

## DESEMPENHO DE ARGAMASSAS LEVES EM ISOLAMENTO A SONS DE PERCUSSÃO

F. G. Branco<sup>1</sup>, L. Godinho<sup>1</sup>, R. Masgalos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CICC, Dep. Eng. Civil da FCTUC  
{[fbranco@dec.uc.pt](mailto:fbranco@dec.uc.pt) ; [lgodinho@dec.uc.pt](mailto:lgodinho@dec.uc.pt)}

<sup>2</sup>Dep. Eng. Civil da FCTUC  
[masgalos@iol.pt](mailto:masgalos@iol.pt)

### Resumo

A actual abordagem dos códigos e regulamentos a nível europeu impõe a limitação a valores máximos para os índices de isolamento a sons de percussão na generalidade das utilizações de edifícios. Frequentemente, estas exigências levam à utilização de soluções construtivas que fazem uso de sistemas ditos flutuantes, com camadas resilientes aplicadas sob o pavimento. Soluções como lajetas flutuantes (sobre mantas de espumas sintéticas ou de fibras naturais) ou pavimentos flutuantes (p.ex. pavimentos em madeira aplicados sobre mantas de espumas sintéticas) tornaram-se comuns nos nossos dias.

Em alternativa a estas soluções, a utilização de camadas de enchimento leves e pouco rígidas, aplicadas sobre a laje estrutural, pode revelar-se como um contributo importante na minimização da transmissão dos ruídos de percussão. No presente trabalho avalia-se a melhoria proporcionada por diferentes soluções argamassas de enchimento leves no isolamento a sons de percussão. Analisam-se, especificamente, argamassas leves com poliestireno expandido, com argila expandida e com granulado de cortiça. O desempenho destas soluções é estudado em laboratório, com recurso a uma câmara acústica de dimensões reduzidas, permitindo uma comparação expedita entre diversas soluções ensaiadas nas mesmas condições.

**Palavras-chave:** argamassas leves, camada de enchimento, isolamento a sons de percussão.

### Abstract

Most recent European acoustic design codes and regulations establish a maximum value for percussion sound insulation on pavement slabs. These requirements, demand the implementation of technical solutions such as floating floors, with the introduction of a resilient layer under the finishing pavement layer. Technical solutions such as floating concrete slabs (placed over synthetic foam or natural fibers layers), or floating pavements (like wooden floors built over synthetic foam layers) became quite common on recently built constructions.

A possible alternative solution to floating pavements is the use of lightweight soft layers, applied over the structural concrete slab. These lightweight materials may present high quality results on the reduction of impact sound transmission.

In the present work, lightweight mortar slabs were tested, and the impact sound insulation for different materials was quantified. Different types of cement mortar containing expanded polystyrene, expanded cork and expanded clay granulates were compared. The acoustical performance of these solutions was evaluated through laboratory tests, using an acoustic chamber with small dimensions, which allows comparing several solutions, on similar test conditions, in an expedite way

**Keywords:** lightweight mortar, filling layer, impact noise insulation.

## 1 Introdução

As actuais exigências de conforto acústico no interior dos edifícios têm levado a uma crescente procura de soluções construtivas que garantam um bom desempenho no que respeita ao isolamento acústico nas suas componentes de ruído aéreo e de ruído de percussão. Estas exigências têm vindo a reflectir-se, um pouco por toda a Europa, na evolução da regulamentação em vigor, sendo que actualmente a abordagem generalizada dos códigos e regulamentos é a de impor a limitação a valores máximos para os índices de isolamento a sons de percussão na generalidade das utilizações de edifícios.

Do ponto de vista prático, estas exigências reflectem-se numa evolução progressiva das técnicas construtivas, sendo hoje corrente a utilização em edifícios de sistemas ditos flutuantes. Nestes sistemas, o revestimento superficial do pavimento assenta sobre uma ou mais camadas não estruturais, algumas delas com características resilientes, que permitem a dissipação da energia vibratória transmitida pelos ruídos de impacto. As soluções mais frequentemente implementadas em Portugal são, maioritariamente, de dois tipos:

- Soluções de lajeta flutuante: neste sistema o revestimento de pavimento assenta numa lajeta de betão construída sobre uma camada resiliente (que pode ser constituída por mantas de espumas sintéticas ou de fibras naturais). Trata-se de um sistema de grande interesse prático e versatilidade, uma vez que permite a aplicação de revestimentos rígidos (p.ex. cerâmicos), garantindo, ainda assim, o corte na transmissão de vibrações à estrutura. O desempenho deste sistema é muito condicionado pelos pormenores de execução (que deverão garantir uma efectiva separação entre a estrutura e a lajeta), e pelo material resiliente que é aplicado sob a lajeta de betão.
- Soluções de pavimentos flutuantes: Este sistema encontra-se amplamente divulgado e aplicado em Portugal, sendo extremamente comum a utilização de pavimentos em madeira aplicados sobre mantas finas de espumas sintéticas. Embora o seu efeito seja significativo, verifica-se que este tipo de solução é de aplicação mais limitada que a anterior.

Uma possível solução complementar às duas anteriormente apresentadas poderá corresponder à utilização de camadas de enchimento leves e pouco rígidas, aplicadas sobre a laje estrutural. Se o material que constitui esta camada apresentar boas características para dissipação da energia vibratória gerada por impactos na superfície, esta solução poderá constituir um contributo importante na minimização da transmissão dos ruídos de percussão. Embora existam alguns dados na literatura especializada sobre o efeito destas camadas (veja-se, por exemplo, Ferreira et al. [1]), não foi possível encontrar nenhum trabalho de referência que aborde esta temática, e que permita concluir da eficácia real desta solução complementar.

Nesta perspectiva, procura-se no presente trabalho avaliar a melhoria proporcionada por diferentes soluções argamassas de enchimento leves no isolamento a sons de percussão. Analisam-se, especificamente, argamassas leves com poliestireno expandido, com argila expandida e com regranulado de cortiça.

A caracterização da redução sonora a sons de percussão de soluções construtivas passa, do ponto de vista normativo, pela aplicação da metodologia definida nas Normas NP EN ISO 140-8 [2] e ISO 717-2 [3]. De acordo com estas normas, e com a norma ISO 140-1 [4] que especifica as características a que um sistema laboratorial deve obedecer para a realização deste ensaio, o ensaio deve ser realizado sobre uma laje de referência com 150mm de espessura (+20mm -40mm), em betão armado, com uma área mínima de 10m<sup>2</sup>, submetendo este sistema a uma sequência de impactos normalizados em diferentes posições e avaliando o nível sonoro numa câmara receptora que se encontra sob esta laje. A redução sonora a sons de percussão é, depois, quantificada como a diferença entre os níveis sonoros registados com a laje de referência com e sem o revestimento, em cada banda de 1/3 de oitava ou de oitava. A grande envergadura exigida para este sistema leva a que apenas um número muito limitado

de laboratórios de ensaio sejam capazes de dar resposta a solicitações nesta área. Quando apenas se pretende a realização célere de ensaios de pré-caracterização ou de comparação directa entre soluções, poderá não se justificar a utilização de um sistema desse género. Em alternativa, é possível recorrer-se a sistemas de menor dimensão, não normalizados, como o desenvolvido por Masgalos [5]. Nesse sistema, é utilizada uma câmara reverberante de dimensões reduzidas, que permite a execução de alguns ensaios a sons de percussão sobre pequenas amostras, para efeitos de comparação directa de desempenhos. Embora seja um ensaio simplificado, de acordo com esse trabalho, os resultados finais do índice de redução sonora a sons de percussão, determinado de acordo com a norma ISO 717-2 [3], apresentam-se suficientemente próximos dos resultados obtidos em câmaras de maiores dimensões para permitirem a sua utilização como referência no desenvolvimento de soluções construtivas e de materiais. Tendo em conta o objectivo do presente trabalho, tomou-se a opção de recorrer ao sistema desenvolvido por Masgalos [5] para a realização dos testes preliminares que aqui se apresentam. O presente artigo organiza-se da seguinte forma: em primeiro lugar descrevem-se as soluções construtivas testadas, indicando as composições de argamassa utilizadas e as dimensões dos provetes construídos; segue-se, depois, uma breve explicação do método de ensaio seguido; apresentam-se, então, os resultados obtidos para as diferentes soluções, procurando interpretá-los e verificar a utilidade prática destas soluções construtivas.

## 2 Soluções construtivas testadas

O trabalho efectuado tinha como objectivo comparar o desempenho, ao nível do índice de redução sonora, de diferentes tipos de argamassas leves, ensaiadas em idênticas condições. Para o efeito, seleccionaram-se quatro tipos de argamassas, produzidas com recurso a diferentes tipos de agregados leves: argila expandida com grânulos de dimensão 2/4 (ALF); argila expandida com grânulos de dimensão 3/8 (ALG); grânulos de cortiça expandida 3/10 (AC) e granulado de poliestireno expandido (APE). Os resultados dos ensaios realizados sobre as argamassas leves foram comparados com os obtidos sobre um microbetão de peso corrente (BET).

As argamassas testadas apresentavam uma relação água/cimento (W/C) igual a 0,5 e um traço em volume de 1:6. No que diz respeito aos agregados utilizados, todas as argamassas leves continham unicamente o agregado indicado na designação, à excepção da argamassa APE que, para além dos grânulos de poliestireno, possuía também areia. A Tabela 1 apresenta a composição adoptada na produção das argamassas. Uma descrição detalhada sobre o procedimento seguido na definição das composições das argamassas e a sua caracterização pode ser consultada em Carvalho [6].

Tabela 1 – Composições das argamassas ensaiadas

Constituintes	Composições para 1m <sup>3</sup>				
	ALF	ALG	AC	APE	BET
Cimento CEMII/B-L 32,5 N (kg/m <sup>3</sup> )	317,8	337,6	341,9	337,8	320,0
Água (l/m <sup>3</sup> )	158,9	168,8	171,0	168,9	160,0
Cortiça de granulado 3/5 (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	25,8	-	-
Cortiça de granulado 5/10 (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	79,6	-	-
Grânulos de poliestireno expandido (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	12,1	-
Argila expandida da classe 3/8 (kg/m <sup>3</sup> )	-	293,0	-	-	-
Argila expandida da classe 2/4 (kg/m <sup>3</sup> )	450	130,2	-	-	-
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	415,0	626,0
Brita (4/8) (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	1192,0

Tendo seleccionado as argamassas a ensaiar, produziram-se os provetes para o ensaio de percussão (ver Figura 1). Os provetes tinham a forma de lajetas, com dimensão em planta 50x50 cm<sup>2</sup>, e uma espessura uniforme de 4cm.

Para além da comparação entre o desempenho proporcionado pelos diferentes tipos de argamassa, pretendia-se avaliar a sensibilidade do método de ensaio à dimensão da amostra ensaiada. Com esse objectivo, para além dos provetes de dimensão 50x50 cm<sup>2</sup> referidos, produziram-se lajetas de argamassa ALF com diferentes dimensões em planta (70x70 e 90x90 cm<sup>2</sup>). A influência da espessura da camada foi igualmente uma das variáveis em análise, tendo sido testadas argamassas dos tipos ALF, ALG e AC com espessuras de 4cm e 6cm.

Para cada geometria e material constituinte, produziram-se e ensaiaram-se dois provetes.



Figura 1 – Provetes de ensaio.

### 3 Definição do sistema e do procedimento de ensaio

O sistema de ensaio localiza-se no laboratório de acústica do Laboratório de Construções do DEC da FCTUC. Trata-se de uma câmara acústica de dimensões reduzidas, com dimensões interiores de 1.4x1.3x1.5 m<sup>3</sup>, e com paredes em betão armado com 0.1m de espessura. A laje usada como referência é também em betão armado, com 1.5x1.6 m<sup>2</sup> e 0.06m de espessura. A câmara dispõe de uma porta lateral de acesso, com 50x50 cm<sup>2</sup>, situada no centro de uma parede lateral, sendo esta fechada com uma solução em sanduíche constituída por duas placas de gesso com fibras de celulose, entre as quais se interpõe uma membrana asfáltica (Ref. M.A.D.4) com 4 mm de espessura entre elas. Esta tampa foi fixada recorrendo a quatro varões roscados. Para assegurar a separação entre a base da câmara e o pavimento da sala onde foi inserida, usou-se uma tela de aglomerado de borracha. Os topos das paredes, onde a laje superior assenta, são revestidos com aglomerado de cortiça com 5 mm de espessura, procurando-se evitar a existência de ligações rígidas entre ambas as partes, situação indesejável para ensaios a sons de percussão. Este sistema encontra-se ilustrado na Figura 2, podendo uma descrição mais detalhada sobre este sistema e sobre a sua caracterização ser encontrada em Masgalos [5].



Figura 2 –Aspecto da câmara de ensaio.

Em laboratório, e de acordo com a norma ISO 140-8 [2], o acréscimo de isolamento proporcionado por cada solução construtiva,  $\Delta L_w$ , é determinado com base numa laje de suporte/estrutural de referência com 14 cm de espessura, em betão armado, através da equação (1).

$$\Delta L_w = L_{n,r,w,0} - L_{n,r,w} \quad (1)$$

Nesta equação,  $L_{n,r,w,0}$  é o nível sonoro, normalizado, de percussão do pavimento de referência sem revestimento, e  $L_{n,r,w}$  é o nível sonoro, normalizado, de percussão do pavimento de referência com revestimento.

No âmbito do presente trabalho, e dados os objectivos estabelecidos, não se procedeu ao cálculo deste índice, mas apenas da redução sonora  $\Delta L$ . Para tal, recorreu-se ao cálculo descrito na equação (2).

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad (2)$$

Nesta equação,  $L_{n,0}$  é o nível sonoro, normalizado, de percussão do pavimento da câmara sem revestimento e  $L_n$  é o nível sonoro, normalizado de percussão do pavimento da câmara com revestimento.

Para obtenção das curvas de nível sonoro nas diferente situações, o ensaio foi realizado escolhendo uma posição para a fonte de ruídos de impacto normalizados (do tipo B&K 3204) e uma posição para o microfone (do tipo GRAS Sound and Vibration 40AF, com pré-amplificador 26AK). A curva de nível sonoro final correspondeu sempre à média de 5 medições de 6 s, realizadas em sequência e desligando e voltando a ligar a fonte entre cada duas medições.

## 4 Resultados experimentais

### 4.1 Análise da importância da dimensão e da posição da amostra

Uma primeira fase do estudo experimental realizado consistiu na verificação da dependência dos resultados obtidos em relação às condições de ensaio, nomeadamente no que respeita à dimensão da amostra utilizada e à sua posição relativa sobre a laje usada como referência.

Para verificar a influência da dimensão da amostra usada, foram construídos três provetes com a argamassa designada por ALF, com dimensões (em cm) de 50x50, 70x70 e 90x90. O nível sonoro foi

avaliado no interior da câmara para cada uma destas três amostras, tendo-se registado os valores representados na Figura 3. A observação destes resultados permite concluir que as três curvas apresentam comportamentos semelhantes ao longo do domínio de frequências analisado, registando-se, no entanto, alguma discrepância entre os valores obtidos para as duas dimensões extremas (50x50 e 90x90). De facto, era esperado que a dimensão da amostra influenciasse o comportamento dinâmico do sistema, uma vez que a massa envolvida em cada situação era distinta. Desta forma, torna-se importante referir que os resultados apresentados apenas podem ser considerados válidos na medida em que representam uma comparação directa entre várias soluções construtivas com a mesma dimensão, não devendo ser extrapolados para resultados de caracterização final destas soluções. Com esta noção, tomou-se a opção de considerar, na análise que se segue, apenas amostras com 50x50, e com dimensão igual para todos os casos a analisar.

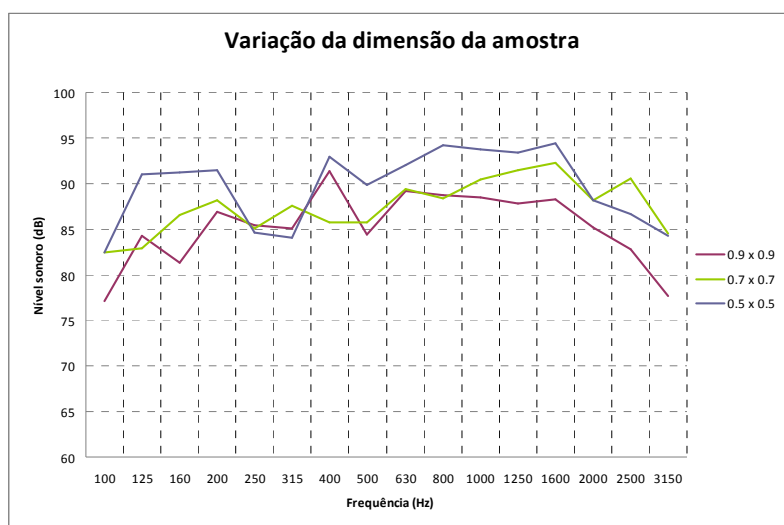


Figura 3 – Níveis sonoros avaliados com amostras de ALF com diferentes dimensões

Um segundo aspecto a estudar antes de proceder à análise das várias soluções era o da dependência dos resultados obtidos da posição do conjunto amostra/fonte sobre a laje de referência. Para avaliar essa dependência recorreu-se à realização de ensaios para quatro posições distintas (identificadas na Figura 4) deste conjunto, avaliando para cada uma o nível sonoro no interior da câmara quando os ruídos de impacto eram gerados sobre uma amostra de 50cm x 50cm da argamassa ALF.

Os resultados obtidos para cada uma dessas posições encontram-se representados na Figura 5. A análise destas curvas permite concluir que, embora exista uma dependência do comportamento dinâmico do sistema com relação à posição da carga de impacto, em particular nas frequências mais baixas, essa dependência não introduz variações significativas nos resultados, mesmo quando se consideram posições extremas de ensaio. Desta forma, pode dizer-se que se ocorrer uma pequena alteração de posição da amostra de ensaio para ensaio, esta alteração não introduzirá variações sensíveis nos resultados obtidos. Esta conclusão é consistente com os resultados obtidos por Masgalos [5].

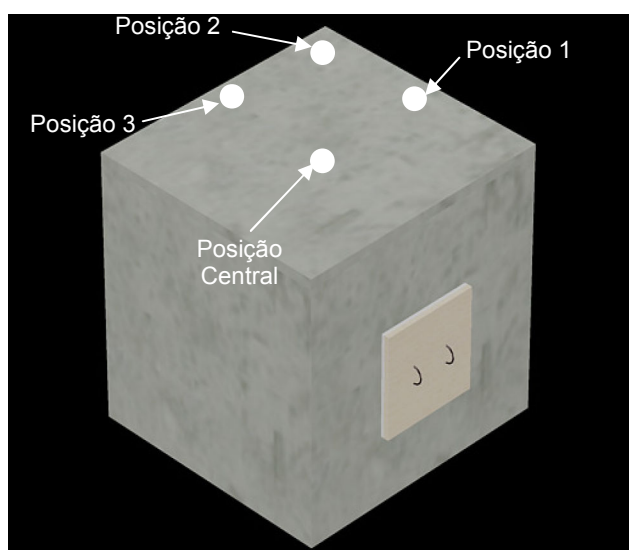


Figura 4 – Representação esquemática das posições usadas para a fonte de ruídos de impacto e para a amostra.

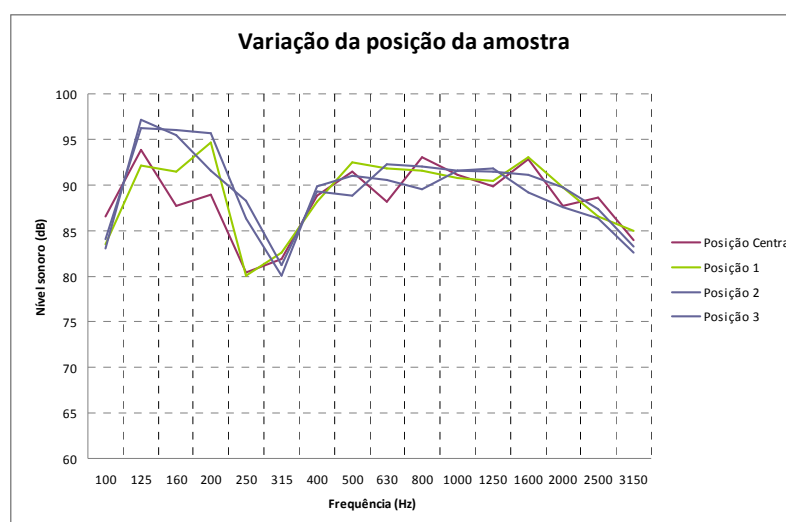


Figura 5 – Níveis sonoros avaliados para diferentes posições de fonte.

Tendo em atenção as conclusões retiradas destes ensaios preliminares, foram definidas as seguintes condições de ensaio para efectuar a comparação entre soluções construtivas:

- utilização de amostras de 50x50 cm<sup>2</sup>;
- colocação da amostra aproximadamente centrada com a laje de referência.

#### 4.2 Análise comparativa de soluções construtivas

Um dos objectivos do presente trabalho é a análise da melhoria de desempenho a sons de percussão proporcionada pela presença de uma camada de enchimento em betão leve com diferentes espessuras, incorporando diferentes materiais. Nos pontos que se seguem apresentam-se os principais resultados obtidos nesta fase do trabalho.



#### 4.2.1 Influência do material constituinte da lajeta

De acordo com a secção 2 deste trabalho, foi testado o comportamento de cinco materiais distintos (ALG, ALF, APE, AC e BET), utilizáveis em camadas de enchimento, quando sujeitos a ruídos de impacto. Para permitir a comparação do seu desempenho relativo, foram testadas amostras com 50cm x 50cm com 4cm de espessura, sendo o ensaio realizado nas condições fixadas anteriormente. Na Figura 6 apresentam-se as curvas da redução sonora obtidas para estes 5 materiais.

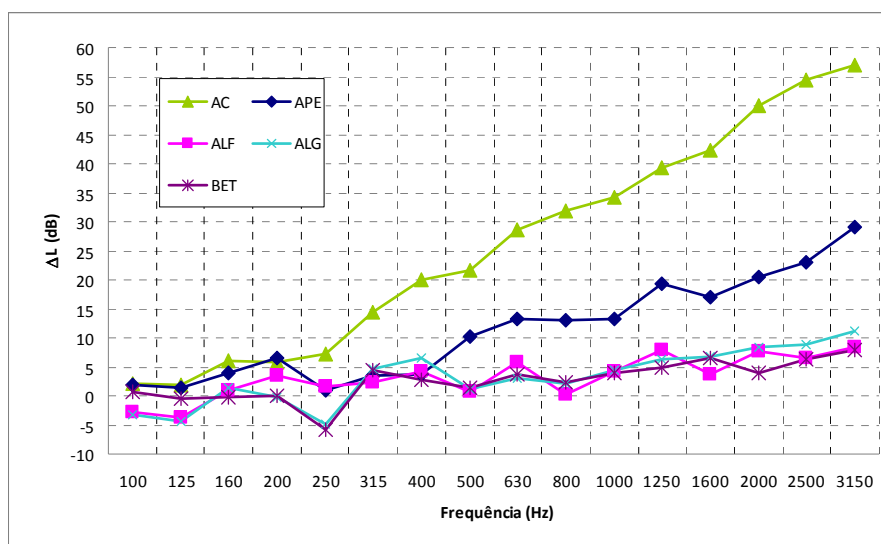


Figura 6 – Redução sonora a sons de percussão proporcionada por amostras de diferentes materiais, com 4cm de espessura.

Observando os resultados apresentados, torna-se possível constatar a existência de comportamentos bastantes distintos para as diferentes amostras ensaiadas. Analisando a amostra de argamassa com agregados calcários (BET), verifica-se que a contribuição desta para a redução dos sons de percussão é bastante diminuta, situação que era esperada dada a elevada rigidez dessa solução, não tendo por isso capacidade para dissipar a energia vibratória introduzida pela máquina de impacto. Apesar disso, mesmo para essa solução, regista-se uma ligeira melhoria do desempenho nas frequências mais elevadas. No que respeita às argamassas com argila expandida (ALF e ALG), a sua contribuição para a melhoria do isolamento a sons de percussão é também reduzida. Tal como no caso anterior, crê-se que a explicação para este fraco desempenho se prende com a fraca resiliência e elevada rigidez dos grânulos que integram a argamassa, não assegurando a dissipação de energia. Verifica-se, no entanto, que a argamassa de granulometria mais fina, apesar de mais densa, parece apresentar um melhor comportamento nas baixas frequências.

As argamassas que integram grânulos de cortiça ou de poliestireno expandido (AC e APE), apresentam um desempenho claramente superior, em particular nas frequências altas (acima dos 315 Hz). Esta melhoria é ainda mais visível no caso da argamassa AC, onde se registam melhoria de quase 60 dB nos 3150Hz. A elevada elasticidade e resiliência dos grânulos de poliestireno e de cortiça é, seguramente, a explicação para a grande dissipação de energia que ocorre nestas amostras. No entanto, é importante referir que os valores aqui apresentados não contemplam qualquer revestimento aplicado sobre as amostras, pelo que serão influenciados pela elasticidade dos grânulos que existam à superfície. Ainda assim, aquando da instalação dos provetes teve-se o cuidado de garantir que a face



onde eram gerados os impactos não apresentava uma elevada concentração destes grânulos, para minimizar a sua influência no resultado final.

#### 4.2.2 Influência da espessura da camada de enchimento

A espessura dos elementos de construção representa, regra geral, uma variável importante e que influencia de forma significativa o desempenho acústico desses elementos. No caso dos ruídos de percussão, sabe-se, por exemplo, que o índice normalizado de percussão de uma laje de betão varia de forma inversa com a sua espessura, significando que o desempenho dessa laje melhora com o aumento da sua espessura e, por isso, da sua massa. Pretendeu-se, por isso, perceber se também no caso de camadas de enchimento esta variável teria significado. Para tal, foram comparados os desempenhos de amostras realizadas com as argamassas ALF, ALG e AC, para espessuras de 4cm e de 6cm. Os resultados obtidos para o parâmetro  $\Delta L$  apresentam-se na Figura 7. A observação desta figura permite verificar que, para os exemplos apresentados, não parece existir uma variação significativa do desempenho das argamassas ALF e ALG com a variação da espessura, enquanto que para a argamassa AC é visível algum acréscimo de  $\Delta L$  nas frequências mais elevadas. De facto, as argamassas ALF e ALG apresentam na sua composição grânulos bastante rígidos, proporcionando um menor amortecimento das vibrações geradas na superfície da amostra. Por outro lado, a sua massa é bastante reduzida, não sendo significativa quando comparada com a massa da laje usada como referência e, por isso, não sendo o resultado muito influenciado pela sua espessura.

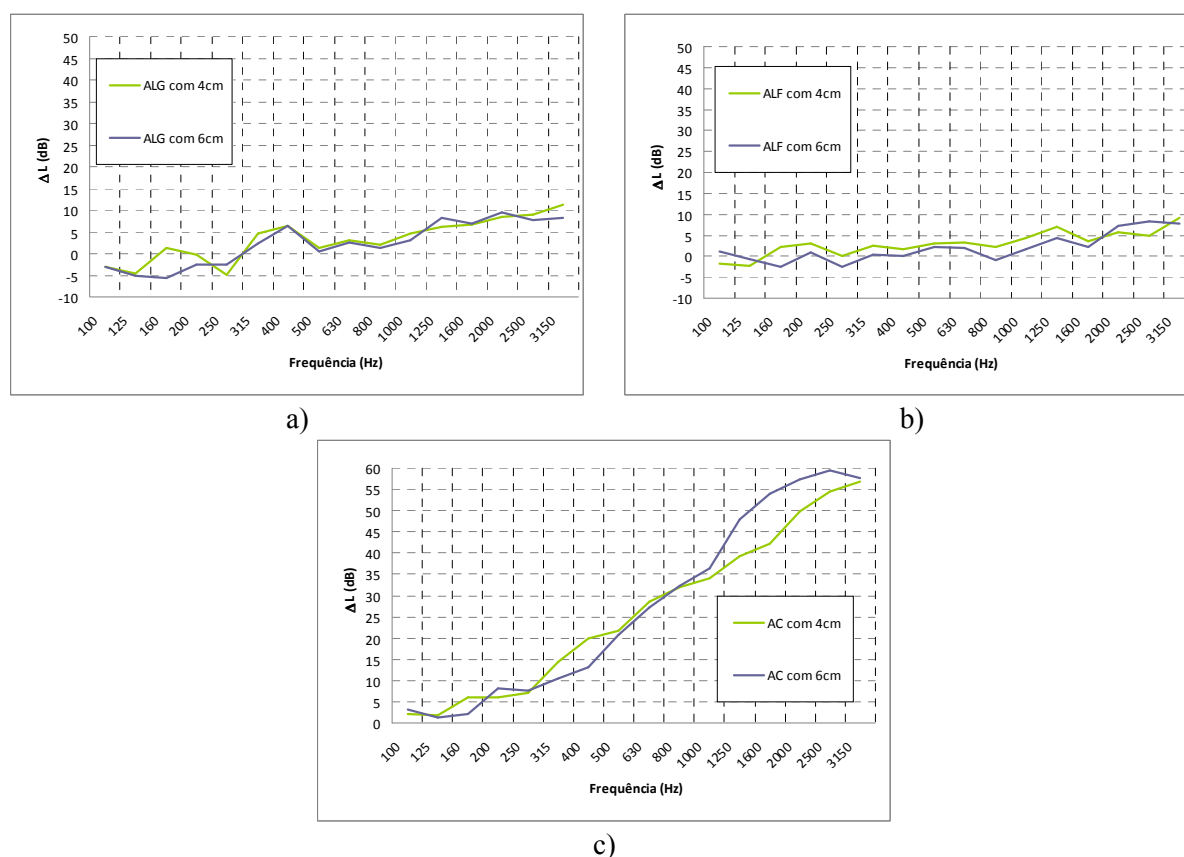


Figura 7 – Redução sonora a sons de percussão proporcionada por amostras de diferentes espessuras e para os materiais ALG (a), ALF (b) e AC (c).

Já no caso da amostra com AC, a elevada resiliência dos grânulos e a sua capacidade para dissipação de energia, em particular nas frequências mais elevadas, é amplificada com o aumento da espessura, representando esta um acréscimo na capacidade de dissipação de energia da amostra.

## 5 Conclusões

No presente artigo avaliou-se a melhoria proporcionada por diferentes soluções argamassas de enchimento leves no isolamento a sons de percussão. Analisaram-se argamassas leves com poliestireno expandido, com argila expandida e com granulado de cortiça. Para proceder a esta análise, realizou-se um conjunto de ensaios em laboratório com recurso a uma câmara acústica de dimensões reduzidas.

Os resultados obtidos indicam que existe uma variação significativa da redução sonora a sons de percussão entre as várias soluções estudadas, revelando que o material usado como agregado leve na realização das argamassas de enchimento pode influenciar de forma relevante o isolamento a sons de percussão de uma determinada solução construtiva. Da análise efectuada neste trabalho, concluiu-se que as argamassas que incorporam grânulos de cortiça ou de poliestireno expandido apresentam, potencialmente, maiores benefícios no que respeita à melhoria do isolamento a sons de percussão. Este facto fica a dever-se à elevada elasticidade e resiliência destes grânulos que permitem uma dissipação eficaz da energia introduzida no sistema pelos impactos normalizados. Por outro lado, verificou-se que as soluções que fazem uso de grânulos de argila expandida apresentam uma menor eficácia, quando comparadas com as outras soluções testadas, em virtude da elevada rigidez desses grânulos.

## Referências

- [1] Ferreira, A.; Brito, J.; Branco, F. Desempenho Relativo das Argamassas de Argila Expandida na Execução de Camadas de Forma. *2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, Lisboa, 22 e 23 de Novembro de 2007 (em CD-Rom).
- [2] NP EN ISO 140-8: 2008 – Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção - Parte 8: Medição em laboratório da redução de transmissão sonora de revestimento de piso em pavimento normalizado.
- [3] EN ISO 717-2: 1996 – Acoustics. Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements – Part 2: Impact Sound Insulation.
- [4] ISO 140-1:1997 – Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission.
- [5] Masgalos, R. Análise de um Sistema de Dimensões Reduzidas para Ensaio de Isolamento a Sons de Percussão. *Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FCTUC, Coimbra, 2008.*
- [6] Carvalho, A.C. Avaliação do processo de secagem em argamassas leves. *Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FCTUC, Coimbra, 2008.*