

## DESEMPENHO ACÚSTICO DE UM MATERIAL DESENVOLVIDO A PARTIR DO RECICLADO DE BORRACHA E AEROGEL PARA UTILIZAÇÃO EM PISOS FLUTUANTES

**PACS:** 43.55 -n, 43.50.Pn, 43.55.Vj, 43.40.Kd

Pereira A.; Mateus D.; Lopes P.

ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal, Tel. +351-239797189, apereira@dec.uc.pt; diogo@dec.uc.pt.

**Palabras Clave:** Reciclado de borracha, aerogel, pisos flutuantes, ruído de percussão

### ABSTRACT

Tire rubber granules, resulting from recycling, have been used to develop materials and construction solutions used in the construction sector, in order to reduce the environmental impact of this waste and at the same time promote the improvement of thermal and/or acoustic performance. The aerogel is another promising material in building applications due to its high porosity, low density and very low thermal conductivity. Based on the materials mentioned a composite was developed through the introduction of a polymer binder.

Regarding attenuation of impact noise, it is known that constructive solutions which incorporate resilient materials, with flexible characteristics, as is the case of recycled rubber, have a good acoustic performance. Thus, this work aims to evaluate the possibility of using this new material for application in floating floors. For this purpose, in a first stage the evaluation of the apparent dynamic stiffness is performed, based on the ISO 9052-1 standard method and comparison with existing solutions is provided. Then, impact sound reduction provided by systems that incorporate this new material is determined by using the procedure described in the standard ISO 16251-1 and also the prediction method defined in the standard ISO 12354-2.

### RESUMO

O granulado de borracha de pneus, resultante de reciclagem, tem vindo a ser utilizado para desenvolver materiais e soluções construtivas utilizados no sector da construção, de forma a possibilitar a redução do impacto ambiental deste resíduo e em simultâneo promover a melhoria do desempenho térmico e/ou acústico. O aerogel é outro material com aplicações promissoras em aplicações nos edifícios, devido à sua porosidade elevada, densidade baixa e muito reduzida condutibilidade térmica. Com base nos materiais referidos foi desenvolvido um compósito através da introdução de um ligante polimérico.

Ao nível da atenuação do ruído de percussão, é sabido que soluções construtivas que integram materiais resilientes, com características flexíveis, como é o caso dos reciclados de borracha possuem um bom desempenho. Deste modo, neste trabalho pretende-se avaliar a possibilidade de utilização deste novo material para utilização em pisos flutuantes. Para o efeito é efetuada a avaliação da rigidez dinâmica aparente, baseada no método da norma ISO 9052-1 e comparação com soluções existentes. É ainda determinada a redução sonora conferida por sistemas que incorporam o material com base na norma ISO 16251-1 e no método de previsão proposto na ISO 12354-2.

## 1. INTRODUÇÃO

As diretivas europeias 2008/98/EC e 1999/31/EC priorizam a reutilização e reciclagem da borracha e proíbem a sua deposição em aterros, pelo que nos últimos anos têm sido encetados esforços no sentido de se encontrarem novas utilizações para os componentes dos pneus em fim de ciclo de vida, designadamente a borracha.

O granulado de borracha de pneu, resultante de reciclagem, tem vindo a ser utilizado para desenvolver materiais e soluções construtivas com desempenho acústico comprovado, designadamente para garantir isolamento acústico e absorção sonora ([1]; [2], [3]; [4]) possibilitando a sua utilização em problemas de controlo de ruído em edifícios ou ambiental (sistemas antivibratórios, barreiras acústicas ou pavimentos).

Vários trabalhos têm também vindo a demonstrar a eficácia do granulado de borracha reciclada quando incorporado em mantas para utilização em pisos flutuantes, de modo a reduzir os sons de percussão, nos edifícios, devido às suas propriedades intrínsecas, como o fato de permitir velocidades de propagação baixas e a capacidade para absorver/atenuar energia sonora. Relativamente aos materiais desenvolvidos para este tipo de aplicações os parâmetros que influenciam as propriedades do material compósito final, são a dimensão do granulado de borracha, o ligante, sua concentração, grau de compactação das amostras e espessura final [5]. Para promover isolamento a ruídos de impacto é fundamental entender como a densidade, rigidez dinâmica e a compressibilidade da manta afetam o desempenho acústico. Neste contexto, destaca-se aqui o trabalho de Asdrubali e D'Alessandro [6] que efetuaram uma extensa campanha laboratorial focando no desempenho aos ruídos de impacto de amostras feitas com granulado de borracha consolidado com diferentes ligantes. Adicionalmente a borracha permite a manutenção das suas propriedades acústicas por um período de tempo significativo, o que a torna mais vantajosa face a outros materiais que vão perdendo as suas propriedades resilientes ao longo do tempo [7].

Aerogel é um material descoberto na década de 1930 e bem conhecido pela sua estrutura nanoporosa tridimensional. Devido à característica alta porosidade e baixa densidade, os aerogéis são uma das famílias mais promissoras de materiais para aplicações de edifícios [8-9], em particular quando também se pretende obter um melhor desempenho térmico. Baseado nestes dois materiais foi desenvolvido um novo material com borracha hidrofóbica e sílica aerogel reforçada com vários tipos de fibras (fibras têxteis de pneus reciclados, fibras de poliéster, feltro de sílica, lã de vidro). Dentro deste contexto, pretende-se neste artigo analisar as possibilidades de utilização do novo material para melhorar o desempenho acústico de soluções construtivas no que concerne à redução do ruído de impacto. Com este intuito é efetuada uma caracterização do desempenho de materiais existentes no mercado de uso corrente em pisos flutuantes, bem como do novo material.

## 2. RIGIDEZ DINÂMICA

Nesta secção são apresentados os resultados da avaliação da rigidez dinâmica aparente de materiais resilientes, tendo por base a norma ISO 9052-1 [10]. De acordo com esta norma a rigidez dinâmica aparente,  $s'_t$ , por unidade de área de amostra ( $\text{MN}/\text{m}^3$ ), é obtida através do método da ressonância. De acordo com este método, a frequência fundamental, na vertical, de um sistema mola-massa, é primeiramente obtida, em que a mola corresponde ao material resiliente e a massa a uma placa metálica apoiada sobre o material. A frequência de ressonância deste sistema

relaciona-se com a rigidez dinâmica aparente através da seguinte expressão:  $f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}}$  em que

$s'_t$  corresponde à rigidez dinâmica aparente ( $\text{MN}/\text{m}^3$ ) e  $m'_t$  à massa total por unidade de área utilizada durante o teste ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). A rigidez dinâmica aparente é obtida a partir da expressão anterior fazendo  $s'_t = 4\pi^2 m'_t f_r^2$ .

Nas Tabelas 1 e 2 são as apresentadas imagens das amostras dos materiais comerciais testados (polietileno, aglomerado de borracha reciclada, aglomerado de borracha e cortiça, aglomerado de poliuretano), bem como os resultados da rigidez dinâmica (vd. Tabela2). Estes materiais foram utilizados como referência para a análise do desempenho do material desenvolvido.

Tabela 1 – Imagens de diversas amostras de materiais comerciais testadas.


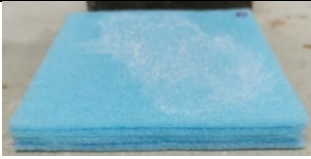






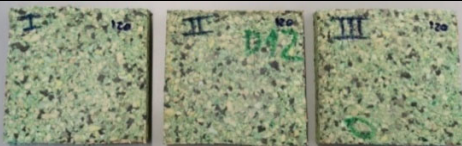

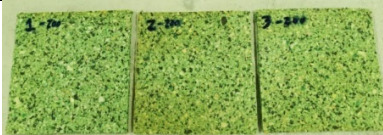

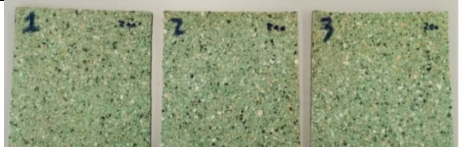
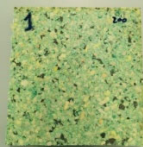
<b>Polietileno</b>	
<b>e=5mm</b>	<b>e=20mm</b>
	
<b>Aglomerado de borracha reciclada de vários fabricantes</b>	
<b>e=5mm</b>	<b>e=5mm</b>
	
<b>Aglomerado de borracha e cortiça</b>	
<b>e=5mm</b>	<b>e=20mm</b>
	
<b>Aglomerado de poliuretano d=120 kg/m3</b>	
<b>e=5mm</b>	<b>e=10mm</b>
	
<b>e=30mm</b>	
	
<b>Aglomerado de poliuretano d=200 kg/m3</b>	
<b>e=5mm</b>	<b>e=10mm</b>
	
<b>e=30mm</b>	
	
<b>Aglomerado de poliuretano d=150 kg/m3</b>	
<b>e=10mm</b>	<b>e=30mm</b>
	




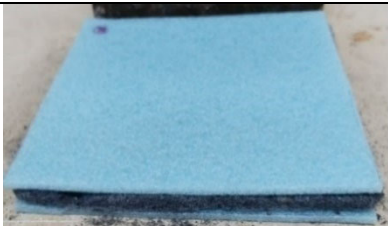


Tabela 2 – Densidade e rigidez dinâmico das amostras de materiais testadas.

Material	Amostras	Espessura [mm]	Densidade média [kg/m <sup>3</sup> ]	fr [Hz]	s't [MN/m <sup>3</sup> ]
Poliétileno de célula fechada	1	5	40,1	69	52
	2	5			
	3	5			
2x Poliétileno de célula fechada	1	10	39,6	51	27
4x Poliétileno de célula fechada	1	20	40,1	36	14
Aglomerado de borracha	1	5	698,7	89	85
	2	5			
	3	5			
Aglomerado de borracha (Amorim)	1	5	704,5	55	33
	2	5			
	3	5			
2x Aglomerado de borracha (Amorim)	1	10	624,6	81	71
Aglomerado de borracha e cortiça	1	5	622,9	134	192
	2	5			
	3	5			
2X Aglomerado de borracha e cortiça	1	10	624,6	117,5	148
4x Aglomerado de borracha e cortiça	1	20	621,7	81	71
Aglomerado de poliuretano D120	1	5	90,8	49	25
	2	5			
	3	5			
Aglomerado de poliuretano D120	1	10	103,1	35	13
	2	10			
	3	10			
Aglomerado de poliuretano D120	1	30	98,5	19	4
	2	30			
	3	30			
Aglomerado de poliuretano D150	1	10	128,7	47	24
	2	10			
	3	10			
Aglomerado de poliuretano D150	1	30	157,0	30	10
Aglomerado de poliuretano D200	1	5	191,7	83	73
	2	5			
	3	5			
Aglomerado de poliuretano D200	1	10	194,3	70	53
	2	10			
	3	10			
Aglomerado de poliuretano D200	1	30	194,3	43	20

A Tabela 3 apresenta imagens das amostras que incorporam o novo material, que também foram testadas. Relativamente a este material, numa primeira fase, foi testada a rigidez dinâmica fornecida

por duas amostras com diferentes espessuras, 10 e 15 mm respetivamente. Em seguida, foram testadas amostras de outros materiais (espuma de polietileno e aglomerado de borracha/cortiça) integrando o novo material, formando um sanduiche, a fim de perceber se este material permitiria melhorar o desempenho acústico dos materiais existentes. Esta tabela contém ainda a imagem das amostras utilizadas para referência que são amostras de espessura semelhante, mas homogêneas e feitas do material exterior da amostra sanduiche.

Tabela 3 – Imagens das amostras testadas incorporando o novo material.

Novo Material	
e=10 mm	e=15 mm
	
<b>Polietileno (e=20 mm)</b>	<b>Sandwich de polietileno com novo material (e=20 mm)</b>
	
<b>Aglomerado de borracha e cortiça (e=20mm)</b>	<b>Sandwich de aglomerado de borracha e cortiça com novo material (e= 20mm)</b>
	

Os resultados finais destes ensaios são apresentados na Tabela 4. Note-se que na preparação da amostra não se aplicou a camada de gesso (a norma recomenda a realização de uma camada de gesso). Este procedimento torna a preparação do ensaio mais morosa, e em ensaios anteriores efetuados com ou sem gesso verificou-se que são obtidos pequenos desvios [11], pelo que os ensaios foram realizados sem aplicar a camada de gesso.

Tabela 4 – Densidade e rigidez dinâmica das amostras incorporando o novo material.

Material	Amostras	Espessura [mm]	Densidade média [kg/m <sup>3</sup> ]	fr [Hz]	s't [MN/m <sup>3</sup> ]
Novo material	1	15	100,8	30	10
	2	15			
	3	15			
Novo material	1	10	118,8	33	12
Sanduiche de polietileno incorporando o novo material	1	20	89,7	28	8
Sanduiche de aglomerado de borracha e cortiça incorporando o novo material	1	20	371,7	29	9

Relativamente ao novo material composto, foram testadas três amostras com 15 mm de espessura e obteve-se um resultado de 10 MN/m<sup>3</sup>. Uma amostra com 10mm também foi testada com um

resultado de rigidez dinâmica de  $12 \text{ MN/m}^3$ . É importante referir que não foi possível produzir uma amostra com uma espessura de 5 mm que permitisse comparar com espessuras padrão normalmente utilizadas.

Comparando as amostras testadas com uma espessura de 10 mm (ver Tabelas 2 e 4), é possível verificar que o novo material proporciona a menor rigidez dinâmica de todos os materiais comerciais testados (espuma de polietileno, aglomerado de borracha, borracha/cortiça, espuma de poliuretano), sendo a amostra de espuma de poliuretano a que proporciona um desempenho mais próximo. Este resultado indica que o material pode ser interessante para a atenuação das vibrações, uma vez que será capaz de atenuar sons de impacto de baixa frequência em relação à maioria das amostras comerciais.

Tendo em conta este desempenho acústico, foram também testadas amostras de sanduíches de outros materiais (espuma de polietileno e borracha/cortiça) que integram o novo material, a fim de perceber se o este material permitiria melhorar o desempenho acústico dos materiais existentes. É igualmente importante referir que o material tem uma fraca consistência e que se for utilizado com outros materiais será protegido e não se desintegrará. Os resultados obtidos foram comparados com os fornecidos pelo material da parte exterior do sanduiche com espessura semelhante (20 mm). No que diz respeito à espuma de polietileno, ao inserir o material os resultados diminuíram de 14 para  $8 \text{ MN/m}^3$ , o que demonstra alguma melhoria, mas não com expressão significativa no desempenho acústico de uma solução no que concerne à atenuação dos ruídos de percussão. Quanto à sanduiche de aglomerado de borracha/cortiça, observou-se uma melhoria de  $71 \text{ MN/m}^3$  para  $9 \text{ MN/m}^3$ , o que é considerado uma melhoria significativa no desempenho. Estes valores indicam que se este novo material for utilizado juntamente com outros materiais com menor desempenho, permitirá aumentar o comportamento acústico correspondente.

### 3. REDUÇÃO SONORA A SONS DE PERCUSSÃO

Para avaliar o desempenho do novo material compósito na redução da transmissão sonora a sons de percussão, foi utilizado um procedimento experimental para avaliar a redução sonora proporcionada por soluções de pavimentos flutuantes com materiais comerciais e também com o novo material. O procedimento descrito na norma ISO 16251-1 [12] foi utilizado, permitindo testar amostras de pequena dimensão. A instalação é composta por uma laje de betão com dimensões  $1.2(\text{m}) \times 0.8(\text{m}) \times 0.2(\text{m})$ , simplesmente apoiada em quatro suportes elásticos, como mostra a Figura 1. A lajeta utilizada tem dimensões  $0,5 (\text{m}) \times 0,5 (\text{m}) \times 0,05(\text{m})$ . O procedimento de medição consiste na aquisição de níveis de vibração na superfície superior da laje, em bandas de frequência de 1/3 oitavas, entre 100Hz e 3150 Hz. A fonte utilizada é uma máquina de percussão normalizada colocada em pelo menos duas posições distintas (com uma distância mínima de 30 cm uma da outra, e nenhum martelo deve estar mais próximo das bordas da placa do que 10 cm). **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**



a)



b)

Figura 1: Imagem da instalação laboratorial utilizada para determinar a redução sonora resultante do ruído de percussão a) sem revestimento de piso; b) com o revestimento de piso.

Os materiais comerciais testados foram o aglomerado de borracha e cortiça; polietileno e aglomerado de borracha com 5 mm. Os resultados são apresentados na Figura 2. Nesta figura foi também incluída a curva de previsão de acordo definida na ISO 12354-2 [13]. A análise destas curvas permite observar uma tendência semelhante entre o modelo de previsão e resultados experimentais, embora a curva experimental apresente oscilações que estão relacionadas com os modos de vibração da lajeta. É de referir que o procedimento utilizado é válido para pavimentos flutuantes, por isso, torna-se importante verificar se, para os sistemas de lajeta flutuante, também pode ser utilizado para uma avaliação de tendência.

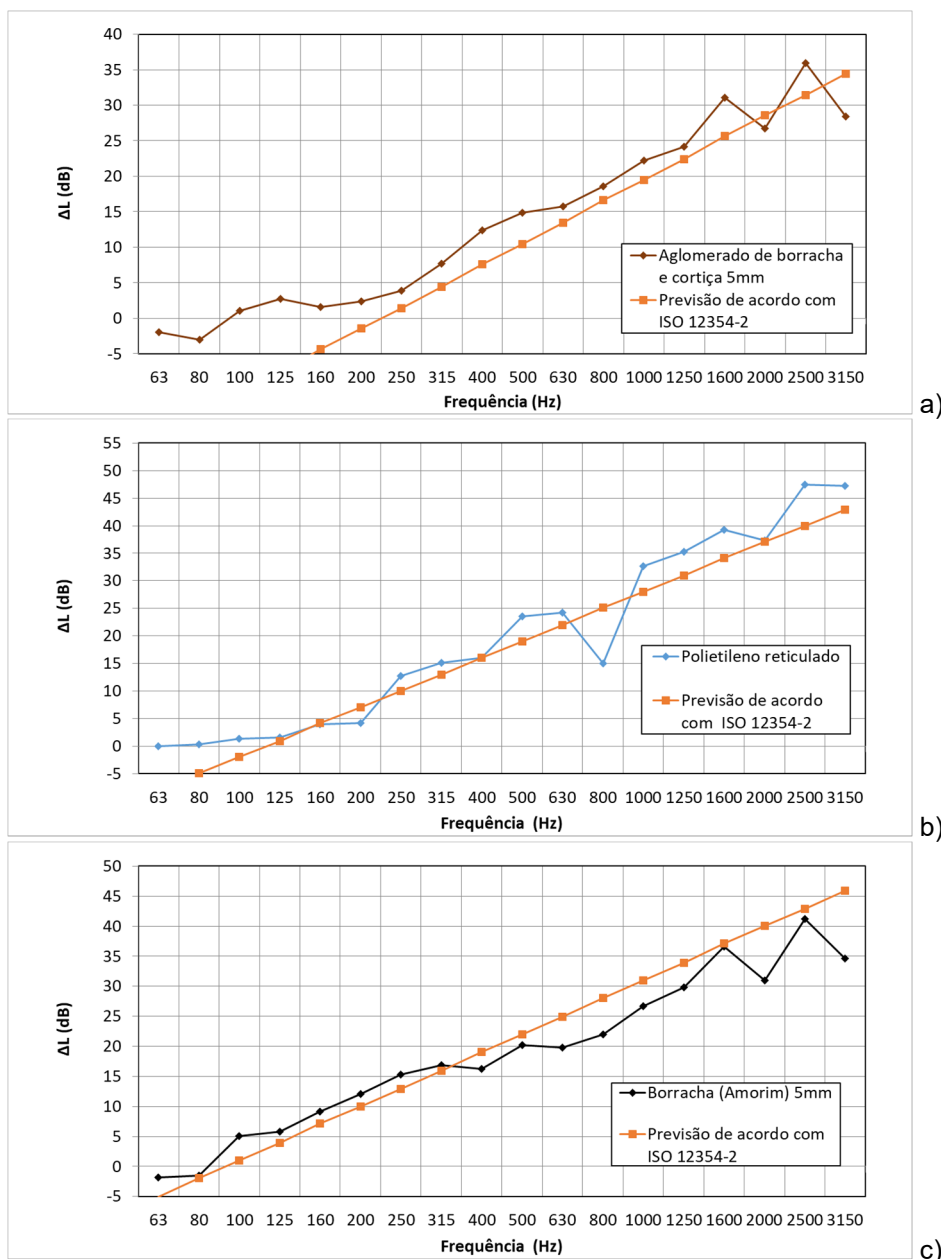


Figura 2 – Redução sonora a ruído de percussão de sistemas de lajeta flutuante com: a) aglomerado de cortiça e borracha com 5 mm; b) espuma de polietileno com 5 mm; c) aglomerado de borracha com 5 mm.

Procedeu-se igualmente à avaliação da frequência de ressonância do sistema de lajeta flutuante obtida tanto por previsão como a partir destes resultados experimentais. No que diz respeito à previsão, o cálculo desta frequência é efetuado utilizando a seguinte expressão

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

em que a rigidez dinâmica utilizada é a obtida a partir dos ensaios anteriores

realizados utilizando o ISO 9052-1. Quanto ao resultado experimental, o valor obtém-se a partir das curvas apresentadas na Figura 1, correspondendo à frequência em que o valor da redução sonora de impacto está próximo de zero. Estes valores são apresentados na Tabela 5. Como se pode observar, os resultados são próximos, o que indica que este procedimento pode ser utilizado para avaliar o desempenho destas soluções. **Erro! A origem da referência não foi encontrada. Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Tabela 5 – Frequência de ressonância dos pisos flutuantes.

Material	fr (experimental result)	fr (previsão)
Aglomerado de borracha e cortiça (5 mm)	[200-240]	224
Espuma de polietileno (5mm)	125	116
Aglomerado de borracha (5mm)	[80-100]	92

O material testado a seguir foi o novo material composto sendo o resultado apresentado na Figura 3. É importante referir que a amostra colocada sob a lajeta flutuante não cobriu toda a superfície da lajeta, o que permite explicar as diferenças observadas nas frequências mais elevadas em relação ao modelo de previsão. Estes resultados possibilitam ainda confirmar que a frequência de ressonância está situada em torno de 50 e 63Hz para a curva experimental e no caso do modelo de previsão de 51 Hz, o que confirma que o material pode fornecer um bom desempenho no que concerne ao isolamento de frequências mais baixas.

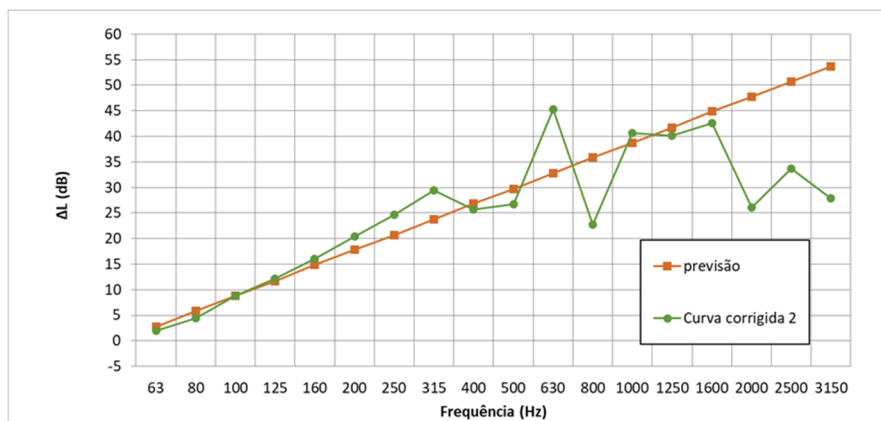


Figura 6 – Redução sonora referente à lajeta flutuante incorporando novo material composto.

No que diz respeito à solução sanduíche devido ao tamanho muito pequeno das amostras, não foram testadas sob a lajeta flutuante, no entanto determinou-se através do modelo de previsão da ISO 12354-2, a redução sonora para as soluções sanduíche com espuma de polietileno e cortiça de borracha incorporando o novo material composto. Mais uma vez, os resultados obtidos foram comparados com os fornecidos pelo material exterior, com espessura semelhante (20mm). A Figura 7 apresenta estes resultados. Observa-se que quando o novo material é posicionado entre a espuma de polietileno, o desempenho acústico apresenta uma pequena melhoria em relação ao material exterior sem o novo material. Quando o novo material é utilizado juntamente com o aglomerado de cortiça de borracha, a melhoria no desempenho é significativa. Estes resultados estão de acordo com a análise realizada anteriormente utilizando os resultados da rigidez dinâmica.



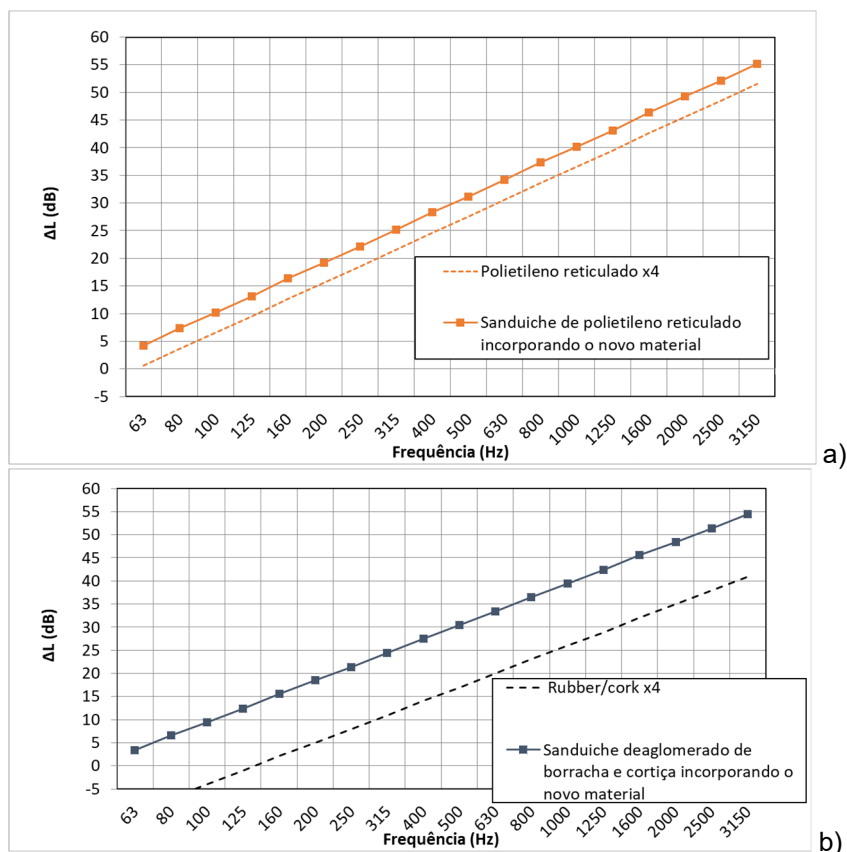


Figura 1 – Redução sonora a sons de percussão referente ao sistema de lajeta flutuante incorporando os materiais sanduiche; a) Polietileno reticulado incorporando o novo material compósito; b) Aglomerado de borracha e cortiça incorporando o novo material compósito.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliadas as possibilidades de utilização do um novo material para melhorar o desempenho acústico de soluções construtivas, no que concerne à redução do ruído de impacto. O material desenvolvido faz uso de borracha hidrofóbica e aerogel de sílica reforçados com vários tipos de fibras. Refira-se que especificamente no que concerne ao reciclado de borracha, este material é eficaz quando incorporado em mantas para utilização em pisos flutuantes, de modo a reduzir os sons de percussão. Relativamente ao aerogel a investigação tem demonstrado uma excelente eficácia no desempenho térmico.

Primeiramente foi efetuada uma caracterização do desempenho de materiais existentes no mercado de uso corrente em pisos flutuantes, bem como do novo material, através da determinação da rigidez dinâmica. Estes resultados permitiram concluir que a rigidez dinâmica do material compósito é menor em relação à maioria dos materiais comerciais, logo poderá ter um potencial para utilização quando é importante garantir um bom desempenho no que concerne ao ruído de percussão. Quando incorporado em outros materiais constituindo o núcleo de um sanduiche, verificou-se que possibilita uma clara melhoria do desempenho final se o outro material apresentar um desempenho acústico significativamente inferior.

Seguidamente procedeu-se à avaliação da redução sonora de sistemas de lajeta flutuante incorporando o novo material, tendo -se verificado que este novo material permite obter uma clara eficácia no desempenho destas soluções, relativamente a soluções existentes. É de referir, no entanto, que o material apresenta uma baixa consistência o que compromete a manutenção da sua eficácia acústica no longo prazo. Este aspeto deverá ser melhorado.

## AGRADECIMENTOS

Parte das soluções construtivas estudadas no âmbito deste trabalho fazem parte do projeto de investigação “Tyre4BuildIns – Recycled tyre rubber resin-bonded for building insulation systems towards energy efficiency” – apoiado pelo FEDER através do Programa Operacional de Fatores de Competitividade - COMPETE - e por fundos nacionais da Fundação para a Ciência e Tecnologia - FCT - no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-032061.



## REFERENCIAS

- [1] J. Pfretzschner, R. M. Rodriguez, Acoustic properties of rubber crumbs, *Polymer Testing* (18), 1999, 81–92.
- [2] K. V. Horoshenkov, M. J. Swift, The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates, *Applied Acoustics*, 62, 2001, pp.665-690.
- [3] M. Sobral, A.J.B. Samagaio, J.M.F. Ferreira b, J.A. Labrincha, Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 2003, pp.427–433.
- [4] Zhou Hong, Li Bo, Huang Guangsu, He Jia, A novel composite sound absorber with recycled rubber particles, *Journal of Sound and Vibration*, 304, 2007, pp.400–406.
- [5] Asdrubali F., Baldinelli G., D’Alessandro F., Schiavoni S. *Manufacturing process optimization of resilient materials made from recycled tyre granules granules*, Proceedings of the 16<sup>th</sup> ICSV, Krakow, Poland, 2009
- [6] Asdrubali F., D’Alessandro F., Impact Sound Insulation and Viscoelastic Properties of Resilient Materials made from Recycled Tyre Granules, *International Journal of Acoustics and Vibration*, 16(3), 2011, pp. 119-123.
- [7] L. Lapčík Jr., P. Augustin, A. Pístěk, L. Bujnoch, Measurement of the dynamic stiffness of recycled rubber based railway track mats according to DB-TL 918.071 standard, *Applied Acoustics* 62, 2001, pp.1123-1128.
- [8] E. Cuce, P.M. Cuce, C.J. Wood, S.B. Riffat, Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34 (2014) 273–299. doi:10.1016/j.rser.2014.03.017.
- [9] A. Baetens, Ruben, Jelle Bjorn, Gustavsen, Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review, *Energy Build.* 43 (2011) 761–769.
- [10] Pereira A, Mateus D, Santos P, Avaliação do Desempenho Acústico de Reciclados de Borracha para Aumentar o Isolamento Acústico; *Tecniaústica 2020*, Congresso online
- [11] Norma ISO 9052-1 (1989). Acoustics. Determination of dynamic stiffness. Part 1: Materials used under floating floors in dwellings.
- [12] Norma ISO 16251-1 (2014): Acoustics – Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up – Part 1: Heavyweight compact floor.
- [13] ISO 12354-2 (2017): Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 2: Impact sound insulation between rooms