

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA RIGIDEZ DINÂMICA DE MATERIAIS USADOS SOB PAVIMENTOS FLUTUANTES

Ana Neves¹, Julieta António², Ana Nossa¹

¹Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção – ITeCons
Rua Pedro Hispano, Pólo II da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal
{anaisab,anossa@itecons.uc.pt}

²Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra
Rua Luís Reis Santos, Pólo II da Universidade de Coimbra, 3030-788 Coimbra, Portugal
julieta@dec.uc.pt

Resumo

A utilização de materiais resilientes tais como espumas, borrachas, cortiça e feltros, que poderão ser colocados sob a camada de revestimento dos pavimentos ou fazendo parte de uma camada flutuante (lajeta flutuante), é uma prática comum para reduzir as vibrações estruturais geradas por acções de impacto. Existem propriedades dinâmicas dos materiais resilientes que estão relacionadas com a sua capacidade para atenuar os sons de percussão. Uma dessas propriedades é a rigidez dinâmica dos mesmos.

Neste trabalho apresentam-se os resultados, obtidos em laboratório, da rigidez dinâmica de diversos materiais existentes no mercado e que são habitualmente aplicados sob as lajetas flutuantes dos pavimentos. O ensaio é realizado cumprindo o especificado na norma ISO 9052-1.

A quantificação desta propriedade permitirá comparar o desempenho dos diferentes materiais ensaiados. Será também efectuada a previsão da atenuação sonora a sons de percussão, utilizando as expressões da norma EN 12354-2.

Palavras-chave: sons de percussão, rigidez dinâmica, ensaio laboratorial.

Abstract

The use of resilient materials, such foams, rubbers, cork and felts, which can be placed under the layer coating or as part of a floating floor is a common practice in order to reduce structural vibrations caused by the impact loads.

There are dynamic properties of the resilient materials which are related to the capacity of absorbing the impact. One of those properties is the dynamic stiffness of the materials themselves.

The dynamic stiffness of various materials existing in the market and which are commonly applied under floating floor slabs is obtained in laboratory. The experiment will be carried out according to the ISO 9052-1 standard.

The quantification of this property allows to compare the performance of different materials and will be used to predict the impact sound attenuation by using expressions of the EN 12354-2 standard.

Keywords: impact sound, dynamic stiffness, laboratory test.

1 Introdução

O desenvolvimento da sociedade conduziu a um crescimento do número de fontes de ruído que se traduz num aumento dos níveis de ruído. Este facto tem como consequência a diminuição da qualidade de vida das populações. A sociedade dos nossos dias é cada vez mais exigente no que diz respeito às condições de conforto dos edifícios. De entre estas, destacam-se as condições térmicas, acústicas, de iluminação e qualidade do ar. O ruído no interior dos edifícios é das principais causas de reclamação por parte dos seus habitantes. Os sons transmitidos por meio sólido resultam da excitação directa nos elementos estruturais. Estes sons são bastante incómodos e a sua atenuação após o edifício estar construído é bastante difícil.

O elemento estrutural mais frequentemente solicitado aos sons de percussão é a laje de pavimento. A forma de reduzir as vibrações estruturais causadas pelos sons de percussão é interromper o elemento sólido que serve de base à propagação. Pode-se agir alterando a superfície de contacto ou o meio de transmissão. A utilização de materiais resilientes tais como espumas, borrachas, feltros e cortiça, que poderão ser colocados sob a camada de revestimento do pavimento ou fazendo parte da camada flutuante (lajeta flutuante) é uma prática comum para resolver este problema.

A avaliação da redução da transmissão aos sons de percussão pela aplicação de revestimentos em pavimentos pode ser obtida em laboratório, com base na norma EN ISO 140-8 [1]. A quantificação da atenuação sonora em laboratório requer câmaras acústicas de dimensões normalizadas, a utilização de provetes de grandes dimensões (10 m² de camada resiliente), uma lajeta flutuante de betão e 28 dias de cura do betão até o ensaio poder ser realizado. Contudo, os materiais resilientes apresentam propriedades dinâmicas que estão relacionadas com a sua capacidade de amortecer o impacto. Uma das propriedades é a rigidez dinâmica. A rigidez dinâmica é determinada de acordo com a norma ISO 9052-1 [2] e são utilizados provetes de dimensões reduzidas (200 × 200 mm²) cujos ensaios são bastante menos demorados.

Vários investigadores têm efectuado estudos acerca da rigidez dinâmica dos materiais resilientes usados em pavimentos. De acordo com a norma ISO 9052-1 [2], é possível determinar a rigidez dinâmica aplicando diferentes métodos de excitação: ruído branco, sinais sinusoidais e sinais impulsivos. Baron et al [3] fizeram um estudo no qual determinaram a rigidez dinâmica de vários materiais resilientes utilizando as três técnicas de excitação.

Quando os materiais são muito compressíveis, a diminuição de espessura do material, quando sujeito a carga, pode provocar um aumento da rigidez dinâmica. Schiavi et al [4] fizeram um estudo experimental no qual avaliaram o desempenho dos materiais resilientes a longo prazo.

Bettarello et al [5] investigaram o efeito da amplitude da força de excitação na frequência de ressonância do material, usando diferentes técnicas de excitação: sinal de ruído sinusoidal e impulsivo. A partir do conhecimento da rigidez dinâmica é possível estimar a redução do nível sonoro a sons de percussão. Schiavi et al [6] fizeram um estudo experimental que permitiu comparar a redução do nível sonoro a sons de percussão medido em laboratório e estimado através do conhecimento da rigidez dinâmica da camada resiliente.

Neste trabalho, vai determinar-se a rigidez dinâmica aparente, a curto prazo, de diversos materiais existentes no mercado e que são habitualmente colocados sob as lajetas flutuantes dos pavimentos. A quantificação desta propriedade permitirá comparar o desempenho dos diversos materiais e permitirá fazer a previsão da atenuação sonora a sons de impacto. Esta previsão será feita através das normas EN 12354-2 [7] e ISO 717-2 [8].

2 Materiais e técnicas de ensaio

2.1 Introdução

A capacidade de um material resiliente, usado sob pavimentos flutuantes, para reduzir a transmissão do nível sonoro aos sons de percussão pode ser definida pela sua rigidez dinâmica por unidade de área, s' (MN/m³). Esta propriedade pode ser expressa em termos do módulo de elasticidade do material, E (N/m²), e da sua espessura, d (m).

$$s' = \frac{E}{d} \quad (1)$$

Um pavimento flutuante consiste numa massa flutuante separada da sua base estrutural através de uma camada resiliente contínua. Este pavimento pode ser descrito, na sua forma mais simples, como um sistema massa-mola, em que a lajeta flutuante é representada pela massa e a mola corresponde à camada de material resiliente.

Os ensaios para a determinação da rigidez dinâmica de materiais resilientes são realizados tendo por base os procedimentos descritos na norma ISO 9052-1 [2]. O princípio desta norma é a determinação da rigidez dinâmica aparente (s'_t), por unidade de área de amostra, através do método da ressonância. Este método consiste na medição da frequência fundamental de ressonância da vibração vertical do sistema massa-mola. A mola corresponde ao material resiliente e a massa à placa de carga. A rigidez dinâmica (s') é determinada somando ao valor da rigidez dinâmica aparente um factor (s'_a) que depende da rigidez dinâmica do gás existente nos poros do material. Neste trabalho, apenas se determinou a rigidez dinâmica aparente dos materiais resilientes.

A frequência de ressonância é dada por:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}} \quad (2)$$

onde s'_t é a rigidez dinâmica aparente por unidade de área da amostra (MN/m³) e m'_t a massa total por unidade de área usada durante o teste (kg/m²).

A rigidez dinâmica aparente, por unidade de área de amostra, é:

$$s'_t = m'_t (2\pi f_r)^2 = 4\pi^2 m'_t f_r^2 \quad (3)$$

2.2 Execução dos provetes

De acordo com as indicações da norma ISO 9052-1 [2], deverão ser ensaiadas, pelo menos, 3 amostras do material resiliente. Estas amostras deverão ser quadradas com dimensões 200 mm x 200 mm. Sobre elas, deverá ser colocada uma película de plástico impermeável. Para colmatar eventuais irregularidades da superfície da amostra, deverá ser aplicada uma camada de gesso de, pelo menos, 5 mm. Por fim, e antes de o gesso começar a secar, é colocada uma chapa de aço (placa de carga) que deverá ser quadrada com (200 ± 3) mm x (200 ± 3) mm e com uma massa de aproximadamente 8 kg. A carga total de cada provete, incluindo equipamento de medição, deve ser de 8 kg ± 0.5 kg.

Após um período de secagem do gesso de $24 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$, os ensaios são realizados numa base de grande inércia de modo a que, em vibração, a velocidade desta base possa ser desprezável em relação à velocidade de vibração da placa de carga.

No caso de materiais de célula fechada, deve ser colocada uma fina camada de vaselina à volta da amostra.

2.3 Lista de materiais ensaiados

Os materiais estudados neste trabalho são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Amostras estudadas, descrição e respectivas espessuras.

Amostra	Descrição do Material	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	Espessura (mm)
AC1 (*)	Aglomerado composto de cortiça, tendo por composição granulada 2/4 mm e poliuretano.	219.5 – 222.3	6
AC2 (*)	Aglomerado composto de cortiça, tendo por composição granulada 2/4 mm e poliuretano.	172 – 176	6
AC3 (*)	Aglomerado composto de cortiça, tendo por composição granulada 2/4 mm e poliuretano.	184 – 195.8	6
AC4	Aglomerado composto de cortiça, tendo por composição granulada 2/4 mm e poliuretano.	181.5 – 196.9	2
PE1	Espuma de polietileno reticulado de cor cinza.	29.3 – 31.8	5.5
PE2	Espuma de polietileno extrudido de cor cinza escuro.	35.2 – 37	6
PE3	Espuma de polietileno reticulado de cor cinza.	24 – 24.4	11
PE4	Espuma de polietileno extrudido de cor azul.	37 – 41	5
PE5	Espuma de polietileno extrudido de cor branca.	16.6 – 17.5	3
BP1	Granulado de borracha, ligado com resina.	848 – 862	10
BP2	Granulado de borracha, ligado com resina.	719 – 744	10
Tela 1	Produto que consiste num véu de tecido de vidro de elevada densidade impregnado parcialmente por um betuminoso especial com acabamento de um tecido de polipropileno.	268 – 337	2.8
Tela 2	Feltro de betume oxidado com granulada de cortiça na face inferior.	364 – 404	4
F1	Feltro.	97 – 111	5
F2	Feltro.	84 – 94	10
F3	Feltro.	93 – 97	20
EPS_1	Poliestireno de cor branca.	14.6 – 15.5	20
EPS_2	Poliestireno de cor branca.	14 – 14.5	40
EPS_3	Poliestireno de cor branca.	14 – 15	60
EPS_C1	Poliestireno expandido de cor cinza.	14 – 14.5	20
EPS_C2	Poliestireno expandido de cor cinza.	13.9 – 14.3	40
EPS_C3	Poliestireno expandido de cor cinza.	14.2 – 14.5	60

(*) É de notar que estas amostras, apesar de terem a mesma composição, apresentam massas volúmicas aparentes distintas.

2.4 Equipamento

O equipamento utilizado no ensaio (Figura 1) consiste:

- num martelo de impacto, do tipo 8206;
- um acelerómetro, do tipo 4370 e pré-amplificador, do tipo 2646;
- sistema Multi-Analisador PulseTM, modelo 3560-C;
- software.

Todo o equipamento é da marca “Bruel & Kjaer”.

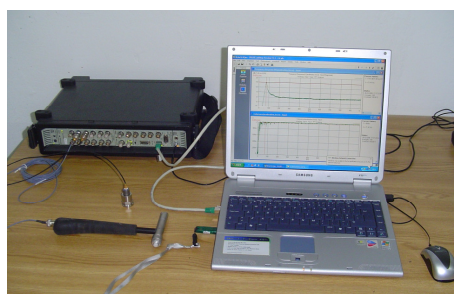


Figura 1 – Equipamento utilizado no ensaio

2.5 Descrição do ensaio

Após 24 ± 2 h dos provetes serem realizados, as amostras são ensaiadas sobre uma base de grande inércia. O ensaio consiste na excitação do sistema através de um martelo de impacto sobre a placa de carga. A vibração é medida através de um acelerómetro que é colocado no centro da mesma (Figura 2). É de notar que a excitação do sistema deve ser provocada na zona central da placa, de modo a que ocorram apenas vibrações verticais.

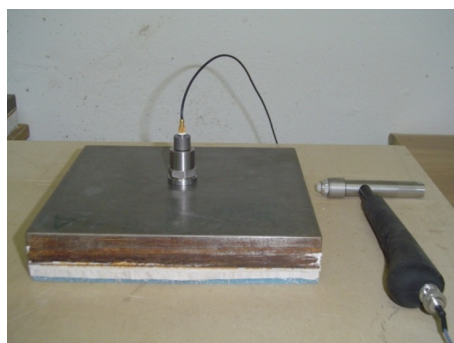


Figura 2 – Proвете de uma amostra de material resiliente pronto a ser ensaiado

A excitação é provocada durante um determinado período de tempo com batimentos que deverão ser compassados e com força constante. Para cada impacto, a força aplicada e a aceleração do sistema são registadas, respectivamente, pelo transdutor de força incorporado no martelo de impacto e pelo acelerómetro, analisadas e tratadas pelo sistema Multi-Analisador PulseTM.

De acordo com a norma ISO 9052-1 [2], quando se usa excitação por impacto, esta deve ser tratada de acordo com a norma ISO 7626-5 [9]. Esta norma especifica os procedimentos para a medição da

mobibilidade e outras respostas em frequência de estruturas excitadas por forças impulsivas, geradas por equipamentos que não estão ligados à estrutura. A função resposta em frequência, expressa a resposta da estrutura à força aplicada, em função da frequência. Se a resposta for a aceleração, a função de transferência será a acelerância (quociente da aceleração pela força). No caso em estudo, registaram-se acelerações e forças, sendo possível apresentar a acelerância do sistema. Assim, a função transferência de resposta em frequência, permite identificar a frequência para a qual ocorre a ressonância do sistema (Figura 3).

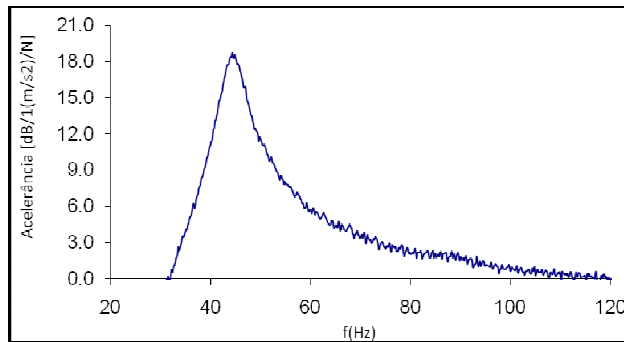


Figura 3 – Função de transferência no domínio da frequência

A validação do resultado do ensaio é feita tendo em conta a função de coerência que nos dá o grau de linearidade entre a força aplicada e a aceleração, para cada frequência. Esta função está compreendida entre 0 e 1. Um valor de coerência menor que 1 indica falta de qualidade dos dados obtidos pelo que, sempre que este facto é constatado, o resultado do ensaio deve ser rejeitado.

A curva de resposta em frequência permite avaliar o desempenho do material resiliente. Além de se poder determinar a rigidez dinâmica aparente a partir do conhecimento da frequência de ressonância, é possível avaliar o amortecimento interno nas vizinhanças do pico da curva usando o método “Half-Power Point” [10]. Segundo este método, as frequências ω_1 e ω_2 definem os pontos que correspondem a uma diminuição para metade da energia (3 dB). O grau de amortecimento do sistema é, então:

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega} \quad (4)$$

O factor de qualidade define-se como o quociente da frequência de ressonância, ω , pela diferença entre as frequências ω_2 e ω_1 e resulta:

$$Q = \frac{\omega}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{1}{2\xi} \quad (5)$$

Quando a curva de resposta em frequência é muito assimétrica, a diferença entre ω_2 e ω_1 passa a ser $2(\omega_2 - \omega)$ ou $2(\omega - \omega_1)$, consoante a curva, nas vizinhanças do pico, é mais estreita, respectivamente, à direita ou à esquerda da frequência de ressonância.

3 Apresentação e discussão de resultados

3.1 Apresentação e análise dos resultados dos ensaios

Para cada amostra de material resiliente, foram realizados, pelo menos, três provetes. Em cada um destes, o acelerómetro foi colocado no centro da placa de carga e excitou-se o sistema, através de um martelo de impacto, em quatro pontos à volta da sua zona central (em redor do acelerómetro). Foi recolhida informação acerca da aceleração e da força para cada um dos quatro pontos de excitação do sistema. Para cada uma das medições, foi obtida a função de transferência acelerância na qual foi possível identificar o pico de ressonância e a correspondente frequência de ressonância. Através da equação (3), determinou-se a rigidez dinâmica aparente para cada uma das medições. Assim, a rigidez dinâmica aparente de cada uma das várias amostras de material resiliente é uma média de doze valores obtidos, cujo desvio padrão é inferior a 10%. Quando, nalguma das amostras, o desvio padrão foi superior a 10%, ensaiaram-se novos provetes até se obter uma rigidez dinâmica aparente média com desvio padrão inferior a 10%. A exceção é o PE1 cujo resultado corresponde a uma média de 24 medições (6 provetes ensaiados) uma vez que se obtiveram valores muito díspares para as frequências de ressonância nos vários provetes. Para esta amostra, o desvio padrão é superior a 10%.

Foram determinadas, de uma forma muito expedita, as massas volúmicas aparentes de cada amostra, de modo a se poder ter uma ideia aproximada da densidade do material. Estas foram obtidas a partir da pesagem da amostra e da determinação do volume da mesma.

Os resultados finais encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados finais da frequência de ressonância, f_r , e respectiva rigidez dinâmica aparente, s'_t , para cada uma das amostras.

Amostra	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	Espessura (mm)	f_r (Hz)	s'_t (MN/m ³)
AC1	219.5 – 222.3	6	152.4	193
AC2	172 – 176	6	151.1	190
AC3	184 – 195.8	6	141.3	165
AC4	181.5 – 196.9	2	186.4	292
PE1	29.3 – 31.8	5.5	102.1	87
PE2	35.2 – 37	6	89.7	67
PE3	24 – 24.4	11	86.0	61
PE4	37 – 41	5	73.2	46
PE5	16.6 – 17.5	3	97.9	79
BP1	848 – 862	10	99.0	84
BP2	719 – 744	10	80.0	55
Tela 1	268 – 337	2.8	45.7	17
Tela 2	364 – 404	4	145.3	174
F1	97 – 111	5	59.8	30
F2	84 – 94	10	43.6	16
F3	93 – 97	20	34.6	10
EPS_1	14.6 – 15.5	20	100.2	83
EPS_2	14 – 14.5	40	104.0	89
EPS_3	14 – 15	60	83.2	56
EPS_C1	14 – 14.5	20	47.9	19
EPS_C2	13.9 – 14.3	40	42.4	15
EPS_C3	14.2 – 14.5	60	37.6	12

Observando os resultados, pode-se fazer a análise destes por conjunto de amostras e por espessuras. É de salientar que esta análise diz respeito ao comportamento do material a curto prazo pois desconhece-se o seu desempenho a longo prazo.

Relativamente ao agrupamento das amostras de cortiça, todas têm a mesma composição (granulado 2/4 mm e poliuretano). As amostras AC1, AC2 e AC3 têm a mesma espessura e diferente massa volúmica aparente. As amostras AC3 e AC4 têm espessura diferente e igual massa volúmica aparente. Comparando o grupo formado por estas duas últimas amostras, verifica-se que a amostra que conduz ao valor de rigidez dinâmica aparente mais elevado é a amostra de menor espessura (AC4). Nas amostras de igual espessura, a que apresenta maior rigidez dinâmica aparente é a que possui maior massa volúmica aparente (AC1). Contudo, a que possui menor massa volúmica aparente não é a que conduz ao menor valor da rigidez dinâmica aparente. Este facto pode ser devido ao arranjo das partículas constituintes da amostra. Neste conjunto de amostras, o melhor resultado encontra-se na amostra AC3 (6 mm), com um valor de rigidez dinâmica aparente de 165 MN/m^3 .

Nas espumas, dispõe-se de 3 amostras de polietileno extrudido e duas amostras de polietileno reticulado de diferentes espessuras. Todas as amostras têm diferentes espessuras. No grupo constituído pelas amostras PE1, PE2 e PE3, à medida que a espessura aumenta, a rigidez dinâmica aparente diminui. No segundo grupo, constituído por PE4 e PE5, também se verifica que a rigidez dinâmica aparente é menor para a maior espessura. Neste conjunto de amostras, o melhor resultado encontra-se na amostra PE4 (5 mm), com um valor de rigidez dinâmica aparente de 46 MN/m^3 .

Nos aglomerados de borracha, tem-se duas amostras de igual espessura mas de diferentes massas volúmicas aparentes. A amostra que possui menor massa volúmica aparente (BP2) apresenta menor valor de rigidez dinâmica aparente (55 MN/m^3).

No grupo dos feltros, tem-se três amostras de igual massa volúmica aparente, diferindo apenas a espessura. Verifica-se que, à medida que a espessura aumenta, a rigidez dinâmica aparente diminui. O melhor resultado encontra-se na amostra F3 cujo valor de rigidez dinâmica aparente é igual a 10 MN/m^3 .

O mesmo comportamento tem o conjunto formado pelas amostras de poliestireno expandido de cor cinza, em que o valor da rigidez dinâmica aparente mais baixo é 12 MN/m^3 .

Em relação às amostras de EPS, comparando a amostra de menor espessura (EPS_1) com a de maior espessura (EPS_3), também se verifica que a que apresenta menor valor da rigidez dinâmica aparente é a que tem maior espessura. O mesmo se passa quando se compara as amostras EPS_2 e EPS_3. No entanto, a rigidez dinâmica aparente da amostra EPS_2 (com 40 mm de espessura) apresenta um valor maior que o da amostra EPS_1 (20 mm). Todavia, o valor mais baixo encontrado para este conjunto de amostras foi de 56 MN/m^3 para a rigidez dinâmica aparente.

Comparando as amostras de igual espessura, verifica-se que nem sempre a amostra que conduz ao menor valor de rigidez dinâmica aparente é a que apresenta o menor valor de massa volúmica aparente.

Ainda se pode comparar o desempenho das amostras de EPS e de EPS de cor cinza. Estas amostras são feitas do mesmo material (poliestireno expandido) mas as amostras de EPS de cor cinza têm grafite incorporada. Constata-se que as amostras de EPS com grafite incorporada conduzem a melhores resultados.

Finalmente, tem-se as amostras Tela 1 e Tela 2. Estas amostras não se enquadram em nenhum dos grupos acima referenciados, nem formam outro grupo. A Tela 1 é constituída por dois tipos de materiais: fibra de vidro e um betuminoso com acabamento de um tecido de polipropileno. Esta amostra conduziu a um bom resultado, sendo o seu valor de rigidez dinâmica aparente dos mais baixos obtidos (17 MN/m^3). A Tela 2 também é uma amostra heterogénea, constituída por um feltro de betume oxidado com granulado de cortiça na face inferior. O valor resultante da rigidez dinâmica aparente é elevado (174 MN/m^3) e encontra-se no grupo de amostras que deram piores resultados.

Nesta análise, verifica-se que, nem sempre a amostra com o menor valor de massa volúmica aparente conduziu ao menor valor da rigidez dinâmica aparente. A massa volúmica aparente não pode ser um factor de comparação porque as perdas internas de energia dependem também da estrutura do material.

Analisando globalmente os materiais ensaiados, pode-se considerar que a Tela 1 apresenta bons resultados atendendo à sua reduzida espessura. Para espessuras maiores, pode-se considerar que as amostras de feltro e de EPS com grafite incorporada podem ser uma boa opção. Alguns dos materiais, tais como a espuma PE4, poderão conduzir a bons resultados com o aumento da espessura.

Se compararmos os valores obtidos com o limite de 15 MN/m³ imposto pelo documento Inglês *Resistance to the passage of sound, Building Regulations 2000 Approved Document E*, [11], apenas as amostras F3, EPS_C2 e EPS_C3 cumprem esse requisito.

Fazendo diminuir 3 dB ao valor de pico da função de transferência é possível identificar as frequências f_1 e f_2 que correspondem às frequências para as quais há uma diminuição da energia para metade. Para as diversas amostras de material resiliente estudado, foram obtidas as frequências f_1 e f_2 em cada uma das 12 medições. Com estes valores e tendo em conta a equação (5), foi possível determinar o factor de qualidade, Q . O grau de amortecimento, ξ , foi obtido a partir da equação (4). O valor final de cada um destes parâmetros é uma média dos 12 valores calculados. A excepção é o PE1 cujos resultados são uma média de 24 medições. Apresenta-se na Tabela 3 os resultados finais destes parâmetros para cada uma das amostras.

Tabela 3 – Resultados finais do factor de qualidade, Q , e do amortecimento do sistema, ξ , para cada uma das amostras.

Amostra	Espessura (mm)	Δf	Q	ξ (%)	s'_t (MN/m ³)
AC1	6	52.88	2.91	17.3	193.0
AC2	6	33.12	4.56	11.0	190.0
AC3	6	29.09	4.88	10.3	165.0
AC4	2	46.25	4.09	12.4	292.0
PE1	5.5	24.26	3.72	14.4	87.0
PE2	6	11.72	8.61	6.6	67.0
PE3	11	13.59	6.33	7.9	61.0
PE4	5	11.01	6.68	7.5	46.0
PE5	3	21.93	4.50	11.2	79.0
BP1	10	23.92	4.14	12.1	84.0
BP2	10	17.19	4.67	10.7	55.0
Tela 1	2.8	15.08	3.05	16.5	17.0
Tela 2	4	16.82	9.99	5.8	174.0
F1	5	18.58	3.27	15.5	30.0
F2	10	11.70	3.77	13.4	16.0
F3	20	8.16	4.16	12.0	10.0
EPS_1	20	12.95	8.04	6.4	83.0
EPS_2	40	17.93	5.84	8.6	89.0
EPS_3	60	14.04	6.58	8.5	56.0
EPS_C1	20	5.24	9.17	5.5	19.0
EPS_C2	40	3.08	13.90	3.6	15.0
EPS_C3	60	1.53	24.69	2.0	12.0

Para amostras do mesmo material, em que a única diferença entre elas é a espessura, pode-se comparar resultados. Confrontando os valores de Q e ξ com os respectivos valores da rigidez dinâmica aparente, nas amostras de Feltro e de EPS de cor cinza, constata-se que quanto maior for o grau de amortecimento do sistema, maior é o valor da rigidez dinâmica aparente pelo que o factor de qualidade decresce. Então, para estes materiais, à medida que a espessura do material resiliente aumenta, a rigidez dinâmica aparente diminui, assim como o amortecimento e, conseqüentemente, o factor de qualidade aumenta. Para o aumento de espessura, o amortecimento diminui quando a frequência de ressonância diminui porque o Δf também diminui, ou seja, à medida que a frequência de ressonância

diminui, a curva, de resposta em frequência, apresenta um pico mais estreito na ressonância. A exceção é o EPS. Neste material, não se verifica o aumento do amortecimento com o aumento da rigidez dinâmica aparente nas amostras EPS_1 e EPS_3, pois a primeira apresenta uma rigidez dinâmica aparente superior à da amostra EPS_3 mas o seu amortecimento é inferior ao desta última. No entanto, comparando os valores de rigidez dinâmica aparente e amortecimento para as amostras EPS_2 e EPS_3, ocorre o mesmo que nas amostras de Feltro e de EPS de cor cinza, ou seja, quanto menor for a espessura, maior é o valor da rigidez dinâmica aparente e do amortecimento (a curva alarga). Em relação às cortiças, para as amostras AC1, AC2 e AC3, quanto maior é a rigidez dinâmica aparente, maior é o amortecimento. Comparando AC3 e AC4 (mesmo material, mesma densidade e diferentes espessuras), quanto maior a rigidez dinâmica aparente maior é o amortecimento.

Verifica-se o mesmo para os dois grupos das espumas e para as borrachas.

Comparando o amortecimento com a rigidez dinâmica para diferentes materiais com a mesma espessura, observa-se que apenas para as amostras de 6, 40 e 60 mm se verifica o aumento do amortecimento com o aumento da rigidez dinâmica aparente. Para as restantes espessuras, não se verifica este facto. Note-se que se estão a comparar materiais diferentes com comportamentos diferentes (alguns podem ter comportamento próximo do elástico, outros características viscoelásticas).

3.2 Aplicação dos resultados a previsões de isolamento

A partir dos resultados dos ensaios realizados, foi possível estimar a redução sonora aos sons de impacto, para cada uma das amostras.

Tendo em conta o Anexo C da norma EN 12354-2 [7], é possível estimar a redução do nível de pressão sonora aos sons de percussão, ΔL (em dB), em pavimentos flutuantes através da seguinte expressão:

$$\Delta L = 30 \log \frac{f}{f_0} \quad (6)$$

sendo f a frequência central (em Hz) da banda de um 1/3 de oitava e f_0 a frequência de ressonância (em Hz) do sistema.

A frequência de ressonância do sistema é determinada de acordo com a equação (2) onde m' é a massa por unidade de área de pavimento flutuante (kg/m^2).

A partir da curva de previsão, determinou-se o índice normalizado ΔL_w . Os resultados obtidos dizem respeito à redução do nível sonoro conferido pela aplicação de uma camada resiliente sob uma lajeta de betão com uma massa de 122.4 kg/m^2 .

Observa-se (Tabela 4) que a amostra que apresenta uma maior redução do nível sonoro aos sons de percussão corresponde à amostra de feltro de maior espessura, F3, com $\Delta L_w = 34 \text{ dB}$.

Para algumas amostras, foi possível obter os valores declarados pelo fabricante para a redução do nível sonoro aos sons de impacto. Verificou-se que, em alguns casos, os valores declarados eram muito inferiores aos valores estimados. Uma vez que não foram realizados ensaios experimentais para avaliar a redução da transmissão aos sons de percussão pela aplicação de revestimentos em pavimentos, não é possível tirar grandes conclusões. Em função dos resultados disponíveis, parece que as fórmulas sobestimam o valor da redução sonora. No entanto, estas podem servir para comparar o desempenho dos diversos materiais.

Tabela 4 – Resultados finais da rigidez dinâmica aparente, s'_t , e respectiva redução sonora aos sons de impacto, ΔL_w , para cada uma das amostras.

Amostra	s'_t (MN/m ³)	ΔL_w (dB)
AC1	193.0	15
AC2	190.0	15
AC3	165.0	16
AC4	292.0	12
PE1	87.0	20
PE2	67.0	22
PE3	61.0	22
PE4	46.0	24
PE5	79.0	21
BP1	84.0	20
BP2	55.0	23
Tela 1	17.0	31
Tela 2	174.0	16
F1	30.0	27
F2	16.0	31
F3	10.0	34
EPS_1	83.0	20
EPS_2	89.0	20
EPS_3	56.0	23
EPS_C1	19.0	30
EPS_C2	15.0	32
EPS_C3	12.0	33

4 Conclusões

Uma forma de reduzir as vibrações estruturais resultantes da excitação directa dos pavimentos dos edifícios é a utilização de uma camada resiliente contínua que separa a lajeta e o revestimento de pavimento da sua base estrutural. A capacidade que os materiais resilientes têm para amortecer o impacto pode ser avaliada pela sua rigidez dinâmica. Assim, o presente trabalho pretendeu contribuir para o conhecimento do desempenho, a curto prazo, de alguns materiais resilientes existentes no mercado, no que diz respeito à sua capacidade de atenuação aos sons de impacto. Foi determinada, em laboratório, a rigidez dinâmica aparente dos materiais e, a partir dos resultados dos ensaios, foi possível fazer a previsão da redução sonora aos sons de impacto que esses materiais proporcionam.

Existem aspectos deste trabalho cujo estudo deveria ser mais alargado e desenvolvido.

Como se fez uma análise a curto prazo, é de todo conveniente fazer uma análise do desempenho do material a longo prazo, de modo a se poder fazer uma avaliação mais completa do material, no que diz respeito à sua capacidade para reduzir o nível sonoro aos sons de percussão quando sujeito à carga da lajeta flutuante ao longo dos anos. Note-se que, para materiais muito compressíveis, a aplicação da carga faz diminuir a espessura e torna o material mais rígido pelo que a rigidez dinâmica do material aumenta.

Seria também interessante ensaiar uma gama alargada de espessuras do mesmo material para se poder detectar tendências viscoelásticas no seu comportamento.

Referências

- [1] EN ISO 140-8 (1997). Acustica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 8: Medição em laboratório da redução da transmissão sonora de revestimento de piso em pavimento normalizado.
- [2] ISO 9052-1 (1989). Acoustics. Determination of dynamic stiffness. Part 1 : Materials used under floating floors in dwellings.
- [3] Baron, N.; Bonfiglio, P.; Fausti, P. Dynamic Stiffness Of Materials Used For Reduction In Impact Noise : Comparison Between Different Measurement Techniques. *Acústica 2004*, Guimarães.
- [4] Schiavi, A.; Belli, A. P.; Corallo, M.; Russo, F. Acoustical performance characterization of resilient materials used under floating floors in dwellings. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 3(3), 2007, pp. 477-485.
- [5] Bettarello, F.; Fausti, P.; Schiavi, A. On the dynamic stiffness of materials used under floating floors : analysis of the resonant frequency dependence by excitation force amplitude using different measurement techniques. *19th Internacional Congress on Acoustics*, Madrid, 2-7 September 2007.
- [6] Schiavi, A.; Belli, A. P.; Russo, F. Estimation of acoustical performance of floating floors from dynamic stiffness of resilient layers. *Journal of Building Acoustics*, Vol. 12(2), 2005, pp. 99-113.
- [7] EN 12354-2 (2000). Building acoustics. Estimation of acoustic performance of building from the performance of elements. Part 2 : Impact sound insulation between rooms.
- [8] EN ISO 717-2 (1996). Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements. Part 2: Impact sound.
- [9] 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.
- [10] Fertis, D, G. “Mechanical and structural vibration”, John Wiley&Sons, INC, Cidade de Publicação, 1995.
- [11] *Resistance to the passage of sound, Building Regulations 2000 Approved Document E* , RIBA Bookshops, 2006