



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação experimental da redução sonora ao ruído de percussão proporcionada por sistemas de lajeta flutuante de dimensões reduzidas.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

Ricardo Jorge da Silva Ferreira

Orientadores

Prof.^a Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira

Prof. Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Janeiro, 2013

AGRADECIMENTOS

“Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós”.

Antoine de Saint-Exupéry

Chega ao fim uma longa caminhada cheia de obstáculos, vivências, alegrias e tristezas.

De Coimbra levo o conhecimento, mas também uma nova forma de encarar o mundo. Em Coimbra eu ri, eu chorei, eu amei, eu vivi. Em Coimbra muitas noites em claro eu passei, mas sinto que valeram a pena, pois sem essas elas, nunca teria alcançado o meu grande objetivo.

Queria agradecer a todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para que este meu objetivo fosse alcançado. Queria agradecer em particular aos meus orientadores Prof.^a Dr.^a Andreia Pereira e Prof. Dr. Diogo Mateus, pelo incansável apoio e dedicação que manifestaram, no decorrer da elaboração desta tese. Agradeço também à minha família, em particular, aos meus pais e irmão, pelo incondicional apoio e compreensão que tiveram para comigo ao longo destes anos. Por último, mas não menos importantes, agradeço aos meus colegas e amigos pela paciência, disponibilidade e pelos momentos muitos agradáveis que passei na sua companhia.

“Não basta dar os passos que nos devem levar um dia ao objetivo. Cada passo deve ser ele próprio um objetivo em si mesmo, ao mesmo tempo que nos leva para diante”.

Johann Wolfgang Von Goethe

RESUMO

Os sistemas de lajeta flutuante são uma das soluções construtivas mais utilizadas na redução sonora aos ruídos de percussão. Este tipo de solução consiste na aplicação de uma betonilha em argamassa ou microbetão que assenta sobre um material flexível, aplicado sobre a laje de suporte.

A avaliação da redução sonora destes sistemas é geralmente efetuada em laboratório através da metodologia descrita nas normas EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010, que requer a utilização de câmaras acústicas normalizadas e uma lajeta de betão com cerca de 10m². A construção destas câmaras acústicas, que deverão cumprir os requisitos descritos na norma EN ISO 10140-5:2010, implica um investimento significativo, o que leva a que o número de locais existentes para a realização destes ensaios seja limitado. Para além disso, as dimensões das lajetas de betão requeridas nas normas EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010 são demasiado elevadas o que dificulta o manuseamento das mesmas.

Desta forma, tornar-se mais prático, avaliar o desempenho acústico das soluções recorrendo a métodos, que envolvam a utilização de lajetas, de menor área, que, de um modo geral, são mais fáceis de manusear. Estes métodos envolvem custos mais reduzidos e apesar de não normalizados, podem constituir uma alternativa para a utilização por parte de centros de investigação ou fabricantes no desenvolvimento de produtos.

No âmbito deste trabalho pretende-se avaliar a influência da variação da dimensão da lajeta na determinação experimental da redução sonora resultante da atuação de uma fonte de ruído de percussão. São realizados diversos ensaios utilizando sistemas de lajeta flutuante com vários tipos de camada resiliente e várias áreas e espessuras de lajeta, sendo os resultados obtidos comparados com os resultados normalizados, de modo a avaliar eventuais semelhanças. Procurou-se analisar várias metodologias de ensaio não normalizadas, dando especial relevância ao método descrito no documento técnico ISO/CD16251-1.

ABSTRACT

The floating slab systems are one of the most efficient solutions used in impact sound reduction. This solution is based on the application of screed mortar or concrete over a flexible material, placed over the support slab.

The system acoustic performance is usually assessed on laboratory, according to the procedure described in EN ISO 10140-3:2010 standard and EN ISO 10140-4:2010 standard, requiring the use of normalized acoustic chambers and a floating slab with an area around 10m². The construction of such chambers, according to the requirements described in the EN ISO 10140-5:2010 standard implies a significant investment reducing the number of laboratories available to perform these tests. Additionally, according to the EN ISO 10140-3:2010 standard and EN ISO 10140-4:2010 standard, the required concrete slabs have a significant size and weight, implying the use of specific tools and machines to handling them.

So, it will become more practical to evaluate the noise performance using methods that use smaller area slabs, which in general are easier to handle. These methods involve lower costs and even though they are not standard, they can be a valid alternative to researchers or manufacturers apply in products development.

This work intends to evaluate the slab size variation influence on the impact sound reduction resulting from one percussion noise source. Several tests were performed using floating slabs systems with different resilient layers, different sizes and thicknesses. In order to validate the tests results, they were compared with standard results. Various non-standard test methodologies were used, giving special relevance to the one described in the ISO/CD16251-1 technical document.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	x
SIMBOLOGIA	xi
ABREVIATURAS	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Generalidades.....	4
2.2 Sistemas de lajeta flutuante.....	5
2.2.1 Camada resiliente: Materiais existentes no mercado.....	6
2.2.2 Pormenores construtivos	9
2.3 Parâmetros acústicos.....	9
2.3.1 Nível sonoro de percussão, L_j	9
2.3.2 Nível sonoro normalizado de percussão, L_n	10
2.3.3 Redução sonora, ΔL	10
2.3.4 Índice de isolamento sonoro a sons de percussão obtido com base em medições realizadas por bandas de terços de oitava.....	10
2.3.5 Índice de redução sonora a ruídos de percussão, ΔL_w	10
2.4 Métodos de avaliação experimental.....	13
2.4.1 Método de avaliação experimental normalizado.....	13
2.4.2 Métodos de avaliação experimental não normalizados	13
2.4.2.1 Método da ISO/CD 16251-1	13
2.4.2.2 Outros métodos de avaliação experimental não normalizados	16
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	19
3.1 Descrição dos materiais ensaiados e equipamentos utilizados	19
3.2 Método ISO/CD16251-1.....	21

3.2.1	Caracterização do método de avaliação experimental não normalizado.....	23
3.2.1.1	Influência da posição de fonte sonora.....	23
3.2.1.2	Influência da posição do recetor.....	24
3.2.1.3	Influência do ruído ambiente.....	26
3.3	Outros métodos de avaliação experimental não normalizados.....	26
3.3.1	Medição no pavimento de uma câmara acústica.....	26
3.3.2	Medição numa câmara reverberante de dimensões reduzidas.....	28
4	RESULTADOS.....	30
4.1	Introdução.....	30
4.2	Caracterização do método ISO/CD 16251-1 para sistemas de lajeta flutuante.....	31
4.2.1	Método ISO/CD16251-1 vs. NP EN ISO140-8:2008 (método normalizado): Mantas flexíveis de aglomerado de borracha.....	31
4.2.1.1	Influência da variação da área da lajeta, mantendo a espessura.....	33
4.2.1.2	Influência da variação da espessura da lajeta.....	35
4.2.2	Método ISO/CD16251-1 vs. NP EN ISO140-8:2008 (método normalizado): Placas de fibra de coco.....	37
4.2.2.1	Influência da variação da área da lajeta, mantendo a espessura.....	39
4.2.3	Método ISO/CD16251-1 vs. NP EN ISO140-8:2008 (método normalizado adaptado): aglomerados de espuma de poliuretano.....	40
4.3	Comparação do método ISO/CD16251-1 com outros métodos de avaliação experimental não normalizados.....	47
4.3.1	Influência da variação da área da lajeta de betão, mantendo a espessura.....	48
4.3.2	Influência da variação espessura da lajeta de betão.....	52
4.3.3	Análise dos resultados obtidos para aglomerados de espuma de poliuretano....	55
4.4	Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos pela fórmula da EN 12354-2:2000.....	57
4.4.1	Caracterização do método estimativo descrito na norma EN 12354-2:2000.....	57
4.4.2	Análise dos resultados obtidos.....	58
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	60
5.1	Considerações finais.....	60
5.2	Trabalhos futuros.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
	ANEXO A – FOTOGRAFIAS DOS ENSAIOS.....	65
A.1	Método ISO/CD16251-1: Utilização de várias áreas de lajeta.....	65
A.2	Método ISO/CD16251-1: Utilização de lajetas com várias espessuras.....	66
A.3	Medição no pavimento de câmara acústica do DEC.....	66
A.4	Medição numa câmara reverberante de dimensões reduzidas construída no DEC ...	66
	ANEXO B – EXEMPLOS DE CÁLCULO.....	67
B.1	Cálculo do índice de redução sonora a sons de percussão.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Ilustração das principais soluções construtivas: a) Revestimentos de pavimento com materiais elásticos e flexíveis; b) Pavimentos flutuantes; c) Sistemas de lajeta flutuante (Mendes et al, 2011). 5
- Figura 2.2 – Vários exemplos de materiais existentes no mercado: a) membrana de polietileno reticulado de célula fechada (DANOSA, 2012); b) espuma de polietileno extrudido (DOW Portugal, 2012), (TOPECA, 2012); c) poliestireno expandido (Plastimar, 2012); d) feltro betuminoso oxidado com granulado de cortiça colado (IMPERALUM, 2012); e) aglomerado de cortiça expandida (Amorim, 2012); f) placa de fibra de coco com aglomerado de cortiça expandida colado (Amorim, 2012); g) Placa de lã mineral aglomerada com resinas de alta densidade à compressão (Knauf Insulation, 2012), h) placa de lã de vidro (Mendes et al, 2011); i) placa de lã de rocha (Fibrosom, 2012). 7
- Figura 2.3 – Pormenores construtivos: a) Pormenor da separação da lajeta flutuante da restante estrutura; b) Selagem das tubagens e condutas (Tadeu et al, 2010). 9
- Figura 2.4 – Curva convencional de referência para sons de percussão em bandas de um terço de oitava, segundo a norma NP EN ISO 717-2:2009 (Mateus, 2008). 12
- Figura 2.5 – Exemplo do ajuste da curva convencional de referência para sons de percussão segundo a norma NP EN ISO 717-2:2009 (Patrício, 2010). 12
- Figura 2.6 – Fotografia da laje de betão indicada no documento técnico ISO/CD16251-1 e pormenor do material resiliente colocado na base dos apoios. 14
- Figura 2.7 – Redução sonora proporcionada por diferentes amostras, obtida utilizando o método ISO/CD16251-1: a) carpete; b) vinílico de base flexível; c) vinílico corrente; d) linóleo; e) pavimento flutuante com manta de cortiça colada; f) pavimento flutuante com manta de aglomerado de borracha com 4,5mm, vs. Metodologia normalizada (Pereira et al, 2012). 15
- Figura 2.8 – Comparação entre índice de redução sonora obtido através da metodologia normalizada e o método ISO/CD16251-1 (Sommerfeld, 2009). 16
- Figura 2.9 – Fotografia da vista geral da câmara reverberante de dimensões reduzidas. Detalhes dos materiais resilientes utilizados: a) aglomerado de cortiça natural,

colocado ao longo do topo das paredes; b) aglomerado de borracha, aplicado por baixo da câmara. (Godinho et al, 2010).....	17
Figura 2.10 – Redução sonora obtida para vários revestimentos: a) pavimento de madeira sobre manta de espuma de polietileno com 3 mm de espessura; b) tapete comum; c) pavimento de madeira sobre manta de aglomerado de cortiça natural com 5 mm de espessura; d) vinílico com uma camada intermédia de espuma de poliuretano (Godinho et al, 2010).....	18
Figura 3.1 – Fotografia das várias lajetas de betão analisadas: a) Lajetas de betão com várias áreas; b) Lajetas de betão com várias espessuras.	19
Figura 3.2 – Ilustração dos materiais ensaiados: a) Aglomerado de espuma de poliuretano com densidades 120kg/m^3 , 150kg/m^3 e 200kg/m^3 e com espessuras 5cm,10cm e 30cm; b) manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura e com espessura variável 15/7mm; c) Placa de fibra de coco com 10mm e 20mm de espessura.	20
Figura 3.3 – Ilustração dos equipamentos utilizados: a) acelerómetro B&K 4370 (Brüel & Kjaer, 2012); b) microfone G.R.A.S Sound and Vibration do tipo 40AF com pré-amplificador do tipo 26AK (G.R.A.S Sound and Vibration, 2012); c) Symphonie (01dB) (AREVA 01dB-Metravib, 2012); d) calibrador B&K 4231 (Brüel & Kjaer, 2012); e) calibrador Shaker 4294 (Brüel & Kjaer, 2012); f) máquina de percussão normalizada Bruel (modelo 3204).	21
Figura 3.4 – Esquema das posições de fonte e posições de acelerómetro: a) na face superior da laje de betão (A1 a A10); b) na face inferior da laje de betão (A1 a A8).....	22
Figura 3.5 – Redução sonora produzida pelas posições de fonte P1, P2 e P3 ao ensaiar uma lajeta de 4cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha: a) com espessura 4,5mm; b) com espessura variável 15/7mm.	23
Figura 3.6 – Redução sonora média para as três posições de fonte e desvio padrão correspondente obtidos ao ensaiar uma lajeta de 4cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha com a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm.	24
Figura 3.7 – Redução sonora resultante da atuação da fonte na posição P1 nas oito posições de recetor e desvio padrão correspondente obtidos ao ensaiar uma lajeta de 4cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha com a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm.	25
Figura 3.8 – Redução sonora produzida pelas posições de fonte P1, P2 e P3 nas posições de acelerómetro localizadas na face superior e inferior da laje para uma lajeta de 4cm	

sobre manta flexível de aglomerado de borracha com a) espessura 4,5mm; b) espessura variável 15/7mm.....	26
Figura 3.9 – Fotografia ilustrativa do método de medição no pavimento de uma câmara acústica.	27
Figura 3.10 – Fotografia ilustrativa do método de medição no pavimento de uma câmara acústica e esquema das posições de acelerómetro (A1a A5) e de fonte sonora (P1 a P3).	27
Figura 3.11 – Esquema das posições definidas na laje de referência da câmara reverberante de dimensões reduzidas: a) Posições de fonte (P1 a P9); b) Posição do microfone M1.....	28
Figura 4.1 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD16251-1 para ensaiar uma lajeta com 4 cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha com: a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm, vs. Metodologia normalizada.....	31
Figura 4.2 – Ajuste da curva de referência utilizando uma lajeta com 4cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha com: a) espessura de 4,5mm: b) espessura variável 15/7mm.....	33
Figura 4.3 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD 16251-1 para as diversas áreas de lajeta sobre manta flexível de aglomerado de borracha com a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm, vs. Metodologia normalizada.	34
Figura 4.4 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD 16251-1 para ensaiar lajetas de diversas espessuras sobre manta flexível de aglomerado de borracha com: a) 4,5mm de espessura; b) espessura 15/7mm.....	35
Figura 4.5 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD16251-1 para ensaiar uma lajeta com 4 cm de espessura sobre: a) placa de fibra de coco com 10mm de espessura b) placa de fibra de coco com 20mm de espessura, vs. Metodologia normalizada.....	38
Figura 4.6 – Ajuste da curva de referência utilizando uma lajeta com 4cm de espessura sobre: a) placa de fibra de coco com 10mm de espessura b) placa de fibra de coco com 20mm de espessura.	38
Figura 4.7 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD 16251-1 para as diversas dimensões de lajeta sobre: a) Placa de fibra de coco com 10mm de espessura; b) Placa de fibra de coco com 20mm de espessura, vs. Metodologia normalizada. .	39
Figura 4.8 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD16251-1 para ensaiar uma lajeta com 4 cm de espessura sobre aglomerados de espuma de poliuretano a) densidade 120kg/m ³ ; b) densidade 200kg/m ³ , vs. Metodologia normalizada.....	41

Figura 4.9 – Ajuste da curva de referência utilizando uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerado de espuma de poliuretano de densidade 120kg/m^3 e 200kg/m^3 e espessura: a) 5mm; b) 10mm; c) 30mm.	43
Figura 4.10 – Avaliação da influência da variação da espessura de aglomerados de espuma de poliuretano, mantendo a densidade, na redução sonora obtida através: a) norma NP EN ISO140-8:2008; b) método ISO/CD 16251-1.	44
Figura 4.11 – Avaliação da influência da variação da densidade de aglomerados de espuma de poliuretano, mantendo a espessura, na redução sonora obtida através: a) norma NP EN ISO140-8:2008; b) método ISO/CD 16251-1.	45
Figura 4.12 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD16251-1 para ensaiar uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerado de espuma de poliuretano, procurando avaliar: a) a influência da variação da densidade da espuma de poliuretano, mantendo a espessura; b) a influência da variação da espessura, mantendo a densidade.	46
Figura 4.13 – Redução sonora obtida através dos 3 métodos analisados, utilizando várias áreas de lajeta sobre manta flexível de borracha com: a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm, vs. Metodologia normalizada.	49
Figura 4.14 – Redução sonora obtida através dos 3 métodos analisados, utilizando várias áreas de lajeta sobre: a) placa de fibra de coco com 10mm espessura; b) placa de fibra de coco com 20mm espessura, vs. Metodologia normalizada.	50
Figura 4.15 – Redução sonora obtida através dos 3 métodos analisados, utilizando lajetas de dimensões $0,50\text{m} \times 0,50\text{m}$ e várias espessuras sobre manta flexível de aglomerado de borracha com: a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm.	53
Figura 4.16 - Redução sonora obtida utilizando as 3 metodologias de ensaio para ensaiar uma lajeta com 4 cm de espessura sobre espuma de poliuretano a) densidade 120kg/m^3 ; b) densidade 200kg/m^3 , vs. Metodologia normalizada.	56
Figura 4.17 – Comparação da redução sonora obtida através das 3 metodologias de ensaio analisadas e através do ensaio normalizado, com reta resultante da fórmula descrita na norma EN 12354-2:2000 ao ensaiar uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerado de espuma de poliuretano com 30mm de espessura: a) densidade 120kg/m^3 ; b) densidade 200kg/m^3	59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Nível de pressão sonora, normalizado, devido a uma excitação de impacto, num pavimento de referência.....	11
Quadro 3.1 – Área e peso das lajetas de betão analisadas.....	19
Quadro 4.1 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos utilizando várias áreas de lajeta com 4cm de espessura, sobre mantas flexíveis de aglomerado de borracha, vs. Metodologia normalizada.....	35
Quadro 4.2 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos utilizando lajetas com várias espessuras sobre mantas flexíveis de aglomerado de borracha, vs. Metodologia normalizada.....	36
Quadro 4.3 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos utilizando várias áreas de lajeta com 4cm de espessura sobre placas de fibra de coco, vs. Metodologia normalizada.....	40
Quadro 4.4 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos utilizando uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerados de espuma de poliuretano, vs. Metodologia normalizada.....	42
Quadro 4.5 – Índices de redução sonora obtidos para os quatro tipos de camada resiliente ensaiados através das 3 metodologias de ensaio e através da metodologia normalizada para várias áreas de lajeta de betão com 4cm de espessura.....	52
Quadro 4.6 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos através das três metodologias de ensaio analisadas e para várias espessuras de lajeta sobre mantas flexíveis de aglomerado de borracha.....	55
Quadro 4.7 – Índices de redução obtidos utilizando as três metodologias de ensaio analisadas e a metodologia normalizada para ensaiar uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerado de espuma de poliuretano.....	57
Quadro 4.8 – Rigidez dinâmica dos tipos de aglomerado de espuma de poliuretano analisados.....	58

SIMBOLOGIA

L_i – Nível médio de pressão sonora, numa banda de um terço de oitava, na câmara recetora, quando o pavimento em ensaio é excitado pela máquina de percussão normalizada (dB).

$L_{n,0}$ – Nível de pressão sonora normalizado devido à ação da percussão no pavimento normalizado sem o revestimento aplicado (dB).

L_n – Nível de pressão sonora normalizado devido à ação da percussão no pavimento normalizado com o revestimento aplicado (dB).

ΔL – Redução sonora (dB).

A – Área de absorção sonora equivalente (m^2).

A_0 – Área de absorção sonora de referência (m^2).

$L_{n,r}$ – Nível de pressão sonora normalizado de um pavimento de referência com o revestimento aplicado, devido a uma excitação de impacto (dB).

$L_{n,r,0}$ – Nível de pressão sonora normalizado de um pavimento de referência devido a uma excitação de impacto (dB).

$L_{n,r,w}$ – Índice de isolamento a sons de percussão, calculado a partir do nível de pressão sonora normalizado de um pavimento de referência, com o revestimento aplicado (dB).

$L_{n,r,0,w}$ – Índice de isolamento a sons de percussão, calculado a partir do nível de pressão sonora normalizado de um pavimento de referência, sem revestimento (dB).

ΔL_w – Índice de redução sonora a sons de percussão (dB).

$L_{a,0}$ - Nível de vibração médio obtido na laje de betão sem a amostra aplicada (dB).

a_0 – Aceleração medida na laje de betão sem a amostra aplicada (m/s^2).

a_{ref} – Aceleração de referência de valor igual a $10^{-6} m/s^2$.

$L_{a,1}$ - Nível de vibração médio obtido na laje de betão com a amostra aplicada (dB).

a_1 – Aceleração medida na laje de betão com a amostra aplicada (m/s^2).

$P_{n,0}$ – Pressão sonora medida na laje de referência de uma câmara reverberante sem a amostra aplicada (Pa).

P_0 – Pressão de referência (Pa).

P_n – Pressão sonora medida na laje de referência de uma câmara reverberante com a amostra aplicada (Pa).

ABREVIATURAS

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

NI&DEA-FEUP – Núcleo de Investigação & Desenvolvimento em Engenharia Acústica -
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

B&K – Brüel & Kjaer.

PTB – Physikalisch Technische Bundesanstalt.

ISO – International Organization for Standardization.

EN – European Norm.

NP – Norma Portuguesa.

DEC – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

EPS – Poliestireno expandido.

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

A sociedade atual está cada vez mais preocupada com as condições de conforto dos edifícios, sendo a acústica uma referência para este conforto.

Os sons de percussão são uma das principais causas de incómodo nas habitações, sendo a sua propagação feita principalmente ao nível do pavimento. Atendendo à melhoria do conforto acústico nos edifícios, surgiram no mercado um elevado número de soluções construtivas de elevado desempenho, na minimização da transmissão de ruídos de percussão.

Uma das soluções para diminuir a transmissão do ruído de percussão em edifícios, de modo a dar cumprimento aos requisitos regulamentares consagrados no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) consiste na utilização de sistemas de lajeta flutuante. Estes sistemas são compostos por uma betonilha em argamassa ou microbetão que assenta sobre uma camada resiliente estendida sobre a laje estrutural e por um revestimento final aplicado sobre a betonilha em argamassa ou microbetão. Este sistema além de proporcionar um isolamento aos sons de percussão satisfatório induz também uma melhoria no isolamento aos sons aéreos.

O desempenho acústico proporcionado por estas soluções ao nível dos sons de percussão pode ser obtido experimentalmente através da metodologia de ensaio normalizada, descrita nas normas EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010. A realização destes ensaios envolve custos relativamente elevados de construção e manutenção, e implica o uso de provetes com dimensões bastante elevadas. Para além disso, estes ensaios apenas podem ser realizados num número restrito de locais preparados para o efeito.

Num mundo onde cada vez mais se aposta na relação qualidade/preço, surge a necessidade de procurar novas metodologias de ensaio, mais simples e com menor custo. Numa fase de desenvolvimento de um novo tipo de solução acústica, tornar-se importante a utilização de metodologias de ensaio não normalizadas, mais simples e com custos mais reduzidos, que permitam estimar o desempenho acústico da solução. Este tipo de metodologia de ensaio proporciona a uma entidade a possibilidade efetuar um rastreamento de soluções, eliminando

à partida soluções que não cumpram os objetivos traçados, reduzindo assim os custos associados.

O método ISO/CD 16251-1 é uma metodologia de ensaio não normalizada que tem vindo a ser testado, e está atualmente considerado para a normalização pela ISO. No que diz respeito a pavimentos flexíveis e pisos flutuantes existem já alguns resultados comparados com a metodologia normalizada, tendo sido obtidas diferenças reduzidas. No que concerne a sistemas de lajeta flutuante, não existem ainda resultados relevantes.

Existem ainda outras metodologias de ensaio não normalizadas, como por exemplo medição no pavimento de uma câmara acústica e numa câmara reverberante de dimensões reduzidas, constantes em trabalhos já realizados por outros autores, nomeadamente Godinho et al, 2010 e Pereira, 2012.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a redução sonora a ruídos de percussão proporcionada por sistemas de lajeta flutuante de dimensões reduzidas, utilizando métodos de avaliação experimental não normalizados, em particular o método ISO/CD16251-1.

Desta forma, foram ensaiadas através deste método várias dimensões de lajeta de betão (0,50mx0,50mx0,04m; 0,80mx0,80mx0,04m; 1,20mx0,80mx0,04m), assim como lajetas de betão com dimensões 0,50mx0,50m e várias espessuras (4cm, 8cm, 12cm), com o objetivo de avaliar a influência da variação da área da lajeta de betão e a influência da variação da espessura da lajeta de betão. Estas lajetas de betão foram ensaiadas utilizando diferentes tipos de camada resiliente. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados do ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008 para uma lajeta com 4cm de espessura, por forma a avaliar a existência de similaridade de resultados entre as duas metodologias de ensaio. De referir que a norma NP EN ISO 140-8:2008 foi substituída em 2010 pela norma EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010. Contudo, faz-se referência à norma NP EN ISO 140-8:2008, uma vez que à data da realização dos ensaios, segundo a metodologia normalizada, cujos resultados serão objeto de comparação neste trabalho, a norma NP EN ISO 140-8:2008 encontrava-se ainda em vigor. Não se verificam, no entanto, diferenças significativas entre as duas normas.

Os resultados do método ISO/CD16251-1 foram posteriormente comparados com os resultados obtidos através de duas outras metodologias de ensaio não normalizadas (medição no pavimento de uma câmara acústica existente no DEC, e medição numa câmara reverberante de dimensões reduzidas, desenvolvida no DEC), com o intuito de avaliar, mais

uma vez, a existência de proximidade de resultados relativamente ao método ISO/CD16251-1 e relativamente ao ensaio normalizado.

Os resultados obtidos através das três metodologias de ensaio foram por último comparados com os resultados da fórmula da EN 12354-2:2000 mais uma vez com o intuito de avaliar a existência de similaridade de resultados relativamente às três metodologias de ensaio e relativamente ao ensaio normalizado.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado encontra-se dividida em cinco capítulos, cada um deles referente a uma área específica do trabalho realizado.

No Capítulo 1, é definido o enquadramento geral da dissertação, procurando introduzir o leitor no tema desenvolvido. São apresentados os principais objetivos e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica onde são apresentados os conceitos teóricos que servirão de base para a realização desta dissertação, assim como, algum do conhecimento já existente acerca do tema abordado.

No Capítulo 3, é apresentado o procedimento experimental. São definidos os materiais e equipamentos utilizados na elaboração dos ensaios e descritas as três metodologias de ensaio analisadas.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais. Primeiramente são apresentados os resultados obtidos através do método ISO/CD16251-1, efetuando uma avaliação ao nível da variação da área da lajeta de betão, mantendo a espessura e da variação da espessura da lajeta de betão. Estes resultados são comparados com os resultados obtidos através da metodologia normalizada. Posteriormente os resultados obtidos por este método são comparados com outras duas metodologias de ensaio não normalizadas. Efetuou-se ainda uma comparação dos resultados experimentais, com os resultados da fórmula EN12354-2:2000.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões retidas do trabalho realizado e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Generalidades

O som produzido num determinado compartimento pode ser transmitido para outro compartimento por meio aéreo ou por meio sólido. Os sons de percussão podem ser provenientes de choques ou de outras solicitações mecânicas aplicadas diretamente nos elementos de construção. São exemplos habituais de fonte de ruído de percussão o arrastamento de móveis, o funcionamento de máquinas, ações do caminhar (especialmente no caso do uso de saltos altos).

A transmissão de sons de percussão entre dois locais, à semelhança da transmissão de sons de condução aérea, depende das transmissões diretas através do elemento de separação direto (quando o pavimento percutido é sobrejacente ao compartimento recetor em análise) bem como das transmissões marginais, através dos elementos adjacentes (Mateus, 2008).

A produção de um impacto está associada à existência de uma determinada quantidade de energia. Uma parte desta energia é dissipada (no momento e na zona da aplicação do impacto e ao longo do material) sendo a restante transmitida pelo material. A quantidade de energia transmitida pelo material depende, em grande parte, da rigidez desse material. Como regra geral quanto maior for a rigidez do material maior será a quantidade de energia transmitida (Tadeu et al, 2010).

Em edifícios de habitação, a principal fonte de propagação são os pavimentos, geralmente formados por uma laje de betão armado. Neste caso existe uma rápida propagação das ondas vibratórias para os edifícios vizinhos. Para evitar que o ruído proveniente de impactos afete os locais vizinhos é necessário reduzir a quantidade de energia transmitida pela estrutura do edifício (Tadeu et al, 2010).

De forma a diminuir a quantidade de energia transmitida pela estrutura ao edifício, existem três tipos de soluções construtivas para o isolamento a sons de percussão utilizadas mais correntemente:

- Revestimento de pavimentos com materiais elásticos e flexíveis, tais como: alcatifas, linóleos e vinílicos;
- Pisos flutuantes, como por exemplo: pavimentos em madeira maciça com camada resiliente entre a laje estrutural e o revestimento;
- Sistemas de lajeta flutuante, sobre os quais se baseia o presente trabalho.

Os três tipos de soluções construtivas encontram-se representados na Figura 2.1.

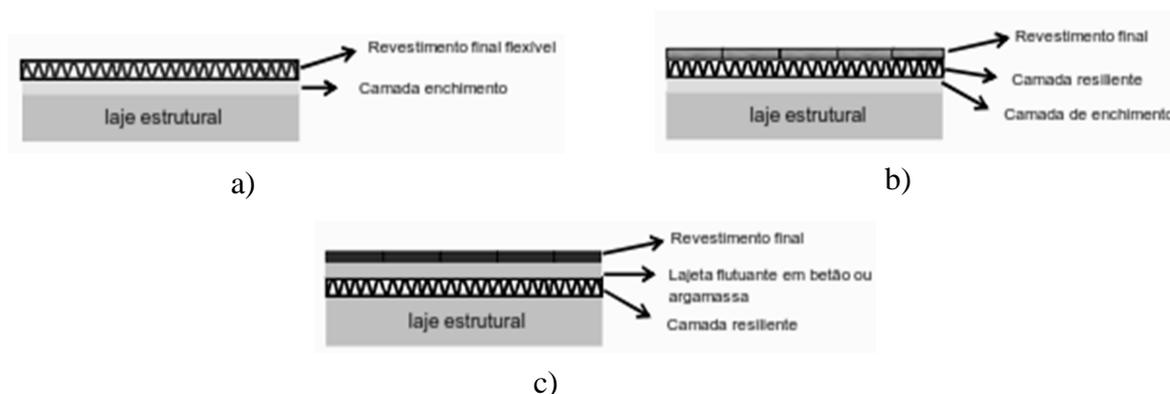


Figura 2.1 – Ilustração das principais soluções construtivas: a) Revestimentos de pavimento com materiais elásticos e flexíveis; b) Pavimentos flutuantes; c) Sistemas de lajeta flutuante (Mendes et al, 2011).

2.2 Sistemas de lajeta flutuante

Os sistemas de lajeta flutuante são uma das soluções mais utilizadas na diminuição da propagação dos sons de percussão em edifícios, agindo sobre o meio de propagação. Estes sistemas são compostos por uma betonilha em argamassa ou microbetão que assenta sobre uma camada resiliente estendida sobre a laje estrutural e por um revestimento final aplicado sobre a betonilha em argamassa ou microbetão. A camada resiliente é tradicionalmente composta por um material flexível e o revestimento final pode ser de qualquer tipo (cerâmico, madeira, entre outros).

2.2.1 Camada resiliente: Materiais existentes no mercado

Tal como já referido, um sistema de lajeta flutuante possui entre a laje estrutural e a betonilha em argamassa ou microbetão, uma camada, denominada camada resiliente que, em conjunto com a betonilha, contribui para uma diminuição da propagação dos sons de percussão.

A camada resiliente deve apresentar as seguintes características:

- Conservar a sua elasticidade mesmo quando aplicado com pequenas espessuras;
- Possuir elasticidade pouco sensível à variação da frequência do som e do tipo de impacto aplicado;
- Resistir às numerosas variações de sobrecarga;
- Ser quimicamente neutro e fisicamente estável;
- Deve ser totalmente impermeável à passagem dos fluidos resultantes da betonagem (Tadeu et al, 2010).

São vários os materiais resilientes existentes no mercado. Como exemplo existem: o aglomerado de espumas de poliuretano com várias densidades e espessuras, as mantas flexíveis de aglomerado de borracha e as placas de fibra de coco com várias espessuras. Estes materiais serão objeto de estudo no presente documento, sendo ilustrados no capítulo 3. Para além destes materiais existem ainda outros, nomeadamente:

- Membrana de polietileno reticulado de célula fechada;
- Espuma de polietileno extrudido;
- Poliestireno expandido (EPS);
- Aglomerado de cortiça expandida
- Placas de fibra de coco com aglomerado de cortiça expandida colado;
- Feltro betuminoso oxidado com granulado de cortiça colado na face inferior;
- Placas de lã mineral aglomerado com resinas de alta densidade à compressão;
- Placas de lã de vidro;
- Placas de lã de rocha.

Na Figura 2.2 são ilustrados alguns destes materiais.

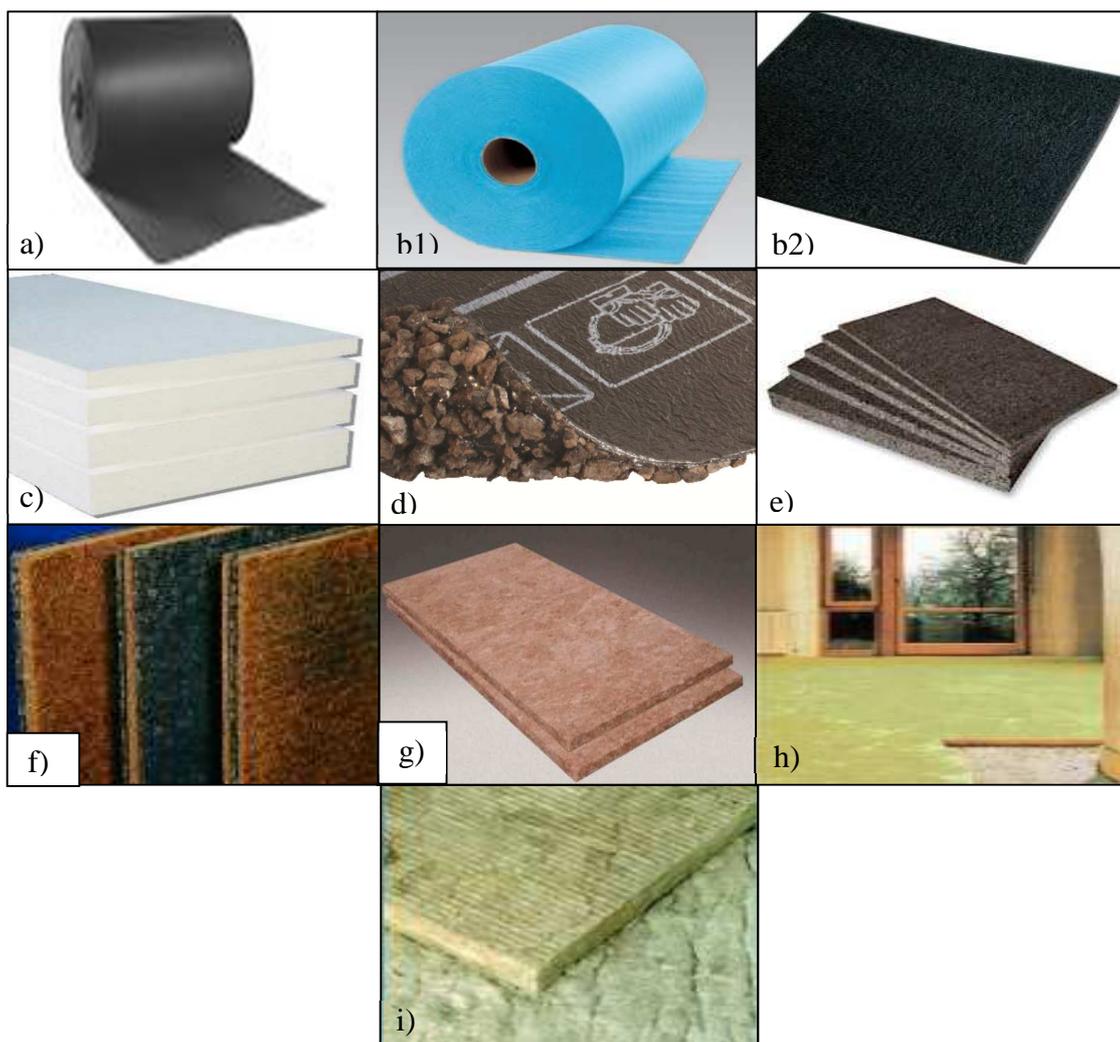


Figura 2.2 – Vários exemplos de materiais existentes no mercado: a) membrana de polietileno reticulado de célula fechada (DANOSA, 2012); b) espuma de polietileno extrudido (DOW Portugal, 2012), (TOPECA, 2012); c) poliestireno expandido (Plastimar, 2012); d) feltro betuminoso oxidado com granulado de cortiça colado (IMPERALUM, 2012); e) aglomerado de cortiça expandida (Amorim, 2012); f) placa de fibra de coco com aglomerado de cortiça expandida colado (Amorim, 2012); g) Placa de lã mineral aglomerada com resinas de alta densidade à compressão (Knauf Insulation, 2012), h) placa de lã de vidro (Mendes et al, 2011); i) placa de lã de rocha (Fibrosom, 2012).

As membranas de polietileno reticulado de célula fechada podem apresentar várias espessuras e densidades, sendo utilizadas no isolamento a sons aéreos e a sons de percussão em pavimentos. As espumas de polietileno extrudido podem ser aplicadas em pisos flutuantes ou em sistemas de lajeta flutuante, sendo particularmente utilizadas no isolamento a sons de percussão. Estes dois materiais apresentam uma elevada flexibilidade, o que proporciona um fácil manuseamento e aplicação. O poliestireno expandido (EPS) possui uma elevada

capacidade de isolamento térmico, sendo indicado para pavimentos que incorporem sistemas de aquecimento (pavimento radiante). Para além disso, funciona como um bom isolamento aos sons de percussão. Antes de aplicada a lajeta de betão, deve ser colocado um filme impermeável (por exemplo uma folha de polietileno) sobre o EPS, de forma a não danificar o material. A cortiça é também um material utilizado na redução acústica aos sons de percussão, sendo diversas as suas formas de aplicação. A título de exemplo, existem o aglomerado de cortiça expandida e o granulado de cortiça. O primeiro pode ser utilizado isoladamente ou associado a placas de fibra de coco ou a borracha. O segundo encontra-se normalmente associado a feltro betuminoso. Este material confere também um bom isolamento térmico. As placas de lã mineral, lã de vidro e lã rocha são tradicionalmente utilizadas no isolamento térmico de edifícios, podendo ser aplicadas em coberturas, pavimentos, paredes, entre outros. Para além destas aplicações, podem ainda ser utilizadas para o isolamento acústico a sons de percussão, nomeadamente, funcionando como camada resiliente de sistemas de lajeta flutuante. No caso das placas de lã mineral, estas podem ser aglomeradas com resinas de alta densidade à compressão, por forma a conferir um bom isolamento aos sons de percussão.

Consultando catálogos do fabricante observa-se, no caso de membranas de polietileno reticulado de célula fechada que, a redução sonora a ruídos de percussão varia entre 19dB e 21dB. A título de exemplo, existem o IMPACTODAN 10 ou o IMPACTODAN 5 (DANOSA, 2012) com 10mm e 5mm de espessura e densidade 25kg/m^3 e 27kg/m^3 , respetivamente. Estes resultados são, no entanto, obtidos utilizando uma lajeta de betão com 6cm de espessura, contrariamente à espessura de 4cm normalmente ensaiada, o que pode, de certa forma, influenciar o desempenho acústico da solução. No caso do feltro betuminoso com granulado de cortiça colado, a redução sonora a ruídos de percussão, obtida utilizando uma lajeta de betão com 4cm de espessura, é de cerca de 20dB. A título de exemplo existe o IMPERSOM (IMPERALUM, 2012) com uma espessura de 10cm. Para além destes materiais existem no mercado, a título de exemplo, o Pactpol Force (poliestireno extrudido de cor cinza) (Topeca, 2012) ou ETHAFOAM 222-E (poliestireno extrudido de cor azul) (DOW Portugal, 2012), o EPS20 ou EPS30 (poliestireno expandido) (Plastimar, 2012), Ultracoustic Pavimento TP (lã mineral aglomerada com resinas de alta densidade à compressão) (Knauf Insulation, 2012), PANEL SOLADO (placa de lã de rocha) (ISOVER, 2012), entre outros. Contudo, nos catálogos de fabricante relativos a estes materiais, encontra-se omissa a informação acerca da espessura da lajeta de betão utilizada nos ensaios para a determinação da redução sonora aos ruídos de percussão conferida por estes materiais pelo que, a fiabilidade dos resultados obtidos pode ser colocada em causa. Esta característica verifica-se em muitos dos catálogos de materiais existentes no mercado, pelo que os resultados relativos à redução sonora aos sons de percussão, devem ser olhados com sentido crítico, uma vez que alguns deles não são coerentes.

2.2.2 Pormenores construtivos

Para lajetas flutuantes executadas *in situ*, muitas vezes mais importante que a solução de base escolhida é o processo construtivo. Uma grande parte das situações de lajeta flutuante *in situ*, conduz a resultados muito fracos, praticamente iguais aos que seriam obtidos com a solução tradicional de revestimento rígido diretamente ligado à laje de suporte ou ao enchimento da laje. Esta deficiência deve-se geralmente à ligação rígida às paredes envolventes, soleiras, pilares e, ainda que pontual, à própria laje de apoio. Para evitar esta deficiência, devem ser utilizadas membranas com resistência adequada (de modo a não rasgarem durante a execução), devem ser convenientemente seladas nas juntas (entre duas camadas adjacentes) e devem subir cerca de 20cm acima da base das paredes, de pilares, atravessamento de tubagens e/ou de caixas de pavimento (se existirem), devendo apenas ser cortadas após a aplicação do revestimento de piso, antes da aplicação do rodapé (se existir) (Mateus, 2008).

Alguns pormenores construtivos são apresentados na Figura 2.3.

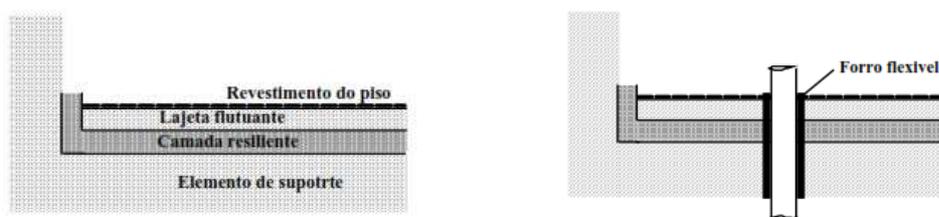


Figura 2.3 – Pormenores construtivos: a) Pormenor da separação da lajeta flutuante da restante estrutura; b) Selagem das tubagens e condutas (Tadeu et al, 2010).

2.3 Parâmetros acústicos

Tal como já referido anteriormente, a norma NP EN ISO 140-8:2008 foi substituída em 2010 pela norma EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010. Contudo faz-se referência à norma NP EN ISO 140-8:2008, uma vez que os resultados referentes ao ensaio normalizado, objeto de comparação neste trabalho, foram obtidos antes desta data. Não existem, no entanto, diferenças significativas entre as duas normas.

Para a execução do ensaio normalizado são necessárias duas câmaras adjacentes, dispostas verticalmente, sendo a superior denominada câmara emissora e a inferior de câmara recetora. Estas câmaras encontram-se separadas por um pavimento de referência, sobre o qual é aplicado o revestimento de pavimento.

2.3.1 Nível sonoro de percussão, L_i

Segundo as normas EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010, o nível sonoro de percussão L_i , pode ser definido como sendo o nível médio de pressão sonora, numa banda de

um terço de oitava, na câmara recetora, quando o pavimento de ensaio é excitado pela máquina de percussão normalizada. Este valor é expresso em decibel.

2.3.2 Nível sonoro normalizado de percussão, L_n

Segundo as normas EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010, o nível sonoro normalizado de percussão L_n , pode ser definido como sendo o nível médio de pressão sonora, L_i , corrigido com um termo corretivo, expresso em decibel, igual a dez vezes o logaritmo decimal da razão entre a área de absorção sonora equivalente, A , medida na câmara recetora, e a área de absorção sonora de referência, A_0 . Este pode ser traduzido através da expressão 2.1 e expresso em decibel.

$$L_n = L_i + 10 \times \log \frac{A}{A_0} \quad (2.1)$$

Onde $A_0=10\text{m}^2$.

2.3.3 Redução sonora, ΔL

A redução sonora (ΔL) pode ser definida como sendo a diferença entre o nível de pressão sonora normalizado devido à ação da percussão no pavimento normalizado sem ($L_{n,0}$) e com o revestimento aplicado (L_n), tal como indicado nas normas EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010. Este pode ser traduzido pela expressão 2.2 e expresso em decibel.

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad (2.2)$$

2.3.4 Índice de isolamento sonoro a sons de percussão obtido com base em medições realizadas por bandas de terços de oitava

O índice de isolamento sonoro a sons de percussão obtido com base em medições realizadas por bandas de terço de oitava pode definir-se como o valor em decibéis, da ordenada da respetiva curva de referência, na banda de frequências de 500Hz, após ajuste efetuado de acordo com o método especificado na norma NP EN ISO 717-2:2009.

2.3.5 Índice de redução sonora a ruídos de percussão, ΔL_w

O índice de redução sonora a ruídos de percussão (ΔL_w) pode ser definido como sendo a diferença entre o índice de isolamento a sons de percussão de um pavimento de referência, sem e com o revestimento aplicado, conforme especificado na norma NP EN ISO717-2:2009 e traduzido na expressão 2.3.

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} \quad (2.3)$$

Segundo esta norma, e por forma a obter valores comparáveis entre laboratórios, é necessário converter os valores medidos de ΔL a um pavimento de referência. Esta conversão torna-se necessária pois, apesar de os valores de ΔL obtidos pelos revestimentos de piso quando ensaiados numa laje de betão homogénea serem independentes do isolamento a sons de percussão normalizado do pavimento não revestido, o índice de isolamento a sons de percussão de um pavimento, sem e com o revestimento aplicado, depende até certo deste valor.

O pavimento de referência é definido pelos valores do nível de pressão sonora, normalizados, devidos a uma excitação de impacto, também normalizada $L_{n,r,0}$, os quais são apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Nível de pressão sonora, normalizado, devido a uma excitação de impacto, num pavimento de referência.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500
$L_{n,r,0}$ (dB)	67,0	67,5	68,0	68,5	69,0	69,5	70,0	70,5
Frequência (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
$L_{n,r,0}$ (dB)	71,0	71,5	72,0	72,0	72,0	72,0	72,0	72,0

Desta forma, os valores de $L_{n,r}$ convertidos para um pavimento de referência são obtidos através da seguinte expressão:

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad (2.4)$$

Onde:

$L_{n,r}$ – Nível de pressão sonora, devido à excitação de impacto, calculado para um pavimento de referência com o revestimento aplicado.

Após a conversão para um pavimento de referência, torna-se possível o cálculo do índice de redução sonora a ruídos de percussão. Este cálculo é efetuado segundo a norma NP EN ISO717-2:2009 que indica que, para determinar o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, a partir de resultados de medição por bandas de frequência de um terço de oitava, deve efetuar-se o ajuste da curva dos valores de referência, definida na norma NP EN ISO

717-2:2009, por patamares de 1dB, relativamente à curva dos valores medidos, de modo a que a soma dos desvios desfavoráveis seja o maior possível, mas nunca superior a 32dB.

Para o ajuste da curva de referência, valores localizados acima da curva de referência são tidos como desfavoráveis para o cálculo do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão. Na Figura 2.4 encontra-se representada a curva convencional de referência para sons de percussão em bandas de frequência de um terço de oitava utilizada para a determinação dos desvios desfavoráveis. Na Figura 2.5 encontra-se representado um exemplo de ajuste da curva convencional de referência para sons de percussão.

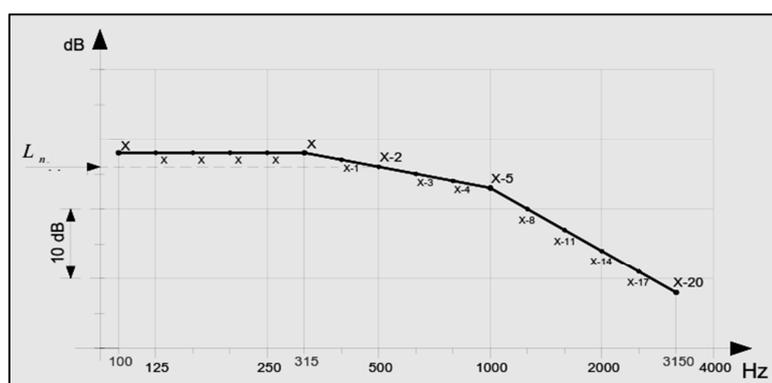


Figura 2.4 – Curva convencional de referência para sons de percussão em bandas de um terço de oitava, segundo a norma NP EN ISO 717-2:2009 (Mateus, 2008).

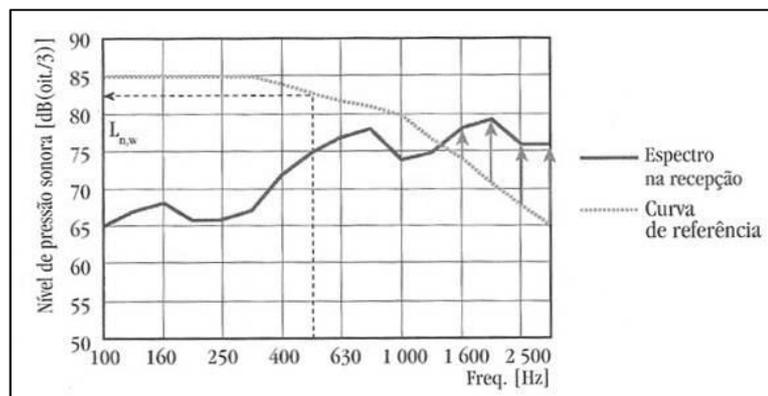


Figura 2.5 – Exemplo do ajuste da curva convencional de referência para sons de percussão segundo a norma NP EN ISO 717-2:2009 (Patrício, 2010).

Efetuada o ajuste da curva de referência, o valor do índice de isolamento a sons de percussão $L_{n,r,w}$ é igual à ordenada da curva de referência ajustada, na banda de frequências de 500Hz.

O índice de isolamento a sons de percussão do pavimento de referência sem o revestimento aplicado, $L_{n,r,0,w}$, determinado segundo o procedimento descrito é de 78dB.

2.4 Métodos de avaliação experimental

2.4.1 Método de avaliação experimental normalizado

O ensaio normalizado é realizado segundo a normas EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010. Segundo estas normas, para a execução do ensaio, são necessárias duas câmaras adjacentes, dispostas verticalmente, sendo a superior denominada câmara emissora e a inferior de câmara recetora. Estas câmaras encontram-se separadas por um pavimento de referência, sobre o qual é aplicado o revestimento de pavimento. Este pavimento deve ser uma laje de betão com uma área mínima de 10 m² e 140 mm de espessura. A superfície do pavimento deve ser plana com uma tolerância de ± 1 mm num comprimento de 200mm e com uma rigidez suficiente para resistir aos impactos da máquina de percussão. A máquina de percussão normalizada deve respeitar os requisitos descritos no anexo E da norma EN ISO 10140-5:2010 e os requisitos anteriormente definidos no Anexo A da norma NP EN ISO 140-8:2008. Esta induz um regime permanente de vibração no pavimento do compartimento emissor, para que seja possível efetuar a medição do isolamento a sons de percussão. O nível de pressão sonora devido à ação de percussão é medido utilizando um microfone que é movimentado de posição em posição ou através de um conjunto de microfones fixos. Devem ser utilizadas pelo menos quatro posições de microfone devendo estas ser distribuídas uniformemente ao longo da câmara. Cada par de posições do microfone deve, no mínimo, estar relacionada com duas das posições da máquina de percussão. As distâncias mínimas de afastamento são: 0,7m entre posições de microfone; 0,7m entre qualquer posição de microfone e os limites da câmara e dos elementos difusores e 1,0m entre uma posição qualquer de microfone e o pavimento excitado pela máquina de percussão. O nível de pressão sonora deve ser medido com o auxílio de filtros de bandas de um terço de oitava. A redução sonora é obtida através da expressão 2.2. Este ensaio pode ser realizado em laboratório ou *in situ*.

2.4.2 Métodos de avaliação experimental não normalizados

2.4.2.1 Método da ISO/CD 16251-1

De forma a simplificar a metodologia de ensaio normalizada surge, numa pesquisa liderada pela Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), um método de ensaio simplificado, descrito no documento técnico ISO/CD 16251-1. Este método, tal como já referido, encontra-se atualmente considerado para a normalização pela ISO. Segundo o documento técnico ISO/CD 16251-1, as câmaras emissora e recetora adotadas no método de avaliação experimental normalizado, são removidas e o pavimento de referência, sobre o qual é aplicado o revestimento, é substituído por uma pequena laje de betão com dimensões 1,2m x 0,8m, e 0,2m de espessura. Entre o pavimento e os apoios e na base dos apoios é colocado material resiliente, com o intuito de minimizar a transmissão de vibrações do exterior para o sistema. Uma ilustração da laje de betão indicada no documento técnico ISO/CD16251-1 e um

pormenor do material resiliente colocado na base dos apoios encontra-se representado na Figura 2.6. A melhoria do desempenho acústico provocada pelo revestimento aplicado é determinada pela diferença entre o nível de aceleração, medido na face inferior da laje de betão, com e sem o revestimento aplicado, em vez de se medir diretamente o nível de pressão sonora na parte inferior do compartimento (Bjor, Ole-Herman, 2010).

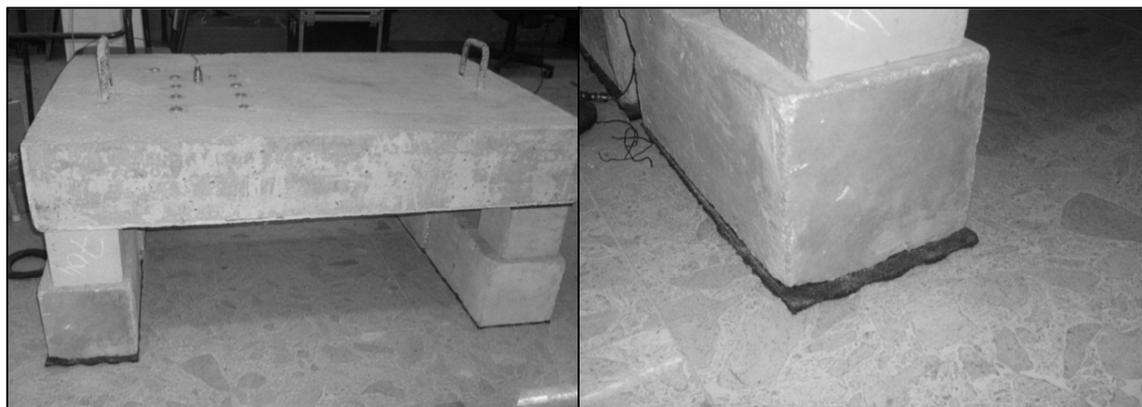


Figura 2.6 – Fotografia da laje de betão indicada no documento técnico ISO/CD16251-1 e pormenor do material resiliente colocado na base dos apoios.

Esta metodologia de ensaio será utilizada no âmbito desta tese, pelo que o procedimento de ensaio, assim como os equipamentos utilizados serão apresentados no capítulo 3.

Este método tem vindo a ser testado tanto para pavimentos pesados como para pavimentos aligeirados. Entende-se por pavimento pesado, o pavimento constituído por uma laje de betão armado e pavimento aligeirado, o pavimento constituído por vigotas de betão e blocos de cofragem (abobadilhas), revertidos por uma camada de betão armado. No caso de pavimentos aligeirados, os resultados obtidos não são tão bons como os obtidos para pavimentos pesados, pelo que na opinião de alguns autores este método, para pavimentos aligeirados, não se encontra ainda pronto para a normalização (Bjor, Ole-Herman, 2010). No âmbito desta dissertação apenas foi estudado o método para pavimentos pesados.

Embora, no caso dos sistemas de lajeta flutuante, ainda não tenham sido obtidos resultados significativos noutros sistemas, como revestimentos de piso flexíveis e pisos flutuantes existem já alguns resultados. Revestimentos em PVC, linóleos, vinílicos, carpetes ou laminados são alguns dos exemplos de revestimentos para os quais existem já alguns resultados.

Numa pesquisa efetuada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra foram testados diversos revestimentos de piso flexíveis e pisos flutuantes, utilizando a

metodologia de ensaio descrita no documento técnico ISO/CD16251-1. Segundo Pereira et al, 2012, foram testados onze tipos de revestimentos flexíveis, designadamente: vinílicos de base flexível, vinílicos correntes, linóleos, tapetes, entre outros e seis pisos flutuantes, entre os quais: piso flutuante com camada resiliente, colada ao piso, em cortiça e piso flutuante com camada resiliente de borracha com 4,5mm de espessura. Na Figura 2.7 encontram-se representados alguns dos resultados obtidos por Pereira et al, 2012, no que concerne à redução sonora obtida para revestimentos flexíveis e pisos flutuantes, utilizando a metodologia de ensaio em análise, e a metodologia normalizada que segue a norma NP EN ISO140-8:2008.

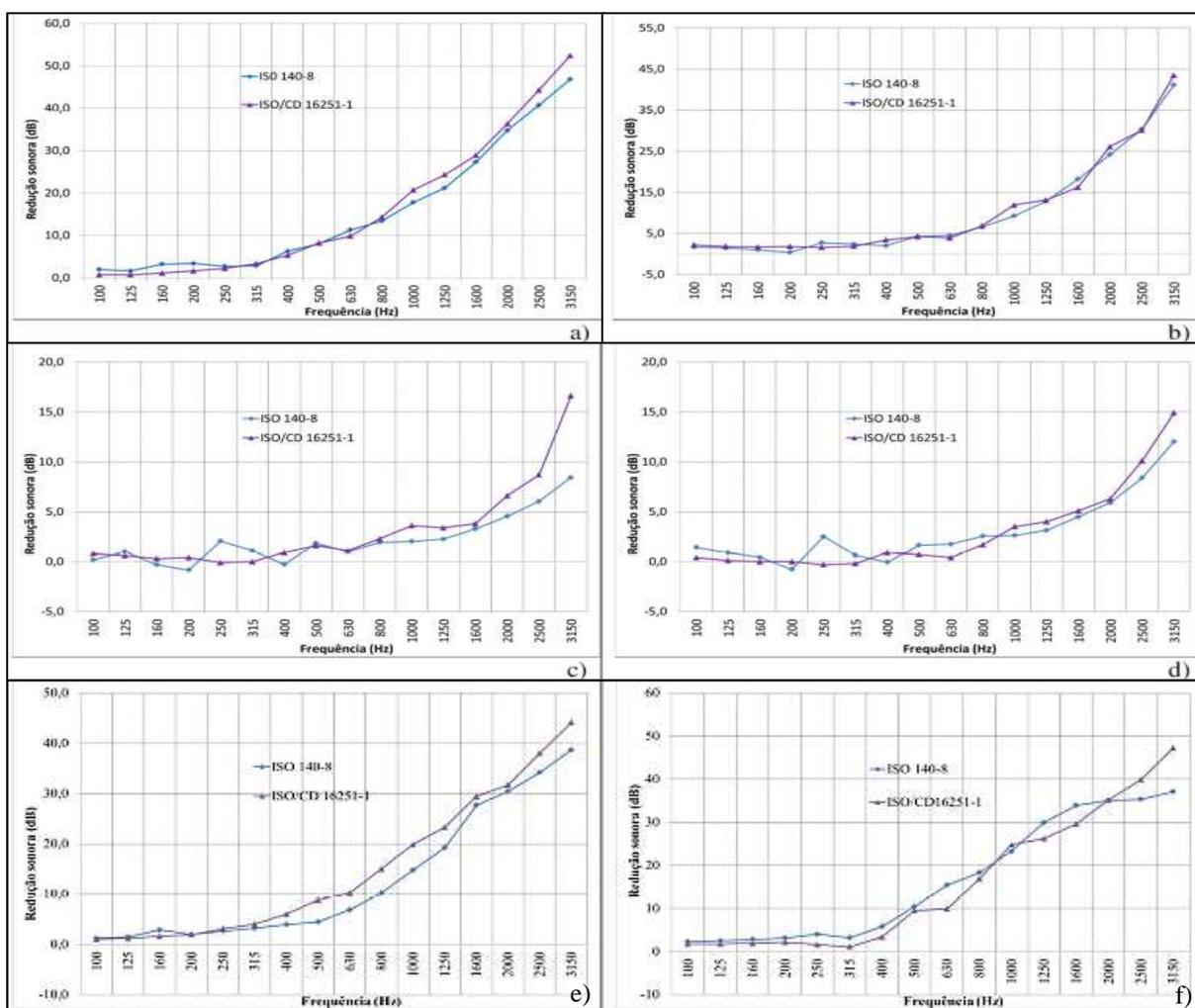


Figura 2.7 – Redução sonora proporcionada por diferentes amostras, obtida utilizando o método ISO/CD16251-1: a) tapete; b) vinílico de base flexível; c) vinílico corrente; d) linóleo; e) pavimento flutuante com manta de cortiça colada; f) pavimento flutuante com manta de aglomerado de borracha com 4,5mm, vs. Metodologia normalizada (Pereira et al, 2012).

Observou-se que, as curvas da redução sonora obtidas para revestimentos flexíveis e pisos flutuantes, utilizando a metodologia de ensaio em análise, são próximas das obtidas utilizando

a metodologia normalizada, verificando-se algumas diferenças ao nível das médias e altas frequências. Constatou-se ainda que os índices de redução sonora obtidos para o método ISO/CD16251-1 apresentam desvios máximos de 2dB, em ambos os casos, relativamente ao ensaio normalizado.

Ole-Herman, 2010, refere num artigo publicado, alguns resultados obtidos por Sommerfeld, 2009. Este utilizou a metodologia de ensaio em análise para ensaiar quatro tipos de revestimentos de pavimento: revestimentos em PVC, linóleos, laminados e alcatifas procurando efetuar uma comparação entre a redução sonora obtida para o método ISO/CD16251-1 e para a metodologia de ensaio normalizada. Na Figura 2.8 são apresentados os resultados obtidos para os quatro tipos de camada resiliente, no que concerne ao índice de redução sonora. Observou-se que mais uma vez que os resultados obtidos pelo método ISO/CD16251-1 são semelhantes aos obtidos através da metodologia normalizada, nomeadamente no caso dos revestimentos em PVC, linóleos e alcatifas. Para estes tipos de revestimento, os desvios máximos de índice de redução sonora ao ruído de percussão, ΔL_w , são inferiores a 2 dB. Para o caso dos laminados, os desvios são ligeiramente superiores, mas não ultrapassando os 3dB.

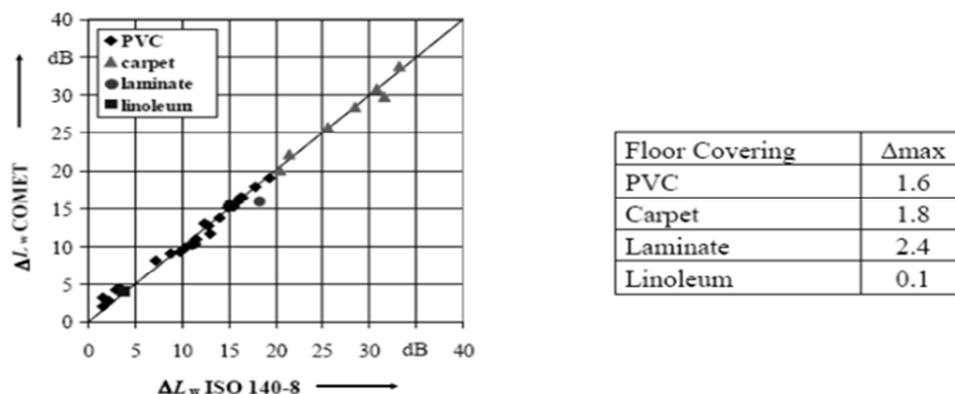


Figura 2.8 – Comparação entre índice de redução sonora obtido através da metodologia normalizada e o método ISO/CD16251-1 (Sommerfeld, 2009).

2.4.2.2 Outros métodos de avaliação experimental não normalizados

Diversos autores têm utilizado metodologias de ensaio não normalizadas para avaliar o desempenho acústico de soluções. Uma dessas metodologias encontra-se descrita no trabalho desenvolvido por Godinho et al, 2010. Segundo este, foi desenvolvida uma metodologia de ensaio não normalizada que consiste na medição do nível de pressão sonora, sem e com a lajeta flutuante aplicada, dentro de uma câmara reverberante de dimensões reduzidas, construída no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, quando uma máquina de percussão normalizada atua na laje de referência existente no topo da câmara.

Esta câmara apresenta uma forma paralelepípedica de dimensões internas de 1,40 m x 1,30 m x 1,50 m e um volume de aproximadamente 2,73m³. As paredes e o piso da câmara reverberante são constituídos por betão e apresentam uma espessura de 10cm, com o intuito de conferir uma resistência estrutural adequada e permitir um isolamento acústico a sons aéreos, de tal forma que as paredes de betão não se tornem um elemento fraco do sistema. A laje de referência utilizada para a avaliação da redução sonora a ruídos de percussão apresenta uma espessura de 6cm. Ao longo do topo das paredes da câmara reverberante foi colocada uma camada de aglomerado de cortiça natural, de 5mm de espessura, de forma a proporcionar um melhor isolamento entre a laje de referência e a estrutura da câmara. Foi ainda colocado aglomerado de borracha do tipo MDL 43.010/05, com espessura que varia entre os 5mm e os 10mm, abaixo do piso da câmara reverberante. A câmara possui ainda uma abertura de dimensões 0,50mx0,50m numa das paredes de betão, de forma a possibilitar o fácil acesso ao seu interior. Esta abertura, aquando da realização de ensaios, é fechada através de um painel composto por duas camadas de placa de gesso com fibras de celulose, cada uma com 12,5mm de espessura e com uma densidade de cerca de 1050 kg/m³. Entre as camadas, foi colocada uma membrana betuminosa de alta densidade com uma espessura de 4mm (com a designação comercial MAD4, produzido por Danosa), de forma a melhorar o isolamento a sons aéreos do painel. Este painel é fixo à parede da câmara através de quatro barras de aço roscadas. Na Figura 2.9 encontra-se apresentado um esquema geral da câmara reverberante de pequenas dimensões, assim como um pormenor da colocação dos materiais resilientes adotados.

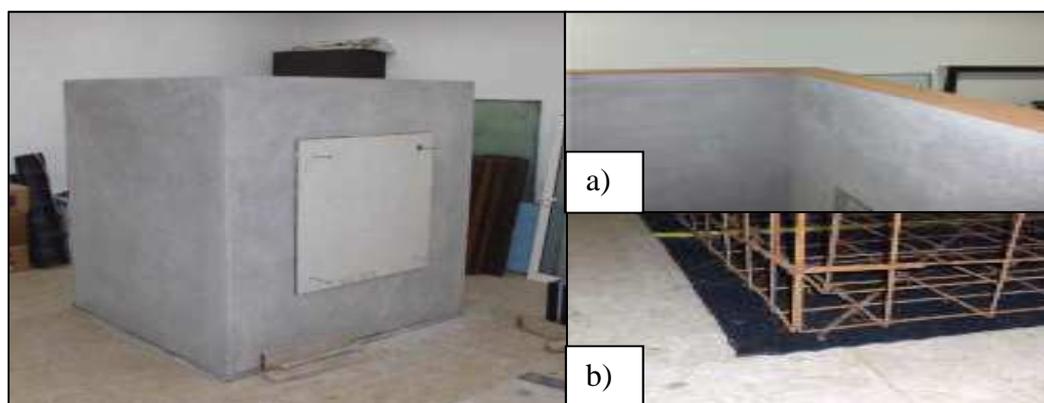


Figura 2.9 – Fotografia da vista geral da câmara reverberante de dimensões reduzidas. Detalhes dos materiais resilientes utilizados: a) aglomerado de cortiça natural, colocado ao longo do topo das paredes; b) aglomerado de borracha, aplicado por baixo da câmara. (Godinho et al, 2010).

Esta metodologia de ensaio será utilizada no âmbito desta tese, pelo que o procedimento de ensaio, assim como os equipamentos utilizados serão apresentados no capítulo 3.

No âmbito do documento referido, foram testados vários revestimentos, tais como, pavimento de madeira sobre manta de espuma de polietileno com 3 mm de espessura, ou sobre uma

manta de aglomerado de cortiça natural com 5 mm de espessura; vinílico com uma camada intermédia de espuma de poliuretano, e um tapete comum feito de fibras têxteis, utilizando a metodologia de ensaio em análise e comparados com os resultados obtidos através de ensaios realizados *in situ*, segundo a metodologia descrita na norma NP EN ISO 140-8:2008. A Figura 2.10 apresenta as curvas de redução sonora, obtidas para os revestimentos referidos. Mais uma vez verifica-se uma boa correlação entre as curvas obtidas na câmara acústica de dimensões reduzidas e através da metodologia normalizada, nomeadamente ao nível das altas frequências, verificando-se pequenas discrepâncias ao nível das frequências mais baixas.

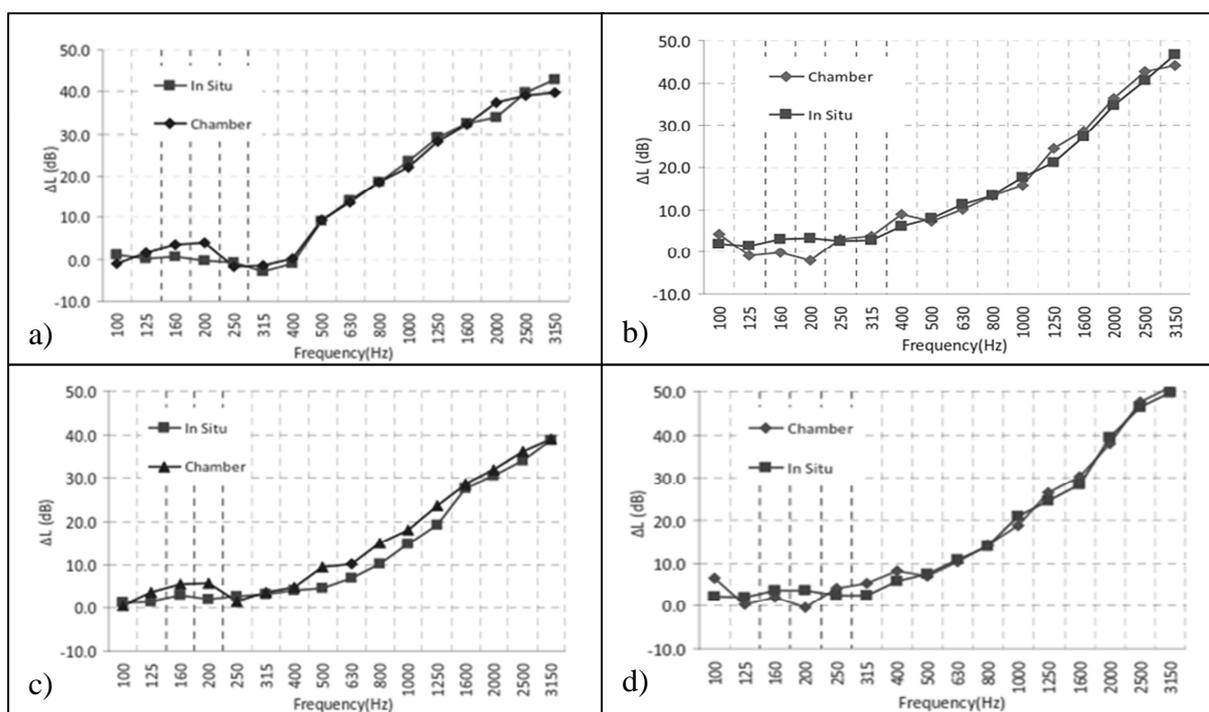


Figura 2.10 – Redução sonora obtida para vários revestimentos: a) pavimento de madeira sobre manta de espuma de polietileno com 3 mm de espessura; b) tapete comum; c) pavimento de madeira sobre manta de aglomerado de cortiça natural com 5 mm de espessura; d) vinílico com uma camada intermédia de espuma de poliuretano (Godinho et al, 2010).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Descrição dos materiais ensaiados e equipamentos utilizados

No âmbito da elaboração deste documento foram analisadas as seguintes dimensões de lajeta: 0,5mx0,5m com espessuras 4cm, 8cm e 12cm; 0,8mx0,8m com espessura 4cm e 1,2mx0,8m com espessura de 4cm, ilustradas na Figura 3.1. No Quadro 3.1 encontram-se representadas a área e o peso de cada lajeta de betão analisada. As lajetas são compostas por betão e apresentam uma armadura em malha com 6mm de diâmetro.

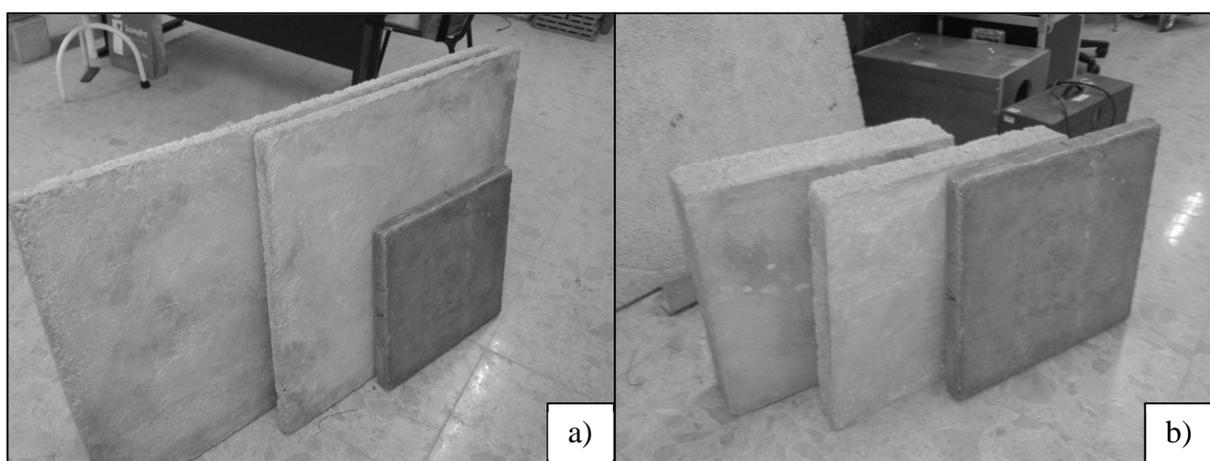


Figura 3.1 – Fotografia das várias lajetas de betão analisadas: a) Lajetas de betão com várias áreas; b) Lajetas de betão com várias espessuras.

Quadro 3.1 – Área e peso das lajetas de betão analisadas.

Dimensões (m)	Área (m ²)	Peso (kg)
0,5x0,5x0,04	0,25	23,40
0,8x0,8x0,04	0,64	53,20
1,2x0,8x0,04	0,96	83,60
0,5x0,5x0,08	0,25	39,50
0,5x0,5x0,12	0,25	63,20

Como camada resiliente do sistema de lajeta flutuante foram ensaiados os seguintes materiais:

- a) Espuma de aglomerado de poliuretano com densidades 120kg/m^3 , 150kg/m^3 e 200kg/m^3 , e com espessuras 5cm, 10cm e 30cm;
- b) Manta flexível de aglomerado de borracha, com 4,5mm de espessura e com espessura variável, sendo a máxima de 15mm e a mínima de 7mm;
- c) Placa de Fibra de coco com 10 e 20mm de espessura.

Na Figura 3.2 são ilustrados todos os tipos de camada resiliente ensaiados.

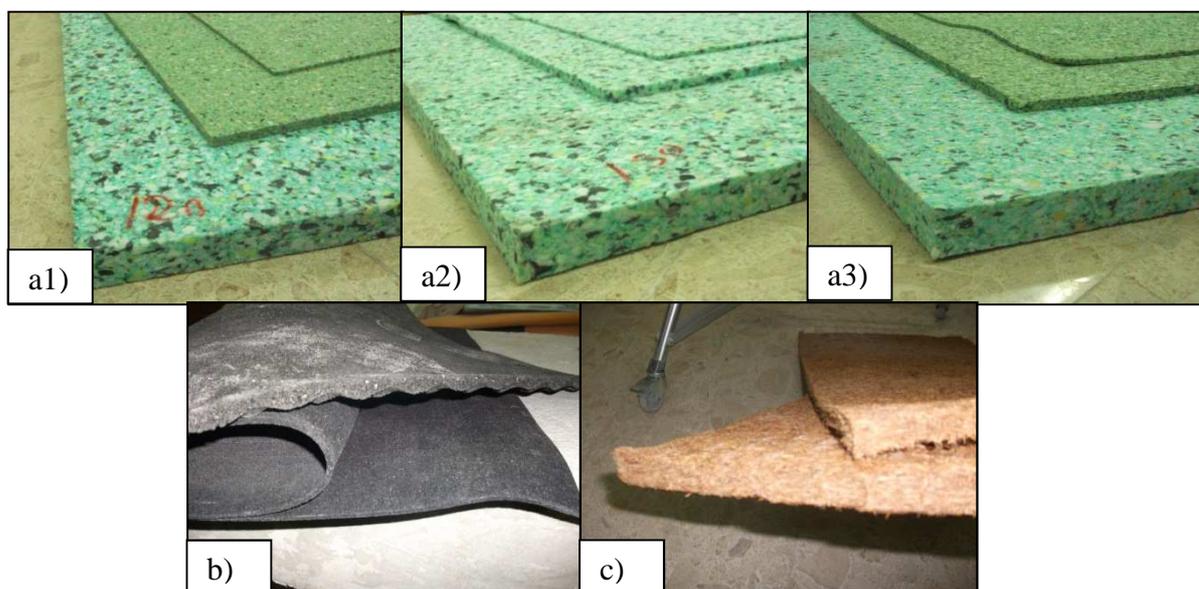


Figura 3.2 – Ilustração dos materiais ensaiados: a) Aglomerado de espuma de poliuretano com densidades 120kg/m^3 , 150kg/m^3 e 200kg/m^3 e com espessuras 5cm, 10cm e 30cm; b) manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura e com espessura variável 15/7mm; c) Placa de fibra de coco com 10mm e 20mm de espessura.

As medições foram efetuadas utilizando dois equipamentos distintos: um acelerómetro B&K do tipo 4370, que permite medir com precisão num intervalo de frequências entre 0,2 Hz e 3500Hz e um microfone G.R.A.S Sound and Vibration do tipo 40AF com pré-amplificador do tipo 26AK que permite medir com precisão num intervalo de frequências entre 3,15Hz e 20kHz. O primeiro foi utilizado em duas metodologias de ensaio não normalizado: método ISO/CD16251-1 e medição no pavimento de uma câmara acústica existente no DEC. O segundo foi utilizado na medição efetuada numa câmara reverberante de dimensões reduzidas construída no DEC. Como sistema de aquisição de sinal foi utilizado o Symphonie (01dB) e como software de tratamento de sinal foi utilizado o programa dBati32. Antes de efetuar qualquer medição, os equipamentos para medição de sinal foram calibrados, tendo sido utilizado um calibrador Shaker do tipo 4294 no caso do acelerómetro e um calibrador B&K

do tipo 4231 no caso do microfone. A fonte sonora utilizada foi uma máquina de percussão normalizada Bruel, modelo 3204 que deve seguir os requisitos descritos no Anexo E, da norma NP ISO 10140-5:2010 e os requisitos anteriormente definidos no Anexo A da norma NP EN ISO 140-7:2008. A Figura 3.3 ilustra todos os equipamentos utilizados.

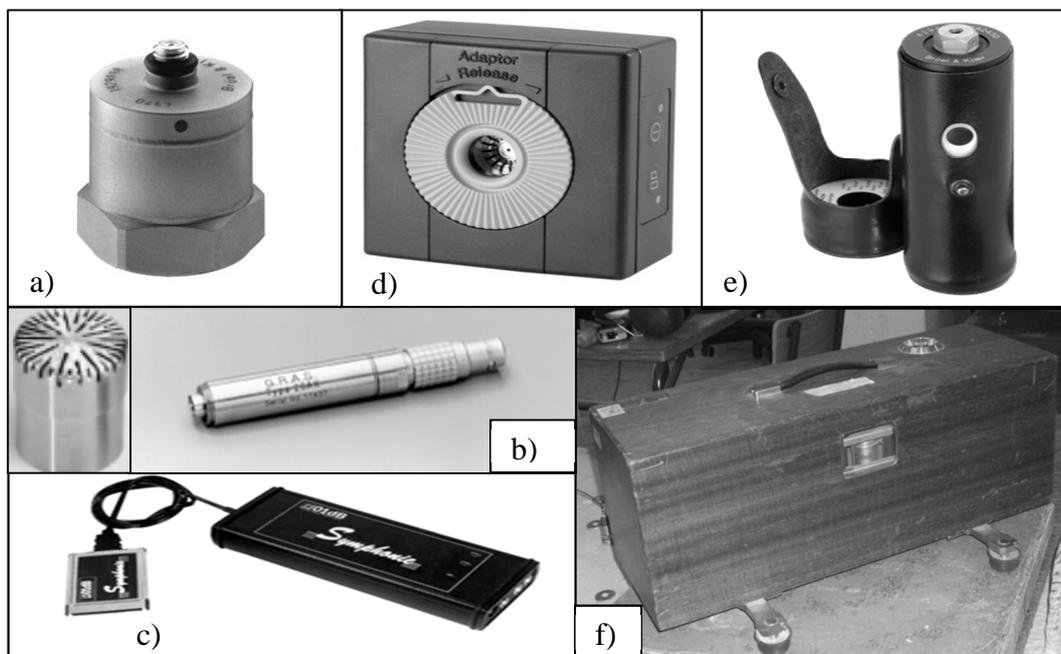


Figura 3.3 – Ilustração dos equipamentos utilizados: a) acelerómetro B&K 4370 (Brüel & Kjaer, 2012); b) microfone G.R.A.S Sound and Vibration do tipo 40AF com pré-amplificador do tipo 26AK (G.R.A.S Sound and Vibration, 2012); c) Symphonie (01dB) (AREVA 01dB-Metrvib, 2012); d) calibrador B&K 4231 (Brüel & Kjaer, 2012); e) calibrador Shaker 4294 (Brüel & Kjaer, 2012); f) máquina de percussão normalizada Bruel (modelo 3204).

3.2 Método ISO/CD16251-1

Uma das metodologias de ensaio utilizadas corresponde à descrita no documento técnico ISO/CD 16251-1. Para a execução dos ensaios foram utilizados os equipamentos já referidos. Foram efetuados ensaios na face superior e na face inferior da laje de betão com o intuito de verificar a existência de similaridade de resultados nas duas faces da laje de betão. Foram definidas 8 posições de acelerómetro (A1, A2, ... A8) localizadas na face inferior da laje de betão e 10 posições de acelerómetro (A1,A2,...,A10) na face superior da laje de betão. Foram ainda definidas 3 posições de fonte sonora distintas (P1, P2 e P3). Nas posições de fonte sonora analisadas procurou-se evitar posições de simetria e paralelismo com os cantos da laje. Para cada posição de acelerómetro foi efetuado um registo. O procedimento é repetido para cada posição de fonte sonora. Os registos são efetuados de modo a obter os níveis de vibração

na face inferior e superior da laje, em bandas de 1/3 de oitava dos 100Hz aos 3150 Hz. Um esquema das posições de acelerómetro e de fonte sonora encontra-se representado na Figura 3.4.

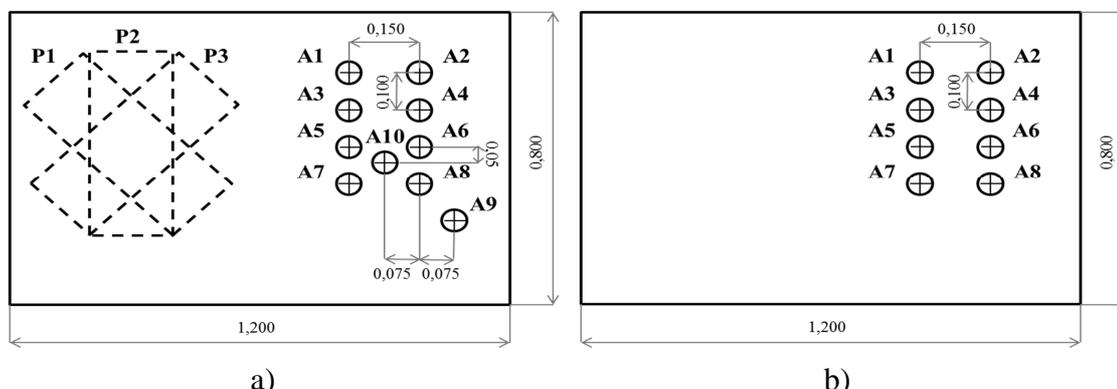


Figura 3.4 – Esquema das posições de fonte e posições de acelerómetro: a) na face superior da laje de betão (A1 a A10); b) na face inferior da laje de betão (A1 a A8).

O procedimento de ensaio é idêntico ao descrito nas normas EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010. Inicialmente são realizadas medições de níveis de vibração na laje de betão sem o revestimento aplicado ($L_{a,0}$). Posteriormente é colocada a amostra de revestimento a analisar sendo registado o nível de vibração correspondente ($L_{a,1}$).

A redução sonora é obtida através da seguinte expressão:

$$\Delta L_a = L_{a,0} - L_{a,1} \quad (3.1)$$

Onde:

$L_{a,0}$ - Nível de vibração médio obtido na laje de betão sem a amostra aplicada (dB). Este pode ser obtido através da expressão:

$$L_{a,0} = 20 \log \left(\frac{a_0}{a_{ref}} \right) \quad (3.2)$$

a_0 – Aceleração medida na laje de betão sem a amostra aplicada (m/s^2).

a_{ref} – Aceleração de referência de valor igual a $10^{-6} m/s^2$.

$L_{a,1}$ - Nível de vibração médio obtido na laje de betão com a amostra aplicada (dB). Este pode ser obtido através da expressão:

$$L_{a,1} = 20 \log \left(\frac{a_1}{a_{ref}} \right) \quad (3.3)$$

a_1 – Aceleração medida na laje de betão com a amostra aplicada (m/s^2).

3.2.1 Caracterização do método de avaliação experimental não normalizado

3.2.1.1 Influência da posição de fonte sonora

Com vista à avaliação da influência da posição de fonte na redução sonora, foram realizadas medições utilizando as três posições de fonte definidas (P1, P2 e P3). A título de exemplo, foram selecionados os resultados obtidos para uma lajeta de dimensões 0,50mx0,50m e 4cm de espessura sobre dois tipos de material resiliente: manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura e com espessura variável 15/7mm.

Na Figura 3.5 são apresentados os resultados, referentes à redução sonora, produzida pelas três posições de fonte (P1, P2 e P3) para um sistema de lajeta flutuante com lajeta de dimensões 0,50mx0,50m e 4cm de espessura sobre os materiais selecionados. Observa-se que as curvas de redução sonora referentes às três posições de fonte apresentam resultados bastante semelhantes ao nível das baixas frequências. No que concerne às médias e altas frequências verificam-se algumas oscilações. As curvas de redução sonora obtidas para a posição P1 e P3 apresentam resultados muito similares, verificando-se que é no caso da posição P2 que a maior diferença de resultados se verifica. Esta diferença pode ser justificada pelo paralelismo existente entre a posição de fonte definida e os bordos da lajeta de betão, o que poderá estar a excitar um modo de vibração da lajeta de betão.

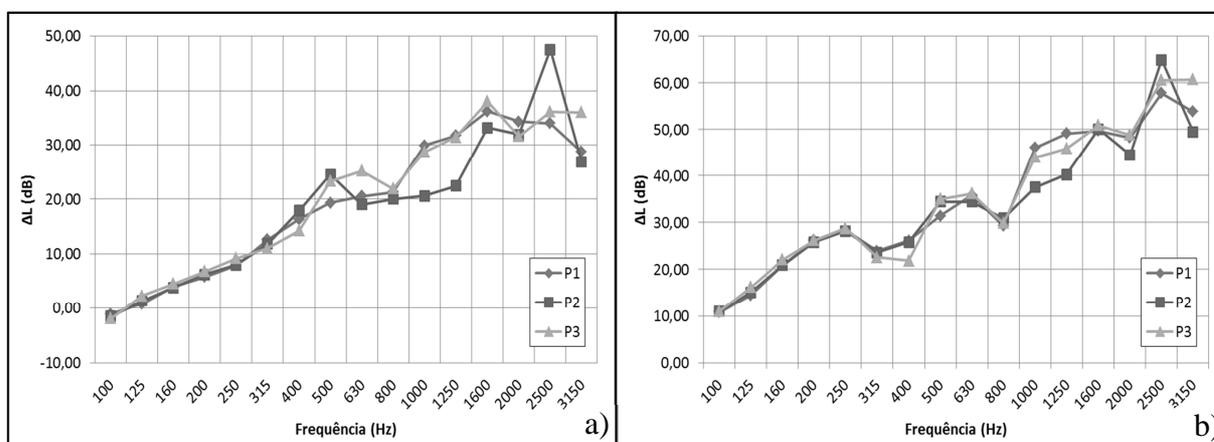


Figura 3.5 – Redução sonora produzida pelas posições de fonte P1, P2 e P3 ao ensaiar uma lajeta de 4cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha: a) com espessura 4,5mm; b) com espessura variável 15/7mm.

A Figura 3.6 apresenta a curva de redução sonora média das 3 posições de fonte e o desvio padrão correspondente.

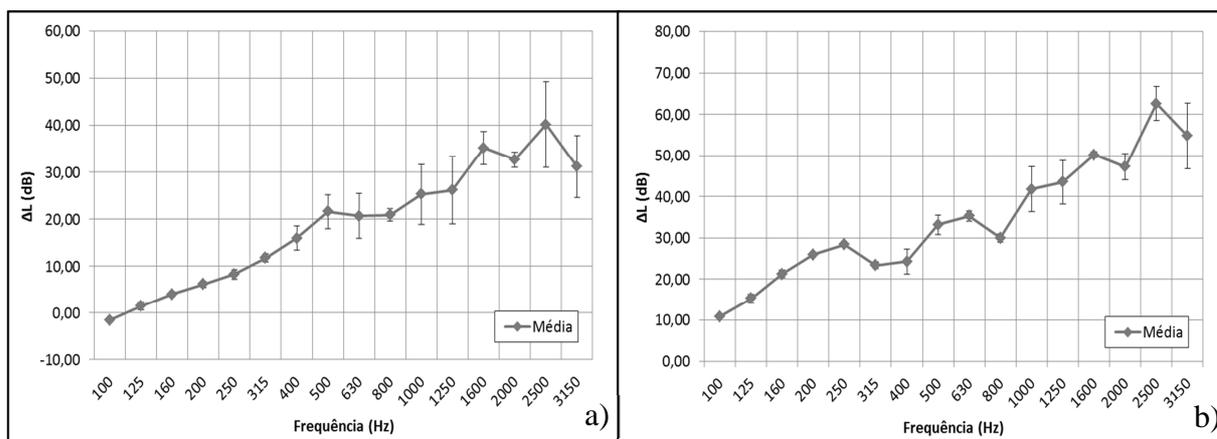


Figura 3.6 – Redução sonora média para as três posições de fonte e desvio padrão correspondente obtidos ao ensaiar uma lajeta de 4cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha com a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm.

Da análise destes resultados verifica-se que, para as três posições de fonte, o desvio padrão tende a aumentar ao longo da banda de frequências, embora ocorram algumas oscilações. No caso do sistema de lajeta flutuante com uma manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura o desvio padrão varia entre 0,5dB e 9,1dB e entre 0,1dB e 8,0dB no caso do sistema de lajeta flutuante com uma manta flexível de aglomerado de borracha com espessura variável 15/7mm. Em ambas as situações, os desvios máximos são observados ao nível das altas frequências, sendo que o desvio máximo no caso do sistema de lajeta flutuante com uma manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura é obtido para a frequência dos 2500Hz e na frequência dos 3150Hz, no caso do sistema de lajeta flutuante com manta flexível de aglomerado de borracha de espessura variável 15/7mm. Os desvios mais baixos verificam-se ao nível das baixas frequências, nunca ultrapassando os 3,0dB.

3.2.1.2 Influência da posição do recetor

A influência da posição do recetor foi avaliada utilizando as 8 posições definidas na face inferior da laje (A1,A2,...,A8). Adotou-se como posição de fonte a posição P1. A título de exemplo foram mais uma vez selecionados os resultados obtidos para uma lajeta de dimensões 0,50mx0,50m e 4cm de espessura sobre dois tipos de manta flexível de aglomerado de borracha já referidos. A média das 8 posições de acelerómetro e o desvio padrão correspondente encontram-se representados na Figura 3.7.

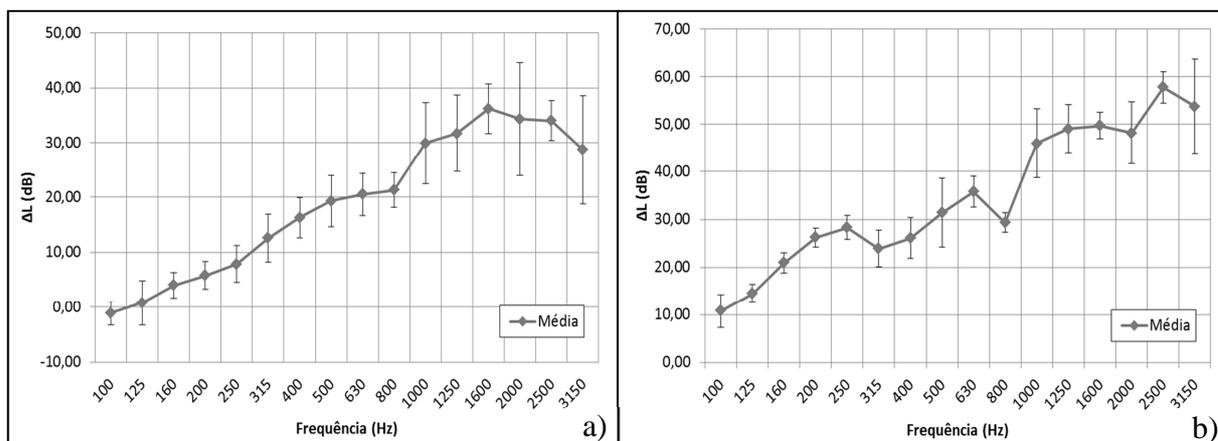


Figura 3.7 – Redução sonora resultante da atuação da fonte na posição P1 nas oito posições de recetor e desvio padrão correspondente obtidos ao ensaiar uma lajeta de 4cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha com a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm.

Da análise dos resultados obtidos observa-se que, tal como no caso anterior, o desvio padrão para as 8 posições de acelerómetro tende a aumentar com o aumento da frequência, embora ocorram algumas oscilações. No caso do sistema de lajeta flutuante com uma manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura, o desvio padrão varia entre 2,1dB e 10,3dB e entre 1,9dB e 9,9dB no caso do sistema de lajeta flutuante com uma manta flexível de aglomerado de borracha com espessura variável 15/7mm. Em ambos os casos, os desvios máximos são observados ao nível das altas frequências, sendo que o desvio máximo no caso do sistema de lajeta flutuante com uma manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura obtido para a frequência dos 2000Hz e na frequência dos 3150Hz, no caso do sistema de lajeta flutuante com manta flexível de aglomerado de borracha de espessura variável 15/7mm. Os desvios mais baixos verificam-se mais uma vez ao nível das baixas frequências nunca ultrapassando os 5,0dB.

Procurou-se ainda avaliar a influência do posicionamento dos acelerómetros na face superior ou inferior da laje na obtenção da redução sonora de um sistema de lajeta flutuante. De notar que o posicionamento do acelerómetro na face superior da laje facilita a execução do ensaio tornando-se, desta forma, importante a realização desta análise. Assim, são apresentados na Figura 3.8 os resultados obtidos para um sistema de lajeta flutuante adotando como camada resiliente as mantas flexíveis de aglomerado de borracha já referidas. Da análise destes gráficos verifica-se que a utilização de posições de acelerómetro localizadas na face superior ou inferior da laje conduz a resultados bastante próximos, embora ocorram algumas oscilações, nomeadamente ao nível das médias e altas frequências. Apesar destas oscilações, as curvas de redução sonora resultante são bastante similares, podendo concluir-se que ambas as superfícies podem ser utilizadas. No entanto, outros fatores, como a dimensão da lajeta de

betão condicionam o posicionamento dos acelerômetros. Para lajetas de maiores dimensões torna-se inviável o posicionamento na face superior da laje, dado que as dimensões da laje e da lajeta de betão são similares.

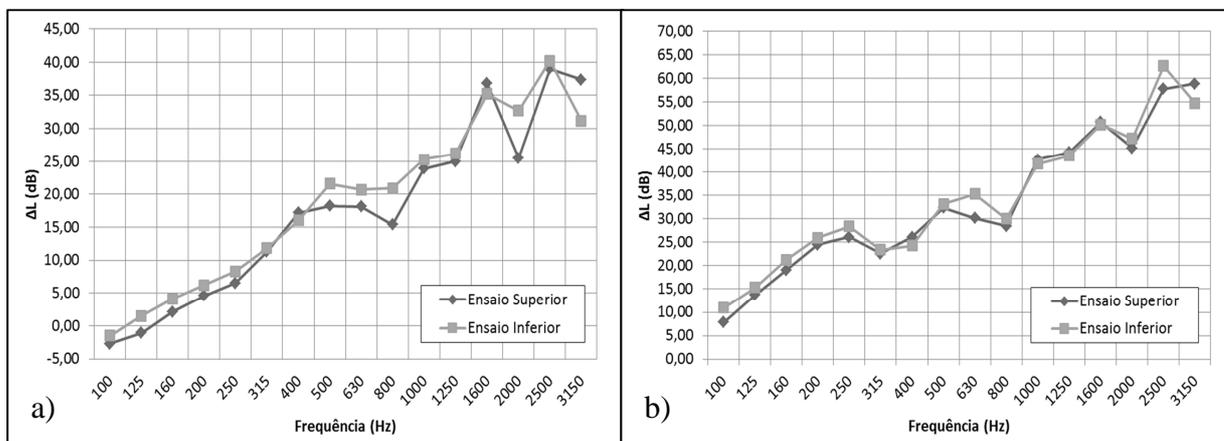


Figura 3.8 – Redução sonora produzida pelas posições de fonte P1, P2 e P3 nas posições de acelerómetro localizadas na face superior e inferior da laje para uma lajeta de 4cm sobre manta flexível de aglomerado de borracha com a) espessura 4,5mm; b) espessura variável 15/7mm.

3.2.1.3 Influência do ruído ambiente

Vários autores testaram o método ISO/CD16251-1 e verificaram a influência do ruído ambiente nas medições. Se o nível de vibração ambiente se encontrar 10 dB abaixo do nível de vibração medido com a máquina de percussão em funcionamento, considera-se que não haverá necessidade de fazer correções. Atendendo aos resultados obtidos por diversos autores, verificou-se que o ruído ambiente não influenciava as medições efetuadas pelo que, no presente trabalho, este parâmetro não foi considerado.

3.3 Outros métodos de avaliação experimental não normalizados

Para além do método ISO/CD16251-1, foram também analisadas outras duas metodologias de ensaio: medição no pavimento da câmara acústica reverberante existente no DEC e medição em câmara reverberante de dimensões reduzidas, construída também nesta instituição.

3.3.1 Medição no pavimento de uma câmara acústica

O método de medição no pavimento de uma câmara acústica é idêntico ao método ISO/CD16251-1, no entanto, a laje de betão é substituída pelo pavimento de uma câmara acústica existente no DEC, onde são registados os níveis de vibração sem e com a lajeta flutuante aplicada. A Figura 3.9 ilustra a metodologia apresentada.



Figura 3.9 – Fotografia ilustrativa do método de medição no pavimento de uma câmara acústica.

Para o método de medição no pavimento de uma câmara acústica foram utilizados os equipamentos já referidos. À semelhança do método ISO/CD16251-1 foram definidas posições de acelerómetro e posições de fonte. Neste caso, foram adotadas 5 posições de acelerómetro (A1, A2, ... A5) e 3 posições de fonte sonora distintas (P1, P2, P3) ilustradas na Figura 3.10. Mais uma vez procurou-se evitar posições de simetria e paralelismo. Para cada posição de acelerómetro foi efetuado um registo. O procedimento é repetido para cada posição de fonte sonora. Os registos foram efetuados de modo a obter os níveis de vibração em bandas de 1/3 de oitava dos 100Hz aos 3150Hz.

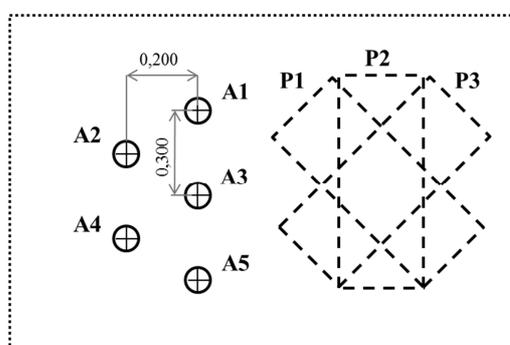


Figura 3.10 – Fotografia ilustrativa do método de medição no pavimento de uma câmara acústica e esquema das posições de acelerómetro (A1 a A5) e de fonte sonora (P1 a P3).

O procedimento de ensaio é idêntico ao utilizado no método ISO/CD16251-1. Inicialmente são realizadas medições de níveis de vibração no pavimento da câmara acústica sem o revestimento aplicado ($L_{a,0}$). Posteriormente é colocada a amostra de revestimento a analisar sendo registado o nível de vibração correspondente ($L_{a,1}$). A redução sonora é obtida através da expressão 3.1.

3.3.2 Medição numa câmara reverberante de dimensões reduzidas

Por último, procedeu-se à avaliação da redução sonora a ruídos de percussão, proporcionada por sistemas de lajeta flutuante, numa câmara reverberante de dimensões reduzidas desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Para o método de medição em câmara reverberante de dimensões reduzidas foram utilizados os equipamentos já referidos. À semelhança das outras metodologias de ensaio, foram definidas nove posições de fonte sonora (P1, P2,..., P9), na laje de referência e uma posição de microfone M1, no interior da câmara de dimensões reduzidas. As amostras foram também colocadas nas nove posições de fonte sonora. Estas posições de microfone e de fonte sonora tiveram por base trabalhos anteriores, nomeadamente o trabalho de Tavares, 2009, no qual foram obtidos resultados satisfatórios utilizando as posições de fonte sonora e de microfone referidas. Para cada posição de fonte sonora, foram efetuados 2 registos. Os registos foram efetuados de modo a obter os níveis de vibração em bandas de 1/3 de oitava dos 100Hz aos 3150Hz. Um esquema da posição do microfone e das posições de fonte sonora encontra-se representado na Figura 3.11.

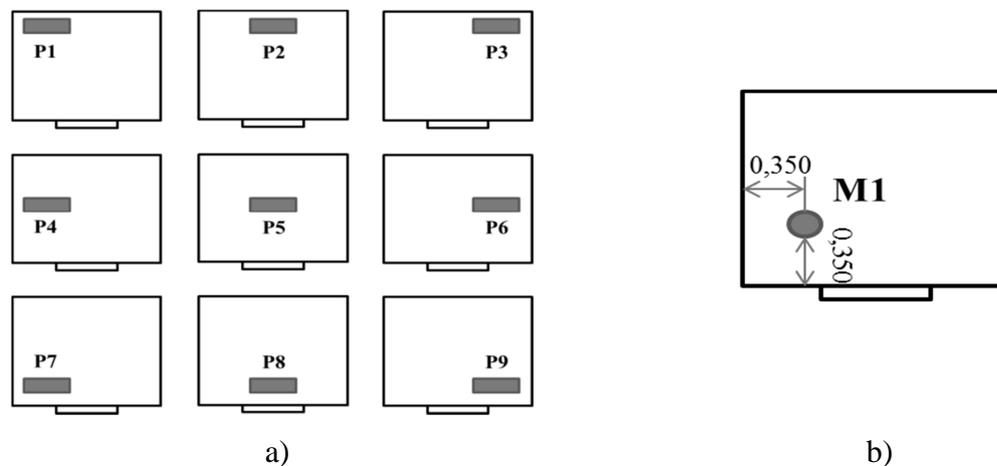


Figura 3.11 – Esquema das posições definidas na laje de referência da câmara reverberante de dimensões reduzidas: a) Posições de fonte (P1 a P9); b) Posição do microfone M1.

A redução sonora é obtida através da seguinte expressão:

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \quad (3.4)$$

Onde:

$L_{n,0}$ - Nível de pressão sonora de impacto obtido na laje de referência da câmara reverberante de dimensões reduzidas sem a amostra aplicada (dB).

Este pode ser obtido através da expressão:

$$L_{n,0} = 20\log\left(\frac{P_{n,0}}{P_0}\right) \quad (3.5)$$

$P_{n,0}$ – Pressão sonora medida na laje de referência da câmara reverberante de dimensões reduzidas sem a amostra aplicada (Pa).

P_0 – Pressão de referência de valor igual a 2×10^{-5} Pa.

L_n – Nível de pressão sonora de impacto obtido na laje de referência da câmara reverberante de dimensões reduzidas com a amostra aplicada (dB). Este pode ser obtido através da expressão:

$$L_n = 20\log\left(\frac{P_n}{P_0}\right) \quad (3.6)$$

P_n – Pressão sonora medida na laje de referência da câmara reverberante de dimensões reduzidas com a amostra aplicada (Pa).

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos três métodos de avaliação experimental não normalizados analisados no presente trabalho.

Primeiramente serão apresentados os resultados dos ensaios realizados de acordo com o método descrito no documento técnico ISO/CD16251-1. Através deste método de avaliação experimental não normalizado foram ensaiados vários tipos de camada resiliente, sobre os quais assentam lajetas de betão com várias áreas e espessuras. Como camada resiliente, foram analisadas mantas flexíveis de aglomerado de borracha com espessura uniforme de 4,5mm e de espessura variável 15/7mm; placas de fibra de coco com 10mm e 20mm de espessura e aglomerado de espuma de poliuretano com densidades 120kg/m^3 e 200kg/m^3 e espessuras 5mm, 10mm e 30mm. Procurou-se avaliar a influência da variação da área da lajeta de betão, mantendo a espessura e a influência da variação da espessura da lajeta de betão na redução sonora. Desta forma, foram construídas lajetas de betão de dimensões 0,50mx0,50m, 0,80mx0,80m e 1,20mx0,80m com 4cm de espessura e lajetas de betão com dimensões 0,50mx0,50m e espessuras 4cm, 8cm e 12cm.

Estes resultados serão posteriormente comparados com os resultados dos ensaios realizados de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008, obtidos através da consulta de relatórios de ensaio do fabricante, realizados no LNEC e do NI&DEA-FEUP e com os resultados obtidos através de duas outras metodologias de ensaio não normalizadas: medição em pavimento de câmara reverberante e medição em câmara acústica de dimensões reduzidas. De referir que a norma NP EN ISO 140-8:2008 foi substituída em 2010 pela norma EN ISO 10140-3:2010 e EN ISO 10140-4:2010. Contudo, faz-se referência à norma NP EN ISO 140-8:2008, uma vez que à data da realização dos ensaios segundo a metodologia normalizada, cujos resultados serão objeto de comparação neste trabalho, a norma NP EN ISO 140-8:2008 encontrava-se ainda em vigor. Não se verificam, no entanto, diferenças significativas entre as duas normas.

Por último será efetuada uma comparação dos resultados obtidos através dos três métodos de avaliação experimental não normalizados, com a reta obtida através da fórmula da EN 12354-2:2000.

4.2 Caracterização do método ISO/CD 16251-1 para sistemas de lajeta flutuante

Tal como já referido anteriormente, para o método ISO/CD 16251-1 foram definidas 8 posições de acelerómetro (A1, A2, ..., A8) e 3 posições de fonte sonora (P1, P2, P3). Para cada posição de acelerómetro foi efetuado um registo, sendo este procedimento repetido para cada posição de fonte sonora.

4.2.1 Método ISO/CD16251-1 vs. NP EN ISO140-8:2008 (método normalizado): Mantas flexíveis de aglomerado de borracha

De forma a ilustrar o comportamento do sistema, procedeu-se primeiramente ao ensaio de uma lajeta de betão com dimensões 0,50mx0,50m e 4cm de espessura sobre uma manta flexível de aglomerado de borracha com espessura uniforme de 4,5mm e com espessura variável, sendo a máxima de 15mm e a mínima de 7mm.

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados obtidos para um sistema de lajeta flutuante com manta flexível de aglomerado de borracha de 4,5mm de espessura, cujo índice de redução sonora, facultado pelo fabricante, é de 20dB e com manta flexível de aglomerado de borracha com espessura variável 15/7mm cujo índice de redução sonora, facultado pelo fabricante, é de 24dB. São ainda apresentados os respetivos resultados para o ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008 utilizando uma lajeta de betão com 4cm de espessura.

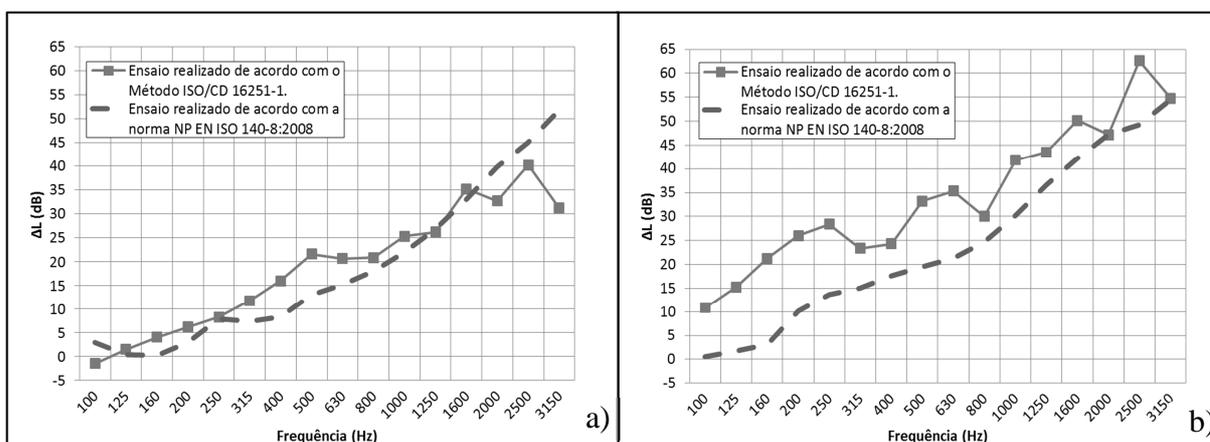


Figura 4.1 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD16251-1 para ensaiar uma lajeta com 4 cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha com: a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm, vs. Metodologia normalizada.

Analisando os resultados obtidos verifica-se, em ambos os casos, que a curva de redução sonora obtida através do método ISO/CD 16251-1 apresenta, ao longo de toda a banda de frequências, um desenvolvimento semelhante à curva de redução sonora obtida através do

ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008, ocorrendo apenas algumas oscilações. Estas são devidas aos modos próprios de vibração da lajeta de betão. No caso do ensaio normalizado, estas oscilações não se encontram tão evidenciadas pelo facto de ser adotada uma lajeta de betão com uma área de 10m^2 . Para a dimensão de lajeta analisada verifica-se que estas oscilações ocorrem em frequências mais elevadas. No caso do revestimento que confere um desempenho acústico superior observa-se uma diferença mais notória entre os resultados obtidos, nomeadamente ao nível das médias e baixas frequências. Verifica-se ainda que os resultados do ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1 conduzem a valores de redução sonora superiores aos obtidos através do ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008, ao longo de praticamente toda a banda de frequências.

Posteriormente efetuou-se uma análise ao nível do índice de redução sonora a sons de percussão. Tal como já referido anteriormente, o índice de redução sonora é obtido através da diferença entre o índice de isolamento a sons de percussão de um pavimento de referência, sem e com o revestimento aplicado, tal como indicado na norma NP EN ISO 717-2:2009. Para determinar o índice de isolamento a sons de percussão, a partir de resultados de medição por bandas de frequência com largura de um terço de oitava, deve efetuar-se o ajuste da curva de referência, definida na norma NP EN ISO 717-2:2009, por patamares de 1dB, relativamente à curva dos valores medidos, de modo a que a soma dos desvios desfavoráveis seja o maior possível, mas nunca superior a 32dB. Para o ajuste da curva de referência, valores localizados acima da curva de referência são tidos como desfavoráveis para o cálculo do índice de redução sonora a sons de percussão. A Figura 4.2 apresenta a curva de redução sonora, convertida para um pavimento de referência indicado na norma NP EN ISO717-2:2009 e o respetivo ajuste, com vista à determinação do índice de isolamento a sons de percussão.

Da observação desta figura retira-se que o cálculo do índice de isolamento a sons de percussão do pavimento de referência com o revestimento aplicado ($L_{n,r,w}$), no caso do revestimento com menor desempenho acústico, é condicionado pelos valores nas baixas frequências e por um pico existente na frequência dos 3150Hz. Para o revestimento com menor desempenho acústico, o índice de isolamento a sons de percussão do pavimento de referência com o revestimento aplicado ($L_{n,r,w}$), obtido pelo método em análise, é igual a 57dB. O índice de isolamento a sons de percussão do pavimento de referência sem o revestimento aplicado ($L_{n,r,0,w}$) é segundo a norma NP EN ISO 717-2:2009 igual a 78dB. O índice de redução sonora apresenta assim, um desvio de 1dB relativamente ao valor normalizado, sendo igual a 21dB. Para o revestimento com desempenho acústico superior, esta situação já não se verifica. As curvas de redução sonora relativas ao método em análise e ao método normalizado apresentam uma diferença significativa de resultados ao nível das

baixas e médias frequências. O cálculo do índice de redução sonora a sons de percussão é, neste caso, condicionado pelas baixas frequências e por alguns picos existentes na frequência dos 800Hz e no intervalo de frequências entre 315Hz e os 500Hz. O índice de isolamento a sons de percussão do pavimento de referência com o revestimento aplicado ($L_{n,r,w}$) é, neste caso, igual a 42dB. Sendo o índice de isolamento a sons de percussão do pavimento de referência sem o revestimento aplicado ($L_{n,r,0,w}$) igual a 78dB, tal como definido na norma NP EN ISO717-2:2009, obtém-se um valor de índice de redução sonora com um desvio de cerca de 12dB relativamente ao valor normalizado, sendo igual a 36dB.

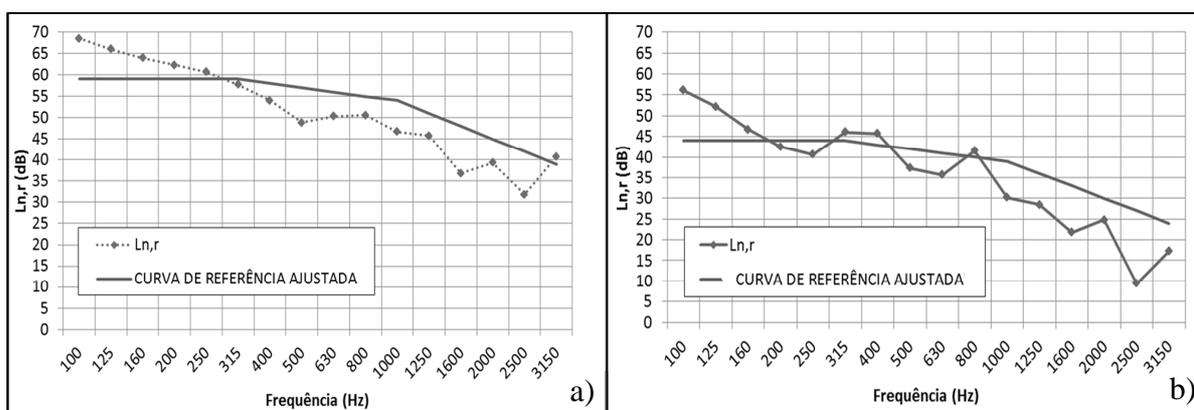


Figura 4.2 – Ajuste da curva de referência utilizando uma lajeta com 4cm de espessura sobre manta flexível de aglomerado de borracha com: a) espessura de 4,5mm; b) espessura variável 15/7mm.

4.2.1.1 Influência da variação da área da lajeta, mantendo a espessura

Com vista à avaliação da influência da variação da área da lajeta mantendo a espessura, foram construídas lajetas de betão com dimensões: 0,5mx0,5mx0,04m; 0,8mx0,8mx0,04m e 1,2mx0,8mx0,04m de espessura e com uma área de 0,25m², 0,64m² e 0,96m² respetivamente. Estas lajetas de betão foram ensaiadas, utilizando a metodologia de ensaio descrita no documento técnico ISO/CD16251-1, sobre as mantas flexíveis de aglomerado de borracha com espessura uniforme e espessura variável já referidas.

A Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos utilizando como camada resiliente as mantas flexíveis já referidas. Foi adicionada ainda a curva de redução sonora normalizada, resultante do ensaio em câmara reverberante, com uma lajeta com área igual a 10m², conforme a norma NP EN ISO140-8:2008.

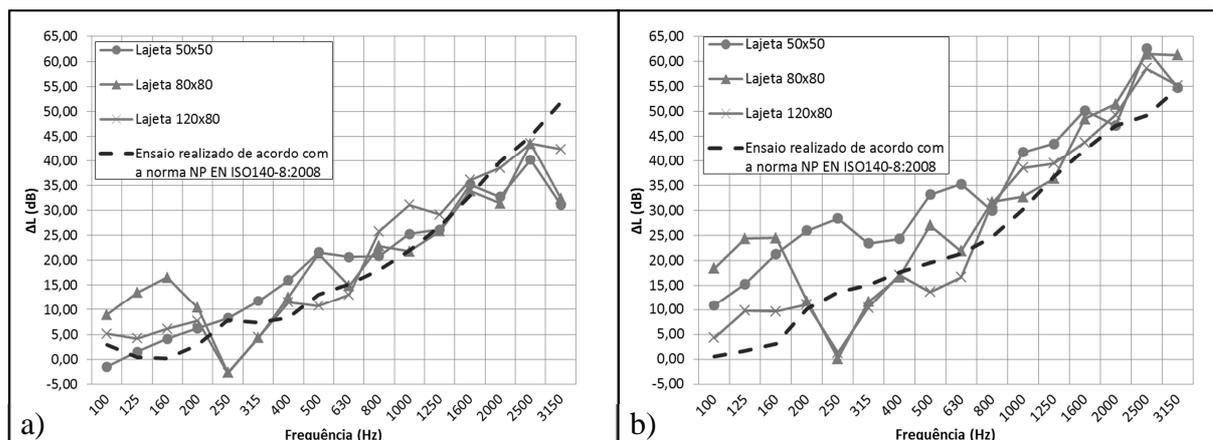


Figura 4.3 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD 16251-1 para as diversas áreas de lajeta sobre manta flexível de aglomerado de borracha com a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm, vs. Metodologia normalizada.

Da análise dos resultados retira-se que, para lajetas de maior área, o comportamento da curva de redução sonora obtida é similar ao comportamento registado para uma lajeta de dimensões 0,50mx0,50mx0,04m e área igual a 0,25m². Observa-se uma aproximação da curva de redução sonora obtida através do método ISO/CD16251-1 relativamente ao ensaio normalizado, com a ocorrência de algumas oscilações, à medida que aumenta a área da lajeta. Estas oscilações, tal como já referido, são devidas aos modos próprios de vibração da lajeta, que apresentam áreas muito inferiores à lajeta de betão com uma área de 10m² utilizada no ensaio normalizado. Observa-se que estas oscilações tendem a deslocar-se para frequências mais baixas à medida que aumenta a dimensão da lajeta mantendo-se, no entanto, dentro da gama de frequências em análise.

Efetuu-se seguidamente uma análise ao nível do índice de redução sonora a sons de percussão. O Quadro 4.1 apresenta os valores de índice de redução sonora a sons de percussão obtidos para as diversas áreas de lajeta sobre as mantas flexíveis de aglomerado de borracha já mencionadas. Da análise deste quadro, observa-se que no caso do revestimento com menor desempenho acústico, o índice de redução sonora a sons de percussão tende a aproximar-se do valor normalizado à medida que aumenta a área da lajeta. Verifica-se no caso da lajeta de dimensões 0,80mx0,80mx0,04m um desvio de 2dB, relativamente ao valor normalizado, desvio este que é dissipado ao aumentar a dimensão da lajeta para 1,20mx0,80mx0,04m. No caso do revestimento com maior desempenho acústico, verifica-se uma diminuição significativa do valor do índice de redução sonora a sons de percussão, relativamente ao valor normalizado, atingindo-se um valor idêntico ao valor normalizado para a lajeta de dimensões 1,20mx0,80mx0,04m.

Quadro 4.1 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos utilizando várias áreas de lajeta com 4cm de espessura, sobre mantas flexíveis de aglomerado de borracha, vs. Metodologia normalizada.

Material	ΔL_w (dB)			
	Ensaio realizado de acordo com a norma ISO 140-8:2008	Ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1		
		0,50m x 0,50m	0,80m x 0,80m	1,20m x 0,80m
Manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura	20	21	23	20
Manta flexível de aglomerado de borracha de espessura variável 15/7mm	24	36	28	24

4.2.1.2 Influência da variação da espessura da lajeta

Com vista à avaliação da influência da variação da espessura da lajeta foram construídas, como já referido anteriormente, lajetas de betão com dimensões em planta 0,50mx0,50m e três espessuras distintas: 4cm, 8cm e 12cm. Para esta análise foram tidos em conta mais uma vez os resultados obtidos utilizando como camada resiliente as mantas flexíveis de aglomerado de borracha já referidas, no entanto, a medição foi efetuada na face superior da lajeta de betão. Os resultados encontram-se apresentados na Figura 4.4.

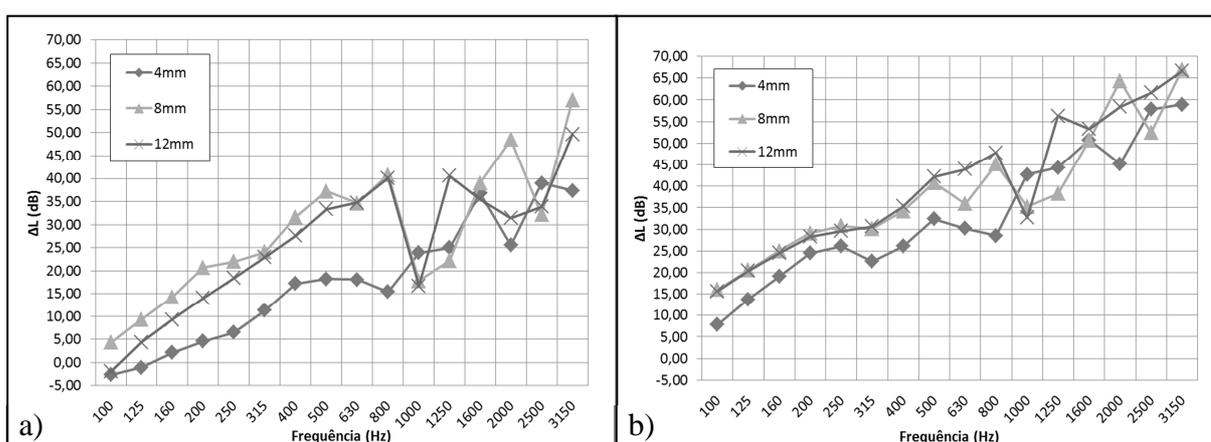


Figura 4.4 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD 16251-1 para ensaiar lajetas de diversas espessuras sobre manta flexível de aglomerado de borracha com: a) 4,5mm de espessura; b) espessura 15/7mm.

Da análise destes gráficos observa-se que quando se aumenta a espessura da lajeta de 4 cm para 8 cm, a redução sonora aumenta de forma significativa. No entanto, nas altas frequências, surgem oscilações de amplitude considerável, possivelmente resultantes de ressonâncias no interior da placa. Para a lajeta de espessura 12cm sobre o material com menor desempenho acústico ocorre uma inversão de desempenho, observando-se que a redução sonora é inferior à obtida para a lajeta com 8 cm. Este comportamento poderá dever-se ao facto desta lajeta, com massa superficial significativa, estar a comprimir a manta flexível de menor desempenho acústico, conduzindo a que esta se comporte de forma mais rígida, e promovendo, deste modo, uma maior transmissão sonora.

Para o caso da lajeta sobre o revestimento com melhor desempenho acústico, observa-se igualmente, uma melhoria do desempenho acústico do sistema quando se aumenta a espessura de 4cm para 8 cm, verificando-se que o aumento de espessura de 8cm para 12 cm não conduz a ganhos significativos da redução sonora. Mais uma vez verificam-se oscilações de alguma amplitude ao nível das altas frequências, no entanto, com uma amplitude menos significativa do que no caso do revestimento de menor desempenho acústico.

Seguidamente efetuou-se uma análise ao nível do índice de redução sonora a sons de percussão. O Quadro 4.2 apresenta os valores de índice de redução sonora a sons de percussão obtidos para as várias espessuras de lajeta analisadas sobre as mantas flexíveis de aglomerado de borracha já referidas.

Quadro 4.2 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos utilizando lajetas com várias espessuras sobre mantas flexíveis de aglomerado de borracha, vs. Metodologia normalizada.

Material	ΔL_w (dB)			
	Ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008 (Lajeta com 4cm)	Ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1		
		4cm	8cm	12cm
Manta flexível de aglomerado de borracha 4,5mm de espessura	20	20	27	25
Manta flexível de aglomerado de borracha de espessura variável 15/7mm	24	35	41	41

Em ambos os casos, verifica-se que o índice de redução sonora a sons de percussão, obtido para as três espessuras de lajeta de betão analisadas, é superior ao valor normalizado, verificando-se desvios de 5dB e 17dB para a lajeta de espessura 12cm sobre a manta flexível de aglomerado de borracha de espessura uniforme 4,5mm e de espessura variável 15/7mm respetivamente.

Em suma, ao aumentar a área da lajeta verifica-se, uma aproximação da curva de redução sonora relativamente à curva obtida através do ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008. Caso fossem objeto de estudo lajetas com dimensões superiores às analisadas, seria expectável que a curva de redução sonora obtida tendesse a aproximar-se ainda mais do resultado normalizado. Ao aumentar a espessura da lajeta, observa-se que para uma lajeta com 12cm de espessura, o desempenho acústico é quase sempre inferior ao verificado para uma lajeta com 8cm de espessura. Ao nível do índice de redução sonora a sons de percussão observa-se que, os valores obtidos ao aumentar a área da lajeta tendem a aproximar-se do valor normalizado atingindo-se, no caso das duas mantas analisadas e para uma lajeta de dimensões 1,20mx0,80mx0,04m, um valor idêntico ao normalizado. Apesar de idênticos, estes valores de índice de redução sonora são fortemente condicionados pelo ajuste da curva de referência, podendo conduzir a falsas conclusões. A fiabilidade do método em análise não deve ser avaliada com base nos valores de índice de redução sonora a sons de percussão obtidos.

4.2.2 Método ISO/CD16251-1 vs. NP EN ISO140-8:2008 (método normalizado): Placas de fibra de coco

Um outro tipo de material resiliente analisado foram as placas de fibra de coco de 10mm e 20mm de espessura, que apresentam um índice de redução sonora, facultado pelo fabricante, de 22dB e 24dB respetivamente. Na Figura 4.5 são apresentados os resultados referentes à redução sonora obtida para o ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD 16251-1 e o ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008 para um sistema de lajeta flutuante com lajeta de dimensão 0,50mx0,50mx0,04m sobre uma placa de fibra de coco com 10mm e 20mm de espessura.

Analisando as curvas de redução sonora obtidas verifica-se que, no caso das fibras de coco, o método ISO/CD16251-1 conduz a um desempenho acústico muito superior ao verificado através do ensaio normalizado. Tal como no caso das mantas flexíveis de aglomerado de borracha, verificam-se oscilações na curva de redução sonora, nomeadamente ao nível das médias e altas frequências. Estas oscilações são devidas aos modos próprios de vibração da lajeta de betão que apresentam áreas muito mais reduzidas do que a área da lajeta utilizada no ensaio normalizado. Observam-se diferenças de amplitude muito significativas entre os dois métodos de avaliação experimental atingindo-se desvios máximos que, em alguns casos, são

próximos dos 30dB. Verifica-se assim que, para a dimensão de lajeta analisada, o método ISO/CD16251-1 não conduz a bons resultados.

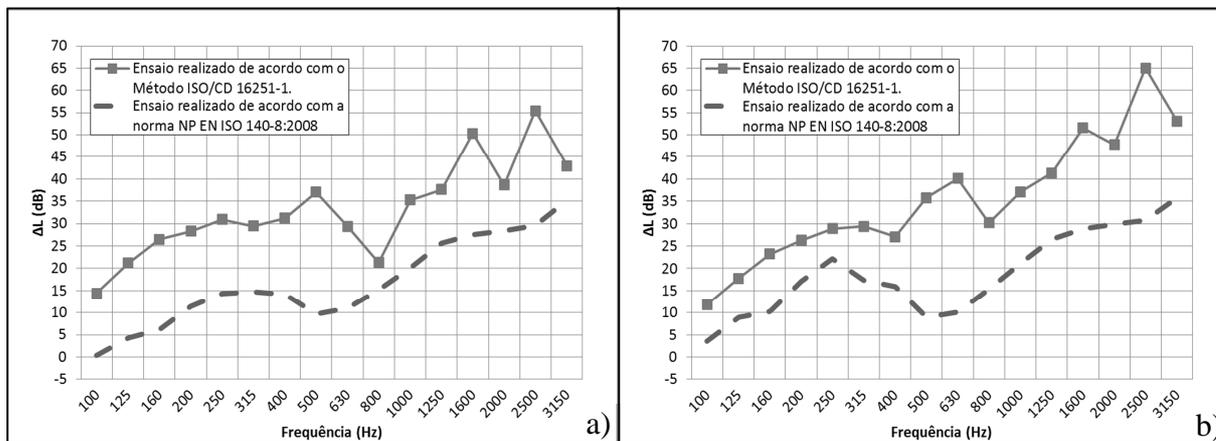


Figura 4.5 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD16251-1 para ensaiar uma lajeta com 4 cm de espessura sobre: a) placa de fibra de coco com 10mm de espessura b) placa de fibra de coco com 20mm de espessura, vs. Metodologia normalizada.

Analisou-se posteriormente o índice de redução sonora a sons de percussão para a solução apresentada. A Figura 4.6 apresenta a curva de redução sonora, convertida para um pavimento de referência indicado na norma NP EN ISO 717-2:2009 e o respetivo ajuste, com vista à determinação do índice de redução sonora a sons de percussão.

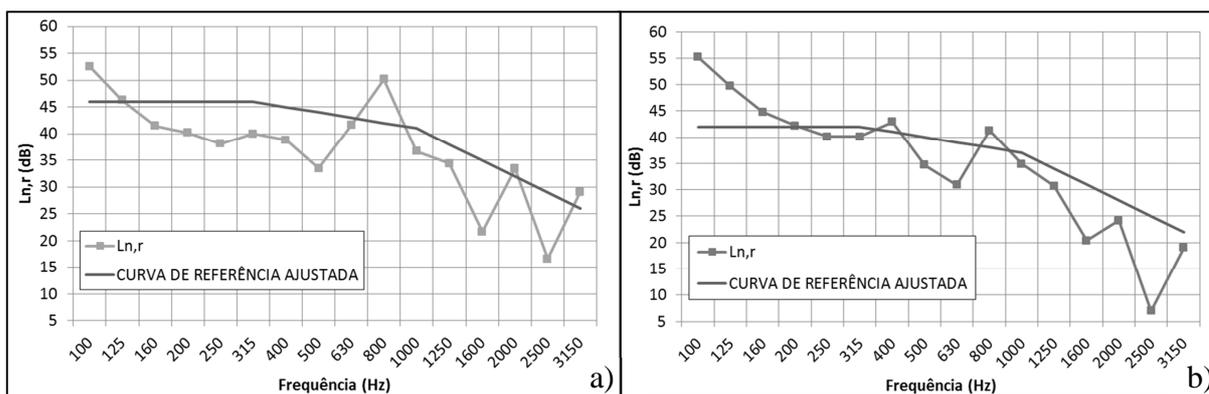


Figura 4.6 – Ajuste da curva de referência utilizando uma lajeta com 4cm de espessura sobre: a) placa de fibra de coco com 10mm de espessura b) placa de fibra de coco com 20mm de espessura.

Da observação desta figura, verifica-se que o cálculo do índice de isolamento a sons de percussão do pavimento de referência com o revestimento aplicado ($L_{n,r,w}$) é, em ambos os casos, condicionado mais uma vez pelos valores nas baixas frequências e por alguns picos

verificados em algumas frequências. Estes picos, para o caso da placa de fibra de coco com 10mm de espessura, concentram-se essencialmente ao nível das médias e altas frequências, sendo que, para a solução de maior espessura, estes picos tendem a verifica-se ao nível das médias frequências. O índice de redução sonora apresenta assim um desvio de 12dB e 14dB relativamente ao valor normalizado, sendo igual a 34dB e 38dB, no caso de uma placa de fibra de coco com 10mm e 20mm de espessura respetivamente.

4.2.2.1 Influência da variação da área da lajeta, mantendo a espessura

A Figura 4.7 apresenta os resultados obtidos, utilizando como camada resiliente, placas de fibra de coco de 10mm e 20mm. Mais uma vez, foi adicionada a curva de redução sonora normalizada, resultante do ensaio em câmara reverberante, com lajeta de espessura 4cm e uma área de 10 m², conforme a norma NP EN ISO 140-8:2008. Da análise desta figura, observa-se que a tendência de aproximação das curvas de redução sonora obtidas através do método em análise, relativamente ao ensaio normalizado se mantém, à medida que se aumenta a área da lajeta de betão. Verifica-se ainda que para as várias áreas de lajeta, o desempenho acústico obtido através do ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1, é superior ao obtido no caso do ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008. Mais uma vez são verificadas oscilações, nomeadamente ao nível das altas frequências. Estas oscilações tendem a deslocar-se para frequências mais baixas à medida que aumenta a área da lajeta, mantendo-se, no entanto, dentro da gama de frequências em análise.

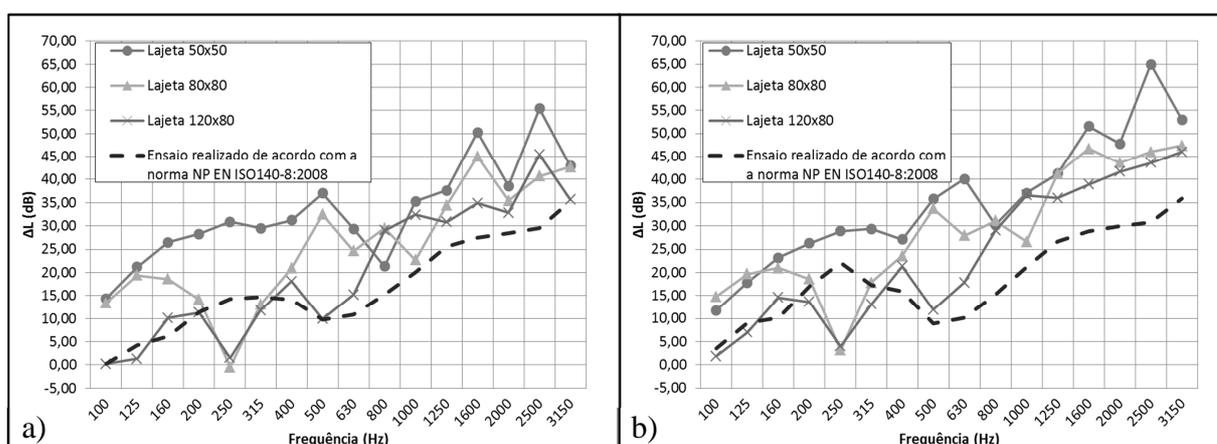


Figura 4.7 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD 16251-1 para as diversas dimensões de lajeta sobre: a) Placa de fibra de coco com 10mm de espessura; b) Placa de fibra de coco com 20mm de espessura, vs. Metodologia normalizada.

O Quadro 4.3 apresenta os valores de índice de redução sonora obtidos no ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1 utilizando como camada resiliente placas de fibra de coco de 10mm e 20mm de espessura.

Quadro 4.3 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos utilizando várias áreas de lajeta com 4cm de espessura sobre placas de fibra de coco, vs. Metodologia normalizada.

Material	ΔL_w (dB)			
	Ensaio realizado de acordo com a norma ISO 140-8:2008	Ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1		
		0,50m x 0,50m	0,80m x 0,80m	1,20m x 0,80m
Placa de fibra de coco com 10mm de espessura	22	34	28	22
Placa de fibra de coco com 20mm de espessura	24	38	32	24

Verifica-se em ambos os casos uma diminuição considerável do valor do índice de redução sonora a sons de percussão relativamente ao valor normalizado, ao aumentar a área da lajeta. No caso da lajeta de dimensões 0,80mx0,80mx0,04m, as duas soluções apresentam um decréscimo significativo do valor do índice de redução sonora a sons de percussão, apresentando as duas soluções, neste caso, um decréscimo de cerca de 6dB. Ao aumentar as dimensões da lajeta para 1,20mx0,80mx0,04m, o valor de índice de redução sonora desce para um valor idêntico ao valor normalizado.

Em suma, ao aumentar a área da lajeta observa-se, mais uma vez, uma aproximação da curva de redução sonora relativamente à curva obtida através do ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008. Ao nível do índice de redução sonora a sons de percussão observa-se que, os valores obtidos ao aumentar a área da lajeta tendem a aproximar-se do valor normalizado atingindo-se, no caso das duas placas de fibra de coco analisadas e para uma lajeta de dimensões 1,20mx0,80mx0,04m, um valor idêntico ao normalizado. Apesar de idênticos, estes valores de índice de redução sonora são fortemente condicionados pelo ajuste da curva de referência, podendo conduzir a falsas conclusões. A fiabilidade do método em análise não deve ser avaliada com base nos valores de índice de redução sonora a sons de percussão obtidos.

4.2.3 Método ISO/CD16251-1 vs. NP EN ISO140-8:2008 (método normalizado adaptado): aglomerados de espuma de poliuretano

Por último foram ensaiados como camada resiliente, aglomerados de espuma de poliuretano de densidade 120kg/m³ e 200kg/m³ e espessuras 5mm, 10mm e 30mm. Na Figura 4.8 são apresentados os resultados da redução sonora obtida para sistemas de lajeta flutuante sobre aglomerado de espuma de poliuretano utilizando o método ISO/CD16251-1 e uma adaptação do método descrito na norma NP EN ISO140-8:2008, uma vez que a lajeta de betão utilizada

apresenta dimensões não normalizadas. De referir que os resultados dos ensaios realizados de acordo com o método ISO/CD16251-1, para a solução apresentada, foram obtidos colocando o acelerómetro na face superior da laje.

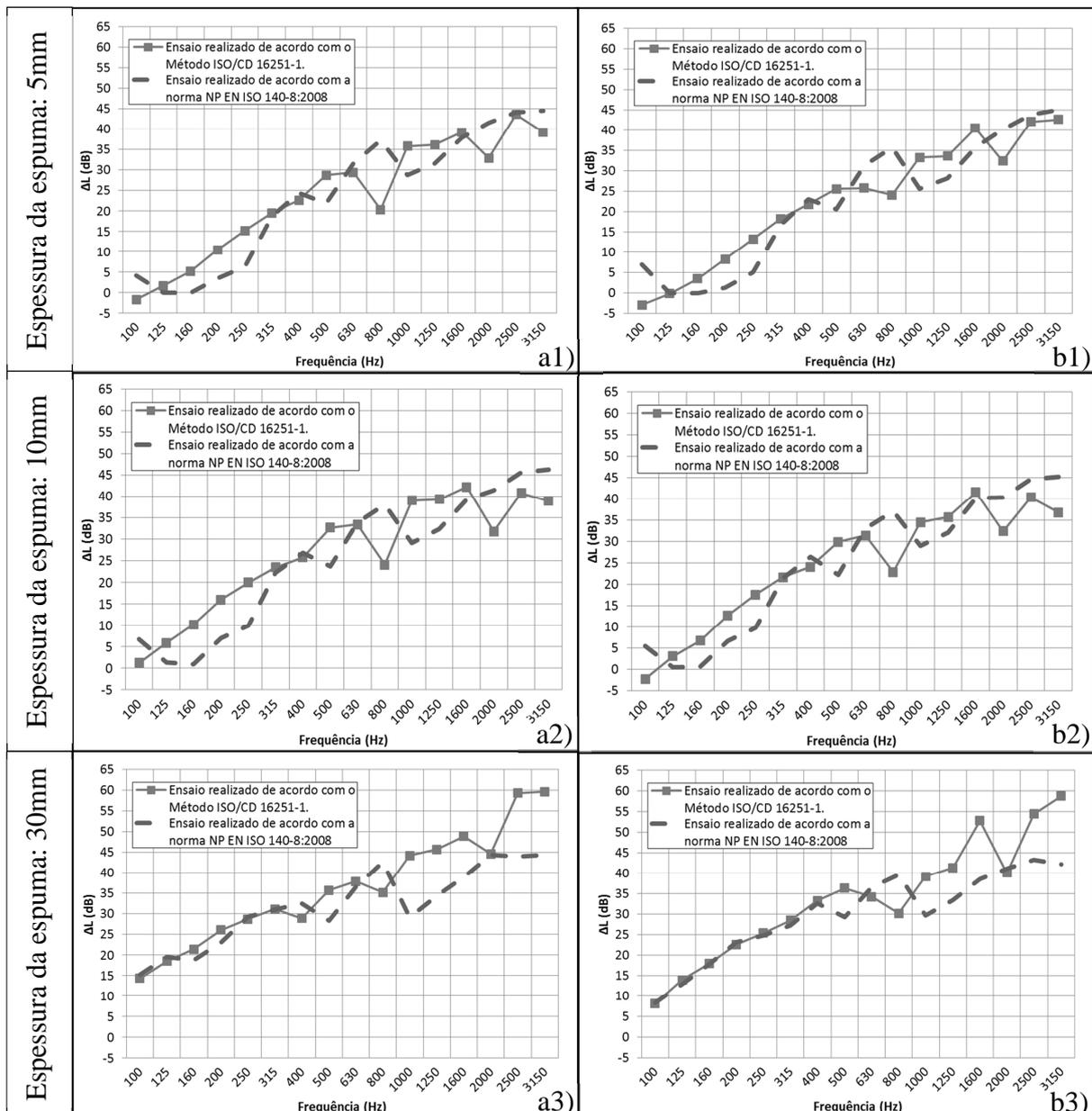


Figura 4.8 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD16251-1 para ensaiar uma lajeta com 4 cm de espessura sobre aglomerados de espuma de poliuretano a) densidade 120kg/m^3 ; b) densidade 200kg/m^3 , vs. Metodologia normalizada.

Nesta figura observa-se mais uma vez a similaridade de resultados, referentes à redução sonora, obtidos através dos dois métodos de avaliação experimental, embora com algumas

oscilações, que como já referido são devidas aos modos próprios de vibração da lajeta de betão. Verificam-se ainda, ao nível das curvas de redução sonora normalizadas, algumas oscilações não observadas nos casos anteriores. Ao contrário das amostras anteriores, os resultados objeto de consulta, foram obtidos seguindo o procedimento descrito na norma NP EN ISO140-8:2008, mas utilizando uma lajeta de betão com dimensões 0,40mx0,60mx0,05m. Desta forma a curva de redução sonora normalizada possui, tal como no ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1 algumas oscilações.

Efetuada uma análise ao nível do índice de redução sonora a sons de percussão, são apresentados no Quadro 4.4 os valores de índice de redução sonora a sons de percussão obtidos para os aglomerados de espuma de poliuretano. Na Figura 4.9, são apresentadas as curvas de redução sonora adaptadas a um pavimento de referência descrito na norma NP EN ISO 717-2:2009 e o respetivo ajuste.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o ajuste das curvas de redução sonora é, em todos os casos, condicionado pelas baixas frequências. O desvio relativamente ao índice normalizado dos aglomerados de espuma de poliuretano de densidade 120kg/m³ é superior ao verificado no caso dos de densidade 200kg/m³, verificando-se desvios entre os 3 e 4dB, no caso dos aglomerados de espuma de poliuretano de densidade 120kg/m³ e no caso dos aglomerados de espuma de poliuretano de densidade 200kg/m³ desvios entre 1 e 2dB. Esta diferença pode ser justificada pelo facto de ao nível das baixas frequências, zona que condiciona o cálculo do índice, a proximidade de resultados ser superior no caso das espumas de poliuretano de densidade superior relativamente às de densidade inferior.

Quadro 4.4 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos utilizando uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerados de espuma de poliuretano, vs. Metodologia normalizada.

Material			Ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008	Ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1
Aglomerado de espuma de poliuretano	Densidade 120kg/m ³	5mm	21	24
		10mm	23	27
		30mm	36	39
	Densidade 200kg/m ³	5mm	21	22
		10mm	23	25
		30mm	34	35

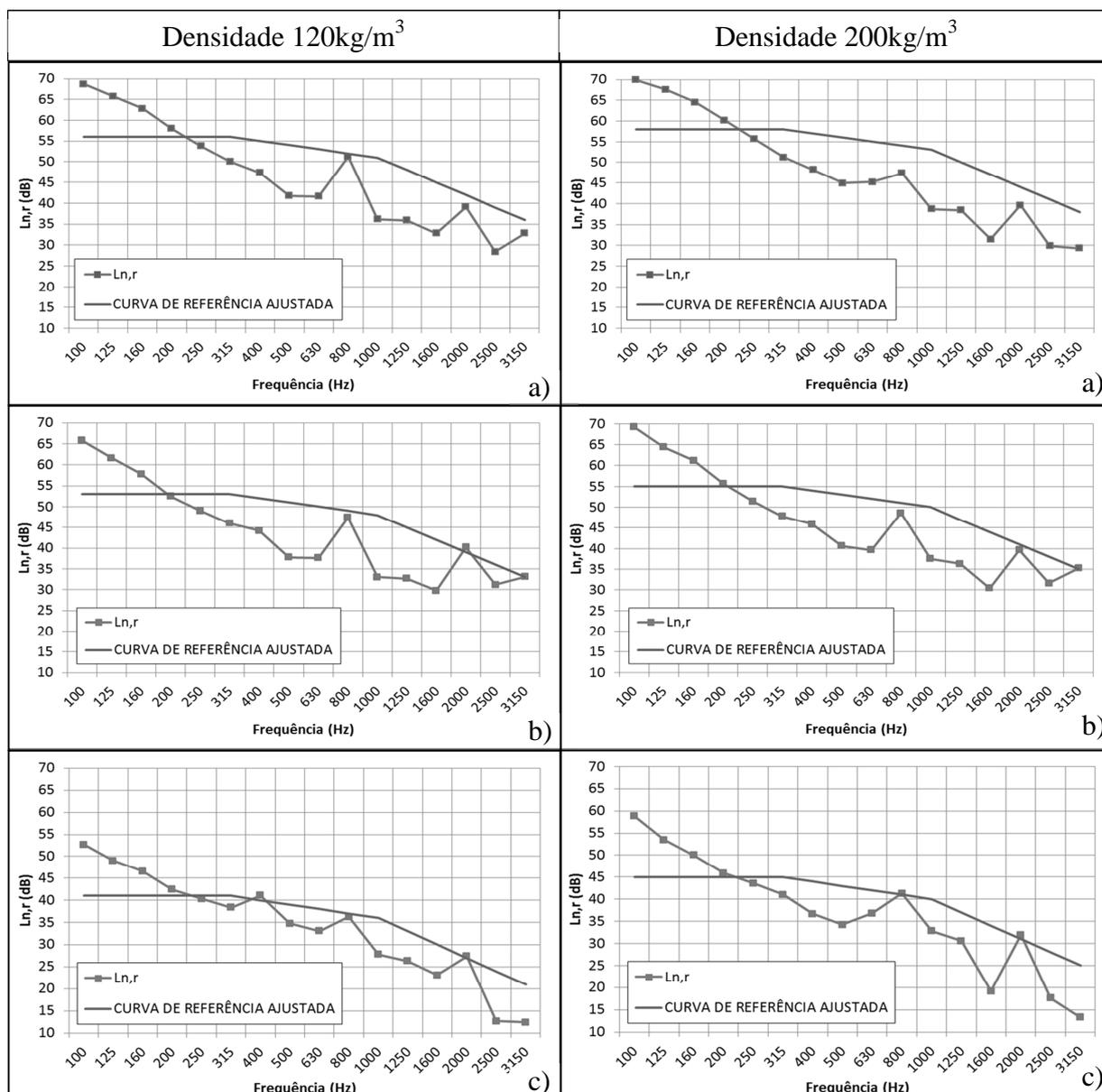


Figura 4.9 – Ajuste da curva de referência utilizando uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerado de espuma de poliuretano de densidade 120kg/m³ e 200 kg/m³ e espessura: a) 5mm; b) 10mm; c) 30mm.

Atendendo ao facto de terem sido efetuados ensaios utilizando aglomerados de espuma de poliuretano com várias densidades e espessuras, foram feitas duas análises distintas: uma primeira análise, onde se procurou avaliar a influência da variação da espessura do aglomerado de espuma de poliuretano, mantendo a mesma densidade; e uma segunda análise onde se procurou avaliar a influência da variação da densidade do aglomerado de espuma de poliuretano, mantendo a mesma espessura. Para ambas as análises foram utilizados o método de avaliação experimental descrito no documento técnico ISO/CD16251-1 e a metodologia

normalizada. Os resultados obtidos através destes métodos de avaliação experimental foram mais uma vez comparados de forma a verificar se as conclusões obtidas são idênticas.

Numa primeira análise, na Figura 4.10 são apresentados os resultados dos ensaios realizados de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008 e de acordo com o método ISO/CD16251-1, referentes à redução sonora, utilizando como camada resiliente aglomerados de espuma de poliuretano.

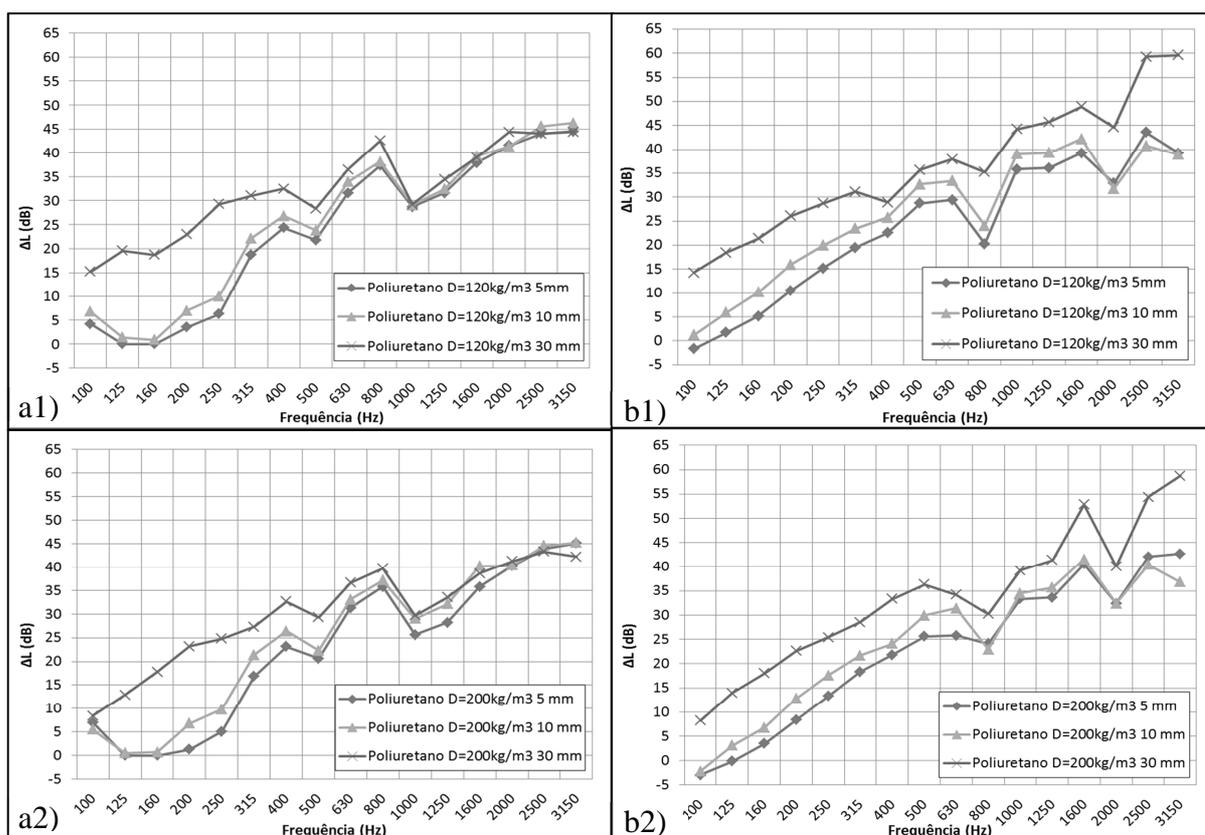


Figura 4.10 – Avaliação da influência da variação da espessura de aglomerados de espuma de poliuretano, mantendo a densidade, na redução sonora obtida através: a) norma NP EN ISO140-8:2008; b) método ISO/CD 16251-1.

Para ambos os casos, a redução sonora obtida pela lajeta sobre aglomerado de espuma de poliuretano com 30 mm é a que apresenta melhor desempenho acústico, sendo que, o aglomerado de espuma de poliuretano com 5mm é aquela que apresenta um desempenho menos satisfatório. Ao nível das baixas frequências, o método ISO/CD 16251-1, conduz a uma diferença de desempenho acústico entre a solução com 30mm de espessura e as soluções com 5 e 10mm, inferior à verificada utilizando o procedimento descrito na norma NP EN ISO140-8:2008. Ao nível das médias e altas frequências verifica-se, no caso do ensaio normalizado, uma aproximação notória das curvas de redução sonora. Esta aproximação não é

tão evidenciada no caso do ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD 16251-1. Verifica-se assim, que em ambos os procedimentos, mantendo a densidade do material, quanto maior a espessura do aglomerado de espuma de poliuretano, maior o nível de redução sonora, logo maior o desempenho acústico da solução.

Seguidamente efetuou-se uma segunda análise, onde se procurou avaliar a influência da variação da densidade do aglomerado de espuma de poliuretano, mantendo a mesma espessura. Os resultados dos ensaios realizados de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008 e de acordo com o método ISO/CD16251-1 utilizando o material referido são apresentados na Figura 4.11.

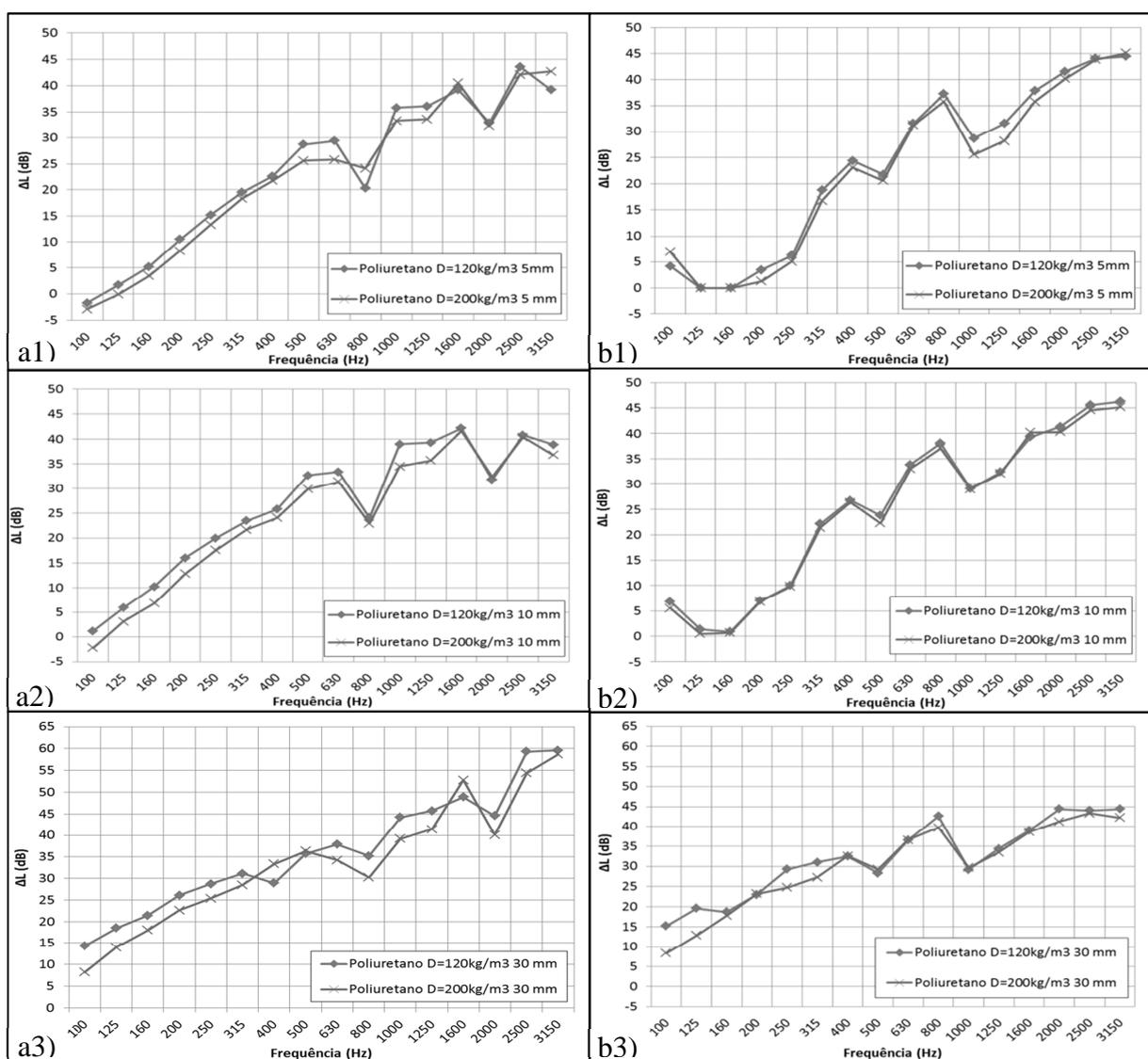


Figura 4.11 – Avaliação da influência da variação da densidade de aglomerados de espuma de poliuretano, mantendo a espessura, na redução sonora obtida através: a) norma NP EN ISO140-8:2008; b) método ISO/CD 16251-1.

Da análise destes resultados, observa-se um comportamento semelhante entre as curvas de redução sonora dos dois métodos analisados. Em ambos os casos verifica-se que, mantendo a mesma espessura, o aglomerado de espuma de poliuretano que apresenta menor densidade, é aquele que apresenta melhor desempenho acústico, embora a diferença de resultados não seja muito significativa.

Dentro dos aglomerados de espuma de poliuretano foi ainda analisada a densidade 150kg/m^3 e espessuras 5mm, 10mm e 30mm, utilizando o método ISO/CD16251-1. Procedeu-se a uma comparação de resultados entre as três densidades analisadas, com vista à avaliação do desempenho acústico conferido por estas. A Figura 4.12 apresenta os resultados, referentes à redução sonora, obtidos para as três densidades de aglomerado de espuma de poliuretano analisadas.

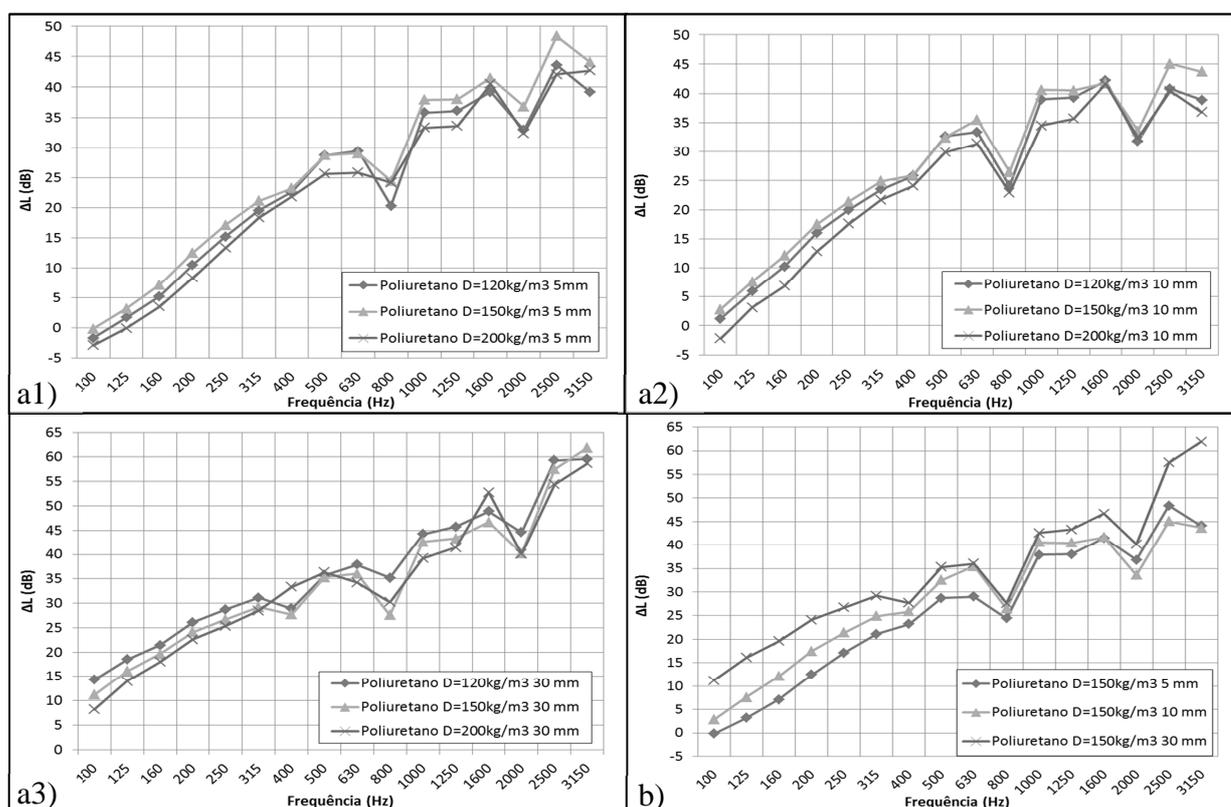


Figura 4.12 – Redução sonora obtida utilizando o método ISO/CD16251-1 para ensaiar uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerado de espuma de poliuretano, procurando avaliar: a) a influência da variação da densidade da espuma de poliuretano, mantendo a espessura; b) a influência da variação da espessura, mantendo a densidade.

Observa-se, para uma espessura de 5mm e 10mm, que o desempenho acústico do aglomerado de espuma de poliuretano de densidade 150kg/m^3 é aquele que apresenta um resultado mais

satisfatório. Para uma espessura de 30mm, o desempenho acústico do aglomerado de espuma de poliuretano de densidade 120kg/m^3 , é aquele que apresenta um resultado mais satisfatório, sendo que o aglomerado de espuma de poliuretano de densidade 150kg/m^3 apresenta um desempenho acústico superior ao de densidade 200kg/m^3 , embora com algumas oscilações. Verifica-se, portanto, que mantendo qualquer uma das espessuras analisadas, a solução de lajeta flutuante sobre aglomerado de espuma de poliuretano de densidade 150kg/m^3 apresenta quase sempre um desempenho acústico superior à solução de lajeta flutuante sobre aglomerado de espuma de poliuretano de densidade 200kg/m^3 . Efetuando uma análise preliminar, com base nos resultados obtidos através do método ISO/CD16251-1, poderia concluir-se que um aglomerado de espuma de poliuretano de densidade 200kg/m^3 conduz quase sempre a um desempenho acústico inferior ao verificado para a solução de densidade 150kg/m^3 .

Numa análise onde se mantém a densidade do aglomerado de espuma de poliuretano, fazendo variar a espessura, observa-se o mesmo comportamento verificado para as soluções de lajeta flutuante sobre aglomerado de espuma de poliuretano de 120kg/m^3 e 200kg/m^3 , onde o aglomerado de espuma de poliuretano com 30mm de espessura, é aquele que apresenta um melhor desempenho acústico, sendo a solução de 5mm de espessura, aquela que apresenta um resultado menos satisfatório. Estes resultados podem ser observados através da Figura 4-12b).

4.3 Comparação do método ISO/CD16251-1 com outros métodos de avaliação experimental não normalizados

Tal como referido anteriormente, para além do método ISO/CD 16251-1 foram realizados ensaios utilizando outros dois métodos de avaliação experimental: medição no pavimento de uma câmara reverberante e medição em câmara reverberante de dimensões reduzidas. Para o método de medição no pavimento da câmara acústica reverberante existente no DEC foram definidas três posições de fonte (P1, P2 e P3) e cinco posições de acelerómetro (A1,A2,...,A5). Para o método de medição em câmara reverberante de dimensões reduzidas foram definidas 9 posições de fonte (P1, P2, ..., P9) e uma posição de microfone M1. Os resultados dos ensaios realizados de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008 foram obtidos através da consulta de relatórios de ensaio de fabricantes realizados no LNEC e NI&DEA-FEUP.

A comparação dos resultados obtidos através da metodologia descrita no documento técnico ISO/CD16251-1 com os dois outros métodos de avaliação experimental não normalizados enunciados torna-se importante, uma vez que, tal como o método ISO/CD16251-1, a medição num pavimento de uma câmara acústica e numa câmara reverberante de dimensões reduzidas são ensaios não normalizados e são utilizados para sistemas de lajeta flutuante de dimensões

reduzidas. Desta forma é possível avaliar se os métodos de avaliação experimental conduzem a resultados idênticos.

Procurou-se efetuar uma comparação entre os resultados, ao nível da redução sonora, obtidos através do método ISO/CD 16251-1 e os resultados obtidos através dos outros dois métodos de avaliação experimental, com vista à avaliação da influência da variação da área da lajeta de betão, mantendo a espessura e a influência da variação da espessura da lajeta. Pretendeu-se ainda verificar qual o método de avaliação experimental que conduz a uma melhor aproximação relativamente à curva de redução sonora obtida através do método normalizado. Por último foi efetuada uma análise utilizando aglomerados de espuma de poliuretano, com vista a avaliação dos resultados obtidos através dos três métodos de avaliação experimental. Para os ensaios realizados no pavimento de uma câmara acústica e numa câmara acústica de dimensões reduzidas foram ensaiados como camada resiliente os seguintes materiais: manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm e com espessura variável 15/7mm, placa de fibra de coco com 10mm e 20mm de espessura e aglomerado de espuma de poliuretano com densidade de 120kg/m^3 e 200kg/m^3 e espessura 5mm, 10mm e 30mm.

4.3.1 Influência da variação da área da lajeta de betão, mantendo a espessura

Por forma a avaliar a influência da variação da área da lajeta de betão, mantendo a espessura, na redução sonora, são apresentados na Figura 4.13 os resultados para lajetas de dimensões 0,50mx0,50mx0,04m, 0,80mx0,80mx0,04m e 1,20mx0,80mx0,04m sobre manta flexível de aglomerado de borracha com espessura de 4,5mm e com espessura variável 15/7mm utilizando os três métodos de avaliação experimental não normalizados.

Analisando esta figura observa-se, em ambos os casos, uma grande proximidade de resultados entre o método ISO/CD 16251-1 e o método de medição no pavimento de uma câmara acústica. O método de ensaio em câmara acústica de dimensões reduzidas é aquele que, em ambos os casos, conduz a resultados mais afastados dos resultados obtidos através do ensaio normalizado. No caso de uma lajeta de dimensões 0,50mx0,50mx0,04m, os resultados obtidos através do método de medição no pavimento de uma câmara acústica apresentam resultados mais próximos do valor normalizado do que aqueles que se verificam para as outras duas metodologias de ensaio não normalizadas. Ao aumentar a área da lajeta os resultados do ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1 tendem a aproximar-se cada vez mais do ensaio normalizado apresentado, neste caso, melhores resultados do que os verificados através do método de medição no pavimento de uma câmara acústica. Tal como no ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1, verificam-se oscilações na curva de redução sonora obtidas através das outras duas metodologias de ensaio não normalizadas, oscilações que, mais uma vez, são devidas aos modos próprios de vibração da lajeta. Estas oscilações, no caso do método de medição no pavimento de uma câmara acústica

e no caso do método de medição em câmara reverberante de dimensões reduzidas são de amplitude mais reduzida, principalmente ao nível das altas frequências.

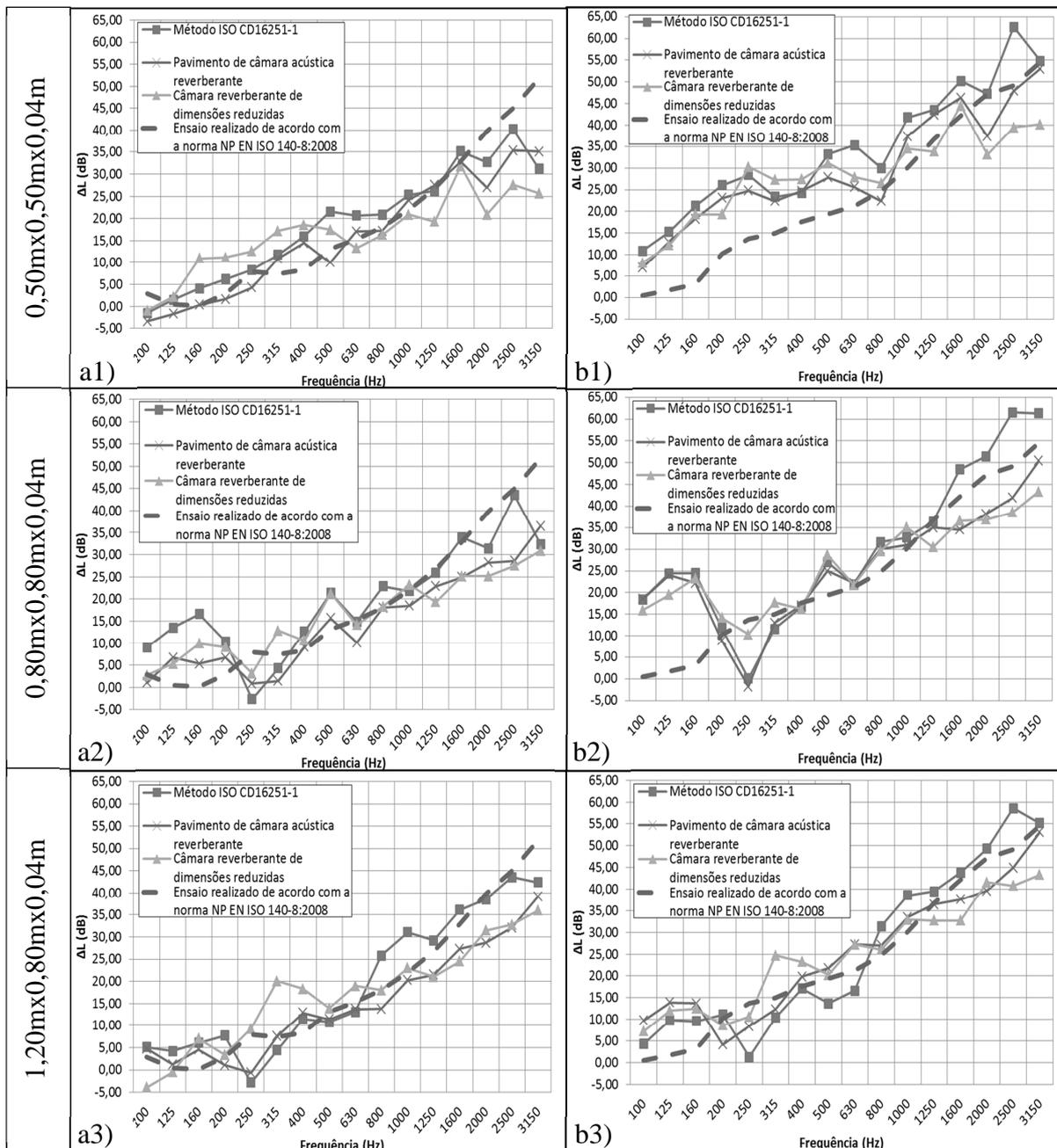


Figura 4.13 – Redução sonora obtida através dos 3 métodos analisados, utilizando várias áreas de lajeta sobre manta flexível de borracha com: a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm, vs. Metodologia normalizada.

Avaliou-se posteriormente os resultados obtidos para uma placa de fibra de coco com 10mm e 20mm de espessura, sendo estes resultados apresentados na Figura 4.14. Mais uma vez a solução apresentada foi ensaiada através dos três métodos de avaliação experimental não normalizados, procurando-se avaliar qual o método que conduz a uma curva de redução sonora mais próxima da obtida através do ensaio normalizado.

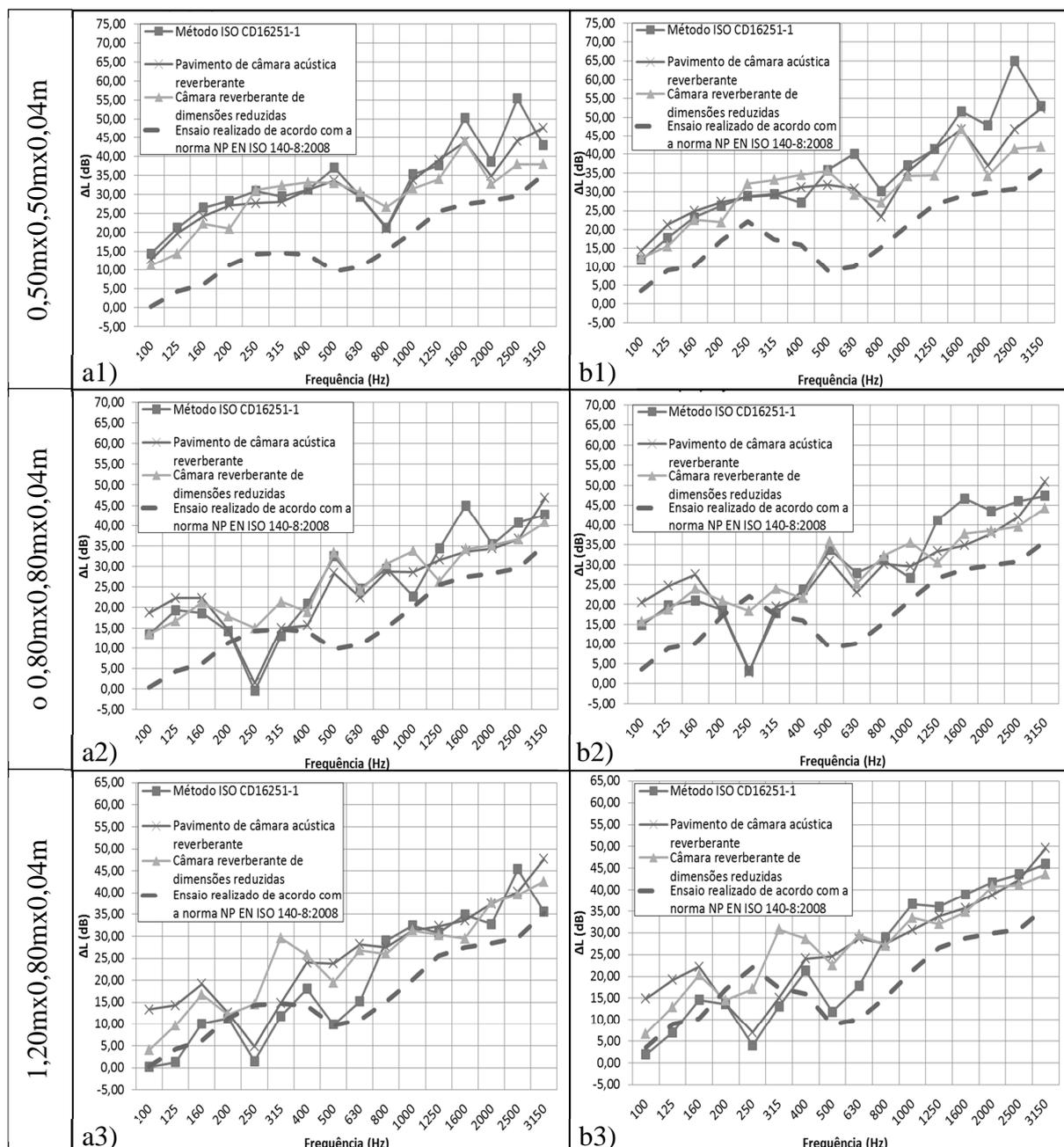


Figura 4.14 – Redução sonora obtida através dos 3 métodos analisados, utilizando várias áreas de lajeta sobre: a) placa de fibra de coco com 10mm espessura; b) placa de fibra de coco com 20mm espessura, vs. Metodologia normalizada.

Da análise destes resultados retira-se que, em ambos os casos e para uma lajeta de dimensões 0,50mx0,50mx0,04m com uma área igual a 0,25m², o método em câmara reverberante de dimensões reduzidas é aquele que conduz a uma maior aproximação da curva de redução sonora relativamente à curva normalizada, embora se verifiquem algumas oscilações, nomeadamente ao nível das médias frequências. Ao aumentar a área da lajeta observa-se que a curva de redução sonora obtida através do método em câmara reverberante de dimensões reduzidas tende a afastar-se da curva normalizada, embora as oscilações se mantenham. Observa-se que o método ISO/CD16251-1 e o método de medição no pavimento de uma câmara acústica conduzem a resultados bastante similares. Mais uma vez, as curvas de redução sonora, obtidas para uma lajeta de dimensões 0,50mx0,50mx0,04m, através de qualquer um dos métodos analisados, conduzem a um desempenho acústico superior ao registado no ensaio normalizado. Este incremento de desempenho acústico tende a diminuir à medida que se aumenta a área da lajeta verificando-se, no entanto, que ao nível das altas frequências esse incremento se mantém para qualquer uma das soluções analisadas. Observa-se ainda uma redução brusca de desempenho acústico na frequência dos 250Hz em ambas as soluções para lajetas de maior área. Esta redução é detetada para todas as metodologias de ensaio sendo, no entanto, de menor amplitude no caso do ensaio realizado em câmara reverberante de dimensões reduzidas. Esta redução poderá ser explicada por uma ressonância verificada na frequência dos 250Hz, pois é registada em todos os ensaios realizados com as lajetas de áreas superiores.

Efetuada uma análise ao nível do índice de redução sonora a sons de percussão, são apresentados no Quadro 4.5, os valores de índice de redução sonora a sons de percussão obtidos através dos três métodos de avaliação experimental não normalizados e para os quatro materiais ensaiados como camada resiliente. Da análise deste quadro observa-se que a tendência de diminuição do índice de redução sonora a sons de percussão, à medida que se aumenta a área da lajeta, se continua a verificar nos outros dois métodos de avaliação experimental não normalizados. Observa-se, no entanto, que os valores de índice de redução sonora obtidos através da medição em pavimento de câmara acústica e medição em câmara reverberante de dimensões reduzidas diferem do valor normalizado, nomeadamente para uma lajeta de dimensões 1,20mx0,80mx0,04m. No ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1 verificava-se que para uma lajeta de dimensões 1,20mx0,80mx0,04m, os valores de índice de redução sonora obtidos eram idênticos aos obtidos no ensaio normalizado. No entanto, tal como já referido, os valores de índice de redução sonora a sons de percussão são fortemente condicionados pelo ajuste da curva de referência, podendo conduzir a falsas conclusões, não devendo a fiabilidade do método em análise ser avaliada com base nos valores de índice de redução sonora a sons de percussão obtidos.

Quadro 4.5 – Índices de redução sonora obtidos para os quatro tipos de camada resiliente ensaiados através das 3 metodologias de ensaio e através da metodologia normalizada para várias áreas de lajeta de betão com 4cm de espessura.

Material	Dimensão de lajeta (m)	ΔL_w (dB)			
		Manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura	Manta flexível de aglomerado de borracha de espessura variável	Placa de fibra de coco 10mm de espessura	Placa de fibra de coco 20mm de espessura
Ensaio realizado de acordo com a norma ISO 140-8:2008		20	24	22	24
Método ISO/CD16251-1	0,50x0,50x0,04	21	36	34	38
	0,80x0,80x0,04	23	28	28	32
	1,20x0,80x0,04	20	24	22	24
Pavimento de câmara acústica	0,50x0,50x0,04	18	32	35	37
	0,80x0,80x0,04	19	27	29	32
	1,20x0,80x0,04	19	27	30	32
Câmara reverberante de dimensões reduzidas	0,50x0,50x0,04	20	32	32	34
	0,80x0,80x0,04	21	31	31	34
	1,20x0,80x0,04	21	28	28	32

4.3.2 Influência da variação espessura da lajeta de betão

Avaliando agora a influência da variação da espessura da lajeta de betão na redução sonora são apresentados na Figura 4.15 os resultados para lajetas de dimensões 0,50mx0,50m, e espessuras 4cm, 8cm e 12cm sobre manta flexível de aglomerado de borracha com espessura de 4,5mm e com espessura variável 15/7mm utilizando os três métodos de avaliação experimental não normalizados.

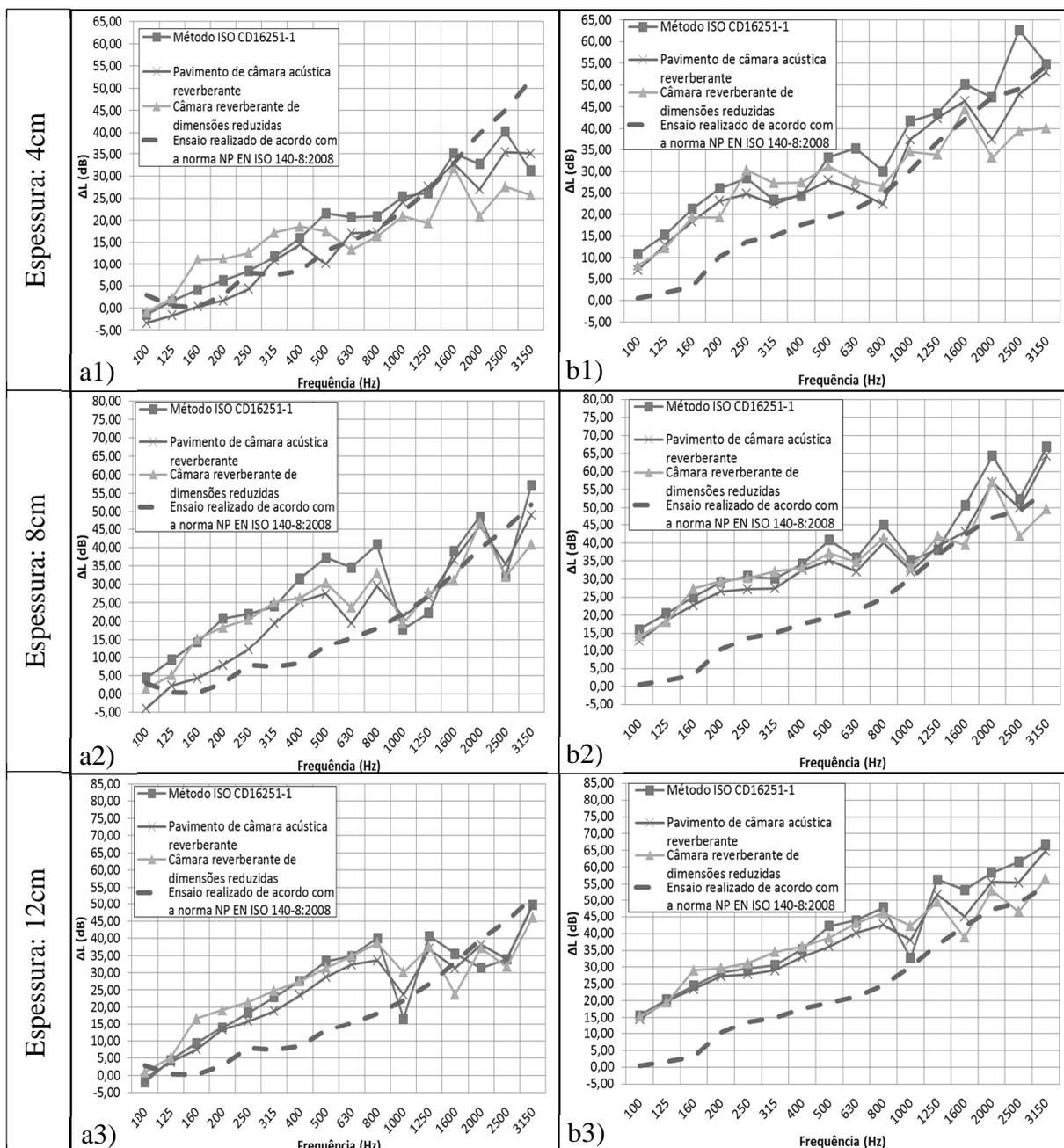


Figura 4.15 – Redução sonora obtida através dos 3 métodos analisados, utilizando lajetas de dimensões 0,50mx0,50m e várias espessuras sobre manta flexível de aglomerado de borracha com: a) 4,5mm de espessura; b) espessura variável 15/7mm.

Da análise destes gráficos verifica-se que, todos os métodos de avaliação experimental conduzem a curvas de redução sonora com comportamentos similares. Ao nível das baixas frequências e à medida que se aumenta a espessura da lajeta, o afastamento relativamente à curva de redução sonora normalizada vai aumentando em ambas as soluções e para as três metodologias de ensaio. Ao nível das altas frequências, as curvas de redução sonora obtidas

através dos três métodos de avaliação experimental não normalizados, tendem a aproximar-se do resultado normalizado, embora mais uma vez se verifiquem algumas oscilações que, tal como já foi referido, são devidas aos modos próprios de vibração da lajeta. Para a espessura de 12cm, o método de medição no pavimento de uma câmara acústica é o que conduz a uma melhor aproximação relativamente à curva normalizada, em ambas as soluções, embora a curva obtida através do método ISO/CD16251-1 conduza a uma curva de redução sonora muito similar. O método de medição numa câmara reverberante de dimensões reduzidas, apesar de conduzir a curvas de redução sonora próximas das obtidas através dos dois outros métodos de avaliação experimental não normalizados, conduz sempre a resultados menos satisfatórios, nomeadamente ao nível das baixas frequências, onde o desempenho acústico da solução é sobrevalorizado relativamente ao desempenho acústico obtido através do método normalizado.

Em suma, verifica-se uma grande proximidade entre as curvas de redução sonora obtidas através das três metodologias de ensaio e para as três espessuras de lajeta em análise. Verifica-se que em quase todos os casos o método ISO/CD16251-1 e o método de medição no pavimento câmara acústica conduzem a curvas de redução sonora bastante similares. Ao aumentar a espessura da lajeta verifica-se um afastamento das curvas de redução sonora relativamente à curva normalizada, nomeadamente ao nível das baixas frequências. Ao nível das altas frequências observa-se um ligeiro aumento do desempenho acústico à medida que se aumenta a dimensão da lajeta, no entanto, as curvas de redução sonora aproxima-se bastante da curva normalizada para esta gama de frequências.

Efetuando uma análise ao nível do índice de redução sonora, são apresentados no Quadro 4.6 os valores de índice de redução sonora a sons de percussão, obtidos para as três metodologias de ensaio e para os dois tipos de camada resiliente ensaiados.

Analisando este quadro confirma-se, para as medições em pavimento de câmara acústica e numa câmara reverberante de dimensões reduzidas, a manutenção da tendência crescente do valor do índice de redução sonora ao aumentar a espessura da lajeta, verificada no ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1. Esta tendência é observada em quase todos os casos observando-se, no entanto, alguns casos onde o valor de índice de redução sonora se mantém ou diminui ao aumentar a dimensão da lajeta. Estes casos singulares verificam-se principalmente na transição de uma lajeta de espessura 8cm para uma de espessura 12cm. Observa-se ainda que, tal como no ensaio realizado de acordo com o método ISO/CD16251-1, o valor do índice de redução sonora obtido para qualquer uma das espessuras de lajeta e através das duas outras metodologias de ensaio, apresenta resultados mais próximos do valor normalizado no caso em que se utiliza como camada resiliente uma

manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura, do que no caso de uma manta flexível de aglomerado de borracha com espessura variável 15/7mm.

Quadro 4.6 – Índices de redução sonora a sons de percussão obtidos através das três metodologias de ensaio analisadas e para várias espessuras de lajeta sobre mantas flexíveis de aglomerado de borracha.

Material	Espessura da lajeta de betão	ΔL_w (dB)	
		Manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura	Manta flexível de aglomerado de borracha de espessura variável 15/7mm
Ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008 (lajeta de espessura 4cm)		20	24
Método ISO/CD 16251-1	4cm	21	36
	8cm	27	41
	12cm	25	41
Pavimento de câmara acústica	4cm	18	32
	8cm	22	38
	12cm	25	40
Câmara reverberante de dimensões reduzidas	4cm	20	32
	8cm	27	38
	12cm	26	41

4.3.3 Análise dos resultados obtidos para aglomerados de espuma de poliuretano

Vários tipos de aglomerado de espuma de poliuretano foram também ensaiados utilizando as três metodologias de ensaio não normalizadas. A Figura 4.16 apresenta os resultados referentes à redução sonora obtida através das três metodologias de ensaio analisadas. Mais uma vez foi adicionada a curva de redução sonora obtida através do ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008. De referir que a curva de redução sonora obtida através do ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO 140-8:2008 possui algumas oscilações pelo facto de não ter sido utilizada uma superfície de ensaio com 10m².

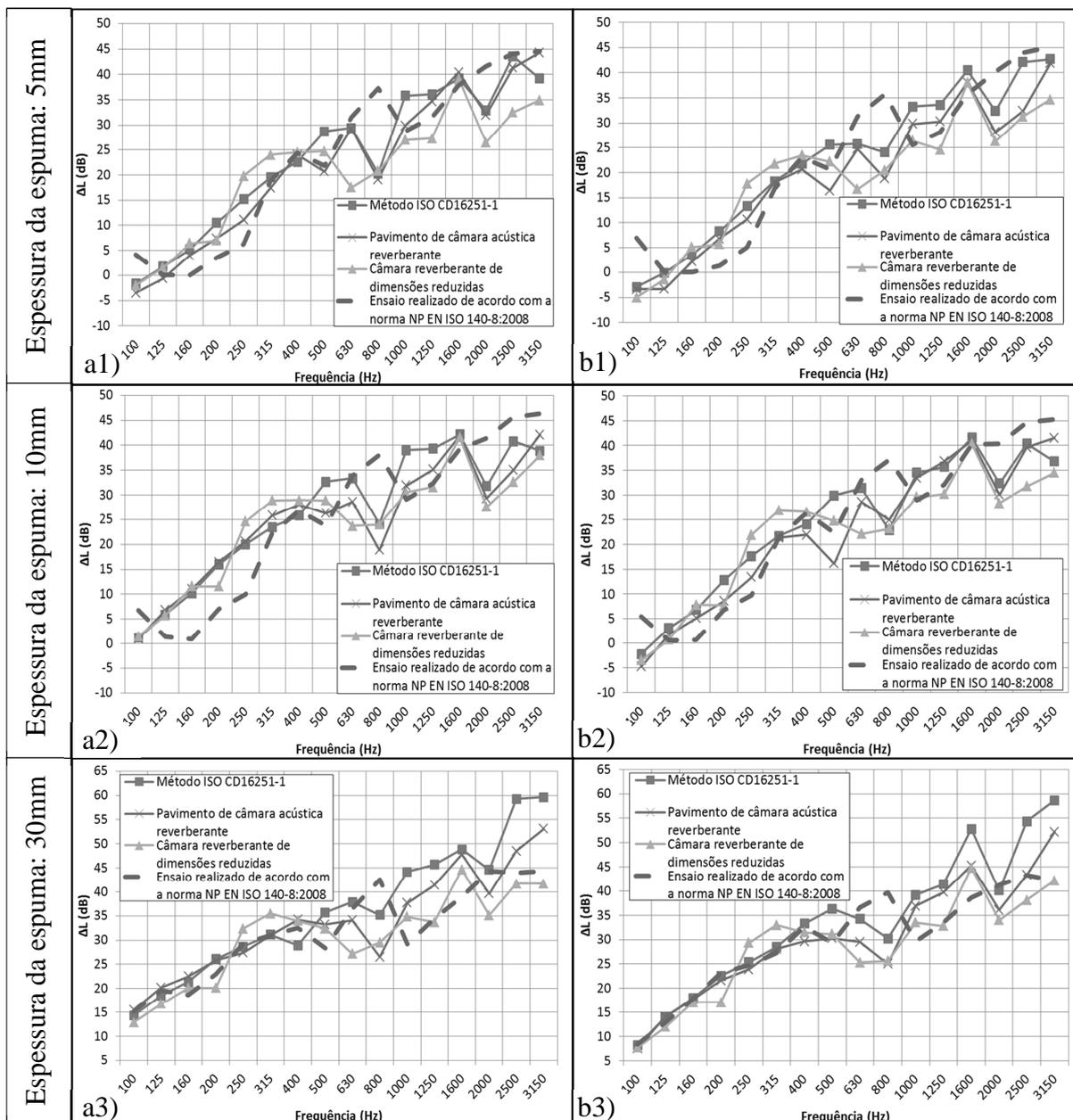


Figura 4.16 - Redução sonora obtida utilizando as 3 metodologias de ensaio para ensaiar uma lajeta com 4 cm de espessura sobre espuma de poliuretano a) densidade 120kg/m^3 ; b) densidade 200kg/m^3 , vs. Metodologia normalizada.

Da observação destes resultados verifica-se mais uma vez a similaridade de comportamento entre a curva de redução sonora obtida através do método ISO/CD16251-1 e a obtida através do método de medição no pavimento de uma câmara acústica. Os resultados obtidos através do ensaio realizado numa câmara acústica de dimensões reduzidas são os que conduzem a uma menor aproximação relativamente ao ensaio normalizado. Verifica-se ao nível das altas

frequências oscilações de amplitude considerável nas três metodologias de ensaio analisadas. Ao nível das baixas frequências as curvas de redução sonora obtidas através das três metodologias de ensaio apresentam um comportamento muito semelhante.

Analisando o índice de redução sonora a sons de percussão, verifica-se através da observação do Quadro 4.7 que o ensaio realizado no pavimento de uma câmara acústica e o ensaio realizado numa câmara acústica de dimensões reduzidas conduzem a valores de índice de redução sonora inferiores aos verificados para o método ISO/CD16251-1 e mais próximos do valor normalizado. Verifica-se ainda que o método de ensaio em câmara reverberante de dimensões reduzidas conduz em alguns casos a valores idênticos aos valores normalizados.

Quadro 4.7 – Índices de redução obtidos utilizando as três metodologias de ensaio analisadas e a metodologia normalizada para ensaiar uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerado de espuma de poliuretano.

Material	ΔL_w (dB)					
	Densidade 120kg/m ³			Densidade 200kg/m ³		
	5mm	10mm	30mm	5mm	10mm	30mm
Ensaio realizado de acordo com a norma ISO 140-8:2008	21	23	36	21	23	34
Método ISO/CD16251-1	24	27	39	22	25	35
Pavimento de câmara acústica	22	26	38	20	22	33
Câmara reverberante de dimensões reduzidas	22	26	34	21	23	31

4.4 Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos pela fórmula da EN 12354-2:2000

4.4.1 Caracterização do método estimativo descrito na norma EN 12354-2:2000

Para sistemas de lajeta flutuante é possível determinar a redução sonora em função da frequência, de forma aproximada, segundo a função de Cremer, de acordo com o descrito na norma EN 12354-2:2000 (Sousa, 2008).

Esta função pode ser expressa da seguinte forma:

$$\Delta L = 30 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad (4.1)$$

Onde:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (4.2)$$

f_0 – Frequência de ressonância do sistema lajeta flutuante-camada resiliente;

f – Frequência (Hz);

s' – Rigidez dinâmica (MN/m³);

m' – Massa superficial da lajeta flutuante (kg/m²).

No âmbito deste trabalho foram analisados dois tipos de aglomerado de espuma de poliuretano: Densidade 120kg/m³ e 200kg/m³ e espessura 30mm sobre uma lajeta de betão de dimensões 0,5m x 0,5m x 0,04m. A lajeta de betão apresenta área igual a 0,25m² e peso igual a 23,4kg. A rigidez dinâmica para cada uma das camadas resilientes encontra-se apresentada no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Rigidez dinâmica dos tipos de aglomerado de espuma de poliuretano analisados.

Densidade (kg/m ³)	Espessura (mm)	Rigidez dinâmica (MN/m ²)
120	30	7,0
200	30	16,4

4.4.2 Análise dos resultados obtidos

Na Figura 4.17 são apresentados os resultados obtidos utilizando as três metodologias de ensaio para ensaiar uma lajeta de dimensões 0,50m x 0,50m x 0,04m sobre aglomerados de espuma de poliuretano de densidade 120kg/m³ e 200kg/m³ e 30mm de espessura juntamente com a reta resultante dos resultados obtidos através da fórmula descrita na norma EN 12354-2:2000. Foi ainda adicionada a curva de redução sonora referente ao ensaio realizado de acordo com a norma NP EN ISO140-8:2008 para cada um dos aglomerados de espuma de poliuretano. Com esta comparação pretende-se avaliar eventuais semelhanças entre os resultados obtidos pela fórmula da norma EN 12354-2:2000 e os resultados obtidos pelos métodos de avaliação experimental não normalizados, analisados no presente trabalho, e a metodologia normalizada.

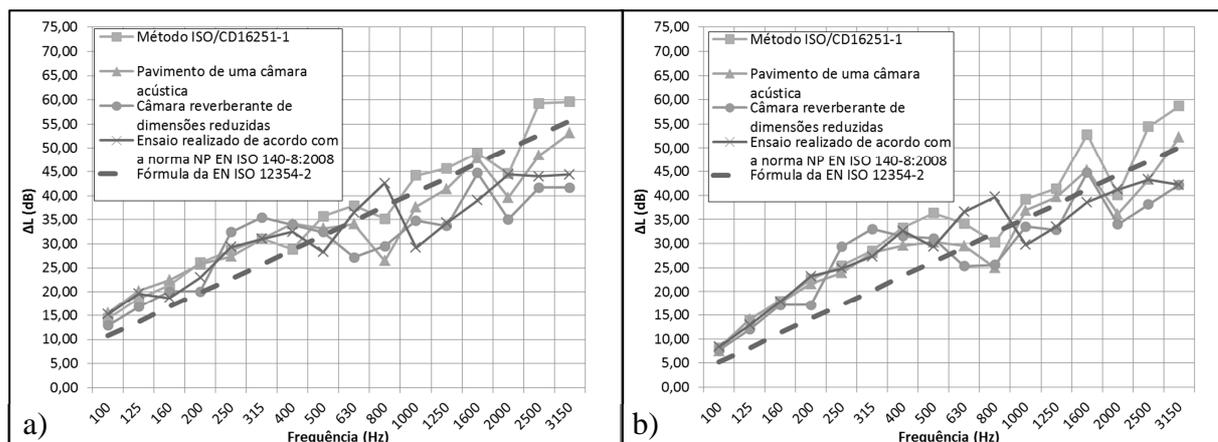


Figura 4.17 – Comparação da redução sonora obtida através das 3 metodologias de ensaio analisadas e através do ensaio normalizado, com reta resultante da fórmula descrita na norma EN 12354-2:2000 ao ensaiar uma lajeta com 4cm de espessura sobre aglomerado de espuma de poliuretano com 30mm de espessura: a) densidade 120kg/m^3 ; b) densidade 200kg/m^3 .

Da observação dos gráficos retira-se o facto de, em ambos os casos, os três métodos de avaliação experimental não normalizados, assim como o ensaio normalizado, tenderem para a reta resultante da fórmula descrita na norma EN 12354-2:2000. Verifica-se que em ambos os casos e ao nível das baixas e médias frequências as curvas de redução sonora tendem a posicionar-se acima da reta resultante da fórmula descrita na norma EN 12354-2:2000. Ao nível das altas frequências as curvas de redução sonora tendem a posicionar-se abaixo da reta resultante da fórmula descrita na norma EN 12354-2:2000. Verifica-se ainda que quanto maior a densidade da espuma de poliuretano mais acima se localizam as curvas de redução sonora. Das três metodologias de ensaio não normalizadas em análise, a que apresenta uma curva de redução sonora que se posiciona maioritariamente acima da reta resultante da fórmula descrita na norma EN 12354-2:2000 é a obtida através do método ISO/CD16251-1.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Considerações finais

No presente trabalho procurou-se avaliar experimentalmente a redução sonora a ruídos de percussão proporcionada por sistemas de lajeta flutuante de dimensões reduzidas. Desta forma, foram analisadas várias áreas e espessuras de lajeta de betão, por forma a avaliar a influência da variação da área da lajeta, mantendo a espessura e a influência da variação da espessura da lajeta, utilizando vários tipos de material resiliente. Foram analisados três métodos de avaliação experimental não normalizados e os resultados obtidos foram comparados com resultados normalizados. Por último, os resultados obtidos através das metodologias não normalizadas foram comparados com os resultados obtidos através da fórmula da norma EN 12354-2:2000.

Os resultados obtidos permitem concluir que, para lajetas de maior área, as curvas de redução sonora resultantes do método ISO/CD16251-1 aproximam-se bastante da curva normalizada. Estes resultados apresentam contudo, oscilações devidas aos modos próprios de vibração da lajeta, nomeadamente ao nível das altas frequências. Caso fossem objeto de estudo lajetas com áreas superiores às analisadas, será expectável que a curva de redução sonora obtida tenda a aproximar-se ainda mais do resultado normalizado.

Ao nível do índice de redução sonora a sons de percussão observa-se que os valores obtidos através do método ISO/CD16251-1, ao aumentar a área da lajeta, tendem a aproximar-se do valor normalizado chegando-se, para o caso dos quatro materiais ensaiados, a um valor idêntico ao normalizado para uma lajeta de dimensões 1,20mx0,80mx0,04m. Apesar de idênticos, estes valores de índice de redução sonora são fortemente condicionados pelo ajuste da curva de referência, podendo conduzir a falsas conclusões. A fiabilidade do método de avaliação experimental não normalizada, não deve ser avaliada com base nos valores de índice de redução sonora obtidos.

Avaliando a influência da variação da espessura da lajeta de betão observa-se, utilizando o método ISO/CD16251-1, que quando se aumenta a espessura da lajeta de 4 cm para 8 cm, a redução sonora aumenta de forma significativa. No entanto, nas altas frequências, surgem oscilações de amplitude considerável, possivelmente resultantes de ressonâncias no interior da

placa. Para a lajeta de espessura 12cm ocorre uma inversão de desempenho acústico, no caso da manta flexível de aglomerado de borracha com 4,5mm de espessura, observando-se que a redução sonora é inferior à obtida para a lajeta com 8 cm. Para a manta flexível de aglomerado de borracha com espessura variável 15/7mm, verifica-se que o aumento de espessura de 8cm para 12 cm não conduz a ganhos significativos da redução sonora. Mais uma vez verificam-se oscilações de alguma amplitude ao nível das altas frequências, no entanto, com uma amplitude menos significativa.

Efetuada uma comparação entre as metodologias de ensaio não normalizadas ensaiadas, verifica-se que o método de medição no pavimento de uma câmara acústica apresenta resultados muito similares aos obtidos através do método ISO/CD16251-1, observando-se ainda que a curva de redução sonora obtida pelo primeiro, ao nível das altas frequências, apresenta amplitudes menores.

Conclui-se que a metodologia proposta no documento técnico ISO/CD16251-1 poderá constituir uma abordagem a utilizar em fase de desenvolvimento de produtos para sistemas de lajeta flutuante. Verifica-se, no entanto, que para lajetas de menor dimensões os resultados obtidos conduzem a desempenhos acústicos superiores aos verificados no ensaio normalizado.

5.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros propõe-se alargar o estudo do método ISO/CD16251-1, através do ensaio de outros tipos de camada resiliente, nomeadamente o aglomerado de cortiça, o feltro betuminoso, entre outros já referidos neste trabalho, utilizando as áreas de lajeta já analisadas e outras áreas e espessuras de lajeta de betão. A título de exemplo propõe-se a análise de lajetas com dimensões superiores a 1,20mx0,80mx0,04m por forma a avaliar a continuidade de proximidade relativamente ao resultado normalizado.

Propõe-se ainda testar o método ISO/CD16251-1, utilizando uma laje de suporte aligeirada. O estudo nesta área não se encontra ainda pronto para normalização, pelo que poderá ser interessante analisar este método, utilizando sistemas de lajeta flutuante sobre uma laje de suporte aligeirada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EN ISO 10140-3:2010, “*Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 3: Measurement of impact sound insulation*”.
- EN ISO 10140-4:2010, “*Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 4: Measurement procedures and requirements*”.
- EN ISO 10140-5:2010, “*Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 5: Requirements for test facilities and equipment*”.
- NP EN ISO717-2:2009, “*Acústica: Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção - Parte 2: - Isolamento sonoro a sons de percussão*”.
- EN 12354-2:2000, “*Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Impact sound insulation between rooms*”.
- ISO/CD 16251-1, “*Acoustics – Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up – Part 1: Heavyweight compact floor*”.
- RRAE – “*Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*”, aprovado pelo Decreto-Lei nº.129/2002 de 11/05, com a nova redação dada pelo Decreto-Lei nº.96/2008 de 09/06”.
- Godinho, L., Masgalos, R., Pereira, A., Branco, F.G. (2010). “*On the use of a small-sized acoustic chamber for the analysis of impact sound reduction by floor coverings*”. *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 58 (6), pp. 658-668.
- Bjor, O-H (2010). “*Simplified measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings*”, Proc 2010, BNAM 2010 - Bergen.
- Sommerfeld, Marc (2009). “*A simplified measurement method for the determination of impact sound reduction*”. DAGA 2009, Rotterdam.

-
- Foret, R. A, Chéné, J., Guigou-Carter, C. (2011), “*A comparison of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings measured using ISO 140-8 and ISO/CD16251-1*”, Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark, 28 Junho a 1 Julho de 2011, pp. 1371-1376.
- Miškinis, K., Dikavicius, V., Ramanauskas, J., Norvaišiene, R. (2012). “*Dependence between Reduction of Weighted Impact Sound Pressure Level and Specimen Size of Floating Floor Construction*”. Materials Science, Vol. 18 (1), pp. 93-97.
- Pereira, A., Godinho, L., Mateus, D., Ramis, J., Branco, F.G. (2012). “*Avaliação de uma metodologia simplificada na determinação experimental da redução sonora de revestimentos de piso*”, Acústica 2012, Évora
- Mateus, D. (2008), “*Acústica de edifícios e controlo de ruído*”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Mendes, P.A., Godinho, L., Pereira, A., António, A. (2011), “*Apontamentos acústica aplicada Ano letivo 2011/2012 – Ruídos de percussão em edifícios*”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Mendes, P.A. (2010), “*Sebenta de Acústica Aplicada*”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Patrício, J. V. (2010), “*Acústica nos Edifícios*”, 6ª Edição. Verlag Dashofer, Lisboa.
- Sousa, N. (2008), “*Caracterização do comportamento acústico a sons de percussão de soluções á base de espumas de poliuretano*”, Tese de mestrado integrado, FEUP, Porto.
- Tavares, J.B. (2009) “*Desempenho de argamassas leves em isolamento aos sons de percussão*”, Tese de mestrado integrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Brüel & Kjaer: <http://www.bksv.com/Products.aspx> (Consultado em Dezembro de 2012)
- G.R.A.S Sound and Vibration: <http://www.gras.dk> (Consultado em Dezembro de 2012)
- AREVA 01dB-Metravib: <http://01db-cn.orionis.fr/nvh-products.11/?L=1> (Consultado em Dezembro de 2012)

Plastimar: <http://www.plastimar.pt/> (Consultado em Dezembro de 2012)

Danosa: <http://www.danosa.com.pt> (Consultado em Dezembro de 2012)

TOPECA: <http://www.topeca.pt> (Consultado em Dezembro de 2012)

IMPERALUM: <http://www.imperialum.com> (Consultado em Dezembro de 2012)

FIBROSOM: <http://www.fibrosom.com> (Consultado em Dezembro de 2012)

Amorim: <http://www.amorim.com> (Consultado em Dezembro de 2012)

Knauf Insulation: <http://www.knaufinsulation.pt> (Consultado em Dezembro de 2012)

DOW Portugal: <http://www.dow.com> (Consultado em Dezembro de 2012)

ISOVER: <http://www.isover.com> (Consultado em Dezembro de 2012)

ANEXO A – FOTOGRAFIAS DOS ENSAIOS

A.1 Método ISO/CD16251-1: Utilização de várias áreas de lajeta.



A.2 Método ISO/CD16251-1: Utilização de lajetas com várias espessuras.



A.3 Medição no pavimento de câmara acústica do DEC



A.4 Medição numa câmara reverberante de dimensões reduzidas construída no DEC



ANEXO B – EXEMPLOS DE CÁLCULO

B.1 Cálculo do índice de redução sonora a sons de percussão

Hz	ΔL	$L_{n,r,0}$	$L_{n,r}$	Curva de referência	Δl_i	Curva de referência ajustada	Δl_i
100	-1,5	67	68,5	62	6,5	59	9,5
125	1,5	67,5	66	62	4	59	7
160	4,1	68	63,9	62	1,9	59	4,9
200	6,2	68,5	62,3	62	0,3	59	3,3
250	8,3	69	60,7	62	-1,3	59	1,7
315	11,8	69,5	57,7	62	-4,3	59	-1,3
400	16,0	70	54	61	-7	58	-4
500	21,6	70,5	48,9	60	-11,1	57	-8,1
630	20,7	71	50,3	59	-8,7	56	-5,7
800	20,9	71,5	50,6	58	-7,4	55	-4,4
1000	25,3	72	46,7	57	-10,3	54	-7,3
1250	26,2	72	45,8	54	-8,2	51	-5,2
1600	35,2	72	36,8	51	-14,2	48	-11,2
2000	32,7	72	39,3	48	-8,7	45	-5,7
2500	40,2	72	31,8	45	-13,2	42	-10,2
3150	31,2	72	40,8	42	-1,2	39	1,8
				$\sum \Delta l_i$	12,7	$\sum \Delta l_i$	28,2
					VERIFICA		VERIFICA

X	-3
---	----

$L_{n,r,w}$ (dB)	57
$L_{n,r,0,w}$ (dB)	78
ΔL_w (dB)	21