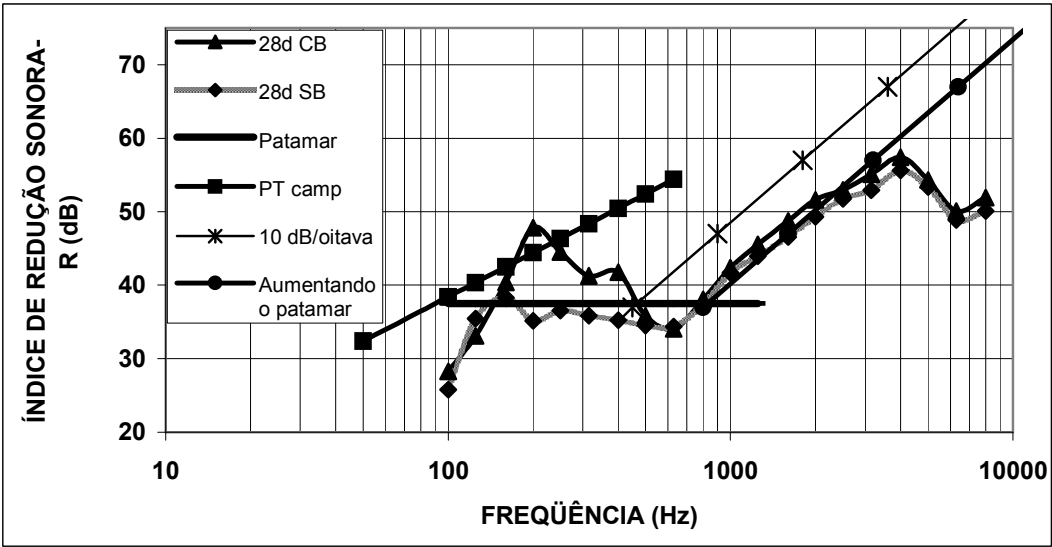


Figura 12 - Método do Patamar aplicado para alvenaria de tijolos cerâmicos maciços

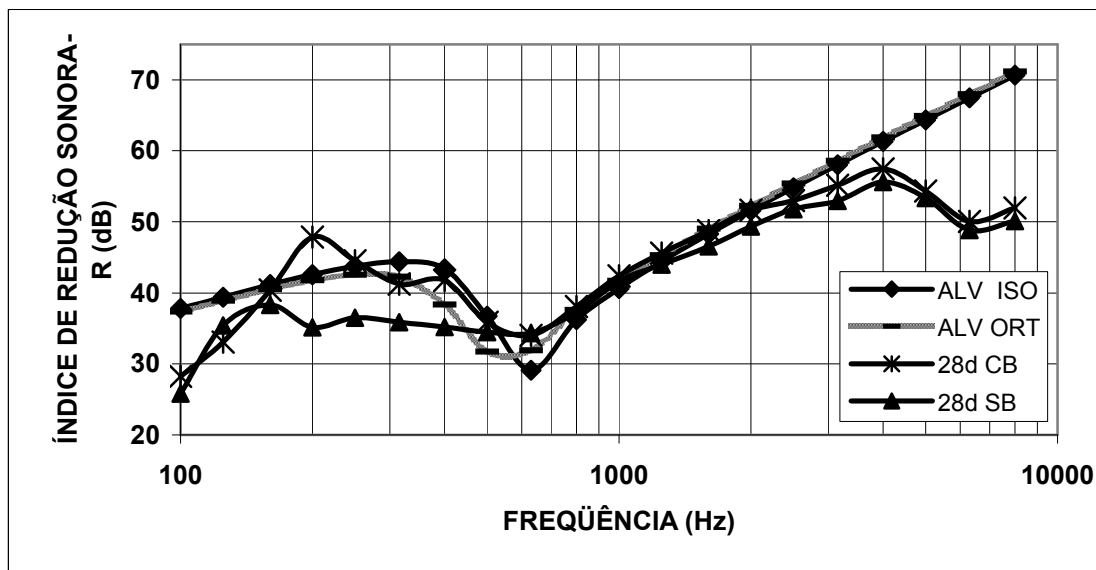


Figura 13 - Comparação da alvenaria simulada como isotrópica e ortotrópica

Considerações finais

O estudo acústico de edificações, ainda em fase de projeto, não é habitual. Os métodos mais conhecidos são complexos e demorados. As propriedades dos materiais e das técnicas construtivas não estão caracterizadas. O emprego de SEA na construção civil permite trabalhar-se a performance média de um conjunto de paredes similares (com as mesmas propriedades gerais), e não uma solução determinística, exata, para um problema específico. Ainda na fase de projeto pode-se identificar alterações capazes de minorar os problemas decorrentes de ruído e vibrações, de forma rápida, confiável e econômica. Além disso, ao trabalhar-se com SEA, pode-se incluir a resposta ressonante e a não-ressonante da parede, conforme ressalta Craik (1996, p. 4).

Aos ensaios de módulo de elasticidade perpendicular às juntas de argamassa – habitualmente executados nos laboratórios de materiais de construção civil – pode-se acrescentar apenas a identificação das deformações (com simples relógios comparadores), obtendo-se, assim, quase todas as informações necessárias à aplicação de SEA.

A questão mais complexa é a determinação do amortecimento da parede. Revisões na Norma ISO 140 já estão sendo propostas. Schmitz e Méier (2000, p. 130) consideram que o fator de perda total deve acompanhar os relatórios de ensaios de transmissão sonora, devido à importância de tal informação. Discutem, também, o emprego de excitação contínua (por *shaker*) em substituição à excitação por impacto (com martelo). Agrega-se a

essas preocupações, a partir da experiência do presente estudo, a recomendação do emprego de uma célula de força, caso seja mantida a recomendação de excitação por impacto, a fim de identificar a intensidade da batida, pois ela influencia a resposta obtida. A especificação do acelerômetro a ser empregado, evitando que a sua sensibilidade capte os ruídos espúrios, constitui-se em outra recomendação, visando a alterações na norma.

Concluiu-se, portanto, que o desenvolvimento de uma metodologia clara e eficaz para a determinação do fator de amortecimento total (bem como de seus constituintes, perda interna e por acoplamento) para as paredes das edificações é um dos trabalhos mais urgentes a ser realizado na área de acústica arquitetônica.

Uma das questões normalmente enfocadas para justificar o deficiente desempenho acústico das edificações é o aumento no custo da construção. Estudos específicos sobre custos de implantação do isolamento acústico em edificações, como os apresentados por Kuerer (1997) e Amarilla (1992), embora realizados em outros países (com realidades socioeconômicas e tecnológicas distintas), servem para repensar essa afirmativa. A prevenção da patologia, mediante um estudo do projeto e detalhada especificação de materiais, equipamentos e formas construtivas, pode minimizar custos de reparos e aumentar a satisfação do usuário.

O estudo aqui apresentado refere-se à alvenaria de tijolos maciços cerâmicos e necessita ser estendido para outros materiais e técnicas construtivas empregadas no Brasil, pois tais características

variam de região para região, o mesmo acontecendo com os níveis de exigência dos usuários das edificações.

Com isso, considera-se que a rapidez e a facilidade do estudo do desempenho acústico das edificações podem, em breve, estar ao alcance dos profissionais da área e, em decorrência disso, contribuir para a melhoria na qualidade de vida das pessoas.

Referências

AMARILLA, Beatriz Cecília. Influence of compactness on housing sound insulation costs. **Applied Acoustics**, n. 35, p. 203-219, 1992.

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.

BRÜEL; KJAER. Buildings Acoustics Analyzer Type 4418. Instruction Manual. May 1982. 125p.

CRAIK, R. J. M. **Sound Transmission through buildings using Statistical Energy Analysis**. Hampshire, Gower, 1996. 261 p.

CREMER, L.; HECKL, M; UNGAR, E. E. **Structure-borne sound**. Berlin: Springer-verlang, 1973.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 2. ed. revista e ampliada. Florianópolis: NR Editora, 2000. 675 p.

KUERER, Ralf C. Classes of acoustical comfort in housing: improved information about noise control in buildings. **Applied Acoustics**, n. 52, p. 197-210, 1997.

LJUNGGREN, Sten. Airborne sound insulation of thick walls. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 89, n. 5, p. 2338-2345, 1991a.

_____. Airborne sound insulation of thin walls. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 89, n. 5, p. 2314-2337, 1991b.

MÉNDEZ, Antonio Miguel et al. **Acústica arquitectónica**. Buenos Aires: Universidad del Museo Social Argentino, 1994. 238 p.

OSIPOV, A.; MEES, P.; VERMEIR, G. Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings. **Applied Acoustics**, v. 52, n. 3/4, p. 273-288, 1997.

PAIXÃO, D. X. da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando Análise Estatística de Energia (SEA)**. 2002. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

REYNOLDS, Douglas D. **Engineering Principles of Acoustics**. Boston: Allin and Bacon Inc., 1981. 641 p.

SCHMITZ, A.; MEIER, A. Total loss factor in building acoustics: measurement and application. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19., 2000. **Anais...** Belo Horizonte, 15-19 abr. 2000. P. 111-132.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), através do programa PICDT, e aos alunos e aos técnicos que colaboraram na execução dos ensaios.