



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

Sofia Raquel Freitas Cabral Torra

# **Estudo de soluções de reabilitação acústica para o caso dos pavimentos tradicionais em madeira**

## **Study of acoustic rehabilitation solutions for traditional wood floors**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil , na área de Especialização em Construções,  
orientada pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer  
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões  
que possam surgir

Coimbra, 31 de outubro de 2016

## **AGRADECIMENTOS**

Ao longo desta caminhada que por vezes não foi fácil, quero aqui deixar algumas palavras de agradecimento a todos aqueles que contribuíram diretamente ou indiretamente para que esta dissertação fosse possível.

Aos meus orientadores: Professora Doutora Andreia Pereira e ao Professor Doutor Diogo Mateus por toda a paciência, apoio, disponibilidade, orientação, conselhos e sugestões ao longo desta jornada.

As minhas colegas de curso e amigas: Ana Paula Forno, Sara Alves e Sara Gouveia pelo companheirismo e por todas as palavras de incentivo e força. À Diana Pinheiro, apesar de não estar diretamente presente foi um elemento chave neste percurso, pela confiança, paciência, ânimo e momentos de descontração.

Por fim, quero deixar um agradecimento especial a minha família, nomeadamente, aos meus pais e ao meu irmão por me proporcionarem uma formação académica, por toda a força e apoio incondicional ao longo destes oito anos. Dedico este título à minha família, em especial aos meus avós que apesar de não estarem presentes fisicamente, sei que era algo que os deixará muito orgulhosos.

## RESUMO

As situações de reabilitação acústica apresentam diversas configurações, sobretudo decorrentes da época de construção do edifício. No caso dos edifícios localizados em núcleos históricos onde os pavimentos são em madeira a reabilitação obriga, muitas vezes, por motivos de ordem estrutural, a aplicação de soluções aligeiradas, que, de um modo geral, se encontram menos estudadas e caracterizadas, do ponto de vista acústico.

A avaliação da componente de ruído de percussão pode ser obtida, geralmente em laboratório, com base em metodologias de ensaio normalizadas, segundo a série de normas EN ISO 10140, que requerem a utilização de amostras com dimensões razoáveis ( $10 \text{ m}^2$ ), que acresce os custos de construção e manutenção.

Numa fase inicial de desenvolvimento de um produto, onde são ensaiadas diversas amostras, muitas das quais poderão ser alteradas ou mesmo eliminadas no decorrer do processo, é necessário agilizar o processo e os custos envolvidos. Para tal, vários autores têm vindo a desenvolver novas metodologias para avaliar o desempenho acústico das soluções com custos menos onerosos, de entre estas, uma metodologia normalizada EN ISO 16251-1:2014 e não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas).

Neste trabalho, estudam-se soluções de reabilitação acústica recorrendo a abordagem experimental para o caso de pavimentos tradicionais em madeira, sendo utilizados provetes de dimensões reduzidas. É dado enfoque às soluções que permitem reduzir a componente de ruído de percussão.

**Palavras-chave:** pavimentos tradicionais em madeira, reabilitação acústica, redução sonora, revestimentos de piso, amostras de dimensões reduzidas, experimental

## ABSTRACT

The acoustic rehabilitation situations present several configurations, mainly due to its building construction time. For buildings located in historical centers where wood floors rehabilitation requires structural reasons, implementation of lightened solutions, which, generally, was acoustically designed are less studied and characterized.

The evaluation of the percussion noise component can be obtained, in a laboratory, based on standard test methods according to EN ISO 10140, which require the use of samples with reasonable dimensions (10 m<sup>2</sup>), increasing the construction and the maintenance costs.

At an early stage of development of a product, which are tested several samples, many of which may be changed or even eliminated in the process, it is necessary to expedite the process and the costs involved. To this end, several authors have developed new methods to assess the acoustic performance solutions with lower costs. A standard methodology EN ISO 16251-1: 2014 and non-standard (reverberation chamber of small dimensions).

This work aims to study acoustic rehabilitation solutions using several experimental trials in the case of traditional wood floors taking into account the constraints of structural mentioned order. Focus will be given to solutions that reduce the impact of noise component.

**Key words:** traditional wood floors, acoustic rehabilitation, sound reduction, floor coverings, small sizes test sample, experimental

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE QUADROS.....	xi
SIMBOLOGIA .....	xii
ABREVIATURAS.....	xiv
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento geral.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação .....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Considerações Iniciais .....	4
2.2 Pavimentos tradicionais de madeira .....	4
2.2.1 Elementos construtivos .....	5
2.2.1.1 Vigamento .....	5
2.2.1.2 Apoio do vigamento nas paredes.....	5
2.2.1.3 Tarugos .....	6
2.2.1.4 Cadeias .....	6
2.2.1.5 Soalho .....	7
2.2.2 Anomalias mais usuais.....	7
2.2.2.1 Deformação excessiva .....	8
2.2.2.2 Ataques biológicos .....	8
2.3 Requisitos acústicos dos edifícios novos/reabilitação.....	9
2.4 Soluções de melhoria de desempenho acústico .....	10
2.4.1 Soluções de reforço superior.....	11
2.4.1.1 Revestimento de piso com materiais elásticos e flexíveis .....	11
2.4.1.2 Pavimento flutuante .....	12
2.4.2 Soluções de reforço inferior .....	13

---

2.4.3 Soluções de reforço misto .....	13
2.5 Parâmetros acústicos .....	14
2.5.1 Considerações gerais .....	14
2.5.2 Nível sonoro de percussão ( $L_I$ ) .....	14
2.5.3 Nível sonoro normalizado de percussão ( $L_n$ ) .....	14
2.5.4 Redução sonora ( $\Delta L$ ) .....	15
2.5.5 índice de isolamento sonoro, normalizado a sons de percussão ( $L_n, w$ ) .....	15
2.5.6 Índice de redução sonora a sons de percussão ( $\Delta LW$ ) .....	15
2.5.7 Índice de isolamento sonoro a sons de percussão num pavimento de referência ...	16
2.6 Métodos de avaliação experimental .....	18
2.6.1 Método de avaliação experimental normalizado .....	18
2.6.1.1 Série de normas ISO 10140 .....	18
2.6.1.2 EN ISO 16251-1:2014 .....	18
2.6.2 Outro método de avaliação não normalizada .....	22
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	26
3.1 Laje ensaiada .....	26
3.2 Equipamentos .....	28
3.3 Metodologia simplificada (ISO 16251-1:2014) .....	29
3.3.1 Procedimento experimental .....	29
3.3.2 Pavimentos de madeira .....	31
3.3.3 Influência da posição de fonte .....	33
3.3.4 Influência da posição do acelerómetro .....	36
3.3.5 Influência do ruído de fundo .....	38
3.3.6 Influência do ruído aéreo nos níveis de vibração .....	39
3.4 Metodologia não normalizada .....	39
3.4.1 Soluções de melhoria do sistema .....	40
3.4.2 Procedimento experimental .....	42
3.4.3 Caracterização da câmara .....	43
3.4.3.1 Influência do ruído a sons aéreos .....	43
4 RESULTADOS .....	45
4.1 Considerações gerais .....	45
4.2 Análise dos níveis de vibração sonoro .....	46
4.2.1 Revestimentos Flexíveis .....	46
4.2.1.1 Tapete .....	46
4.2.1.2 Vinílico cinzento .....	48
4.2.1.3 Vinílico azul .....	49
4.2.2 Pavimentos Flutuantes .....	50
4.2.2.1 Aglomerado de borracha .....	50

---

---

4.2.2.2 Aglomerado de cortiça.....	51
4.2.2.3 Espuma de polietileno.....	52
4.3 Análise dos níveis sonoros.....	53
4.3.1 Revestimentos flexíveis.....	54
4.3.1.1 Índice de redução sonora conferido pelos revestimentos de piso.....	55
4.3.2 Pavimento flutuantes.....	56
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	58
5.1 Considerações finais.....	58
5.2 Trabalhos futuros.....	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXO A – ILUSTRAÇÕES DOS ENSAIOS.....	A-1
A.1 – Medição dos níveis de vibração numa laje de betão de dimensões reduzidas sob um pavimento flutuante com 5 mm de espuma de polietileno: cor azul, segundo a metodologia normalizada (ISO 16251:1-2014).....	A-1
A.2 – Medição dos níveis de vibração num pavimento de madeira (1.20 m × 0.80 m × 0.12 m) sob um vinílico azul com 2 mm de espessura, segundo a metodologia normalizada (ISO 16251:1-2014).....	A-1
A.3 – Medição dos níveis de vibração num pavimento de madeira (1.60 m × 1.50 m × 0.12 m) sob um vinílico azul com 2 mm de espessura, segundo a metodologia normalizada (ISO 16251:1-2014).....	A-2
A.4 – Medição dos níveis de pressão sonora de um revestimento de piso em vinílico azul com 2 mm de espessura sobre a laje de suporte, segundo a metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas).....	A-2
ANEXO B – EXEMPLO DE CÁLCULO.....	B-1
B. 1 – Cálculo do índice de redução sonora a sons de percussão.....	B-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Constituição de um pavimento tradicional em madeira (Baião et al., 2012).....	5
Figura 2.2 – Apoio do vigamento em paredes: a) vigas encastradas em paredes de alvenaria. Edifício do Largo São Domingues, Porto (Ilharco, 2008); b) Viga apoiadas em frechal. Edifício do Largo dos Lóios, Porto (Ilharco, 2008). .....	6
Figura 2.3 – Tarugamento em vigas de seção circular. Edifício do largo de São Domingues, Porto (Ilharco, 2008). .....	6
Figura 2.4 – Cadeira: a) configuração (Ilharco, 2008) ; b) Ilustração num pavimento na casa do Infante, Porto (Ilharco, 2008). .....	7
Figura 2.5 – Revestimento superior do pavimento: a) soalho à portuguesa (Teixeira, 2010); b) soalho à inglesa. (Teixeira, 2010). .....	7
Figura 2.6 – Elementos de madeira atacados por insetos xilófagos: a) térmitas (Ilharco, 2008); carunchos (InovaDomus, 2013). .....	8
Figura 2.7 – Solução de um sistema flutuante aligeirado sob o revestimento existente em madeira (InovaDomus, 2013). .....	12
Figura 2.8 – Solução de teto falso com múltiplas camadas suspenso através de apoios anti vibratórios à estrutura de teto em madeira existente (InovaDomus, 2013). .....	13
Figura 2.9 – Solução de reforço misto em pavimentos de madeira (Mateus, 2011). .....	13
Figura 2.10 - Curvas de referência de acordo com a norma ISO 717-2: 1996, revista e substituída pela NP EN ISO 717 - 2: 2013 (Mateus, 2008). .....	17
Figura 2.11 – Ajustamento da curva característica à curva de referência (Mateus, 2008). .....	17
Figura 2.12 – Ilustração da metodologia EN ISO 16251-1:2014: a) laje de dimensões reduzidas; b) Pormenor do material resiliente entre a laje e apoio e na base do apoio. ....	19
Figura 2.13 – Pavimentos pesados: Comparação entre a metodologia padrão e simplificada para o cálculo da redução sonora (Sommerfeld, 2009). .....	20
Figura 2.14: Redução sonora para revestimentos de pavimentos obtidos usando a metodologia padrão e a simplificada: a) carpete; b) vinílico com base flexível; c) vinílico corrente; d) linóleo (Pereira et al., 2014). .....	21
Figura 2.15 - Redução sonora para soalhos flutuantes obtidos usando a metodologia padrão e a simplificada: a) cortiça colada à sua superfície inferior; b) 4.5 mm de borracha (Pereira et al., 2014). .....	21



---

Figura 2.16 – Comparação da metodologia simplificada (ISO 16251-1:2014) e a metodologia padrão (ISO 10140) (Schmidlt et al., 2014). .....	22
Figura 2.17 – Vista exterior da câmara reverberante de dimensões reduzidas (Godinho et al., 2010). .....	23
Figura 2.18: Pormenor construtivo da câmara acústica de dimensões reduzidas (Godinho et al., 2010): a) aglomerado de cortiça ao longo da face superior da parede; b) aglomerado de borracha sob o piso da câmara. ....	24
Figura 2.19 – Curva de redução sonora das soluções construtivas segundo a metodologia simplificada e in situ: a) pavimento de madeira sobre um material resiliente de polietileno de 3 mm; b) pavimento de madeira sobre um material resiliente de polietileno de 5mm; c) pavimento de madeira sobre um material resiliente de aglomerado de cortiça 5 mm; d) vinílico sobre uma espuma. ....	25
Figura 3.1 – Ilustração dos pavimentos de madeira ensaiados com as dimensões: a) 1,60 m×1,5 m×0,12 m; b) 1,20 m×0,80× 0,12m. ....	26
Figura 3.2 – Soluções construtivas: a) vinílico azul; b) vinílico cinzento; c) tapete; d) pavimento de madeira flutuante com 2 mm de aglomerado de cortiça; e) pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; f) pavimento de madeira flutuante com 5 mm de espuma de polietileno de cor azul. ....	27
Figura 3.3 – Equipamentos técnicos: a) acelerómetro da Brüel & Kjar do tipo 4370; b) microfone G.R.A.S Sound & Vibration com um pré amplificador do tipo 26 AK, série nº 19148. ....	28
Figura 3.4 – Calibradores utilizados: a) Brüel & Kjaer do tipo 4294; b) Brüel & Kjaer do tipo 4231. ....	28
Figura 3.5 – Equipamentos: a) máquina de percussão normalizada da Brüel & Kjaer do tipo 3204, série 1666586; b) sistema de aquisição de som da Symphonie (01dB) da série 924. ....	29
Figura 3.6 – Configuração das posições de fonte (P1 a P3) e posições do acelerómetro: a) face superior do pavimento de referência (A1 a A9) b) face inferior do pavimento de referência (A1 a A8). ....	30
Figura 3.7 – Configuração das posições de fonte (P1 a P3) e posições do acelerómetro (A1 a A10): a) pavimento de madeira (1.20 m ×0.80 m×0.12 m); b) pavimento de madeira (1.60 m ×1.50 m×0.12 m). ....	32
Figura 3.8 – Ilustração da metodologia normalizada ISO 16251-1:2014: a) laje de pavimento de madeira de dimensões reduzidas (1.20m × 0.80m); b) Pormenor do material resiliente entre a laje de betão e o pavimento ensaiado, bem como as garras suportadas à laje de referência. ....	32
Figura 3.9 – Influência das soluções de melhoria no sistema ensaiado, segundo a metodologia normalizada (EN ISO 16251-1:2014). ....	33
Figura 3.10 – Redução sonora para as posições de fonte (P1, P2 e P3): a) laje de dimensões reduzidas de betão sob 3 mm de vinílico cinzento; b) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m)	

---

---

sob 3 mm de vinílico cinzento; c) laje de dimensões reduzidas de betão sob um tapete; d) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob um tapete; e) laje de dimensões reduzidas de betão sob um pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; f) pavimento de madeira (1.20m×0.8m) sob um pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha. ....	34
Figura 3.11 – Curva de redução sonora média e desvio padrão para as posições de fonte (P1, P2 e P3): a) laje de dimensões reduzidas de betão com 3 mm de vinílico cinzento; b) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob 3 mm de vinílico cinzento; c) laje de dimensões reduzidas de betão sob um tapete; d) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob 3 mm vinílico cinzento; e) laje de dimensões reduzidas de betão sob um pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; f) pavimento de madeira (1.20m×0.8m) sob um pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha.....	36
Figura 3.12 – Curva de redução sonora média e desvio padrão para a posição de fonte (P1): a) laje de dimensões reduzidas de betão sob 3 mm de vinílico cinzento; b) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob 3 mm de vinílico cinzento; c) laje de dimensões reduzidas de betão sob um tapete; d) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob um tapete; e) laje de dimensões reduzidas de betão sob um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; f) pavimento de madeira (1.20m×0.8m) sob um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha.	37
Figura 3.13 – Influência do ruído de fundo nos níveis de vibração sonora medidos. ....	39
Figura 3.14 – Influência do ruído aéreos nos níveis de vibração. ....	39
Figura 3.15 – Ilustração das soluções de melhoria do sistema. ....	40
Figura 3.16 – Configuração da posição de fonte e microfone utilizada na avaliação do comportamento das soluções de melhoria testadas.....	41
Figura 3.17 – Contribuição da componente aos sons aéreos no interior do recinto recetor para as soluções de melhoria testadas.....	41
Figura 3.18 – Configuração das posições na laje de suporte: a) posições de fonte; b) posições do microfone.....	42
Figura 3.19 – Influência da componente de ruído a sons aéreos nas medições realizadas no recinto recetor para a laje de suporte: a) pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; b) 2 mm de vinílico azul. ....	44
Figura 4.1 – Curva de redução sonora para um tapete sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m). ....	46
Figura 4.2 – Representação esquemática do pavimento de referência (Villoet et al., 2007). ...	47
Figura 4.3 – Redução sonora para um revestimento em tapete com um pavimento de betão e pavimento de madeira (Villot et al., 2007).....	48

---

---

Figura 4.4 – Redução sonora para um revestimento de vinílico cinzento com 3 mm de espessura sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).....	48
Figura 4.5 – Redução sonora para um revestimento de vinílico azul com 2 mm de espessura sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).....	49
Figura 4.6 – Redução sonora para um pavimento flutuante com 4 mm de espessura de aglomerado de borracha sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), uma laje de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e uma laje de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).....	51
Figura 4.7 – Redução sonora para um pavimento flutuante com 2 mm de espessura de aglomerado de cortiça sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m). ....	52
Figura 4.8 – Redução sonora para um pavimento flutuante com 5 mm de espessura de espuma de polietileno sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).....	53
Figura 4.9 – Curvas de redução sonora segundo as metodologias normalizada (ISO 16251:1-2014) e não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas) para vários revestimentos flexíveis: a) tapete; b) 3 mm de vinílico cinzento; c) 2 mm de vinílico azul. ...	54
Figura 4.10 – Reajustamento a curva de referência de um vinílico cinzento com 3 mm de espessura sobre a laje de suporte (1.60 m×1.5 m×0.06 m), segundo a metodologia não normalizada. ....	55
Figura 4.11 – Curvas de redução sonora segundo as metodologias normalizada e não normalizada para pavimentos flutuantes com um material resiliente de: a) 4 mm de aglomerado .....	56

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Requisitos acústicos exigidos em edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras (Mateus, 2008).....	9
Quadro 2.2 – Nível de pressão sonora, normalizado, num pavimento de referência (NP EN ISO 717-2: 2013). .....	16
Quadro 3.1 – Características geométricas dos pavimentos de madeira. ....	26
Quadro 3.2 – Características das soluções construtivas. ....	27
Quadro 3.3 – Características das soluções construtivas. ....	27
Quadro 3.4 – Constituição das soluções de melhoria ao sistema. ....	40
Quadro 4.1 – Índice de redução sonora para os três revestimentos finais de piso de acordo com as duas metodologias de ensaio. ....	55
Quadro 4.2 – Índice de redução sonora segundo as metodologias normalizada e não normalizada para pavimentos flutuantes com um material resiliente de: a) 4 mm de aglomerado de borracha; b) 2 mm de aglomerado de cortiça; c) 5mm de espuma de polietileno de cor azul.....	57

---

## SIMBOLOGIA

### Letras latinas

$a_0$	Aceleração média no pavimento de referência sem a solução aplicada ( $m/s^2$ )
$a_1$	Aceleração média no pavimento de referência com a solução aplicada ( $m/s^2$ )
$a_{ref}$	Aceleração de referência $10^{-6}m/s^2$
A	Área de absorção sonora equivalente ( $m^2$ ).
$A_0$	Área de absorção sonora de referência ( $m^2$ )
D	Isolamento bruto a sons aéreos entre o recinto emissor e recetor (dB)
$L_{a,0}$	Nível médio de vibração do pavimento de referência sem o revestimento de pavimento aplicado (dB)
$L_{a,1}$	Nível médio de vibração fornecido pelo sistema quando é percutido sobre o mesmo uma máquina de percussão normalizada (dB)
$L_{a,r}$	Nível de vibração normalizado devido a excitação de impacto, calculado para o pavimento de referência com o revestimento de piso em análise (dB)
$L_1$	Nível de pressão sonora medido no recinto recetor (dB)
$L_2$	Nível de pressão sonora medido no recinto emissor (dB)
$L_i$	Nível médio da pressão sonora (dB)
$L_n$	Nível sonoro normalizado de percussão (dB)
$L_{n,0}$	Nível de pressão sonora normalizada devido à ação da percussão no pavimento normalizado sem revestimento (dB)
$L_{n,1}$	Nível de pressão sonora de referência com o revestimento de pavimento aplicado (dB)
$L_{n,r}$	Nível de pressão sonora normalizada devido à excitação de impacto, calculado para o pavimento de referência com o revestimento aplicado (dB)
$L_{n,r,0}$	Nível de pressão sonora, normalizado, num pavimento de referência (dB)
$L_{n,r,0,w}$	Índice de isolamento, devido à excitação de impacto, normalizado, calculado para o pavimento de referência sem o revestimento de piso a ensaiar (dB)

$L_{n,r,w}$	Índice de isolamento, devido à excitação de impacto, normalizado, calculado para o pavimento de referência com o revestimento de piso em ensaio (dB)
$L_{n,w}$	Índice de isolamento sonoro, normalizado a sons de percussão (dB)
$L_{out}$	Nível de pressão sonora no recinto no recinto emissor (dB)
$P_0$	Medição da pressão sonora no pavimento de referência sem a solução aplicada (dB)
$P_1$	Pressão média no pavimento de referência com a solução aplicada ( $m^2$ )
$p_{ref}$	Pressão sonora de referência $2 \times 10^{-5} Pa$

### **Letras gregas**

$\Delta L$	Redução do nível de pressão sonora devido à ação de percussão normalizada (dB)
$\Delta L_{a,w}$	Índice de redução sonora de um revestimento de pavimento (dB)
$\Delta L_w$	Índice de redução sonora a sons de percussão (dB)

## ABREVIATURAS

A	Posição de acelerómetro
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
CSTB	Centro Científico e Técnico para a Construção
DEC	Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra
EN	Norma Europeia
EPI	Equipamento de proteção individual
INOVADOMUS	Associação para o Desenvolvimento da Casa do Futuro
ISO	International organization of standardization
M	Posição de microfone
NP	Norma Portuguesa
OBS	Aglomerado de partícula de madeira longas e orientadas
P	Posição de fonte
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
PVC	Policloreto de vinila
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento geral

A madeira é um dos materiais mais antigos da construção. Desde a antiguidade o homem, já utilizava a madeira como um material de construção, devido ao seu fácil manuseamento e bom desempenho mecânico em relação a outros materiais. Em Portugal, grande parte do edificado localizado em zonas com um elevado valor patrimonial possui elementos estruturais em madeira, nomeadamente os pavimentos tradicionais em madeira.

A reabilitação designa toda a série de ações que se empreendem tendo em vista a recuperação e a beneficiação de um certo sistema funcional (normalmente edifício), conceptualizando à data de implementação para a satisfação de determinados requisitos, voltando a torná-lo habitável para usos existentes e manutenção dos mesmos, mas agora em conformidade com padrões exigências atuais. (Patrício, 2008).

Dentro da reabilitação de um edificado existem várias áreas de atuação, uma das quais a reabilitação acústica que deve ser inserida juntamente com os outros tipos de reabilitação quando necessário.

Na reabilitação acústica numa zona histórica, considera-se elemento-chave a observância das exigências relacionadas com o comportamento do edifício. Todavia, é um dado objetivo que os edifícios se encontram inseridos numa realidade bem específica. Neste sentido, qualquer procedimento de reabilitação acústica deve ter em conta não só o comportamento acústico do edifício, mas também a resposta adequada a outras exigências funcionais.

No caso dos pavimentos tradicionais de madeira, estes são na sua maioria, substituídos por outro tipo de pavimentos por opção do projetista. Esta decisão deve-se, por um lado, com o grande grau de deterioração em que se encontra o pavimento e por outro lado, por questões regulamentares e de estética. Do ponto de vista arquitetónico, esta substituição passa muitas vezes pela manutenção da solução tradicional.

No domínio da acústica com exceção das moradias unifamiliares, os pavimentos de madeira, por si só, não cumprem as exigências regulamentares, quer aos sons aéreos quer aos sons de



percussão. Deste modo, é necessário encontrar soluções de reforço que permitam melhorar o seu isolamento.

O desempenho acústico de um pavimento a sons de percussão pode ser determinado experimentalmente através da metodologia normalizada, descrita na série de normas EN ISO 10140. A sua realização requer a utilização de provetes com dimensões consideráveis (10 m<sup>2</sup>), encarecendo os custos de construção e de instalação.

Numa sociedade onde o fator económico prevalece, houve necessidade de estudar numa fase de desenvolvimento do produto, metodologias alternativas mais simples que permitem estimar o desempenho acústico de um revestimento de piso. Com este intuito vários protótipos são analisados numa fase inicial, podendo ocorrer alterações ou eliminações dos mesmos numa fase de desenvolvimento de acordo com os objetivos delineados serem ou não atingidos, sem encarecer os custos.

## 1.2 Objetivos

Esta dissertação incide sobre a avaliação de soluções de reabilitação acústica para o isolamento sonoro a sons de percussão de pavimentos tradicionais em madeira, recorrendo a métodos de avaliação experimental normalizada “alternativa” (ISO 16251-1:2014) e não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas, existente nas instalações do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra - DEC).

Os pavimentos tradicionais de madeira foram testados considerando dois tipos de soluções distintas: diferentes revestimentos de piso flexíveis (tapete, 3 mm de vinílico de base flexível e 2 mm de vinílico de base flexível) e pavimentos flutuante com diferentes materiais resilientes (4 mm de aglomerado de borracha, 2 mm de aglomerado de cortiça e 5 mm de espuma de polietileno). Foram utilizadas duas configurações de pavimentos de madeira com uma área de 0.12 m<sup>2</sup> e 0.29 m<sup>2</sup>.

Os resultados das curvas de redução sonora obtidos segundo metodologia normalizada “alternativa” (ISO 16251-1:2014) para as duas configurações acima descritas, são comparados com os valores obtidos numa laje de betão de dimensões reduzidas com uma área de 0.12 m<sup>2</sup>, segundo a mesma metodologia.

Analisa-se ainda outro método de avaliação experimental, para avaliar o desempenho acústico dos revestimentos de piso adotados, que consiste numa metodologia não normalizada, constituída por uma câmara reverberante de dimensões reduzidas, em que a laje de suporte possui dimensões (1.60 m×1.50 m×0.06 m). Com o intuito de avaliar a redução sonora e o

índice de redução conferido para cada revestimento de piso, utilizou-se como elemento de comparação, os resultados obtidos segundo a metodologia normalizada “alterativa” (ISO 16251-1:2014) sobre uma laje de betão de dimensões reduzidas com dimensões (1.20 m×0.80 m×0.20 m).

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação de mestrado, desenvolvida no âmbito da obtenção de grau de mestre em engenharia civil no perfil de construções, encontra-se disposta em cinco capítulos com os seguintes conteúdos a desenvolver:

- No primeiro capítulo, será feito um enquadramento geral ao tema, bem como as principais metas e objetivos a desenvolver ao longo da presente dissertação.
- No segundo capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica ao tema em estudo que incidirá sobre os pavimentos tradicionais em madeira: principais elementos construtivos, principais anomalias e causas. Assim como, quais os requisitos acústicos que devem obedecer segundo a legislação em vigor e algumas soluções de melhoria do desempenho acústica. De igual modo, será exposto alguns conceitos teóricos, métodos de análise experimental e alguns resultados obtidos de várias investigações sobre o objetivo a desenvolver.
- No terceiro capítulo, descreve-se o procedimento experimental para as duas metodologias estudadas: lajes ensaiadas, revestimentos de piso adotados e equipamentos técnicos. Por fim efetua-se uma caracterização de ambas as metodologias.
- No quarto capítulo, apresenta-se os resultados obtidos para os diversos revestimentos de piso sob as duas configurações de pavimentos de madeira e laje de betão de dimensões reduzidas, segundo os dois métodos de avaliação experimental testados.
- No quinto capítulo, refere-se as principais conclusões da observação dos dados das atividades experimentais e algumas sugestões de trabalhos a desenvolver em futuros estudos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações Iniciais

O som produzido num recinto emissor pode ser transmitido para o recinto recetor, por via aérea (sons aéreos) ou por via sólida (sons de percussão). No recinto recetor o som resultante é a junção da transmissão direta mais a transmissão que ocorre por via secundária (transmissões marginais).

Os sons de percussão são todos os choques ou solicitações mecânicas que ocorrem geralmente por via sólida, percutindo diretamente num elemento de compartimentação. Os choques que ocorrem no interior de um edifício podem ser de carácter impulsivo (atividades por parte dos residentes/comercio), carácter periódico (maquinaria do sistema AVAC, elevadores entre outros) ou carácter aleatório (atividades industriais).

Qualquer ação de choque exercida num ponto de determinado elemento de compartimentação de um edifício produz uma excitação que se propaga por ondas elásticas a todo esse elemento, e ao que se encontra ligado, convertendo-o numa fonte de radiação de energia sonora para os compartimentos por ele delimitados com características fortemente influenciadas pelas propriedades elásticas dos elementos. (Patrício, 2008).

Na construção corrente, a transmissão destes ruídos, mais significativa processa-se para as habitações dos pisos inferiores ao pavimento solicitado, verificando-se também transmissão sonora para as habitações laterais ou ainda para os pisos superiores (Domingues, 2008).

### 2.2 Pavimentos tradicionais de madeira

Até aos anos 30 do século XX, os pavimentos tradicionais de madeira foram uma solução corrente nos edifícios antigos inseridos em centros históricos. Segundo (Ilharco *et al.*, 2008), as espécies mais utilizadas nas estruturas dos pavimentos em Portugal eram o castanho, o carvalho, o pinho e o eucalipto.

### 2.2.1 Elementos construtivos

Os pavimentos de madeira ou sobrados, apresentam inúmeras especificidades que os tornam excelentes soluções para execução de estruturas horizontais, tendo por isso sido utilizada ao longo dos vários séculos. São constituídos pelo vigamento e soalho, apresentando elementos secundários, normalmente designados por tarugos e cadeias que, executando funções específicas, tornam o conjunto mais homogéneo (Ilharco, 2008). Na figura 2.1 apresenta-se uma representação esquemática de um pavimento tradicional em madeira.

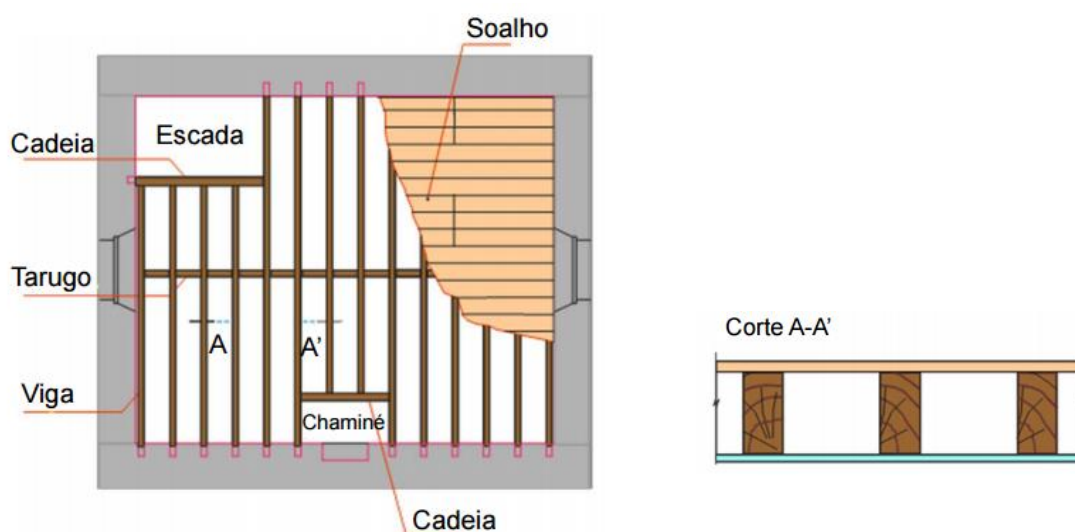


Figura 2.1 – Constituição de um pavimento tradicional em madeira (Baião *et al.*, 2012).

#### 2.2.1.1 Vigamento

A estrutura dos pavimentos de madeira organiza-se colocando as vigas paralelamente. Nos edifícios pombalinos as vigas, com uma largura de cerca de 0.15 m, têm um afastamento, entre 0.20 a 0.40m. As limitações dos espécimes florestais levam a privilegiar o recurso a perfis com altura não superior a 0.20 m, o que limita o vão a vencer para valores de cerca de 4 m. Nas situações em que era necessário vencer vãos maiores, recorria-se a vigas principais de maior seção onde apoiava o vigamento atrás referido (Baião *et al.*, 2012).

#### 2.2.1.2 Apoio do vigamento nas paredes

O apoio do vigamento nas paredes é em geral realizado através de dois processos (Baião *et al.*, 2012):

- encaixe das extremidades das vigas ou dos barrotes de madeira em aberturas nas paredes (figura 2.2 - a).

- se tratar de uma parede com frechal, peça de madeira que coroa a paredes, a ligação entre o pavimento e a parede faz-se através desse elemento, que por sua vez é ligado à parede por elementos de ferro ou madeira (figura 2.2 - b).

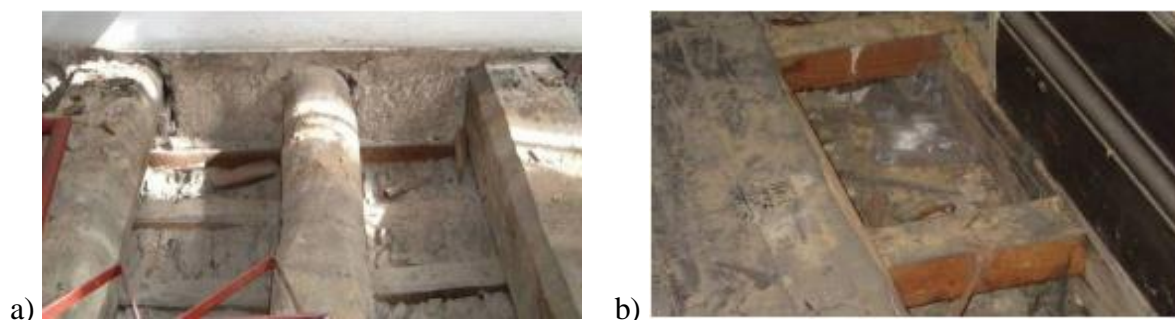


Figura 2.2 – Apoio do vigamento em paredes: a) vigas encastradas em paredes de alvenaria. Edifício do Largo São Domingues, Porto (Ilharco, 2008); b) Viga apoiadas em frechal. Edifício do Largo dos Lóios, Porto (Ilharco, 2008).

### 2.2.1.3 Tarugos

A fim de diminuir os riscos de empenamento do vigamento, o que provocaria desnivelamento e distorções dos pavimentos, faz-se o seu tarugamento. Os tarugos são, na sua versão mais simples, constituídos por troços de viga, introduzidos, bem juntos, entre as vigas e a elas ligados segundo alinhamento transversais (Baião *et al.*, 2012). Na figura 2.3 apresenta-se um exemplo de tarugamento em vigas de seção circular num edifício localizado na cidade do Porto.



Figura 2.3 – Tarugamento em vigas de seção circular. Edifício do largo de São Domingues, Porto (Ilharco, 2008).

### 2.2.1.4 Cadeias

Num pavimento de um edifício quando existem pontos singulares, tais como, chaminés e escadas, é necessário alterar a configuração do vigamento. Segundo (Ilharco, 2008), é

necessário adotar uma disposição que consiga transmitir as cargas das vigas para outras que apoiem noutras zonas das paredes. Esta situação era colmatada com a colocação de cadeias que consistem em vigas perpendiculares e encastradas entre duas vigas principais (Figura 2.4).

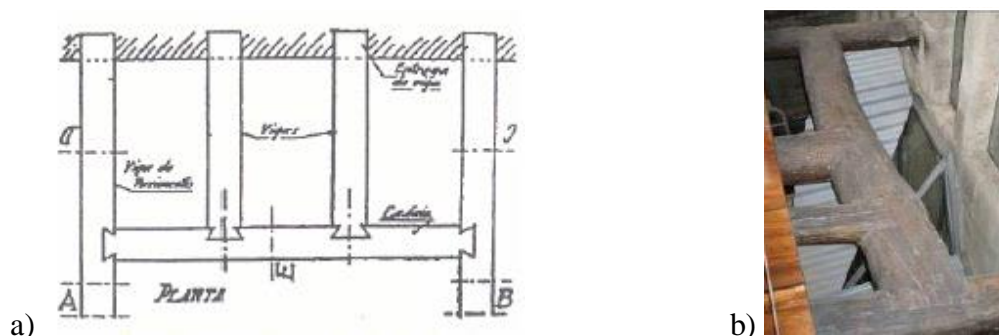


Figura 2.4 – Cadeia: a) configuração (Ilharco, 2008) ; b) Ilustração num pavimento na casa do Infante, Porto (Ilharco, 2008).

#### 2.2.1.5 Soalho

O revestimento dos pavimentos era, na maior parte das vezes, efetuado por um conjunto de tábuas de madeira, designado por soalho com espessuras variáveis entre os 2.2 e os 5.0 cm, largura entre os 12 e os 30 cm e comprimentos que podiam atingir os 10 m (Ilharco, 2008). O soalho varia consoante o tipo de ligação que apresenta de chanfro, de meio-fio (à portuguesa) (figura 2.5 - a) e de macho e fêmea (à inglesa) (figura 2.5 - b). As espécies mais utilizadas na sua construção eram o pinho nacional, o pinho manso e a casquinha.

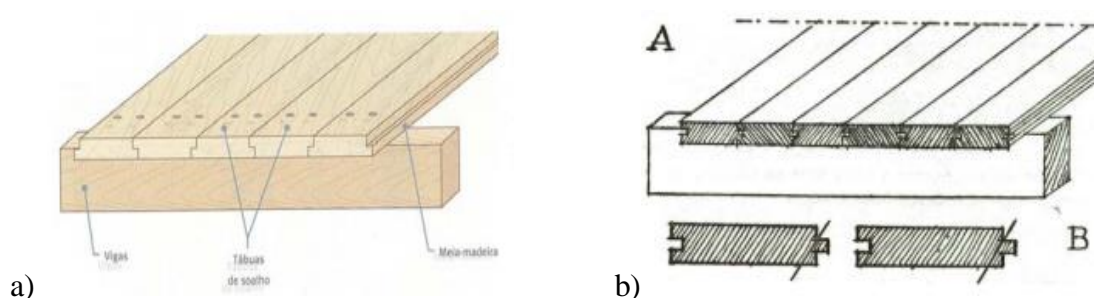


Figura 2.5 – Revestimento superior do pavimento: a) soalho à portuguesa (Teixeira, 2010); b) soalho à inglesa. (Teixeira, 2010).

#### 2.2.2 Anomalias mais usuais

Os pavimentos localizados em núcleos históricos são constituídos na sua grande maioria por elementos de madeira. De Um projeto “cooperar para Reabilitar” da autoria da (InovaDomus,

2013) refere que principais anomalias presentes nos pavimentos tradicionais em madeira são as deformações excessivas e os ataques biológicos.

### 2.2.2.1 Deformação excessiva

As formas de manifestação das deformações excessivas são as grandes deformações dos elementos resistentes, nomeadamente das vigas e barrotes, perceptíveis a olho nu (InovaDomus, 2013).

Causas comuns segundo a (InovaDomus, 2013):

- Deficiências de projeto: o dimensionamento da solução foi mal executado, culminando em seções de dimensão insuficiente.
- Mudança de utilização do piso: ao longo do tempo de vida do edifício o tipo de utilização foi alterado, passando o piso a estar sujeito a cargas para as quais não foi dimensionado.
- Execução de tetos falsos demasiado pesados e por vezes com tubagens de equipamentos de AVAC ancorados à estrutura do piso.

### 2.2.2.2 Ataques biológicos

As formas de manifestação dos ataques biológicos são os fungos de podridão e bolores, que numa fase mais avançada podem conduzir a uma diminuição da seção resistente do vigamento dos pisos (InovaDomus, 2013).

Causas comuns segundo a (InovaDomus, 2013):

- Presença de água, associada a um aumento de temperatura, resultando em condições favoráveis ao desenvolvimento de insetos xilófagos como térmitas (figura 2.6 – a) e carunchos (figura 2.6 – b).



Figura 2.6 – Elementos de madeira atacados por insetos xilófagos: a) térmitas (Ilharco, 2008); carunchos (InovaDomus, 2013).

### 2.3 Requisitos acústicos dos edifícios novos/reabilitação

Do ponto de vista do conforto acústico dos edifícios, as exigências correspondentes encontram tradução quantitativa num conjunto de índices que é necessário cumprir em qualquer projeto de licenciamento (Patrício, 2010). Estas exigências integram-se em três aspetos fundamentais:

- Isolamento a sons aéreos dos elementos de compartimentação verticais (paredes), tanto interiores como exteriores (fachadas);
- Isolamento a sons de percussão dos elementos de compartimentação horizontais;
- Ruído de equipamentos e instalações.

As exigências encontram-se descritas no Decreto-Lei nº129/2002 de 11 de maio, denominado Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios-RRAE, com as alterações do Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de junho. Têm como objetivo melhorar a qualidade do edificado em Portugal, quer dos edifícios novos quer dos edifícios existentes que sofrem alteração do tipo de uso, amplificação e reabilitação.

Segundo o artigo 5, do RRAE, os edifícios com o tipo de uso habitacional e misto ou unidades hoteleiras, estão sujeitos a cumprir os seguintes requisitos acústicos (quadro 2.1). Os edifícios que se encontram localizados numa zona histórica que sejam sujeitos a ações de reabilitação pode-se aplicar os requisitos das alíneas b) a g) da alínea 1, com uma tolerância de 3 dB, desde que não se altere o tipo de uso referido no presente artigo e que mantenha a mesma identidade patrimonial.

Quadro 2.1 – Requisitos acústicos exigidos em edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras (Mateus, 2008).

Ref.	Elemento / local	Mínimo Regulamentar
1a)	Entre o exterior e quartos ou zonas de estar (fachadas com envidraçados)	D2m,nT,w + (C;Ctr) ≥ 28 dB – em zonas sensíveis reguladas pela alínea b) do n.º1 do art. 11 do RGR D2m,nT,w + (C;Ctr) ≥ 33 dB – em zonas mistas ou zonas sensíveis reguladas pelas alíneas c), d) e e) do n.º1 do art. 11 do RGR D2m,nT,w + (C;Ctr) ≥ 36 dB – quando se verifique o disposto no n.º 7 do art. 12 do RGR (zonas urbanas consolidadas com violação até 5dB(A) dos valores limite de exposição) C ou Ctr, somados a D2m,nT,w, quando área translúcida superior a 60% do elemento de fachada (função do tipo de ruído dominante na emissão).
1b) e 1e)	Entre compartimentos de um fogo e quartos ou zonas de estar de outro fogo	DnT,w ≥ 50 dB L'nT,w ≤ 60 dB
1c), 1e) e 1f)	Entre locais de circulação comum e quartos ou zonas de estar dos fogos	DnT,w ≥ 48 dB DnT,w ≥ 40 dB se a circulação comum for caminho vertical e existir elevador DnT,w ≥ 50 dB se a circulação comum for garagem de estacionamento autom. L'nT,w < 60 dB ou não se aplica se a circulação comum for caminho vertical e existir elevador
1d) e 1g)	Entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão e quartos ou zonas de estar dos fogos	DnT,w ≥ 58 dB L'nT,w ≤ 50 dB
1h)	No interior dos quartos ou zonas de estar o valor de LAr,nT do ruído particular de equipamentos colectivos do edifício deve satisfazer as seguintes condições	LAr,nT ≤ 32 dB(A) se o funcionamento for intermitente LAr,nT ≤ 27 dB(A) se o funcionamento for contínuo LAr,nT ≤ 40 dB(A) se for um grupo gerador eléctrico de emergência
5 e 6	Nas avaliações in situ destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos deve considerar-se:	+ 3 dB para D2m,nT,w e para DnT,w - 3 dB/dB(A) para L'nT,w e LAr,nT



No sentido de agilizar e dinamizar a promoção da reabilitação urbana houve a necessidade de proceder a alteração do Decreto – Lei nº307/2009 de 23 de outubro, que estabelece o regime jurídico da reabilitação urbana de acordo com a Lei nº32/2012, de 14 de agosto para o Decreto-Lei nº 53/2014 de 8 de abril. Este regulamento excecional terá uma duração temporária de sete anos.

De acordo com a Lei nº 53/2014 de 8 de abril, a revisão do regime jurídico vem reforçar o conceito de promover o edificado existente, simplificando o procedimento de criação de áreas de reabilitação urbanas, criando um procedimento simplificado de controlo prévio de operações urbanísticas e regulamentando a reabilitação urbana de edifícios e frações, ainda que localizadas fora das áreas de reabilitações urbanas, cuja construção tenha sido concluída há pelo menos 30 anos e em que se justifique uma intervenção de reabilitação destinada a conferir-lhes adequadas características de desempenho e de segurança.

Segundo o artigo 5, do Decreto-Lei nº53/2014 de 8 de abril, estão dispensadas do cumprimento de requisitos acústicos, as operações urbanísticas destinadas a obras de conservação, alteração, reconstrução, construção ou de amplificação, na medida em que sejam condicionadas por circunstâncias preexistentes que impossibilitem o cumprimento da legislação técnica aplicável, desde que não ultrapasse os alinhamentos e a cêrcea superior das edificações confinadas mais elevadas e não agravem as condições de salubridade ou segurança de outras edificações.

#### **2.4 Soluções de melhoria de desempenho acústico**

Na grande maioria dos edifícios antigos é frequente a degradação dos elementos de madeira, pelo que surge a necessidade de intervenção ao nível dos pavimentos, as quais poderão passar pelo reforço ou pela substituição parcial de peças de madeira que deixaram de cumprir os requisitos necessários, bem como pela substituição ou tratamento de revestimentos (de piso e tetos). Face às novas exigências funcionais e à luz da regulamentação construtiva, muitas das intervenções deverão, também, complementar a incorporação de materiais de isolamento acústico (frequente em casos de piso intermédio) e isolamento térmico. (Almeida *et al.*, 2008).

A transmissão de ruídos nos edifícios antigos, por via aérea e de percussão, ocorre sobretudo na direção vertical entre fogos, através elementos estruturais em pavimentos de madeira. Estes não cumprem o regulamento devido ao fato de serem mais leves, dificultando o aumento do isolamento a sons de percussão, sobretudo, ao nível das baixas frequências.

Os aspetos relevantes a ter em atenção numa perspetiva de reabilitação acústica dos edifícios inserem-se, fundamentalmente, na necessidade de verificação da conformidade regulamentar

do edifício “corrigido” com a legislação em vigor à data do licenciamento da ação de reabilitação/ recuperação/ remodelação correspondente (Patrício, 2010). Devem ser verificados os seguintes parâmetros:

- O isolamento a sons aéreos entre fogos (tanto na horizontal como na vertical) e entre estes e o exterior (isolamento da fachada);
- O isolamento a sons de percussão entre fogo sobrepostos;
- O ruído de equipamentos de carácter coletivo e de instalações que se possa estabelecer nas várias frações habitacionais;
- Existindo unidades de comércio e serviços integrados no edifício, também o isolamento a sons aéreos e a sons de percussão entre estes espaços e os fogos imediatamente, seja na direção vertical (habitação sobreposta) ou na horizontal (habitação contígua).

Ao nível da intervenção de elementos em pavimentos tradicionais com a incorporação de materiais de isolamento acústico, tem como objetivo melhorar a componente a sons de percussão e a sons aéreos. As soluções construtivas mais utilizadas, resumem-se em três tipos de métodos: soluções de reforço superior, soluções de reforço inferior e soluções mistas. Contudo a reabilitação deste elemento construtivo tende a aumentar a carga sobre os elementos estruturais existentes em madeira, podendo ser necessário realizar um estudo estrutural.

#### **2.4.1 Soluções de reforço superior**

A intervenção ao nível dos pavimentos tradicionais de madeira inseridos em núcleos históricos, geralmente por questões de estética os tetos constituídos por elementos principais de vigamentos e soalho podem ser deixados a olho nu. Para se conseguir fazer a redução do ruído de percussão, deverá efetuar-se a alteração da superfície de impacto, através da aplicação de um revestimento de piso com materiais elásticos e flexíveis ou através de pavimentos flutuantes sobre um material resiliente.

Um revestimento de piso deve assegurar a integridade dos ocupantes (resistência mecânica, segurança na circulação, segurança contra o risco de incêndios e segurança contra o risco de eletrocussão), questões de conforto dos utentes (estanquidade, salubridade, conforto acústico, conforto visual, conforto higrotérmico, conforto na circulação, conforto tátil e visual) e garantir a manutenção das qualidades do revestimento (Cole *et al.*, nd).

##### **2.4.1.1 Revestimento de piso com materiais elásticos e flexíveis**

Atualmente no mercado existe uma gama variada de revestimentos finais de piso (elásticos e flexíveis), tais como: materiais têxteis (carpetes e alcatifas), materiais sintéticos (linóleos e vinílicos).

### 2.4.1.2 Pavimento flutuante

O sistema consiste na realização de um pavimento constituído por duas camadas de diferentes espessuras separadas por um material resiliente. A camada superior é constituída por um pavimento flutuante de menor espessura. Segundo (Tadeu *et al.*, 2010) podem ser agrupados em três categorias:

- Pavimentos tradicionais de madeira maciça assente direta ou indiretamente sobre a camada resiliente;
- Pavimentos flutuantes colados, em geral de pequena espessura;
- Pavimentos contraplacados.

O elemento de separação é constituído por um material resiliente (flexível e elástico), que tem como função refletir a maior parte da energia de vibração que chega à superfície da camada resiliente e a restante é transmitida ao segundo elemento (laje de suporte – pavimento de madeira). De acordo com (Tadeu *et al.*, 2010), um material resiliente deve apresentar as seguintes características:

- Conservar a sua elasticidade mesmo quando aplicado com pequenas espessura;
- 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.

No âmbito desta dissertação serão estudadas soluções de reforço superior, com o objetivo de atenuar, o impacto sobre a superfície das lajes de suporte em elementos de madeira. No capítulo 3 serão apresentados os revestimento de piso adotados, bem como a constituição das lajes de suporte.

Na figura 2.7 apresenta-se, uma solução de reabilitação de um sistema flutuante aligeirado sob um revestimento existente, em madeira no edifício sede da InovaDomus em Ílhavo.

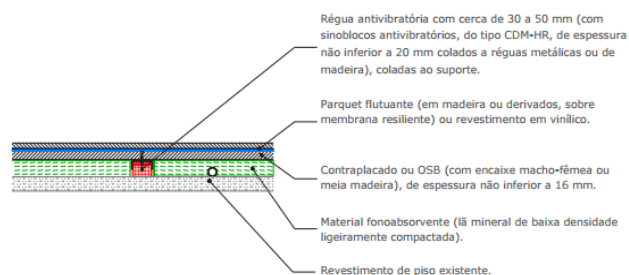


Figura 2.7 – Solução de um sistema flutuante aligeirado sob o revestimento existente em madeira (InovaDomus, 2013).

### 2.4.2 Soluções de reforço inferior

Por vezes é necessário reduzir a propagação de ruído, devido a ligações rígidas entre o pavimento e o teto ou a ocultação de equipamentos e instalações de tubagens, o que requer a implementação de soluções de reforço na parte inferior do pavimento, através da colocação de materiais de isolamento acústico nas vigas ou a suspensão do teto por mecanismos próprios de vibração (tetos falsos).

Tal como já referido anteriormente os materiais escolhidos para este tipo de soluções de reabilitação devem ser leves, de modo a não comprometer o comportamento estrutural do elemento em madeira, como por exemplo: gesso cartonado, lã de rocha, fibras de coco, aglomerados de cortiça entre outros. Na figura 2.8 apresenta-se uma solução de reabilitação acústica, em pavimentos intermédios no edifício sede da InovaDomus em Ílhavo.

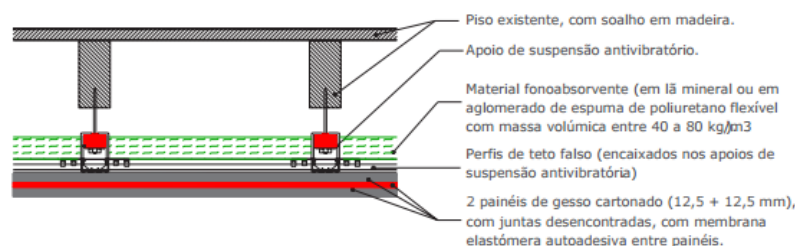


Figura 2.8 – Solução de teto falso com múltiplas camadas suspenso através de apoios antivibratórios à estrutura de teto em madeira existente (InovaDomus, 2013).

### 2.4.3 Soluções de reforço misto

Às vezes as soluções de reforço na face superior ou inferior não são suficientes para corrigir a propagação de ruído, de modo a cumprir com os requisitos acústicos exigidos conforme o tipo de uso a que destina. Para tal, é necessário intervir nas duas faces (soluções mistas). Na figura 2.9 apresenta-se uma solução de reforço misto em pavimentos de madeira.

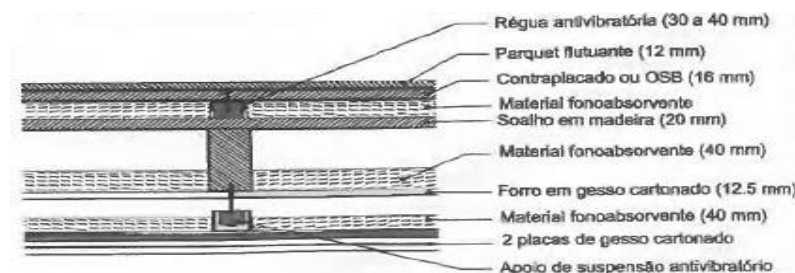


Figura 2.9 – Solução de reforço misto em pavimentos de madeira (Mateus, 2011).

## 2.5 Parâmetros acústicos

### 2.5.1 Considerações gerais

A partir das Normas ISO 140-7 e série de normas ISO 10140, pode-se obter os procedimentos de medição do isolamento sonoro a sons de percussão aplicado a edifícios quer a elementos de construção.

Nas caracterizações do isolamento aos sons de percussão em edifícios (*in situ*), aplicam-se as seguintes normas europeias que convertem a medição de gama de frequência para um único valor de índice que caracterize o desempenho acústico.

- NP EN ISO 717-2:2013: Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão.
- NP EN ISO 140-7:2008: Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 7: Medição, *in situ*, do isolamento sonoro de pavimentos a sons de percussão.

A série de normas EN ISO 10140: 2010 é constituída por cinco partes, designada com o título principal: Acústica – Medição em laboratório do isolamento acústico de elementos de construção:

- Parte 1: Normas de aplicação a produtos específicos;
- Parte 2: Medição do isolamento sonoro a sons aéreos;
- Parte 3: Medição do isolamento sonoro a sons de percussão;
- Parte 4: Procedimentos e requisitos de medição;
- Parte 5: Requisitos para instalações e equipamentos experimentais.

Para os ensaios realizados em laboratório aplicam-se a série de normas EN ISO 10140: 2010.

### 2.5.2 Nível sonoro de percussão ( $L_i$ )

Segundo as normas aplicáveis aos ensaios em laboratório, o nível sonoro de percussão define-se como o nível médio da pressão sonora, numa banda de um terço de oitava, na câmara recetora, quando o pavimento em ensaio é excitado pela máquina de percussão normalizada, este valor é expresso em decibel (dB).

### 2.5.3 Nível sonoro normalizado de percussão ( $L_n$ )

O nível sonoro normalizado de percussão define-se como o nível médio da 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 ( $A$ ), medido na câmara recetora, e a área de absorção sonora de referência ( $A_0$ ). Este valor é expresso em decibel.

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

Sendo  $A_0$ , área de absorção sonora de referência ( $10\text{m}^2$ ).

#### 2.5.4 Redução sonora ( $\Delta L$ )

A redução sonora ( $\Delta L$ ) define-se como a redução do nível de pressão sonora devido à ação de percussão normalizada, para uma banda de frequências com a largura de um terço de oitava, resultante da aplicação de um revestimento de piso e é determinado de acordo com a expressão (2.2). O seu valor é expresso em decibel.

$$\Delta L = L_{n0} - L_n \quad (2.2)$$

Sendo:  $L_{n0}$  e  $L_n$ , nível de pressão sonora normalizado devido à ação da percussão num determinado pavimento sem revestimento ( $L_{n0}$ ) e nível de pressão sonora normalizada devido à ação da percussão nesse pavimento com revestimento ( $L_n$ ).

#### 2.5.5 Índice de isolamento sonoro, normalizado a sons de percussão ( $L_{n,w}$ )

O índice de isolamento sonoro normalizado a sons de percussão é o valor da ordenada correspondente a curva de referência, na banda de frequência de 500 Hz, após o devido ajustamento com base na norma NP EN ISO 717-2: 2013.

#### 2.5.6 Índice de redução sonora a sons de percussão ( $\Delta L_w$ )

O índice de redução sonora a sons de percussão pode ser calculado de acordo com a seguinte expressão:

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

sendo:  $L_{n,r,0,w}$  e  $L_{n,r,w}$ : índice de isolamento, devido à excitação de impacto, normalizado, calculado para o pavimento de referência sem o revestimento de piso a ensaiar ( $L_{n,r,0,w}$ ) e índice de isolamento, devido à excitação de impacto, normalizado, calculado para o pavimento de referência com o revestimento de piso em ensaio ( $L_{n,r,w}$ ).

### 2.5.7 Índice de isolamento sonoro a sons de percussão num pavimento de referência

A caracterização do isolamento a sons de percussão, normalizado de um pavimento em ambiente laboratorial é determinado de acordo com a série de normas ISO 10140. Após a realização das diversas medições por bandas de frequência de um terço de oitava, é necessário transpor os valores obtidos para um pavimento de referência que representa um comportamento linear ideal, em termos do nível de pressão sonora a sons de percussão normalizado ( $L_{n,r,0}$ ).

O pavimento de referência é constituído por uma laje de betão armado, homogéneo com 120 mm de espessura (quadro 2.2) e tem como finalidade tornar possível a comparação dos valores do índice de redução sonora a sons de percussão obtidos em diversos laboratórios.

Quadro 2.2 – Nível de pressão sonora, normalizado, num pavimento de referência (NP EN ISO 717-2: 2013).

<i>Frequência (Hz)</i>	100	125	160	200	250	315	400	500
$L_{n,r,0}$	67	67.50	68	68.50	69	69.5	70	70.5
<i>Frequência (Hz)</i>	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
$L_{n,r,0}$	71	71.5	72	72	72	72	72	72

O nível de pressão sonora normalizada devido à excitação de impacto, calculado para o pavimento de referência com o revestimento aplicado ( $L_{n,r}$ ) pode ser obtido através da seguinte expressão:

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

sendo:  $\Delta L$ : Redução do nível de pressão sonora, normalizada, devido à excitação de impacto, medida de acordo com a ISO 140 – 11, que foi anulada em 2010 e substituída pela série de normas ISO 10140: 2010.

Após proceder-se à devida conversão, pode-se proceder ao cálculo do índice de isolamento sonoro normalizado ( $L_{n,r,w}$ ) do ruído de percussão para o pavimento de referência, que corresponde ao valor da ordenada na banda de frequência de 500Hz em decibel na curva de referência de acordo com a norma ISO 717-2:1996, que foi revista e substituída pela NP EN ISO 717-2: 2013 (figura 2.10), após a realização do necessário ajuste desta curva à curva obtida.

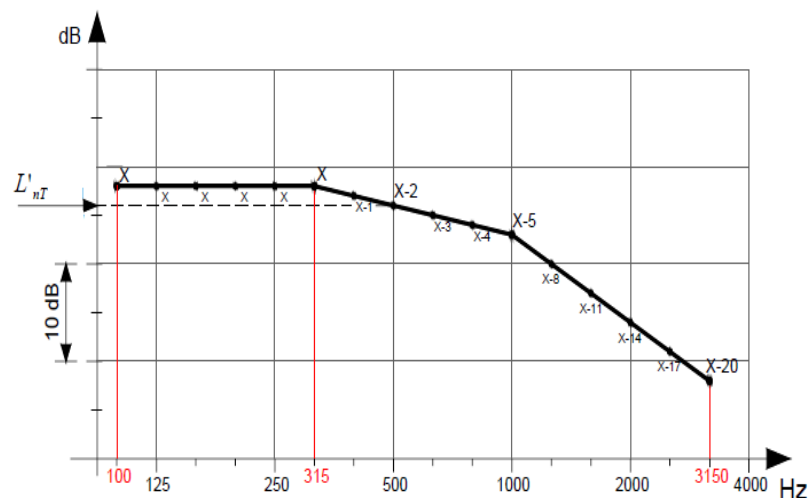


Figura 2.10 - Curvas de referência de acordo com a norma ISO 717-2: 1996, revista e substituída pela NP EN ISO 717 - 2: 2013 (Mateus, 2008).

O ajustamento à curva característica de isolamento sonoro é obtido por patamares de 1dB, relativamente à curva de valores medidos. As curvas estão ajustadas quando a soma dos desvios desfavoráveis (figura 2.11) seja o maior dos valores, mas não superior a 32dB. Considera-se que o desvio é desfavorável quando a curva de referência é inferior à curva característica do revestimento ensaiado.

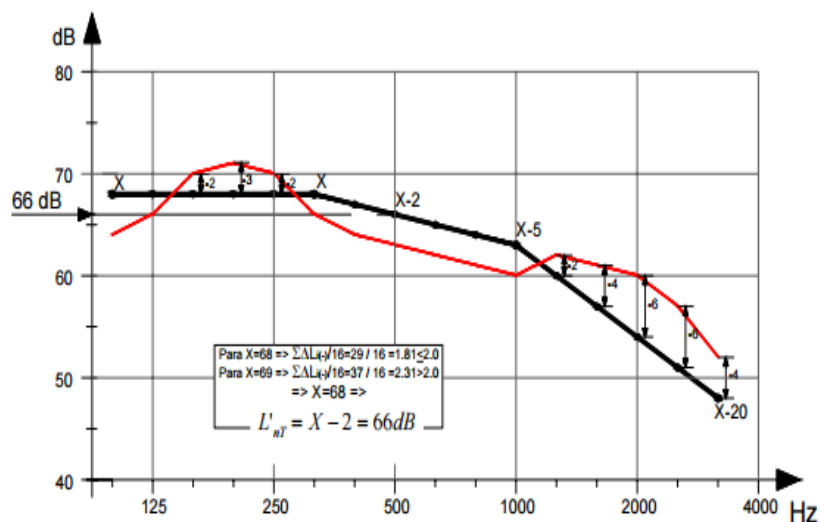


Figura 2.11 – Ajustamento da curva característica à curva de referência (Mateus, 2008).

O valor do índice de isolamento a sons de percussão do pavimento de referência, de acordo com o NP EN ISO 717-2: 2013 é de 78 dB.



## **2.6 Métodos de avaliação experimental**

### **2.6.1 Método de avaliação experimental normalizado**

#### **2.6.1.1 Série de normas ISO 10140**

O ensaio normalizado em laboratório é efetuado de acordo com a série de normas EN ISO 10140. Segundo estas normas são necessárias duas câmaras adjacentes, dispostas verticalmente, sendo a superior denominada de câmara emissora e a inferior câmara receptora. O elemento de separação entre as câmaras é constituído por um pavimento de referência sobre o qual é aplicado o revestimento de piso a ensaiar.

O pavimento de referência é de betão armado, homogéneo com 140 mm de espessura e uma área mínima de 10 m<sup>2</sup>. A superfície do pavimento deve ser plana, com uma tolerância de  $\pm 1$  mm num comprimento de 200 mm e ser suficientemente dura para resistir aos impactos da máquina de percussão. O som de percussão é realizado por uma máquina de percussão normalizada que deve satisfazer um conjunto de requisitos especificados nas normas.

A avaliação do nível do som de percussão é feita medindo o nível de pressão sonora com um microfone movendo-o de posição a posição, ou um conjunto de microfones fixos, ou um microfone de varrimento contínuo ou de movimento oscilante. Deve ser utilizado no mínimo quatro posições distintas de microfone, posicionadas de igual maneira de acordo com o espaço disponível na câmara. Cada par de posições de um microfone, deve no mínimo conter duas posições da máquina de percussão. As distâncias mínimas de afastamento devem ser as seguintes: 0.7 m entre posições de microfone, 0.7 m entre uma qualquer posição de microfone e os limites da câmara e dos elementos difusores e 1m entre uma posição qualquer do microfone e o pavimento excitado pela máquina de percussão.

O nível de pressão sonora normalizado a sons de percussão é medido em filtros de bandas de um terço de oitava que devem cumprir os requisitos definidos no IEC 61260. O índice de redução sonora é obtido conforme descrito na secção (2.5).

#### **2.6.1.2 EN ISO 16251-1:2014**

A instalação das câmaras acústicas requer instalações amplas devido ao elevado volume das mesmas, além das soluções ensaiadas serem de dimensões consideráveis. Por isso, apenas um número reduzido de laboratórios possui capacidade para implementá-los, além dos custos onerosos que implicam a sua realização. Uma pesquisa liderada pela PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt), desenvolveu uma metodologia menos complexa que se encontra descrita na norma EN ISO 16251-1:2014. O método de avaliação experimental consiste na

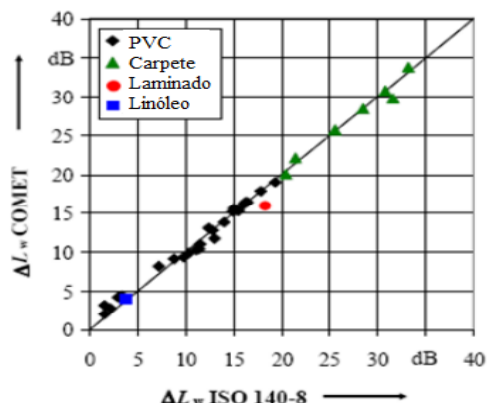
substituição da câmara emissora e recetora por um pavimento em betão com  $1.2 \times 0.8$  m de dimensões e 0.20 m de espessura (figura 2.12 - a). Entre o pavimento e os apoios, bem como na base dos apoios é colocado um material resiliente (figura 2.12 - b), com a finalidade de diminuir a transmissão de vibrações do exterior para o sistema. Uma máquina de percussão é usada para percutir a solução em análise, com o objetivo de medir os níveis de vibração das componentes da solução. A redução sonora é obtida através da diferença do nível de vibração médio no pavimento sem e com o revestimento de pavimento ensaiado. Os níveis de vibração são medidos através de acelerómetros dispostos na face superior do pavimento de referência.



Figura 2.12 – Ilustração da metodologia EN ISO 16251-1:2014: a) laje de dimensões reduzidas; b) Pormenor do material resiliente entre a laje e apoio e na base do apoio.

A metodologia acima descrita, será utilizada na presente dissertação com a finalidade de avaliar a redução sonora de diversas soluções para duas configurações de pavimento de madeira. No próximo capítulo apresentar-se-ão as soluções construtivas, equipamentos técnicos e o procedimento experimental adotado.

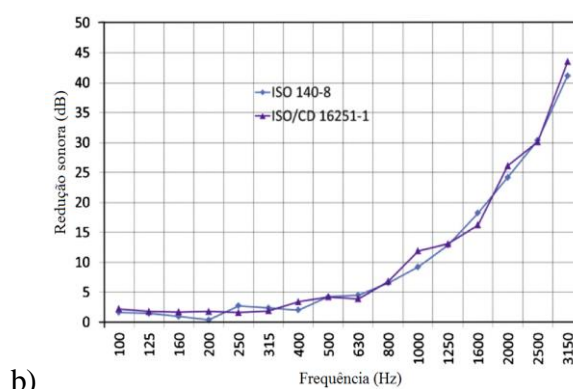
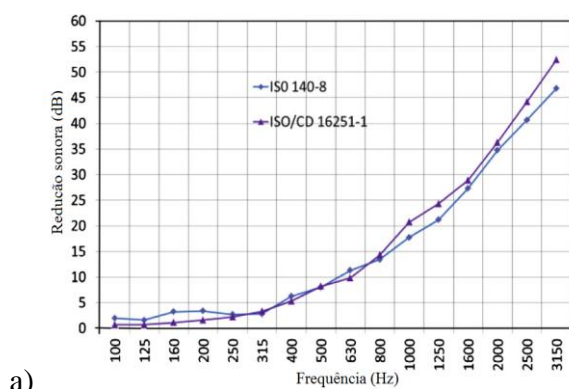
No sentido de compreender melhor o comportamento acústico do sistema descrito na norma ISO 16251-1, vários autores têm vindo a estudar várias soluções com revestimentos flexíveis, soalho flutuante com diferentes camadas resilientes sobre pavimentos pesados. (Bjor, 2010) *apud* (Sommerfeld,2009) concluíram que a metodologia simplificada obtinha uma boa concordância com a metodologia padrão para os revestimentos de pavimento (PVC, carpete, laminado e linóleo), com desvios máximos entre os dois métodos de 2 dB. Para os laminados as diferenças obtidas foram ligeiramente superiores, mas dentro de um intervalo aceitável (2.4 dB) (figura 2.13).



Revestimento de pavimento	$\Delta m_{\text{áx}}$
PVC	1.6
Carpete	1.8
Laminado	2.4
Linóleo	0.1

Figura 2.13 – Pavimentos pesados: Comparação entre a metodologia padrão e simplificada para o cálculo da redução sonora (Sommerfeld, 2009).

Num estudo, desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (DEC), com o intuito de compreender o comportamento acústico da metodologia simplificada (Pereira *et al.*, 2014), avaliaram três tipos de soluções (revestimentos flexíveis, lajeta flutuante e soalhos flutuantes com diferentes camadas resilientes), utilizando uma laje de betão de dimensões reduzidas com a finalidade de obter a redução sonora prevista para o revestimento de pavimento. Os resultados são comparados com os obtidos de acordo com o procedimento descrito nas normas ISO 140-8:2008 e ISO 717-2:2009. Foram testadas onze amostras diferentes de revestimentos flexíveis (carpete, vinílicos de base flexível, vinílicos correntes e linóleos). Como exemplo ilustrativo, apenas quatro tipos de revestimento foram escolhidos para compreender o comportamento do sistema (figura 2.14).



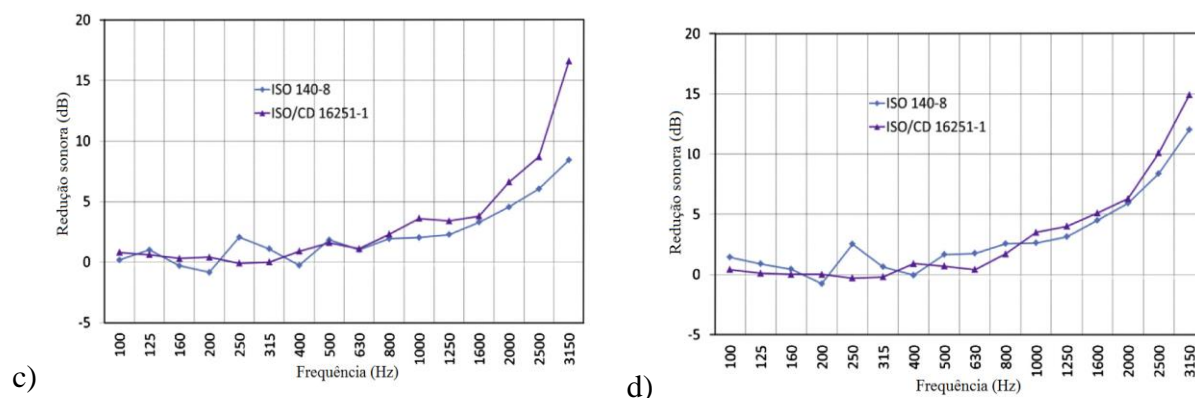


Figura 2.14: Redução sonora para revestimentos de pavimentos obtidos usando a metodologia padrão e a simplificada: a) carpete; b) vinílico com base flexível; c) vinílico corrente; d) linóleo (Pereira *et al.*, 2014).

Para os revestimentos flexíveis, a partir da análise das curvas de redução sonora fornecidos pelo método simplificado, (Pereira *et al.*, 2014), concluíram haver uma proximidade dos valores obtidos com as resultantes do procedimento padrão (ISO 140-8:2008). Salientam que, apenas nas altas frequências, era possível observar diferenças significativas, que eram mais pronunciadas para os revestimentos que tinham um menor desempenho acústico.

Foram também testados seis tipos de soalho flutuantes com diferentes camadas resilientes (cortiça, borracha, poliuretano flexível e polietileno). As curvas de redução sonora obtidas quer para a metodologia simplificada quer padrão, descrevem o comportamento de dois soalhos flutuantes ensaiados com diferentes camadas resilientes, em que, o primeiro é composto por uma camada resiliente em cortiça colada à sua superfície inferior e o segundo uma camada de 4.5 mm de espessura de borracha (Figura 2.15).

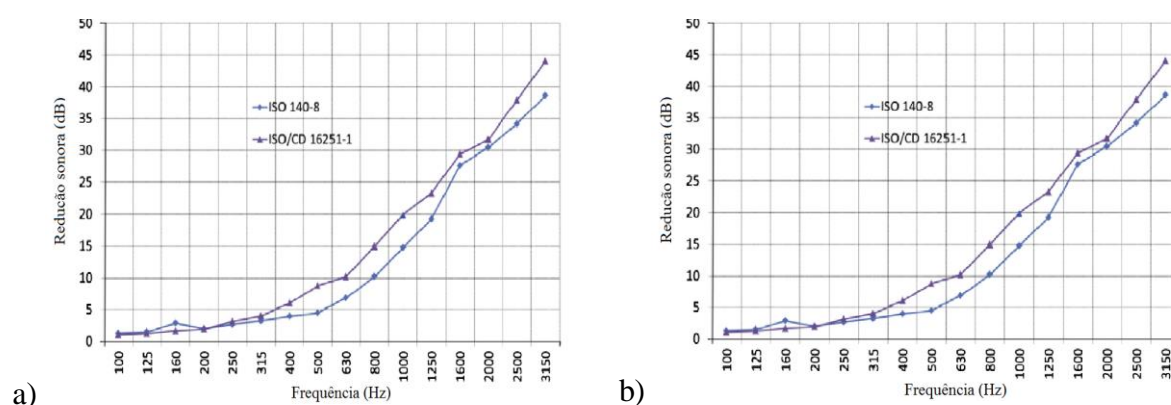


Figura 2.15 - Redução sonora para soalhos flutuantes obtidos usando a metodologia padrão e a simplificada: a) cortiça colada à sua superfície inferior; b) 4.5 mm de borracha (Pereira *et al.*, 2014).

As curvas de redução sonora obtidas para os soalhos flutuantes testados, apresentam um comportamento semelhante para as duas metodologias, embora nas médias e altas frequências haja uma maior diferença. Ao compararem os índices de redução sonora fornecidos pelas duas metodologias, (Pereira *et al.*, 2014), verificou que os desvios máximos eram de 2 dB, devido ao fato que os desvios desfavoráveis em relação à curva de referência ocorriam principalmente nas baixas e médias frequências.

Os autores (Schmidt, *et al.*, 2014), salientam a existência de uma boa concordância entre as metodologias padrão e simplificada através da figura 2.16 - a para os 19 revestimentos flexíveis (13 PVC e 6 tapetes). A diferença entre os mesmos não é ultrapassada com uma confiabilidade estatística de 95 % (ISO 12999-1). Evidenciam que a utilização do método simplificado para a determinação da redução sonora de pavimentos laminados precisa de ser melhorado devido ao mau acoplamento entre o revestimento e pavimento. Assim como, (Foret *et al.*, 2011) e (Bjor, 2010) já tinham referenciado em estudos anteriores.

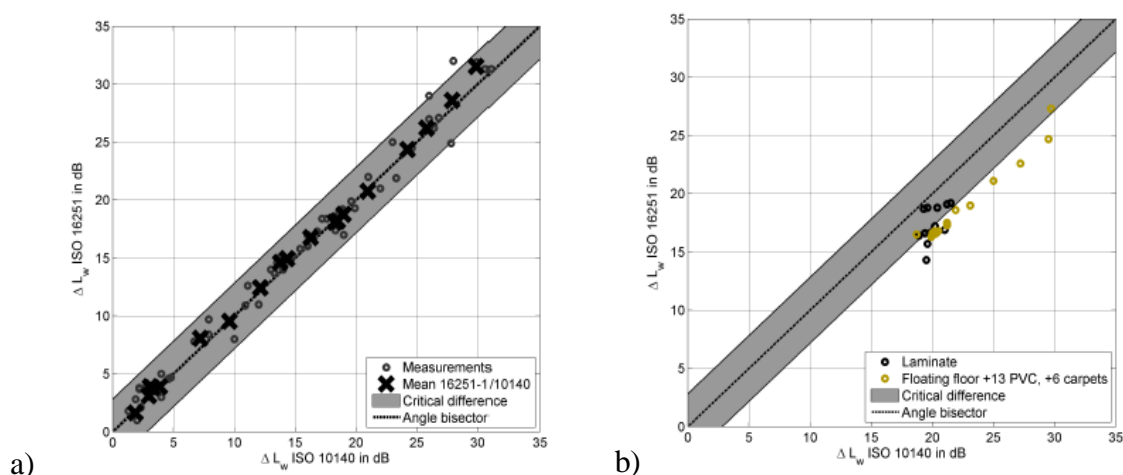


Figura 2.16 – Comparação da metodologia simplificada (ISO 16251-1:2014) e a metodologia padrão (ISO 10140) (Schmidt *et al.*, 2014).

### 2.6.2 Outro método de avaliação não normalizada

Ao longo dos últimos anos diversos autores têm vindo a desenvolver novas metodologias não normalizadas, no sentido de definir alternativas simplificadas, eficientes e de custos menos onerosos na obtenção de curvas de redução de sonora que descrevam o comportamento de soluções adotadas numa fase de desenvolvimento de um produto. Nomeadamente, (Godinho *et al.*, 2010), desenvolveram uma metodologia não normalizada que permite avaliar o comportamento de um pavimento sobre uma câmara reverberante de dimensões reduzidas na determinação do índice de redução sonora de revestimentos de pisos leves. O procedimento é

similar ao estipulado na norma ISO 140-8:2008, utiliza-se o mesmo equipamento técnico e obtém-se para cada solução a redução sonora que consiste na diferença entre o nível de pressão sonora do pavimento de referência e da solução em estudo no interior da câmara reverberante quando se faz- percutir sobre a mesma uma máquina de percussão normalizada. A câmara reverberante de dimensões reduzidas foi construída no laboratório de acústica, nas instalações do DEC e apresenta dimensões internas da estrutura de betão em forma de paralelepípedo de  $1,40 \times 1,30 \times 1,50\text{m}$  (figura 2.17), com um volume aproximado de  $2,73\text{m}^3$ . Com o intuito de conferir uma adequada resistência estrutural e permitir um razoável isolamento acústico a sons aéreos, a espessura das paredes e do piso da câmara é de 10 cm, de forma a que, as paredes não se tornem num elemento fraco do sistema.



Figura 2.17 – Vista exterior da câmara reverberante de dimensões reduzidas (Godinho *et al.*, 2010).

Segundo (Godinho *et al.*, 2010), dada a pequena dimensão da câmara reverberante, a utilização de um pavimento de referência em betão armado, homogéneo com 14 cm de acordo com a ISO 140-8, implicava a ocorrência do primeiro modo de vibração nas frequências mais altas (185Hz) interferindo na gama de frequências com interesse em analisar. De forma a antecipar a ocorrência do primeiro modo de vibração diminuíram a espessura do pavimento para 6 cm. Com o objetivo de minimizar a transmissão de vibrações entre o pavimento de referência e a câmara, colocaram ao longo da parte superior das paredes uma camada de aglomerado de borracha natural (figura 2.18 - a). Sob o pavimento da câmara reverberante, foi colocado um aglomerado de borracha do tipo MDL 43,010/05, com uma espessura que varia entre 5 a 10 mm, com a finalidade de isolar a câmara de vibrações externas originadas pelo pavimento do laboratório (figura 2.18 - b). Numa parede da câmara foi feita uma abertura com as dimensões de  $0,50 \times 0,50\text{m}$ , de modo, a garantir o fácil acesso ao seu interior. Aquando da realização de ensaios, a abertura é fechada através de um painel constituído por duas camadas de gesso com fibras de celulose de 12,5 cm de espessura e com uma densidade cerca de  $1050 \text{m}^3$ . Entre estas, foi colocado uma membrana betuminosa de elevada densidade com 4 cm de espessura

(produzido pela Danosa com a designação comercial Mad4), a fim de melhorar o isolamento a sons aéreos do painel. O painel é fixo à parede da câmara através de quatro varrões roscados.

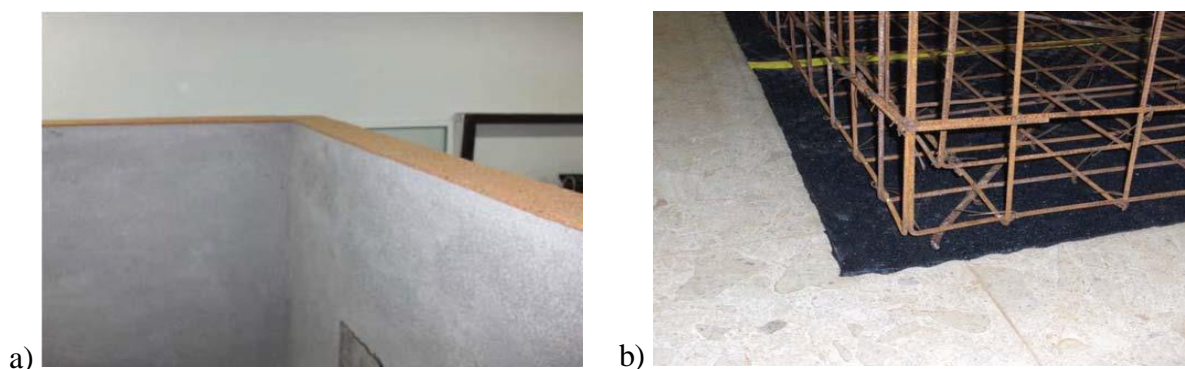


Figura 2.18: Pormenor construtivo da câmara acústica de dimensões reduzidas (Godinho *et al.*, 2010): a) aglomerado de cortiça ao longo da face superior da parede; b) aglomerado de borracha sob o piso da câmara.

A metodologia não normalizada descrita, será também utilizada no decorrer desta dissertação. No capítulo seguinte apresentar-se-á com maior ênfase todos os equipamentos técnicos, bem como a implementação de soluções de melhoria na abertura da câmara reverberante.

No âmbito de uma dissertação de mestrado intitulada “Uma análise de um sistema de dimensões reduzidas para ensaio de isolamento a sons de percussão” da autoria de (Masgalos, 2010), realizaram uma série de ensaios experimentais de isolamento a sons de percussão de alguns tipos de revestimentos, de modo a comparar com os valores fornecidos pelos fabricantes. Foram testados três tipos de soluções distintas. Dentro das quais, revestimentos finais de piso sobre a laje de suporte, sistema de lajeta flutuante em betão  $1,20\text{m} \times 1,20\text{m} \times 0,40\text{m}$  com várias camadas resilientes entre a lajeta flutuante e a laje de suporte e por fim uma solução mista que consiste na colocação de um revestimento Wicanders sobre a lajeta e com diversos materiais intercalares entre esta e a laje de suporte. A partir da análise dos resultados obtidos para as várias soluções construtivas verificaram que os valores obtidos tinham uma boa aproximação aos valores de referência.

Com o intuito de avaliar a precisão dos resultados fornecidos pela câmara reverberante de dimensões reduzidas, (Godinho *et al.*, 2010) testaram vários revestimentos, nomeadamente, um pavimento de madeira sobre um material resiliente de polietileno de 3 mm e 5mm, um pavimento de madeira sobre um material resiliente de aglomerado de cortiça 5 mm, um vinílico sobre uma espuma e um tapete comum de fibras têxteis em laboratório segundo uma metodologia simplificada (câmara reverberante de dimensões reduzidas) e compararam com os

obtidos *in situ* para as mesmas soluções segundo a ISO 140 – 8:2008. Na figura 2.19 apresentam-se, as curvas da redução sonora para as soluções construtivas de pavimentos de madeira com diferentes materiais resilientes.

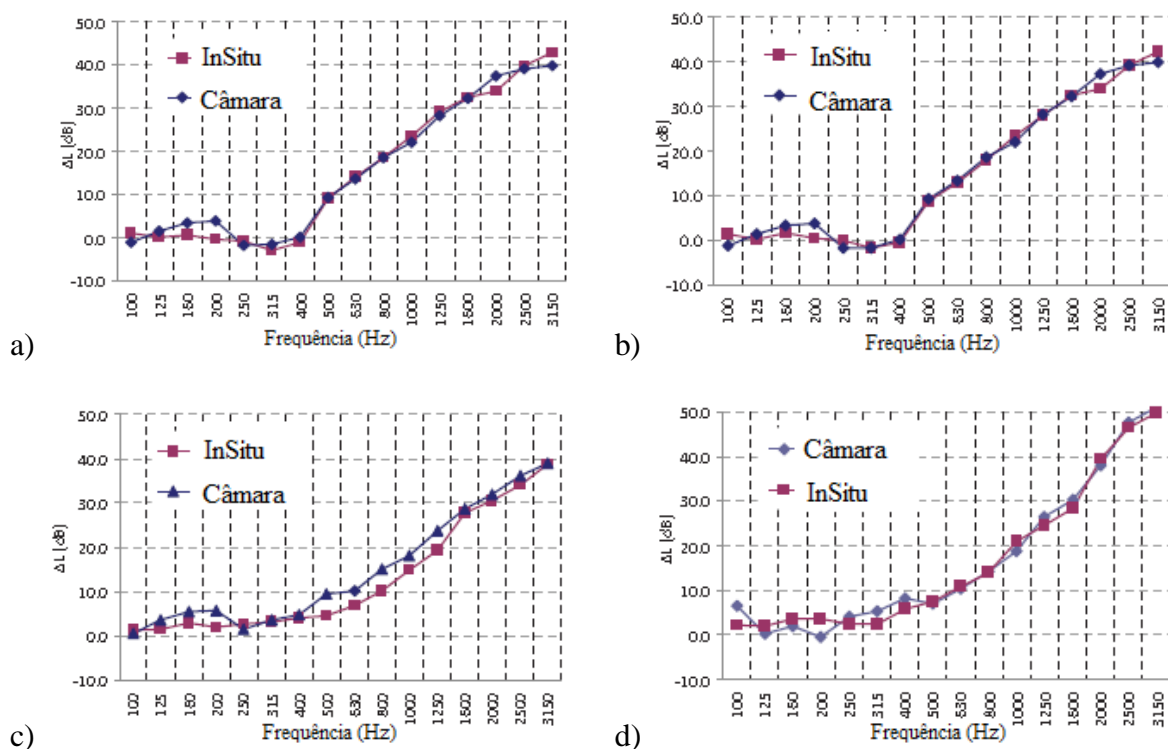


Figura 2.19 – Curva de redução sonora das soluções construtivas segundo a metodologia simplificada e *in situ*: a) pavimento de madeira sobre um material resiliente de polietileno de 3 mm; b) pavimento de madeira sobre um material resiliente de polietileno de 5mm; c) pavimento de madeira sobre um material resiliente de aglomerado de cortiça 5 mm; d) vinílico sobre uma espuma.

A partir da observação dos resultados obtidos para as duas metodologias avaliadas, os autores concluíram haver uma boa concordância entre os mesmos. Contudo, salientam a existência de algumas discrepâncias nas baixas frequências e uma melhoria de desempenho nas altas frequências.



### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Laje ensaiada

Na elaboração desta dissertação foram estudadas duas configurações de lajes de madeira em pinho, constituídas por tábuas de madeira maciça sobre uma estrutura de vigas em madeira na direção perpendicular (figura 3.1). As pormenorizações dos elementos constituintes de cada configuração analisada, bem como as respetivas dimensões, encontram-se discriminadas no quadro 3.1.

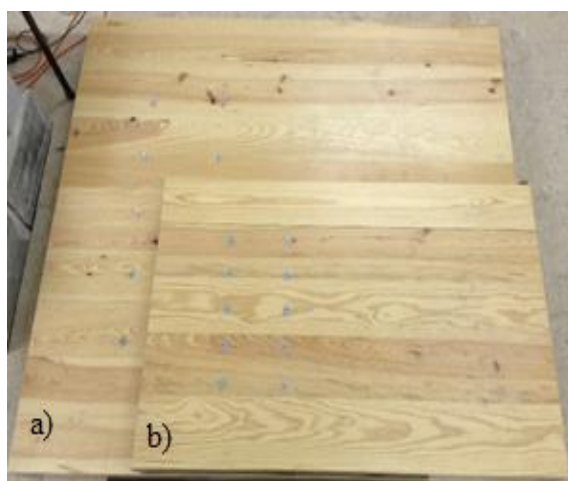
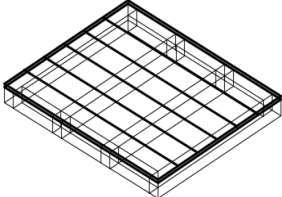


Figura 3.1 – Ilustração dos pavimentos de madeira ensaiados com as dimensões: a) 1,60 m×1,5 m×0,12 m; b) 1,20 m×0,80× 0,12m.

Quadro 3.1 – Características geométricas dos pavimentos de madeira.

Pavimento de Madeira  Representação esquemática	Dimensões (m)		
	Características geométricas	Pavimento A	Pavimento B
Tábua	Largura	0,23	0,16
	Comprimento	1,60	1,20
	Espessura	0,02	0,02
Ripa	Largura	0,07	0,08
	Comprimento	1,50	0,80
	Altura	0,10	0,10
	Distância entre ripas	0,44	0,29

Foram selecionadas seis soluções construtivas, atualmente mais utilizadas em edifícios no isolamento aos sons de percussão para pavimentos de madeira, nomeadamente, três revestimentos flexíveis e três pavimentos de madeira flutuantes com diferentes camadas resilientes (figura 3.2). No quadro 3.2 encontra-se esquematizado, de acordo com o tipo de método as características de cada solução adotada.

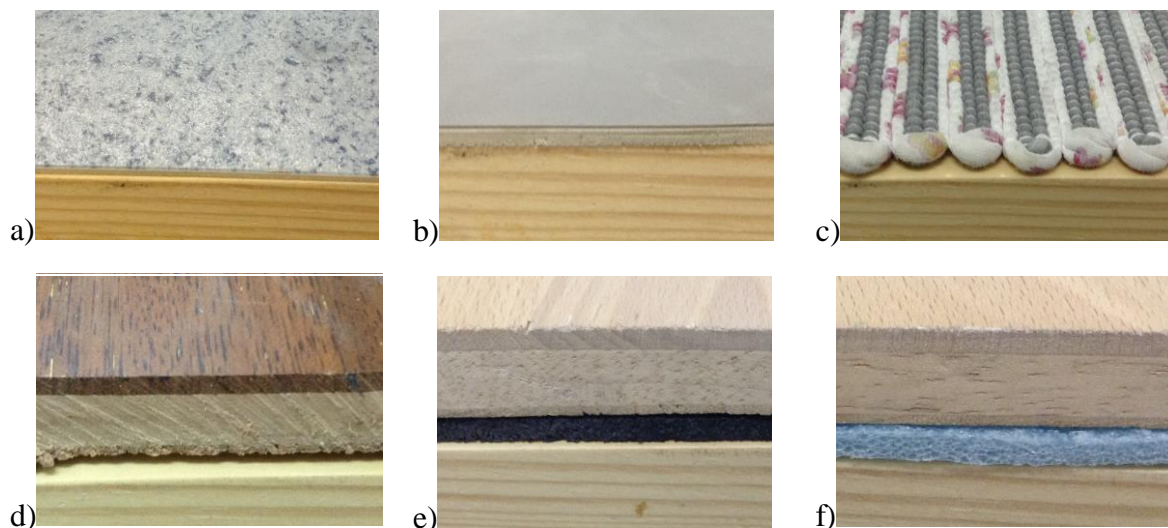


Figura 3.2 – Soluções construtivas: a) vinílico azul; b) vinílico cinzento; c) tapete; d) pavimento de madeira flutuante com 2 mm de aglomerado de cortiça; e) pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; f) pavimento de madeira flutuante com 5 mm de espuma de polietileno de cor azul.

Quadro 3.2 – Características das soluções construtivas.

<i>Tipo de Método</i>	<i>Designação</i>	<i>Material Resiliente (subcamada)</i>	<i>Espessura (mm)</i>
Revestimentos Flexíveis	Vinílico azul	-	2
	Vinílico cinzento	-	3
	Tapete	-	4
Pavimento flutuante	Pavimento de madeira flutuante com 2 mm de aglomerado de cortiça	Aglomerado de cortiça	17
	Pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha	Aglomerado de borracha	16
	Pavimento de madeira flutuante com 5 mm de espuma de polietileno, cor azul	Espuma de polietileno – cor azul	17

### 3.2 Equipamentos

Com o objetivo de proceder-se a medição dos níveis de vibração (ISO 16251 – 1:2014) e níveis de pressão sonora (câmara reverberante de dimensões reduzidas – DEC) das várias soluções, utilizaram-se dois equipamentos técnicos distintos. O primeiro um acelerómetro da Brüel & Kjar do tipo 4370 com conector de topo, incluindo um cabo. Sendo um equipamento de alta sensibilidade permite medir um intervalo de frequências entre 0.1 Hz e 4800Hz (figura 3.3 – a). O segundo um microfone G.R.A.S Sound & Vibration com um pré amplificador do tipo 26 AK, série nº19148 que permite medir um intervalo 2Hz e 20KHz (figura 3.3 – b).

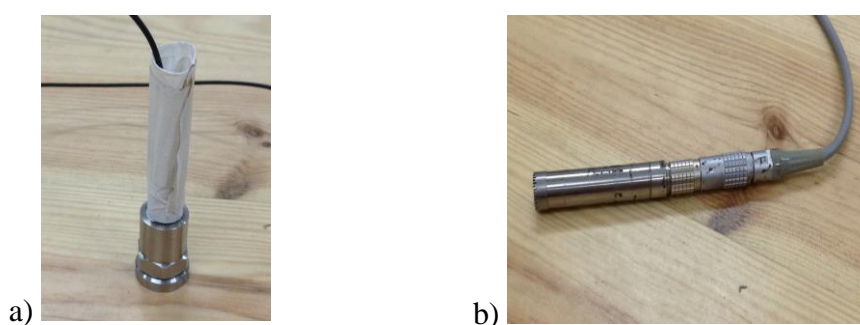


Figura 3.3 – Equipamentos técnicos: a) acelerómetro da Brüel & Kjar do tipo 4370; b) microfone G.R.A.S Sound & Vibration com um pré amplificador do tipo 26 AK, série nº 19148.

Antes de se iniciar uma bateria de ensaios é necessário calibrar, a valores específicos os equipamentos técnicos com a finalidade de obter-se valores válidos. O equipamento utilizado para proceder à devida calibração do acelerómetro, foi um calibrador da Brüel & Kjaer do tipo 4294 (figura 3.4 – a), assim como, no microfone utilizou-se um calibrador da Brüel & Kjaer do tipo 4231 (figura 3.4 – b).

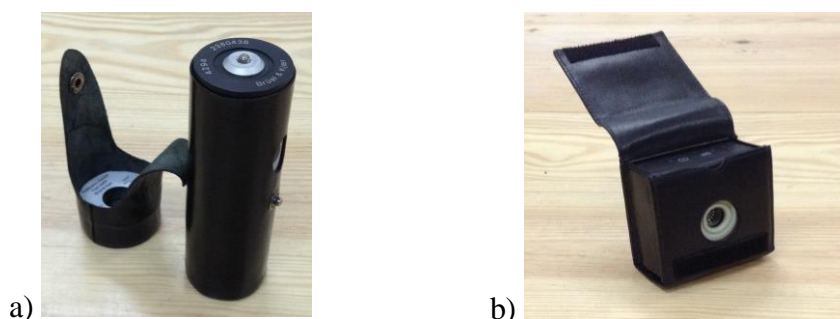


Figura 3.4 – Calibradores utilizados: a) Brüel & Kjaer do tipo 4294; b) Brüel & Kjaer do tipo 4231.

O equipamento utilizado como fonte sonora nas duas metodologias é uma máquina de percussão normalizada da Brüel & Kjaer do tipo 3204, série 1666586 (figura 3.5 – a). O sinal medido é recolhido através de um sistema de aquisição de sinal denominado Symphonie (01dB) da série 924 (figura 3.5 – b) e o software utilizado para o seu tratamento foi o dBATI32.

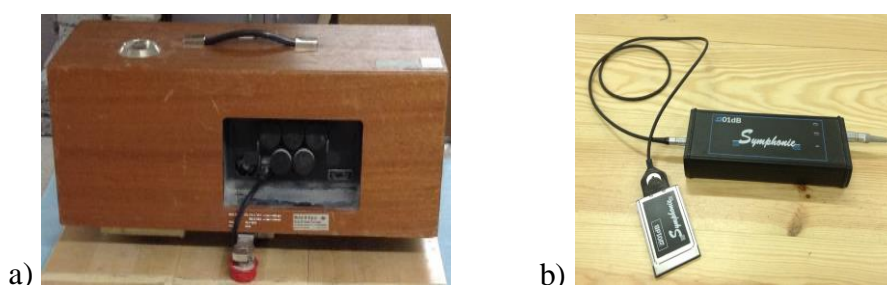


Figura 3.5 – Equipamentos: a) máquina de percussão normalizada da Brüel & Kjaer do tipo 3204, série 1666586; b) sistema de aquisição de som da Symphonie (01dB) da série 924.

Em todas as medições realizadas utilizou-se um abafador. Este elemento de proteção individual (EPI) tem como objetivo proteger o aparelho auditivo dos elevados níveis de ruído.

### 3.3 Metodologia simplificada (ISO 16251-1:2014)

Até ao momento da realização da presente dissertação não existem estudos publicados sobre o comportamento acústico em pavimentos de madeiras, de acordo com a metodologia descrita na norma ISO 16251-1:2014. Com o intuito de perceber, a resposta fornecida pelo sistema, considerou-se como elemento de comparação uma laje de dimensões reduzidas em betão armado com as mesmas dimensões e soluções construtivas.

#### 3.3.1 Procedimento experimental

A metodologia simplificada consiste na medição dos níveis de vibração em bandas de frequência de um terço de oitava, entre os 100 Hz e as 3150 Hz. Para proceder à sua realização utilizou-se os equipamentos e software de apoio referidos anteriormente. Para tal, foram definidas quantidades e posições de acelerómetros, quer de fonte atendendo as especificações descritas na norma ISO 16251-1:2014. De modo, a avaliar a similaridade dos resultados obtidos em ambas as faces do pavimento de referência, definiram-se nove posições de acelerómetros na face superior e oito posições de acelerómetros na face inferior. Assim como, três posições de fonte dispostas de forma a não haver similaridade e paralelismo com os cantos da laje. Para cada posição de fonte, realizaram-se duas medições dos acelerómetros. A configuração das

posições de fonte e dos acelerómetros nas duas faces do pavimento referência, encontra-se ilustrada na figura 3.6.

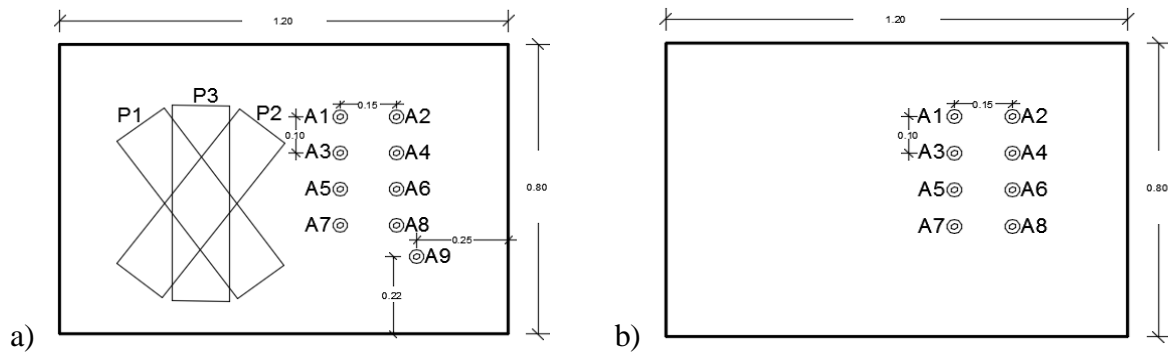


Figura 3.6 – Configuração das posições de fonte (P1 a P3) e posições do acelerómetro: a) face superior do pavimento de referência (A1 a A9) b) face inferior do pavimento de referência (A1 a A8).

O procedimento de medição é similar ao descrito na série de normas ISO 10140: 2010, sendo os níveis de vibração mensuráveis. Inicialmente começa-se por medir o nível médio de vibração do pavimento de referência sem o revestimento de pavimento aplicado ( $L_{a,0}$ ). De seguida, com o revestimento de pavimento aplicado sobre o pavimento de referência mediu-se o nível médio de vibração fornecido pelo sistema quando é percutido sobre o mesmo uma máquina de percussão normalizada ( $L_{a,1}$ ). A redução sonora consiste na subtração entre os dois níveis de vibração, podendo ser determinado segundo a seguinte expressão:

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

sendo:  $L_{a,0}$ : nível de vibração médio no pavimento de referência sem o revestimento de piso aplicado (dB). Pode ser obtido de acordo com a seguinte expressão:

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

sendo:  $a_0$  e  $a_{ref}$ ; aceleração média no pavimento de referência sem a solução aplicada ( $a_0$ ) em ( $m/s^2$ ) e aceleração de referência ( $a_{ref}$ ) toma o valor de  $10^{-6} m/s^2$ .

Por fim, o nível de vibração médio no pavimento de referência com o revestimento de piso aplicado ( $L_{a,1}$ ), pode ser obtido segundo a seguinte expressão:

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

sendo:  $a_1$  e  $a_{ref}$ : aceleração média no pavimento de referência com a solução aplicada ( $m/s^2$ ) e aceleração de referência ( $a_{ref}$ ) toma o valor de  $10^{-6} m/s^2$ .

O índice de redução sonora de um revestimento de pavimento é determinado segundo a norma NP EN ISO 717-2:2013. Para tal, começa-se por medir o nível médio de vibração da solução adotada. De seguida, o valor obtido é comparado com um pavimento de referência composto por uma laje de betão com 12 cm de espessura com um comportamento ideal (78 dB). Por fim é feito um reajustamento a curva de referência por patamares de 1dB de acordo com a norma NP EN ISO 717-2:2013, obtendo-se o índice de redução sonora conferido por o revestimento de piso (3.4).

$$\Delta L_{w,a} = 78dB - L_{w,a,r} \quad (3.4)$$

Sendo:  $\Delta L_{w,a}$  e  $L_{w,a,r}$ , índice de redução sonora de um revestimento de pavimento ( $\Delta L_{w,a}$ ) e índice de isolamento com o revestimento aplicado no pavimento de referência ( $L_{w,a,r}$ ).

No âmbito desta dissertação não será calculado o índice de redução sonora para cada um dos revestimentos de piso analisados, mas apenas a redução do nível de vibração sonora.

### 3.3.2 Pavimentos de madeira

Com o intuito de proceder-se a avaliação da atenuação sonora fornecida pelas soluções construtivas para as duas configurações de pavimentos de madeira, realizou-se a medição dos níveis médios de vibração de acordo com a norma ISO 16251-1:2014. A definição e marcação, das quantidades e posições dos acelerómetros, quer das posições de fonte em ambas as configurações foi a mesma. De modo, a estudar o comportamento do sistema, definiu-se dez posições de acelerómetros na face superior da laje de suporte dispostos do seguinte modo: cinco a meio vão entre duas ripas de madeira consecutivas e os restantes cinco sobre uma ripa de madeira. De igual modo, três posições de fonte foram dispostas do seguinte modo: uma posição a meio vão entre duas ripas de madeira e as restantes sobre uma ripa de madeira na direção perpendicular (45º graus). Para cada posição de acelerómetro realizaram-se duas medições. Todos os equipamentos técnicos, software e o procedimento de tratamento de dados é análogo ao realizado para o pavimento de referência (laje de betão de dimensões reduzidas). Na figura 3.7, apresenta-se a configuração, das posições de fonte e posições de acelerómetros, nos dois pavimentos de madeira analisados.

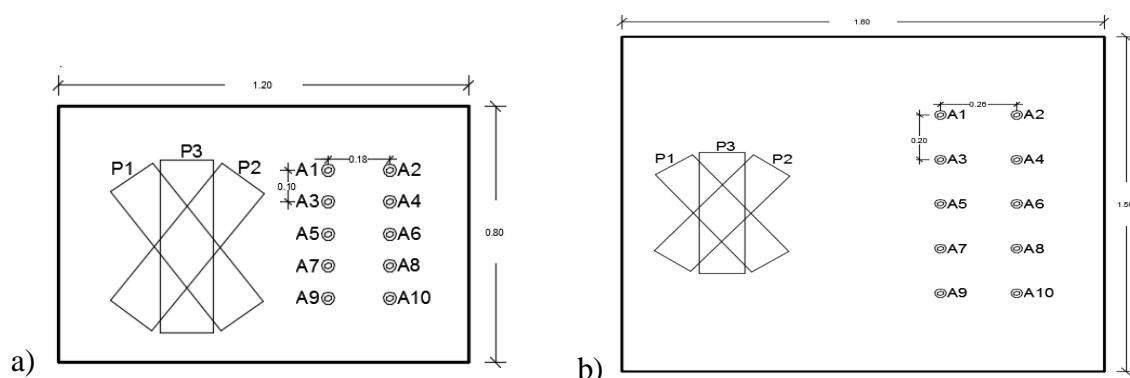


Figura 3.7 – Configuração das posições de fonte (P1 a P3) e posições do acelerómetro (A1 a A10): a) pavimento de madeira (1.20 m × 0.80 m × 0.12 m); b) pavimento de madeira (1.60 m × 1.50 m × 0.12 m).

A quando a realização das medições dos níveis médios de vibração no pavimento de madeira de dimensões reduzidas, houve a necessidade melhorar as condições de apoio entre o pavimento de madeira e a laje de betão de dimensões reduzidas. De modo, a não haver transmissão de vibração ao sistema, colocaram-se quatro garras suportadas à laje de betão de dimensões reduzidas (figura 3.8 – a), assim como, um material resiliente com 4 mm de aglomerado de borracha entre o pavimento de madeira com dimensões (1.20 m × 0.80 m) e a laje de referência (figura 3.8 – b).



Figura 3.8 – Ilustração da metodologia normalizada ISO 16251-1:2014: a) laje de pavimento de madeira de dimensões reduzidas (1.20m × 0.80m); b) Pormenor do material resiliente entre a laje de betão e o pavimento ensaiado, bem como as garras suportadas à laje de referência.

Com o intuito de perceber, a influência da transmissão de vibrações ao sistema realizou-se, a título de exemplo, a medição dos níveis médios de vibração do pavimento de madeira de dimensões reduzidas para um revestimento flexível de vinílico cinzento com 3 mm de

espessura, antes e depois da colocação das respetivas soluções de melhoria. A partir da observação dos resultados obtidos na figura 3.9, pode-se constatar que a redução sonora aumenta para ambas as soluções com o incremento da frequência com ligeiras oscilações, ao nível das baixas e médias frequências. Tal fato, pode dever-se aos modos próprios de vibração da própria estrutura. Na gama das altas frequências ocorre uma melhoria do desempenho acústico com a implementação das novas condições de apoio. Em todos os ensaios realizados, segundo a metodologia ISO 16251-1:2014, utilizou-se as novas condições de apoio.

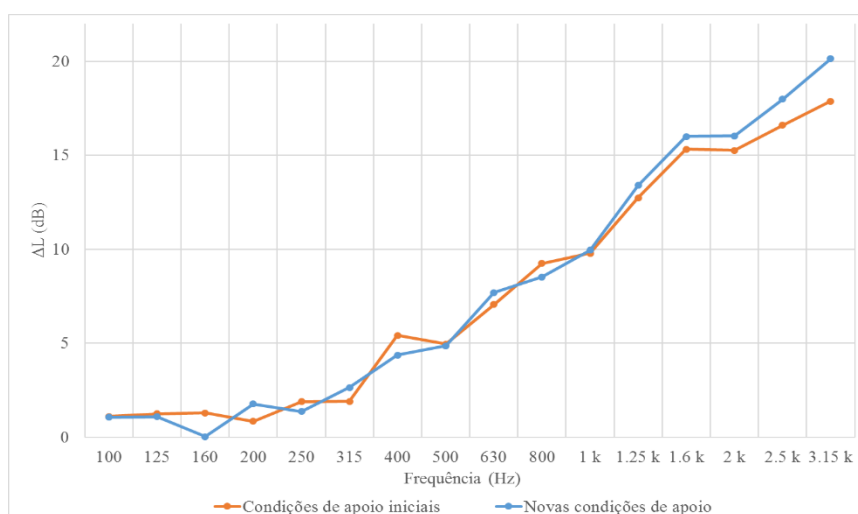


Figura 3.9 – Influência das soluções de melhoria no sistema ensaiado, segundo a metodologia normalizada (EN ISO 16251-1:2014).

### 3.3.3 Influência da posição de fonte

Com o objetivo, de avaliar a influência da variação da posição de fonte (P1, P2 e P3), nos resultados obtidos, determinou-se para cada posição de fonte, a curva de redução sonora correspondente, para cada uma das configurações de laje testadas com as mesmas dimensões (1.20 m×0.8 m) e revestimentos de piso adotados na seção 3.1. A título de exemplo, selecionaram-se as respostas para três tipos de revestimentos, nomeadamente, dois revestimentos flexíveis (vinílico cinzento e tapete) e um pavimento de madeira flutuante com uma camada resiliente com 4 mm de aglomerado de borracha para proceder a respetiva análise (figura 3.10).



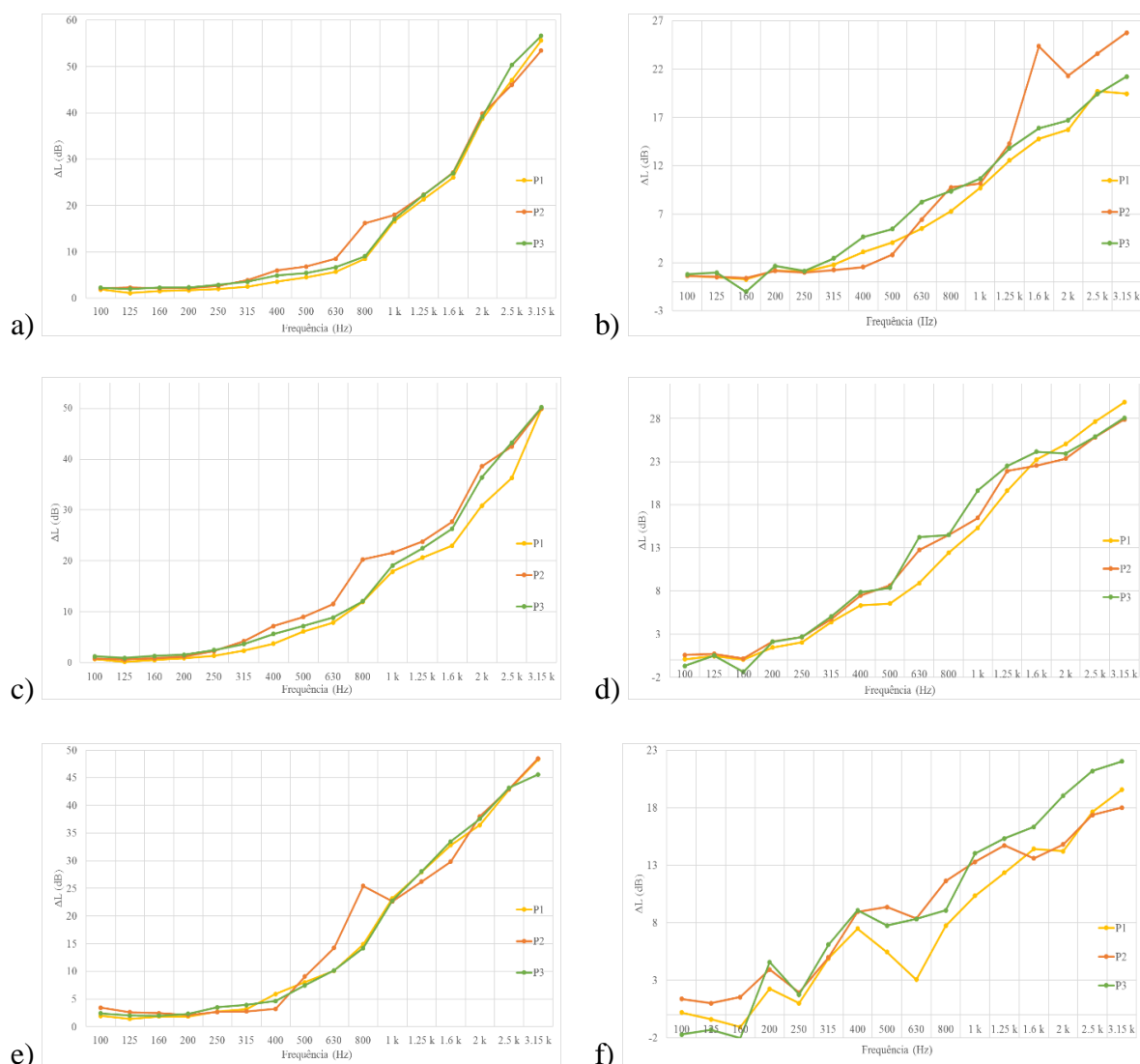


Figura 3.10 – Redução sonora para as posições de fonte (P1, P2 e P3): a) laje de dimensões reduzidas de betão sob 3 mm de vinílico cinzento; b) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob 3 mm de vinílico cinzento; c) laje de dimensões reduzidas de betão sob um tapete; d) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob um tapete; e) laje de dimensões reduzidas de betão sob um pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; f) pavimento de madeira (1.20m×0.8m) sob um pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha.

A partir da observação dos resultados das curvas de redução sonora segundo as três posições de fonte (P1, P2 e P3), pode-se constatar um comportamento idêntico na gama das baixas frequências para três posições de fonte (P1, P2 e P3) quando percutidas sobre uma laje de dimensões reduzidas de betão, para os três revestimentos de piso testados (figura 3.10 – a, figura

3.10 – c e figura 3.10 – e). Ao nível, das médias e altas frequências, apresentam a mesma tendência, apesar de algumas oscilações. A posição de fonte P3 está a gerar um comportamento distinto das restantes nos três revestimentos analisados, com um valor máximo na frequência dos 800 Hz. Tal fato, pode dever-se que esta posição de fonte pode estar a gerar um modo de vibração no sistema. Tal já não ocorre quando a configuração da laje de suporte é alterada para um pavimento em madeira. Constatou-se que, ao variar a posição de fonte, influencia os resultados ao longo do incremento das bandas de frequência (figura 3.10 – b, figura 3.10 – d e figura 3.10 – f). Tais resultados, são evidentes para uma solução construtiva de um pavimento de madeira sob um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha (figura 3.10 – f) e para um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob 3 mm de vinílico cinzento (figura 3.10 – b).

Na figura 3.11 apresenta-se os resultados, das curvas de redução sonora média e desvio padrão, para as três posições de fonte (P1, P2 e P3) para os mesmos sistemas construtivos. O desvio padrão tende a aumentar com o incremento da frequência com algumas oscilações para a laje de dimensões reduzidas de betão com os três revestimentos de pavimento testados (vinílico cinzento, tapete e soalho flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha). No que respeita, ao pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) com os mesmos revestimentos de pavimento, segue a mesma tendência à exceção da solução construtiva de um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha sobre o pavimento de madeira onde ocorre uma maior variabilidade de valores na gama das baixas frequências. Nos seis sistemas testados os desvios máximos ocorrem na gama das médias e altas frequências. Para um revestimento flexível de vinílico cinzento é obtido na frequência dos 800 Hz para uma laje de dimensões reduzidas de betão e 1600 Hz no caso do pavimento de madeira. Em relação, ao revestimento flexível de um tapete, o desvio máximo ocorre na frequência dos 800 Hz para uma laje de betão de dimensões reduzidas e 630 Hz no pavimento de madeira. No caso de um pavimento flutuante de 4 mm de aglomerado de borracha é obtido na frequência dos 800 Hz para uma laje de betão de dimensões reduzidas e 630 Hz quando testado sobre um pavimento de madeira. Os desvios mínimos acontecem na gama das baixas e altas frequências para a laje de dimensões reduzidas de betão com os três revestimentos testados nunca ultrapassam os 0.35 dB e 1.20 dB no caso do pavimento de madeira com os respetivos revestimentos analisados.

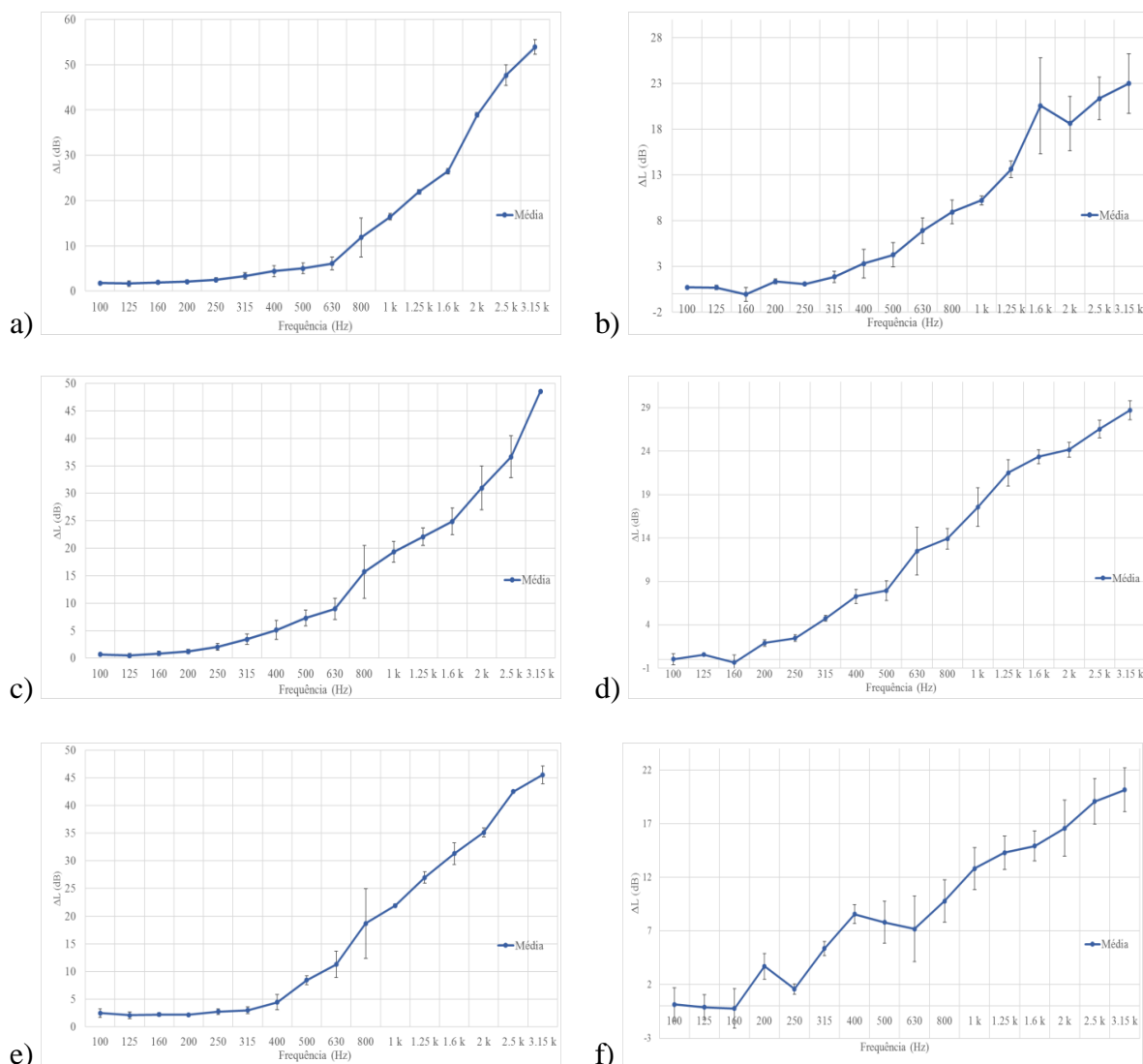


Figura 3.11 – Curva de redução sonora média e desvio padrão para as posições de fonte (P1, P2 e P3): a) laje de dimensões reduzidas de betão com 3 mm de vinílico cinzento; b) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob 3 mm de vinílico cinzento; c) laje de dimensões reduzidas de betão sob um tapete; d) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob 3 mm vinílico cinzento; e) laje de dimensões reduzidas de betão sob um pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; f) pavimento de madeira (1.20m×0.8m) sob um pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha.

### 3.3.4 Influência da posição do acelerómetro

A influência da disposição dos acelerómetros nas duas configurações de laje ensaiadas (laje de dimensões reduzidas de betão e pavimento de madeira com as mesmas dimensões, foi tida em

conta, apenas a medição na face superior do pavimento, devido ao, fato de não haver acessibilidade à face inferior dos sistemas ensaiados. Para tal, definiu-se nove posições de acelerómetros (A1, A2,...,A9) na face superior da laje de dimensões reduzidas em betão e dez posições (A1, A2,..., A10) na face superior do pavimento de madeira. A título de exemplo, considerou-se a posição de fonte (P1) e os mesmos revestimentos de piso, na determinação da curva de redução sonora média e desvio padrão da mesma (figura 3.12).

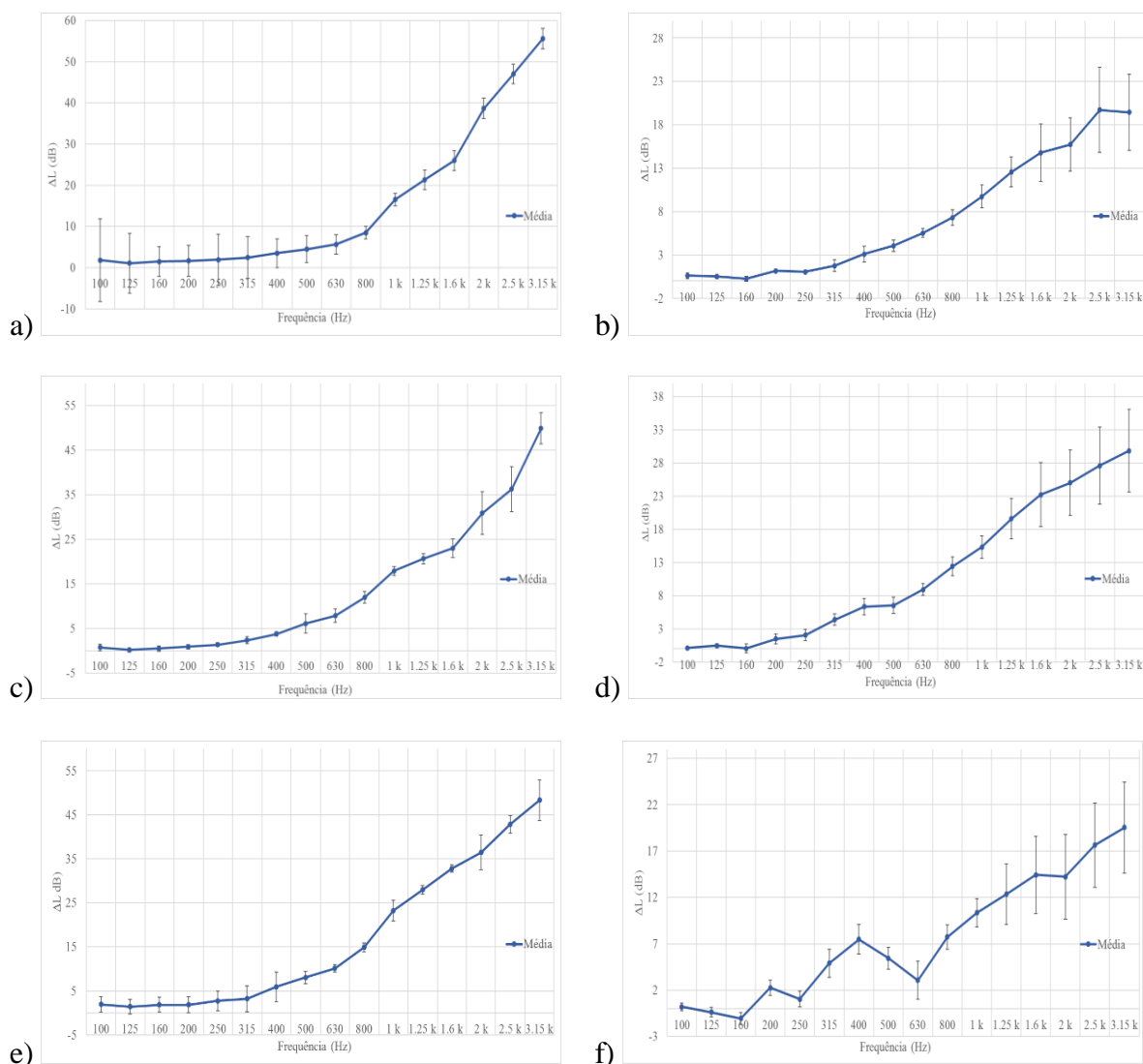


Figura 3.12 – Curva de redução sonora média e desvio padrão para a posição de fonte (P1): a) laje de dimensões reduzidas de betão sob 3 mm de vinílico cinzento; b) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob 3 mm de vinílico cinzento; c) laje de dimensões reduzidas de betão sob um tapete; d) pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m) sob um tapete; e) laje de dimensões reduzidas de betão sob um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; f) pavimento de madeira (1.20m×0.8m) sob um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha.

A partir da observação dos resultados obtidos, a curva de redução sonora e desvio padrão, tende a aumentar ao longo da gama de frequência com algumas oscilações para cinco dos seis sistemas testados. Tais oscilações, são mais evidentes para um sistema constituído por uma laje de madeira sob um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha (figura 3.12 – f). Ao invés, do sistema de uma laje de betão de dimensões reduzidas sob um vinílico cinzento com 3 mm de espessura, que apresenta uma tendência decrescente. Os desvios máximos, ocorrem para os revestimentos de piso sob uma configuração em pavimento de madeira (figura 3.12 – b, figura 3.12 – d e figura 3.12 – f), comparativamente à uma laje de betão com as mesmas dimensões e soluções construtivas. Taís desvios, ocorrem na gama de frequência para uma laje de dimensões reduzidas de betão com um revestimento de pavimento: 100 Hz com 10.01 dB para um vinílico cinzento, 2500 Hz com 5.05 dB para um tapete e 2000 Hz com 3.89 dB para um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha. Quando a laje ensaiada é alterada para um pavimento de madeira com as mesmas dimensões e soluções construtivas, os desvios máximos ocorrem na gama das altas frequências. Para um pavimento de madeira (1.20 m × 0.8 m) com vinílico cinzento ocorre na frequência de 2500 Hz com valor máximo de 4.89 dB. No caso de uma laje de madeira (1.20 m × 0.8 m) com tapete é obtido numa frequência de 3150 Hz com um valor máximo de 6.23 dB. Assim como, para um pavimento de madeira (1.20 m × 0.8 m) com aglomerado de borracha com 4 mm ocorre na mesma frequência com 4.90 dB. Os desvios mínimos ocorrem na gama das médias e altas frequências para a laje de dimensões reduzidas de betão com os respetivos revestimentos de pavimentos nunca ultrapassando 1.52 dB e na gama das baixas frequências para a pavimento de madeira (1.20 m × 0.8 m) com os vários revestimentos testados nunca ultrapassando os 0.30 dB.

### 3.3.5 Influência do ruído de fundo

Os níveis de vibração sonoros medidos segundo a metodologia (ISO 16251-1:2014) podem ser influenciados por ruídos perturbadores designados de ruídos de fundo ou residuais, tais como, ruídos vizinhos, ruídos de equipamentos e de sistemas ou da própria estrutura onde ocorre os ensaios. A título de exemplo, mediu-se os níveis de vibração da solução construtiva de um pavimento de madeira de dimensões 1.20 m × 0.8 m com tapete com e sem a fonte de percussão em funcionamento (figura 3.13). Pode-se concluir, que os níveis de vibração medidos na face superior do pavimento de madeira (1.20 m × 0.8 m) com um tapete com a fonte ligada é pelo menos 61.83 dB superior aos níveis de vibração com a fonte “muda”. Logo, não é necessário proceder a correção dos níveis de vibração sonora do sistema.

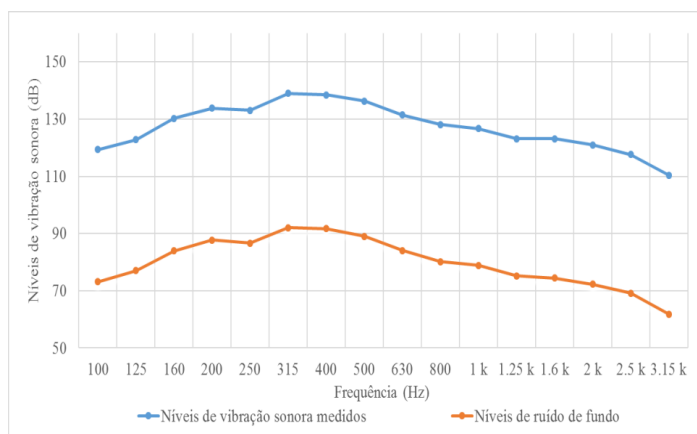


Figura 3.13 – Influência do ruído de fundo nos níveis de vibração sonora medidos.

### 3.3.6 Influência do ruído aéreo nos níveis de vibração

Achou-se ainda pertinente avaliar a influência do ruído aéreo gerado pela máquina de percussão nos níveis de vibração medidos na face superior do pavimento de dimensões reduzidas de madeira. Para tal, avaliou-se o nível de vibração num pavimento de madeira flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha com a fonte de percussão no chão sobre solução de piso flutuante idêntica (figura 3.14). Não se verifica influência do ruído aéreo gerado pela máquina.

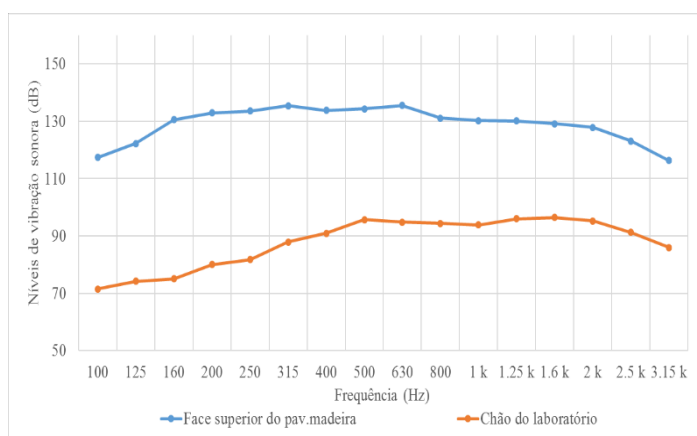


Figura 3.14 – Influência do ruído aéreo nos níveis de vibração.

## 3.4 Metodologia não normalizada

De modo a avaliar a melhoria do isolamento aos sons de percussão para as várias soluções construtivas testadas, recorreu-se ainda a uma câmara reverberante de dimensões reduzidas

instalada no laboratório de acústica do Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Coimbra para o cálculo expedito das mesmas.

### 3.4.1 Soluções de melhoria do sistema

A máquina de percussão ao percutir sobre um elemento produz vibrações, mas também níveis de ruído aéreo que podem atingir o compartimento recetor. Tal que, (Godinho *et al.*, 2010) avaliaram a influência do ruído a sons aéreos nos valores medidos no interior da câmara, de acordo com o procedimento estipulado na NP EN ISO 140-4:2000, com ligeiras adaptações, devido às pequenas dimensões interiores da câmara e concluíram que a laje de suporte e a abertura existente poderiam ser elementos fracos do sistema. Para tal, implementaram-se duas novas soluções de melhoria do sistema: uma porta adicional de OSB fixa à parede e 30 mm de aglomerado de espuma de poliuretano à volta da abertura da parede (figura 3.15).



Figura 3.15 – Ilustração das soluções de melhoria do sistema.

De forma, a avaliar a influência da implementação das novas soluções na componente de ruído aéreo que é transmitido para o interior da câmara reverberante de dimensões reduzidas foram testadas três soluções construtivas distintas (quadro 3.3).

Quadro 3.3 – Constituição das soluções de melhoria ao sistema.

<i>Soluções de melhoria</i>	<i>Constituição</i>
1	Porta de gesso
2	Porta de gesso + OSB
3	Porta de gesso + OSB+ espuma de poliuretano

Com o objetivo de agilizar o processo de medição considerou-se apenas uma posição de fonte e duas posições de microfone fixas com 1.16 m e 0.90m de altura. A posição de fonte foi

considerada no compartimento exterior. Na figura 3.16 apresenta-se a configuração das posições de fonte e microfones.

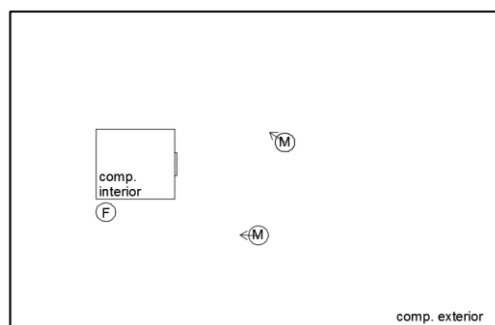


Figura 3.16 – Configuração da posição de fonte e microfone utilizada na avaliação do comportamento das soluções de melhoria testadas.

Na figura 3.17, apresenta-se os resultados referentes a contribuição, da componente aos sons aéreos no interior do recinto recetor ( $L_2$ ) para as três soluções de melhoria testadas.

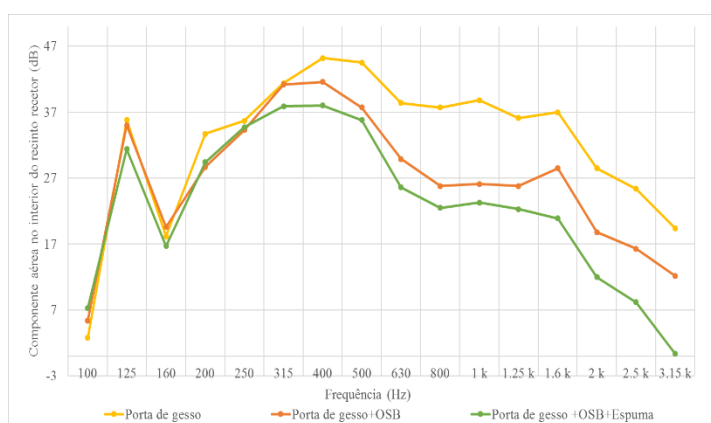


Figura 3.17 – Contribuição da componente aos sons aéreos no interior do recinto recetor para as soluções de melhoria testadas.

A partir da observação dos mesmos, verifica-se que apresentam um comportamento idêntico na gama das baixas frequências. Contudo, na gama das médias e altas frequências, os seus desempenhos tendem a melhor com o incremento das frequências. A solução de melhoria constituída por uma porta de gesso fixa à abertura é a que mais influência, os níveis sonoros medidos no recinto recetor. Ao contrário, da solução porta de gesso + OSB + espuma de poliuretano que apresenta um melhor desempenho. Na frequência de 3150 Hz, a influência do ruído aéreo gerado pela máquina de percussão no interior do recinto recetor é de 25.4 dB para



uma solução constituída por uma porta de gesso fixa à abertura e 16.3 dB para uma solução com uma porta de gesso + OSB. No caso, da solução de melhoria constituída por uma porta de gesso + OSB + espuma de poliuretano apresenta um valor de 8.2 dB. Esta solução de melhoria, será implementada na abertura da câmara reverberante de dimensões reduzidas - DEC, com o objetivo de avaliar a redução de transmissão sonora dos revestimentos de pisos referidos na secção 3.1.

### 3.4.2 Procedimento experimental

A metodologia simplificada consiste na medição do nível da pressão sonora para bandas de frequência com largura de um terço de oitava no interior da câmara reverberante de dimensões reduzidas (câmara recetora). De forma a agilizar as especificações descritas na série de normas EN ISO 10140, definiram-se apenas três posições de fonte na face superior da laje de suporte, assim como, três posições de microfone no interior da câmara reverberante: duas posições de microfone com 1.16 m e uma com 0.90 m de altura. Na figura 3.18 apresenta-se a configuração das posições de fonte na laje de suporte, bem como as posições dos microfones no compartimento interior.

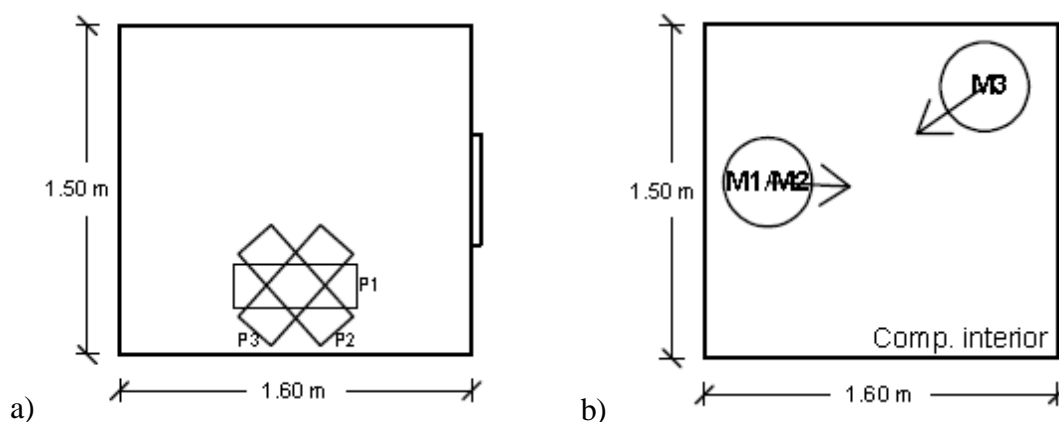


Figura 3.18 – Configuração das posições na laje de suporte: a) posições de fonte; b) posições do microfone.

O procedimento é idêntico ao mencionado na série de normas ISO 10140:2014 com recurso aos equipamentos técnicos referidos na secção (3.2). Para cada posição de fonte mediu-se o nível de pressão sonora para cada solução construtiva segundo um microfone movendo-o ao longo das três posições delineadas no interior da câmara reverberante de dimensões reduzidas quando se percute sobre a laje de suporte uma máquina de percussão normalizada. Para cada posição de microfone realizou-se duas medições. A redução do nível de pressão sonora devido à ação de percussão normalizada pode ser determinada de acordo com a seguinte expressão:

$$\Delta L = L_{n,0} - L_{n,1} \quad (3.5)$$

sendo:  $L_{n,0}$ : Nível de pressão médio no pavimento de referência sem o revestimento de pavimento aplicado (dB). Pode ser obtido de acordo com a seguinte expressão:

$$L_{n,0} = 20 \log \left( \frac{p_0}{p_{ref}} \right) \quad (3.6)$$

sendo:  $p_0$  e  $p_{ref}$ ; medição da pressão sonora no pavimento de referência sem a solução aplicada ( $p_0$ ) em (dB) e a pressão sonora de referência ( $p_{ref}$ ) toma o valor de  $2 \times 10^{-5}$  Pa.

$L_{n,1}$ : Nível de pressão sonora de referência com o revestimento de pavimento aplicado (dB). Pode ser obtido de acordo com a seguinte expressão:

$$L_{n,1} = 20 \log \left( \frac{p_1}{p_{ref}} \right) \quad (3.7)$$

$p_1$ : pressão média no pavimento de referência com a solução aplicada (Pa).

### 3.4.3 Caracterização da câmara

#### 3.4.3.1 Influência do ruído a sons aéreos

Os níveis de pressão sonoros medidos no interior do compartimento recetor (câmara reverberante) podem ser influenciados pelo ruído aéreo gerado pela máquina de percussão. Segundo (Godinho *et al.*, 2010), utilizou uma metodologia baseada na ISO 140-1424 para avaliar a influência da componente do ruído aéreo a quanto a realização de ensaios de percussão. Esta consiste na medição dos níveis de pressão no recinto emissor ( $L_{out}$ ), bem como no recinto recetor ( $L_1$ ) simultaneamente. Para cada banda de frequência a contribuição da componente aérea no interior do recinto recetor ( $L_2$ ) é determinado segundo a seguinte expressão:

$$L_2 = L_{out} - D \quad (3.8)$$

sendo:  $L_{out}$  e  $D$ ; o nível de pressão sonora no recinto emissor ( $L_{out}$ ) e isolamento bruto a sons aéreos entre o recinto emissor e recetor ( $D$ ).

Quando a diferença entre do nível de pressão sonora medido no recinto recetor e a componente de ruído aéreo no interior do recinto recetor for inferior a 10dB é necessário efetuar uma correção ao nível sonoro medido ( $L_1$ ), de acordo com a seguinte expressão:

$$L_1 = 10 \log(10^{L_2/10} - 10^{L_2/10}) \quad (3.9)$$

sendo:  $L_1$  e  $L_2$ ; nível de pressão sonora medido no recinto recetor ( $L_1$ ) e nível de pressão sonora medido no recinto emissor ( $L_2$ ).

A metodologia supracitada será utilizada na presente dissertação, com o intuito de avaliar, a influência da contaminação do ruído aéreo nos níveis de pressão sonora medidos no interior da câmara reverberante de dimensões reduzidas. A título de exemplo, selecionou-se dois tipos de revestimentos, um vinílico azul com 2 mm de espessura e um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha para a avaliação expedita do sistema. Assim como, três posições de fonte e duas posições de microfone com uma altura de 1.16 m. As respetivas posições, bem como a distância mínima de afastamento entre os mesmos, foram adaptadas ao compartimento exterior. Dá análise da figura 3.19, verifica-se que a solução construtiva de um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha, apresenta níveis de pressão no recinto recetor de pelo menos 15 dB superior aos níveis de pressão sonora medidos no recinto emissor. No caso de um revestimento com 2 mm de vinílico azul, a diferença é de pelo menos 36 dB. Em todas as soluções testadas, não se procederam a correção dos níveis de pressão sonora medidos.

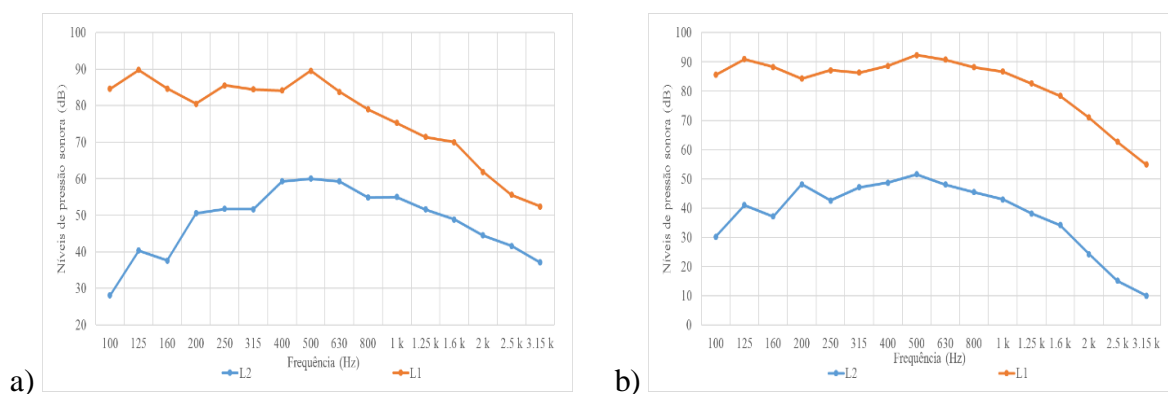


Figura 3.19 – Influência da componente de ruído a sons aéreos nas medições realizadas no recinto recetor para a laje de suporte: a) pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha; b) 2 mm de vinílico azul.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Considerações gerais

Ao longo deste capítulo será exposto os resultados obtidos das atividades laboratoriais, realizadas no laboratório de acústica do Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra (DEC) para dois métodos de avaliação experimental distintos. Nomeadamente, uma metodologia normalizada “alternativa” (ISO 16251-1:2014) e não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas).

Com o intuito de avaliar soluções de reabilitação acústica para pavimentos tradicionais de madeira foram testados dois tipos de soluções, designadamente, diferentes revestimentos de piso flexíveis (tapete, 3 mm de vinílico cinzento e 2 mm de vinílico azul) e pavimentos de madeira flutuante com diferentes materiais resilientes (4 mm de aglomerado de borracha, 2 mm de aglomerado de cortiça e 5 mm de espuma de polietileno de cor azul) sobre duas configurações de pavimentos de madeira com dimensões (1.20 m×0.80 m×0.12 m e 1.60 m×1.50 m×0.12m).

Inicialmente apresentar-se-á os resultados das curvas de redução sonora, segundo a metodologia normalizada “alternativa” (ISO 16251-1:2014) para as várias soluções referidas anteriormente. De modo, a avaliar o comportamento acústico das mesmas, utilizou-se como elemento de comparação uma laje de betão de dimensões reduzidas (1.20 m×0.80 m×0.20 m) sob as mesmas soluções.

Outro método de avaliação experimental utilizado para avaliar o comportamento das soluções adotadas foi uma metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas), que permite obter o nível de pressão sonora e o índice de redução sonora para cada solução testada. Apenas, se avaliaram os desempenhos acústicos para as mesmas soluções a quando à análise da metodologia normalizada, sob uma laje de suporte em betão com dimensões (1.60 m×1.50 m×0.06 m).

Por fim, apresentar-se-á os resultados de ambas as metodologias para as seis soluções construtivas sobre as respetivas lajes de suporte em betão com dimensões (1.20 m×0.80 m×0.20 m e 1.60 m×1.50 m×0.06 m).

## 4.2 Análise dos níveis de vibração sonora

Em suma os níveis de vibração sonora foram medidos, na face superior para as nove posições de acelerómetros (A1, A2, ..., A9) na laje de dimensões reduzidas de betão e dez posições de acelerómetros (A1, A2, ..., A10) nos pavimentos de madeira com uma espessura constante (12 cm) variando apenas as suas dimensões. Para cada posição de acelerómetro, realizou-se duas medições para cada posição de fonte (P1, P2 e P3). O processo descrito foi realizado para cada uma das seis soluções construtivas, sobre uma laje de suporte, em elementos de madeira com duas configurações (1.20 m×0.8 m×0.12m e 1.60 m×1.5 m×0.12m). De igual modo, realizou-se para uma laje de suporte, em betão com as mesmas dimensões e soluções.

### 4.2.1 Revestimentos Flexíveis

Tal como já foi referido, testaram-se dezoito soluções construtivas, dos quais, nove soluções sobre três configurações de laje distintas com diferentes revestimentos flexíveis (4 mm de tapete, 2 mm de vinílico azul e 3 mm de vinílico cinzento).

#### 4.2.1.1 Tapete

Na figura 4.1, apresenta-se as curvas de redução sonora obtidas para um revestimento em tapete sobre as três configurações de laje de suporte testadas.

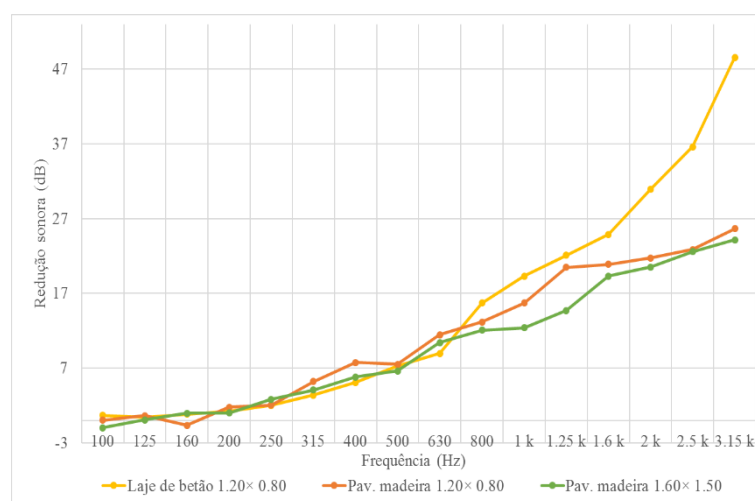


Figura 4.1 – Curva de redução sonora para um tapete sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).

Dá análise da figura 4.1, pode-se constatar que a redução sonora para um revestimento de piso em tapete, tende a aumentar ao longo das frequências, para as três configurações de laje testadas. Estas, apresentam um desempenho acústico idêntico, com ligeiras oscilações, até a frequência dos 630 Hz. Tais, oscilações podem ser devido, a um modo próprio de vibração nas duas configurações de pavimentos em madeira analisados. A partir da banda de frequência de 800 Hz, verifica-se que, ambas as configurações em pavimento de madeira apresentam um menor desempenho comparativamente à laje de referência em betão. Tal discrepância, apresenta um valor máximo para uma frequência de 3150 Hz, para uma solução construtiva de um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) sob um tapete de 25.68 dB e 24.15 dB para o pavimento de madeira (1.60 m×1.5 m×0.12 m) sob um tapete, relativamente a 48.55 dB para uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m) sob o mesmo revestimento. Salienta-se que, a laje de referência sob o revestimento analisado apresenta um melhor desempenho acústico, principalmente ao nível das altas frequências. Tal resultado, era espectável devido ao fato que, ao aumentarmos a sua espessura, irá melhorar conseqüentemente o seu desempenho. No que refere, aos sistemas sob um pavimento de madeira, a variação das respetivas dimensões não influenciou a redução do nível sonoro, em particular ao nível das médias e altas frequências. A solução construtiva de um tapete sobre um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m) é a que apresenta um menor desempenho acústico.

Tais resultados vão de encontro a um estudo desenvolvido em França, pelo Centro Científico e Técnico para a Construção (CSTB) com o objetivo de avaliar a redução de transmissão sonora de dois revestimentos de pavimentos (tapete e pavimento flutuante laminado) sobre pavimentos leves com base na norma ISO 140-11: 2005. O pavimento de referência escolhido (figura 4.2), representa a típica estrutura em pavimento de madeira aligeirada no país onde ocorreu o estudo (França).

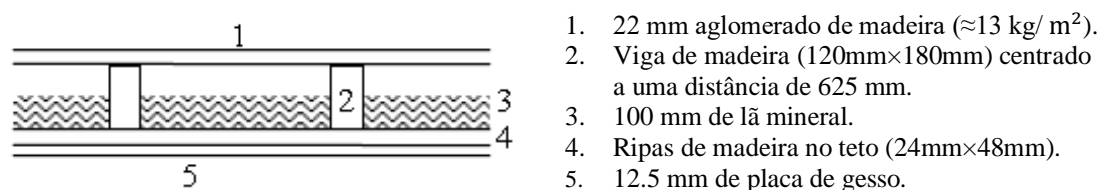


Figura 4.2 – Representação esquemática do pavimento de referência (Villoet *et al.*, 2007).

A título de exemplo, apresenta-se a redução sonora obtida para um tapete com 5 mm de espessura e  $4.2 \text{ kg/m}^2$  de peso sobre um pavimento de referência e uma laje de betão com 14 cm de acordo com a ISO 140-6 (figura 4.3). (Villot *et al.*, 2007), evidenciam a semelhança de resultados na primeira metade da gama de frequências e grandes discrepâncias na segunda

metade da gama de frequências, indicando que nas médias e altas frequências o desempenho destes revestimentos flexíveis é inferior nos pisos de madeira face aos de betão.

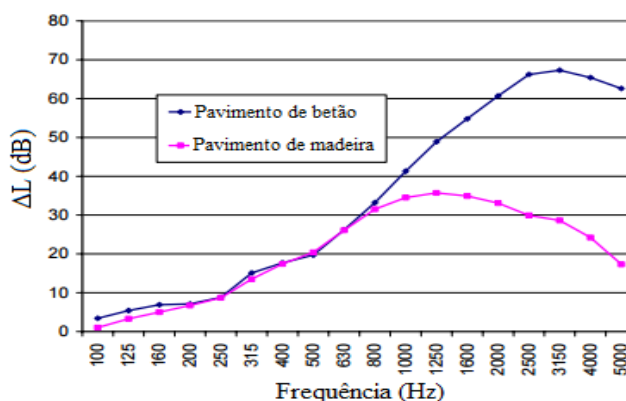


Figura 4.3 – Redução sonora para um revestimento em tapete com um pavimento de betão e pavimento de madeira (Villot *et al.*, 2007).

#### 4.2.1.2 Vinílico cinzento

Na figura 4.4, apresenta-se os resultados da curva de redução sonora para um revestimento de vinílico cinzento com 3 mm de espessura para três configurações de laje. Dos quais, uma laje de betão de dimensões reduzidas com dimensões 1.20 m×0.8 m e dois pavimentos de madeira com dimensões (1.20 m×0.8 m e 1.60 m×1.5 m).

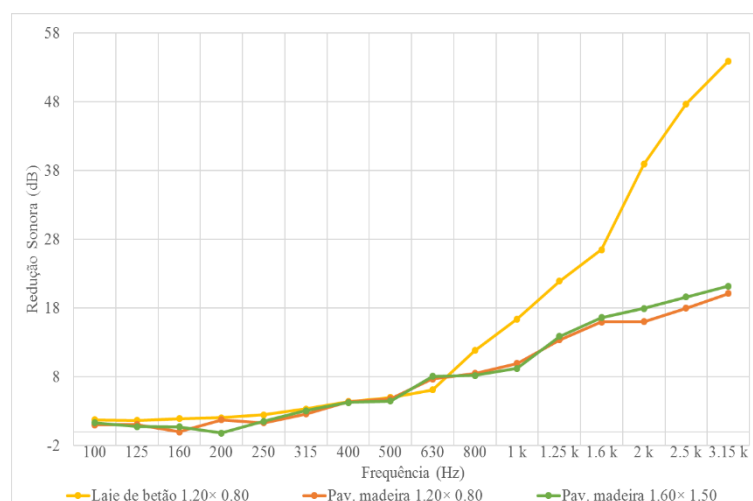


Figura 4.4 – Redução sonora para um revestimento de vinílico cinzento com 3 mm de espessura sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).

A partir da análise dos resultados, da curva de redução sonora para um revestimento em vinílico cinzento sobre as três configurações de lajes testadas, verifica-se que o comportamento da curva de redução sonora é idêntico até uma de frequência de 500 Hz, com oscilações pontuais na frequência de 160 Hz e 200 Hz para os três sistemas testados. De igual modo, estes tendem a aumentar com o incremento da frequência. Para uma frequência de 630 Hz, os sistemas com uma configuração em madeira, apresentam um melhor desempenho relativamente à laje de referência sob o mesmo revestimento. Porém, a partir da frequência de 800 Hz o seu desempenho piora consideravelmente, atingindo um valor máximo na frequência de 3150 Hz com um valor de 20.14 dB para um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e 21.21 dB para um pavimento de madeira (1.60 m×1.5 m×0.12 m) . Assim como, um valor de 53.89 dB para uma laje de betão (1.20 m×0.80 m×0.20 m) sob o revestimento de piso testado. O desempenho acústico das duas configurações em pavimento de madeira sob um vinílico cinzento com 3 mm de espessura não é influenciado pela variação de dimensões das respetivas configurações, em particular ao nível das baixas e médias frequências. A solução construtiva de um pavimento de madeira (1.20 m×0.80 m×0.12 m) sob um vinílico cinzento com 3 mm de espessura é a que apresenta um pior desempenho acústico.

#### 4.2.1.3 Vinílico azul

Na figura 4.5, apresenta-se as curvas de redução sonora para um revestimento de piso em vinílico azul com 2 mm de espessura sobre as mesmas configurações de laje testadas.

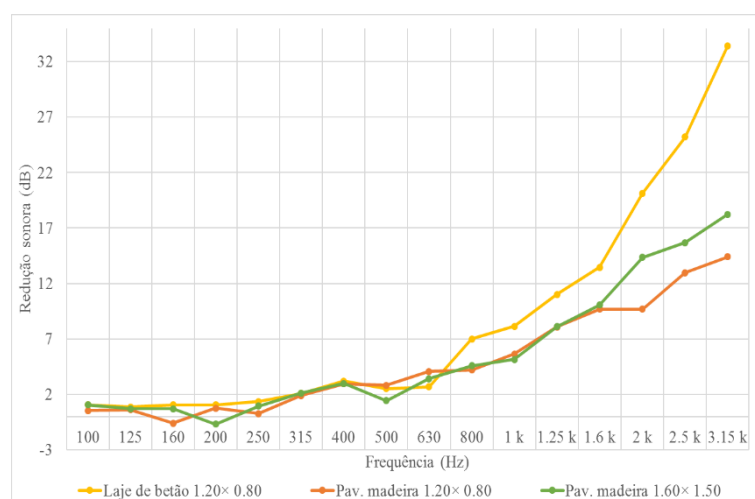


Figura 4.5 – Redução sonora para um revestimento de vinílico azul com 2 mm de espessura sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).



Dá análise dos resultados para os três sistemas construtivos testados, verifica-se um comportamento análogo até uma frequência de 630 Hz, com ligeiras oscilações para as duas configurações em pavimento de madeira face à laje de referência (laje em betão). Tais resultados, são idênticos aos obtidos para os restantes revestimentos flexíveis testados. De igual modo, a redução sonora tende a aumentar com o aumento ao longo da banda de frequência. A partir, da frequência de 800 Hz as duas configurações em madeira apresentam um menor desempenho acústico comparativamente à laje em betão com dimensões (1.20 m×0.8 m×0.20 m). O seu desempenho, atinge um valor máximo de 33.43 dB na frequência de 3150 Hz. No caso, de um pavimento de madeira com dimensões (1.20 m×0.8 m×0.12) um valor de 14.40 dB e 18.23 dB para um pavimento de madeira (1.60 m×1.5 m×0.12 m) com 2 mm de vinílico azul. Ao variar as dimensões de um sistema em pavimentos de madeira, verifica-se que, a redução sonora apresenta uma ligeira melhoria de desempenho ao nível das altas frequências, a partir da frequência de 1600 Hz para um sistema construtivo de um pavimento de madeira (1.60 m×1.5 m×0.12 m) com 2 mm de vinílico azul. Em relação as baixas e médias frequências a melhoria é praticamente inexistente.

#### **4.2.2 Pavimentos Flutuantes**

De igual modo, testou-se nove soluções construtivas de pavimentos flutuantes em madeira com diferentes camadas resilientes (4 mm de aglomerado de borracha, 2 mm de aglomerado de cortiça e 5 mm de espuma de polietileno de cor azul) sobre as mesmas configurações de laje testadas.

##### **4.2.2.1 Aglomerado de borracha**

As curvas de redução sonora, para um sistema em pavimento flutuante com um material resiliente com 4 mm de aglomerado de borracha sobre as três configurações lajes analisadas, encontra-se ilustrada na figura 4.6. Dá análise dos mesmos, verifica-se que, as três soluções construtivas testadas apresentam comportamentos distintos. Apesar, do seu desempenho melhorar ao longo das bandas de frequência de um terço de oitava. As duas soluções em pavimento de madeira, apresentam um melhor desempenho acústico, na primeira metade da gama de frequência, face à laje de referência em betão sob o mesmo sistema. Contudo, a partir da frequência dos 500 Hz, o seu desempenho decresce comparativamente à laje de referência. Esta, apresenta um valor máximo de 45.52 dB para uma frequência de 3150 Hz, no caso de um pavimento de madeira com dimensões (1.20 m×0.8 m×0.12m) um valor de 16.03 dB e 12.67 dB para um pavimento de madeira com dimensões (1.60 m×1.5 m×0.12 m) sob o sistema testado. O desempenho acústico dos sistemas em pavimento de madeira sob um aglomerado de borracha com 4 mm de espessura, apresenta melhorias significativas ao nível das baixas e médias frequências com o aumento das suas dimensões. Em relação as altas frequência, a sua

melhoria é praticamente inexistente. A partir de uma frequência de 2000 Hz, a solução construtiva de um pavimento de madeira (1.60 m×1.5m×0.12m) sob um pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha apresenta um desempenho decresce.

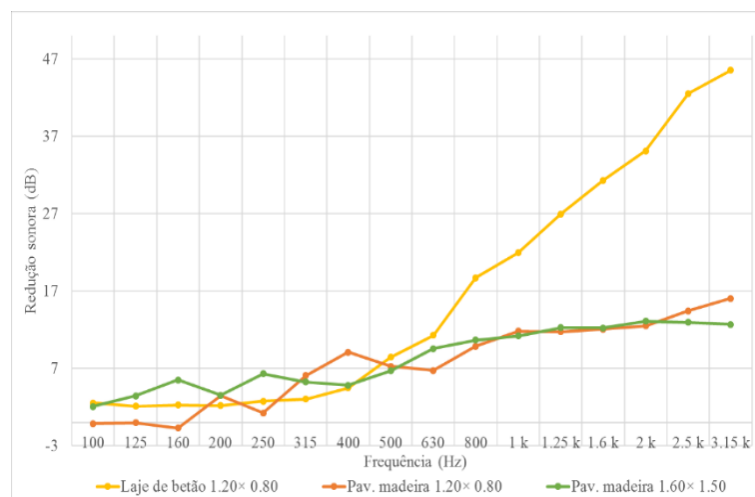


Figura 4.6 – Redução sonora para um pavimento flutuante com 4 mm de espessura de aglomerado de borracha sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), uma laje de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e uma laje de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).

#### 4.2.2.2 Aglomerado de cortiça

De igual modo, apresenta-se na figura 4.7, os resultados obtidos das respetivas curvas de redução sonora para os três sistemas testados, alterando apenas, a composição da camada intermédia, para um aglomerado de cortiça com 2 mm de espessura colado à face inferior do pavimento flutuante. A partir, da observação dos resultados obtidos verifica-se, que os três sistemas testados apresentam um comportamento destinto. Contudo, estes tendem a aumentar com o incremento da frequência. As duas configurações em pavimento de madeira apresentam um melhor desempenho acústico, até uma frequência de 800 Hz, comparativamente à laje de referência analisada sob o mesmo sistema construtivo. Porém, com algumas oscilações de valores. Tal fato pode dever-se, ao empenamento das amostras e/ou aos grãos de areia presentes, na superfície da camada resiliente em aglomerado de cortiça gerando vibrações ao sistema testado. A partir da frequência de 800 Hz, o desempenho acústico das duas configurações em pavimentos de madeira piora face à laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m) para o mesmo sistema flutuante testado. Esta, apresenta um valor máximo de 40.14 dB para uma frequência de 3150 Hz, no caso de um pavimento de madeira com dimensões (1.20 m×0.8 m×0.12 m) um valor de 15.56 dB e 11.57 dB para um pavimento de madeira com dimensões (1.60 m×1.5 m×0.12 m) sob o sistema testado. De igual modo, ao variar as respetivas dimensões de sistema em

pavimento de madeira, não se verifica melhorias significativas ao nível das altas frequências. No entanto, ao nível das baixas e médias apresenta uma ligeira melhoria no seu desempenho acústico.

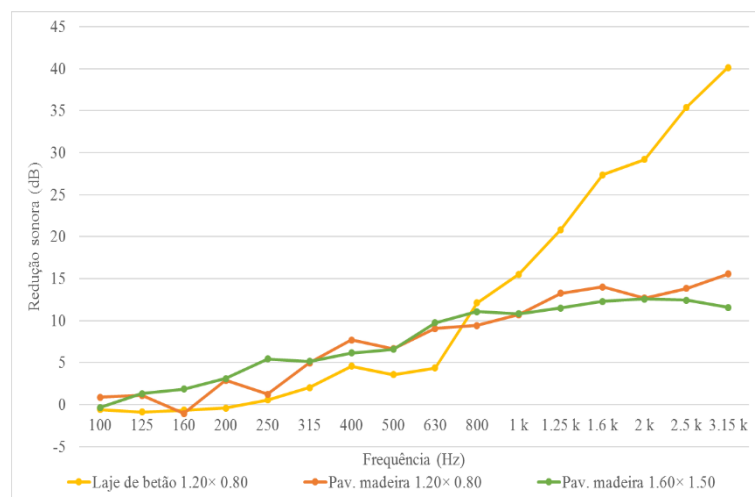


Figura 4.7 – Redução sonora para um pavimento flutuante com 2 mm de espessura de aglomerado de cortiça sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).

#### 4.2.2.3 Espuma de polietileno

Na figura 4.8 apresenta-se, as curvas de redução sonora para um sistema flutuante com um material resiliente em espuma de polietileno de cor azul com 5 mm de espessura sobre as três configurações de laje testadas. Da análise, dos resultados obtidos verifica-se, que os sistemas testados melhoram o seu desempenho acústico com o aumento da frequência. Tal como, nos restantes sistemas flutuantes testados, verifica-se que, os dois sistemas flutuante com 4 mm de espuma de polietileno sobre um pavimento de madeira com dimensões (1.20 m×0.8 m×0.12 m e 1.60 m×1.50 m×0.12 m) apresentam um comportamento similar ao nível das baixas frequências comparativamente à laje de dimensões reduzidas de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m) com algumas oscilações. De igual modo, o sistema construtivo de um pavimento flutuante com 5 mm de espuma de polietileno sobre a um pavimento de madeira com dimensões (1.60 m×1.50 m×0.12 m) apresenta um melhor desempenho acústica na gama das baixas frequência. A partir da frequência de 500 Hz, ambos os sistemas flutuantes sobre um pavimento de madeira apresentam um pior desempenho acústico, em relação à laje de referência sob o mesmo tipo de sistema. Esta, apresenta um valor máximo de 54.14 dB para uma frequência de 3150 Hz, no caso de um pavimento de madeira com dimensões (1.20 m×0.8m×0.12m) um valor de 19.28

dB e 17.43 dB para um pavimento de madeira com dimensões (1.60 m×1.5 m×0.12 m) sob o sistema testado.

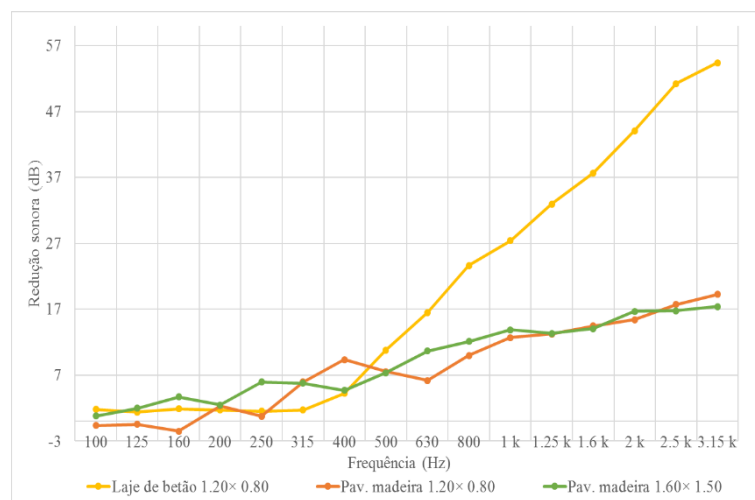


Figura 4.8 – Redução sonora para um pavimento flutuante com 5 mm de espessura de espuma de polietileno sobre: uma laje de betão (1.20 m×0.8 m×0.20 m), um pavimento de madeira (1.20 m×0.8 m×0.12 m) e um pavimento de madeira (1.60 m×1.50 m×0.12 m).

### 4.3 Análise dos níveis sonoros

Em suma, para além da metodologia normalizada (ISO 16251:1-2014) utilizou-se uma metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas - DEC) na avaliação do comportamento acústico das soluções construtivas adotadas. Para tal, mediu-se o nível de pressão sonora no interior da câmara reverberante de dimensões reduzidas para três posições de microfone (M1, M2, M3). Para cada posição de microfone considerou-se três posições de fonte (P1, P2, P3). Para cada posição de fonte realizou-se duas medições. De seguida, obteve-se a redução sonora para cada solução que consiste na diferença entre o nível de pressão sonora médio medido no pavimento de referência sem o revestimento aplicado e com revestimento aplicado.

Apesar das duas metodologias abordadas medirem grandezas acústicas diferentes, uma vez que, a metodologia normalizada (ISO 16251-1:2014) mede níveis de vibração sonora enquanto a metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas) mede níveis de pressão sonora. Ambas permitem avaliar o comportamento acústico de cada solução testada através de curvas de redução sonora e do índice de redução sonora conferido pelo revestimento de piso. Como tal, no subcapítulo 4.3 será apresentado para os dois tipos de soluções testadas (diferentes revestimentos finais de piso e pavimentos flutuantes com diferentes materiais

resilientes) sobre as lajes de suporte, a avaliação dos resultados obtidos para ambas as metodologias analisadas.

#### 4.3.1 Revestimentos flexíveis

Tal como já referido anteriormente avaliou-se para os dois métodos de avaliação experimental, o desempenho acústico para diferentes revestimentos finais de piso (tapete, 2 mm de vinílico azul e 3 mm de vinílico cinzento) sobre as duas lajes de suporte com dimensões (1.20 m×0.8 m×0.20 m e 1.60 m×1.5 m×0.06 m. Na figura 4.9 apresenta-se, os resultados das curvas de redução sonora para as soluções construtivas referidas anteriormente. A partir da análise dos mesmos, pode-se constatar para as três soluções de revestimentos flexíveis testadas que ao nível das baixas e médias frequências existe algumas oscilações do desempenho acústico entre os dois métodos analisados. Todavia, ao nível das altas frequências verifica-se uma melhor concordância e que a metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas) apresenta valores de redução sonora superiores a metodologia normalizada (ISO 16251-1:2014).

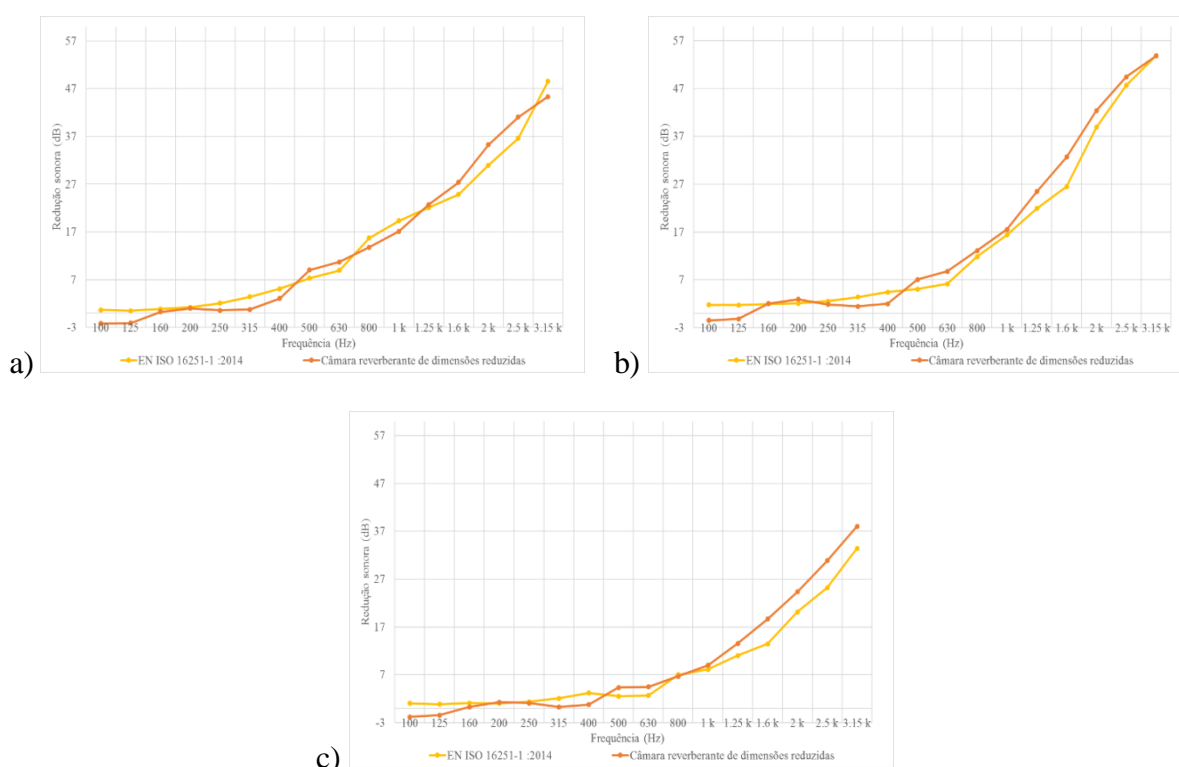


Figura 4.9 – Curvas de redução sonora segundo as metodologias normalizada (ISO 16251:1-2014) e não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas) para vários revestimentos flexíveis: a) tapete; b) 3 mm de vinílico cinzento; c) 2 mm de vinílico azul.

#### 4.3.1.1 Índice de redução sonora conferido pelos revestimentos de piso

Como já referido no subcapítulo 3.3.1 o índice de redução sonora conferido pelo revestimento de piso é obtido de acordo com a equação 8 segundo a NP EN ISO 717-2:2013. Primeiramente começa-se por medir o nível médio de pressão sonora para cada solução testada. De seguida, o valor obtido é comparado com um pavimento de referência (78 dB). Por fim é feito um reajustamento a curva de referência por patamares de 1dB. A título de exemplo, apresenta-se na figura (4.10) o reajustamento à curva de referência por patamares de 1 dB, para um revestimento final de piso em vinílico cinzento com 3 mm de espessura sobre a laje de suporte (câmara reverberante de dimensões reduzidas). No anexo B, apresentar-se-á um exemplo de cálculo do índice de redução sonora a sons de percussão, para a solução construtiva acima descrita.

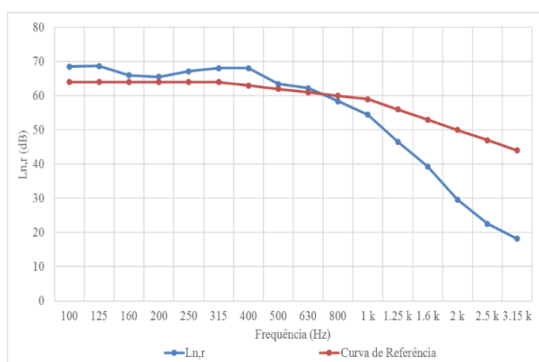


Figura 4.10 – Reajustamento a curva de referência de um vinílico cinzento com 3 mm de espessura sobre a laje de suporte (1.60 m×1.5 m×0.06 m), segundo a metodologia não normalizada.

De igual modo, analisou-se os índices de redução sonora para os três revestimentos flexíveis segundo as duas metodologias analisadas (quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Índice de redução sonora para três revestimentos finais de piso, de acordo com as duas metodologias de ensaio.

Revestimento final de piso	espessura (mm)	$\Delta L_{L,W}$ (dB)	
		Metodologia normalizada (EN ISO 16251-1:2014)	Metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas)
Tapete	4	17	16
Vinílico cinzento	3	17	16
Vinílico azul	2	14	14

Dá análise do quadro 4.1 pode-se observar que o índice de redução sonora obtido para os três revestimentos final de piso apresenta resultados semelhantes nas duas metodologias analisadas.

Para os revestimentos flexíveis (tapete e vinílico cinzento) apresenta uma diferença 1 dB. No caso do revestimento com vinílico azul apresenta o mesmo desempenho em ambas metodologias.

### 4.3.2 Pavimento flutuantes

Na figura 4.11 apresenta-se os resultados das curvas de redução sonora, para um pavimento flutuante com um material resiliente (4 mm de aglomerado de borracha, 2 mm de aglomerado de cortiça e 5 mm de espuma polietileno de cor azul), de acordo com os dois métodos de avaliação experimental. Dá análise dos resultados pode-se verificar que para as soluções com pavimento flutuante com 4 mm de aglomerado de borracha e pavimento flutuante com 5 mm de espuma de polietileno de cor azul apresentam uma boa concordância entre os dois métodos de avaliação experimental com algumas oscilações. Para ambas as soluções a metodologia não normalizada apresenta um pior desempenho comparativamente a metodologia normalizada (ISO 16251:1-2014). Relativamente a solução construtiva com pavimento flutuante com 2 mm de aglomerado de cortiça determinada segundo as duas metodologias é a que apresenta uma maior discrepância de resultados ao nível das baixas e médias frequências. Contudo, o seu desempenho acústico melhora na gama das altas frequências.

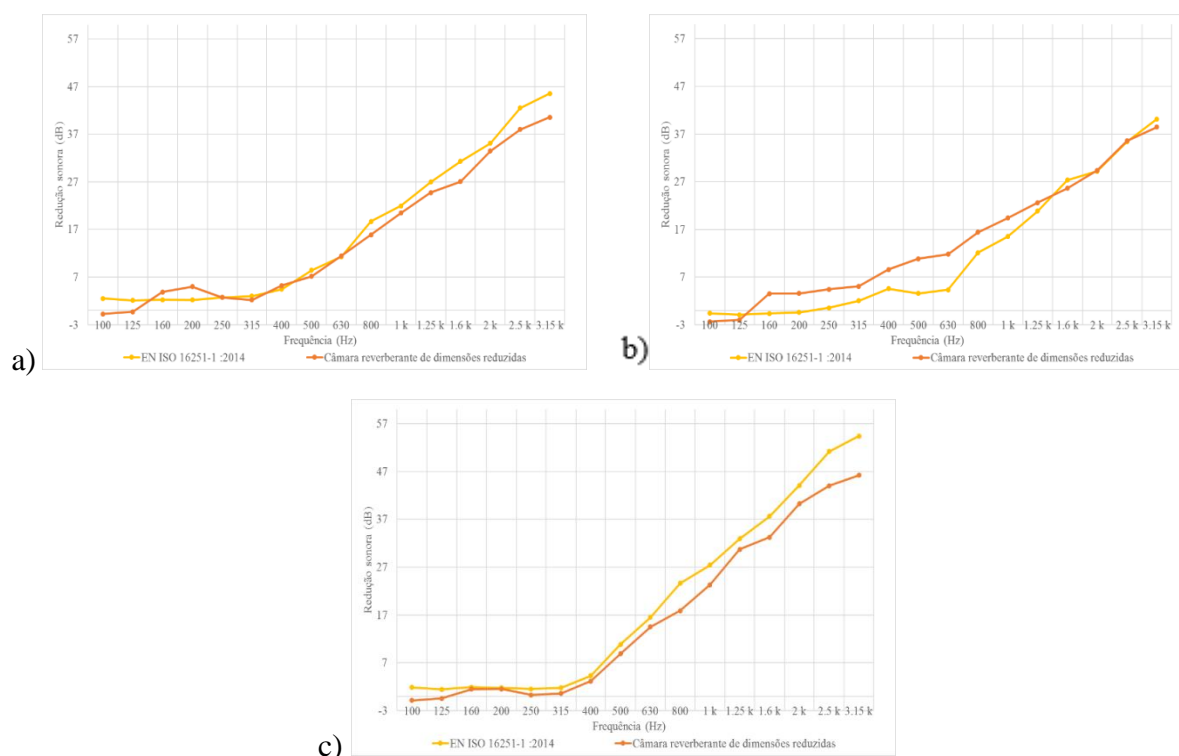


Figura 4.11 – Curvas de redução sonora segundo as metodologias normalizada e não normalizada para pavimentos flutuantes com um material resiliente de: a) 4 mm de aglomerado de borracha; b) 2 mm de aglomerado de cortiça; c) 5 mm de espuma de polietileno de cor azul.

No quadro 4.2 apresenta-se os resultados dos índices de redução sonora para as três soluções construtivas de pavimento flutuante sobre diferentes materiais resilientes segundo a metodologia normalizada e não normalizada. A partir da análise dos resultados, observa-se que os valores obtidos para as soluções construtivas de um pavimento flutuante com material resiliente (4 mm de aglomerado de borracha e 5 mm de polietileno de cor azul) apresenta uma diferença de 1dB entre as duas metodologias analisadas. Contudo a solução construtiva com aglomerado de cortiça apresenta uma maior discrepância. Tal facto, poderá dever-se ao empenamento da amostra e a pequenos grãos de areia existentes na face inferior do aglomerado de cortiça.

Quadro 4.2 – índice de redução sonora segundo as metodologias normalizada e não normalizada para pavimentos flutuantes com um material resiliente de: a) 4 mm de aglomerado de borracha; b) 2 mm de aglomerado de cortiça; c) 5mm de espuma de polietileno de cor azul.

<i>Pavimento flutuante com um material resiliente:</i>	<i>espessura (mm)</i>	<i><math>\Delta L_{L,w}</math> (dB)</i>	
		<i>Metodologia normalizada (EN ISO 16251-1:2014)</i>	<i>Metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas)</i>
Aglomerado de borracha	4	18	17
Aglomerado de cortiça	2	15	18
Espuma de polietileno de cor azul	5	17	16



## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Considerações finais

No âmbito desta dissertação foram estudadas soluções de reabilitação acústica em pavimentos tradicionais em madeira, corrente em edifícios, localizados sobretudo em centros históricos. Tais soluções, consistem na alteração da superfície de impacto, através da implementação de revestimentos de piso flexíveis e pavimentos flutuantes com diferentes materiais resilientes sobre a laje de suporte (pavimento em madeira) com diferentes dimensões. A avaliação deste tipo de ruído, predominante, na componente a sons de percussão, foi avaliada, através de dois métodos de avaliação experimental distintos. Designadamente uma metodologia normalizada “alternativa” (ISO 16251-1:2014) e outra não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas).

Os resultados obtidos através da metodologia normalizada para as duas configurações de laje de suporte em pavimentos de madeira sob as diversas soluções construtivas testadas, permitem concluir que, o desempenho acústico para os revestimentos de piso flexíveis na gama das baixas e médias frequências é idêntico ao da laje de betão de dimensões reduzidas para o mesmo tipo de revestimento. As soluções com pavimentos flutuantes com os diferentes materiais resilientes apresentam um melhor comportamento ao nível do isolamento a sons de percussão nas baixas e médias frequências comparativamente aos revestimentos de piso flexíveis. Ao nível das altas frequências os dois tipos de soluções testadas apresentam um pior comportamento em relação à laje de betão de dimensões reduzidas. Verificou-se também que outros autores constataram comportamento idêntico através de ensaios laboratoriais em condições normalizadas o que indicia que o procedimento experimental poderá ser também utilizado neste tipo de pavimento.

Os desempenhos acústicos das duas configurações de pavimento de madeira testadas segundo a metodologia normalizada apresentam um comportamento semelhante com algumas oscilações ao nível das baixas e médias frequências para os dois tipos de soluções analisada. É de salientar no caso dos revestimentos com pavimentos flutuantes com os diferentes materiais resilientes apresentam um melhor comportamento a sons de percussão a configuração do pavimento de madeira com dimensões (1.60 m×1.5 m×0.12 m) em relação ao pavimento de madeira com dimensões (1.2 m×0.8 m×0.12 m). Tal fato, pode dever-se a uma maior massa na configuração de pavimento de madeira com dimensões maiores.

O desempenho acústico obtido para os mesmos tipos de soluções, utilizando as duas metodologias testadas sobre as respectivas lajes de suporte em betão armado, permitem concluir que os resultados em frequência obtidos segundo a metodologia normalizada para o tipo de solução com revestimentos flexíveis apresentam um comportamento aproximado, com os índices de redução sonora praticamente iguais. Quando o tipo de revestimento de piso é alterado para uma solução em pavimento flutuante, tais resultados apresentam tendência semelhante, mas algumas discrepâncias em amplitude. Os índices de redução sonora apresentam também diferenças máximas de 3dB.

## **5.2 Trabalhos futuros**

Tal como já foi referido, os resultados obtidos através de ensaios normalizados em condições normalizadas, segundo uma metodologia normalizada “alternativa” (ISO 16251: 2014) sob este tipo de pavimento são satisfatórios, podendo ser implementados. Será de todo o interesse, testar em estudos futuros, para o mesmo tipo de pavimento soluções de reabilitação acústica, que permitem atenuar o impacto na fonte, segundo uma metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas). De modo, a avaliar a similaridade de respostas entre as duas metodologias.

De igual modo, implementar novas soluções de reforço na parte inferior sob este tipo de pavimento, através de dois métodos de avaliação experimental propostos com a finalidade de avaliar a resposta fornecida pelo sistema.

Por fim, para as soluções supracitadas, testar em ensaios à escala real.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, N., Faria P. (2008). “ Soluções Construtivas para Pavimentos e Coberturas em Edifícios Antigos”, 4º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, CINPAR, Aveiro.

Baião, M., Pinho, F., Lúcio, V., Coelho, A. (2012). “Aspetos Da Reabilitação de Edifícios Antigos de Alvenaria”, Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria: 47–62.

Baião, M., Dias, M., Coelho, L., Marques, A. (2012) “Reabilitação de paredes de alvenaria e de pavimentos de madeira de edifícios antigos”, Jornadas LNEC – Cidades e desenvolvimento, LNEC, Lisboa.

Bjor, Ole-herman. (2010). “Transmitted Impact Noise by Floor Coverings.” : 2–6.

Branco, F.G., Godinho, L., Pereira, A., e Masgalos, R. (2010). “Analysis of Impact Sound Reduction by Floor Coverings Using a Small-Sized Acoustic Chamber.” 39th International Congress on Noise Control Engineering 2010, INTER-NOISE 2010 : 1100–1110.

Colen, I., Garcia, J., Silva, L., Silva, A. e Neto, N. (sem data). “Revestimentos de pisos – Tecnologia da Construção de Edifícios”, Instituto Superior Técnico.

Domingues, Odete. (2008). “A acústica nos edifícios: pavimentos e revestimentos de pavimentos, isolamento a sons de percussão”, Lisboa : LNEC.

Ilharco, Tiago. (2008). “Pavimentos de Madeira Em Edifícios Antigos. Diagnóstico E Intervenção Estrutural.”, Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

InovaDomus (2013). “Caso de estudo – Edifício sede da InovaDomus, Ílhavo”, Projeto Cooperar para Reabilitar, InovaDomus.

ISO 10140-1:2010. “Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Parte 1: Application rules for specific products”.

ISO 10140-1:2010. “Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Parte 2: Measurement of airborne sound insulation”.

ISO 10140-3:2010. “Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Parte 3: Measurement of impact sound insulation”.

ISO 10140-4:2010. “Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Parte 4: Measurement procedures and requirements”.

ISO 10140-5:2010. “Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Parte 5: Requirements of test facilities and equipment”.

ISO 16251-1:2014. “Acoustics – Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up – Part 1: Heavyweight compact floor”.

ISO 717-2: 1996. “Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation”.

Masgalos, Rui (2008). “Análise de um sistema de dimensões reduzidas para o ensaio de isolamento a sons de percussão”, Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Mateus, Diogo. (2008). “Acústica de Edifícios E Controlo de Ruído”, apontamentos de apoio a disciplina de acústica, DEC-FCTUC.

Mateus, Diogo.(2005). “Influência de ruído aéreo gerado pela percussão de pavimentos na determinação de  $L'_{n,w}$ ”, 1ª Conferência Nacional “Medir Mais e Melhor”, 28-29 de Novembro, IST, Lisboa.

NP EN ISO 140.7 (2010). “Acústica – Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção – Parte 7: Medição, in situ, do isolamento sonora de pavimentos a sons de percussão”- Errata 1.

NP EN ISO 140.8 (2008). “Acústica – Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção – Parte 8: Medição em laboratório da redução de transmissão sonora de revestimento de piso em pavimento normalizado”.

NP EN ISO 140.11 (2005) “Acústica – Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção – Parte 11: Medição em laboratório da redução de transmissão sonora de revestimento de piso em pavimentos leves de referência”.

NP EN ISO 717-2: 2013. “Acústica - Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção - Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão”.

Pavicentro - Pré-Fabricação, S.A. (sem data) “Guia para a reabilitação - Sistema Estrutural.”, Projeto Cooperar para Reabilitar, InovaDomus.

Patrício, J. (2008). “Reabilitação Acústica de Edifícios – Linhas Guia”. Verlag Dashofer, 2ª Edição, Lisboa, (100 páginas).

Pereira, A., Godinho, L., Mateus, D., Ramis, J. and Branco, F. (2014). “Assessment of a Simplified Experimental Procedure to Evaluate Impact Sound Reduction of Floor Coverings.” *Applied Acoustics* 79: 92–103.

RRAE – “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios”, aprovado pelo Decreto-Lei nº129/2002 de 11 de maio, substituída pelo Decreto – Lei nº96/2008 de 9 de junho.

Schmidt, J., Wittstock, V., e Langer, S. 2014. “Uncertainties and Validation Procedures for the Compact Measurement Setup” *Internoise 2014* 10140(1): 1–9.

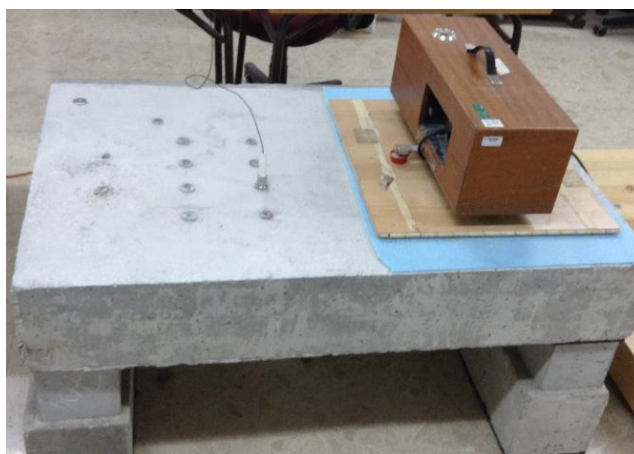
Tadeu, António et al. 2010. “Acústica Aplicada, Laboratório de Construções Departamento de Engenharia Civil Da F.C.T Da Universidade de Coimbra.”

Teixeira, Maria (2010). “Reabilitação de edifícios pombalinos – Análise experimental de paredes de frontal”, Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Villot, M., Chene, J. and Houssain, S. (2007). “Testing floor coverings mounted on lightweight floors using ISO/FDIS 140-11.”, 19th International Congress on Acoustics Madrid, Madrid, INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS MADRID, 2-7 SEPTEMBER 2007 (September): 2–7.

## ANEXO A – ILUSTRAÇÕES DOS ENSAIOS

**A.1 – Medição dos níveis de vibração numa laje de betão de dimensões reduzidas sob um pavimento flutuante com 5 mm de espuma de polietileno: cor azul, segundo a metodologia normalizada (ISO 16251:1-2014)**



**A.2 – Medição dos níveis de vibração num pavimento de madeira (1.20 m x 0.80 m x 0.12 m) sob um vinílico azul com 2 mm de espessura, segundo a metodologia normalizada (ISO 16251:1-2014)**



**A.3 – Medição dos níveis de vibração num pavimento de madeira (1.60 m × 1.50 m × 0.12 m) sob um vinílico azul com 2 mm de espessura, segundo a metodologia normalizada (ISO 16251:1-2014)**



**A.4 – Medição dos níveis de pressão sonora de um revestimento de piso em vinílico azul com 2 mm de espessura sobre a laje de suporte, segundo a metodologia não normalizada (câmara reverberante de dimensões reduzidas)**



## ANEXO B – EXEMPLO DE CÁLCULO

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

<b>f</b>	<b><math>\Delta L</math></b>	<b><math>L_{n,r,0}</math></b>	<b><math>L_{n,r}</math></b>	<b>Curva de Referência</b>	<b><math>\Delta L_i</math></b>
<b>Hz</b>	<b>dB</b>	<b>dB</b>	<b>dB</b>	<b>dB</b>	<b>dB</b>
100	-1.51	67.00	68.51	64.0	4.51
125	-1.19	67.50	68.69	64.0	4.69
160	2.00	68.00	66.00	64.0	2.00
200	2.93	68.50	65.57	64.0	1.57
250	1.82	69.00	67.18	64.0	3.18
315	1.41	69.50	68.09	64.0	4.09
400	1.95	70.00	68.05	63.0	5.05
500	7.01	70.50	63.49	62.0	1.49
630	8.74	71.00	62.26	61.0	1.26
800	13.09	71.50	58.41	60.0	0.00
1 k	17.53	72.00	54.47	59.0	0.00
1.25 k	25.43	72.00	46.57	56.0	0.00
1.6 k	32.67	72.00	39.33	53.0	0.00
2 k	42.38	72.00	29.62	50.0	0.00
2.5 k	49.43	72.00	22.57	47.0	0.00
3.15 k	53.85	72.00	18.15	44.0	0.00
<b><math>\Sigma</math></b>					<b>27.84</b>

<b>X</b>	<b>1</b>
----------	----------

<b><math>L_{n,r,w}</math></b>	<b>62</b>
<b><math>L_{n,r,0,w}</math></b>	<b>78</b>
<b><math>\Delta L_w</math></b>	<b>16</b>