

Elementos vazados com atenuação acústica para vedações verticais em construções populares: ensaios laboratoriais e simulações numéricas

Fagerlande, G. C.¹; Grabois, T. M.²; Niemeyer, M. L. A.³

^{1,2,3} Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,

¹guilhermefagerlande@gmail.com, ²grabois@fau.ufrj.br, ³lygianiemeyer@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta os resultados preliminares de uma pesquisa dedicada ao desenvolvimento de elementos vazados em argamassa armada de baixo custo com atenuação acústica, visando à conciliação entre isolamento sonoro e ventilação natural em edificações. Os elementos foram submetidos a ensaios laboratoriais para determinação do índice de redução sonora ponderado (R_w), e paralelamente, o desempenho acústico foi investigado por meio de simulações numéricas por elementos finitos. Três configurações construtivas foram analisadas, com variação da quantidade de material absorvente aplicada nas cavidades internas dos elementos. Os resultados experimentais indicaram índices de redução sonora ponderados (R_w) de 10, 15 e 19 dB para as configurações avaliadas, enquanto as simulações reproduziram adequadamente as tendências observadas experimentalmente. O melhor desempenho foi obtido com a aplicação de lã de rocha em três faces internas das cavidades, alcançando isolamento sonoro comparável ao de sistemas de esquadrias acústicas de entrada disponíveis comercialmente, mantendo, contudo, a possibilidade de ventilação natural permanente. Os resultados demonstram o potencial da solução proposta para aplicações em edificações localizadas em regiões de clima quente e úmido, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias passivas de conforto ambiental em ambientes urbanos.

Palavras-chave: elementos vazados, isolamento acústico, ventilação natural.

1. Introdução

O ruído urbano é um dos problemas ambientais mais persistentes nas cidades contemporâneas e afeta diretamente a saúde e o bem-estar da população, causando estresse, distúrbios do sono, perda auditiva entre outros impactos. Em especial nas moradias populares, situadas em zonas densamente ocupadas, em distritos industriais, à margem de rodovias, ferrovias e aeroportos, e expostas a diversas fontes de ruído, a ausência de soluções arquitetônicas adequadas agrava o desconforto sonoro e torna o conforto acústico um privilégio urbano. [1]

As condições climáticas de grande parte do território brasileiro, marcadas pelo clima tropical úmido, impõem outro desafio: a necessidade de promover ventilação natural constante e a iluminação natural difusa, essenciais para o conforto térmico e para a redução do uso de sistemas artificiais de climatização e iluminação nas edificações. Dessa forma, o equilíbrio entre ventilação e isolamento acústico é, portanto, um tema central para a arquitetura em países de clima quente, onde o desafio de reduzir a entrada de ruído sem impedir o fluxo de ar natural ainda carece de soluções efetivas e acessíveis [2–6].

O aprimoramento do isolamento acústico de fachadas pode ser atingido através da utilização de materiais específicos, alterações construtivas, modificação da forma da fachada ou pelo uso de varandas como

elemento de barreira sonora. A norma europeia EN ISO 12354-3 [7] oferece um método simplificado para avaliar o impacto da forma da fachada na redução do nível de potência sonora externa do edifício. A avaliação leva em consideração a tipologia da fachada, a direção do som de entrada e o coeficiente de absorção acústica da parte inferior da varanda. Simulações demonstram que varandas maiores e recuos mais extensos da fachada resultam em menor incidência de ruído. Em fachadas escalonadas com peitoris completos, a redução nos níveis de ruído pode chegar a 10 dB [8].

Os elementos vazados, tais como brises, cobogós, pérgolas, venezianas, muxarabis, têm a função de proteger as fachadas de raios solares diretos, mantendo a ventilação e iluminação, além de promover a privacidade dos ambientes internos. Eles reduzem o ganho de calor dentro dos ambientes e atuam na composição arquitetônica de fachadas. Esses elementos arquitetônicos são indicados para regiões de clima quente tropical úmido, como grande parte do Brasil. Conforme a implantação do edifício e a orientação solar, podem ser utilizados diferentes elementos, e, de acordo com sua posição e inclinação, são mais eficientes do ponto de vista do desempenho térmico [4].

A relação entre o conforto térmico e acústico muitas vezes pode ser conflitante, tendo em vista que para regiões quentes e úmidas, como o Rio de Janeiro e a Zona Bioclimática 4A [2], recomenda-se aberturas nas fachadas para ventilação cruzada constante, enquanto para diminuição do ruído interno proveniente do exterior a diretriz principal das normas de acústica é exatamente o oposto, ou seja, diminuir o número de aberturas nas fachadas para melhorar o conforto acústico interno dos ambientes.

Oiticica [5] publicou uma possibilidade de associação entre conforto térmico e conforto acústico ao propor um peitoril ventilado, onde foram realizados ensaios acústicos com diferentes materiais e composições com uso de lã mineral e sem uso de lã nas cavidades internas por onde circula o ar e o som. Os resultados apresentaram um isolamento de fachada ($D_{2m,nT,w}$) de até 26 dB, na configuração com uso de paredes compostas por placas refletoras + lã mineral + placas perfuradas, com uso de chapas metálicas e chapas de PVC, representando um ganho de 14 dB em relação à janela vazada, com $D_{2m,nT,w}$ de 12 dB.

Araújo [4] publicou outra possibilidade de elemento vazado com atenuação acústica, o cobogó acústico, feito também em canteiro de obras, com argamassa de cimento e areia no traço 1:3. Quatro tipos de cobogós foram medidos acusticamente in situ e simulados em computador com software de dinâmica de fluidos (CFD). Os resultados mostraram que as melhores configurações de cobogós apresentaram isolamento acústico de fachada ($D_{2m,nT,w}$) de 27 dB, sendo mais eficientes nas médias e altas frequências, e que nesse caso, o uso de lã mineral não contribuiu para o aumento do isolamento acústico.

Du et al [9] estudaram aberturas de fachada para ventilação com atenuação acústica por meio de divisórias com aberturas escalonadas, utilizando materiais de absorção acústica no trajeto da ventilação. Esse elemento desconsidera a iluminação natural, visando o desempenho térmico através da ventilação e acústico através dos absorvedores. O sistema sem tratamento acústico apresentou STC de 11 dB, enquanto o sistema fechado apresentou STC de 31 dB, com aplicação de lã de vidro nas cavidades internas.

Além desses produtos desenvolvidos em pesquisas universitárias, existem alguns produtos industriais, como venezianas acústicas que alcançam TL (transmission loss) de 25 dB em 4000 Hz com 152 mm de profundidade (Somax SlimShield) e 27 dB em 2000 Hz com 610 mm de profundidade (Somax NoiseShield) [10]; e chicanas acústicas que alcançam $D_{n,e,w}$ de até 44 dB, com profundidade de 1200 mm (Passivent SoundScoop) [11].

O objetivo desse trabalho é, a partir das revisões bibliográficas de Coutinho et al. [6] e Costa et al. [12], desenvolver uma veneziana acústica em argamassa armada, de baixo custo, de simplicidade construtiva e com replicabilidade em canteiros populares, que contribua para o conforto acústico em fachadas de construções populares, para conciliar a ventilação natural e atenuação acústica, e que também possa ser reproduzida em larga escala.

2. Metodologia

2.1 Geometria

A argamassa armada foi escolhida para a fabricação dos elementos devido à sua plasticidade, facilidade de uso, baixo custo e durabilidade. Formas ortogonais com espessura 2 cm foram desenhadas para simplificar a montagem modular com blocos de concreto padrão de 14 cm de espessura, com uso de meios-blocos de 14 x 14 x 19 cm como suporte para as peças. A estrutura monolítica com seção transversal em "L" permitiu eliminar as frestas entre camadas e evitar vazamentos sonoros entre ambientes, sendo as peças assentadas com argamassa, também evitando as frestas entre peças.

A lã mineral foi testada nas cavidades internas, em função de seu papel fundamental no aumento da atenuação sonora [4–6, 9]. As venezianas acústicas propostas são autoportantes e podem ser sobrepostas, podendo aproveitar toda a altura da parede. Foi também considerada a proteção contra chuvas, orientando o vão inferior para a parte externa. A Figura 1 mostra o projeto do sistema montado em perspectiva (a) e em corte (b).

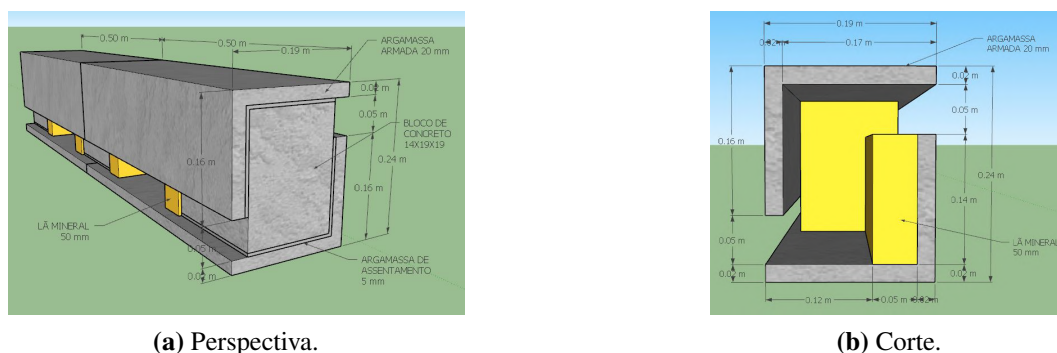


Figura 1: Geometria estudada - visão geral e corte (autores).

2.2 Fabricação e montagem

Para cálculo do traço da argamassa armada foram realizadas as etapas de Santos [13] e Barbosa [14], considerando: massa específica real da areia 2,52 kg/m³; massa específica unitária da areia 1,42 kg/m³; absorção da areia 1,4; massa específica unitária do cimento 1,7 kg/m³; fator água/cimento 0,45. Dessa forma, o traço em massa da veneziana foi determinado: 1 : 1,9 : 0,45 (cimento : areia : água).

Foram utilizadas formas de compensado naval espessura 20 mm, envernizadas e aparafusadas sobre base do mesmo material. Para a armação foi utilizada tela de aço eletrosoldada com malha 50 mm x 100 mm. Foram utilizados pedaços de isopor em forma de "L" com 2 cm de espessura e 2 cm de altura para vedar a parte superior das formas.

A argamassa foi produzida em misturador planetário. O preenchimento das formas foi feito manualmente, e foi utilizada uma plataforma vibratória para assentamento total do material. O desmolde foi feito 6 dias após cada produção, sendo a cura feita com as peças submersas em água. Foram produzidas 18 peças para a montagem no laboratório acústico. A Figura 2 resume o processo de produção das peças.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial (f_{ck}) da argamassa de cada etapa, em 30 corpos de prova com diâmetro 50 mm e altura 100 mm, na velocidade 0,3 MPa/s, em diferentes idades (7, 14, 21 e 28 dias), conforme os procedimentos de carregamento e determinação da resistência descritos na ABNT NBR 5739 [15]. Para o conjunto de dados analisado, 18 corpos de prova (descartando os menores e maiores valores de cada grupo), obteve-se resistência média de 38,56 MPa com desvio padrão de 5,22 MPa.



(a) Produção das formas.



(b) Preenchimento das formas.



(c) Desmolde.



(d) Peças prontas.

Figura 2: Processo de produção das peças (autores).

2.3 Ensaios laboratoriais

Os ensaios acústicos foram realizados em duas câmaras acústicas acopladas, sendo uma câmara reverberante (utilizada como sala emissora, com área de 10,56 m² e pé-direito variando entre 3,00 m e 3,40 m), e uma câmara semi-anecóica (utilizada como sala receptora, com dimensões de 3,00 m × 2,70 m -área de 8,10 m²- e pé-direito de 3,00 m). As duas câmaras são conectadas por uma abertura de ensaio com dimensões de 1,47 m × 1,26 m e profundidade de 0,40 m, resultando em uma área de elemento ensaiado de 1,85 m².

Os ensaios foram conduzidos com base nos procedimentos estabelecidos pelas normas ISO 10140-2:2021 [16] (medição laboratorial do isolamento sonoro aéreo de elementos construtivos), ISO 10140-4:2021 [17] (procedimentos de medição), ISO 10140-5:2021 [18] (requisitos para instalações e equipamentos de ensaio) e ISO 717-1:2020 [19] (avaliação do índice único ponderado R_w). Adicionalmente, foram observadas as recomendações da ISO 3382-2:2008 [20] para determinação do tempo de reverberação, bem como os requisitos metrológicos das normas IEC 61672-1:2013 [21] e IEC 60942:2017 [22] para instrumentação acústica e calibração.

Embora as dimensões das câmaras acústicas e da abertura de ensaio não atendam integralmente a todos os requisitos geométricos especificados na ISO 10140-5:2021 [18] para laboratórios de referência destinados à determinação do isolamento sonoro, os procedimentos de medição, instrumentação, aquisição e processamento dos dados seguiram as recomendações da ISO 10140-2 [16], ISO 10140-4 [17] e ISO 717-1 [19] na máxima extensão aplicável à instalação experimental disponível.

Adicionalmente, foram adotadas medidas para aumentar a confiabilidade dos resultados, incluindo a utilização de múltiplas posições de fonte e receptor, a vedação rigorosa das interfaces construtivas e a repetição sistemática das medições para todas as configurações avaliadas. Como os três protótipos foram ensaiados sob condições experimentais idênticas, os resultados obtidos permitem uma comparação consistente do desempenho acústico relativo entre as diferentes configurações da veneziana.

Montagem da amostra

Inicialmente foi executado o fechamento completo da abertura entre as duas câmaras por meio de alvenaria de blocos de concreto e elementos vazados acústicos. Na base da abertura foram assentadas duas fiadas de blocos de concreto de 19 × 19 × 39 cm, com massa unitária de 12,1 kg, apoiadas sobre três bandas resilientes com espessura de 5 mm. Os vazios internos dos blocos foram preenchidos com vermiculita expandida.

As juntas horizontais e verticais foram executadas com argamassa polimérica industrializada, com

espessura aproximada de 5 mm, garantindo a vedação total entre os blocos e as peças. Para ajuste dimensional das extremidades foram utilizados blocos compensadores de $4 \times 9 \times 19$ cm. Sobre a base foram assentados os elementos vazados do tipo A e os blocos laterais de apoio de $14 \times 19 \times 19$ cm. Na parte superior foram instalados blocos de concreto de $9 \times 19 \times 19$ cm, posicionados horizontalmente, contendo lã mineral em seu interior, complementados por blocos compensadores para fechamento das extremidades.

Após a montagem da parede, todas as interfaces entre o sistema ensaiado e a estrutura existente foram vedadas com lã de rocha de densidade 32 kg/m^3 e espuma expansiva de poliuretano. As juntas remanescentes foram preenchidas com argamassa polimérica, eliminando possíveis caminhos de transmissão sonora por frestas e garantindo que a transmissão sonora ocorresse predominantemente através do elemento ensaiado. A Figura 3 mostra as duas câmaras acopladas em planta e cortes, com inserção dos elementos vazados.

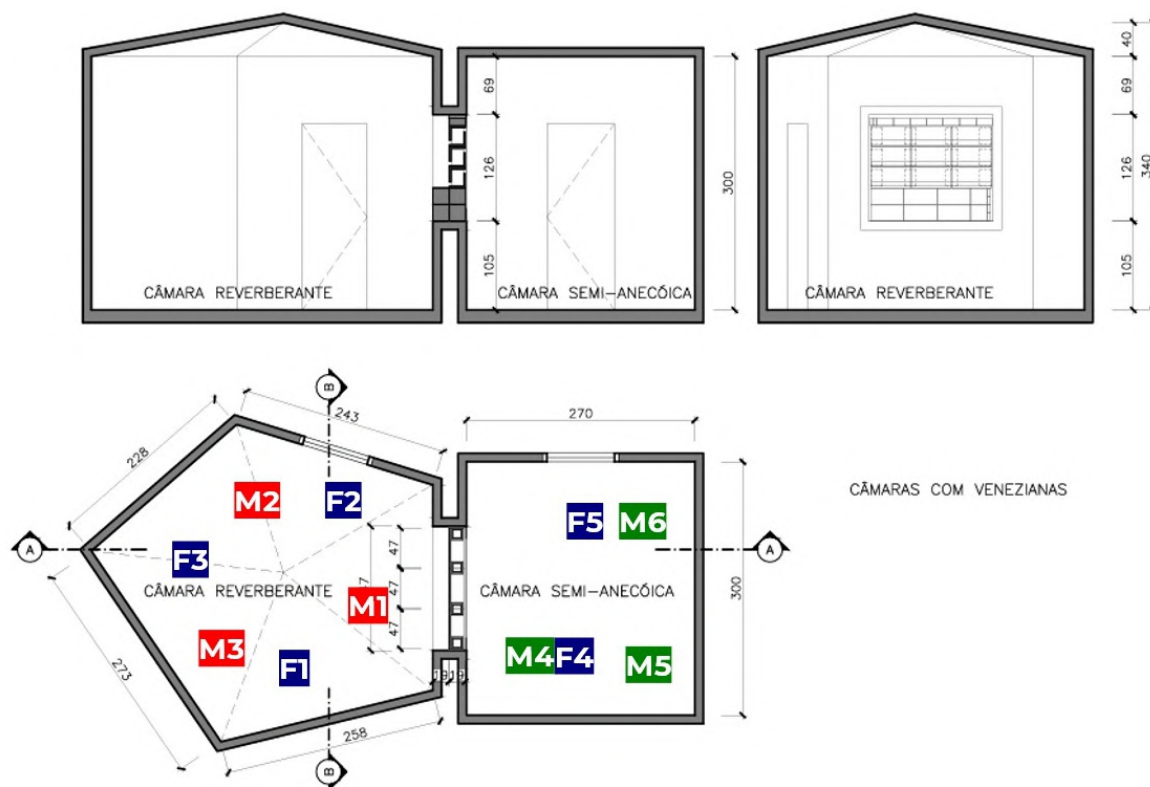


Figura 3: Planta e cortes das câmaras acopladas com inserção dos elementos vazados (autores).

Configurações avaliadas

Foram avaliadas três configurações distintas do elemento vazado acústico:

- **Configuração A:** elemento vazado sem material absorvente interno;
- **Configuração B:** elemento vazado com lã de rocha de 51 mm de espessura e densidade de 32 kg/m^3 aplicada em uma face interna de cada cavidade;
- **Configuração C:** elemento vazado com lã de rocha de 51 mm de espessura e densidade de 32 kg/m^3 aplicada em três faces internas de cada cavidade.

Todas as demais características geométricas e construtivas do sistema permaneceram inalteradas ao longo dos ensaios. A Figura 4 mostra as três configurações em planta (a) e em corte (b).

sonora na câmara de emissão; (b) a fonte dodecaédrica e o sonômetro nas medições de tempo de reverberação na câmara de recepção; (c) o sistema montado na Configuração A; e (d) a aplicação de lã para as Configurações B e C.

As posições de fonte e microfone em planta são apresentadas na Figura 3. Foram realizadas 18 medições de isolamento sonoro, sendo 9 com microfone na sala de emissão (M1, M2, M3), 9 com microfone na sala receptora (M4, M5, M6), e todas com a fonte na sala emissora (F1, F2, F3). Para obtenção do T_{30} foram realizadas 4 medições na câmara receptora (F4, F5, M5, M6).



(a) Fonte sonora e sonômetro na sala de emissão sonora.



(b) Fonte sonora e sonômetro na sala de recepção.



(c) Sistema montado na sala de emissão sonora.



(d) Aplicação de lã de rocha nas cavidades dos elementos vazados.

Figura 5: Ensaios acústicos no Laboratório de Vibro Acústica da FEM/UNICAMP (autores).

Determinação do índice de redução sonora

O índice de redução sonora (R) foi calculado para cada banda de um terço de oitava entre 100 Hz e 5000 Hz conforme a ISO 10140-2 (Equação 1):

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (1)$$

em que (L_1) corresponde ao nível médio de pressão sonora na câmara emissora (dB); (L_2) corresponde ao nível médio de pressão sonora na câmara receptora (dB); (S) é a área do elemento ensaiado (1,85 m²); (A) é a área de absorção equivalente da câmara receptora (m²).

A partir desse procedimento foram obtidas as curvas de isolamento sonoro em bandas de um terço de oitava para cada configuração avaliada.

Avaliação do índice de redução sonora ponderado

Os valores de índice de redução sonora obtidos experimentalmente foram avaliados conforme os procedimentos da ISO 717-1, por meio do ajuste da curva de referência normalizada, resultando no índice de redução sonora ponderado (R_w).

2.4 Simulações numéricas

Modelo geométrico

O modelo tridimensional das duas câmaras acopladas do laboratório foi elaborado considerando os volumes correspondentes aos vazios dos ambientes e entre as cavidades dos elementos vazados. Como a sala receptora tem revestimentos de absorção acústica em todas as paredes, reduziu-se 10 cm em cada de modo que a sala ficou com dimensões 2,8 m x 2,5 m x 2,8 m. Ao final, foram inseridos planos horizontais

na altura dos microfones (1,40 m) na sala emissora e na sala receptora, seccionando os volumes. Cada um dos três volumes (câmara emissora, câmara receptora e cavidades das venezianas) foi separado em um grupo diferente no *software*, para facilitar a inserção de dados, como coeficientes de absorção e impedância acústica.

Modelo acústico

Os volumes correspondentes ao meio de propagação sonora foram definidos considerando as propriedades do ar, adotando-se densidade de $1,225 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$, velocidade do som de 346 m/s e temperatura de 25° C. Os demais parâmetros, como condutividade térmica, viscosidade, coeficiente de absorção, etc., foram mantidos conforme os valores padrão do *software*. Os volumes de ar das câmaras emissora e receptora foram definidos em uma mesma região física acústica, considerando o comportamento compressível do fluido e a formulação acústica linear empregada em análises harmônicas pelo método dos elementos finitos [23, 24].

As interfaces entre os volumes adjacentes, correspondentes aos planos horizontais de referência utilizados para obtenção dos níveis de pressão sonora, foram configuradas como *no separation*, permitindo a continuidade do domínio acústico e evitando a introdução de descontinuidades artificiais no campo de pressão sonora decorrentes da discretização geométrica do modelo.

A discretização do domínio acústico foi realizada por meio de dois controles de malha: um aplicado às cavidades internas das venezianas acústicas, com tamanho de elemento de 25 mm, e outro aplicado aos volumes de ar das câmaras emissora e receptora, com elementos de aproximadamente 240 mm. O refinamento localizado nas cavidades teve como objetivo representar de maneira mais adequada os fenômenos acústicos associados às pequenas dimensões geométricas do sistema, incluindo reflexões internas, difração e transmissão sonora nos canais de passagem. Por outro lado, a utilização de elementos maiores nas câmaras teve como finalidade reduzir o custo computacional da simulação.

A definição do tamanho dos elementos deve considerar a relação entre a dimensão da malha e o comprimento de onda acústico (λ), uma vez que a precisão de modelos harmônicos baseados em elementos finitos depende diretamente da adequada representação espacial do campo de pressão sonora. Em geral, recomenda-se que o tamanho máximo dos elementos seja inferior a aproximadamente $\lambda/6$ para garantir adequada representação das ondas acústicas [23, 24], onde (Equação 2):

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

c é a velocidade do som no meio e f corresponde à frequência analisada. Deste modo, considerando o critério de refinamento da malha, com o menor elemento $h = 0,025 \text{ m} = \lambda/6$, e a velocidade do som adotada $c = 346 \text{ m/s}$, a frequência limite f associada é 2306 Hz.

A limitação da malha está relacionada principalmente ao compromisso entre precisão numérica e custo computacional, especialmente devido ao elevado número de elementos necessário para representar adequadamente as regiões de pequenas dimensões geométricas. Assim, o refinamento adotado buscou equilibrar a representação dos fenômenos acústicos relevantes e a viabilidade computacional da simulação.

Além da avaliação do refinamento da malha, foi analisado o comportamento acústico da sala receptora por meio da frequência de *Schroeder*, que representa aproximadamente a transição entre uma região dominada por modos acústicos discretos e uma região em que o comportamento estatístico do campo sonoro é predominante [25]. A frequência de *Schroeder* pode ser estimada pela Equação 3.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad (3)$$

em que RT_{60} corresponde ao tempo de reverberação médio do recinto e V representa o volume da sala

(24,3 m³).

A partir dos valores de tempo de reverberação obtidos entre 100 Hz e 5000 Hz, foi calculado o valor médio de RT_{60} , resultando em 0,145 s. Dessa forma, a Frequência de Schroeder calculada foi aproximadamente 155 Hz. Logo, os resultados obtidos abaixo dessa frequência devem ser interpretados considerando a influência dos modos próprios da sala, enquanto frequências superiores apresentam progressivamente maior aproximação ao comportamento estatístico do campo acústico.

Análise acústica

A análise acústica foi realizada utilizando o módulo *Harmonic Acoustics* do software ANSYS, baseado na solução harmônica da equação de Helmholtz pelo método dos elementos finitos. Essa abordagem permite determinar a distribuição do campo de pressão sonora considerando os fenômenos de propagação, reflexão, transmissão e absorção em geometrias complexas, sendo amplamente empregada na análise de dispositivos acústicos e sistemas de isolamento sonoro [23].

A resposta acústica foi calculada em bandas de 1/3 de oitava, entre 100 Hz e 5000 Hz, totalizando 18 frequências de análise, compatíveis com os procedimentos experimentais e com as recomendações das normas ISO 10140-2, ISO 717-1 e IEC 61260-1 [16, 19, 26]. Todos os volumes de ar do modelo, incluindo as câmaras emissora e receptora e as cavidades internas das venezianas, foram considerados pertencentes a um único domínio acústico, permitindo a solução integrada do campo sonoro.

As condições de contorno relacionadas à absorção sonora foram definidas por meio de coeficientes de absorção atribuídos às superfícies internas do modelo. Nas cavidades das venezianas foram adotados coeficientes de absorção (α) correspondentes ao concreto [27]. Para a câmara receptora foram utilizados coeficientes de absorção representativos de um ambiente altamente absorvente, considerando $\alpha = 0,39$ para 125 Hz e $\alpha = 1,00$ para as demais bandas entre 250 Hz e 4000 Hz, conforme catálogo técnico de cunhas acústicas comerciais [28]. Nas configurações contendo material absorvente foram utilizados os coeficientes de absorção da lã de rocha Sopra Rock Pad Light, da Rock Fibras, com espessura de 51 mm e densidade de 28 kg/m³, correspondentes a $\alpha = 0,27 / 0,55 / 0,92 / 0,98 / 0,96 / 0,96$, nas bandas de oitava entre 125 Hz e 4000 Hz [29].

A excitação acústica foi aplicada em duas superfícies opostas da câmara emissora por meio de uma condição de pressão acústica prescrita de 1 Pa, correspondente a um nível de pressão sonora de referência de 94 dB. As superfícies externas da câmara emissora foram modeladas utilizando condição de impedância acústica, com resistência acústica de 50 kg/mm²s e reatância de 10 kg/mm²s, representando superfícies refletoras e evitando a consideração de paredes perfeitamente rígidas [25, 30].

Essa configuração permitiu representar simultaneamente a propagação sonora no meio fluido, a absorção nas superfícies internas, a excitação controlada da fonte e as perdas associadas às condições de contorno, possibilitando a determinação do desempenho acústico das venezianas por meio da diferença entre os níveis médios de pressão sonora obtidos nas câmaras emissora e receptora.

Solução

Os resultados foram obtidos a partir da resposta em frequência do nível de pressão sonora em dois planos horizontais localizados nas câmaras emissora e receptora, utilizando bandas de 1/3 de oitava entre 100 Hz e 5000 Hz, em conformidade com os ensaios experimentais. Para cada frequência analisada foi calculado o nível médio de pressão sonora em cada plano, sendo esses valores utilizados para determinar o índice de redução sonora (R) conforme a ISO 10140-2 (Equação 1), empregando o mesmo procedimento adotado nas medições laboratoriais.

A Figura 6(a) apresenta o modelo geométrico desenvolvido no módulo *SpaceClaim* e a Figura 6(b) mostra um exemplo da distribuição dos níveis de pressão sonora obtida na simulação da Configuração A (sem lã mineral), para a frequência de 500 Hz.

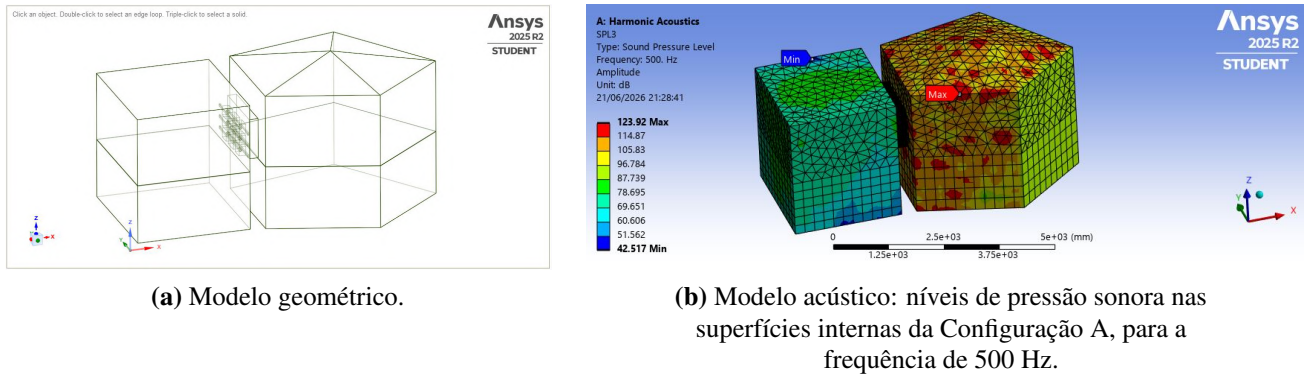


Figura 6: Modelo geométrico e modelo acústico (autores).

3. Resultados e discussão

3.1 Medições acústicas

As curvas R com os resultados do R_w para cada uma das três configurações (A, B e C) são apresentadas na Figura 7. As curvas espectrais e os índices únicos obtidos permitiram avaliar a influência da inserção progressiva de material absorvente nas cavidades internas dos elementos vazados. Observou-se aumento contínuo do desempenho acústico à medida que a quantidade de lã mineral foi ampliada, indicando redução da energia sonora transmitida através dos canais internos da veneziana.

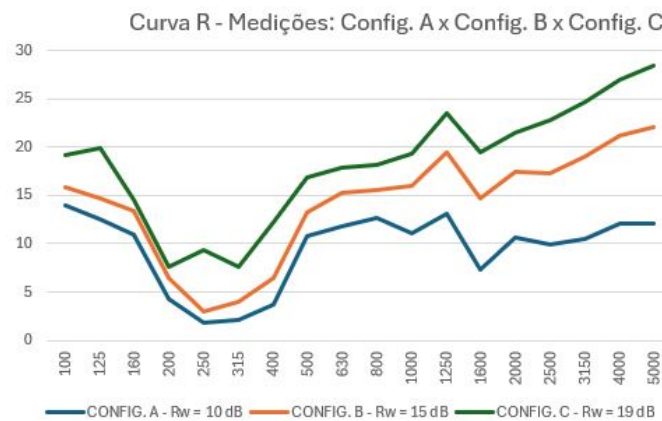


Figura 7: Curva R_w - Medições - Configuração A x Configuração B x Configuração C (autores).

Comparando-se as três configurações, verificou-se um incremento de 5 dB no índice (R_w) entre as Configurações A (sem lã mineral) e B (com lã de rocha em uma face interna), e um incremento adicional de 4 dB na Configuração C (quando a lã mineral passou a revestir três faces internas das cavidades). Em relação à Configurações A e C, a configuração com revestimento em três faces apresentou ganho total de 9 dB no índice ponderado de isolamento sonoro.

O resultado experimental obtido para a Configuração C ($R_w = 19$ dB) evidencia o potencial da solução proposta para aplicações que demandam simultaneamente ventilação natural e controle de ruído. Esse desempenho é comparável ao de modelos de esquadrias acústicas disponíveis comercialmente destinados à atenuação moderada de ruído, cujos índices ponderados de redução sonora frequentemente iniciam-se na faixa entre $R_w = 18$ e 19 dB. Dessa forma, as venezianas acústicas desenvolvidas foram capazes de proporcionar níveis de isolamento sonoro semelhantes aos observados em algumas soluções de janelas acústicas de entrada no mercado, apresentando como principal diferencial a possibilidade de ventilação natural permanente, sem a necessidade de abertura de esquadrias para renovação do ar.

Essa característica torna a solução particularmente interessante para edificações localizadas em regiões

de clima quente e úmido, nas quais a ventilação natural contribui para a melhoria do conforto térmico e para a redução do consumo energético associado aos sistemas de climatização artificial. Por outro lado, diferentemente das esquadrias envidraçadas convencionais, as venezianas acústicas apresentam limitações quanto ao aproveitamento da iluminação natural, uma vez que a geometria dos canais acústicos e a presença do material absorvente restringem a passagem direta da luz. Assim, sua aplicação mostra-se especialmente adequada para ambientes nos quais os requisitos de ventilação contínua e controle de ruído sejam prioritários em relação à disponibilidade de iluminação natural, podendo ser associadas com soluções para iluminação natural.

3.2 Simulações acústicas

Configuração A - sem lã mineral

A comparação da curva R com o resultado do índice de redução sonora ponderado R_w medido e simulado para a Configuração A é apresentada na Figura 8(a). Para essa configuração (sem lã mineral), observa-se que a curva obtida por simulação numérica reproduziu de forma consistente a tendência geral da curva medida experimentalmente, especialmente nas médias e altas frequências. Ambas as curvas apresentam redução do isolamento nas baixas frequências, com aumento progressivo a partir de aproximadamente 500 Hz e valores próximos entre si acima de 2500 Hz. Entretanto, são observadas diferenças mais significativas nas bandas de 100 Hz, 125 Hz, 250 Hz e, principalmente, na região em torno de 1000 Hz, onde a simulação previu um pico de isolamento superior ao medido experimentalmente. Essas discrepâncias podem ser atribuídas às limitações inerentes ao modelo numérico, incluindo a representação simplificada das condições de contorno, as incertezas associadas aos coeficientes de absorção sonora adotados, a discretização da malha e a não consideração de fenômenos construtivos presentes no protótipo real, como imperfeições geométricas, frestas, heterogeneidades do material e perdas por transmissão estrutural.

Além disso, conforme discutido na metodologia, a malha utilizada apresenta maior confiabilidade até aproximadamente 2 kHz, sendo esperados erros crescentes nas frequências superiores devido à relação entre o tamanho dos elementos e o comprimento de onda acústico. Apesar dessas limitações, a simulação apresentou boa concordância qualitativa com os resultados experimentais, reproduzindo adequadamente o comportamento global do sistema e resultando em um índice ponderado de isolamento sonoro (R_w) de aproximadamente 9 dB, valor compatível com o desempenho observado para a configuração sem material absorvente nas cavidades. Dessa forma, os resultados indicam que o modelo numérico é capaz de representar as principais tendências do fenômeno físico analisado, constituindo uma ferramenta adequada para avaliação comparativa e desenvolvimento de soluções de venezianas acústicas.

Configuração B - com lã mineral em 1 face interna

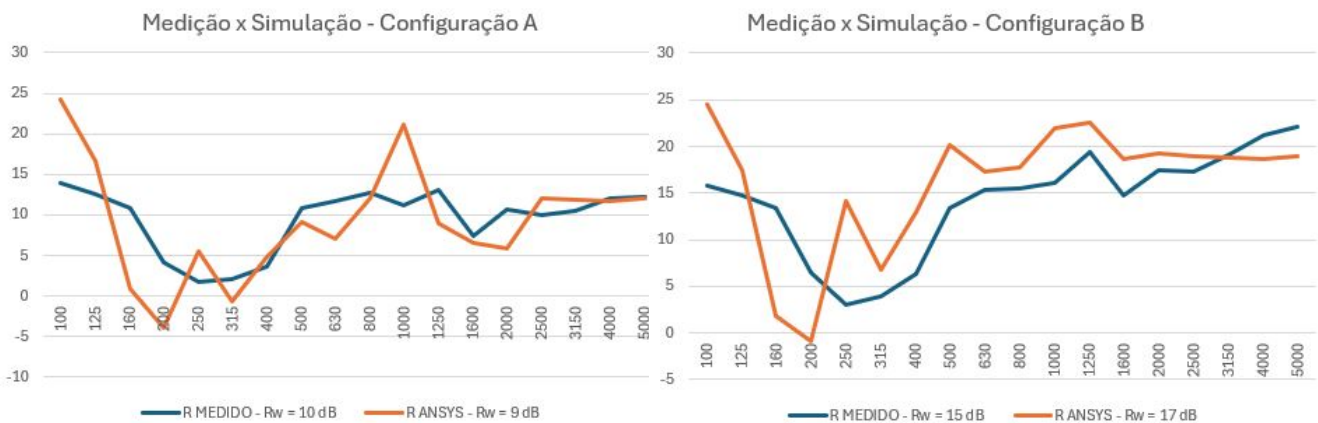
A comparação da curva R com o resultado do índice de redução sonora ponderado R_w medido e simulado para a Configuração B é apresentada na Figura 8(b). Para essa configuração, correspondente à aplicação de lã de rocha em uma face interna de cada elemento vazado, observa-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, tanto em termos da tendência geral das curvas quanto do índice ponderado de isolamento sonoro. A medição laboratorial resultou em $R_w = 15$ dB, enquanto a simulação numérica realizada no ANSYS apresentou $R_w = 17$ dB, correspondendo a uma diferença de 2 dB. De maneira geral, ambas as curvas apresentam redução do isolamento nas baixas frequências, com valores mínimos entre 200 Hz e 315 Hz, seguida por um aumento progressivo do desempenho acústico a partir de aproximadamente 400 Hz. A simulação reproduziu adequadamente o crescimento do isolamento nas médias e altas frequências, embora tenha apresentado valores superiores aos medidos em grande parte da faixa analisada.

As maiores discrepâncias ocorreram nas baixas frequências, entre 100 Hz e 250 Hz, onde a curva numérica apresentou oscilações mais acentuadas do que as observadas experimentalmente, possivelmente associadas à ocorrência de ressonâncias locais nas cavidades internas dos elementos vazados e às

simplificações adotadas na modelagem dos materiais absorventes. As simulações numéricas apresentaram resultados superiores aos experimentais em 100 Hz, 125 Hz, 250 Hz a 2500 Hz, e valores inferiores aos medidos em 160 Hz, 200 Hz, 4000 Hz e 5000 Hz.

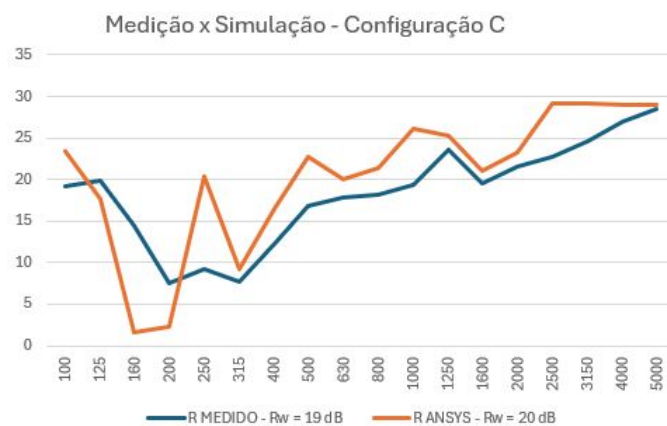
De modo geral, a proximidade entre os valores de (R_w) obtidos por medição e simulação indica que a modelagem numérica reproduziu de maneira coerente o comportamento acústico da solução analisada. As diferenças observadas podem ser atribuídas às simplificações inerentes ao modelo computacional, incluindo a representação idealizada da geometria, a adoção de propriedades acústicas uniformes para os materiais, as condições de contorno empregadas e a não consideração de imperfeições construtivas presentes no protótipo real, tais como frestas, variações dimensionais, heterogeneidades dos materiais e possíveis transmissões laterais. Ainda assim, os resultados demonstram que o modelo desenvolvido apresenta capacidade adequada para prever o desempenho acústico global das venezianas e avaliar a influência da inserção de materiais absorventes nas cavidades internas do sistema.

Configuração C - com lã mineral em 3 faces internas



(a) Medição vs. simulação - Configuração A (autores).

(b) Medição vs. simulação - Configuração B (autores).



(c) Medição vs. simulação - Configuração C (autores).

Figura 8: Medição vs. simulação - Configurações A, B e C (autores).

A comparação da curva R com o resultado do índice de redução sonora ponderado R_w medido e simulado para a Configuração C é apresentada na Figura 8. Para essa configuração, correspondente à aplicação de lã de rocha em três faces internas das cavidades de cada elemento vazado, observa-se uma concordância entre os resultados experimentais e numéricos quanto à tendência geral da resposta acústica, embora também com discrepâncias em determinadas bandas de frequência. O índice ponderado de isolamento sonoro obtido experimentalmente foi superior ao das demais configurações, evidenciando a contribuição

do aumento da área revestida com material absorvente para a redução da energia sonora transmitida através do sistema. A medição laboratorial resultou em $R_w = 19$ dB, enquanto a simulação numérica realizada no ANSYS apresentou $R_w = 20$ dB, correspondendo a uma diferença de 1 dB. De forma geral, tanto a curva medida quanto a simulada apresentam redução do isolamento nas baixas frequências, com valores mínimos entre 160 Hz e 315 Hz, seguida por um crescimento progressivo do desempenho acústico a partir de 400 Hz.

A simulação reproduziu adequadamente a tendência de aumento do isolamento nas médias e altas frequências, porém apresentou valores superiores aos medidos na maior parte da faixa analisada. As maiores diferenças ocorreram entre 250 Hz e 1250 Hz, destacando-se as bandas de 250 Hz, 500 Hz e 1000 Hz, nas quais o modelo numérico superestimou o desempenho acústico do sistema. Em contrapartida, observa-se uma boa aproximação entre os resultados experimentais e simulados nas bandas de 1250 Hz a 2000 Hz, indicando que o modelo representou de forma mais adequada o comportamento acústico nessa região espectral. Acima de 2500 Hz, a simulação manteve valores relativamente constantes próximos de 29 dB, enquanto os resultados medidos continuaram apresentando crescimento gradual até aproximadamente 28,5 dB em 5000 Hz, reduzindo progressivamente a diferença entre as curvas.

O comportamento observado sugere que a inserção de lã de rocha em três faces internas das cavidades promove aumento significativo da dissipação de energia sonora por absorção, reduzindo a intensidade das reflexões múltiplas no interior dos canais acústicos. Entretanto, a modelagem numérica considera propriedades acústicas homogêneas e coeficientes de absorção idealizados para o material absorvente, não contemplando possíveis variações de densidade, irregularidades de instalação, descontinuidades geométricas ou imperfeições construtivas presentes no protótipo ensaiado. Além disso, as simplificações associadas às condições de contorno, ao refinamento da malha e à representação das cavidades internas podem influenciar a resposta simulada, particularmente em frequências associadas a fenômenos modais e ressonâncias locais. As frequências estimadas para os modos fundamentais das cavidades, próximas de 865 Hz e 1153 Hz, encontram-se em uma região em que são observadas algumas das maiores divergências entre medição e simulação, sugerindo a influência de ondas estacionárias e acoplamentos acústicos internos não totalmente representados pelo modelo.

Apesar dessas diferenças pontuais, a simulação reproduziu adequadamente o comportamento global da solução construtiva, indicando corretamente a tendência de melhoria do isolamento sonoro decorrente do aumento da superfície revestida com lã de rocha. Os resultados obtidos demonstram que o modelo numérico apresenta capacidade para análises comparativas e estudos paramétricos de venezianas acústicas, constituindo uma ferramenta útil para a avaliação preliminar de soluções de ventilação natural com atenuação sonora.

4. Considerações finais

Os resultados obtidos demonstram que a incorporação de material absorvente nas superfícies internas das cavidades dos elementos vazados constitui uma estratégia eficaz para aumentar o isolamento sonoro de sistemas destinados à ventilação natural. A aplicação progressiva de lã de rocha nas cavidades promoveu melhorias consistentes no desempenho acústico, evidenciando a importância dos mecanismos de absorção sonora interna para a redução da transmissão sonora através dos caminhos de ventilação.

A comparação entre os resultados experimentais e as simulações numéricas realizadas por meio do método dos elementos finitos indicou que o modelo desenvolvido foi capaz de reproduzir de forma representativa o comportamento acústico global das soluções avaliadas, bem como as tendências de desempenho observadas entre as diferentes configurações. Embora tenham sido observadas algumas discrepâncias em determinadas bandas de frequência, incluindo regiões potencialmente influenciadas por fenômenos modais e ressonâncias locais das cavidades, os resultados numéricos apresentaram concordância apropriada com os dados experimentais, demonstrando o potencial da modelagem computacional como ferramenta de apoio ao desenvolvimento e à otimização de dispositivos acústicos para ventilação

natural.

Considerando as limitações geométricas da instalação experimental e as restrições computacionais associadas à malha do modelo numérico, os resultados devem ser interpretados principalmente de forma comparativa. Ainda assim, os ensaios e as simulações indicam de forma consistente que a utilização de materiais absorventes nas cavidades internas contribui significativamente para o aumento do isolamento sonoro, mantendo a função de ventilação do sistema.

Os resultados obtidos sugerem que a solução proposta apresenta potencial para aplicação em edificações localizadas em climas quentes e tropicais, nas quais a ventilação natural desempenha papel relevante na redução do consumo energético associado aos sistemas de condicionamento artificial de ar. Como trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios em escala real conforme os requisitos geométricos da ISO 10140 [16–18], bem como a investigação da influência de diferentes geometrias de cavidades, espessuras e propriedades dos materiais absorventes, condições de escoamento de ar e modelos numéricos mais refinados, visando ampliar a compreensão dos mecanismos físicos envolvidos e aumentar a precisão das previsões numéricas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FEM/UNICAMP pela disponibilização do Laboratório de Vibro Acústica e pelo suporte técnico, e à FECFAU/UNICAMP pela disponibilização do sistema de medição acústica Brüel & Kjaer utilizado nos ensaios experimentais e também no apoio técnico.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) - Processos nº [#E-26/201.369/2022 e #E-26/204.437/2025].

Referências

1. World Health Organization. *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe, 2018.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho, 2024.
3. Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. Florianópolis, Brazil: Eletrobras / Procel, 2014. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf.
4. Araujo, B. C. D. *Proposta de elemento vazado acústico*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2010.
5. Oiticica, M. L. G. R. *Desempenho acústico de diferentes tipologias de peitoris ventilados*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2010.
6. Coutinho, L. G.; Michalski, R. L. X. N. e Shimomura, A. R. P. State-of-the-art of noise control in openings for natural ventilation and its applicability to the comfort in regions of tropical climate. Em *Proceedings of the 49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2020)*, Seoul, South Korea, 2020.
7. International Organization for Standardization. Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound, 2017.
8. Busa, L.; Secchi, S. Effect of façade shape for the acoustic protection of buildings. *Building Acoustics*, 17(4):317–338, 2010. ISSN 2059-8025.
9. Du, L.; Lau, S.K.; Lee S. E. Sound insulation of ventilation partitions with different configurations. 2019.
10. SOMAX Ambiental & Acústica. Slimshield®: Venezianas acústicas – catálogo técnico. <https://www.somaxbrasil.com.br/upload/arquivos/arquivo20120611113601.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2026.
11. Passivent. Soundscoop – technical brochure. <https://www.passivent.com/download/passivent-aircool-ventilators/>. Accessed June 27, 2026.
12. Costa, E.; Westphal, F. Soluções de atenuação sonora para ventilação natural através de janelas: revisão de literatura. *Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído 18.1*, págs. 1–8, 2020. ISSN 2764-9105.
13. Santos, W. *Desenvolvimento de Metodologia de Dosagem de Argamassas de Revestimento e Assentamento*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014.
14. Barbosa, T. F. *Estudo e desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassa estrutural auto adensável*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2016.

15. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, 2018.
16. International Organization for Standardization. ISO 10140-2: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation, 2021.
17. International Organization for Standardization. ISO 10140-4: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 4: Measurement procedures and requirements, 2021.
18. International Organization for Standardization. ISO 10140-5: Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 5: Requirements for test facilities and equipment, 2021.
19. International Organization for Standardization. ISO 717-1: Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, 2020.
20. International Organization for Standardization. ISO 3382-2: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, 2008.
21. International Electrotechnical Commission. IEC 61672-1: Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications, 2013.
22. International Electrotechnical Commission. IEC 60942: Electroacoustics – Sound calibrators, 2017.
23. Ihlenburg, Florian. *Finite Element Analysis of Acoustic Scattering*. New York, USA: Springer, 1998.
24. Zienkiewicz, Olek C.; Taylor, Robert L. e Zhu, Jian Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7^a ed. Oxford, UK: Elsevier, 2013. ISBN 978-1-85617-633-0.
25. Cox, Trevor J. e D’Antonio, Peter. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. 2^a ed. London, UK: Taylor & Francis, 2009. ISBN 9780415471749.
26. International Electrotechnical Commission. IEC 61260-1: Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters – Part 1: Specifications, 2014.
27. Bistafa, Sylvio R. *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. 2^a ed. São Paulo, Brasil: Blucher, 2010. ISBN 9788521205568.
28. VIBRASOM. Dossiê técnico dos revestimentos acústicos sonique. <https://vibrasom.ind.br/wp-content/uploads/2023/04/dossie-2023.pdf>, 2023. Accessed: 29 Jun. 2026.
29. ROCKFIBRAS. Catálogo técnico: lã de rocha para isolamento termoacústico. <https://rockfibras.com.br/storage/uploads/home/67d2eedfc0b8b.pdf>, 2025. Accessed: 29 Jun. 2026.
30. Bies, David A.; Hansen, Colin H. e Howard, Carl Q. *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. 6^a ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 2018. ISBN 9781138198651.