

Isolamento do ruído de impacto no sistema de piso com aplicação de revestimento sobre o piso original

Impact noise isolation on a floor system with coating application on the original floor

Leilane Aguiar Almeida Xavier 

Aluísio Braz Melo 

Enildo Tales Ferreira 

Resumo

A classificação de desempenho acústico ao ruído de impacto em sistemas de piso prevista na NBR 15575-3 (ABNT, 2013) é exigência apenas às novas construções de edifícios multipavimentos. O presente artigo aborda tais problemas de ruídos que ocorrem nos edifícios concluídos antes de 2013. O estudo busca uma alternativa para a correção acústica, através da aplicação de novo revestimento sobre piso original. Para tal considerou-se os seguintes condicionantes: facilidade de execução e menor acréscimo na espessura total do sistema de piso. O estudo experimental foi realizado em duas câmaras acústicas e em campo (edifício residencial), quando se verificou a eficiência acústica em um caso real. Os novos revestimentos aplicados sobre o piso original (cerâmica esmaltada) foram: laminado de madeira; porcelanato extrafino e o mesmo tipo de cerâmica original, sendo os dois últimos sem material resiliente entre eles e o piso original. Os resultados mostraram que a proposta tem potencial para corrigir problemas de ruído de impacto em sistemas de piso entre unidades residenciais autônomas sobrepostas. O uso de laminado de madeira sobre o piso original se destaca, combinando maior isolamento ao ruído de impacto (até 28 dB), pequeno acréscimo na espessura final do sistema (1,6 cm) e facilidade de execução.

Palavras-chave: Ruído de impacto. Isolamento acústico. Revestimento.

Abstract

The classification of acoustic performance to impact noise in floor systems provided for in NBR 15575-3 (ABNT, 2013) is only required for new multi-floor buildings. This article addresses the noise problems occurring in buildings constructed before 2013. This study seeks for an alternative form of acoustic correction by applying a new coating on the original flooring. In order to do this, the following conditions were considered: ease of execution and lower increment in the total thickness of the floor system. An experimental study was performed in two acoustic chambers and on the field (residential building), where acoustic efficiency was verified in a real case. The new coatings applied on the original floor (enamelled ceramic) were: wood laminate; extra fine porcelain tiles and the same type of ceramic as the original flooring. The two latter did not have a resilient material between them and the original floor. The results showed that the proposed alternative has the potential to correct impact noise problems in floor systems between superimposed autonomous dwelling units. The systems using laminate wood on the original floor proved to be the most effective, as they combine greater acoustic insulation against the impact noise (until 28 dB), small increase in the final thickness of the system (1.6 cm) and ease of execution.

Keywords: Impact noise. Sound insulation. Coating.

¹Leilane Aguiar Almeida Xavier

¹Lema Engenharia Ltda.
João Pessoa - PB - Brasil

²Aluísio Braz Melo

²Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa - PB - Brasil

³Enildo Tales Ferreira

³Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa - PB - Brasil

Recebido em 20/03/19

Aceito em 01/04/20

Introdução

A crescente verticalização das edificações habitacionais em certos bairros das cidades médias brasileiras já há algum tempo é uma realidade, reproduzindo o cenário das grandes cidades. Esse crescimento tem colocado em evidência os problemas de desempenho acústico das tais edificações, sobretudo aqueles relacionados aos ruídos de impacto no piso, gerando conflitos na convivência entre vizinhos de unidades autônomas sobrepostas. Nesse contexto, a partir de 2013 entrou em vigor a NBR 15575-3 (ABNT, 2013), que na parte “3”, em um dos subitens, aborda sobre os ruídos causados pelo impacto de objetos no piso nos edifícios com múltiplos pavimentos, os quais são transmitidos ao andar inferior através da laje e das paredes. Os sistemas de piso que separam unidades habitacionais posicionadas em pavimentos distintos podem ser classificados em nível de desempenho mínimo, intermediário e superior (Tabela 1), de acordo com os níveis de pressão sonora de impacto ponderado ($L'_{nT,w}$). A classificação do sistema de piso com desempenho mínimo de acordo com a NBR 15575-3 (ABNT, 2013) apresenta um intervalo admissível entre 66 dB e 80 dB, cujo valor máximo é muito superior quando comparado, por exemplo, com aqueles previstos nas regulamentações de países europeus (RASMUSSEN, 2010; REZENDE; RODRIGUES; VECCI, 2014).

Durante a execução das obras de edifícios com múltiplos pavimentos é possível executar um sistema de piso flutuante, que utiliza material resiliente entre a laje estrutural e o contrapiso, de modo a garantir um isolamento acústico entre as unidades sobrepostas. Com tal procedimento, pode-se conseguir redução significativa dos ruídos de impacto no piso. Contudo, várias medições realizadas em edifícios, onde não se executam sistema de piso flutuante, têm revelado que os valores de $L'_{nT,w}$ são muito próximos do limite de 80 dB (PEREIRA, 2018; MARTINS; OLIVEIRA; JUNIOR, 2016). Esses valores, ainda que dentro do desempenho mínimo previsto na NBR 15575-3 (ABNT, 2013), não garantem o desejável conforto aos usuários (MARTINS; OLIVEIRA; JUNIOR; 2016). Esse fato confirma o quanto a norma brasileira é tolerante em relação aos níveis de ruídos de impacto no piso, confirmando como aceitáveis as práticas convencionais de execução dos pisos (não flutuantes), em prejuízo do conforto acústico dos usuários.

Por outro lado, uma prática muito utilizada em reformas de departamentos, nas quais é executado o assentamento de um novo revestimento sobre o existente, resulta no aumento da densidade superficial e, conseqüentemente, redução dos níveis de ruído de impacto no sistema de piso resultante. Em tal processo, além da possibilidade de menor geração de entulho e menor incômodo aos moradores vizinhos durante a execução do serviço, deve-se considerar os possíveis ganhos acústicos, que precisam ser mensurados. Alinhando-se com essa ideia, o mercado tem oferecido novas opções de revestimentos com pequena espessura (ex.: porcelanato extrafino). Esse tipo de revestimento é apropriado quando é assentado sobre o original, para não gerar problemas ergonômicos nas alturas de bancadas, ou mesmo gerar a necessidade de substituição de portas. Portanto, vislumbra-se aqui a ideia de aproveitar essa prática de reforma como algo que seja eficiente na correção desejada dos níveis de ruído de impacto no sistema de piso original, sem a necessidade de retirada do contrapiso e do revestimento originais. Nesse processo, é importante uma seleção adequada do novo revestimento, em função do custo compatível com o padrão da obra e o poder aquisitivo do usuário.

De fato, parece se tratar de uma interessante alternativa para reduzir os ruídos de impacto entre pisos de unidades autônomas nos edifícios habitacionais, inclusive podendo melhorar o conforto acústico daqueles edifícios já concluídos antes da vigência da NBR 15575-3 (ABNT, 2013). Também pode ser interessante para quaisquer edifícios, quando se pretende aumentar o nível de isolamento acústico, visando alterar a classificação de desempenho de mínimo para intermediário, ou mesmo para superior.

O presente artigo baseia-se em um estudo experimental que objetiva analisar a capacidade de redução dos níveis de ruído de impacto em sistemas de piso, através da execução de um novo revestimento sobre o existente. Nesse processo, os seguintes pré-requisitos são importantes: facilidade de execução e menor acréscimo na espessura total do sistema de piso. Os resultados de ensaios executados em câmaras acústicas são confrontados com os obtidos em campo, realizados em um edifício residencial multipavimentos.

Tabela 1 - Nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L'_{nT,w}$) e critérios recomendados pela NBR 15575-3 (ABNT, 2013)

Elemento	$L'_{nT,w}$ (dB)	Nível de desempenho
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	66 a 80	M (mínimo)
	56 a 65	I (intermediário)
	≤ 55	S (superior)

Adicionalmente, faz-se uma análise para identificar possíveis problemas relacionados com a carga extra sobre a estrutura de concreto armado do edifício, devido ao aumento da densidade superficial de cada pavimento. Nessa análise, imagina-se o cenário em que todos os apartamentos do edifício venham a adotar a mesma estratégia de execução de novo piso sobre o existente. Então, são feitas análises considerando também simulações, procurando identificar quando há realmente necessidade de reforço estrutural adicional no edifício.

Referencial teórico

Ao tratar sobre sistema de piso, deve-se entender que ele é composto por vários elementos, essencialmente laje, contrapiso e revestimento. Apesar de o forro não ser um elemento do sistema de piso, este será considerado na análise. Os ruídos de impacto produzidos na superfície do revestimento podem ser reduzidos em termos de transmissão da energia sonora de um andar para o outro imediatamente inferior, quando se utilizam estratégias específicas que contribuam para diminuir a propagação dessa energia. De acordo com Hopkins (2012), os impactos são vibrações que se difundem pelas estruturas do edifício e quando geradas nos pisos elas tendem a se propagar nos elementos intrínsecos ao piso.

Simões (2011), no seu estudo sobre esse tema, afirma que para os mesmos materiais utilizados em uma dada situação o isolamento acústico entre pisos é diretamente proporcional à espessura final do sistema de piso. Ou seja, quanto maior for essa espessura maior será o isolamento, considerando o ganho da densidade superficial do sistema. Assim, é possível favorecer o isolamento acústico entre pisos de ambientes sobrepostos, adotando-se espessuras adequadas para cada elemento (laje e contrapiso) que compõe o sistema. Depreende-se dessa afirmação que o aumento na espessura do sistema de piso, a partir da execução de um novo revestimento sobre o original, também deve favorecer o isolamento ao ruído de impacto.

Hassan (2009) afirma que quanto mais espessa é a laje, menor é o ruído de impacto transmitido para o andar adjacente, porém o aumento dessa espessura tem limite, sendo essa uma solução inadequada com relação aos custos para sua execução. É interessante acrescentar que é impossível adotar tal estratégia no caso de correção em um edifício já em uso.

Pereyron (2008) realizou um estudo no qual testou inicialmente o isolamento acústico ao ruído de impacto diretamente sobre 4 tipos de lajes (espessuras diferentes, sem execução do contrapiso e revestimento): maciça (12 cm), nervurada (28 cm), pré-moldada convencional (12 cm) e pré-moldada treliçada (28 cm). Também foram testados outros dois cenários, um deles composto pela laje pré-moldada convencional, contrapiso e revestimento em laminado de madeira; e outro por laje nervurada, contrapiso, revestimento em laminado de madeira e forro de gesso, 24 cm abaixo da laje. O revestimento em laminado de madeira deve ser considerado como piso flutuante, devido ao uso de material resiliente entre ele e o contrapiso. Com base nos testes iniciais, a laje pré-moldada convencional (69 dB) obteve o desempenho acústico mínimo, enquanto as demais se classificaram no nível intermediário. Contudo, o destaque é para os resultados com as lajes nervuradas (62 dB) e pré-moldada treliçada (63 dB) que apresentaram valores muito próximos (diferença de apenas 1 dB para o $L_{nT,w}$). O mais baixo desempenho observado para a laje pré-moldada convencional é creditado à sua reduzida massa (vigotas esbeltas, blocos e camada de concreto armado no recobrimento) quando comparada às outras lajes avaliadas. A comparação entre os dois cenários com execução de contrapiso e revestimento em laminado de madeira revelou que com a laje pré-moldada convencional ocorreu um ganho no isolamento de 8 dB e com a laje nervurada ocorreu o ganho de apenas de 3 dB. Portanto, o mesmo aumento da densidade superficial provocado nos sistemas de piso com uso dos mesmos materiais (contrapiso e revestimento em laminado de madeira) adicionados sobre lajes diferentes (pré-moldada convencional e nervurada) resultou em redução do $L_{nT,w}$ para 61 dB na medição com a laje pré-moldada convencional e para 59 dB na medição com a laje nervurada, estabelecendo uma diferença de apenas 2 dB entre os dois resultados.

Nunes, Zini e Pagnussat (2014) realizaram um estudo com sete diferentes sistemas de piso, utilizando-se três tipos de lajes: laje maciça de concreto (espessuras de 10 cm e 12 cm); laje pré-moldada treliçada (com blocos de EPS); e laje nervurada. Os revestimentos testados foram piso cerâmico (porcelanato e cerâmica) e laminado de madeira (7 mm), neste último com dois materiais resilientes diferentes, ora com manta de fibras de polipropileno (5 mm), ora com manta de polietileno expandido (2 mm), caracterizando-os como pisos flutuantes. Os contrapisos testados tiveram variações na composição e na espessura, sendo avaliadas 4 situações: a argamassa comum (5 cm), a argamassa com brita leve (4 cm), o concreto (4 cm) e duas camadas de argamassa, com brita leve (5 cm) e comum (2 cm). Os resultados indicam que a maior espessura do sistema (laje e contrapiso) é mais determinante para proporcionar o maior isolamento de ruído de impacto no

piso. O melhor resultado ($L_{nT,w} = 50$ dB; desempenho superior) entre os sistemas de pisos comparados ocorreu quando combinou uso de laje nervurada, contrapiso com dupla camada de argamassa e revestimento em laminado de madeira. Nesse caso, destacam-se a maior espessura do contrapiso composto com material leve e o uso de laminado de madeira no revestimento (piso flutuante), ambos favoráveis à redução dos ruídos de impacto no piso. Os autores também constataram que o mais baixo isolamento do ruído de impacto foi quando se usou o piso em cerâmica esmaltada.

No estudo feito por Pagnoncelli e Morales (2016) foram exploradas diferentes soluções para sistema de piso entre pavimentos, construídas com estrutura de laminado de madeira colada, incluindo camada de material resiliente (lã mineral), teto suspenso com material absorvente fibroso, instalado acima do forro, e revestimentos diferentes, procurando avaliar a redução de ruído de impacto. Destaca-se a melhoria no isolamento de até 5 dB, quando se usa lã de rocha acima do forro. Os resultados dos testes considerando como variável apenas os dois tipos de revestimento de piso, entre os testados, especificamente a madeira e a cerâmica, mostraram que a redução do ruído de impacto no piso é maior (3 dB), quando se utiliza a madeira como revestimento.

Lee *et al.* (2014) afirmam que os materiais resilientes deformam-se com o tempo de carregamento das outras camadas do sistema de piso executadas sobre eles, portanto alertam que é importante considerar também as características estruturais dos materiais resilientes e a influência da carga em longo prazo nos seus desempenhos. Caniato *et al.* (2016) destacam que os principais parâmetros que caracterizam as propriedades mecânicas de um material resiliente são a rigidez dinâmica, a fluência compressiva e a compressibilidade. Zuchetto, Nunes e Patrício (2016) acrescentam que após 10 anos de uso os sistemas de pisos flutuantes compostos por materiais poliméricos fibrosos podem apresentar perda de desempenho entre 3 dB e 4 dB.

Kim *et al.* (2009) destacam a importância do uso de material resiliente com baixa rigidez dinâmica para a redução do ruído de impacto nos sistemas de piso flutuante. Na Coreia do Sul, por exemplo, são aceitáveis apenas valores menores do que 40 MN/m^3 relativos à rigidez dinâmica dos materiais resilientes (KIM *et al.*, 2015). Neves, António e Nossa (2008) corroboram que a eficiência do sistema de piso flutuante na redução do ruído de impacto depende das características elásticas dos materiais resilientes, mas também da ausência de vinculações rígidas entre as superfícies dos flancos e do piso. A execução correta do sistema de piso flutuante é também destacada por Hale (2006), que fez comparações com vários testes em sistemas de pisos de edifícios com múltiplos pavimentos.

Pereira *et al.* (2016) simularam sistemas de piso e os avaliaram quanto ao nível de vibração na superfície da laje, durante teste de impacto no piso, procurando comprar duas diferentes bases estruturais, uma delas leve, construída com madeira e outra pesada, executada com concreto, sendo registrados resultados para dois tipos de revestimentos de piso (vinílico com subcamada com material flexível *versus* carpete). A redução do ruído de impacto nos sistemas de piso simulados foi maior apenas para as médias e altas frequências, tanto com o uso de revestimento vinílico quanto de carpete, contudo o pior resultado foi sempre quando se utilizou a base estrutural leve de madeira.

Beresford e Chen (2018) destacam a menor massa superficial como uma desvantagem no isolamento do ruído de impacto das estruturas construídas entre pavimentos adjacentes de edifícios verticais com sistemas de laminado de madeira colado, quando comparada à estrutura de concreto. Os autores (BERESFORD; CHEN, 2018), ao explorarem resultados de medições em edifícios de apartamento, realizadas na Austrália e na Nova Zelândia, afirmam que o sistema com laminado de madeira colado de fato pode apresentar bom desempenho quando se consideram apenas as baixas frequências do ruído de impacto no sistema de piso, contudo para as frequências mais altas a base estrutural de concreto tem melhor desempenho, por resultar em maior massa superficial do sistema. Em que pese a maior massa superficial ser preponderante para as altas frequências dos ruídos acústicos, em qualquer caso de base estrutural, leve ou pesada, os desempenhos acústicos melhoram quando se instala o forro, bem como camadas adicionais de materiais isolantes, abaixo e acima dessa base estrutural, mais especificamente entre o forro/revestimento do piso e a própria base estrutural.

Conrad (2002), ao comparar o desempenho acústico de diversos materiais tradicionalmente utilizados como revestimentos de pisos, afirma que os materiais que resultam em melhor isolamento ao ruído de impacto são os de maior resiliência. Entre as variáveis testadas em seu estudo realizado com a laje maciça de concreto armado (12 cm), constatou que os melhores desempenhos ao isolamento do ruído de impacto no piso ocorreram com o uso de revestimentos de carpete, sobre base isolante (33 dB a 39,1 dB), ou com piso flutuante com laminado de madeira e adição de tapete (22,4 dB a 30,2 dB).

Nunes, Zini e Pagnussat (2014) alertam que soluções adequadas podem ser conseguidas, a partir de uma

análise global na definição de materiais e sistemas construtivos, não sendo recomendado que os materiais que constituem um sistema de piso sejam considerados isoladamente. Com base nos resultados de testes (em campo) de ruído de impacto no piso, os autores destacam que os sistemas de piso com laje treliçada apresentaram deficiência no isolamento ao ruído de impacto, quando revestido com piso cerâmico. Por outro lado, os resultados confirmaram que com a combinação entre laje nervurada (com cubetas de EPS), contrapiso com brita leve e piso laminado de madeira obteve-se a melhor classificação de desempenho acústico, o nível superior, conforme a norma brasileira.

De acordo como Miskinis *et al.* (2012), a maneira mais rápida e mais barata para avaliar a potencial de redução do $L_{nT,w}$ em sistemas de piso é realizar testes iniciais com área de ensaio menor e depois realizar medições em edifícios concluídos, reproduzindo-se a solução em toda a área do ambiente de emissão. Contudo, deve-se ter atenção que se a área de ensaio é menor (ex.: 1 m^2) haverá redução da passagem dos ruídos de impacto pelos flancos, visto que a placa que simula o contrapiso não encosta nas paredes, resultando em isolamento superestimado.

Branco e Godinho (2013) concordam com Miskinis *et al.* (2012) e enfatizam que o método permite a realização de um grande número de ensaios com custos relativamente baixos. Assim, será possível comparar o desempenho de variadas situações, viabilizando descartar aquelas com desempenho inferior. Destaca ainda que o teste final deve aplicar a solução em toda a área do ambiente de emissão, apenas com aquela configuração cujo resultado foi mais promissor.

Procedimentos metodológicos

O procedimento experimental para analisar a capacidade de redução dos níveis de ruído de impacto em sistemas de piso, através da execução de um novo revestimento sobre o existente, foi desenvolvido em duas etapas. Inicialmente foram realizados ensaios em câmaras acústicas no laboratório, procurando simular uma dada condição de sistema de piso, usual em casos reais. Na sequência foi selecionado um ambiente (dormitório de apartamento de edifício com execução concluída) para realizar o ensaio em campo, que tivesse características similares às câmaras acústicas do laboratório, visando controlar algumas variáveis envolvidas para facilitar as comparações.

Medições de ruído de impacto no sistema com novo piso sobre o existente

Ensaio em câmaras acústicas

Os ensaios foram realizados em duas câmaras acústicas já existentes na área externa do laboratório (Figuras 1a e 2b), adotando-se o método simplificado, que utiliza uma área de ensaio reduzida no sistema de piso, representado por uma placa pré-moldada de argamassa cimentícia (1 m^2) com peças de cerâmica esmaltada assentadas sobre ela.

As duas câmaras acústicas foram construídas com blocos de solo cimento, mas os pavimentos de cada uma delas são separados por tipos diferentes de lajes estruturais de concreto: pré-moldada convencional (13 cm de espessura total – Figura 1a) e nervurada (27 cm de espessura total – Figura 1b). Os ambientes de emissão (piso superior) e recepção (piso inferior) nas câmaras têm a mesma área ($2,42 \times 2,84 = 6,87 \text{ m}^2$), porém há uma pequena diferença nos volumes ($15,80 \text{ m}^3$ e $16,70 \text{ m}^3$) dos respectivos ambientes, devido à diferença de pé-direito. As duas câmaras não possuem forro (Figura 2b e 2c) e têm portas de madeira maciças nos pavimentos térreos. Nos pavimentos superiores as portas são do tipo pré-fabricado em madeira prensada.

Figura 1 - Desenho esquemático em corte das duas câmaras acústicas

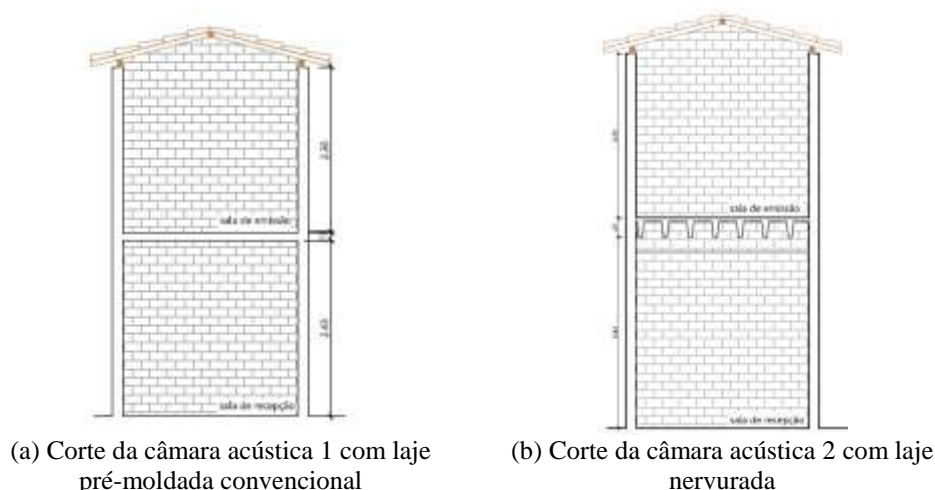


Figura 2 - Câmaras acústicas do laboratório utilizadas para ensaio de ruído de impacto em sistemas de piso



Ensaio com cinco diferentes configurações foram realizados nas duas câmaras acústicas para simular a ideia de execução de um novo piso sobre o existente, visando verificar o ganho potencial de isolamento do ruído de impacto do sistema. Inicialmente utilizou-se a placa pré-moldada representando o contrapiso, com cerâmica esmaltada assentada sobre ela, sendo esta a configuração do piso original (PO – Figura 3); o segundo ensaio foi com a execução de um novo piso em laminado de madeira sobre o piso original (a mesma placa anterior), sendo usada a manta reciclada de polietileno (original do fornecedor do laminado) como material resiliente entre os pisos original e novo (LaMoCe – Figura 4); o terceiro ensaio utilizou laminado de madeira sobre o piso original, mas com uma nova manta acústica comercial (material reciclável de garrafa PET) como material resiliente entre os pisos original e novo (LaMacCe – Figura 5); o quarto ensaio foi com a execução de novo piso de cerâmica sobre o piso original (CeCe – Figura 6); e, por fim, o ensaio feito com a execução do novo piso com assentamento de placas de porcelanato extrafino sobre o piso original (PorCe – Figura 7). As configurações LaMoCe e LaMacCe são consideradas como pisos flutuantes.

Todos os testes foram realizados utilizando-se três placas pré-moldadas com dimensões de 1,0 m x 1,0 m, executadas com argamassa, traço 1:3 (cimento Portland: areia; em volume), uma delas com espessura igual a 4,5 cm e as outras duas com espessura igual a 5,5 cm, todas revestidas com peças de cerâmica esmaltada (60 cm x 60 cm x 0,6 cm; largura x comprimento x espessura). As peças de cerâmica esmaltada foram assentadas com uso de argamassa colante, do tipo ACI (camada da espessura igual a 0,4 cm), e utilizada também argamassa específica para o rejunte entre as peças cerâmicas. A espessura final do sistema de piso representado pela amostra PO resultou igual a 5,5 cm (Figura 3).

O novo piso executado com laminado de madeira (fabricado com resíduos de madeira) é de fácil instalação, considerando que é tipo encaixe com click, assentado sobre a manta, que por sua vez é colocada diretamente sobre o piso original. A manta reciclada de polietileno, original do fornecedor do laminado, tem 0,2 cm de

espessura. O laminado de madeira utilizado foi fornecido em réguas (136 cm x 25 cm x 0,8 cm; comprimento x largura x espessura). A espessura final do sistema LaMoCe resultou em 6,5 cm, acrescentando apenas 1 cm na espessura inicial do sistema (Figura 4).

O outro tipo de material resiliente utilizado entre os dois revestimentos (peças cerâmicas e laminado de madeira) foi a manta acústica comercial (material reciclável de PET), com espessura igual a 0,8 cm, resultando em uma espessura final do sistema de piso LaMacCe igual a 7,1 cm, acrescentando-se apenas 1,6 cm na espessura inicial do sistema (Figura 5).

Na simulação do sistema CeCe foi utilizada a placa pré-moldada (contrapiso) com 5,5 cm de espessura. As peças cerâmicas esmaltadas na cor branca (46 cm x 46 cm x 0,7 cm; comprimento x largura x espessura) foram assentadas sobre o piso original cerâmico, sendo aplicada uma camada (0,4 cm de espessura) de argamassa colante do tipo ACIII (alta resistência) e também utilizada argamassa de rejunte entre as peças assentadas (Figura 6). A amostra CeCe resultou em uma espessura final de 6,6 cm, acrescentando-se apenas 1,1 cm na espessura do sistema do piso inicial (PO).

Figura 3 - Amostra PO no ensaio simplificado de ruído de impacto na câmara acústica

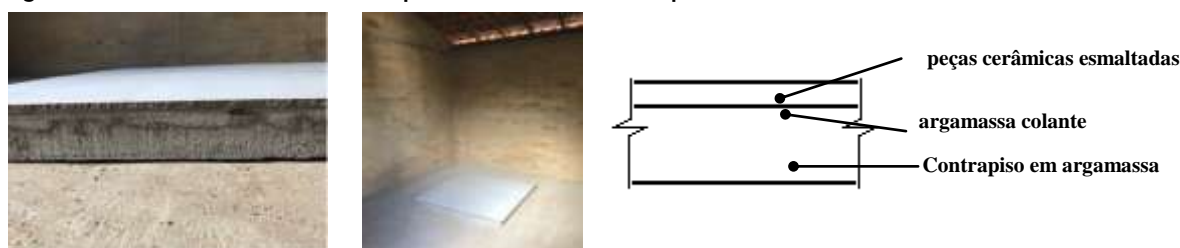


Figura 4 - Amostra LaMoCe no ensaio simplificado de ruído de impacto na câmara acústica

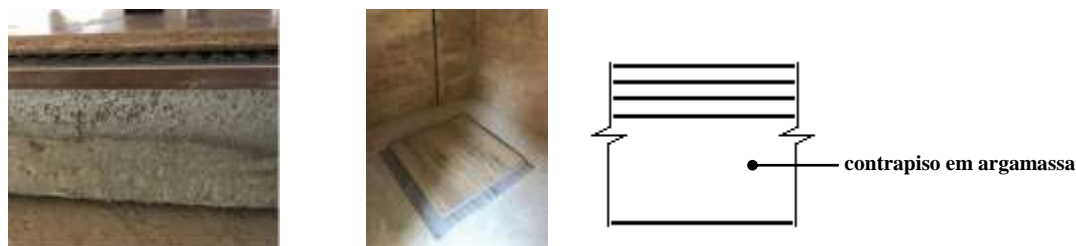


Figura 5 - Amostra LaMacCe no ensaio simplificado de ruído de impacto na câmara acústica

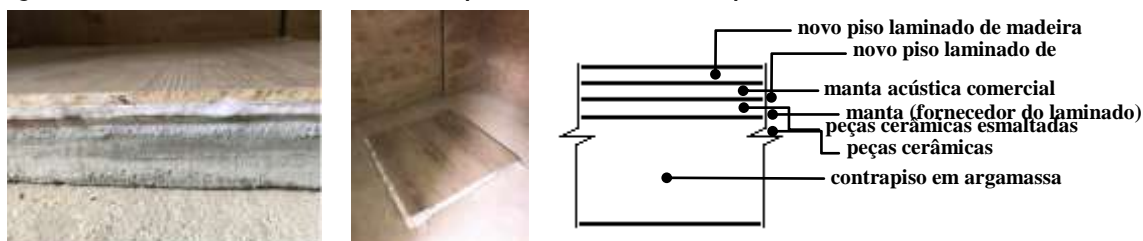
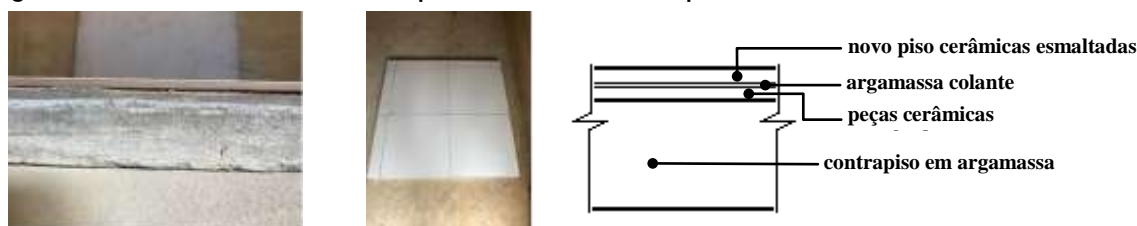


Figura 6 - Amostra CeCe no ensaio simplificado de ruído de impacto na câmara acústica



A última configuração testada foi com peças de porcelanato extrafino (89,85 cm x 44,85 cm x 0,5 cm; comprimento x largura x espessura) assentadas sobre o piso original de cerâmica (PorCe) utilizando também argamassa colante (camada 0,4 cm de espessura) do tipo ACIII (alta resistência), sem nenhum material resiliente entre os revestimentos e, do mesmo modo, foi realizado o rejuntamento entre as peças com o mesmo tipo de argamassa do caso anterior. A placa pré-moldada que simula o contrapiso utilizado, nesse caso, também foi com 5,5 cm de espessura. A amostra PorCe (Figura 7) resultou em uma espessura final de 6,4 cm, acrescentando apenas 0,9 cm ao sistema de piso inicial (PO).

Ensaio em campo: edifício residencial

Os ensaios em campo foram realizados em um edifício residencial multifamiliar recém-concluído, com a configuração de *pilotis* e dois andares com apartamentos (Figura 8). O sistema estrutural do edifício é composto por pilares e vigas em concreto armado e laje pré-moldada treliçada (13 cm de espessura total), executada com blocos cerâmicos e vigotas, solidarizada pela camada de concreto (5 cm) na parte superior. As alvenarias de vedação foram executadas com tijolos cerâmicos e rebocadas com argamassa (cimento, areia e cal), sendo internamente pintadas em PVA e nas paredes externas (fachadas) aplicado o revestimento cerâmico (15 cm x 5 cm), do mesmo fabricante do revestimento de piso. O contrapiso foi executado com espessura média de 5 cm (argamassa de cimento e areia), com assentamento de revestimento do piso em cerâmica esmaltada (6 mm de espessura, 60 cm x 60 cm – largura x comprimento) e rodapé (7 cm de altura) executado com o mesmo material do revestimento do piso. As esquadrias são em alumínio com vidro nas janelas e portas internas de madeira semiocas. Todos os ambientes dos apartamentos receberam forro de gesso comum em placas (60 cm x 60 cm). O ambiente escolhido para realizar o ensaio de ruído de impacto no sistema de piso (aqui considerada toda a área do piso do ambiente) foi o dormitório (área = 6,82 m²; pé-direito = 2,6 m) que tem dimensões muito semelhantes às das câmaras acústicas do laboratório (Figura 8b).

Os ensaios de ruído de impacto foram executados considerando toda a área de piso do ambiente de emissão-dormitório selecionado no edifício residencial. Desse modo, foram realizadas três configurações de ensaios, sendo inicialmente feita a caracterização de desempenho acústico ao ruído de impacto do piso original (POCamp), executado com o mesmo tipo de peças cerâmicas utilizadas nos testes nas câmaras acústicas.

Figura 7 - Amostra Por Ceno ensaios simplificado de ruído de impacto na câmara acústica

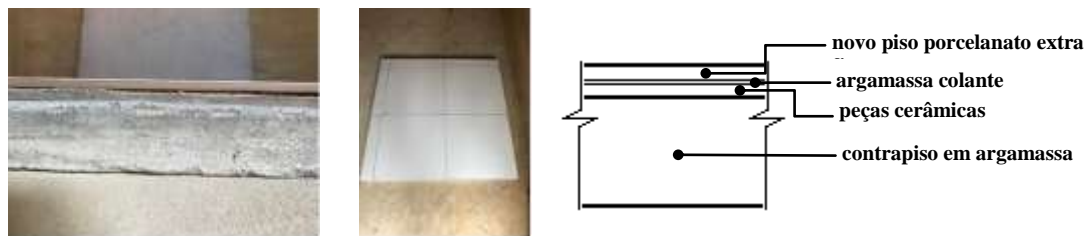


Figura 8 - Edifício residencial onde foram realizados ensaios de ruído de impacto no piso



As duas configurações diferentes com piso flutuante, a partir do uso de laminado de madeira sobre o piso original, utilizaram cada uma das mantas testadas nas câmaras acústicas. Ou seja, em um teste (LaMoCeCamp) a manta reciclada de polietileno (original do fornecedor do laminado) e no outro (LaMacCeCamp) a manta acústica comercial (material reciclável de garrafa PET). Nesses casos, ao colocar o material resiliente em toda a área do ambiente procurou-se garantir que a manta se elevasse até a altura do rodapé, de modo a evitar a ponte acústica entre o sistema de piso flutuante e as paredes na periferia do ambiente. As espessuras finais das amostras LaMoCeCamp e LaMacCeCamp foram iguais a 7,0 cm e 7,6 cm, acrescentando apenas 1 cm e 1,6 cm na espessura inicial do sistema (Figuras 9 e 10), respectivamente.

Procedimento do ensaio de ruído de impacto nos sistemas de piso

As medições de ruído de impacto nos sistemas de piso foram feitas utilizando-se um medidor de nível sonoro portátil (analisador acústico tipo 2270, da marca Brüel&Kjær), apoiado em um tripé. Utilizou-se também um sistema gerador de ruído, constituído por uma máquina padrão (tipo 3207, da marca Bruel&Kjær), em conformidade com a norma ISO 16283-2 (INTERNATIONAL..., 2015), a qual gera ruído de impacto através da queda (altura de 4 cm) livre e sequencial de cinco martelos de 500 g, com uma frequência de 10 golpes por segundo sobre o piso de ensaio.

Durante o ensaio o gerador de ruído é posicionado no ambiente localizado no pavimento superior, que é considerado como câmara de emissão, enquanto o analisador acústico é posicionado no pavimento inferior (câmara de recepção). As 4 posições do analisador acústico e da geradora de ruído de impacto nos ambientes de recepção e emissão, respectivamente, foram definidas de acordo com a norma ISO 16283-2 (INTERNATIONAL..., 2015). Para cada ponto onde a máquina geradora de ruído foi posicionada, foram feitas quatro medições do ruído de impacto com o analisador acústico na câmara de recepção. De acordo com as normas ISO 10140-3 (INTERNATIONAL..., 2010) e ISO 16283-2 (INTERNATIONAL..., 2015), o nível de pressão sonora foi medido utilizando-se filtros de banda de um terço de oitava nas seguintes frequências centrais, em hertz: 100, 125, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150.

A medição do ruído de fundo foi realizada por um tempo de 5 minutos, com o analisador acústico posicionado no centro da câmara receptora. Quando foi o caso, providenciou-se a correção do ruído de impacto medido, em função do valor do ruído de fundo, conforme os procedimentos indicados pela norma ISO 16283-2 (INTERNATIONAL..., 2015). O tempo de reverberação (TR) também foi determinado para cada ambiente de recepção, o qual foi utilizado no processamento dos dados coletados. O ensaio TR, seguindo o procedimento da NBR 11957 (ABNT, 1988), foi realizado utilizando o analisador acústico, conectado à fonte sonora (modelo 4292 da marca Brüel&Kjær), que, ao enviar um sinal de comando, gera um impulso elétrico que é transmitido em som pela referida fonte sonora. O tempo de reverberação é obtido através da média aritmética, para cada frequência, de 3 medições realizadas nas câmaras de recepção.

Figura 9 - Execução do sistema de piso flutuante LaMoCeCamp para ensaio em campo



Figura 10 - Execução do sistema de piso flutuante LaMacCeCamp para ensaio em campo



O processamento dos dados inclui aplicar os valores dos níveis de ruído de impacto medidos na câmara de recepção (L_i) em uma equação prevista na ISO 16283-2 (INTERNATIONAL..., 2015), que resulta nos níveis de ruído de impacto padronizado (L_{nT}), em dB, correspondente a cada frequência, em Hz. Em seguida se faz a determinação do nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L_{nT,w}$), a partir de um tratamento matemático, previsto na norma ISO 717-2 (INTERNATIONAL..., 2013), o qual representa o desempenho acústico ao ruído de impacto do sistema de piso ensaiado.

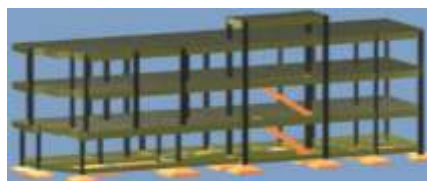
Finalmente, de acordo com cada nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L_{nT,w}$), determinado para cada sistema de piso ensaiado, verifica-se qual o enquadramento entre as três faixas de valores (mínimo, entre 66 dB e 80 dB; intermediário, entre 56 dB e 65 dB; e superior, menor ou igual a 55 dB) que classificam o desempenho de sistemas de piso que separam as unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos, conforme previsto na NBR 15575-3 (ABNT, 2013).

Análise da carga extra na estrutura de edifícios devido ao novo piso sobre o existente

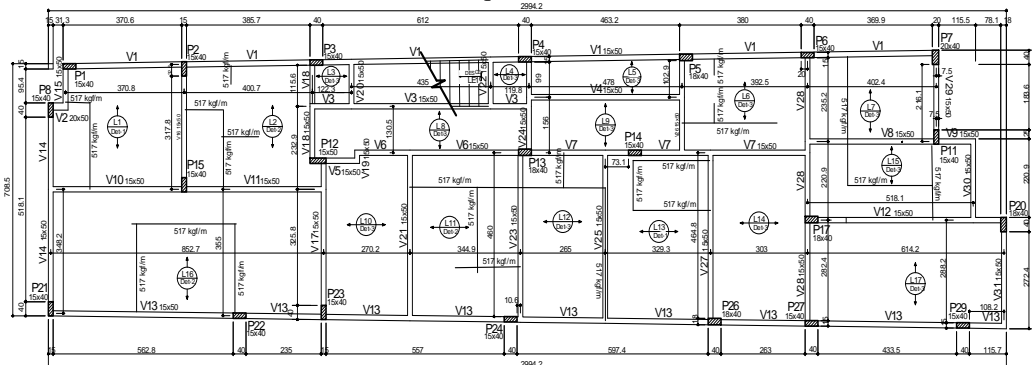
As estruturas dos edifícios foram avaliadas visando identificar possíveis problemas relacionados com a carga extra, devido ao aumento da densidade superficial de cada pavimento. Nesse caso, considera-se a hipótese em que todos os apartamentos dos referidos edifícios venham a adotar a mesma estratégia de execução de novo piso sobre o existente. As cargas extras/m² distribuídas uniformemente sobre as lajes foram consideradas para avaliar o comportamento também das vigas e pilares. O destaque foi para a avaliação de cada pilar com a verificação das cargas máximas e das seções das armaduras. O comportamento estrutural (dimensionamento e verificação de deslocamentos) desses elementos submetidos às cargas (permanentes e acidentais) previstas na NBR 6120 (ABNT, 2000) para o uso residencial foi avaliado, sempre utilizando o software específico para cálculo estrutural, Eberick (ALTOQI, 2018). O processo de análise prevê quatro situações distintas de cargas distribuídas uniformemente, em função do tipo de revestimento do piso utilizado na avaliação. A princípio, foi avaliado o comportamento da laje treliçada com a carga apenas do piso existente, considerada como “referência”. Em seguida, foram avaliadas as cargas extras correspondentes a cada novo piso assentado sobre o existente: as placas cerâmicas (carga extra de 14 kg/m²), o porcelanato extrafino (carga extra de 7,5 kg/m²) e o conjunto laminado de madeira e a manta reciclada de polietileno (carga extra de 6 kg/m²).

A estrutura do edifício residencial recém-concluído, aqui denominado edificação 1, no qual foram realizadas as medições (ruído de impacto no piso) em campo, tem o seu modelo estrutural (Figura 11) baseado em 3 lajes pré-moldadas treliçadas, vigas e pilares de concreto armado, conforme estabelecido no seu projeto estrutural.

Figura 11 - Modelo estrutural da edificação 1



(a) Maquete estrutural



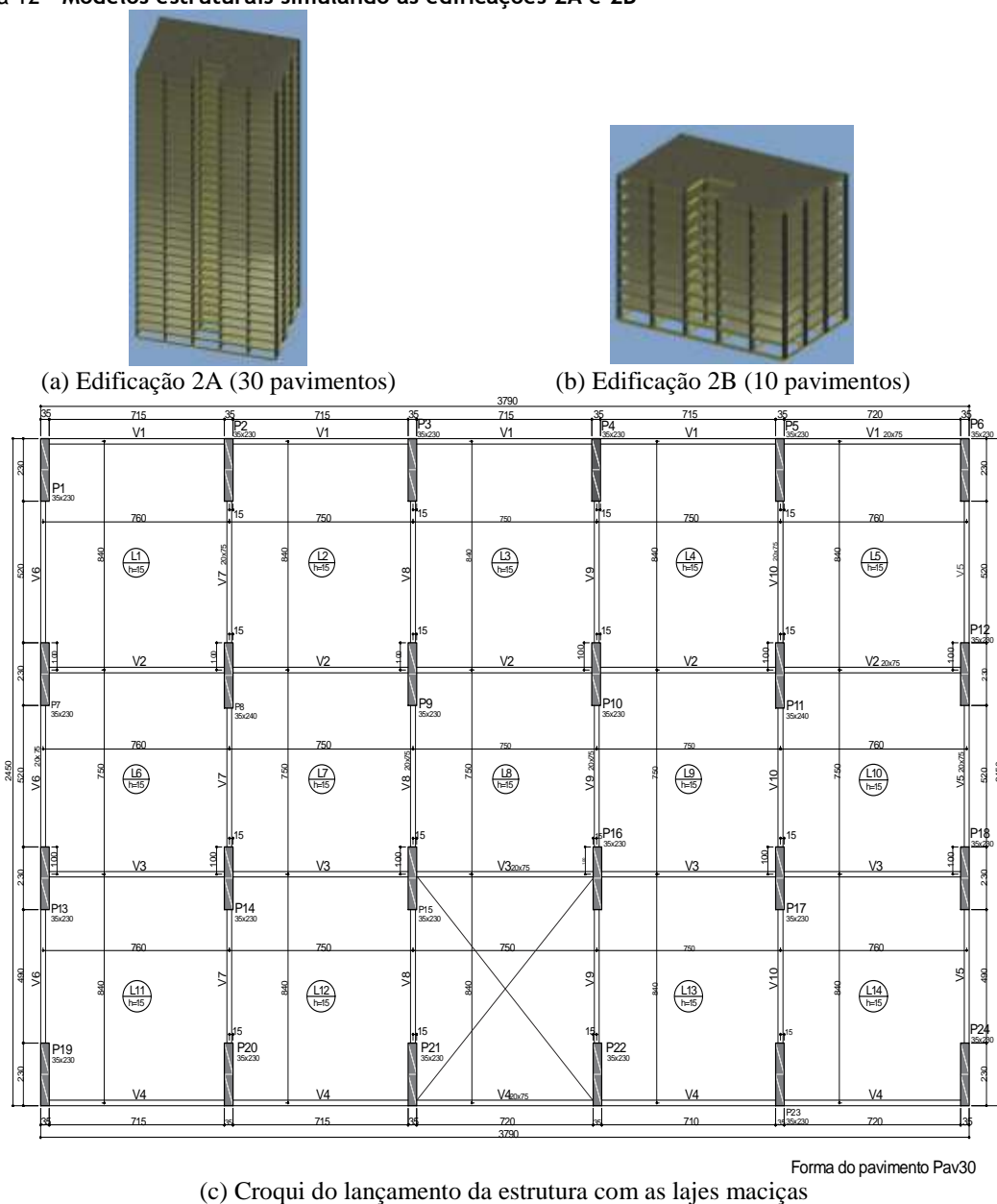
Forma do pavimento Tipo 02 (Nível 560)

(b) Croqui do lançamento da estrutura

Os outros dois modelos estruturais hipotéticos para edifícios multifamiliares utilizados nessas análises foram a edificação 2A, simulada com 30 pavimentos, e a edificação 2B, com 10 pavimentos. A seguinte configuração estrutural foi considerada na edificação 2A (Figura 12a): concreto armado ($F_{ck} = 35 \text{ MPa}$), 30 lajes maciças (15 cm de espessura), 10 vigas (20 cm x 75 cm) e 24 pilares (35 cm x 230 cm), distribuídos em uma modulação de 7,5 m x 7,5 m. O modelo estrutural que simula a edificação 2B (Figura 12b) é o mesmo da edificação 2A, sendo evidentemente ajustadas as seções dos pilares (35 cm x 140 cm). Uma atenção especial foi dada ao acréscimo de cargas em relação aos pilares, sobretudo na edificação 2A, que possui uma quantidade bem maior de pavimentos, o que pode representar uma concentração das cargas extras em algum pilar.

A avaliação dos elementos estruturais previstos em cada edificação (1, 2A e 2B) baseou-se na verificação dos dimensionamentos e dos deslocamentos máximos estruturais obtidos nos processamentos das estruturas em cada situação de carregamento. Assim, procurou-se verificar se estavam em concordância com as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014), que é a norma referência para projeto e execução de estruturas de concreto.

Figura 12 - Modelos estruturais simulando as edificações 2A e 2B

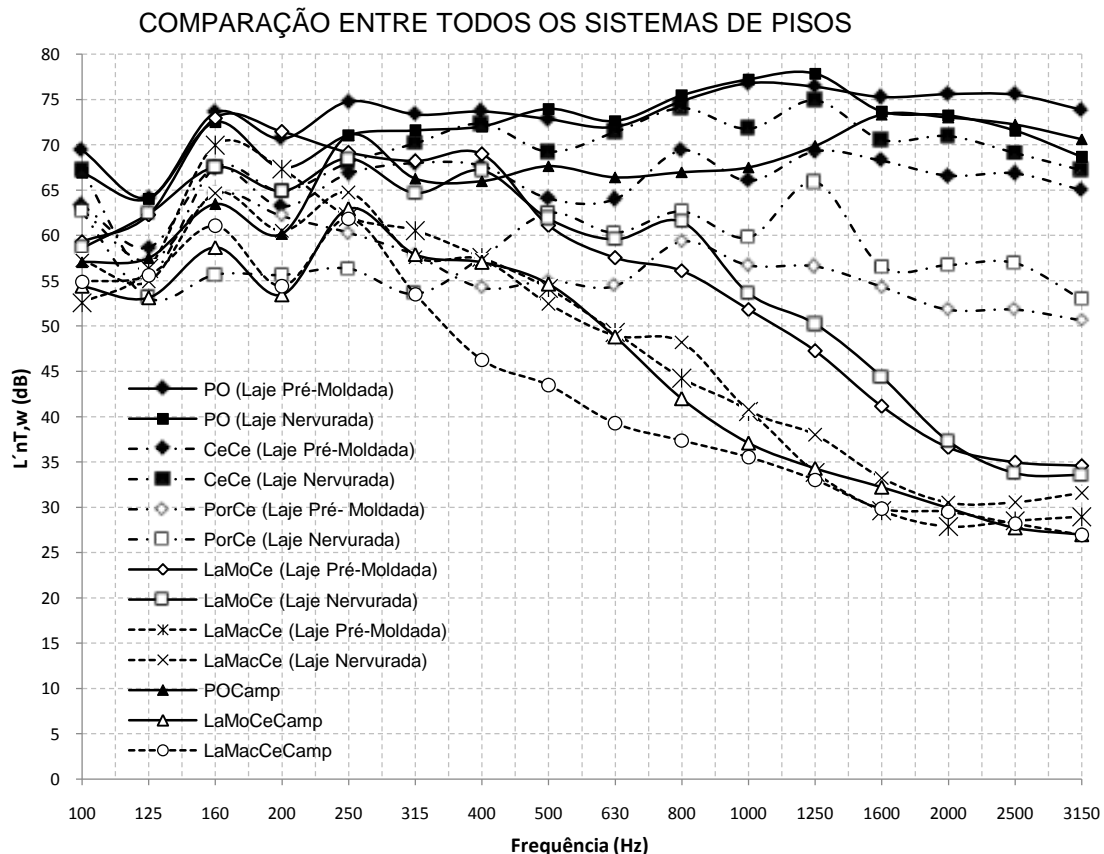


Resultados e discussões

Análises dos ruídos de impacto nos sistemas com novo piso sobre o existente

A comparação entre os valores de $L_{nT,w}$ determinados para cada sistema de piso avaliado (Figura 13) demonstra que as amostras que utilizam o laminado de madeira e material resiliente (LaMoCe e LaMacCe) executado sobre o piso original possuem os menores valores em todas as faixas de frequência. Isso ocorre tanto nos ensaios realizados em laboratório nas duas câmaras acústicas (laje pré-moldada e laje nervurada), quanto em campo – dormitório do edifício residencial (LaMoCeCamp e LaMacCeCamp). Entre tais amostras, observam-se diferenças, sendo as maiores reduções de ruído de impacto nas frequências mais altas, com a seguinte configuração, pela ordem: LaMacCeCamp; LaMoCeCamp; LaMacCe (pré-moldada); LaMacCe (nervurada); LaMoCe (nervurada); LaMoCe (pré-moldada). Tais reduções mais destacadas nas frequências mais altas são coerentes com o estudo de Beresford e Chen (2018), no qual se confirma o melhor desempenho quando a base estrutural é de concreto, como é o caso aqui analisado. O resultado em campo com o laminado de madeira e a manta acústica comercial (LaMacCeCamp) produz o maior isolamento ao ruído de impacto no sistema de piso. Por outro lado, os piores desempenhos acústicos, conforme se esperava, foram obtidos com os pisos originais PO (em laboratório e em campo), seguidos pelo sistema CeCe (novo piso com cerâmica sobre o piso original com cerâmica), com altos ruídos de impacto em todas as frequências. Aqui também os resultados são condizentes com aqueles encontrados por Pagnoncelli e Morales (2016), que confirma a maior redução do ruído de impacto no piso, quando se utiliza o revestimento de madeira no lugar da cerâmica. O sistema de piso PorCe (porcelanato extrafino sobre piso original com cerâmica) teve valores intermediários entre as duas situações anteriores, mais destacadamente nas frequências mais altas.

Figura 13 - Valores de $L_{nT,w}$ para os sistemas de piso ensaiados



Pode-se observar (Tabela 2) que o valor de $L_{nT,w}$ (dB) teve resultados bastante satisfatórios, com reduções de até 28 dB com a amostra LaMacCeCamp, que é a configuração testada na área inteira do dormitório do edifício residencial (situação em campo). Tal intervenção no piso original produziu um pequeno acréscimo (1,6 cm) na espessura final do sistema, depois do novo piso instalado sobre o existente, e resultou na alteração no desempenho acústico de mínimo para superior (ABNT, 2013). Nesse caso, utilizou-se como novo piso o laminado de madeira com manta acústica comercial, configurando-se como piso flutuante, que havia se destacado pelos melhores resultados nos testes realizados nas duas câmaras acústicas em laboratório, a partir do ensaio simplificado (simulação com placa pré-moldada com 1 m²). A ideia do ensaio simplificado se confirma como estratégia interessante para reduzir os custos de avaliação de um maior número de amostras, antes de realizar um teste final em campo, como destacado por Miskiniset *al.* (2012) e Branco e Godinho (2013).

Os resultados da Tabela 2 estão coerentes com os estudos de Kim *et al.* (2009); Neves, António e Nossa (2008); Hale (2006), os quais destacam a importância do uso de materiais resilientes nos resultados obtidos com maior isolamento do ruído de impacto no sistema de piso. Nas comparações aqui feitas, o único sistema que utiliza material resiliente é aquele com laminado de madeira, justamente o que obteve o melhor desempenho acústico ao ruído de impacto, seja nos ensaios realizados nas câmaras acústicas em laboratório ou em campo, (LaMoCe e LaMacCe, LaMoCeCamp e LaMacCeCamp). Vale ressaltar que a possibilidade de deformação do material resiliente em longo prazo, e consequente perda de eficiência na redução do ruído de impacto no piso, como alertam Lee *et al.* (2014), Caniatoetal. (2016) e Zuchetto, Nunes e Patrício (2016), aqui pode ser minimizada, pelo fato da redução das cargas atuantes sobre ele, considerando que quando se executa o novo piso sobre o existente não terá contrapiso sobre o material resiliente, mas apenas o laminado de madeira.

Cabe o destaque para a configuração do sistema com o novo piso laminado utilizando a manta original (fornecedor) sobre piso existente de cerâmica esmaltada (LaMoCe), que apresentou grandes reduções no nível de ruído de impacto ($L_{nT,w}$), 19 dB em ambas as câmaras acústicas do laboratório, e 27 dB em campo (LaMoCeCamp), alterando do desempenho mínimo inicial para o desempenho intermediário e superior, respectivamente. Nesse caso, a alteração da espessura final do sistema de piso sobre piso foi de apenas 1,0 cm. Aqui também se confirma o efeito do piso flutuante, com uso de laminado de madeira, como estratégia importante para a redução dos ruídos de impacto, como apontado nos estudos de Pereyron (2008), Nunes, Zini e Pagnussat (2014).

Com relação ao aumento na espessura final do sistema de piso, considera-se tal acréscimo irrelevante, visto que não devem ocorrer alterações substanciais no mobiliário funcional da edificação (protótipo).

Tabela 2 - Comparações entre redução de ruído de impacto, desempenho acústico e aumento na espessura dos sistemas de pisos

Sistemas de piso	$L_{nT,w}$ (dB)	Redução de ruído de impacto (dB)	Desempenho (ABNT 2013)	Aumento na espessura do sistema de piso (cm)
Laboratório (câmaraacústica 1 – lajepre-moldada)				
PO	81	-	abaixo do mínimo	-
LaMoCe*	62	19	intermediário	1,0
LaMacCe*	56	25	intermediário	1,6
CeCe	73	8	mínimo	1,1
PorCe	60	21	intermediário	0,9
Laboratório (câmaraacústica 2 – lajenervurada)				
PO	79	-	mínimo	-
LaMoCe*	60	19	intermediário	1,0
LaMacCe*	54	25	superior	1,6
CeCe	77	2	mínimo	1,1
PorCe	64	15	intermediário	0,9
Campo – dormitórioEdifícioResidencial (lajepre-moldadatreliçada)				
PoCamp	78	-	mínimo	-
LaMoCeCamp*	51	27	superior	1,0
LaMacCeCamp*	50	28	superior	1,6

Nota: *o novo piso adicionado é considerado como piso flutuante

Deve-se ressaltar que um dos requisitos deste estudo é mitigar a interferência na espessura total resultante do piso. Assim, na ocasião da reforma, opcionalmente, poderão ser aproveitadas as portas de madeira internas (até mesmo a porta de acesso ao apartamento), realizando pequenos cortes (entre 0,9 e 1,6 cm, conforme o caso) para ajustar ao novo nível do piso. Quanto ao desnível de piso na transição entre ambientes, por exemplo, entre a sala/varanda haverá necessidade de trocar a soleira de granito (muito usual). O mais complicado seria o ajuste na porta (sala/varanda), que normalmente é feita de vidro com molduras de alumínio. Aqui se deve analisar cada caso, pois se não for viável realizar os cortes (no alumínio e no vidro), terá que trocar a porta inteira. Na transição entre quarto/banheiro, por exemplo, caso a ideia seja preservar o mesmo desnível entre os pisos, basta executar o novo piso também no banheiro.

O sistema de piso que menos favoreceu a redução do ruído de impacto foi aquele utilizando o novo piso com cerâmica sobre o piso original de cerâmica (CeCe), confirmando o estudo de Nunes, Zini e Pagnussat (2014), no qual também se concluiu que o piso em cerâmica esmaltada apresentava o mais baixo isolamento do ruído de impacto.

O resultado com o novo piso utilizando peças de porcelanato extrafino sobre o piso original de cerâmica (PorCe) mostrou que se consegue uma redução intermediária nos ruídos de impacto no sistema de piso, entre 21 dB e 15 dB, comparada aos casos anteriores de ensaios realizados nas câmaras acústicas 1 e 2 do laboratório, respectivamente. Contudo, o menor acréscimo (0,9 cm) na espessura final do sistema de piso ocorreu com essa configuração. Certamente, o acréscimo da massa superficial resultante deve ter sido determinante no ganho de redução dos ruídos de impacto para o sistema PorCe, comparado com CeCe, o que de certo modo aqui também confirma a importância desse aspecto, corroborando as análises feitas por Pereyron (2008), Simões (2011) e Beresford e Chen (2018).

Com relação à análise de custo-benefício na comparação entre as configurações testadas com o sistema novo piso sobre o piso original, tendo como referência (março/2018) o custo de execução por m^2 , observa-se que aquela que representa o menor custo (R\$ 60,00) corresponde ao piso cerâmico sobre o piso cerâmico (CeCe), exatamente o que reduziu pouco o isolamento do ruído de impacto. Por outro lado, os melhores resultados no isolamento ao ruído de impacto, alcançados com a aplicação do piso flutuante com laminado de madeira sobre o piso cerâmico, correspondem aos custos intermediários (LaMoCe = R\$ 125,00; LaMacCe = R\$ 129,00). O maior custo de execução resultou para o piso com peças de porcelanato extrafino sobre o piso original com cerâmica esmaltada (PorCe = R\$ 245,00). Logo, os sistemas com uso de laminado de madeira sobre o piso original (únicos considerados como pisos flutuantes) se destacam por proporcionar o maior isolamento acústico ao ruído de impacto, a maior facilidade de execução, com pequeno acréscimo na espessura final do sistema, e um custo de execução considerado intermediário entre as que foram testadas.

Análise dos elementos estruturais devido à carga extra dos novos pisos sobre o existente

Com base nos resultados obtidos nos cálculos para o dimensionamento e avaliação dos deslocamentos, considerando os materiais e os tipos de vínculos escolhidos entre os elementos estruturais no procedimento do lançamento da estrutura, verifica-se que as lajes e vigas não exigem reforços que pudessem inviabilizar a colocação das tais cargas extras. Deve-se lembrar que as lajes recebem apenas o acréscimo das cargas extras dos novos pisos adicionados no mesmo pavimento (não há o acúmulo de cargas provenientes de outros pavimentos). A confirmação de não exigência de reforços foi até mesmo na situação de maior carregamento, correspondente a “cerâmica” ($14,0 \text{ kg/m}^2$). Entretanto, para os elementos estruturais, como os pilares e as fundações, que acumulam cargas correspondentes aos outros pavimentos existentes em cada edificação avaliada, deve-se ter maior atenção.

A verificação dos valores das cargas máximas de cálculo (Nd) e das armaduras (As) para os pilares, avaliados no modelo da edificação 1 (3 pavimentos), comprovou que nenhum apresentou erro de dimensionamento. A maior diferença de carga ocorreu no pilar P9, quando foram comparados os dois cenários PO e CeCe, apresentando uma variação de carga de apenas 0,9 tf, o que caracteriza um valor baixo, em se tratando de um pilar com seção igual a 18 cm x 40 cm.

Mesmo considerando a edificação 2B (10 pavimentos), a verificação também não apresentou nenhum erro de dimensionamento, nem de deslocamento nos elementos estruturais. Nesse caso, o pilar P14 foi o único que apresentou maior diferença de carga (12 tf) na comparação entre os cenários PO e CeCe. Entretanto, tal diferença de carga, tendo em conta as dimensões previstas para os pilares (35 cm x 140 cm), não influenciou nos resultados das armaduras. Nos três cenários avaliados (CeCe, PorCe e LaMoCe), a mesma seção de armadura (34Φ10) requerida manteve-se igual ao cenário de referência (PO).

A análise realizada com o modelo da edificação 2A (30 pavimentos), no caso dos elementos estruturais lajes e vigas, novamente observou-se o mesmo comportamento estrutural do modelo da edificação 2B (10 pavimentos). Ou seja, não houve nenhum erro no dimensionamento e no deslocamento desses elementos, considerando todos os cenários de cargas avaliadas. No caso dos pilares do modelo da edificação 2A (30 pavimentos), a análise indica que a diferença de carga de apenas $6,0 \text{ kg/m}^2$ (Tabela 3) entre o cenário de referência (PO) e o laminado de madeira (LaMoCe) também não provocou nenhuma alteração na definição das armaduras. Isso mesmo considerando o acúmulo de cargas nos pilares, provenientes da execução do novo piso sobre o existente em todos os 30 pavimentos. Porém, quando foram feitas as verificações considerando os outros dois cenários (PO *versus* CeCe e PO *versus* PorCe) tornaram-se significativos os acréscimos de carga correspondentes aos novos pisos sobre os existentes. A verificação resultou em erros importantes no dimensionamento e na seção das armaduras, especificamente nos P8 e P11, nos quais a variação de carga entre os dois cenários provocou acréscimos de 38 tf. Os pilares P5, P13, P15, P16 e P23 também necessitam de correções nas seções de suas armaduras, o que demandaria intervenção para executar reforços e, por isso, poderia inviabilizar os procedimentos da correção acústica pelo processo de execução de novo piso sobre o existente.

Nas condições analisadas, enquanto nas edificações 1 (3 pavimentos) e 2B (10 pavimentos) nenhum elemento estrutural (laje, viga e pilar) necessitou de reforço, a edificação 2A (30 pavimentos) demandou correções importantes em pilares, ou seja, o número de lâminas do edifício na verificação faz diferença. Cabe destacar que as cargas nas fundações não foram avaliadas, uma vez que não foi possível definir os parâmetros necessários para a verificação do dimensionamento.

Tabela 3 - Valores das cargas máximas de cálculo (Nd) e das armaduras (As) para os pilares avaliados no modelo da edificação 2A (30 pavimentos)

Pilares	PO Referência		CeCe 14,0 kg/m ²		PorCe 7,5 kg/m ²		LaMoCe 6,0 kg/m ²	
	Nd-tf	As(cm ²)	Nd-tf	As(cm ²)	Nd-tf	As(cm ²)	Nd-tf	As(cm ²)
P1	1075	48Φ10	1080	48Φ10	1079	48Φ10	1075	48Φ10
P2	1723	92Φ12.5	1733	146Φ10	1730	146Φ10	1723	92Φ12.5
P3	1721	92Φ12.5	1733	146Φ10	1730	146Φ10	1721	92Φ12.5
P4	1721	56Φ16	1733	146Φ10	1731	146Φ10	1721	56Φ16
P5	1726	146Φ10	1735	94Φ12.5	1735	94Φ12.5	1726	146Φ10
P6	1079	48Φ10	1085	48Φ10	1085	48Φ10	1079	48Φ10
P7	1338	38Φ12.5	1346	38Φ12.5	1344	38Φ12.5	1338	38Φ12.5
P8	2134	108Φ16	2171	Erro D9	2168	Erro D9	2134	108Φ16
P9	2066	102Φ16	2081	68Φ20	2078	68Φ20	2065	102Φ16
P10	2065	102Φ16	2080	68Φ20	2079	68Φ20	2065	102Φ16
P11	2137	108Φ16	2175	Erro D9	2175	Erro D9	2137	108Φ16
P12	1343	38Φ12.5	1350	38Φ12.5	1350	38Φ12.5	1343	38Φ12.5
P13	1318	58Φ10	1326	38Φ12.5	1325	38Φ12.5	1318	58Φ10
P14	2073	102Φ16	2085	66Φ20	2083	66Φ20	2073	102Φ16
P15	1680	124Φ10	1692	32Φ20	1690	32Φ20	1680	124Φ10
P16	1678	124Φ10	1690	32Φ20	1689	32Φ20	1678	124Φ10
P17	2074	102Φ16	2086	66Φ20	2086	66Φ20	2074	102Φ16
P18	1322	38Φ12.5	1330	38Φ12.5	1330	38Φ12.5	1322	38Φ12.5
P19	1028	32Φ12.5	1034	32Φ12.5	1034	32Φ12.5	1028	32Φ12.5
P20	1673	80Φ12.5	1684	130Φ10	1683	130Φ10	1673	80Φ12.5
P21	1164	20Φ16	1171	52Φ10	1170	52Φ10	1164	20Φ16
P22	1163	20Φ16	1169	52Φ10	1169	52Φ10	1163	20Φ16
P23	1673	126Φ10	1684	130Φ10	1684	130Φ10	1673	126Φ10
P24	1033	32Φ12.5	1039	32Φ12.5	1039	32Φ12.5	1033	32Φ12.5

Nota: P5: $146\Phi10 \text{ cm}^2 (103.66 \text{ cm}^2) \leq 94\Phi12.5 \text{ cm}^2 (119.38 \text{ cm}^2)$;
P13: $58\Phi10 \text{ cm}^2 (41.18 \text{ cm}^2) \leq 38\Phi12.5 \text{ cm}^2 (48.26 \text{ cm}^2)$;
P15: $124\Phi10 \text{ cm}^2 (88.04 \text{ cm}^2) \leq 32\Phi20 \text{ cm}^2 (91.20 \text{ cm}^2)$;
P16: $124\Phi10 \text{ cm}^2 (88.04 \text{ cm}^2) \leq 32\Phi20 \text{ cm}^2 (91.20 \text{ cm}^2)$; e
P23: $126\Phi10 \text{ cm}^2 (89.46 \text{ cm}^2) \leq 130\Phi10 \text{ cm}^2 (92.30 \text{ cm}^2)$.

As preocupações sobre o aumento das cargas extras na estrutura de edifícios multipavimentos com maior altura, devido às correções acústicas, nos moldes testados com os materiais utilizados no presente estudo, são pertinentes e precisam ser avaliadas caso a caso. A existência de muitas variáveis (projeto de arquitetura, escolha do tipo da estrutura, material adotado e parâmetros do solo) que influem nos dimensionamentos das estruturas torna difícil prever o comportamento dos elementos estruturais, devendo-se ter cautela mesmo quando se avalia acréscimos de cargas com pequenos valores. A decisão de colocar um piso novo sobre o existente, de forma generalizada em todos os pavimentos de edifícios, deve sempre ser feita mediante consulta prévia de profissionais especializados em estruturas.

Considerações finais

O presente estudo buscou avaliar uma alternativa para reduzir o ruído de impacto entre pisos de unidades habitacionais sobrepostas, a partir da ideia da aplicação de novo piso sobre o piso original. Com base nos resultados, pode-se confirmar o aumento expressivo no isolamento acústico, conforme a escolha de revestimento a ser utilizado. Contudo, é importante que se busque compatibilidade entre a maior redução dos ruídos de impacto, o menor aumento da espessura do piso existente e a facilidade de execução.

O maior destaque é para a redução do nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado ($L_{nT,w}$) nos testes realizados em campo (edifício residencial) que atingiu 28 dB, ao se utilizar o sistema de piso laminado de madeira com material resiliente inserido entre ele e o piso original em cerâmica esmaltada (piso flutuante). Nesse caso, o desempenho acústico teve alteração de mínimo para superior, com apenas um acréscimo de 1,6 cm na espessura do piso original, conforme classificação prevista na NBR 15573-3 (ABNT, 2013). O uso da manta original fornecida pelo próprio fabricante do laminado é a opção mais adequada, tendo em vista a maior redução dos ruídos de impacto (27 dB), menor aumento na espessura do piso (1,0 cm), facilidade de execução e custo de execução intermediário comparado aos outros cenários testados.

Visto as reduções dos ruídos de impacto no piso de até 28 dB, deve-se lembrar que o valor obtido para $L_{nT,w}$ (50 dB) com o piso laminado de madeira e material resiliente sobre o piso original é considerado como desempenho mínimo nas normas internacionais (Suíça e Suécia $L_{nT,w}$ até o limite de 50 dB; Austrália $L_{nT,w}$ até o limite de 48 dB). Tal reflexão indica que a correção acústica que se alcançou nos testes é importante apenas dentro da realidade da norma brasileira, que tolera ruídos de impacto de até 80 dB. Ou seja, a correção para garantir conforto acústico aos usuários ainda não é a desejável e, por isso, não se dispensa executar sistemas de piso flutuantes nos edifícios, conforme as boas práticas, desde a sua fase de construção.

Referências

- ALTOQI. **Tecnologia BIM aplicada à engenharia**. Software Eberick para elaboração de projetos estruturais em concreto armado moldado in loco, pré-moldado, alvenaria estrutural e estruturas mistas. Florianópolis. Versão 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11957**: reverberação: análise do tempo de reverberação em auditórios: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-3**: edifícios habitacionais de até cinco pavimentos: desempenho, parte 3: requisitos para os sistemas de pisos internos. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014. Versão Corrigida.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2000. Versão corrigida.
- BERESFORD, T.; CHEN, J. Floor airborne and impact sound insulation performance of cross laminated timber vs. timber joist and concrete systems. In: HEAR TO LISTEN ACOUSTICS, Adelaide, 2018. **Proceedings [...]** Adelaide, 2018.
- BRANCO, F. G.; GODINHO, L. On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 184-191, 2013.
- CANIATO, M. *et al.* Time-depending performance of resilient layers under floating floors. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 226-232, jan. 2016.

- CONRAD, L. S. **Estudo comparativo entre diversos revestimentos para pisos quanto ao isolamento do ruído de impacto**. Santa Maria, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.
- HALE, M. Comparative results of field impact isolation testing of numerous resilient underlayment systems for hard-surfaced flooring. **Journal of Acoustic Society of America**, v. 120, p. 3147, 2006.
- HASSAN, O. A. B. **Building acoustics and vibration: theory and practice**. London: World Scientific Publishing Company, 2009.
- HOPKINS, C. **Sound insulation**. Burlington: Elsevier, 2012.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10140-3**: acoustics: laboratory measurement of sound insulation of building elements: part 3: measurement of impact sound insulation. Geneva, 2010.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16283-2**: acoustics: field measurement of sound insulation of building and of building elements: part 2: impact sound insulation. Geneva, 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 717-2**: acoustics: rating of sound insulation in buildings and of building elements: part 2: impact sound insulation. Geneva, 2013.
- KIM, K. *et al.* Correlation between dynamic stiffness of resilient materials and heavy weight impact sound reduction level. **Building and Environment**, v. 44, p. 1589-1600. 2009.
- KIM, K. *et al.* Influence of loading time of a load plate and sample size on the measurement of physical properties of resilient materials. **Archives of Acoustics**, v. 40, n. 2, p. 159–167, 2015.
- LEE, Y. J. *et al.* Structural behavior of resilient materials subjected to short-term load and long-term load. **IACSIT International Journal of Engineering and Technology**, v. 6, n. 1, feb. 2014.
- MARTINS, W. B.; OLIVEIRA, H. L. S.; JUNIOR, P. V. D. S. Avaliação da qualidade acústica pré-ocupação para o sistema de piso em ambiente construído de um apartamento residencial em Niterói-RJ. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 12.; INOVARSE RESPONSABILIDADE SOCIAL APLICADA, 3., Rio de Janeiro, 2016. **Anais [...]** Rio de Janeiro, 2016.
- MIŠKINIS, K. *et al.* Dependence between reduction of weighted impact sound pressure level and specimen size of floating floor construction. **Materials Science**, v. 18, n. 1, p. 93-97. 2012.
- NEVES, A.; ANTÓNIO, J.; NOSSA, A. Resultados experimentais da rigidez dinâmica de materiais usados sob pavimentos flutuantes. **Acústica**, Coimbra, p. 18-22. 2008.
- NUNES, M. F. O.; ZINI, A.; PAGNUSSAT, D. T. Desempenho acústico de sistemas de piso: estudos de caso para isolamento ao ruído aéreo e de impacto. **Acústica e Vibrações**, v. 46, p. 13-19, 2014.
- PAGNONCELLI, L.; MORALES, F. **Cross-laminated timber system (CLT): laboratory and in situ measurements of airborne and impact sound insulation**. European Acoustics Association - EAA. EuroRegio, Porto, 2016.
- PEREIRA, A. *et al.* **Evaluation of impact sound reduction of floor coverings on timber and timber-concrete floors using vibration measurements**. European Acoustics Association - EAA. EuroRegio 2016, Porto, 2016.
- PEREIRA, D. A. A. **Desenvolvimento de ferramentas para predição de isolamento de ruído de impacto em edificações de pavimentos múltiplos com laje nervurada**. João Pessoa, 2018. 223 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- PEREYRON, D. **Estudo de tipologias de lajes quanto ao isolamento ao ruído de impacto**. Santa Maria, 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- RASMUSSEN, B. Sound insulation between dwellings: requirements in building regulations in Europe. **Applied Acoustics**, v. 71, p. 373-385, dez. 2010.
- REZENDE, J. B.; RODRIGUES, F. C.; VECCI, M. A. M. Uma análise de critérios de desempenho acústico para sistemas de piso em edificações. In: SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 11., Juiz de Fora, 2014. **Anais [...]** Juiz de Fora, 2014.

SIMÕES, F. M. **Acústica arquitetônica**. Rio de Janeiro: PROCEL Edifica, 2011.

ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. O.; PATRÍCIO, J. V. Influence of the compression conditions in the acoustic performance of resilient layers of floors. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 22., Buenos Aires, 2016. **Proceedings [...]** Buenos Aires, 2016.

Agradecimentos

À Capes e ao CNPq pelo financiamento parcial da presente pesquisa; aos laboratórios do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em especial o Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME), que deram suporte para a realização desta pesquisa.

Leilane Aguiar Almeida Xavier

Lema Engenharia Ltda. | Av. Governador Flávio Ribeiro Coutinho, 500, sala 513, Jardim Oceania | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58037-005 | Tel.: (83) 98801-7594 | E-mail: leilaneaguiar@gmail.com

Aluísio Braz de Melo

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal da Paraíba | Cidade Universitária, Campus I | João Pessoa - PB - Brasil | CEP 58051-900 | Tel.: (83) 3216-7115 | E-mail: aluisiobmelo@hotmail.com

Enildo Tales Ferreira

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade Federal da Paraíba | Tel.: (83) 3216-7355 | E-mail: enildotales@gmail.com

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.