

Influência de propriedades físico-mecânicas para a determinação da frequência de coincidência no isolamento sonoro de paredes de alvenaria

Influence of the physical-mechanical properties in the establishment of the coincidence frequency in the sound isolation of masonry walls

Dinara Xavier da Paixão
Samir Nagi Yousri Gerges

Resumo

Este artigo mostra a influência de propriedades físico-mecânicas, tais como densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, na identificação da frequência crítica de coincidência, para o estudo do isolamento sonoro de uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos. Criou-se um banco de dados com parâmetros determinados em laboratório e obtidos na bibliografia para a execução de simulação computacional, com software que emprega Análise Estatística de Energia (SEA). Os resultados simulados foram comparados com os experimentais, baseado na norma ISO 140. Observou-se que o parâmetro mais influente é a densidade, tanto para a análise da alvenaria como material isotrópico ou ortotrópico.

Palavras-chave: Isolamento acústico. Perda de transmissão. Conforto. Alvenaria.

Abstract

The article shows the influence of physical-mechanical properties (density, modulus of elasticity, and coefficient of Poisson) in the identification of the coincidence critical frequency in the study of the sound isolation of a ceramic solid brick masonry wall. A data-base of parameters determined in laboratory and obtained in the literature was created for carrying out computational simulation using a software that employs Energy Statistical Analysis. The computational simulation and experimental results were compared, based on the ISO 140 standard. The most influential parameter is the density, both for the analysis of masonry as an isotropic or orthotropic material. .

Keywords: Acoustic isolation. Transmission loss. Comfort. Masonry

Dinara Xavier da Paixão
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa
Maria
Av. Roraima, s/n - Campus -
Camobi
Santa Maria - RS - Brasil
CEP 97105-900
Tel.: (55) 3220-8144
E-mail:
dinarapaixao@smail.ufsm.br

Samir Nagi Yousri Gerges
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa
Catarina
Campus Universitário Trindade
Florianópolis -SC - Brasil
CEP 88040-900
Tel.: (48) 3232-0826
E-mail: gerges@mbox1.ufsc.br

Recebido em 25/01/07
Aceito em 28/08/07

Introdução

No trabalho utilizaram-se resultados experimentais, referências bibliográficas e simulações numéricas para analisar no isolamento acústico de uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos a influência das propriedades físico-mecânicas do elemento em estudo.

Avaliou-se, comparativamente, a localização da frequência de coincidência, identificada em ensaio realizado em Câmaras Reverberantes, segundo a norma ISO 140, com o valor obtido em software comercial, que utiliza a Análise Estatística de Energia (SEA).

Caracterizou-se o isolamento acústico de uma parede de 4,10 m x 3,20 m (13,12 m²), construída nas Câmaras Reverberantes de Transmissibilidade do Setor de Acústica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Os resultados dos ensaios serviram de referência para a análise das simulações.

Para o emprego do software foi necessário introduzir no banco de dados os valores relativos aos parâmetros físico-mecânicos, tendo em vista a inexistência de materiais relativos à alvenaria. Assim, compilaram-se valores citados em bibliografias da área de construção civil, comparando-os com as publicações da área de acústica. Dados experimentais relativos aos tijolos maciços cerâmicos, à argamassa e às miniparedes foram obtidos no Setor de Alvenaria do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria.

Parâmetros físicos-mecânicos na alvenaria

A alvenaria é um material composto, por isso suas propriedades dependem das características individuais dos elementos que a constituem. Para essa pesquisa, buscaram-se subsídios referentes aos materiais e às técnicas de determinação dessas propriedades, especialmente do sul do Brasil, tendo em vista que os ensaios experimentais utilizaram materiais dessa região.

Santos (2001) destaca que, antigamente, a análise sobre a alvenaria era simples, considerando-a com um comportamento contínuo, elástico e isotrópico. Atualmente, com a evolução das técnicas numéricas, busca-se respeitar a sua não-linearidade. Lourenço (1996) focaliza a análise não-linear de alvenarias, destacando técnicas de homogeneização, nas quais o comportamento macro do elemento composto pode ser predito a partir das propriedades micro de seus constituintes.

Salienta que os micromodelos são a melhor ferramenta disponível para analisar o comportamento da alvenaria.

As propriedades físicas são úteis na avaliação do material em termos de aparência, peso, permeabilidade e retenção de água, segundo Somayaji (2001). Ele inclui, nessa classificação, estudos sobre densidade, porosidade, conteúdo de vazios, conteúdo de mistura, peso específico, permeabilidade e micro/macro estrutura. Considera, também sob essa classificação, propriedades como textura, cor e forma. No estudo das propriedades mecânicas, cita que elas medem a resistência de um material para cargas ou forças aplicadas, em relação à tensão ou à capacidade de deformação. Afirma que um material com maior deformação, submetido a uma dada tensão, é menos rígido do que outro que apresenta menor deformação sob a mesma tensão.

É importante conhecer-se, através do módulo de elasticidade, a capacidade de deformação do material (sua rigidez). Somayaji (2001) enfatiza três módulos de elasticidade: tração, compressão e cisalhamento. Destaca que, ao ser omitida a denominação, trata-se de tensão normal de tração e compressão, caracterizando o chamado Módulo de Young.

Outro índice necessário para a avaliação da performance acústica da alvenaria, através do programa computacional empregado no presente trabalho, é o Coeficiente (ou razão) de Poisson. Essa grandeza é definida como a razão entre a deformação lateral (normal à direção axial) pela deformação axial (carregamento ao longo do eixo). Somayaji (2001) diz que, para a maioria dos materiais de construção civil, ela está entre 0,15 e 0,40, mas na tabela mostrada em seu livro não constam materiais como alvenaria, tijolo ou argamassa. Yokel e Fattal (1976) estimam o Coeficiente de Poisson na faixa entre 0,10 e 0,25, destacando que não existem muitas informações sobre a razão de Poisson para a alvenaria de argila.

Santos (2001) afirma que a argamassa tem suas propriedades afetadas pelos materiais que a constituem e, em geral, é menos resistente e mais deformável que os blocos, porém apresenta um Coeficiente de Poisson maior. Ela é a principal responsável pelas alterações no módulo de elasticidade da parede, pois é mais flexível que o tijolo e está confinada e submetida a um estado triaxial de tensões, conforme detalhou Mohamad (1998).

A argamassa é o elo de união entre os tijolos, atuando na distribuição das tensões e acomodação das deformações. Existem diversos tipos e, entre as mais empregadas, encontram-se as chamadas mistas: cimento + cal (aglomerante) + areia (agregado). As condições de exposição e solicitação da alvenaria são, segundo Prudêncio Jr (1986), o fator determinante na escolha da argamassa, pois não existe uma ideal, capaz de otimizar, simultaneamente, todas as propriedades.

Quando a trabalhabilidade mantém-se a mesma, o Módulo de Elasticidade melhora com a resistência do tijolo e da argamassa, decrescendo com o aumento da espessura da junta por unidade de comprimento, medida paralelamente à direção da força compressiva (SOMAYAJI, 2001).

A densidade superficial para uma parede de alvenaria, citada por Somayaji (2001), é de 181 kg/m². O autor afirma que o módulo de elasticidade é afetado pelo desenho da parede, a resistência da unidade, a resistência da argamassa e o acabamento da parede. Assim, para um mesmo revestimento, o módulo de elasticidade melhora com a resistência do tijolo e da argamassa e decresce com o aumento na espessura total de pontos de argamassa, por unidade de comprimento, medida paralelamente à direção da força compressiva.

A acústica e os parâmetros físico-mecânicos da alvenaria

A ortotropia das paredes tem sido detectada por pesquisadores da área de Acústica que trabalham com os diferentes tipos de alvenaria. O centro de pesquisas alemão Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), por exemplo, implementou uma avaliação de Fator de Perda Total (TLF). O projeto foi subdividido em duas partes: a primeira buscou estabelecer procedimentos de medição, e a segunda reuniu doze institutos para verificar a variabilidade das medições. A amostra dessa segunda fase foi uma parede de tijolos maciços de cálcio-silicato, com reentrâncias para a fixação em sua face maior e sistemas de ranhuras macho/fêmea nas laterais. Entre as conclusões obtidas destacam-se os efeitos de discrepâncias observadas nas medições de velocidade das ondas longitudinal e de flexão (SCHMITZ; MEIER, 2000). Observa-se que esse comportamento diferenciado precisa ser considerado na análise do desempenho acústico.

Craik (1996) destacou os efeitos de mudanças de projeto, na transmissão sonora nas edificações. A partir de um modelo SEA (*Statistical Energy*

Analysis), o autor avaliou as mudanças de propriedades do material (densidade, Módulo de Young, Razão de Poisson e Fator de Perda Interna) e alterações de dimensões (tamanho da sala e espessura de paredes e pisos). Concluiu que as mudanças na espessura e densidade das paredes e pisos têm um efeito maior na transmissão sonora do que as alterações no Módulo de Young e Razão de Poisson. E, ainda, que o amortecimento pode ter um efeito significativo na transmissão, particularmente distante da fonte.

Os livros de Acústica, como Kinsler e Frey (1967), Kuttruff (1979), Makrinenko (1994), Méndez et al. (1994), Parkin et al. (1979), Recuero e Gil (1993) e Turner e Pretlove (1991), ao caracterizarem os materiais, não mostram informações sobre a alvenaria. Em alguns casos, encontra-se citado apenas o tijolo ou bloco, como em Beranek (1980), Beranek (1988), Bies e Hansen (1988), Fahy (1985) e Gerges (2000). Os dados referentes à argamassa foram encontrados somente em Fahy (1985), que refere os valores relativos a um reboco (sem caracterização de materiais ou traço): módulo de elasticidade igual a $7,0 \times 10^9$ N/m²; densidade igual a 1.200 kg/m³ e velocidade do som igual a 2.420 m/s.

A Tabela 1 resume os dados sobre alvenaria indicados nos livros de Acústica dos seguintes autores: Beranek (1988), Bies e Hansen (1988), Fahy (1985) e Gerges (2000).

Resultados experimentais

Os ensaios físico-mecânicos 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 (executada nas Câmaras Reverberantes) e com a trabalhabilidade ajustada pelo mesmo pedreiro.

Propriedades do tijolo maciço cerâmico

Os tijolos adquiridos atendiam à NBR 8041:1983a (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Forma e dimensões – Padronização) e à NBR 7170:1983b (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Especificação). Retiraram-se do lote, aleatoriamente, cinco tijolos para os ensaios físico-mecânicos. Mediram-se as três dimensões (comprimento, largura e altura) duas vezes e nos terços extremos de cada tijolo, com o emprego de um paquímetro. 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) para a determinação da absorção d'água.

Para atender à NBR 6460:1983c (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Verificação da resistência à compressão – Método de ensaio), cada tijolo foi cortado ao meio, e suas metades unidas com argamassa. Após serem capeados em ambas as faces com traço 1:1 (cimento e areia), secaram ao ar por sete dias e, após a imersão em água por 24 horas, houve o rompimento dos corpos de prova para a determinação da resistência à compressão dos tijolos. A síntese dos resultados constitui a Tabela 2.

Propriedades da argamassa

Utilizou-se argamassa com traço 1:1:6 (cimento: cal: areia) na construção da parede e de doze

miniparedes. Esse traço é um dos mais empregados nos estudos envolvendo argamassa e/ou alvenaria. Optou-se por não peneirar a areia e não controlar o fator água/cimento, deixando o ajuste da trabalhabilidade para o pedreiro, o que caracteriza uma situação similar à encontrada nas obras.

O ensaio de abatimento (relativo à trabalhabilidade) 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 sete, quatorze e vinte e oito dias, após a cura em câmara úmida. Empregou-se a norma NBR 7215:1991. A resistência à compressão média está apresentada na Tabela 3.

Na Figura 1, visualiza-se um dos ensaios relativos à argamassa empregada na execução das miniparedes e da parede principal analisada.

Autor	Material	Módulo de Young E (10 ⁹ N/m ²)	Densidade ρ (kg/m ³)	Coefficiente de Poisson	Velocidade do som (m/s)	Fator de Perda η	Produto da densidade superficial e frequência crítica (Hz-g/m ²)	Perda de transmissão de incidência normal na freq. crítica (dB)
Gerges	Tijolo	25	1.800		3.700			
Beranek	Tijolo		1.900-2.300			0,01(*)	34.700-58.600	48,5– 53
Fahy	Tijolo	16	1.900-2.200		2.800			
Bies & Hansen	Tijolo	16,2	1.800		3.000	0,01		
Bies & Hansen	Bloco de alvenaria	4,8	900		2.300	0,005-0,02		

Fonte: Paixão (2002, p. 17) (*) Fator de amortecimento interno em 1.000 Hz

Tabela 1 - Propriedades dos materiais

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

Fonte: Paixão (2002, p. 82)

Tabela 2 - 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

Fonte: Paixão (2002, p. 83)

Tabela 3 - Resistência à compressão da argamassa



Figura 1 - Rompimento de corpo-de-prova de argamassa

Propriedades das miniparedes

Construíram-se doze 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 x 63 cm. Após vinte e oito dias, elas foram capeadas nas faces superior e inferior, com cimento e areia (traço 1:1), para uma melhor distribuição de tensões. Houve o ensaio à compressão, com carregamento perpendicular às juntas de argamassa, num grupo. No outro grupo o carregamento foi paralelo às juntas de argamassa. 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. Os resultados constituem a Tabela 4.

Análise dos ensaios para a caracterização dos parâmetros físico-mecânicos

Os resultados dos ensaios físico-mecânicos estabeleceram uma ordem de grandeza real para a caracterização da parede em estudo. Empregaram-se, por isso, procedimentos adotados nas obras, em

lugar dos tradicionalmente executados em laboratório. Isso influenciou os resultados. A areia, por exemplo, não foi peneirada, e o fator água/cimento não foi quantificado. Com isso, a resistência da argamassa apresentou valor baixo, se comparada às executadas em laboratório com o mesmo traço.

Em relação ao tijolo, os resultados dos ensaios atenderam às expectativas. Para a determinação dos módulos de elasticidade e Coeficientes de Poisson, no entanto, houve dificuldades devido à falta de equipamentos e informações bibliográficas quanto a procedimentos experimentais específicos.

Lourenço (1996) ressalta a necessidade da alvenaria em análise possuir tamanho suficiente para estar submetida aos estados homogêneos de tensão e deformação. Destaca que a utilização de um modelo só é precisa com uma completa descrição dos materiais constituintes. Isso justifica o dimensionamento adotado para as miniparedes.

Os resultados experimentais obtidos atenderam às necessidades da pesquisa. Recomenda-se, porém, que seu emprego com outros fins seja analisado quanto à adaptabilidade, ou não, a outras utilizações.

A Figura 2 exemplifica os ensaios das miniparedes executados para a determinação dos parâmetros mecânicos da parede.

Ensaio para a determinação do índice de redução sonora da parede

Para a determinação do Índice de Redução Sonora (R) foi construída uma parede (13,12 m²) de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos, sem revestimento, nas Câmaras de Transmissibilidade do Setor de Acústica da UFSM.

A fim de minimizar a transmissão da energia sonora da parede em estudo para as paredes da Câmara, bem como identificar, com precisão, a frequência de coincidência, empregou-se uma borracha em todas as bordas laterais e superior da parede de alvenaria. Para garantir a perfeita estanqueidade da ligação, sobre a borracha foi

colocada uma camada de silicone. Esse tipo de ligação é tratado no texto – e nos gráficos – como conexão elástica ou “com borracha” (CB).

Após a execução dos ensaios com conexões elásticas, a borracha e o silicone foram retirados e substituídos por argamassa convencional, no mesmo traço empregado para o levantamento da parede. Isso caracterizou as chamadas conexões rígidas ou sem borracha (SB).

Todos os ensaios seguiram a norma ISO 140 – parte 3, observando-se que a frequência de coincidência é 630 Hz, o que fica bem enfatizado com o uso de conexões elásticas.

A Figura 3 exemplifica o Índice de Redução Sonora obtido, aos vinte e oito dias, para os dois tipos de conexões: elásticas (CB) e rígidas (SB).

Tipo de Carregamento	Módulo de Elasticidade x 10 ⁹ N/m ²	Coefficiente de Variação %
Perpendicular às juntas de argamassa	E _y = 2,95	17,35
Paralelo às juntas de argamassa	E _x = 1,89	23,80

Fonte: Paixão (2002, p. 85)

Tabela 4 - Módulos de elasticidade da parede de tijolo maciço cerâmico



Figura 2 - Rompimento de miniparede no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

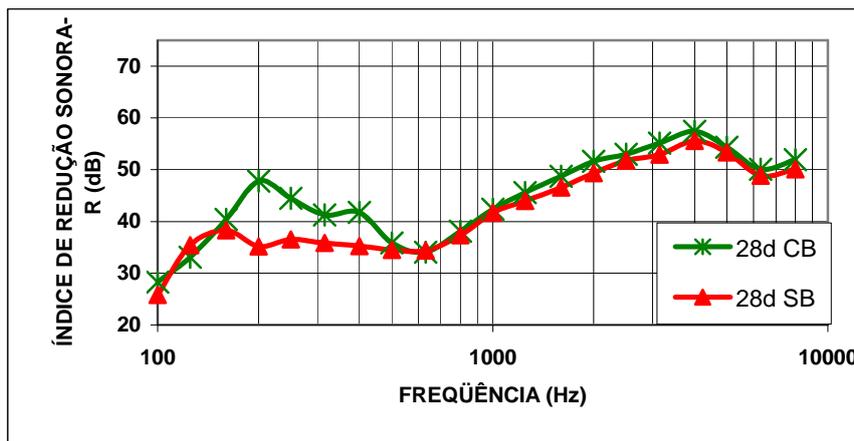


Figura 3 - Ensaios experimentais para a determinação do Índice de Redução Sonora

Simulações numéricas

A determinação da frequência crítica da parede de tijolos maciços cerâmicos, para diferentes opções dos parâmetros físico-mecânicos da alvenaria, foi realizada mediante simulações das Câmaras Reverberantes do Setor de Acústica da UFSM e do elemento em estudo, executadas com o programa AutoSEA (versão 2.2.2), que emprega a Análise Estatística de Energia (SEA).

Considerações sobre a SEA

A abordagem SEA (*Statistical Energy Analysis*), conhecida no Brasil como Análise Estatística de Energia, é usada em Acústica e Vibrações para a solução de problemas que possuem várias fontes e trajetórias de ruído, como transmissões por vias aéreas, estruturais e/ou aquáticas.

Lyon e DeJong (1995) afirmam que a denominação SEA surgiu no início dos anos 1960, designando um ramo de estudos de sistemas dinâmicos. Sua teoria fundamental, segundo Gerges (2000), foi estabelecida ainda naquela década, devido às necessidades advindas da predição da resposta vibroacústica de grandes estruturas marítimas (navios e submarinos) e aeroespaciais (foguetes e mísseis). Ressalta, ainda, que nos anos 70 e 80 as pesquisas acadêmicas identificaram um maior número de aplicações para SEA, enquanto o crescimento no uso de computadores, nos anos 90, facilitou a ampliação de seu emprego.

A importância da utilização dessa metodologia em edificações é enfatizada porque ela pode ser empregada para diferentes espectros de médias e altas frequências, atendendo à maioria das aplicações, que correspondem à faixa de 100 Hz a

8 KHz. Arenas (1997) afirma que “O método SEA tem uma infinidade de aplicações e permite, inclusive, estimar as perdas de transmissão por flancos e conexões de estruturas complexas com densidades modais definidas”.

Lyon e DeJong (1995) enfatizam que a SEA não se constitui em uma alternativa a outras abordagens, mas num sistema de análise dinâmica integrada. O emprego de SEA em edificações é, ainda, incipiente, apresentando uma tendência de desenvolvimento. Em outras áreas (como aeroespacial, automobilística, aeronáutica), no entanto, a aplicação de SEA já está consolidada.

Síntese do método SEA

Ao trabalhar-se com Análise Estatística de Energia, cria-se um sistema, com seus subsistemas, visando ao estudo do balanço de energias. Cada subsistema permite caracterizar a energia modal local média para essa parte de um sistema global mais complexo.

Avalia-se o fluxo de potência entre dois subsistemas e a potência dissipada em cada subsistema. O fluxo de potência é proporcional aos fatores de perda por acoplamento e à diferença de energia modal média. A potência dissipada é proporcional ao nível de energia de um subsistema e ao fator de perda por amortecimento.

Jagt e Martin (1999) enfatizam que “[...] as características modais têm que ser checadadas”, para verificar a aplicabilidade da abordagem SEA na descrição de uma transmissão sonora específica.

A potência de entrada pode ser decorrente de fontes sonoras e estruturais, ou da excitação por fronteiras turbulentas, entre outros fatores. O nível de energia é a variável a ser determinada. O equilíbrio energético, necessário à utilização de

SEA, baseia-se no fato de que toda a energia que entra em um subsistema deve ser igual a que sai, seja por dissipação e/ou transmissão.

Aplicabilidade de SEA às edificações

Nas discussões sobre a validade de SEA, o número mínimo de modos para a precisão da média estatística é sempre enfatizado. Não existe consenso. Faixas mínimas de dois a trinta modos por banda de frequência já foram sugeridas.

É importante lembrar que a simples consideração do número de modos por banda não é suficiente para determinar a aplicabilidade de SEA. Craik (1996), por exemplo, recomenda o emprego de outro parâmetro, o fator de superposição modal (**M**), definido como a razão entre a largura de banda modal (largura de banda de meia-potência ou a largura de banda efetiva na qual $\pi/2$ vezes mais alto) pelo espaçamento da frequência média entre modos.

Se a superposição modal é menor do que 1, parte do espectro de frequência não terá amortecimento controlado, que é uma das exigências de SEA. Craik (1996) afirma que, para uma parede de alvenaria típica, “Dois modos/banda é suficiente para dar uma superposição modal de 1”.

No presente trabalho, as verificações de aplicabilidade foram realizadas e comprovadas.

Programa Computacional Utilizado

Utilizou-se o programa comercial denominado “AutoSEA versão 2.2.2”, da *Vibro-Acoustic Sciences*, em que são criados pontos (ou nós) em um espaço de três dimensões, os quais definem a geometria dos elementos (ou subsistemas) que constituem o modelo (ou sistema). Existe a possibilidade de importar esses pontos de outros modelos ou programas. Os subsistemas podem ser estruturais e acústicos (vigas, anéis, placas retas e curvas, cilindros, abóbodas, fluido semi-infinito, cavidades acústicas e dutos acústicos).

Os dados do material a ser usado são inicializados ou selecionados no “banco de dados” existente no AutoSEA. Especificam-se as propriedades físicas do subsistema, caracterizando o material, a espessura e o tipo de elemento – por exemplo, vigas e placas (uniformes, sanduíches, compostas e reforçadas). Em continuação, definem-se as propriedades do espectro de amortecimento estrutural ou acústico nas seções “*Damping*” e “*Absorption Coefficient*”. Seleciona-se, então, o tipo de subsistema, criando-o. São estabelecidas as conexões, adicionadas fontes de potência e, em

seguida, resolvido o sistema, plotando-se os resultados. O modelo pode ser gravado (.va2) ou exportado (.ntf). É permitida a análise gráfica e das planilhas, determinando, para cada subsistema, informações como a potência de entrada, a perda de potência, a energia modal, a densidade modal, o fator de perda por amortecimento, o número de onda, os modos em banda, a energia, a velocidade, a aceleração e a pressão sonora.

O processo de modelagem é o principal responsável pela qualidade ou validade dos resultados obtidos, por isso mereceu grande atenção.

Simulações realizadas

Definiu-se a frequência de coincidência, importante para o isolamento acústico. Constatou-se que o programa foi desenvolvido para placas finas, por isso não reconhece o comportamento do isolamento da parede como um todo, pois ignora o vale (decréscimo no isolamento) que surge em altas frequências, devido à espessura.

Todos os parâmetros necessários ao programa computacional foram determinados, pois não existia nenhum material de edificações no banco de dados de materiais ortotrópicos e, entre os isotrópicos, havia apenas um concreto, sem qualquer caracterização (traço, componentes, resistência, etc.).

As simulações computacionais são apresentadas divididas em dois grupos: parede isotrópica ou ortotrópica. Em geral, os trabalhos sobre transmissão sonora em edificações referem-se à alvenaria como isotrópica, devido à dificuldade de parâmetros que permitam tratá-la como ortotrópica.

Alvenaria isotrópica

No banco de dados, para materiais isotrópicos, incluiu-se para alvenaria de tijolo maciço cerâmico: ρ (densidade) = 1.839 kg/m³; E (Módulo de Elasticidade) = 2,02 E09 N/m²; G (Módulo de Cisalhamento) = 8,417 E08 N/m²; e ν (Coeficiente de Poisson) = 0,2.

Apresentam-se, a seguir, simulações realizadas com a alteração desses valores, mantidos os demais constantes (quando possível), a fim de obter-se, com clareza, a influência do seu comportamento na determinação da frequência de coincidência, ao estudar-se o isolamento acústico da parede.

Módulo de Elasticidade

Nas simulações, efetuou-se a variação do Módulo de Elasticidade (**E**) e, conseqüentemente, do Módulo de Cisalhamento (**G**), fixando-se a absorção das salas de 1%, $\nu = 0,2$, amortecimento na parede de 1%, $\rho = 1.839 \text{ kg/m}^3$, e NPS de entrada experimental (ou seja, o valor medido na Câmara de Emissão, na realização dos ensaios em laboratório).

Os valores de E usados nas simulações foram:

- o experimental $E_y = 2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$, resultante do ensaio com carregamento perpendicular às juntas de argamassa, de uso corrente na construção civil e executado para esse fim específico;
- o calculado para a direção “X”, a partir do E_y e dos ν experimentais: $E_x = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$;
- o dobro do calculado: $E_x = 4,04 \text{ E}9 \text{ N/m}^2$; e
- a metade do calculado: $E_x = 1,01 \text{ E}9 \text{ N/m}^2$.

Houve conseqüente alteração no Módulo de Cisalhamento ($G = 1,229 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$) para, respectivamente, $G = 8,417 \text{ E}08 \text{ N/m}^2$, $G = 1,683 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ e $G = 4,208 \text{ E}08 \text{ N/m}^2$.

A variação para o dobro e a metade do valor de E_x permite avaliar o comportamento da curva em função do Módulo de Elasticidade.

A Figura 4 mostra os resultados obtidos. O aumento do E gera uma diminuição na frequência de coincidência, que foi obtida, experimentalmente, em 630 Hz. Esse valor só foi identificado na curva decorrente de $E_x = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$. Nas simulações, os valores decresceram, com o aumento de E. Ao diminuí-lo, aumentou-se a frequência para 800 Hz. Mesmo identificando a frequência de coincidência junto à experimental, o emprego de $E_x = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ conduz a um Índice de Redução Sonora inferior (+ ou - 5 dB). O $E_y = 2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ identifica o valor numérico, mas não como a frequência de coincidência. Nas frequências superiores à experimental, há aumento no “R” para E maiores.

As curvas experimentais usadas como referência são 28d CB (vinte e oito dias com borracha na ligação parede/câmaras) e 28d SB (vinte e oito dias com conexões rígidas, sem borracha). Observa-se que a retirada das conexões elásticas (borrachas) ocasiona um patamar em baixas frequências.

Coefficiente de Poisson

Nas simulações com diferentes Coeficientes de Poisson empregaram-se, além do valor medido no LMCC/UFSM (0,22), os dois extremos da faixa de valores recomendados na bibliografia: 0,11 e 0,40. Todos os dados de entrada foram fixados como nas simulações descritas anteriormente, inclusive o Módulo de Elasticidade, nesse caso considerado $E = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$. A Figura 5 mostra os resultados.

Em decorrência das alterações no Coeficiente de Poisson (de 0,11 a 0,40), os Módulos de Cisalhamento empregados foram: $G = 9,099 \text{ E}08 \text{ N/m}^2$ e $G = 7,214 \text{ E}08 \text{ N/m}^2$, respectivamente. Mesmo executando mudanças significativas no Coeficiente de Poisson, a frequência crítica identificada pelo modelo não se altera, mas o valor do “R” torna-se inferior.

Densidade

A alteração no valor da densidade ocasiona mudanças no Índice de Redução Sonora para alvenaria isotrópica, conforme mostra a Figura 6. O aumento da densidade desloca a coincidência no sentido positivo do eixo “X”, ao mesmo tempo em que aumenta os valores do “R” tanto nas faixas superiores quanto nas inferiores à frequência crítica. A diminuição da densidade leva a um comportamento oposto. Essa observação é possível a partir da simulação com o valor real, seu dobro e sua metade.

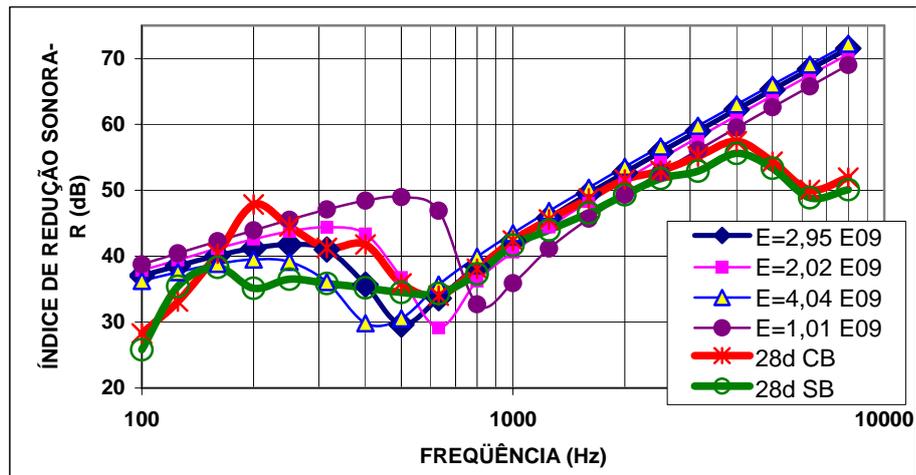


Figura 4 - Influência do Módulo de Elasticidade no R - alvenaria isotrópica

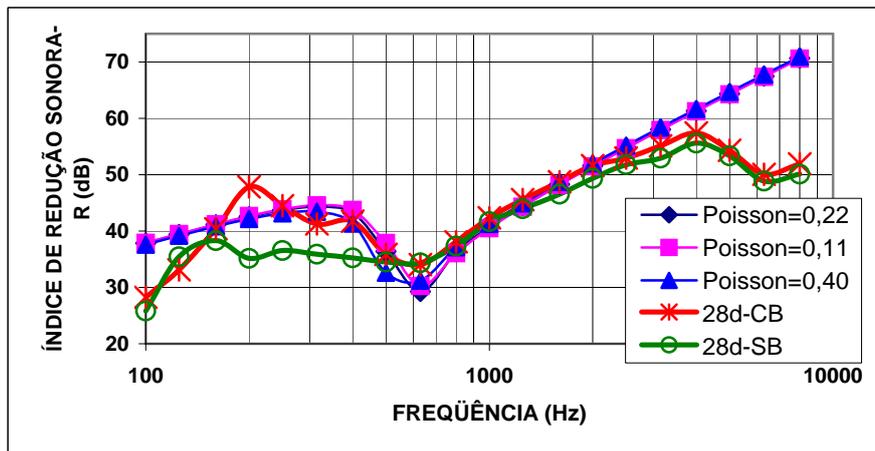


Figura 5 - Influência do Coeficiente de Poisson no R - alvenaria isotrópica

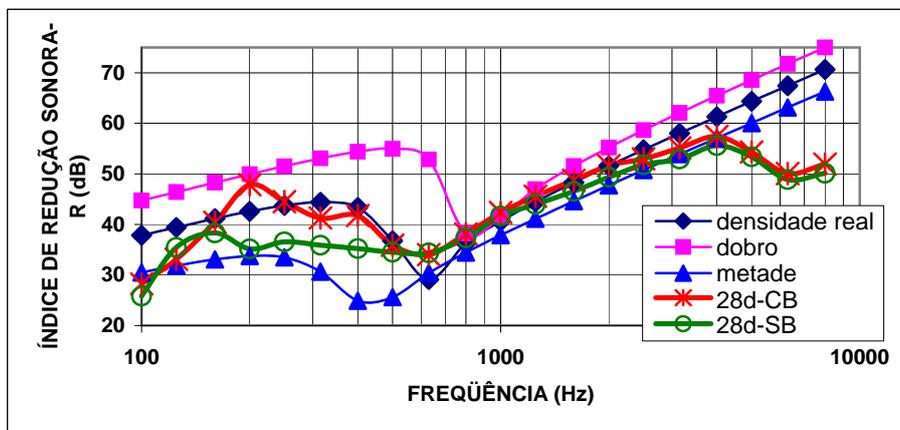


Figura 6 - Influência da alteração de densidade no R - alvenaria isotrópica

Alvenaria ortotrópica

O banco de dados referente a materiais ortotrópicos necessita valores de densidade (ρ), Módulos de Elasticidade (E_1, E_2, E_3), Módulos de Cisalhamento (G_1, G_2, G_3) e Coeficientes de Poisson ($\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}$). Determina-se, inicialmente, a orientação do sistema de eixos. Pereira (2001) identifica as propriedades mecânicas de materiais compostos, com a utilização de um sistema de eixos ortogonais, onde o eixo 1 é colocado longitudinalmente às fibras, enquanto o 2 é transversal às fibras, e o 3 situa-se de forma ortogonal aos dois anteriores. Para o Módulo de Elasticidade desse tipo de alvenaria, nas três direções, constatou-se um número muito reduzido de valores nas bibliografias consultadas. Além disso, há uma grande disparidade entre eles. A seguir, exemplificam-se valores pesquisados.

Módulo de Elasticidade na direção “X” (transversal):

E1a = 1,89 E09 N/m² → determinado, experimentalmente, através de ensaios na UFSM;

E1b = 11,4 E09 N/m² → citado por Craik (1982, p. 281);

E1c = 5,78 E09 N/m² → calculado a partir da velocidade da onda longitudinal referida por Craik e Barry (1992, p. 143) para uma parede de tijolo maciço cerâmico;

E1d = 2,01 E09 N/m² → resultante da Lei de Comportamento de Material Composto, citada por Pereira (2001, p. 29), da qual se origina a Equação 1.

$$(\nu_{21} / E_2) = (\nu_{12} / E_1) \quad (1)$$

Módulo de Elasticidade na direção “Y” (longitudinal):

E2a = 2,95 E09 N/m² → determinado experimentalmente, através de ensaios na UFSM;

E2b = 7,7 E09 N/m² → citado por Craik (1982, p. 281); e

E2c = 2,11 E09 N/m² → calculado a partir da velocidade da onda longitudinal referida por Craik e Barry (1992, p. 143) para uma parede de tijolo maciço cerâmico.

Módulo de Elasticidade Longitudinal na direção “Z” – os únicos valores encontrados na bibliografia, relativos ao módulo de elasticidade no sentido da espessura da parede de alvenaria de tijolo maciço cerâmico, foram obtidos experimentalmente por Sinha (1978, p. 82). Ele cita dois valores: E3a = 11,73 E09 N/m² (para

carregamento paralelo às juntas de argamassa) ou E3b = 8,48 E09 N/m² (para carregamento perpendicular às juntas de argamassa). A análise dos ensaios executados por Sinha (1978) deixa claro, no entanto, tratem-se de Módulos de Elasticidade à Flexão, portanto diferentes do valor requerido no presente trabalho. Por isso, tais valores foram desconsiderados. Na ausência de outra opção, o módulo de elasticidade nessa direção foi adotado igual ao E2, seguindo o comportamento normalmente indicado nos estudos de materiais compostos, como esclarece Pereira (2001, p. 31) referindo-se aos chamados materiais isotrópicos transversos.

Não foram localizados, na bibliografia, valores para os Módulos de Cisalhamento (G_{12}, G_{23}, G_{31}), por isso o G_{12} foi calculado empregando-se a Equação 2.

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{E_1} + \frac{1+2\nu_{12}}{E_2} \quad (2)$$

Para a determinação do G_{31} aplicou-se a Equação 3, recomendada por Pereira (2001). Para o G_{23} adotou-se o mesmo valor de G_{31} .

$$\frac{1}{G_{31}} = \frac{2(1+\nu_{31})}{E_3} \quad (3)$$

Quanto aos Coeficientes de Poisson, optou-se pela utilização do valor obtido experimentalmente nos ensaios realizados no LMCC/UFSM, ou seja: $\nu_{12} = 0,22$. A bibliografia consultada refere Coeficiente de Poisson, geralmente fixado em 0,2, o qual foi adotado para caracterizar numericamente ν_{31} . Uma extensa faixa de valores, que varia de 0,11 até 0,4, pode ser encontrada em textos de autores como Craik (1982), Sinha (1978) e Yokel e Fattal (1976), conforme está mostrado em Paixão (2002).

As simulações relativas à alvenaria, como ortotrópica, avaliaram: Módulos de Elasticidade e de Cisalhamento, Amortecimento da Parede e Densidade. Em todos os casos houve a manutenção do amortecimento da sala e da parede em 1% e do NPS na Câmara de Emissão como o valor obtido experimentalmente. Constatou-se que a influência na mudança do Coeficiente de Poisson é mínima, conforme foi comprovado igualmente para a situação de isotropia. Optou-se, por isso, pela supressão desses gráficos. Nas simulações, considerou-se: $\nu_{12} = 0,22$ e $\nu_{23} = \nu_{31} = 0,2$.

Módulo de Elasticidade

Para a análise do comportamento desse tipo de alvenaria, ante as mudanças nos módulos de elasticidade (E_x, E_y e E_z), utilizaram-se

informações e valores citados anteriormente. A alteração dos módulos de elasticidade (E) implica a alteração dos módulos de cisalhamento (G). Na Figura 7, E2 e E3 foram iguados ao valor medido $2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$, variando-se E1.

Nas curvas decorrentes do E1 resultante do ensaio específico realizado no laboratório da UFSM ($E1a = 1,89 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$) e do valor calculado a partir do ensaio para obtenção do E2 ($E1d = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$), há boa concordância com as curvas experimentais em 630 Hz, frequência identificada nas medições. Os valores citados por Craik (1982), $E1b = 11,4 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$, e o calculado a partir da velocidade referida por Craik e Barry (1992), $E1c = 5,78 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$, originam curvas onde o aumento do Módulo leva a uma redução na frequência de coincidência. Nos dois casos essa frequência está deslocada do valor experimental.

Aumentando-se os módulos para $E2 = E3 = 7,7 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$, tem-se a Figura 5, como resultante da variação de E1. Comparando a Figura 6 com a Figura 7, observa-se que a frequência de 630 Hz,

nessa última, não aparece marcada como nas curvas onde o $E2 = E3$ estavam fixados com o valor obtido nos ensaios realizados no LMCC/UFSM, ou seja, $2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$.

Densidade

Para a densidade foi escolhido o valor determinado experimentalmente no LMCC/UFSM, ou seja, $\rho = 1839 \text{ kg/m}^3$. As referências bibliográficas, nesse caso, são abundantes e confiáveis, pois a densidade do material tem larga aplicação nas pesquisas da área de edificações. Para conhecimento da sensibilidade da resposta do sistema às mudanças na densidade da parede, optou-se por dobrá-la e reduzi-la à metade. Os resultados são semelhantes aos encontrados na análise da alvenaria isotrópica, ou seja, o Índice de Redução Sonora cresce com o aumento da densidade, enquanto a localização da frequência de coincidência altera-se em direção às altas frequências.

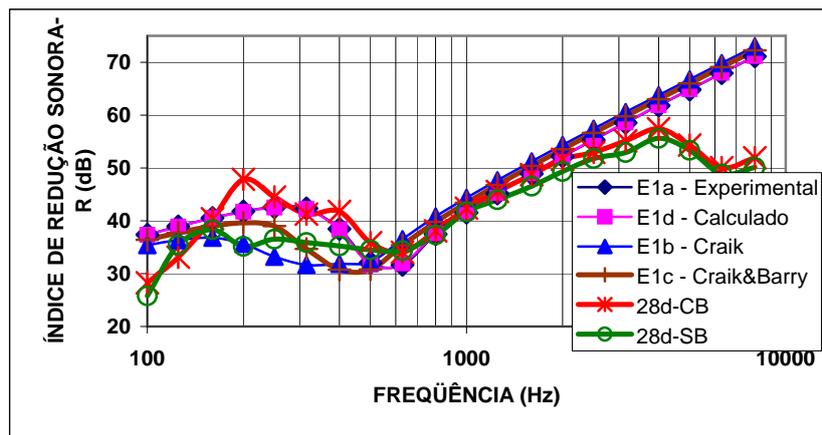


Figura 7 - Variação de "R" com a alteração de E1 - alvenaria ortotrópica

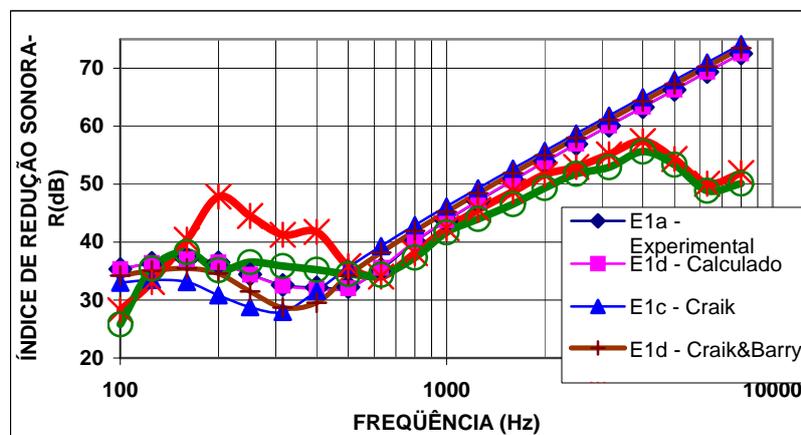


Figura 8 - Variação do "R" com o aumento de E2 e E3 - alvenaria ortotrópica

Análise Global dos Resultados das Simulações

Observou-se, nas simulações, a influência do Módulo de Elasticidade na direção E1 para alvenaria isotrópica e ortotrópica. A velocidade de onda longitudinal (c_ℓ) é diretamente proporcional à raiz do Módulo de Elasticidade (E). A frequência de coincidência (f_c) é inversamente proporcional à c_ℓ . Com o aumento de E, a frequência de coincidência diminui.

Na avaliação dos dois tipos de alvenaria (isotrópica e ortotrópica), detectou-se que mudanças no Coeficiente de Poisson não alteraram significativamente a localização da frequência de coincidência, nem o valor do Índice de Redução Sonora. Verificou-se, ainda, que a densidade é o fator que representa a maior alteração na localização da coincidência e no valor do Índice de Redução Sonora.

Após a análise dos resultados, recomenda-se para o banco de dados de materiais isotrópicos uma alvenaria de tijolo maciço cerâmico com: ρ (densidade) = 1,839 kg/m³; E (Módulo de Elasticidade) = 2,02 E09 N/m²; G (Módulo de Cisalhamento) = 8,417 E08 N/m²; e ν (Coeficiente de Poisson) = 0,2.

Para o banco de dados da alvenaria ortotrópica de tijolos maciços cerâmicos, considera-se viável a inclusão dos seguintes valores: ρ (densidade) = 2,839 kg/m³; E1 (Módulo de Elasticidade paralelo às juntas de argamassa) = 2,02 E09 N/m²; E2 (Módulo de Elasticidade perpendicular às juntas de argamassa) = 2,95 E09 N/m²; E3 (Módulo de Elasticidade na direção da espessura da parede) = 2,95 E09 N/m²; G12 (Módulo de Elasticidade Transversal entre 1 e 2) = 1,02 E09 N/m²; G23 (Módulo de Elasticidade Transversal entre 2 e 3) = 1,22 E09 N/m²; G31 (Módulo de Elasticidade Transversal entre 3 e 1) = 1,22 E09 N/m²; ν_{12} (Coeficiente de Poisson entre 1 e 2) = 0,22; ν_{23} (Coeficiente de Poisson entre 2 e 3) = 0,20; ν_{31} (Coeficiente de Poisson entre 3 e 1) = 0,20.

Considerações finais

Observa-se que há uma disponibilidade muito pequena de informações, que são necessárias aos estudos acústicos, sobre as propriedades físico-mecânicas dos materiais, em especial aqueles que são empregados em técnicas construtivas correntes. Tais propriedades, no entanto, têm sua influência comprovada.

Craik (1996) afirma que as alterações na espessura e densidade das paredes e pisos têm um efeito maior na transmissão sonora do que as mudanças no Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson. Além disso, o amortecimento pode, também, ter um efeito significativo, particularmente longe da fonte sonora.

O presente trabalho confirma tais informações, quantificando valores sobre a alvenaria de tijolos maciços cerâmicos, avaliando-a sob o ponto de vista isotrópico e ortotrópico, concluindo que há uma divergência numérica pequena nos resultados. Por esse motivo, nas análises correntes, diante da pequena disponibilidade de dados físico-mecânicos, considera-se viável a opção pela avaliação isotrópica, pois esta depende apenas de valores usuais na área de construção civil, em geral quantificáveis em laboratórios de Engenharia Civil.

Assim, o texto disponibiliza valores referentes às propriedades físico-mecânicas de uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos, que resultam de ensaios em laboratório e de pesquisas bibliográficas. Mostra, ainda, a possibilidade de emprego de simulações numéricas para a determinação da frequência de coincidência no isolamento acústico, desde que os dados utilizados sejam representativos da realidade do material. Contribui, portanto, para o aprofundamento do estudo do isolamento acústico específico para a construção civil.

Espera-se que o estudo realizado incentive novas caracterizações de materiais, em laboratório, detalhando outros métodos construtivos, sob o ponto de vista de seu desempenho acústico.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8041**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Forma e dimensões. Rio de Janeiro, 1983a.

_____. **NBR 7170**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983b.

_____. **NBR 6460**: Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Verificação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1983c.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1991.

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.

BIES, David; HANSEN, Colin H. **Engineering noise control: theory and practice**. London: Unwin Hyman, 1988. 411 p.

CRAIK, Robert J. M. The measurement of the material properties of building structures. **Applied acoustics**, n. 15, p. 275-282, 1982.

_____. Sound transmission through buildings using Statistical Energy Analysis. Hampshire: Gower, 1996. 261 p.

_____; BARRY, Peter. The internal damping of building materials. **Applied acoustics**, n. 35, p. 139-148, 1992.

FAHY, Frank. **Sound and structural vibration: radiation, transmission and response**. London: Academic Press Inc., 1985. 309 p.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140** – Acoustics – Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements, 1995.

JAGT, G. Susanne van der; MARTIN, Heiko J. Desenvolvimento de um método de medição para fator de perda numa canalização de esgoto: fixação – sistema estrutural da edificação, baseado na Análise Estatística Energética. **Inter-noise**, p. 841-844, 1999.

KINSLER, Lawrence E.; FREY, Austin R. **Fundamentals of acoustics**. 2nd ed. Monterey: John Wiley & Sons Inc., 1967. 524 p.

KUTTRUFF, Heinrich. **Room acoustics**. 2nd ed. London: Applied Science Publishers Ltd, 1979. 309 p.

LOURENÇO, Paulo José Brandão Barbosa. **Computational strategies for masonry structures**. Netherlands: Delft University Press, 1996. 211 p.

LYON, R. H.; DeJONG, R. G. **Theory and application of Statistical Energy Analysis**. 2nd ed. Newton: Butterworth-Heinemann, 1995. 277 p.

MAKRINENKO, Leonid I. **Acoustics of auditoriums in public buildings**. New York: Acoustical Society of America, 1994. 172 p.

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

MOHAMAD, Gihad. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas e blocos de concreto**. 1998. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

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

PARKIN, P. H.; HUMPHREYS, H. R.; COWELL, J. R. **Acoustics noise and buildings**. London: Faber&Faber, 1979. 297 p.

PEREIRA, José Carlos. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. Grupo de Análise e Projeto Mecânico da EMC/UFSC. Disponível em: <<http://www.ufsc.br>>. Acesso em: 10 nov. 2001.

PRUDÊNCIO JR, Luiz Roberto. **Resistência à compressão da alvenaria e correlação entre a resistência de unidades, prismas e paredes**. 1986. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

RECUERO, Manuel; GIL, Constantino. **Acústica arquitectónica**. Madrid: Ártica, 1993. 784 p.

SANTOS, Flávio Antônio dos. **Efeito do não-preenchimento de juntas verticais no desempenho de edifícios em alvenaria estrutural**. 2001. 153 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

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

SINHA, B. P. A simplified ultimate load analysis of laterally loaded model orthotropic brickwork panels of low tensile strength. **The Structural Engineer**, v. 56B, n. 4, p. 81-84, Dec. 1978.

SOMAYAJI, Shan. **Civil engineering materials**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000. 478 p.

TURNER, J. D.; PRETLOVE, A. J. **Acoustics for engineers**. London: Macmillan Education Ltd., 1991. 192 p.

YOKEL, Félix Y.; FATTAL, S. George. Failure hypothesis for masonry shear walls. **Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, ST3, p. 515-532, 1976.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Programa PICDT) e aos alunos e técnicos que auxiliaram na execução dos ensaios.