

ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSÃO DE PAVIMENTOS DE BETÃO E BETONILHAS COM AGREGADOS DE CORTIÇA EXPANDIDA: RESULTADOS EXPERIMENTAIS vs. MODELO ANALÍTICO.

AnabelaMoreira¹, JulietaAntónio², AntónioTadeu²

¹Instituto Politécnico de Tomar, Escola Superior de Tecnologia, Campus de Tomar – Quinta do Contador, 2300-313 Tomar
{anamoreira@ipt.pt}

²Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Pólo II, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra
{julieta@dec.uc.pt; tadeu@dec.uc.pt}

Resumo

O presente trabalho apresenta a caracterização experimental da transmissão sonora de pavimentos flutuantes cuja camada intermédia é constituída por uma betonilha fabricada com agregados de cortiça expandida e cimento *Portland* nas dosagens de 150, 250 e 400 kg/m³. Os ensaios foram realizados em câmaras acústicas verticais. Foram também efectuados ensaios para a determinação da rigidez dinâmica das betonilhas. Os resultados obtidos por via experimental, considerando lajetas fabricadas com cimento e agregados de cortiça com 1.5, 3 e 4.5 cm de espessura são comparados com os obtidos através de um modelo analítico para a previsão da transmissão sonora de sons de impacto em sistemas estratificados.

Palavras-chave: betonilhas com agregados de cortiça, isolamento a sons de percussão, modelo analítico em sistemas estratificados, lajetas flutuantes.

Abstract

The transmitted impact noise through concrete screeds containing cork granules is assessed. The experiments were carried out on 3 different *Portland* cement proportions, i.e., 150, 250 and 400 kg/m³. Laboratory tests have been conducted on samples 1.5, 3 and 4.5 cm thick, in vertical chambers. The dynamic stiffness of the concrete samples was also determined in laboratory conditions. The experimental results are compared with those obtained using an analytical model to predict impact sound transmission through multilayer systems.

Keywords: concrete layers with cork granules, impact sound insulation, analytical model for multilayer systems, floating slabs.

PACS no. xx.xx.Nn, xx.xx.Nn

1 Introdução

O sistema de lajeta flutuante é um dos processos mais eficientes no isolamento aos sons de percussão de elementos de compartimentação horizontais. Este método construtivo consiste em separar fisicamente a lajeta que serve de suporte ao revestimento que ficará aparente, da laje estrutural e dos elementos rígidos envolventes, e.g. paredes, através de um material elástico. A eficiência desta solução depende das características elásticas do material da camada intermédia e da ausência de ligações rígidas entre a superfície rígida aparente e os elementos estruturais e não estruturais confinantes. É de salientar que a camada resiliente não pode ser demasiado deformável por motivos de estabilidade do sistema. Os materiais que usualmente se colocam na camada resiliente são espumas de polietileno, lãs minerais, borrachas sintéticas, cortiça e derivados de cortiça. Porém, alguns destes materiais produzem elevadas emissões nocivas para o meio ambiente durante o seu processamento, e as matérias-primas que lhes dão origem provêm de recursos facilmente esgotáveis e apenas disponíveis em poucos países, como é o caso dos materiais de base polimérica.

No intuito de melhorar o desempenho do isolamento aos sons de percussão relativamente às soluções de pavimentos correntes, têm sido estudados alguns materiais não convencionais: *Hall, 1999* [1] estudou um sistema de pavimento leve flutuante cuja camada resiliente é constituída por espuma flexível de poliuretano de célula aberta; *Rodrigues et al., 2003* [2] analisaram o desempenho ao isolamento a sons de percussão de pavimentos flutuantes com camadas resilientes constituídas por fibra de coco; *Rushforth et al., 2005* [3] estudaram o desempenho ao isolamento aos sons de percussão de materiais destinados a revestimentos de piso fabricados a partir de resíduos da indústria de tapeçarias; *Jeong et al., 2010* [4] apresentaram um estudo no qual avaliaram o isolamento aos sons de percussão de um pavimento radiante com enchimento de betão leve a cuja composição adicionaram espuma de vidro. Nestes trabalhos é comprovada a eficácia das soluções estudadas, obtendo-se um desempenho satisfatório dos pavimentos relativamente ao isolamento aos sons de percussão. Aos estudos de *Rodrigues et al., 2003* [2] e *Rushforth et al., 2005* [3] acresce a vantagem de incorporarem materiais provenientes de desperdícios da indústria cujo processo de revalorização habitual implicaria custos ambientais mais elevados.

A caracterização do isolamento aos sons de percussão conferido por pavimentos é realizada através de ensaios acústicos nos quais se utiliza uma fonte sonora de impactos normalizada, a máquina de percussão. Há, no entanto, propriedades dinâmicas dos materiais a partir das quais se pode prever o seu comportamento físico, e.g., a rigidez dinâmica pode ser usada como parâmetro de previsão do desempenho acústico dos materiais [5], [6], [7].

Os modelos de cálculo tanto podem ser usados na previsão do comportamento de diferentes soluções construtivas, evitando procedimentos experimentais que consomem recursos e geralmente são demorados, como também podem ser usados como precursores de fenómenos que condicionam o desempenho de determinado elemento ou sistema construtivo [8]. No domínio do isolamento aos sons de percussão, têm sido publicados diversos trabalhos: *Stewart & Craik, 2000* [9] desenvolveram um modelo de previsão da transmissão de ruídos de impacto através de pavimentos flutuantes sobre uma laje de betão combinando os resultados obtidos com um modelo para prever a transmissão de ondas de flexão, formulado por *Craik & Wilson, 1997* [10], com um método de análise estatística de energia, *SEA*. *Nightgale et al., 2007* [8] recorreram à simulação do desempenho ao isolamento a sons de percussão em pavimentos de madeira, através de soluções analíticas que permitem prever os factores que mais influenciam a transmissão marginal na região das baixas frequências; posteriormente *Zeitler et al., 2010* [11] procederam à verificação experimental dos factores condicionantes identificados através da simulação desenvolvida por *Nightgale et al., 2007* [8]. *Legault & Noureddine, 2010* [12] estudaram um modelo analítico que simula a influência na transmissão sonora das ligações existentes entre os painéis de um elemento de compartimentação duplo. *Tadeu et al., 2007* [13] usaram um modelo analítico, baseado em funções de *Green*, para a previsão do isolamento a sons de percussão de sistemas estratificados. *Sousa & Gibbs, 2011* [14] desenvolveram um modelo analítico para antever a

transmissão de ruídos de impacto na região das baixas frequências, em pavimentos flutuantes e em lajes estruturais de betão com enchimentos de betonilhas leves à base de argila expandida.

Neste trabalho utilizam-se agregados de cortiça expandida, provenientes de resíduos da indústria corticeira, para o fabrico de betonilhas leves de cimento *Portland*. A cortiça, matéria leve e flexível, provém da casca de duas espécies de sobreiro, *Quercus suber* e *Quercus occidentalis*, que crescem espontaneamente na bacia mediterrânica. Estima-se que a sua floresta ocupe cerca de 2.3 milhões de hectares, localizando-se maioritariamente na Península Ibérica. Portugal assume-se como o maior produtor de cortiça, com mais de 50% da produção mundial e detendo cerca de 40% da floresta de sobreiros, na sua grande maioria, da espécie *Quercus suber* [15].

No presente estudo, as betonilhas leves com agregados de cortiça expandida foram aplicadas como camadas intermédias em pavimentos flutuantes. Neste artigo, apresentam-se os resultados dos ensaios de avaliação do índice de redução dos sons de percussão das referidas soluções de pavimentos. Os ensaios de percussão foram realizados nas câmaras acústicas verticais do *ITeCons*. No domínio experimental, foram ainda efectuados ensaios para a determinação da rigidez dinâmica das mesmas betonilhas, numa tentativa de relacionar estes resultados com os dos ensaios de percussão. As betonilhas foram testadas nas espessuras de 1.5, 3.0 e 4.5 cm. Procedeu-se também à simulação dos ensaios de percussão através de um modelo analítico, desenvolvido no Centro de Investigação em Ciências da Construção, *CICC*, e destinado à previsão da redução sonora aos sons de impacto. Os resultados deste modelo numérico são comparados com os resultados experimentais.

2 Composição das betonilhas

Na Tabela 1 apresentam-se as composições das betonilhas leves fabricadas com agregados de cortiça expandida. Estas betonilhas foram desenvolvidas a partir de quantidades de cimento *Portland* previamente fixadas: 150 (M 150), 250 (M 250) e 400 kg/m³ (M 400). Para além de cimento *Portland* do tipo *CEM II/B-L 32.5 N*, utilizaram-se no seu fabrico areia do rio e granulados de cortiça expandida de granulometrias 3/5 e 5/10. As betonilhas foram formuladas para que na sua composição existam 50% de granulados de cortiça expandida de granulometria 3/5 e 50% de granulometria 5/10. A percentagem destes agregados leves representa 80% da substituição de areia.

Tabela 1. Composição das betonilhas com agregados de cortiça, M 150, M 250 e M 400.

<i>Constituintes</i>	<i>M 150</i>	<i>M 250</i>	<i>M 400</i>
Cimento	151.09 kg/m ³	254.63 kg/m ³	400.02 kg/m ³
ECG 3/5	27.89 kg/m ³	25.54 kg/m ³	26.96 kg/m ³
ECG 5/10	32.54 kg/m ³	29.79 kg/m ³	31.46 kg/m ³
Areia	377.67 kg/m ³	358.25 kg/m ³	339.84 kg/m ³
Água	81.36 dm ³ /m ³	138.80 dm ³ /m ³	202.22 dm ³ /m ³

3 Avaliações experimentais

A determinação do índice de redução da transmissão de sons de percussão, ΔL_w , foi realizada de acordo com as normas EN ISO 10140-1:2010 [16], [17], EN ISO 10130-3:2010 [18] EN ISO 10140-4:2010 [19] e NP EN ISO 717-2:2006 [20] tendo-se reportado a um pavimento de referência de betão homogéneo com 14 cm de espessura, a laje de referência do *ITeCons*. A norma ISO 9052-1:1989 [21] estabelece a metodologia para a determinação experimental da rigidez dinâmica

aparente de materiais resilientes usados sob pavimentos flutuantes. O ensaio proposto por esta norma baseia-se no modelo simplificado desenvolvido por *Cremer et al., 1988* [22] através do qual o pavimento flutuante é representado por um sistema massa-mola, no qual a camada resiliente é a mola e a lajeta flutuante a massa.

3.1 Redução da transmissão de sons de percussão, ΔL_w

Para a realização dos ensaios de desempenho ao isolamento aos sons de percussão, foram moldadas 9 lajetas (1.20x1.20) m^2 das betonilhas M 150, M 250 e M 400. Foram testadas lajetas de cada amostra com as espessuras 1.5, 3.0 e 4.5 cm.

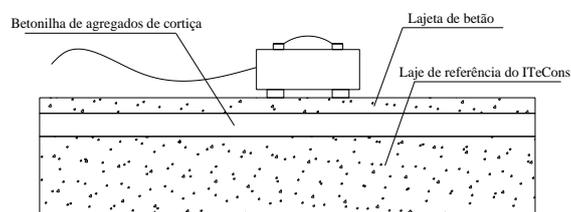
3.1.1 Preparação de provetes, equipamentos e procedimentos de ensaio

Os equipamentos usados nas medições acústicas foram os seguintes: gerador de sinais *Briuel & Kjaer*, referência 3109; amplificador *Briuel & Kjaer*, referência 2716; calibrador acústico do tipo 1, conforme definido na norma IEC 942; microfone *Briuel & Kjaer*, referência 4190 e dispositivo rotativo *Briuel & Kjaer*, referência 3923; fonte sonora omnidireccional, *Briuel & Kjaer*, referência 4292 e máquina de percussão, *Briuel & Kjaer*, referência 3207 e termo-higrómetro.

As betonilhas M 150, M 250 e M 400 foram testadas na camada intermédia do sistema de pavimento, ou seja, a máquina de percussão foi colocada sobre uma lajeta de betão de 3 cm de espessura e esta sobre a lajeta com agregados de cortiça (Figura 1), segundo uma solução de pavimento flutuante. Foi ainda realizado um ensaio com granulados soltos de cortiça na camada intermédia do pavimento flutuante. A mistura de agregados leves que se preparou foi idêntica à mistura usada na composição das betonilhas com agregados de cortiça expandida, i.e. 50% de agregados de cortiça expandida de granulometria 3/5 e 50% de granulometria 5/10. Esta mistura solta de agregados designou-se ‘cortiça’.



a) Ensaio de percussão.



b) Representação esquemática.

Figura 1. Betonilha de agregados de cortiça como camada intermédia.

De acordo com as referidas normas, a redução da transmissão de sons de percussão produzida pelo revestimento de piso, ΔL (dB), corresponde à diferença entre os níveis sonoros normalizados da laje ensaiada sem o revestimento aplicado, $L_{n,0}$, e da laje ensaiada com o revestimento aplicado, L_n , i.e.,

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad (1).$$

O índice de isolamento sonoro do pavimento de referência com o revestimento aplicado, $L_{n,r,w}$ (dB), é determinado através da comparação da curva resultante das medições com a curva de referência, definida para o intervalo de frequência compreendido entre 100 e 3150 Hz. O valor do índice de isolamento sonoro do pavimento de referência com o revestimento aplicado, $L_{n,r,w}$, corresponde à ordenada da curva de referência na abcissa de 500 Hz. O índice de redução da transmissão de sons de percussão produzida pelo revestimento de piso, ΔL_w é determinado por:

$$\Delta L_w = 78 - L_{n,r,w} \quad (2).$$

3.1.2 Apresentação de resultados

Os resultados expostos na Tabela 2 referem-se aos ensaios realizados com as lajetas das betonilhas M 150, M 250, M 400, interpostas na camada intermédia da solução de pavimento flutuante.

Tabela 2. Índice de redução da transmissão de sons de percussão, ΔL_w , das betonilhas aplicadas na camada intermédia – sistema de pavimento flutuante.

<i>Camada Intermédia</i>	ΔL_w (dB)		
	<i>Esp.=1.5cm</i>	<i>Esp.=3.0cm</i>	<i>Esp.=4.5cm</i>
M 150	19	19	22
M 250	18	19	20
M 400	14	17	18
<i>Cortiça</i>	24	28	30

Adicionalmente testou-se uma solução de pavimento flutuante com um estrato intermédio constituído por granulados de cortiça expandida, na forma solta, de granulometrias 3/5 e 5/10 na proporção 50-50% a que se designou ‘cortiça’. A partir da análise de resultados é possível afirmar que o sistema de pavimento com a camada intermédia ‘cortiça’, de 4.5 cm de espessura, é a solução mais eficiente ($\Delta L_w = 30$ dB). Esta solução revela ser também a mais proveitosa para as restantes espessuras testadas, i.e., $\Delta L_w = 24$ dB, na espessura de 1.5 cm e $\Delta L_w = 28$ dB, na espessura de 3.0 cm.

No que se refere aos pavimentos que incorporam na camada intermédia as betonilhas de cortiça, o melhor desempenho corresponde à betonilha M 150 que regista para as espessuras 1.5 e 4.5 cm os valores $\Delta L_w = 19$ dB e $\Delta L_w = 22$ dB, respectivamente. Na espessura de 3 cm, as lajetas fabricadas com as betonilhas M 150 e M 250 apresentam o mesmo valor de $\Delta L_w = 19$ dB. A solução de pavimento flutuante que apresenta os menores valores de ΔL_w , em todas as espessuras, é a que integra a betonilha M 400 na camada intermédia.

A maior variação dos valores de ΔL_w , entre as espessuras estudadas, verifica-se na solução de pavimento flutuante que incorpora a mistura de granulados de cortiça na forma solta ($\Delta L_w^{\max} = 30$ dB e $\Delta L_w^{\min} = 24$ dB). Relativamente às soluções de pavimento com as lajetas de betonilhas de cortiça na camada intermédia do pavimento, a maior diferença de ΔL_w entre a solução de maior e a de menor eficiência, em termos de isolamento a sons de percussão corresponde à que utiliza a betonilha M 400 ($\Delta L_w^{\max} = 18$ dB e $\Delta L_w^{\min} = 14$ dB). As lajetas produzidas com M 250 são as que apresentam a menor variação de ΔL_w , entre as espessuras testadas ($\Delta L_w^{\max} = 20$ dB e $\Delta L_w^{\min} = 18$ dB). Interessa salientar que os valores de ΔL_w referentes ao pavimento flutuante com a lajeta de M 250 não diferem significativamente dos resultados obtidos com a lajeta de M 150, designadamente nas espessuras de 1.5 e de 3.0 cm (na espessura de 1.5 cm, registaram-se $\Delta L_w = 19$ dB e $\Delta L_w = 18$ dB, para as lajetas fabricadas com as betonilhas M 150 e M 250, respectivamente e na espessura de 3.0 cm, os valores de ΔL_w são iguais, i.e., $\Delta L_w = 19$ dB).

3.2 Rigidez dinâmica aparente, s'_t

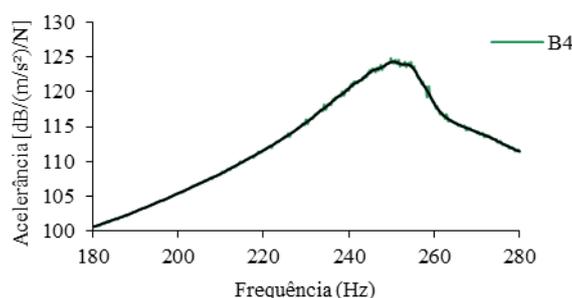
A norma ISO 9052-1:1989 [21] define que o ensaio deve ser realizado com o recurso a 3 provetes quadrados (200×200) mm².

3.2.1 Preparação de provetes, equipamentos e procedimentos de ensaio

A preparação dos provetes e os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com o definido pela norma ISO 9052-1:1989 [21] e encontram-se descritos em [23]. Na Figura 2 a apresentam-se os dispositivos de medição usados no ensaio e na Figura 2 b o resultado da excitação de um dos 4 pontos da superfície de um provete de 4.5 cm de espessura fabricado com a betonilha M 400, ou seja, a correspondente função de transferência, no domínio da frequência. Quando a solitação do sistema é realizada através de impacto, a norma ISO 9052-1:1989 [21] estabelece que o tratamento de dados seja realizado de acordo com o proposto na norma ISO 7626-5:1994 [24]. Esta norma descreve a metodologia a seguir para o caso da resposta no domínio da frequência se reportar a estruturas excitadas por forças impulsivas externas à estrutura.



a) Equipamentos de ensaio.



b) Função de transferência, no domínio da frequência, da amostra M 400 com 4.5 cm de espessura.

Figura 2. Avaliação experimental da rigidez dinâmica.

A rigidez dinâmica aparente, s'_t , por unidade de área de amostra é determinada por avaliação da frequência fundamental de ressonância da vibração vertical do sistema massa-mola, através do designado método da ressonância. A frequência fundamental de ressonância é determinada através da seguinte expressão:

$$s'_t = 4\pi^2 \cdot m'_t \cdot f_0^2 \quad (3),$$

em que m'_t (kg/m^2) é a massa total do provete por unidade de área e f_0 (Hz) o valor médio da frequência fundamental de ressonância que corresponde ao valor de pico da função de transferência.

3.2.2 Apresentação de resultados

No caso em estudo, os dispositivos de ensaio registaram acelerações e forças. A função resposta em frequência traduz a resposta do sistema à força aplicada, em função da frequência, pelo que a função de transferência será o quociente entre a aceleração e a força, i.e., a acelerância. Desta forma, a função de transferência no domínio da frequência permite identificar a frequência para a qual ocorre a ressonância do sistema. A frequência fundamental de ressonância corresponde ao valor de pico da função de transferência. Na Tabela 3 expõem-se os valores médios dos 4 pontos testados em cada um dos 3 provetes de cada amostra.

Atendendo a que o menor valor de s'_t corresponde à maior atenuação de sons de percussão, é possível afirmar, a partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 3, que o sistema mais eficiente é o correspondente à betonilha M 150, na espessura de 3.0 cm ($s'_t = 148.75 \text{ MN}/m^3$). No caso da betonilha M 250, afigura-se que a solução mais vantajosa, atendendo ao valor de s'_t , possa ser a representada pela espessura de 3.0 cm ($s'_t = 191.17 \text{ MN}/m^3$). Interessa, no entanto, referir que a mesma betonilha na espessura de 1.5 cm revelou um resultado relativamente próximo a este valor de s'_t , i.e., $s'_t = 206.43 \text{ MN}/m^3$. Os resultados apresentados na Tabela 3 indicam ainda que a

betonilha M 400 é que apresenta os maiores valores de s'_t . Para esta amostra, o menor valor de $s'_t = 481.70 \text{ MN/m}^3$ corresponde à espessura de 1.5 cm, sendo este valor superior ao maior valor de s'_t obtido na betonilha M 250, i.e., $s'_t = 405.00 \text{ MN/m}^3$.

Tabela 3. Frequência de ressonância, f_0 (Hz), e rigidez dinâmica aparente, s'_t (MN/m^3), das amostras das betonilhas M 150, M 250 e M 400.

<i>Betonilhas</i>	<i>Espessura (cm)</i>	<i>f_0 (Hz)</i>	<i>s'_t (MN/m^3)</i>
M 150	1.5	137.11	159.97
	3.0	127.43	148.75
	4.5	155.10	228.06
M 250	1.5	154.54	206.43
	3.0	145.01	191.17
	4.5	204.52	405.00
M 400	1.5	234.38	481.70
	3.0	246.03	576.59
	4.5	242.89	599.56

Os valores mais baixos da rigidez dinâmica verificam-se para a betonilha M 150, o que está de acordo com os resultados obtidos para o ΔL_w . Os valores mais elevados surgem para a betonilha M 400 que contém maior quantidade de cimento e por isso é mais rígida.

4 Modelo Analítico

Desenvolveu-se um modelo analítico para avaliar a transmissão de sons de impacto através de um sistema de pavimento multicamada composto por uma lajeta flutuante (camada 1), uma camada resiliente (camada 2) e uma laje de betão (camada 3), infinitamente longas ao longo das direcções x e z , dividindo dois meios acústicos (ver Figura 3). O campo incidente é gerado por cargas verticais pontuais 3D.

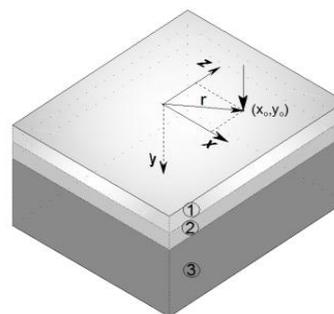


Figura 3. Geometria do problema

4.1 Descrição sumária do problema

A solução da propagação de ondas neste sistema complexo pode ser obtida adicionando a contribuição de um conjunto de termos de superfície, definidos para a interface de cada material. Estes termos podem ser expressos como a soma de um potencial dilatacional (φ) e de um potencial de corte (ψ) no caso de uma camada sólida e um potencial dilatacional no caso de uma interface fluida.

O campo incidente (da fonte) pode ser também expresso como o resultado de um potencial dilatacional e um potencial de corte. Cada um destes potenciais pode ser expresso como integrais de *Bessel*, os quais podem ser expressos como uma soma discreta, se for assumida a existência de fontes virtuais, igualmente espaçadas L_y , na direcção y (direcção vertical).

Os potenciais do campo incidente, gerados por uma carga harmónica vertical, colocada na camada sólida superior, podem ser expressos por:

$$\varphi_{inc}(x, y, z, \omega) = \frac{-\pi}{\rho^{s_i} \omega^2 L_y} \sum_{n=1}^N J_0(k_n r) k_n \frac{E_b^{s_i}}{v_n^{s_i}} \text{sign}(y - y_0), \quad (4)$$

$$\psi_{inc}(x, y, z, \omega) = \frac{\pi}{\rho^{s_i} \omega^2 L_y} \sum_{n=1}^N J_0(k_n r) k_n \frac{E_c^{s_i}}{-i\gamma_n^{s_i}}, \quad (5),$$

com ρ^{s_i} a massa volúmica da camada sólida i , $J_0(\)$ são funções de *Bessel* de ordem 0, $E_b^{s_i} = e^{-i\nu_n^{s_i}|y-y_0|}$, $E_c^{s_i} = e^{-i\gamma_n^{s_i}|y-y_0|}$, $v_n^{s_i} = \sqrt{(k_p^{s_i})^2 - k_n^2}$ ($\text{Im}(\nu_n^{s_i}) \leq 0$), $\gamma_n^{s_i} = \sqrt{(k_s^{s_i})^2 - k_n^2}$ ($\text{Im}(\gamma_n^{s_i}) \leq 0$), $k_p^{s_i} = \omega/\alpha^{s_i}$, $k_s^{s_i} = \omega/\beta^{s_i}$, $k_n = \frac{2\pi}{L_y} n$ é o número de onda na direcção y e $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2}$. α^{s_i} e β^{s_i} são as velocidades das ondas dilatacionais e de corte no meio sólido i . A distância L_y é escolhida de modo a prevenir a sobreposição espacial do efeito das fontes virtuais.

Todas as interfaces sólido-fluido e sólido-sólido geram termos de superfície que podem ser expressos de forma similar aostermos da fonte (campo incidente), usando potenciais com amplitudes *a priori* desconhecidas.

A amplitude desses potenciais é calculada impondo as condições fronteira necessárias nomeadamente continuidade de tensões e deslocamentos normais e tensões tangenciais nulas em interfaces sólido-fluido e continuidade de tensões e deslocamentos ao longo das interfaces sólido-sólido. Estas condições dão origem a um sistema com m equações, com $m=2+4n_s$ ($n_s=3$ é o número de camadas sólidas do pavimento). A resolução do sistema conduz ao conhecimento da amplitude dos potenciais e permite calcular a pressão nos fluídos externos ao pavimento.

No fluído do topo do pavimento

$$p(x, y, z, \omega) = \frac{-2\pi}{L_y} \sum_{n=1}^{n=N} \left[J_0(k_n r) k_n \frac{E_f^{f_{top}}}{v_{nf}^{f_{top}}} A_n^{f_{top}} \right] \quad (6)$$

No fluído da base do pavimento

$$p(x, y, z, \omega) = \frac{-2\pi}{L_y} \sum_{n=1}^{n=N} \left[J_0(k_n r) k_n \frac{E_f^{f_{bottom}}}{v_{nf}^{f_{bottom}}} A_n^{f_{bottom}} \right] \quad (7),$$

$A_n^{f_{top}}$ e $A_n^{f_{bottom}}$ são as amplitudes dos potenciais dilatacionais associados com os fluídos externos.

4.2 Cálculos analíticos

O modelo foi aplicado para simular o comportamento a sons de impacto das soluções ensaiadas em laboratório. Calculou-se o nível de pressão sonora no fluído inferior do sistema (equação 7).

Tabela 4. Parâmetros introduzidos no modelo analítico.

<i>Material</i>	<i>MV_a (kg/m³)</i>	<i>G (kPa)</i>	<i>v_P (m/s)</i>
M 150	520	11204	223
M 250	740	16904	230
M 400	900	22385	240
Betão	2500	12×10 ⁶	3499
Ar	1.2	-	340

MV_a – Massa volúmica aparente aos 28 dias de idade; *G* – Módulo de elasticidade transversal; *v_P* – velocidade das ondas P.

As camadas têm a espessura dos elementos ensaiados, nomeadamente, uma laje de betão de 3 cm, camadas de betonilha com cortiça com várias espessuras (1.5, 3.0 e 4.5 cm) e uma laje de betão de 14 cm de espessura. As propriedades dos materiais introduzidas no modelo encontram-se na Tabela 4.

4.2 Resultados analíticos vs. resultados experimentais

Na Figura 4 exibem-se as curvas referentes ao nível sonoro de percussão na câmara receptora das betonilhas M 150, M 250 e M 400, nas espessuras 1.5, 3.0 e 4.5 cm.

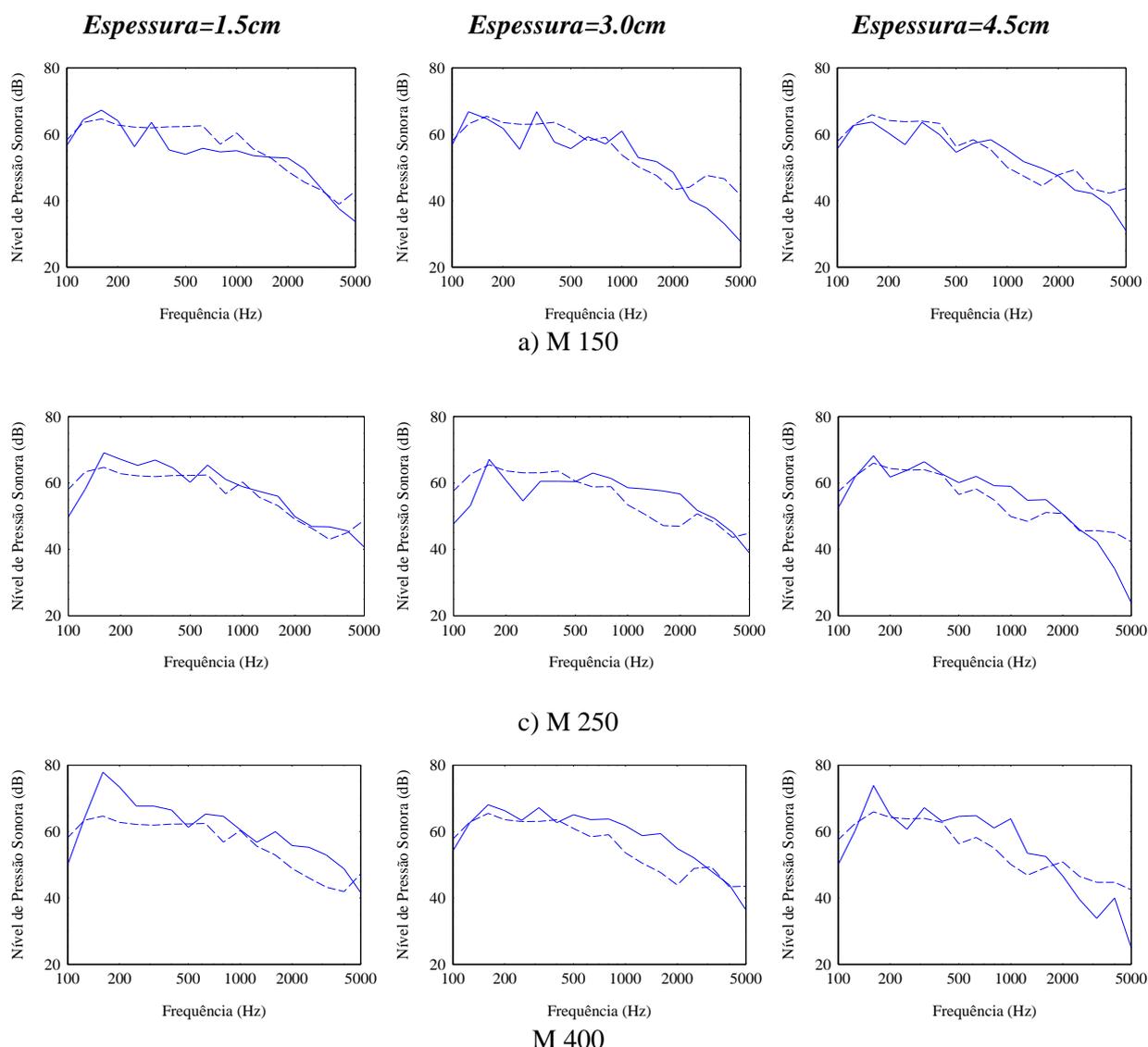


Figura 4. Resultados analíticos e resultados experimentais do nível sonoro de percussão na câmara receptora: a linha contínua representa os resultados experimentais enquanto a linha descontínua os resultados analíticos.

5 Conclusões

Os resultados dos ensaios de percussão permitem afirmar que das soluções de pavimentos flutuantes testadas, a mais proveitosa, em qualquer das espessuras estudadas, é a que utiliza a mistura de granulados de cortiça, na forma solta.

Os resultados de ΔL_w , obtidos a partir dos ensaios de percussão, demonstraram que a solução mais eficiente de pavimento flutuante é a que integra a lajeta de M 150, na camada intermédia do sistema de pavimento, com a espessura de 4.5 cm. De acordo com os resultados do mesmo ensaio, a solução de pavimento flutuante que apresenta os menores valores de ΔL_w , em todas as espessuras, é a que integra a betonilha M 400.

Atendendo aos resultados de rigidez dinâmica dos sistemas ensaiados, depreende-se que a melhor solução, em termos de isolamento aos sons de percussão, é a que inclui, na camada intermédia do sistema de pavimento, a betonilha M 150 de 3.0 cm de espessura. Por outro lado, e de acordo com os resultados do mesmo ensaio, a menor eficiência, em termos de isolamento aos sons de percussão, é evidenciada pela betonilha M 400 que regista os valores mais elevados de s'_1 . Apesar das betonilhas estudadas incorporarem agregados de cortiça expandida, que isoladamente apresentam reduzida rigidez dinâmica aparente, a sua rigidez dinâmica enquanto material compósito é significativamente superior, o que pode influenciar os resultados do ensaio cujo modelo se baseia num sistema massa-mola em que, neste caso específico, a mola é representada pela betonilha.

O modelo analítico usado neste trabalho permite prever de forma aproximada o nível sonoro de percussão na câmara receptora, traduzindo, no entanto, com maior rigor o comportamento do sistema de pavimento flutuante que integra as betonilhas M 150, na espessura de 1.5 cm e M 250 nas espessuras de 1.5 e de 4.5 cm. Importa referir que as câmaras acústicas verticais do *ITeCons*, onde os ensaios de percussão foram realizados, são caixas fechadas com modos próprios de vibração que não são considerados no modelo analítico utilizado e que podem explicar as diferenças entre os resultados analíticos e os resultados experimentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à *Amorim Isolamentos S.A.* a disponibilização dos agregados de cortiça expandida usados no trabalho.

Referências

- [1] Hall, R. *Impact Sound Insulation of Flooring Systems Polyurethane Foam on Concrete Floors - Doctoral Thesis*. Sheffield Hallam University, 1999.
- [2] Rodrigues, R. C.; Carvalho, A. P. O. Natural vegetal fibbers as a new resilient layer for floating floors. *Euronoise 2003 - 5th European Conference on Noise Control*, Naples, Italy 19-21 May, 2003.
- [3] Rushforth, I. M.; Horoshenkov, K. V.; MirafTAB, M.; Swift, M. J. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Applied Acoustics*, Vol. 66, 2005, pp. 731-749.
- [4] Jeong, J., Yun, C.; Kim, M. The effect of aerated concrete containing glass foam aggregate on the heavy-weight impact sound insulation. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics* Sydney, Australia, 23-27 August, 2010.
- [5] Shiavi, Alessandro, Pavoni, Belli Andrea and Russo, Francesco. Estimation of acoustical performance of floating floors from dynamic stiffness of resilient layers. *Building Acoustics*, Vol. 12 (2), 2005, pp. 99-113.

- [6] Neves, A., António, J. ; Nossa, A. Resultados experimentais da rigidez dinâmica de materiais usados sob pavimentos flutuantes. *Acustica 2008*, Coimbra, Portugal 18-22 Outubro, 2008.
- [7] Kim, K.; Jeong, G.; Yang, K.; Sohn, J. Correlation between dynamic stiffness of resilient materials and heavyweight impact sound reduction level. *Building and Environment*, Vol. 44, 2009 pp. 1589-1600.
- [8] Nightingale, Trevor R. T.; Bosmans, Ivan. Two modelling approaches for periodic ri-stiffened plates typical of floor assemblies. *14th International Congress on Sound and Vibration*, Cairns, Australia 9-12 July, 2007, pp. 1-8.
- [9] Stewart, M. A.; Craik, R. J. M. Impact sound transmission through a floating floor on a concrete slab. *Applied Acoustics*, Vol. 59, 2000, pp. 353-372.
- [10] Craik, R. J. M.; Wilson, R. Sound Transmission through masonry cavity walls. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 179 (1), 1995 pp. 79-96.
- [11] Zeitler, B.; S., Schoenwald; Nightingale, T. R. T. Parametric study of sound transmission through lightweight floors. *Internoise 2010 – noise and sustainability*, Lisbon, Portugal 13-16 June, 2010.
- [12] Legault, Julien; Noureddine, Atalla. Sound transmission through a double panel structure periodically coupled with vibration insulators. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, 2010 pp. 3082-3100.
- [13] Tadeu, A.; Pereira, A.; Godinho, L.; Antonio, J. Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multilayer systems using analytical expressions. *Applied Acoustics*, Vol. 68, 2007, pp. 17-42.
- [14] Sousa, A. Neves; Gibbs, B. M. Low frequency impact sound transmission in dwellings through homogeneous concrete floors and floating floors. *Applied Acoustics*, Vol. 72, 2011, pp. 177-189.
- [15] Pereira, João Santos; Bugalho, Miguel Nuno; Caldeira, Maria da Conceição. *From the cork oak to cork - a sustainable system*, APCOR - Portuguese Cork Association, 2008.
- [16] Norma, EN ISO 10140-1:2010. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 1: Application rules for specific products*, ISO, 2010.
- [17] Norma, EN ISO 10140-1:2010/A 1:2012. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 1: Application rules for specific products - Amendment 1: Guidelines for the determination of the sound reduction index of joints filled with fillers and/or seals*, ISO 10140-1:2010/Amd 1:2012.
- [18] EN ISO 10140-3:2010, Norma. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 3: Measurement of impact sound insulation*, ISO, 2010.
- [19] Norma, EN ISO 10140-4:2010. *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 4: Measurement procedures and requirements*, ISO, 2010.
- [20] Norma, NP EN ISO 717-2:2009 (Ed. 1). *Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão*, ISO 717-2:1996+A1:2006.
- [21] Norma, ISO 9052-1:1989. *Acoustics - Determination of dynamic stiffness - Part 1: Materials used under floating floors in dwellings*, ISO, 1989.
- [22] Cremer, L., Heckl, M.; Ugar, E. E. *Structure-Borne Sound - Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*, Springer-Verlag, 2nd edition, 1988.
- [23] Moreira, Anabela; António, Julieta; Tadeu, António. Impact sound reduction of concrete layers containing cork granules. *Internoise 2010 - noise and sustainability*, Lisbon, Portugal, 13-16 June 2010.
- [24] Norma, ISO 7626-5:1994. *Vibration and shock - Experimental determination of mechanical mobility. Part 5: Measurements using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure*, ISO 1994.