XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Desempenho acústico de lajes não homogêneas

Acoustic performance of non-homogeneous slabs

Maria Fernanda de Oliveira
Itt Peformance Unisinos | São Leopoldo | Brasil | mariaon@unisinos.br
Rafael Ferreira Heissler
Itt Peformance Unisinos | São Leopoldo | Brasil | rheissler@unisinos.br
Bianca Gass Walter
Itt Peformance Unisinos | São Leopoldo | Brasil | biancagw@unisinos.br
Fernanda Pacheco
Itt Peformance Unisinos | São Leopoldo | Brasil | fernandapache@unisinos.br

Resumo

Neste trabalho são apresentadas as características de isolamento acústico para os sons aéreos e de impacto de três tipos de lajes, sendo lajes nervuradas de duas espessuras, tipo vigota e lajota de duas espessuras e uma laje de concreto maciço de 12cm de espessura. Foram realizados ensaios em laboratório conforme ISO 10140. Resultados: a) elementos vazados reduzem o isolamento ao som aéreo e alteram a composição espectral do som medido; b) o aumento em 2cm na altura das lajes vigota/lajota não altera o R_w; e c) nas lajes nervuradas o aumento de 10cm na altura das vigas não influencia nos valores de $L_{n,w}$.

Palavras-chave: Desempenho acústico. Sistemas de pisos. Ensaios em laboratório. Ruído de impacto. Isolamento ao som aéreo.

Abstract

In this paper, the acoustic insulation characteristics for airborne and impact sounds of three types of slabs are presented, considering ribbed slabs of two thicknesses, beam/block slabs of two thicknesses and one solid concrete slab. Laboratory tests were carried out with ISO 10140 procedures. Results: a)hollow elements reduce airborne sound insulation and alter the spectral composition of the measured sound; b)the increase from 8 to 12cm in the height of the joist/tile slabs does not change the R_w ; c)in the ribbed slabs the increase of 10cm in the height of the beams does not influence the values of $L_{n,w}$.

Keywords: Acoustic performance. Flooring systems. Laboratory tests. Impact noise. Airborne sound insulation.

Como citar:
OLIVEIRA, M. F.; HEISSLER, R. F.; WALTER, B. G.; PACHECO, F. Desempenho acústico de lajes não homogêneas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

INTRODUÇÃO

Garantir o desempenho acústico das edificações se tornou um desafio para os projetistas e trouxe à tona aspectos referentes a concepção inicial dos sistemas construtivos. De acordo com Heissler *et. al* (1), existe uma carência de conhecimento técnico nacional e muitos dos dados existentes sobre o desempenho acústico de sistemas construtivos são de outros países e não representam, necessariamente, os materiais utilizados no cenário brasileiro.

Os campos de vibração típicos no meio sólido são classificados como barras e placas, e podem ser associados aos principais componentes estruturais do edifício (2). As placas, em um edifício, são as paredes e pisos que delimitam os ambientes, e desempenham um papel fundamental tanto na radiação sonora quanto na transmissão do para a estrutura (3).

Muitas paredes e pisos, ou suas partes constituintes, podem ser representados como placas sólidas, portanto, as placas representam um elemento de construção fundamental para o entendimento da propagação do som em edificações (4). Na prática, existem placas que são compostas por outros elementos, como paredes de alvenaria com blocos com grandes vazios internos. As vigas e pilares, classificados barras quanto à resposta vibracional, desempenham um papel menor em termos de radiação sonora, mas têm importância na irradiação do som transmitido pela estrutura entre elementos do tipo placa (5).

A transmissão sonora em placas ortotrópicas difere da transmissão em placas isotrópicas, pois em placas ortotrópicas as ondas de flexão apresentam variações em sua direção (4). A diferença na rigidez de flexão em placas planas pode resultar em anisotropia do material da placa como sistemas construtivos com vigas, ondulações, desníveis e outros. Em painéis com vigas acopladas para o aumento da rigidez estrutural, elementos monolíticos, o aumento da rigidez na flexão frequentemente aumentam a perda de transmissão (5).

De acordo com Patrício (2), a rigidez de uma placa, ou painel, tem grande influência no controle da transmissão das baixas frequências, visto que, as primeiras ressonâncias podem ser verificadas na transição entre baixas e médias frequências, sendo indicado seu controle através do uso de sistemas de amortecimento que reduzem a amplitude da vibração de ressonância. Os sons em médias frequências têm sua capacidade de transmissão influenciada pela massa, sendo que, o aumento na massa aumenta o isolamento acústico de um painel. Nos intervalos que compreendem as altas frequências podem ser verificadas outras ressonâncias causadas por ondas de flexão, que originam o efeito da coincidência. Assim como a ressonância nas baixas frequências, a coincidência representa perdas no isolamento acústico que podem ser reduzidas com a adoção de elementos que garantam o amortecimento do sistema, para limitar as amplitudes de vibração e minimizar a queda do isolamento pela coincidência. (6, 7)

Em sistemas construtivos executados com vigotas de concreto e lajotas cerâmicas a radiação acústica é elevada e ocorre nas bandas de altas frequências, provocada pelas cavidades de ar principalmente devido a ressonâncias de cavidades de elementos vazados, conforme concluído em estudos anteriores (8–11).

No estudo de Oliveira e Patrício (12), foram analisados cinco tipos de lajes não homogêneas (nervurada com e sem cubetas preenchidas com EPS, tipo T e tipo vigota e lajota), com e sem contrapiso acima do capeamento, por meio de análise por elementos finitos, mediante a excitação de uma fonte de impacto. Os resultados indicaram que, comparativamente, a laje nervurada tem maior resposta vibracional com a fonte de impactos, sendo a maior amplitude identificada nas frequências entre 1,3 kHz e 1,5 kHz, e que o uso do capeamento de concreto reduz a resposta vibracional nas altas frequências nesses tipos de lajes.

Este trabalho tem como objetivo determinar as características de isolamento acústico para os sons aéreos e de impacto em três tipos de lajes, sendo lajes nervuradas bidirecionais de duas espessuras, pré-fabricadas tipo vigota e lajota de duas espessuras e uma laje de concreto maciço de 12 cm de espessura.

MÉTODO

Foram definidos dois tipos de lajes não homogêneas, com duas variações de altura em cada, além de outra laje denominada laje padrão de concreto maciço. As amostras de lajes nervuradas bidirecionais de concreto armado com cubetas com preenchimento em EPS foram testadas com espessuras totais de 25 e 35 cm. As espessuras das lajes pré-moldadas de vigota protendida de concreto e lajota cerâmica foram de 13 e 17 cm. As especificações dos sistemas estão na Tabela 1.

Tabela 1: Características das amostras

Sigla	Descrição da laje	Altura total (cm)
CM	Concreto maciço armado.	12
N20	Nervurada de concreto armado, cubetas com dimensões de 70 x 70 x 20 cm preenchidas em EPS e espessura de mesa de 5 cm.	25
N30	Nervurada de concreto armado, cubetas com dimensões de 70 x 70 x 30 cm preenchidas em EPS e espessura de mesa de 5 cm.	35
V8	Pré-moldada com vigota protendida de concreto e lajota cerâmica (dimensões 37 x 20 x 8 cm) e capa de concreto com espessura de 5 cm.	13
V12	Pré-moldada com vigota protendida de concreto e lajota cerâmica (dimensões 37 x 20 x 12 cm) e capa de concreto com 5 cm de espessura.	17

As lajes foram construídas no chão do laboratório (Figura 1) e, após o tempo de cura de 28 dias, foram transferidas para a câmara através do içamento e movimentação com a ponte rolante (Figura 2).

Figura 1: Execução das amostras de laje de concreto maciço CM (à esquerda); lajes nervuradas N20 e N30 (ao centro) e lajes tipo vigota/lajota (à direita)



Figura 2: Movimentação das amostras de lajes nervuradas (à esquerda) e das lajes tipo vigota/lajota (à direita)



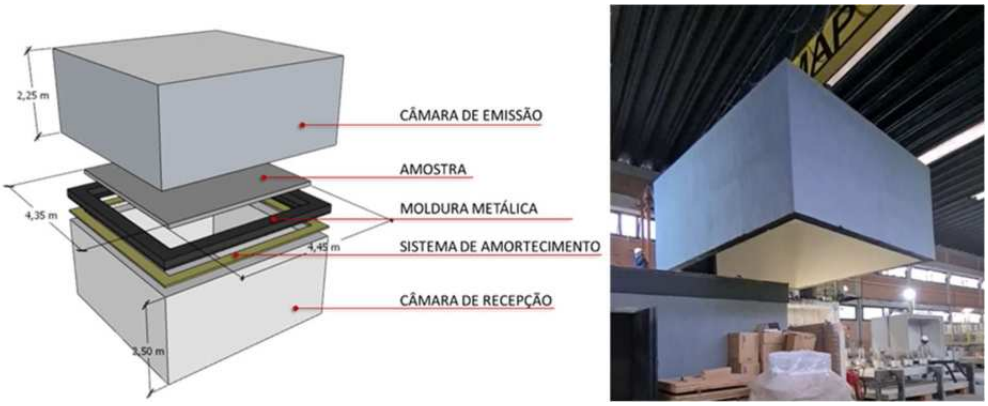
Para realização dos ensaios, foram seguidos os procedimentos das normas ISO 10140-2:2010 (13), ISO 10140-3:2010 (14), ISO 10140-4:2010 (15) e ISO 3382-2:2017 (16).

Para os ensaios de índice de redução sonora aos sons aéreos foram realizadas medições na câmara de emissão (L1), na câmara de recepção (L2), tempo de reverberação da câmara de recepção (T) e ruído de fundo também na câmara de recepção (B2).

Nos ensaios do nível de pressão sonora de impacto padrão foram realizadas medições na câmara de recepção (L2), tempo de reverberação da câmara de recepção (TR) e ruído de fundo também na câmara de recepção (B2).

O tempo de reverberação da câmara de recepção (TR) e ruído de fundo (B2) são os mesmos para o som aéreo e para o som de impacto. Para o nível de pressão sonora aos sons impacto não é realizada a medição L1, já o L2 é realizado com a utilização *tapping machine* (máquina de impactos). **Erro! Fonte de referência não encontrada.**Os ensaios acústicos foram em câmaras reverberantes móveis sobrepostas itt Performance - Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil da Unisinos. As câmaras seguem as premissas normativas da ISO 10140-5:2010 (17), que determina dimensões e processos de validação de resultados. As características gerais das câmaras e o deslocamento da câmara superior estão na Figura 3.

Figura 3: Câmaras utilizadas nos ensaios esquema com as características gerais (à esquerda); e movimentação da câmara superior (à direita)



Os equipamentos utilizados nos ensaios acústicos foram: analisador sonoro FUSION da Acoem 01 dB, microfone GRAS com pré-amplificador FUSION da Acoem 01 dB e calibrador sonoro Cal21, fonte sonora dodecaédrica Type 4292-L B&K, amplificador de potência Type 2734-A B&K.

Após a determinação do índice de redução sonora em bandas de 1/3 de oitava foi possível determinar o índice de redução sonora ponderado (R_w), com cálculos conforme ISO 717-1:2013 (18), e o nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L_{n,w}$) conforme ISO 717-2:2013(19).

RESULTADOS

Os resultados são apresentados para as bandas centrais de frequências em terço de oitava entre 100 e 5.000 Hz e em valores ponderados de índice de redução sonora ponderado R_w e nível de pressão sonora padrão ponderado $L_{n,w}$, para ruído aéreo e de impacto respectivamente.

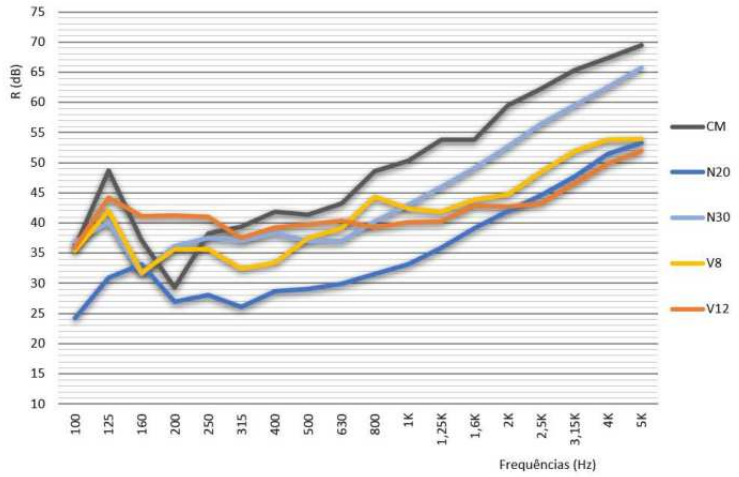
ISOLAMENTO AO SOM AÉREO

Os resultados da perda de transmissão sonora por bandas de terço de oitava podem ser analisados na Tabela 2 e no gráfico da Figura 4. Pode-se verificar que a amostra CM, de concreto maciço com 12 cm de espessura e maior massa superficial, obteve melhor desempenho nas bandas de frequências a partir de 315 Hz. Outro aspecto relevante, corresponde aos sistemas não homogêneos (N20, N30, V8 e V12), que apresentam redução no isolamento acústico devido à baixa massa superficial em relação a amostra CM, sendo que grande parte das deficiências apresentadas na redução da perda de transmissão sonora, é decorrente da reduzida espessura do capeamento na V e da mesa de N, ambas com 5 cm. O comportamento por bandas de terço de oitava das lajes estudadas seguiu o indicado por (2), conforme exposto a seguir. Na transição entre baixas e médias frequências são notadas as primeiras ressonâncias, com oscilações na capacidade de isolamento, que são características de sistemas construtivos rígidos sem o uso de camadas de amortecimento.

Nas faixas das médias frequências, a perda de transmissão sonora influenciada pela massa, pode-se verificar dois grupos de comportamentos a partir do perfil gráfico nas bandas entre 315 Hz e 2 kHz. Para as amostras V8 e V12 as linhas não expressam a ascensão típica de perda de transmissão pelo efeito da massa, sendo as amostras de lajes de concreto maciço (CM) e nervuradas (N20 e N30) com melhor definição dessa característica. Esses resultados são representativos do efeito da ressonância nas cavidades de ar dos elementos cerâmicos vazados. Esse comportamento frente ao som aéreo também foi verificado em paredes por (10) para as quais o aumento da massa com a aplicação de revestimentos argamassados, recuperou o aumento do isolamento nas bandas de médias frequências.

Nessa comparação, pode-se também indicar a influência das dimensões da cubetas e das tavelas nos resultados a partir de 500 Hz, elementos que reduzem a perda de transmissão sonora nas lajes e que definem alterações nas respostas vibracionais dos sistemas analisados.

Figura 4: Índices de redução sonora por bandas de terço de oitava



Os resultados obtidos do índice de redução sonora das amostras, com as respectivas incertezas de medição, são apresentados na Tabela 2 e na Figura 5. A laje de concreto maciço apresentou maior isolamento aos sons aéreos com R_w 48 dB. Os valores de isolamento acústico com os termos de adaptação C e C_{tr} foram todos negativos, sendo maiores para o C_{tr}. Ou seja, esses sistemas construtivos avaliados têm isolamento acústico menor para o ruído de tráfego veicular urbano, no caso de serem usados em sistemas de coberturas, que para os sons originados de conversas e outros que tenham maior componente espectral nas médias frequências.

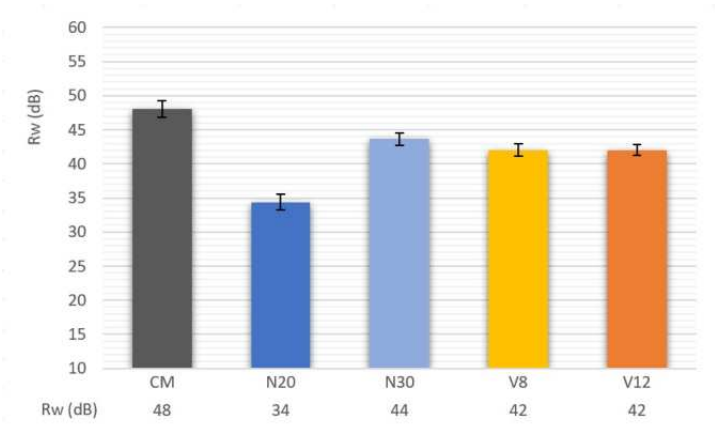
Considerando-se as incertezas de medição, pode-se afirmar que o isolamento ao som aéreo das amostras N30, V8 e V12 podem não ser diferentes entre si.

Tabela 2: Índices de redução sonora ponderados, termos de adaptação e incerteza de medição

Amostras	R_w (C; C_{tr})	U (dB)	R_w + C (dB)	R_w + C_{tr} (dB)
CM	48 (-1; -4)	1,2	47	44

N20	34 (-1; -3)	1,1	33	31
N30	44 (-1; -3)	0,9	43	41
V8	42 (-1; -3)	0,9	41	39
V12	42 (-1; -2)	0,8	41	40

Figura 5: Índices de redução sonora ponderados



RUÍDO DE IMPACTO

Os resultados do desempenho ao ruído de impacto em bandas de terço de oitava das cinco lajes ensaiadas podem ser comparados na Tabela 3 e na Figura 6.

A laje de concreto maciço apresentou menor nível de ruído de impacto ponderado com $L_{n,w}$ 80 dB. Os valores de isolamento acústico com o termo de adaptação C_i foram todos negativos, sendo maiores para as lajes tipo vigota/lajota. Ou seja, esses sistemas construtivos avaliados têm isolamento ao ruído de impacto menor para os sons originados de passos no pavimento superior. Conforme Patrício (20) em sistemas de piso com revestimento rígido o valor de C_i pode variar entre 0 e -15 dB, e pode ser positivo para sistemas de pisos com revestimentos com pisos flutuantes.

Tabela 3: Níveis sonoros de impacto ponderados, termo de adaptação e incertezas de medição

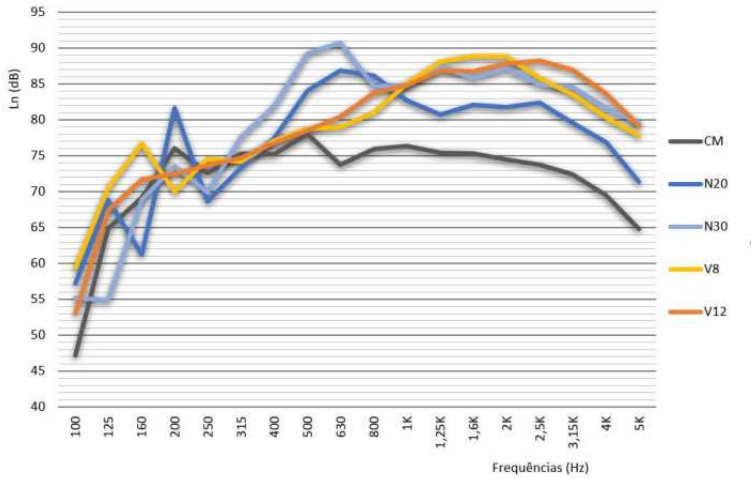
Amostras	$L_{n,w}$ (C_i)	U (dB)
CM	80 (-9)	0,6
N20	87 (-9)	2,1
N30	92 (-9)	2,1
V8	93 (-12)	0,7
V12	93 (-12)	0,7

O choque produzido na placa de capeamento (em V8 e V12) ou na mesa (em N20 e N30) é irradiado para elementos maciços, para as vigas e vigotas, e para elementos vazados (V8 e V12), para que então o som seja transmitido pela superfície inferior da laje. Esse som tem composição espectral diferente, para diferentes trajetórias dessa vibração, o que pode ser verificado nos resultados por bandas de terço de oitava. A

fonte de excitação mecânica e a rigidez superficial nas amostras foram as mesmas, mas a composição espectral do som medido na sala de recepção sofre alterações, com aumento dos níveis sonoros entre as bandas de 400 e 800 Hz e posterior redução nas lajes nervuradas (N20 e N30). Nas lajes tipo vigota/lajota a som mais agudo fica evidenciado pelo aumento dos níveis sonoros até a banda de 3,15 kHz.

É possível verificar que a amostra CM, que representa a laje de concreto maciço, com maior massa superficial, obteve melhor desempenho nas bandas de frequência a partir de 400 Hz. Comparativamente, os sistemas não homogêneos, amostras de laje nervurada (N20 e N30) e vigota/lajota (V8 e V12), apresentam menor isolamento acústico aos sons de impacto. Nas lajes nervuradas, as deficiências apresentadas são decorrentes da reduzida espessura da mesa, com maior transmissão sonora. Nas lajes tipo vigota/lajota os elementos leves e vazados, sem função estrutural, são responsáveis pela irradiação mais complexa das ondas de flexão, pois não são caracterizadas como um sistema monolítico.

Figura 6: Níveis de pressão sonora de impacto por bandas de terço de oitava

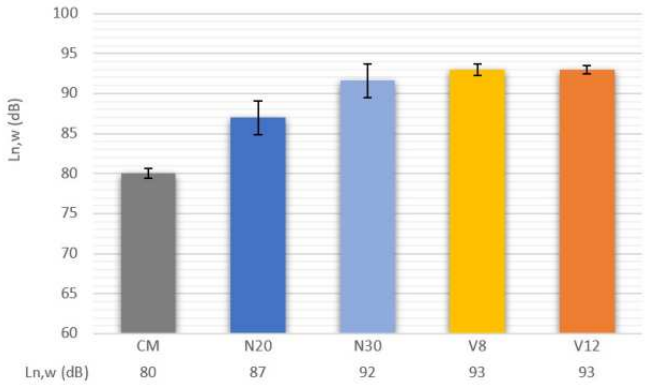


O elevado valor de $L_{n,w}$ 93 dB das lajes do tipo vigota/lajota pode ser justificado reposta vibracional do meio não homogêneo e ortotrópico, com maior área com elementos leves vazados, que induzem a resposta ressonante das pequenas câmaras de ar.

Por meio da Figura 8 é possível identificar o desempenho acústico ao som de impacto expresso em número único dos resultados ponderados. A diferença de espessura das lajes tipo vigota/lajota (V8 e V12), dado pelas vigotas e lajotas, não foi suficiente para alterar os valores ponderados de $L_{n,W}$. Para essas amostras a espessura do capeamento foi o determinante no desempenho ao som de impacto. As amostras de lajes nervuradas apresentaram diferença de $L_{n,W}$ 5 dB entre si, para o aumento de 10 cm na altura das vigas. No entanto, considerando-se a incerteza de medição, o desempenho ao ruído de impacto das amostras N20 e N30 pode ser o mesmo.

Fonte: os autores.

Figura 7: Níveis de pressão sonora de impacto padrão ponderados



CONCLUSÕES

Os sistemas de pisos com lajes não homogêneas apresentam maior complexidade nas estimativas de isolamento acústico, pois em elementos planos ortotrópicos as ondas de flexão apresentam variações de direção, sendo verificadas diferenças na rigidez de flexão de sistemas construtivos com vigas, ondulações, desníveis e outros. Além disso, o aumento da massa como solução para o aumento do isolamento acústico está comprovado para elementos maciços e homogêneos.

Em contrapartida, os critérios relacionados ao custo e carga estrutural de sistemas de pisos não homogêneos amparam sua ampla utilização em diferentes países. Sendo assim, o conhecimento do comportamento de lajes frente os sons aéreos e de impacto permitem especificações mais adequadas de camadas de revestimentos e/ou forros que possam qualificar o desempenho acústico.

Neste trabalho foram analisadas cinco diferentes lajes por meio de testes em laboratório. A laje denominada laje padrão, com concreto maciço e 12 cm de espessura, foi utilizada como parâmetro de comparação do desempenho acústico de duas lajes nervuradas bidirecionais e duas do tipo vigota/lajota com espessuras diferentes.

A laje de concreto maciço tem melhor isolamento acústico ao som aéreo em comparação aos exemplares utilizados neste estudo.

A influência das cavidades ressonantes dos elementos leves vazados reduz o isolamento ao som aéreo e altera significativamente a composição espectral do som no ambiente de recepção. Para o aumento de 8 para 12 cm na altura das lajes vigota/lajota, o R_w não é alterado.

Nas lajes nervuradas, considerando-se a incerteza de medição, o aumento de 10 cm na altura das vigas pode não influenciar nos valores de $L_{n,w}$.

REFERÊNCIAS

[1] OLIVEIRA, M. F.; HEISSLER, R.. Análise comparativa do isolamento acústico em diferentes geometrias: ensaios em campo e simulações computacionais. **Ambiente Construído**. 2021. Vol. 21, no. 1, p. 385–402. DOI: https://10.1590/s1678-86212021000100510.

[2] PATRÍCIO, Jorge Viçoso. **Acústica nos edifícios**. 6. Lisboa: Verlag Dashöfer, 2018.

[3] HOPKINS, C. **Sound Insulation**. CRC Press, 2020. ISBN 9781000159288.

[4] ZARASTVAND, M. R.; GHASSABI, M.; TALEBITOOTI, R. A Review Approach for Sound Propagation Prediction of Plate Constructions. **Archives of Computational Methods in Engineering**. 2021. Vol. 28, no. 4, p. 2817–2843. DOI: https://10.1007/s11831-020-09482-6.

[5] HASSAN, Osama A. B. **Building Acoustics and Vibration:** Theory and Practice. London: World Scientific Publishing Company, Incorporated, 2009. ISBN 9789812838339.

[6] BIES, D. A.; HANSEN, C H. **Engineering Noise Control:** Theory and Practice, Fourth Edition. 4. New York: CRC Press, 2017. ISBN 9781351989985.

[7] POHLMANN, K. C.; EVEREST, F A. **Master Handbook of Acoustics**. 7th. McGraw-Hill Education, 2021. ISBN 9781260473599.

[8] SEMPRINI, G.; BELLA, A. Di; SCHIAVI, A.; ASTOLFI, A.; BARBARESI, L.; LUISON, L.; PONTAROLLO, C.; TARIZZO, P. Acoustical behaviour of bare floor in hollow brick and concrete - Italian building technology. In: Inter-noise 2010 - Noise and Sustainability. **Proceedings [...]** Lisboa: International Institute of Noise Control Engineering, 2010.

[9] JAGNIATINSKIS, Aleksandras, FIKS, Boris and MICKAITIS, Marius. Lithuanian experience of application the masonry cavity walls in multistory buildings with sound insulation requirements. **Applied Acoustics [online]**. 2019. Vol. 153, p. 60–70. DOI: https://10.1016/j.apacoust.2019.04.009.

[10] KLIPPEL FILHO, S.; LABRES, H. S.; PACHECO, F.; OLIVEIRA, M. F.; TUTIKIAN, B. F. Influência da espessura de revestimentos de argamassa no desempenho acústico de alvenarias de blocos cerâmicos. **Ambiente Construído**. 2019. Vol. 19, no. 2, p. 145–156. DOI: https://10.1590/s1678-86212019000200313.

[11] SOUZA, C. F. N.; PACHECO, F.; OLIVEIRA, M. F.; HEISSLER, R. F.; TUTIKIAN, B. F. Impact sound insulation of floor systems with hollow brick slabs. **Case Studies in Construction Materials**. 2020. Vol. 13. DOI: https://10.1016/j.cscm.2020.e00387.

[12] OLIVEIRA, M. F.; PATRICIO, J. Impact Noise of Non-homogeneous Floors: Analysis of Different Input Parameters for Computational Modeling Predictions. **Journal of Civil Engineering and Architecture**. 2017. Vol. 11, no. 3, p. 274–281. DOI: https://10.17265/1934-7359/2017.03.007.

[13] ISO. **ISO 10140-2**: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation. Genebra, 2010.

[14] ISO. **ISO 10140-3**: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 3: Measurement of impact sound insulation. Genebra: 2010.

[15] ISO. **ISO 10140-4**: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4: Measurement procedures and requirements. Genebra: 2010.

[16] ISO. **ISO 3382**: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. 2008. Geneva: ISO.

[17] ISO. **ISO 10140-5**: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment. Genebra: 2010.

[18] ISO. **ISO 717-1**: Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements. Part 1: Airborne sound insulation. Genebra: 2013.

[19] ISO. **ISO 717-2**: Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation. 2013. Geneva: ISO.

[20] PATRÍCIO, J. V. **Isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão:** metodologias de caracterização. 6. ed. Lisboa: LNEC, 2012. ISBN 9789724918235.