



INFLUÊNCIA DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS, PARA A DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE COINCIDÊNCIA, NO ISOLAMENTO SONORO DE PAREDE DE ALVENARIA

Dinara Xavier da Paixão (1); Samir Gerges (2)

(1) Universidade Federal de Santa Maria , Centro de Tecnologia – Grupo de Pesquisa UFSM/CNPq “Acústica” – Campus – Camobi – Santa Maria/RS – CEP 97105-900

Fone: (55) – 3220-8144 - E-mail: dinaraxp@yahoo.com.br

(2) Universidade Federal de Santa Catarina , Centro Tecnológico – Laboratório de Vibrações e Acústica - LVA – Florianópolis /SC

RESUMO

O artigo mostra a influência de parâmetros físico-mecânicos, como: densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, na identificação da frequência crítica de coincidência, no isolamento sonoro de uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos. A simulação computacional comparou os resultados experimentais, obtidos na determinação dos parâmetros e no isolamento sonoro, com conhecimentos obtidos na bibliografia.

ABSTRACT (12 PTS NEGRITO)

The article shows the influence of physical-mechanical parameters, as: density, modulus of elasticity and coefficient of Poisson, in the identification of the coincidence frequency, in the sound isolation of a ceramic solid bricks masonry wall. The computational simulation compared the experimental results, obtained in the determination of the parameters and of the sound isolation, with knowledge obtained in the bibliography.

1. INTRODUÇÃO

No trabalho utilizaram-se resultados experimentais, referências bibliográficas e simulações numéricas para analisar a influência dos Parâmetros Físico-Mecânicos, na identificação da frequência de coincidência, no isolamento acústico de uma parede de alvenaria de tijolos maciços cerâmicos.

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, argamassa e mini-paredes foram obtidos no Setor de Alvenaria do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM. Ensaio realizado no Setor de Acústica caracterizou o isolamento acústico de uma parede de 4,10m x 3,20m (13,12m²), os quais serviram de referência para análise dos resultados das simulações.

2. PARÂMETROS FÍSICO-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 relativas ao sul do Brasil, tendo em vista que os ensaios experimentais utilizaram materiais dessa região.

Santos (2001, p. 30) 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 sua não-linearidade. Lourenço (1996) focaliza a análise não-linear de alvenarias, destacando técnicas de homogenização, nas quais o comportamento macro do elemento composto pode ser predito, a partir das propriedades micro de seus constituintes. Salienta (p. 43) que os micro-modelos 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, p. 15). 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 a tensão ou capacidade de deformação. Afirma (p. 22) que um material com maior deformação, sob uma dada tensão, é menos rígido do que outro que apresenta menor deformação, sob a mesma tensão.

O conhecimento da capacidade de deformação do material (sua rigidez), obtida através do módulo de elasticidade, é importante. Somayaji (2001, p.25) 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, p. 21) 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 & Fattal (p. 523, 1976) estimam o Coeficiente de Poisson na faixa entre 0,10 e 0,25, destacando que não existem muitas informações disponíveis sobre a razão de Poisson para a alvenaria de argila.

Santos (2001, p. 13) 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 tri-axial 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, p. 37), 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, p. 274)

A densidade de área média para uma parede de alvenaria, citada por Somayaji (2001, p. 271), é de 181 Kg/m². O autor diz, ainda (p. 274), 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.

3. 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 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), por exemplo, implementou uma avaliação de TLF (Fator de Perda Total). 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 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. 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 através das 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 por exemplo: Kinsler & Frey (1967), Parkin et al (1979), Kuttruff (1979), Turner & Pretlove (1991), Recuero & Gil (1993), Méndez et al (1994) e Makrinenko (1994) ao caracterizarem os materiais, não mostram informações sobre a alvenaria. Em alguns casos, encontra-se citado apenas o tijolo ou bloco, como em: Gerges (2000), Beranek (1988), Bies & Hansen (1988), Fahy (1985) e Beranek (1980). 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 = $7,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$; densidade=1200 Kg/m^3 e velocidade do som = 2420 m/s.

A Tabela 1 resume os dados sobre alvenaria indicados nos livros de acústica dos seguintes autores: Gerges (2000, p. 655), Beranek (1988, p. 308), Bies & Hansen (1988, p. 358) e Fahy (1985, p. 12).

Tabela 1 : Propriedades dos materiais

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	1800		3700			
Beranek	Tijolo		1900 -2300			0.01(*)	34700-58600	48,5– 53
Fahy	Tijolo	16	1900 -2200		2800			
Bies & Hansen	Tijolo	16.2	1800		3000	0.01		
Bies & Hansen	Bloco de alvenaria	4.8	900		2300	0.005–0.02		

PAIXÃO (2002, p. 17)

(*) Fator de amortecimento interno em 1000 Hz

4. 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 mini-paredes (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.

4.1 Propriedades do tijolo maciço cerâmico

Os tijolos adquiridos atendiam a NBR 8041 (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Forma e dimensões – Padronização) e NBR 7170 (Tijolo maciço cerâmico para alvenaria – Especificação). Retiraram-se do lote, aleatoriamente, cinco tijolos para os ensaios de caracterização físico-mecânica. 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 determinação da absorção d'água, cuja média foi 8,5%, como mostrado na Tabela 2.

Para atender a NBR 6460/83 (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 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 determinação da resistência à compressão dos tijolos. A síntese dos resultados constitui a Tabela 2.

Tabela 2 : Características dos 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

PAIXÃO (2002, p. 82)

4.2 Propriedades da Argamassa

Utilizou-se argamassa com traço 1:1:6 (cimento: cal: areia) na construção da parede e de doze mini-paredes. 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, caracterizando uma situação similar a encontrada nas obras.

O ensaio de abatimento resultou 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. A resistência à compressão média está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 : Resistência à compressão da argamassa

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

PAIXÃO (2002, p. 83)

4.3 Propriedades das Mini-paredes

Construíram-se doze mini-paredes 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 mini-paredes 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.

Tabela 4 : Módulos de elasticidade da parede de tijolo maciço cerâmico.

Tipo de carregamento	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Variação
Perpendicular às juntas de argamassa	$E_y = 2,95 \times 10^9 \text{ N/m}^2$	17,35%
Paralelo às juntas de argamassa	$E_x = 1,89 \times 10^9 \text{ N/m}^2$	23,80%

PAIXÃO (2002, p. 85)

4.4 Análise dos ensaios para caracterização dos Parâmetros Físico-Mecânicos

Os resultados, obtidos nos 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 comparado às executadas em laboratório, com o mesmo traço.

Em relação ao tijolo, os resultados dos ensaios atenderam às expectativas. Na 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, p. 11) ressalta a necessidade de que a alvenaria em análise possua tamanho suficiente para estar submetida a estados homogêneos de tensão e deformação. Destaca (p.26) que a utilização de um modelo só é precisa com uma completa descrição dos materiais constituintes.

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

5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As Câmaras Reverberantes do Setor de Acústica da UFSM e a parede de tijolos maciços cerâmicos foram simuladas, com o programa AUTOSEA, empregando a Análise Estatística de Energia – SEA. 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, devido a espessura, que surge em altas frequências.

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 na aquisição de dados que permitam tratá-la como ortotrópica.

5.1 Alvenaria Isotrópica

No Banco de Dados, para materiais isotrópicos, incluiu-se para alvenaria de tijolo maciço cerâmico: ρ (densidade)=1839 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.

Apresenta-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.

• Módulo de Elasticidade

Nas simulações, com a absorção das salas de 1%, $\nu=0,2$, amortecimento na parede de 1%, $\rho=1839$ Kg/m³ e NPS de entrada experimental, efetuou-se a variação do E e, conseqüentemente, do G .

Usaram-se três valores: o experimental $E_y=2,95$ E09 N/m²; o calculado a partir dele na direção “X” $E_x=2,02$ E09 N/m²; o dobro e a metade do calculado: $E_x=4,04$ E9 N/m² e $E_x=1,01$ E9 N/m². Houve conseqüente alteração de $G=1,229$ E09 N/m², para: $G=8,417$ E08 N/m², $G=1,683$ E09 N/m² e $G=4,208$ E08 N/m².

O $E_y=2,95$ E09 N/m² resultou do ensaio com carregamento perpendicular às juntas de argamassa, sendo usual na construção civil. O $E_x=2,02$ E09 N/m² foi calculado a partir do E_y e dos ν experimentais. A variação para o dobro e a metade desse valor permite avaliar a curva em função do E .

A Figura 1 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 $E_x=2,02$ E09 N/m². 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 a experimental, o emprego de $E_x = 2,02 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ conduz a um Índice de Redução Sonora inferior (+ ou - 05 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 o patamar em baixas frequências.

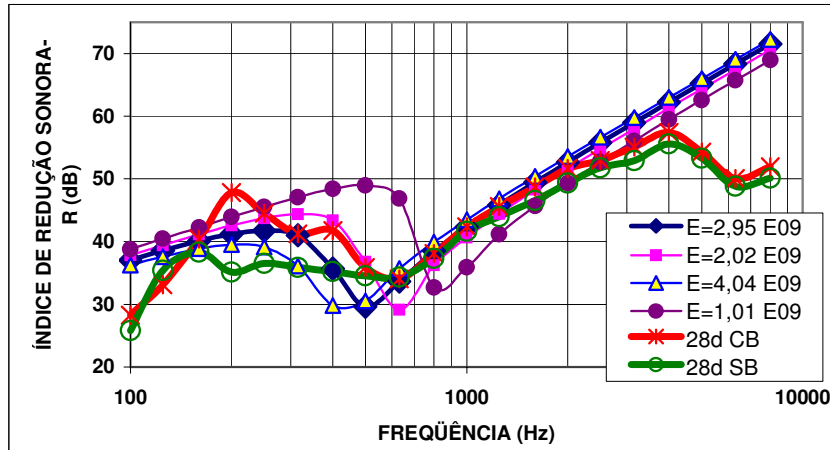


Figura 1 : Influência do Módulo de Elasticidade no R – alvenaria isotrópica.

• **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 2 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 (\pm o dobro e a metade), a frequência crítica identificada pelo modelo não se altera, mas o valor do “R” torna-se inferior.

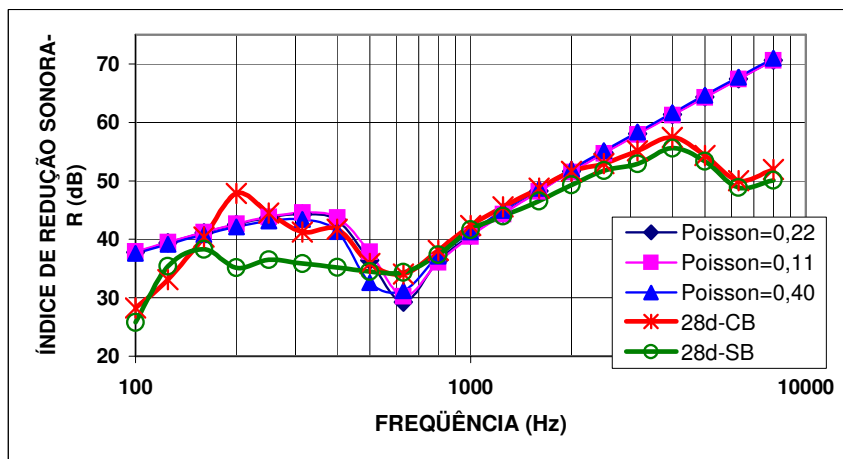


Figura 2 : Influência do Coeficiente de Poisson no R – alvenaria isotrópica.

- **Densidade**

A alteração no valor da densidade ocasiona mudanças no Índice de Redução Sonora para alvenaria isotrópica, conforme a Figura 3. 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.

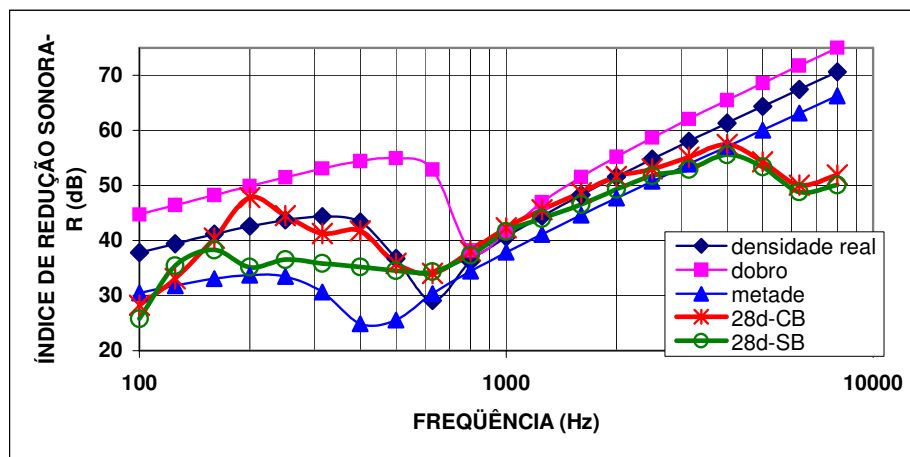


Figura 3 : Influência da alteração de densidade no R – alvenaria isotrópica.

5.2 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 (2002, p. 29) 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 os E desse tipo de alvenaria constatou-se um número muito reduzido de valores e uma grande disparidade entre eles. Exemplifica-se:

- **Módulo de Elasticidade na direção “X”:**

$E_{1a} = 1,89 \text{ E}09 \text{ N/m}^2 \rightarrow$ determinado, experimentalmente, através de ensaios na UFSM;

$E_{1b} = 11,4 \text{ E}09 \text{ N/m}^2 \rightarrow$ citado por Craik (1982, p. 281);

$E_{1c} = 5,78 \text{ E}09 \text{ N/m}^2 \rightarrow$ calculado a partir da velocidade da onda longitudinal referida por Craik & Barry (1992, p. 143) para uma parede de tijolo maciço cerâmico;

$E_{1d} = 2,01 \text{ E}09 \text{ N/m}^2 \rightarrow$ resultante da Lei de Comportamento de Material Composto, citada por Pereira (2002, p. 29), da qual origina-se a Equação 01.

$$(\nu_{21} / E_2) = (\nu_{12} / E_1) \quad \text{Equação 01}$$

- **Módulo de Elasticidade na direção “Y”:**

$E_{2a} = 2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2 \rightarrow$ determinado experimentalmente, através de ensaios na UFSM;

$E_{2b} = 7,7 \text{ E}09 \text{ N/m}^2 \rightarrow$ citado por Craik (1982, p. 281);

$E_{2c} = 2,11 \text{ E}09 \text{ N/m}^2 \rightarrow$ calculado a partir da velocidade da onda longitudinal referida por Craik & 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: $E_{3a} = 11,73 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ (para carregamento paralelo às juntas de argamassa) ou $E_{3b} = 8,48 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$ (para carregamento perpendicular às juntas de argamassa). A análise dos ensaios executados por Sinha (1978) deixa claro, no entanto, tratarem-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 (2002, p. 31) referindo-se aos chamados materiais isotrópicos transversos.

Não foram localizados, na bibliografia, valores para os Módulos de Cisalhamento (**G12**, **G23**, **G31**), por isso o **G12** foi calculado empregando-se a Equação 2

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{E_1} + \frac{1 + 2 \cdot \nu_{12}}{E_2} \quad \text{Equação 2}$$

Para determinação do **G31** aplicou-se a Equação 3, recomendada por Pereira (2002). Para o **G23** adotou-se o mesmo valor de **G31**.

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

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 apenas um 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 (1998), Sinha (1978) e Yokel & Fattal (p. 523), 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 análise do comportamento desse tipo de alvenaria, frente às mudanças nos módulos de elasticidade (**E_x**, **E_y** e **E_z**), utilizaram-se informações e valores citados. A alteração dos módulos de elasticidade (**E**) implica na alteração dos módulos de cisalhamento (**G**). Na Figura 4, **E2=E3** foram igualados ao valor medido $2,95 \text{ E}09 \text{ N/m}^2$, variando-se **E1**.

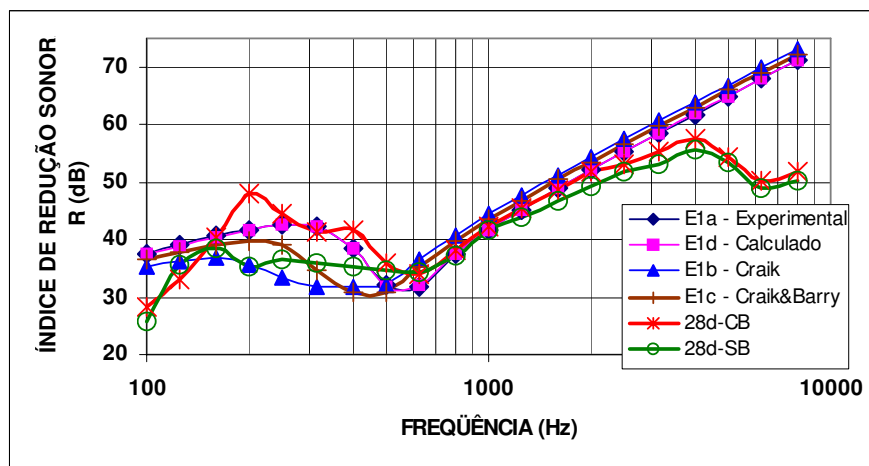


Figura 4 : Variação de “R” com a alteração de E1 – alvenaria ortotrópica.

Nas curvas decorrentes do **E1** resultante do ensaio específico (**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 & Barry (1992)

$E1c = 5,78 E09 N/m^2$ 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 $E2=E3=7,7 E09 N/m^2$, tem-se a Figura 5 como resultante da variação de $E1$. Comparando a Figura 4 com a Figura 5, 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, $2,95 E09 N/m^2$.

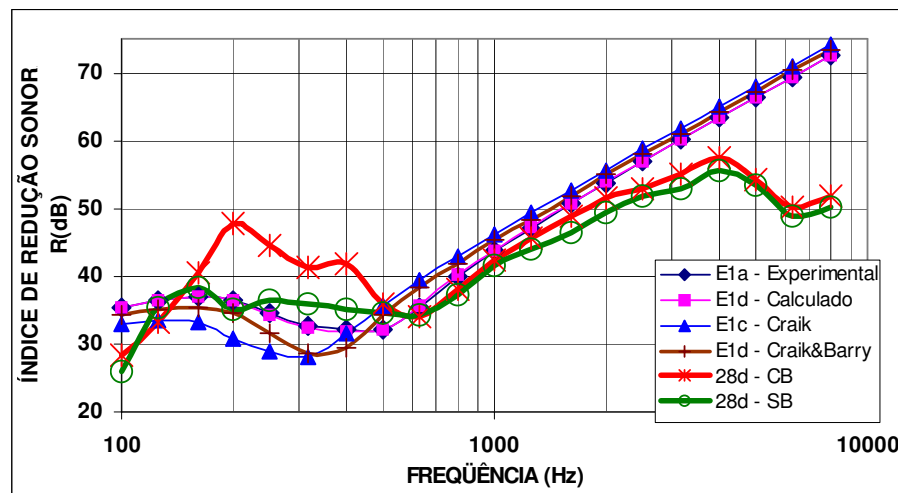


Figura 5 : Variação do “R” com o aumento de E2 e E3 – alvenaria ortotrópica.

- **Densidade**

Para a densidade foi escolhido o valor determinado experimentalmente no LMCC/UFSM, ou seja, $\rho = 1839 Kg/m^3$. 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 baixas frequências.

5.3 Análise Global dos Resultados das Simulações

Detectou-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 a raiz de E . A f_c é inversamente proporcional a c_l . Com o aumento de E , a frequência de coincidência diminui.

Recomenda-se para o Banco de Dados da alvenaria ortotrópica de tijolos maciços cerâmicos: ρ (densidade)= $2839 Kg/m^3$; $E1$ (Módulo de Elasticidade paralelo às juntas de argamassa)= $2,02 E09 N/m^2$; $E2$ (Módulo de Elasticidade perpendicular às juntas de argamassa)= $2,95 E09 N/m^2$; $E3$ (Módulo de Elasticidade na direção da espessura da parede)= $2,95 E09 N/m^2$; $G12$ (Módulo de Elasticidade Transversal entre 1 e 2) = $1,02 E09 N/m^2$; $G23$ (Módulo de Elasticidade Transversal entre 2 e 3) = $1,22 E09 N/m^2$; $G31$ (Módulo de Elasticidade Transversal entre 3 e 1) = $1,22 E09 N/m^2$; $\nu12$ (Coeficiente de Poisson entre 1 e 2) = $0,22$; $\nu23$ (Coeficiente de Poisson entre 2 e 3) = $0,20$; $\nu31$ (Coeficiente de Poisson entre 3 e 1) = $0,20$.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se, portanto, que são limitadas as informações necessárias aos estudos acústicos, sobre as propriedades físico-mecânicas dos materiais empregados nas técnicas construtivas correntes. Sua influência, no entanto, é comprovada. Craik (1998) afirma que as alterações na espessura e densidade das paredes e pisos têm um efeito maior na transmissão sonora, do que mudanças no Módulo de

Elasticidade e Coeficiente de Poisson. Além disso, o amortecimento pode, também, ter um efeito significativo, particularmente longe da fonte sonora.

Espera-se que esse estudo realizado para alvenaria de tijolos maciços cerâmicos incentive novas caracterizações, em laboratório, de outros materiais, sob o ponto de vista de seu desempenho acústico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, 411p.
- CRAIK, Robert J. M. Sound Transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis. Hampshire, Gower, 1996, 261 p.
- _____. & BARRY, Peter. The internal damping of building materials. **Applied Acoustics**, 35, p.139-148, 1992.
- FAHY, Frank. Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response. London: Academic Press Inc., 1985, 309p.
- GERGES, S. N. Y. **Ruído – Fundamentos e Controle**. Florianópolis: NR Editora, 2a Ed. Revista e Ampliada, 2000, 675p.
- KINSLER, Lawrence E. & FREY, Austin R. **Fundamentals of Acoustics**. Monterey: John Wiley & Sons Inc., 1967, 2ª Edição, 5ª Printing, 524p.
- KUTTRUFF, Heinrich. **Room Acoustics**. 2ª edition. London: Applied Science Publishers Ltd, 1979, 309 p.
- LOURENÇO, Paulo José Brandão Barbosa. Computational strategies for masonry structures. Netherlands: Delft University Press, 1996, 211p.
- MAKRINENKO, Leonid I. **Acoustics of auditoriums in public buildings**. New York: Acoustical Society of America, 1994, 172 p.
- MÉNDEZ, Antonio Miguel et al. **Acústica Arquitectonica**. Buenos Aires: Universidad del Museo Social Argentino, 1994, 238 p
- MOHAMAD, Gihad. **Comportamento mecânico na ruptura de prismas e blocos de concreto**. 1998. 178 p. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- PAIXÃO, Dinara X. da. Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando Análise estatística de Energia (SEA). Tese de Doutorado. PPGE/UFSC. Florianópolis: 2002, 168p.
- PARKIN, P. H.; HUMPHREYS, H. R. & COWELL, J. R. **Acoustics Noise and Buildings**. London: Faber&Faber, 1979, 297p.
- 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 p., Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- RECUERO, Manuel & GIL, Constantino. **Acústica Arquitectonica**. Madrid: Ártica, 1993, 784p.
- SANTOS, Flávio Antônio dos. **Efeito do não-preenchimento de juntas verticais no desempenho de edifícios em alvenaria estrutural**. 2001. 153p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- SINHA, B. P. A simplified ultimate load analysis of laterally loaded model orthotropic brickwork panels of low tensile strength. In: **The structural engineer**, december 1978, vol. 56 B, number 4, p. 81 –84.
- SOMAYAJI, Shan. **Civil Engineering Materials**. Prentice Hall, 2000. 2ª Ed., 478p.
- 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. In: **Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, ST3,1976, 515-532.