

DESENVOLVIMENTO DE PAVIMENTO FLUTUANTE COM AGLOMERADO DE CORTIÇA, DE DESEMPENHO ACÚSTICO OTIMIZADO

VÍTOR CONSTANTINO MACHADO ROCHA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

Co-Orientador: Professor Francisco J. C. Xavier de Carvalho

JULHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Àqueles que fazem parte da minha vida,
principalmente àqueles que são a minha vida

Às vezes não adianta andar às voltas atrás de uma solução, “o material tem sempre razão”

Constantino Machado

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar aqui o meu forte agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, em particular:

Ao meu orientador, Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, pela sua incomparável disponibilidade, os seus conselhos e o seu sentido crítico. A motivação que sempre demonstrou perante as dificuldades foi uma fonte de inspiração essencial ao bom desenvolvimento deste trabalho, tendo sido para mim um grande orgulho trabalhar sobre a sua orientação.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor Francisco José de Castro Xavier de Carvalho, que me tratou como um filho durante todo este tempo que trabalhamos juntos, aconselhando, motivando e mostrando-se sempre apto em solucionar qualquer problema que se deparasse no meu caminho. Por tudo e muito mais, um muito obrigado.

À SEDACOR, com um agradecimento especial à Engenheira Vera Sá, pelo apoio e compreensão e pela confiança posta neste trabalho. Sem a vossa vontade de seguir este projeto, não teria a possibilidade de abraçar uma oportunidade tão interessante e motivadora como esta.

Ao Engenheiro Eduardo Costa que me auxiliou nos meus ensaios laboratoriais e me apoiou na compreensão de todos os procedimentos associados à boa execução do meu trabalho. Além disso, mostrou que trabalhar em laboratório é como resolver um simples “cubo mágico”, não há segredo, apenas dedicação.

Aos meus pais que sempre me apoiaram em todo o meu percurso académico, que sempre acreditaram nas minhas capacidades e que mesmo nos momentos em que estive mais afastado, conseguiram estar sempre presentes.

Ao meu irmão, pelas suas brincadeiras que me fizeram carregar as baterias para trabalhar sempre cheio de energia e pela sua disponibilidade ao me ter emprestado durante meses o seu computador para a realização deste trabalho. Finalmente vai tê-lo de volta.

À Residência Universitária Jayme Rios de Sousa, pelo seu acolhimento durante estes longos anos académicos, especialmente nestes últimos meses onde foi para mim um ponto de refúgio, um mundo cheio de pessoas magníficas, pessoas que foram a minha família durante estes inesquecíveis anos.

E um agradecimento muito especial à minha namorada, Carla, pela compreensão nas horas em que não lhe dei tanta atenção, pela grande ajuda que me deu na execução deste trabalho e pela força que me transmitiu, força essa que se transformou na pedra angular de todo o meu trabalho.

A todos vós

Um muito obrigado

RESUMO

O rendimento e a saúde física e mental dos indivíduos estão relacionados com a existência de condições acusticamente favoráveis. Como o ruído originado pela percussão sobre pavimentos tem uma elevada difusão e sendo a cortiça um bom material de isolamento sonoro, o presente trabalho pretendeu, em colaboração com a empresa corticeira SEDACOR, aprimorar a seleção do tipo de material a incluir em pavimentos flutuantes de aglomerado de cortiça e desenvolver novos produtos de pavimentos, com a finalidade de otimizar o seu isolamento sonoro a ruídos de percussão.

Para este efeito, realizaram-se ensaios de percussão a vinte e seis soluções de pavimento flutuante na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da FEUP, de acordo com as normas NP EN ISO 140-8 e NP EN ISO 717-2.

Com esta metodologia foi possível determinar, para bandas de terço de oitava dos 100 Hz aos 5 kHz, o nível de pressão sonora de cada uma das amostras de pavimento, quando percutidos através da máquina de impactos normalizada, e assim efetuar uma análise comparativa entre as diversas soluções ensaiadas. Todas as condições de ensaio assim como as hipóteses associadas ao desenvolvimento dos pavimentos são documentadas no presente estudo.

Os resultados mostraram que, de entre os materiais estudados, o uso do produto “012” como decorativo é a melhor opção. Das várias disposições de pavimentos estudadas, a combinação do “contraplacado” com o *underlay* “51 PL” ou “12 PL” e combinação do “MDF” com o *underlay* “25 MS” demonstram ter bons resultados no isolamento sonoro a ruídos de percussão. Verificou-se também que o aumento de 1 mm na espessura do *underlay* não influencia significativamente o desempenho acústico do pavimento nas baixas frequências mas permite um aumento do isolamento sonoro na ordem dos 3 dB em algumas das bandas nas altas frequências. Além disso, aferiu-se que o envernizamento dos pavimentos prejudica o isolamento sonoro a ruídos de percussão, especialmente nas altas frequências, onde o aumento do ruído ultrapassa os 2 dB. Foi ainda possível apurar que nalguns casos, a utilização de outros formatos de aglomerado de cortiça na camada de *underlay* pode melhorar substancialmente o isolamento sonoro nas médias-altas frequências, chegando a apresentar mais de 10 dB de redução sonora nas frequências centrais entre os 600 Hz e os 2,5 kHz, em relação ao desempenho típico dos pavimentos flutuantes comerciais.

No decorrer desta investigação foi sugerida uma adaptação ao atual método de cálculo do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado, descrito na NP EN ISO 717-2, através da aplicação da curva de ponderação tipo A. Esta adaptação permitiu ter em conta a reação auditiva dos ocupantes, sendo esta preocupação omissa na atual classificação normativa.

Esta investigação vem assim contribuir com resultados empiricamente validados para uma escolha ponderada, por parte da empresa, no que diz respeito ao tipo de material a empregar em pavimentos flutuantes acusticamente otimizados.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento Flutuante, Acústica, Isolamento Sonoro, Ruído de Percussão, Cortiça

ABSTRACT

The productivity and physical and mental health of individuals are connected with the presence of favorable acoustic conditions. Because noise originated by percussion upon floors has a high diffusion rate and cork is a good insulation material, this work intended, in cooperation with the cork company SEDACOR, to improve the selection of the type of material to include agglomerated cork floating floors and develop new floating floors products, so that the sound insulation to structure borne noise be optimized.

For this purpose, the reverberation room of FEUP's Acoustic Lab was used to perform percussion tests to twenty-six floating floors solutions, following the NP EN ISO 140-8 and NP EN ISO 717-2 standards.

With the present methodology it was possible to determine, for third-octave bandwidths from 100 Hz to 5 kHz, the level of sound pressure of each one of the floor samples, when impacted through the tapping machine, and execute a comparative analysis between the several test solutions. Every test condition as well as the hypothesis related to floor's development are documented in the present study.

The results showed that, between the studied materials, the use of the "012" product as upper layer is the best option. From the several dispositions of the studied floors, the combination of "plywood" with underlay "51 PL" or "12PL" and the combination of "MDF" with underlay "25 MS" showed good results in terms of sound insulation to structure borne noise. It was also verified that the increase of 1 mm in the depth of the underlay wasn't of significant influence to the acoustic performance of the floor in low frequencies, but it allows an increase of sound insulation in about 3dB for some of the high frequency bandwidths. Besides, it was possible to reach the conclusion that varnishing floors was harmful to the sound insulation of structure borne noise, especially in high frequencies, where the noise reduction decreased by more than 2dB. In addition, it was discovered that in some cases, using other agglomerated cork forms in the underlay layer can improve substantially sound insulation in medium-high frequencies, showing more than 10dB of sound reduction in central frequencies between 600 Hz and 2,5 kHz, when referring to the typical performance of commercial floating floors.

During this investigation it was suggested an adaptation to the current method to estimate the normalized weighted impact sound index, as described in NP EN ISO 717-2 through the use of the A-weighting curve. This adaptation made possible to take into account the occupants' hearing reactions, a concern absent in the current standard classification.

Therefore, this investigation comes to contribute with empirically supported results, so that the company can make a weighted choice on what concerns the type of materials to apply in acoustically perfected floating floors.

KEYWORDS: Floating Floors, Acoustics, Sound Insulation, Structure Borne Noise, Cork

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE.....	2

2. CONCEITOS TEÓRICOS	3
2.1. NOÇÕES GERAIS	3
2.1.1. ELEMENTOS BÁSICOS	3
2.1.1.1. O Som.....	3
2.1.1.2. Som vs. Ruído.....	4
2.1.1.3. Pressão Sonora.....	5
2.1.1.4. Frequência Sonora	9
2.1.1.5. Curvas de ponderação	10
2.1.2. ABSORÇÃO SONORA	11
2.1.2.1. Definição	11
2.1.2.2. Determinação da absorção sonora	12
2.1.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	12
2.1.3.1. Conceito.....	12
2.1.3.2. Fórmulas de previsão	13
2.1.3.3. Meios de medição	15
2.2. ISOLAMENTO SONORO.....	15
2.2.1. CARACTERIZAÇÃO	15
2.2.2. RUÍDO DE PERCUSSÃO	16
2.2.3. ONDAS EM MEIO SÓLIDO	18
2.2.4. MITIGAÇÃO DO RUÍDO DE PERCUSSÃO	20
2.3. O RUÍDO	21
2.3.1. TIPOS DE RUÍDOS.....	21
2.3.2. EFEITOS DO RUÍDO NO HOMEM.....	23

3. PAVIMENTOS FLUTUANTES	25
3.1. O PAVIMENTO	25
3.2. ESTADO DE ARTE	27
3.3. MODELO ANALÍTICO	31
3.4. ANÁLISE COMPORTAMENTAL	33
3.5. ESTUDO DE PAVIMENTOS FLUTUANTES	35
4. A CORTIÇA	39
4.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA	39
4.2. FABRICO DE CORTIÇA	40
4.2.1. O SOBREIRO	40
4.2.2. A CORTIÇA	42
4.2.3. O DESCORTIÇAMENTO	43
4.3. PROPRIEDADES DA CORTIÇA	44
4.4. PRODUTOS DA CORTIÇA	45
4.5. AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA EM PAVIMENTOS	47
5. DERIVADOS DE MADEIRA	49
5.1. TIPOS DE DERIVADOS	49
5.2. DERIVADOS DE MADEIRA USADOS EM PAVIMENTOS FLUTUANTES	50
5.2.1. O CONTRAPLACADO	50
5.2.2. AGLOMERADO DE FIBRAS - MDF	52
5.3. CUIDADOS COM PAVIMENTOS FLUTUANTES	54
6. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL	57
6.1. AMOSTRAS	57
6.2. MÉTODO	61
6.2.1. NORMALIZAÇÃO	61
6.2.2. MÁQUINA DE IMPACTOS NORMALIZADA	68
6.2.3. OUTRAS NORMAS EM VIGOR	68
6.3. METODOLOGIA DE ENSAIO	70
6.4. RESULTADOS	74
6.4.1. ANÁLISE PRELIMINAR DOS RESULTADOS	74

6.4.2. ANÁLISE DOS PAVIMENTOS COMERCIAIS	78
6.4.2.1. Metodologia.....	78
6.4.2.2. Influência do tipo de decorativo	79
6.4.2.3. Influência do tipo de elemento resistente	81
6.4.2.4. Influência do tipo de <i>underlay</i>	83
6.4.2.5. Influência da espessura do <i>underlay</i>	85
6.4.2.6. Efeito do envernizamento	89
6.4.3. ANÁLISE DOS PAVIMENTOS DESENVOLVIDOS	91
6.4.3.1. Metodologia.....	91
6.4.3.2. Experiência 1 – Tiras e amortecedores.....	92
6.4.3.3. Experiência 2 – Elipses e bastões	95
6.4.3.4. Experiência 3 – Granulado / Resumo dos Resultados.....	98
6.4.4. RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	100
 7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	105
7.1. CONCLUSÕES	105
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	109
7.2.1. NOVOS ESTUDOS PARA A DIMINUIÇÃO DO VALOR DE $L_{N,R,W}$	109
7.2.2. ADAPTAÇÃO DA ATUAL NORMALIZAÇÃO.....	110
7.2.3. ENCURVAMENTO DO PAVIMENTO Z.....	112
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
ANEXO A – REGISTO FOTOGRÁFICO	119
ANEXO B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Variações de pressão temporal e comportamento das partículas, num ponto genérico, em torno da pressão atmosférica aquando da geração de um estímulo sonoro	3
Fig. 2.2 – Esquema elucidativo da separação entre som e ruído	5
Fig. 2.3 – Analogia entre a variação de pressão numa partícula no ar e o movimento harmónico dum relógio de pêndulo.....	6
Fig. 2.4 – Representação esquemática da perda e intensidade sonora em função da distância à fonte.....	7
Fig. 2.5 - Diagrama de conversão de Pressão Sonora [Pa] em Nível de Pressão Sonora [dB]	8
Fig. 2.6 – Soma de dois sons puros (esquerda) num som composto (direita).....	9
Fig. 2.7 – Definição do Tempo de Reverberação T através de extrapolação.....	13
Fig. 2.8 – Representação esquemática da influência da transmissão sonora em função das características do elemento separador entre compartimentos (L_d – transmissão direta, L_f – transmissão marginal)	16
Fig. 2.9 – Esquema do ensaio de caracterização do isolamento sonoro a ruído de percussão com máquina de impactos normalizada	17
Fig. 2.10 – Composição de uma onda de flexão e sua configuração da propagação.....	18
Fig. 2.11 – Influência da elasticidade do material resiliente na atenuação da propagação: material rígido (esquerda) e material elástico (direita)	19
Fig. 2.12 – Comportamento de uma ponte acústica entre dois elementos rígidos, “inserida” num material de características elásticas	19
Fig. 2.13 – Três tipos de situações de melhoramento do isolamento sonoro a ruídos de percussão atuando distintamente em três áreas genéricas de intervenção (alcatifa, sistema flutuante e teto resiliente suspenso).....	20
Fig. 2.14 – Constituição de um pavimento flutuante apoiado sobre uma laje estrutural	21
Fig. 2.15 – Oscilograma de um ruído contínuo ou estacionário (esq.) e de um ruído intermitente em patamares (dir.).....	22
Fig. 2.16 – Oscilograma de um ruído impulsivo (esq.) e de um ruído flutuante aleatório ou de fundo (dir.)	22
Fig. 2.17 – Espectro rico em baixas frequências, com relevo tonal na banda dos 1/3 de oitava dos 500 Hz	23
Fig. 2.18 – Evolução média das fases I, II, III e IV do sono num adulto (SP - Sono Paradoxal)	24
Fig. 3.1 – Facilidade de aplicação do pavimento flutuante tipo <i>parquet</i> , que foi objeto de estudo no presente trabalho, proporcionada pelo seu sistema de encaixe macho-fêmea	26
Fig. 3.2 – Pavimentos da AcoustiCork ensaiados por Vafiadis.....	28
Fig. 3.3 – Níveis de vibração médios medidos numa laje e numa parede adjacente quando excitadas pela máquina de impactos normalizada	28

Fig. 3.4 – Modelo físico básico do comportamento de um pavimento flutuante	31
Fig. 3.5 – Resposta dinâmica de um sistema de um grau de liberdade para vários coeficientes de amortecimento ξ	32
Fig. 3.6 – Curvas típicas da variação do nível de ruído de percussão para a situação de uma laje estrutural nua, com a sobreposição de um sistema flutuante e de um sistema flutuante superiormente revestido com um material elástico.....	34
Figura 3.7 – Diversos tipos de camada resiliente/elástica: a) manta; b) molas; c) blocos; d) lâminas; e) amortecedores pneumáticos	36
Fig. 3.8 – Exemplos de “pontes acústicas” em laje flutuante, representando o caso genérico dos sistemas flutuantes: (1) remate de rodapé; (2) remate de elementos que atravessam o pavimento	37
Fig. 4.1 – Distribuição da produção média anual de cortiça a nível mundial no ano de 2010.....	40
Fig. 4.2 – Sobreiro (esq.) e ocupação do sobreiro na bacia do Mediterrâneo (dir.).....	41
Fig. 4.3 – Constituição de um tronco de sobreiro com cortiça em reprodução.....	41
Fig. 4.4 – Diferentes tipos de cortiças obtidas a partir do sobreiro	42
Fig. 4.5 – Fases do descortiçamento de sobreiros adultos	43
Fig. 4.6 – Gráfico esquemático do comportamento viscoelástico da cortiça	45
Fig. 4.7 – Produtos comerciais de aglomerado composto de cortiça resultantes da aglomeração das partículas de cortiça que servem de revestimento e <i>underlay</i> de pavimentos flutuantes.....	46
Fig. 4.8 – Decomposição de um pavimento flutuante constituído por um elemento resistente em MDF (a verde), revestido com aglomerado composto de cortiça, com envernizamento superior..	47
Fig. 5.1 – Diferenciação das placas de derivados de madeira em função do grau de desagregação da madeira (OSB – Oriented Strand Board, LVL – Laminated Veneer Lumber)	49
Fig. 5.2 – Tipos de contraplacado em função da sua composição	50
Fig. 5.3 – Placa de contraplacado e disposição da orientação perpendicular das fibras de cada folha em relação às camadas adjacentes.....	51
Fig. 5.4 – Provetes de MDF e H-MDF antes e após terem sido sujeitos a ensaios de resistência à humidade, com clivagem total no MDF, de acordo com a NP EN 321	53
Fig. 5.5 – Esquemas recomendado do armazenamento de placas de pavimentos flutuantes de derivados de madeira.....	54
Fig. 6.1 – Pranchas e pavimento antes da montagem (atrás) e depois da montagem (à frente) pronto a colocar sobre a laje laboratorial para ensaio.....	57
Fig. 6.2 – Corte esquemático das várias camadas dos pavimentos flutuantes de cortiça e do tipo de encaixe	58
Fig. 6.3 – Curva de referência para ruídos de percussão para bandas de frequência com largura de um terço de oitava, conforme a NP EN ISO 717-2.....	64
Fig. 6.4 – Método de cálculo do $L_{n,r,w}$ segundo a NP EN ISO 717-2	65

Fig. 6.5 – Esquema da metodologia utilizada em cada ensaio, desde as medições laboratoriais até ao cálculo do $L_{n,r,w}$	66
Fig. 6.6 – (esq.) – Máquina de impactos normalizado; (dir.) – Propostas de posições de ensaio	68
Fig. 6.7 – Recursos utilizados para a caracterização do ruído de percussão, exigidos noutras normas fora da Europa comunitária: (esq.) – Curva de referência IIC, segundo a norma ASTM E989; (dir.) – Pneu acoplado a um sistema mecânico e bola <i>Tachibana</i>	69
Fig. 6.8 – Esquema da interação entre as Câmaras Reverberantes E2 e R1 e o conceito de medição do ruído de percussão associado a pavimentos flutuantes.....	70
Fig. 6.9 – Disposição típica dos pesos 1, 2, 3 e 4 ($\approx 7,6$ kg/cada) sobre as sete pranchas de cada amostra de pavimento ensaiado.....	71
Fig. 6.10 – Planta esquemática das Câmaras Reverberantes do Laboratório de Acústica da FEUP: câmara de emissão E2 (esquerda) com a posição absoluta dos diversos pavimentos ensaiados, e câmara de receção R1 (direita) com as posições dos microfones para os dois tipos de medições	72
Fig. 6.11 – Representação esquemática das quatro posições de ensaio da máquina de percussão e das zonas de impacto dos martelos sobre o pavimento	73
Fig. 6.12 – a) ensaio dos pavimentos na câmara emissora E2; b) disposição dos microfones na câmara recetora R1.....	74
Fig. 6.13 – Influência do ruído de fundo nos valores do nível de pressão sonora L_i do pavimento A ..	75
Fig. 6.14 – Espectrograma do pavimento A representativo do comportamento mais comum do ruído de percussão dos pavimentos ensaiados sem a contribuição do ruído de fundo em função das quatro posições da máquina de percussão descritas na figura 6.11	76
Fig. 6.15 – Espectrograma da redução sonora a ruídos de percussão do pavimento A representativo do comportamento mais comum dos pavimentos ensaiados.....	78
Fig. 6.16 – Pavimentos (G, I, K, H, J e L) que serviram de base para a avaliação da influência do tipo de decorativo nos pavimentos flutuantes	79
Fig. 6.17 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais de <i>underlay</i> “51 PL” (G, I e K) estudados para averiguar a influência do tipo de decorativo (52 CLK, Mono 215 e 012) em câmara reverberante.....	80
Fig. 6.18 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais de <i>underlay</i> “12 PL” (H, J e L) estudados para averiguar a influência do tipo de decorativo (52 CLK, Mono 215 e 012) em câmara reverberante.....	80
Fig. 6.19 – Pavimentos (D, A, F, C, E e B) que serviram de base para a avaliação da influência do tipo de elemento resistente nos pavimentos flutuantes.....	81
Fig. 6.20 – Níveis de pressão sonora normalizados e, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (A, B, C, D, E e F) para averiguar a influência do tipo de elemento resistente (MDF e Contraplacado) em câmara reverberante	82
Fig. 6.21 – Redução dos níveis de pressão sonora normalizados do Contraplacado em relação ao MDF ($\Delta L_n = L_{MDF} - L_{Cont.}$) em função do tipo de <i>underlay</i> (51 PL, 12 PL e 25 MS),	

fundamentada nos ensaios dos pavimentos comerciais (A, B, C, D, E e F) para averiguar a influência do tipo de elemento estrutural (MDF e Contraplacado) em câmara reverberante 82

- Fig. 6.22 – Pavimentos (A, C, B, M e N) que serviram de base para a avaliação da influência do tipo *underlay* nos pavimentos flutuantes.....83
- Fig. 6.23 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (A, B, C, M e N) para averiguar a influência dos cinco tipos de *underlay* (51 PL, 25 MS, 12 PL, 40 BR e HDC) em câmara reverberante 84
- Fig. 6.24 – Pavimentos (A, G, P, B, H e O) que serviram de base para a avaliação da influência da espessura do *underlay* nos pavimentos flutuantes (1,2 a 3,2 mm) 85
- Fig. 6.25 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (A, G, P, B, H e O) para averiguar a influência da espessura do *underlay* (1,2 a 3,2 mm) em câmara reverberante 85
- Fig. 6.26 – Redução média dos níveis de pressão sonora normalizados, criada pela variação da espessura do *underlay* dos pavimentos comerciais (A, B, G, H, O e P) para averiguar a influência da espessura do *underlay* (1,2 a 3,2 mm) em câmara reverberante 86
- Fig. 6.27 – Níveis de pressão sonora normalizados e $L_{n,r,w}$ NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (B e O) para averiguar a influência do aumento da espessura do *underlay* de 1,2 mm para 3,2 mm 87
- Fig. 6.28 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) de todos os dezasseis pavimentos comerciais ensaiados em câmara reverberante 88
- Fig. 6.29 – Pavimentos (G, Q, H e R) que serviram de base para a avaliação do efeito do envernizamento nos pavimentos flutuantes 89
- Fig. 6.30 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (G, H, Q e R) para averiguar o efeito do envernizamento nos pavimentos comerciais em câmara reverberante.....90
- Fig. 6.31 – Espectrograma do aumento do nível de pressão sonora normalizado dos pavimentos G e H quando submetidos a envernizamento, em função do tipo de *underlay* 91
- Fig. 6.32 – Esquema dos quatro pavimentos desenvolvidos a partir de algumas combinações de tiras de cortiça (U, V, S e T).....93
- Fig. 6.33 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos quatro pavimentos desenvolvidos a partir de tiras de cortiça (U,V,S e T) ensaiados em câmara reverberante, comparados com a média energética dos pavimentos comerciais G e H fabricados pela SEDACOR.....94
- Fig. 6.34 – Esquema dos três pavimentos desenvolvidos a partir da ideia dos espaços de ar fechados como maneira de obtenção de um amortecimento extra (Y, W e X) 96
- Fig. 6.35 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) e $LA_{r,eq}$ dos três pavimentos desenvolvidos a partir da ideia dos espaços de ar fechados como maneira de obtenção de um amortecimento extra (Y, W e X) ensaiados em câmara reverberante, comparados com a média energética dos pavimentos comerciais G e H fabricados pela SEDACOR 97

Fig. 6.36 – Esquema do pavimento Z desenvolvido com <i>underlay</i> em granulado 5/8 mm	99
Fig. 6.37 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) e $LA_{r,eq}$ de todos os oito pavimentos desenvolvidos (U, V, S, T, Y, W, X e Z) comparados com a média energética dos pavimentos comerciais G e H fabricados pela SEDACOR	99
Fig. 6.38 – Espectrograma geral com todos os resultados de todos os 26 pavimentos ensaiados em câmara reverberante (pavimentos desenvolvidos a tracejado)	101
Fig. 6.39 – Gráficos de barras: (a) do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão Não Normalizados ($L_{n,r,w}$ NN), adaptado do método da NP EN ISO 717-2 para se obter uma casa decimal, e (b) do nível sonoro contínuo equivalente ponderado A em relação ao pavimento de referência ($LA_{eq,r}$), dos 26 pavimentos ensaiados em câmara reverberante	103
Fig. 7.1 – Exemplificação do cálculo do $L_{n,r,w}$ do pavimento A (a), em função do campo de atuação: (b) diminuindo 5 dB às bandas de frequência dos 630 aos 3150 Hz; (c) diminuindo 5 dB dos 100 aos 500 Hz	110
Fig. 7.2 – Curva dos níveis de pressão sonora normalizados em relação ao pavimento de referência ($L_{n,r}$), antes e depois da aplicação dos valores da curva de ponderação do filtro A, usada para a obter o valor nível sonoro contínuo equivalente ponderado A ($LA_{eq,r}$)	111
Fig. 7.3 – Zonas de influência do cálculo do $L_{n,r,w}$ a partir dos valores de $L_{n,r}$ do pavimento A com (sufixo “- f”) e sem (sufixo “- i”) a aplicação da curva de ponderação do filtro A	112
Fig. 7.4 – Fotos do estado final do pavimento Z após ter ficado 15 dias sobre o piso plano da zona de circulação do laboratório de Acústica	113
Fig. 7.5 – Esquema do possível comportamento das placas do pavimento Z aquando da secagem da cola do <i>underlay</i>	113
Fig. A.1 – Posições da máquina de impactos normalizada aquando dos ensaios de percussão dos pavimentos flutuantes na câmara emissora E2	121
Fig. A.2 – Disposição dos microfones na câmara recetora R1	121
Fig. A.3 – Colagem das tiras de cortiça no pavimento U da “Experiencia 1 – Tiras e amortecedores”	122
Fig. A.4 – Aspeto final do pavimento T da “Experiencia 1 – Tiras e amortecedores”	122
Fig. A.5 – Underlay do pavimento Y da “Experiência 2 – Elipses e bastões”	123
Fig. A.6 – Vista do underlay do pavimento X da “Experiência 2 – Elipses e bastões”	123
Fig. A.7 – Método usado na prensagem do granulado ao elemento resistente, para dar origem ao pavimento Z	124
Fig. A.8 – Aspeto final do pavimento de granulado de cortiça colada (Pav. Z)	124

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Parâmetros fundamentais sonoros e suas expressões	8
Quadro 2.2 – Valores da ponderação do filtro A, na gama do audível, para as bandas de frequência de 1/3 de oitava e 1/1 oitava	11
Quadro 5.1 – Variação do tipo de MDF em função da sua massa volúmica	52
Quadro 6.1 – Constituição dos 26 diferentes pavimentos ensaiados (A a P – pavimentos comerciais sem verniz; Q a R – pavimentos comerciais com verniz; S a Z – pavimentos desenvolvidos pelo autor)	59
Quadro 6.2 – Subprodutos da SEDACOR usados na laboração dos pavimentos descritos no quadro 6.1	60
Quadro 6.3 – Características mais importantes do MDF da FIBRANOR® usado como elemento estrutural dos pavimentos ensaiados descritos no quadro 6.1	60
Quadro 6.4 – Nível de pressão sonora normalizado do pavimento de referência ($L_{n,r,0}$) em função da banda de frequência de terço de oitava, conforme a NP EN ISO 717-2	63
Quadro 6.5 – Valores da curva de referência para ruídos de percussão para bandas de frequência com largura de um terço de oitava, expressa na figura 6.3	64
Quadro 6.6 – Tempo de reverberação e área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante recetora R1 em função da frequência	77
Quadro 6.7 – Valores de $L_{n,r,w}$ e ΔL_w de todos os 26 pavimentos ensaiados, segundo a NP EN ISO 717-2, bem como os valores de $L_{n,r,w}$ NN e ΔL_w NN (Não Normativos) e $L_{Aeq,r}$	100
Quadro B.1 – Níveis de pressão sonora normalizados, L_n , em bandas de terço de oitava (dB), dos pavimentos flutuantes A a N, aquando da percussão com a máquina de impactos normalizada	127
Quadro B.2 – Níveis de pressão sonora normalizados, L_n , em bandas de terço de oitava (dB), dos pavimentos flutuantes O a Z e da laje simples, aquando da percussão com a máquina de impactos normalizada	128
Quadro B.3 – Valores do ΔL do Pav. A e valores do ΔL_n das várias análises de influência, em bandas de terço de oitava (dB)	129

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α – Coeficiente de absorção sonora teórico

α_i – Coeficiente de absorção sonora teórico da superfície i

ξ – Coeficiente de amortecimento

Δ – Variação do nível

ΔL – Redução do nível de pressão sonora do ruído de percussão [dB]

ΔL_n – Redução do nível de pressão sonora do ruído de percussão normalizado [dB]

ΔL_w – Redução do nível de ruído de percussão ponderado [dB]

ΔL_w NN – Redução do nível de ruído de percussão ponderado, Não Normalizado [dB]

ω – Frequência angular [rad/s]

ρ – Massa volúmica [kg/m³]

θ – Temperatura [°C]

A – Área de absorção sonora equivalente [m²]

A_0 – Área de absorção sonora equivalente de referência [m²]

A_j – Absorção sonora localizada j [m²]

c – Celeridade [m/s]

c_b – Velocidade de uma onda de flexão [m/s]

C_i – Termo de adaptação espectral [dB]

$C_{i,\Delta}$ - Termo de adaptação espectral da redução do nível de ruído de percussão [dB]

$C_{i,0}$ - Termo de adaptação espectral do pavimento de referência sem revestimento de piso [dB]

$C_{i, 50-2500}$ – Termo de adaptação espectral considerando inclusive as bandas de terço de oitava dos 50, 63 e 80 Hz [dB]

$C_{i, 63-2000}$ – Termo de adaptação espectral considerando inclusive a banda de uma oitava dos 63 Hz [dB]

$C_{i,r}$ - Termo de adaptação espectral do pavimento de referência com o revestimento de piso a ensaiar [dB]

d - Amortecimento

D – Rigidez do elemento plano de propagação [kPa]

f – Frequência [Hz]

f_0 – Frequência central de banda [Hz]

f_1 – Frequência limite inferior de banda [Hz]

f_2 – Frequência limite superior de banda [Hz]

f'_1 – Frequência de ressonância [Hz]

I – Intensidade sonora [W/m^2]

I_0 – Intensidade sonora de referência [W/m^2]

K – Constante que toma o valor de 1 ou $1/3$ consoante a banda de frequência seja 1 ou $1/3$

L – Nível de pressão sonora do sinal corrigido [dB]

$L_{Aeq,r}$ – Nível sonoro contínuo equivalente ponderado A, aplicado ao pavimento de referência [dB]

L_b – Nível de pressão sonora do ruído de fundo [dB]

$L_{Cont.}$ – Nível de pressão sonora normalizado do pavimento com Contraplacado [dB]

L_d – Transmissão direta

L_i – Nível de pressão sonora do pavimento com revestimento, para a banda de frequência i [dB]

$L_{i,0}$ – Nível de pressão sonora do pavimento sem revestimento, para a banda de frequência i [dB]

L_I – Nível de intensidade sonora [dB]

L_f – Transmissão marginal

L_{MDF} – Nível de pressão sonora normalizado do pavimento com MDF [dB]

L_n – Nível de pressão sonora normalizado do pavimento com revestimento [dB]

$L_{n,eq}$ – Nível de pressão sonora normalizado equivalente [dB]

$L_{n,0}$ – Nível de pressão sonora normalizado do pavimento sem revestimento [dB]

$L_{n,r}$ – Nível de pressão sonora normalizado definido para o pavimento de referência com o revestimento de piso [dB]

$L_{n,r,0}$ – Nível de pressão sonora normalizado definido para o pavimento de referência [dB]

$L_{n,r,0,w}$ – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado definido para o pavimento de referência sem o revestimento de piso [dB]

$L_{n,r,w}$ – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado definido para o pavimento de referência com o revestimento de piso [dB]

$L_{n,r,w} NN$ – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão não normativo definido para o pavimento de referência com o revestimento de piso [dB]

L_P – Nível de pressão sonora [dB]

L_{sb} – Nível de pressão sonora da combinação do sinal de percussão com o ruído de fundo [dB]

L_W – Nível de potência sonora [dB]

m - Absorção sonora do ar [m^{-1}]

m' – Massa superficial (kg/m^2)

m_0 – Massa do martelo de percussão [kg]

M – Massa do corpo

p – Pressão sonora [Pa]

p_0 – Pressão sonora de referência [Pa]

$P(t)$ – Pressão sonora no instante t [Pa]

r – Raio [m]

s – Rigidez

s' – Rigidez dinâmica por unidade de superfície [N/m^3]

s'' – Rigidez dinâmica da camada de ar [N/m^3]

S_i – Secção da superfície i [m^2]

T – Tempo de reverberação [s]

T_{20} – Tempo de reverberação medido para um decaimento de 20 dB [s]

T_{30} – Tempo de reverberação medido para um decaimento de 30 dB [s]

T_{60} – Tempo de reverberação medido para um decaimento de 60 dB [s]

V – volume do compartimento [m^3]

W – Potência sonora [W]

W_0 – Potência sonora de referência [W]

Z_1 - Impedância

ASTM – American Society for Testing and Materials

CR – Curva de Referência

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

HDC – High Density Cork

H-MDF – High Medium Density Fiberboard

IIC – Impact Insulation Class

JIS – Japanese Industrial Standards

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LVL – Laminated Venner Lumber

L-MDF – Light Medium Density Fiberboard

MDF – Medium Density Fiberboard ou Fibras de Madeira de Média Densidade

OSB – Oriented Strand Board

SEDACOR – Sociedade Exportadora de Artigos de Cortiça, Lda

SP – Sono Paradoxal

UL-MDF – Ultra Light Medium Density Fiberboard

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A Acústica, no princípio do século XVIII, era entendida como a ciência que compreendia a teoria dos sons ligada à criação de instrumentos musicais e ao estudo empírico de soluções de boa conceção em espaços de culto ou de apresentação de espetáculos. Porém, ao longo dos tempos sofreu uma evolução e passou a ser também encarada como uma área ligada à vivência dos indivíduos, ou seja, na sua habitação, nas suas áreas de trabalho, de repouso e de lazer [1].

Segundo estudos realizados antes de 1992 a edificações multifamiliares portuguesas, existem problemas de conforto acústico associados à insatisfação das necessidades funcionais de isolamento sonoro a ruídos de percussão, um dos maiores fatores de incomodidade entre vizinhos nos edifícios, que pode levar ao aparecimento de alguns problemas físico-psíquicos, sociais e económicos [2].

Porém, devido à evolução social e económica, a sociedade tem vindo a tornar-se mais exigente nas questões de conforto, levando à necessidade do desenvolvimento de novas soluções, mais leves e baratas, que aumentem a privacidade dos ocupantes a partir do isolamento sonoro a ruídos de percussão.

Para dar resposta a este problema surgem os pavimentos flutuantes leves, constituídos por uma combinação de diferentes camadas de diversos materiais, conferindo um acréscimo de isolamento sonoro ao piso habitacional. Em geral, apresenta três camadas (da superior para a inferior): o decorativo, o elemento resistente e o *underlay* (subcamada).

Dos materiais usados como revestimentos de piso, destacam-se os que têm na sua constituição aglomerado de cortiça devido à sua resistência mecânica, natureza renovável e eficiência no isolamento térmico e acústico [3], tendo vindo a aumentar a sua utilização em pavimentos de forma exponencial graças ao crescente desenvolvimento tecnológico [4].

Por esta mesma razão o número de novos pavimentos flutuantes com aglomerado de cortiça não pára de aumentar. Por ser um setor promissor, tem-se verificado um constante desenvolvimento de novos sistemas construtivos de pavimentos através de inovadoras técnicas produtivas que permitem conferir um maior conforto acústico nos edifícios e um aumento da qualidade de vida da sociedade [5].

Com o objetivo de caracterizar, desenvolver e otimizar o desempenho acústico de pavimentos flutuantes com aglomerado de cortiça, em colaboração com a empresa corticeira SEDACOR (que forneceu os pavimentos flutuantes de cortiça e todo o tipo de materiais para realizar as variadas combinações de pavimentos experimentais), foram ensaiadas mais de duas dezenas de diferentes amostras de pavimentos flutuantes de MDF e contraplacado combinados com revestimentos de

diversos produtos de aglomerado composto de cortiça. Com tal leque de ensaios foi possível quantificar e discutir o isolamento sonoro a ruídos de percussão de cada pavimento, tendo como finalidade encontrar a melhor combinação de pavimento que originasse o melhor desempenho acústico, de modo a facilitar a decisão sobre qual o pavimento mais adequado a produzir na empresa.

Para entender qual dos diferentes materiais usados nas camadas dos pavimentos mais contribui para o isolamento sonoro a ruídos de percussão, estudou-se o comportamento de uma combinação de dezasseis pavimentos que foram ensaiados em câmara reverberante. Como esses pavimentos, por questões logísticas, não tinham levado o envernizamento final, escolheram-se dois desses dezasseis pavimentos, envernizaram-se na nova linha de envernizamento da empresa associada e ensaiaram-se nas mesmas condições laboratoriais para avaliar a influência da camada de verniz na propagação do ruído de percussão. Além disso, desenvolveram-se nas instalações da Secção de Construções do Departamento de Engenharia Civil da FEUP, oito pavimentos flutuantes através da alteração da configuração e morfologia da sua camada inferior, o *underlay*.

Sendo por isso um tema de elevado interesse, com liberdade para criar novas soluções de sistemas isolantes sonoros, o estudo do comportamento de pavimentos flutuantes com aglomerado de cortiça demonstra ser uma mais-valia para o conforto acústico dos ocupantes das habitações multifamiliares e para o desenvolvimento da sociedade em geral.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação é constituída por sete capítulos, todos eles interligados e com o mesmo propósito: explicar as temáticas mais importantes que estão relacionadas com o desenvolvimento deste estudo acústico dos pavimentos flutuantes com aglomerado de cortiça.

No primeiro capítulo faz-se uma breve descrição da importância dos pavimentos flutuantes na sociedade e da necessidade de se proceder a estudos laboratoriais que otimizem a sua eficiência. Também é expressa a motivação criada no autor da dissertação, o interesse e o gosto pelo tema.

O capítulo dois tem como intencionalidade tornar clara a compreensão dos assuntos relacionados com a Acústica que são abordados ao longo da dissertação. Além disso também é comentado o comportamento do ruído e o efeito que ele tem sobre o Homem.

Quanto ao terceiro capítulo, pretende-se dar a conhecer a pesquisa efetuada na área dos pavimentos flutuantes, perceber o seu comportamento, a sua eficiência e a sua evolução tecnológica na área do ruído de percussão.

No quarto capítulo dá-se a conhecer uma parte do mundo da cortiça, desde a sua origem, suas propriedades e aplicabilidade no ramo dos pavimentos flutuantes.

No capítulo 5 descreve-se um pouco os outros constituintes da camada central dos pavimentos flutuantes em estudo, os derivados de madeira, explicando as principais características do MDF e do contraplacado, desde a sua origem, classificação até à sua inclusão em pavimentos flutuantes. Para além da sua caracterização, também é feita uma pequena abordagem sobre os cuidados a ter durante o seu transporte, manuseio, armazenamento, aplicação e manutenção.

No capítulo sexto são apresentadas as amostras ensaiadas, a metodologia de ensaio e os resultados experimentais, fazendo uma discussão dos resultados.

Finalmente no capítulo sete apresentam-se as conclusões dos resultados dos ensaios, com uma pequena referência a possíveis desenvolvimentos futuros.

2

CONCEITOS TEÓRICOS

2.1. NOÇÕES GERAIS

2.1.1. ELEMENTOS BÁSICOS

2.1.1.1. O Som

Numa análise puramente física, o som pode ser definido como uma vibração mecânica num meio elástico, podendo este ser ar, água ou material sólido, associado a um estímulo sonoro, ou seja, uma onda de variação de pressão que se propaga até ser percebido pelo ouvido humano, sendo suscetível de dar origem a uma sensação auditiva. Difunde-se a partir do centro da fonte sonora e percorre o ar sob a forma de ondas esféricas concêntricas. No ponto de emissão inicia-se o fenómeno da alteração da pressão onde tal facto pode ser encarado como uma esfera pulsante que excita as suas partículas circundantes provocando variações de pressão às partículas adjacentes através da compressão e rarefação do ambiente próprio das partículas (Fig. 2.1) até chegar ao ouvido do recetor. [6, 7]. A pressão sonora $P(t)$ é igual à pressão total resultante do impulso subtraída da pressão atmosférica (Fig. 2.1). Normalmente não é muito importante o conhecimento da evolução do valor de $P(t)$, sendo mais interessante a quantificação média da energia libertada pela vibração mecânica durante o intervalo de tempo em questão [8]

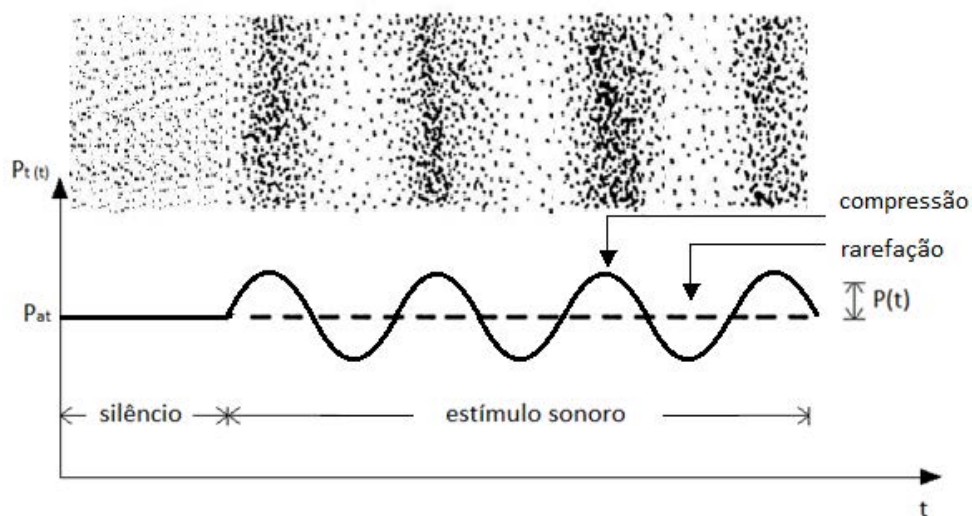


Fig. 2.1 – Variações de pressão temporal e comportamento das partículas, num ponto genérico, em torno da pressão atmosférica aquando da geração de um estímulo sonoro [Adaptado de 6, 9]

O som pode-se propagar através duma onda harmónica, que tem uma única componente em termos de frequência com uma configuração sinusoidal – som puro ou simples (Fig. 2.1) - ou através da sobreposição de duas ou mais ondas harmónicas originando um som complexo ou composto (Fig. 2.6), que podem ter as mais variadíssimas formas. Este último tipo de onda engloba os tipos de sons mais correntes [6].

O ar é o meio mais frequente na transmissão do impulso sonoro até ao sistema auditivo do Homem, sendo composto principalmente por oxigénio, azoto, quantidades muito pequenas de alguns gases inertes, vapor de água e impurezas, onde esses constituintes se encontram misturados numa dispersão homogénea, donde se pode considerar o ar como um meio isotrópico, homogéneo, elástico e muito fluido que se mantém em equilíbrio até a ocorrência de uma qualquer perturbação que instantaneamente se propaga nesse meio [10].

Existem autores que dividem o conceito de som e que defendem que o som tem dois significados distintos, o fenómeno físico, que diz respeito à fonte sonora e à difusão do som através do meio, e o fenómeno psicofísico, que se refere à sensação provocada pela audição desse fenómeno. Descrever o som como um fenómeno físico ou como uma sensação depende da abordagem usada [1].

Contudo o som só é “som” quando existe um recetor para o qual o seu sistema auditivo reaja ao estímulo sonoro, transmitindo ao cérebro uma sensação em função do que aquele som significa para o ouvinte, podendo ser um som ou um ruído [6, 10].

2.1.1.2. Som vs. Ruído

Apesar de ser evidente, no quotidiano identificar a diferença entre um som e um ruído, essa divergência não é tão explicativa quando perguntamos, a alguém que não está dentro da área, qual a diferença, a que justificam que som é tudo o que ouvimos e que o ruído é um tipo de som que não tem lógica/intencionalidade [11]. Por isso é importante salientar: o som é diferente do ruído, não se combinam, ou seja, ambos não podem existir ao mesmo tempo para o mesmo ouvinte e para o mesmo impulso sonoro, ou é som ou é ruído.

O que diferencia o som de um ruído é a reação provocada no indivíduo recetor após a deteção do impulso sonoro pelo sistema auditivo. Se o estímulo sonoro provocar uma reação agradável ao ouvinte ou estar associado a um valor auditivo com significância (mesmo que não seja significado lógico), caracteriza-se como sendo um som, caso contrário, se não tiver significado para o ouvinte ou for incómodo e desagradável, é descrito como ruído [6].

Contudo o problema da definição de ruído não se restringe unicamente ao domínio da Física, devendo-se ter em conta outros aspetos de natureza biológica e psicológica. A diferenciação entre ruído e som dum certo estímulo sonoro, não depende apenas das características individuais do auditor, dado que o mesmo auditor pode sofrer influência de uma carga social inerente à partilha de atitudes sociais que podem enviesar a apreciação do estímulo, carga essa que aumenta a indecisão sobre a classificação dum estímulo sonoro em ruído ou som, fazendo existir uma zona de indiferença (Fig. 2.2) que, para um mesmo indivíduo, pode sofrer alterações ao longo dos tempos. Essa é uma das razões que influencia a delicadeza de certos problemas relacionados com o ruído, dado que com o afastamento das zonas extremas, aumenta-se a indefinição do estímulo [10].

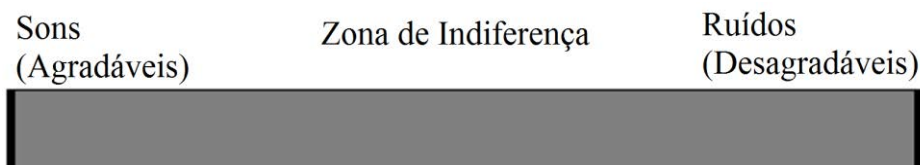


Fig. 2.2 – Esquema elucidativo da separação entre som e ruído [10]

Daí, pode-se averiguar que a resposta a um dado estímulo sonoro está intimamente ligada com o ambiente em que se insere o indivíduo, com o estado físico, psíquico e sociológico, com o estilo de vida e com o cotidiano do mesmo [10]. No entanto, como a mesma solicitação sonora pode ser som para uns mas também ruído para outros, devido à existência de diversas classificações de um estímulo sonoro para vários indivíduos, é de extrema importância evitar possíveis motivos de conflitos dentro da sociedade. Para isso, as entidades reguladoras e legislativas usam a regulamentação para obrigar a uma série de restrições, levando a um estudo mais aprofundado e a uma preocupação dimensional dentro dos ambientes em que o ruído é bastante incomodativo, forçando o uso de técnicas e materiais adequados a uma boa redução da propagação sonora, propiciando uma diminuição do possível mal-estar provocado nos recetores. Porém há ruídos que são ruídos para todos os indivíduos, sendo por isso do interesse de todos diminuí-los nos ambientes em que vivemos.

É frequente realizar o estudo do som e do ruído segundo três domínios: a pressão, a frequência e o tempo. Apesar destes domínios serem complementares entre si, só serão de seguida referenciadas as noções mais importantes: a pressão e de frequência.

2.1.1.3. Pressão Sonora

Como já foi dito anteriormente, a produção do ruído é causada pela variação da pressão no meio de difusão em que se encontra, propagando-se graças às constantes colisões entre as partículas existentes no meio, sofrendo estas compressões e rarefações que as movimentam de um lado para o outro em relação à sua posição inicial, sem que haja no final deslocamento absoluto de cada partícula, levando a que todas elas voltem à posição original [9].

Olhando em particular o movimento de compressão e rarefação numa partícula, verifica-se que a vibração ocorrida pelo estímulo sonoro obriga-a a afastar-se da sua posição inicial, no entanto existem forças elásticas no meio que a submetem, posteriormente, a um movimento contrário, fazendo-a voltar à sua posição original. Todavia, devido à força de inércia a partícula ultrapassa a sua posição inicial e percorre alguma distância afastando-se da sua origem, voltando novamente a ser puxada para a posição inicial às mesmas forças elásticas, repetindo-se o ciclo de vaivém até o estímulo cessar [9]. Este movimento harmónico é muito parecido com o movimento dum pêndulo de um relógio (Fig. 2.3), preso num vai e vem repetitivo onde tenta entrar em repouso na sua posição central mas que por força da inércia continua em movimento regular. Anexando ao relógio uma tira de papel que passa descendente e verticalmente na posição central do pêndulo e em que o mesmo risca na folha o seu movimento pendular, tem-se um gráfico sinusoidal que retrata as variações de pressão nas partículas em volta da pressão atmosférica aquando da passagem de uma onda sonora (Fig. 2.3). No entanto, à exceção da gravidade, se não houver outra força que suscite o movimento no pêndulo, este pára na sua posição original. O mesmo acontece com as partículas, se não houver vibração por parte da fonte sonora, as partículas tendem a entrar em repouso voltando à sua posição original.

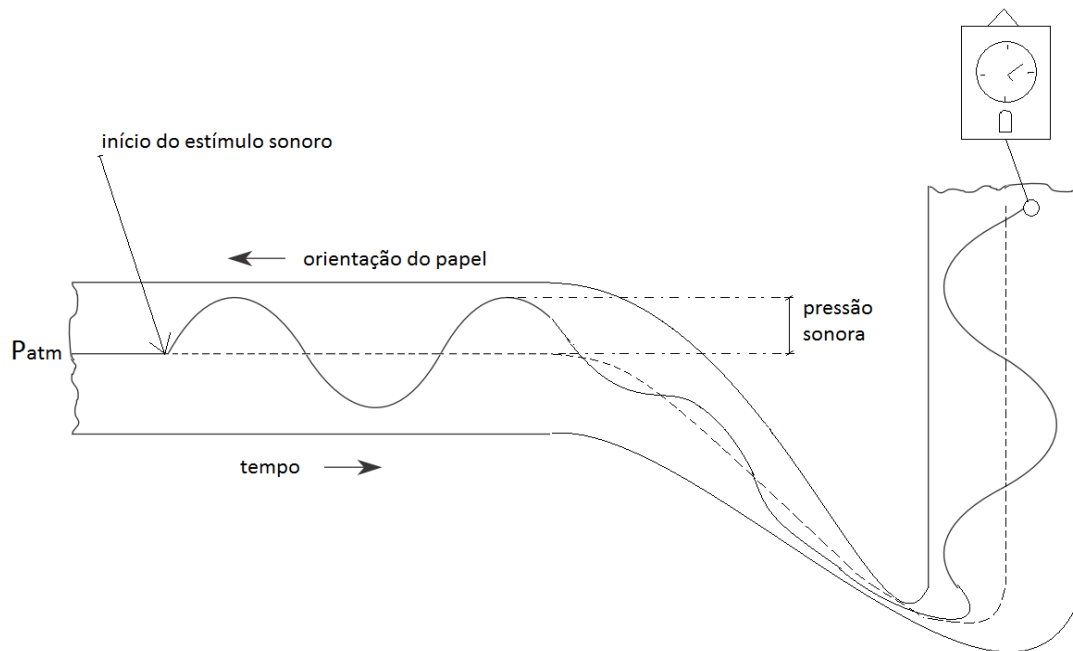


Fig. 2.3 – Analogia entre a variação de pressão numa partícula no ar e o movimento harmónico dum relógio de pêndulo

Essa alternância de pressão é função da diferença entre a pressão atingida e a pressão atmosférica normal que é tida como referência (≈ 101.325 Pa), ou seja, quanto maior o desfasamento entre a pressão atmosférica, maior será a pressão sonora. Assim, pode-se averiguar que na caracterização de um som, é essencial avaliar a variação da pressão de maneira a aferir a sua intensidade.

Contudo, se o meio de propagação for homogêneo, em repouso, isotrópico e sem viscosidade, por exemplo o ar, as ondas sonoras têm uma velocidade c (celeridade) constante. Nesse caso, o valor de c respeita a equação 2.1, válida para ar seco e ao nível do mar [6].

$$c = 20,045\sqrt{273,15 + \theta} \quad (\text{m/s}) \quad (2.1)$$

em que θ é a temperatura em $^{\circ}\text{C}$ do meio onde a onda sonora se transmite (ar)

Em complemento à pressão, o som também pode ser caracterizado através da potência sonora e da intensidade sonora. A potência sonora é específica da fonte sonora e não do estímulo provocado num determinado ponto e é caracterizada como a energia total que atravessa por segundo uma qualquer esfera concêntrica e fictícia de raio qualquer centrada no foco. Em suma, a potência sonora não depende da distância mas sim da potência do elemento emissor. Porém, outro parâmetro que ajuda a caracterizar a fonte sonora é a intensidade sonora, definida como a quantidade média de energia que atravessa perpendicularmente uma área de 1 m^2 num segundo. Com esta grandeza é possível avaliar a direccionalidade do som e complementar a informação quantitativa fornecida pela pressão sonora [6].

A equação 2.2 demonstra a relação que existe entre a pressão sonora, a potência sonora e a intensidade sonora.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.2)$$

onde I é a intensidade em W/m^2 , W é a potência sonora em W , r é a distância desde o ponto em estudo até à fonte sonora em m , p é a pressão sonora em Pa , ρ é a massa volúmica em kg/m^3 e c é a celeridade em m/s . É de notar que por simplificação $\rho \cdot c \cong 400 \text{ N.s/m}^3$ [6]. Pela equação 2.2 e figura 2.4 verifica-se que ao duplicar a distância, a intensidade diminui para um quarto. Segundo a teoria, este facto pode ser explicado à luz da propagação sonora, tendo em conta que a energia que atravessa uma certa superfície da onda sonora é constante em todo o seu trajeto, independentemente da sua distância à fonte. Quando a distância à fonte aumenta, a superfície da onda aumenta e como a quantidade de energia é a mesma, a intensidade diminui pois tem-se a mesma energia distribuída numa maior área (Fig. 2.4), relacionando-se a intensidade sonora inversamente proporcional com a distância [8].

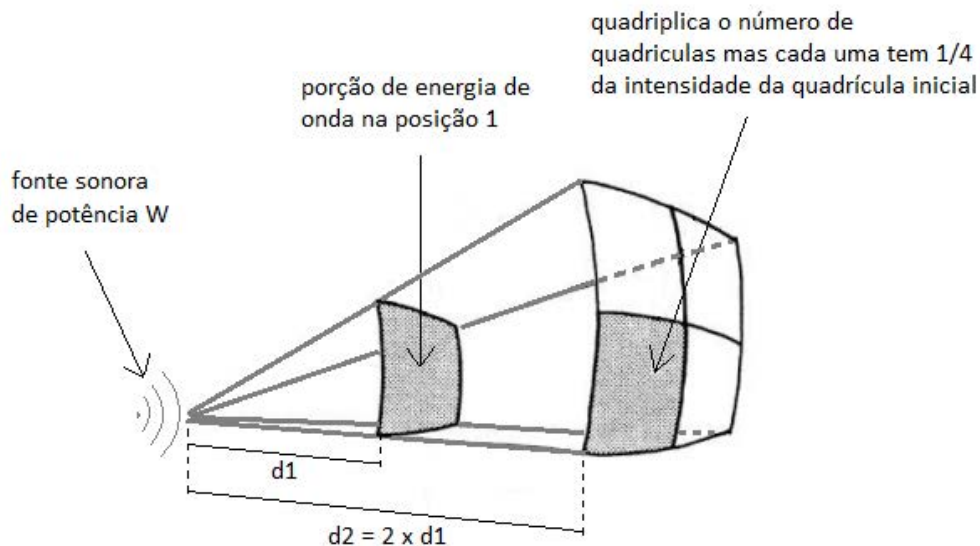


Fig. 2.4 – Representação esquemática da perda de intensidade sonora em função da distância à fonte [adaptado de 12]

Apesar do som ser capaz de transportar energia através da vibração das partículas do meio em que propaga, quando se consideram condições reais de irradiação da energia sonora, a propagação deixa de ser infinita e perfeita uma vez que ocorrem desvios por força da dissipação/absorção da energia. Esses desvios são derivados da viscosidade do meio (significativo no domínio das altas frequências), da condução calorífica, da absorção molecular provocada por fenómenos de relaxação, da não homogeneidade do meio e da possível presença de obstáculos.

O som audível para o ser humano vai desde o limiar da audição (10^{-5} Pa) até ao limiar da dor (10^2 Pa), segundo a escala linear de pressões, compreendendo uma gama de audibilidade de 10^7 pascal. Porém é usual caracterizar a grandeza dum som usando uma escala logarítmica ao invés de uma escala linear de pressões pois a linearidade dos valores de pressão, em pascal (Pa), dá uma noção muito dispar e pouco prática dos resultados ao que acresce ainda o facto de o ouvido humano reagir aproximadamente de forma logarítmica ao estímulo sonoro. Por isso, é vulgar exprimir o som através duma escala

logarítmica, o decibel (dB). O mesmo se verifica para a intensidade sonora e para a potência sonora, onde estas grandezas passam a ser definidas como o logaritmo da razão entre a quantidade em estudo e uma quantidade de referência. No caso da pressão sonora, o uso da escala logarítmica leva a uma mudança de parâmetro, deixando de se chamar Pressão Sonora (p), em pascal, e passando a nomenciar-se Nível de Pressão Sonora (L_p), em decibel, correspondente ao termo inglês *Sound Pressure Level* (SPL) [6]. No quadro 2.1 são expostas as expressões que convertem esses parâmetros em níveis, assim como os respectivos valores base de referência.

Quadro 2.1 – Parâmetros fundamentais sonoros e suas expressões [Adaptado de 6]

Parâmetro	Expressão (dB)	Valor de referência
Nível de Pressão Sonora	$L_p = 10 \log_{10} (p^2/p_0^2)$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
Nível de Intensidade Sonora	$L_I = 10 \log_{10} (I/I_0)$	$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
Nível de Potência Sonora	$L_W = 10 \log_{10} (W/W_0)$	$W_0 = 10^{-12} \text{ W}$

O nível de pressão sonora (L_p) e a pressão sonora (p) são relacionáveis entre si através da primeira equação do quadro 2.1, sendo evidenciada na figura 2.5 a relação entre estes dois parâmetros para alguns sons. É de salientar que, quando o nível de pressão sonora é igual a zero, não há ausência de som, há sim uma propagação de um som que corresponde ao limiar da audição e, mesmo que o nível seja menor que zero (mas número real), continua a haver propagação do som, só que desta vez fora do domínio audível humano [13].

Diagrama de conversão de Pressão Sonora [Pa] em Nível de Pressão Sonora [dB]

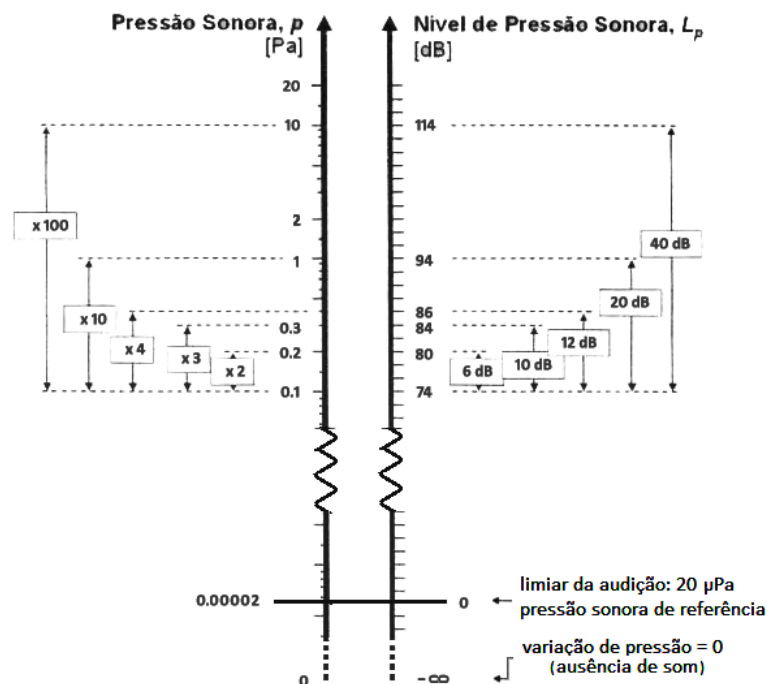


Fig. 2.5 - Diagrama de conversão de Pressão Sonora [Pa] em Nível de Pressão Sonora [dB] [Adaptado de 9, 14]

2.1.1.4. Frequência Sonora

Como uma das características mais importantes para descrever um estímulo sonoro, a frequência qualifica um som e ajuda a indicar o tipo de “família de frequências” a que esse som pertence. Este parâmetro não é nada mais do que o número de ciclos completos de uma onda num segundo e expressa-se em hertz (Hz), sendo também indicada como o número de ciclos por segundo. Por isso, uma onda que complete o maior número de ciclos possível num segundo, terá uma alta frequência. Muitas vezes o que diferencia uma fonte sonora de outra são as frequências que emitem dado que estas funcionam como termo identificativo dos imensos tipos de frequências existentes no espectro frequencial [6].

Considerando que o som se propaga através de ondas harmônicas, pode-se descrevê-lo através do seu período (frequência), do seu comprimento de onda e da sua amplitude num gráfico pressão vs. tempo, representando-se num oscilograma (A1 e B1 - Fig. 2.6). Porém também pode ser definido num espectrograma em que se representa o nível de pressão sonora em função da frequência (A2 e B2 – Fig. 2.6). Através da análise dos oscilogramas e espectrogramas da figura 2.6 pode-se verificar a diferença entre um som puro e um som complexo. O som puro ou simples é aquele que está associado a uma única frequência e tem um oscilograma sinusoidal perfeito (A1). Similarmente, o som composto ou complexo está relacionado com mais do que uma frequência (C), apresentando um oscilograma não harmônico (D1). O espectrograma D2 é a soma dos espectrogramas A2 e B2.

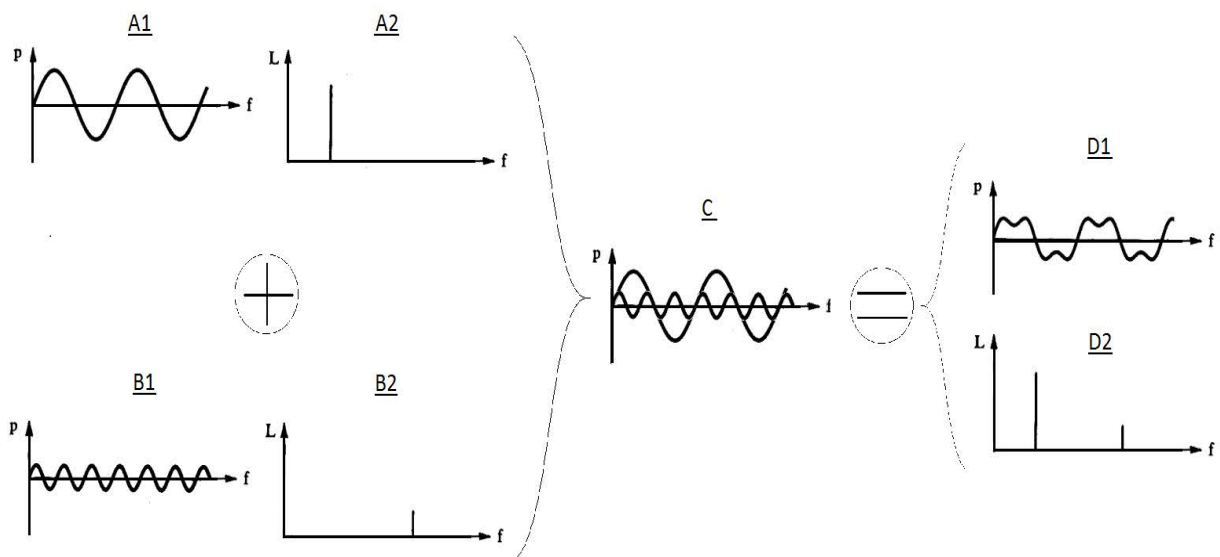


Fig. 2.6 – Soma de dois sons puros (esquerda) num som composto (direita) [adaptado de 6]

Das imensas frequências existentes, o ouvido humano jovem apenas tem a capacidade de reagir a uma ampla gama de frequências compreendidas entre os 20 Hz e os 20 kHz. No entanto, por processos biológicos naturais, o limite superior da audição humana decresce com a idade, podendo chegar a atingir apenas 4 kHz, diminuindo a gama de audição. Essa gama de frequências pode ser subdividida em três grupos gerais: as baixas frequências – 20 aos 355 Hz, as médias frequências – 355 Hz aos 1,41 kHz, e as altas frequências – 1,41 aos 20 kHz [7].

Dado o grande leque de frequências audíveis, geralmente são agrupadas em bandas de dimensões normalizadas de larguras bem definidas. Existem bandas de várias larguras, 1/1 oitava, 1/3 oitava, 1/12 oitava, 1/24 oitava, etc., no entanto as mais utilizadas são as duas primeiras. Uma oitava é uma banda de frequência em que a frequência limite superior, f_1 (equação 2.3), é aproximadamente o dobro da frequência limite inferior, f_2 (equação 2.4). Para uma análise mais detalhada, é habitual dividir o intervalo de uma oitava em três intervalos de 1/3 de oitava, porém a relação entre as frequências limites das suas bandas não é tão evidente, sendo essa relação de $2^{1/3} \approx 1,26$. As seguintes expressões possibilitam a determinação exata das frequências limites f_1 e f_2 para qualquer largura de banda [1, 6].

$$f_1 = f_0 \cdot 2^{-K/2} \text{ (Hz)} \quad (2.3)$$

e

$$f_2 = f_0 \cdot 2^{K/2} \text{ (Hz)} \quad (2.4)$$

Nas expressões anteriores, f_0 representa a frequência central da banda e K recebe o valor de 1 ou de 1/3, se as bandas em questão forem de 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava. Dentro da gama audível pelo ouvido humano, as bandas de 1/1 oitava estão centradas nas frequências 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz, enquanto as bandas de 1/3 de oitava estão centralizadas nas bandas 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1.25k, 1.6k, 2k, 2.5k, 3,15k, 4k, 5k, 6.3k, 8k, 10k, 16k e 20 kHz [6]. Todas as frequências centrais assim como os seus limites superior e inferior encontram-se normalizados internacionalmente, servindo de base para os estudos de frequência em questão [15].

Com o intuito de obter resultados mais pormenorizados em laboratório, geralmente as medições são realizadas em bandas de 1/3 de oitava, em que na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão é usual usar uma gama de frequências entre os 100 Hz e os 3150 Hz. Apesar da diferença da largura entre as oitavas, é possível converter níveis de pressão sonora de bandas de 1/3 de oitava para 1/1 oitava. Para isso basta fazer uma soma logarítmica dos três níveis de pressão sonora das bandas de frequência de 1/3 de oitava que fazem parte da frequência de uma oitava, obtendo assim o valor do nível de pressão sonora daquela banda de oitava.

2.1.1.5. Curvas de ponderação

A resposta do ouvido humano não é igual para todas as frequências uma vez que o sistema auditivo é mais sensível às altas frequências do que às baixas. Este facto é explicável à luz da evolução humana, uma vez que desde os primórdios da humanidade, o Homem desenvolveu o seu sistema auditivo de maneira a estar mais alerta aos sons agudos dos seus predadores, e mais atualmente, no sentido de aumentar a percepção a subtis variações nas consoantes (altas frequências), levando ao desenvolvimento de uma complexa oralidade [13]. Dado que os dispositivos de captação e medição das variações de pressão, os sonómetros, não têm essa capacidade de perceber o estímulo sonoro como o ouvido humano, é frequente usar filtros que não são mais que curvas de ponderação a introduzir nos aparelhos de medição que imitam a sensibilidade do ouvido humano consoante a frequência.

De entre os vários filtros existentes, o filtro A é o mais usual, tendo como função encurtar as diferenças entre os resultados dos equipamentos de medição e a percepção humana dos estímulos sonoros. Existem outros filtros, porém, a versatilidade do filtro A levou ao uso generalizado deste tipo

de filtro. Quando seja necessário tirar proveito da curva de ponderação tipo A, é necessário que os seus valores por banda de frequência sejam somados algebricamente aos valores do nível de pressão sonora medidos, de maneira a obter resultados devidamente ponderados. Após essa ponderação, os resultados medidos passam de Níveis de Pressão Sonora a Níveis Sonoros, com a designação unitária de dB(A) [6]. No quadro 2.2 estão expostos os valores da curva de ponderação do filtro A, na gama do audível humano, para as bandas de 1/1 oitava e 1/3 oitava.

Quadro 2.2 – Valores da ponderação do filtro A, na gama do audível, para as bandas de frequência de 1/3 de oitava e 1/1 oitava [6]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação para 1/3 oitava (dB)	Ponderação para 1/1 oitava (dB)	Banda de frequência (Hz)	Ponderação para 1/3 oitava (dB)	Ponderação para 1/1 oitava (dB)
25	-44,7		800	-0,8	
31	-39,4	-40	1.000	0	0
40	-34,6		1.250	0,6	
50	-30,2		1.600	1,0	
63	-26,2	-26	2.000	1,2	+1
80	-22,5		2.500	1,3	
100	-19,1		3.150	1,2	
125	-16,1	-15,5	4.000	1,0	+1
160	-13,4		5.000	0,5	
200	-10,9		6.300	-0,1	
250	-8,6	-8,5	8.000	-1,1	-1
315	-6,6		10.000	-2,5	
400	-4,8		12.500	-4,3	
500	-3,2	-3	16.000	-6,6	-7
630	-1,9		20.000	-9,3	

Após a análise geral dos conceitos fundamentais da geração e difusão do som, assim como o relacionamento do Homem com o meio sonoro, é importante entender o comportamento do som no ambiente onde o ser humano desempenha as suas atividades e o ruído se pode tornar incomodativo.

2.1.2. ABSORÇÃO SONORA

2.1.2.1. Definição

Desde há muito tempo que se apreendeu que existem superfícies que fazem diminuir mais a intensidade do som do que outras, como é o caso das casas onde as paredes interiores estanhadas aparentam um aumento da intensidade sonora e após as demãos de pintura diminuem essa intensidade resultado fundamentado devido à diferente absorção sonora dos vários materiais. A absorção sonora é uma característica de determinados materiais que lhes permite dissipar uma parte da energia que sobre eles incide através da conversão dessa noutro tipo de energia. Essa absorção é quantificável graças ao

coeficiente de absorção sonora, α , que representa a relação entre a energia absorvida e a energia incidente [6]. Além desta caracterização, a absorção sonora pode ainda ser definida através da área de absorção sonora equivalente, A , expressa em m^2 , que representa o produto do coeficiente de absorção sonora do material com a área de superfície desse mesmo material. Essa área equivalente corresponde à área de um material perfeitamente absorvente que seria necessário existir naquele espaço para equivaler à mesma absorção que o material em estudo [16]. Este parâmetro é usado na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado, servindo como forma de uniformizar os ensaios à mesma área de absorção sonora equivalente.

2.1.2.2. Determinação da absorção sonora

A determinação do coeficiente de absorção sonora é praticável através do uso de alguns métodos, no entanto os dois mais importantes e utilizados são o método do tubo de ondas estacionárias e o método da câmara reverberante. O primeiro método consiste num tubo longo metálico de pequenas dimensões que permite determinar o coeficiente de absorção sonora de incidência normal à amostra. Tem a vantagem de permitir aferir o α necessitando apenas de pequenas amostras, contudo esse valor diz respeito unicamente a ondas incidentes perpendiculares, tornando-se um método limitativo. Em contrapartida, o método da câmara reverberante permite determinar diretamente o coeficiente de absorção sonora para uma incidência difusa, tornando-se mais eficaz e mais próximo da realidade do que o método do tubo de ondas estacionárias que apenas permite uma incidência perpendicular [6].

O revestimento das superfícies internas de um compartimento com um material de coeficiente de absorção sonora maior do que aquele que existe nas superfícies originais, torna o som aí produzido mais “abafado”, diminuindo a sua permanência dentro desse espaço. Por isso, para caracterizar a absorção sonora de qualquer ambiente, é estudada a sua área de absorção sonora equivalente, A , gerando um impulso sonoro nesse espaço e contabilizando o seu tempo de “permanência”, o tempo de reverberação.

2.1.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

2.1.3.1. Conceito

Quando uma fonte sonora produz um som dentro de um espaço fechado, o que atinge o ouvido humano é uma série de ondas diretas e refletidas que se propagam dentro desse espaço. Cessada a produção sonora, o ouvinte sente o som escapar-se, deixando durante um curto período de tempo um rasto de som pelo compartimento, fruto das inúmeras ondas refletidas que percorrem o espaço do compartimento, dando a sensação que o som permanece nesse ambiente. Devido à absorção sonora do ar e à múltipla incidência das ondas sonoras nas superfícies absorventes desse espaço, o impulso sonoro vai perdendo energia a cada reflexão sonora, deixando posteriormente de ser audível pelo recetor. A este curto período de tempo entre o fim da emissão do som e o instante em que se extingue o rasto sonoro das múltiplas reflexões sonoras, dá-se o nome de tempo de reverberação, que além de criar a sensação de permanência do som nesse espaço, também influencia o nível de pressão sonora do ambiente, aumentando-o pela sobreposição das ondas sonoras aí refletidas.

O tempo de reverberação, que é uma das características acústicas mais utilizadas e mais importantes na quantificação dum ambiente, é o tempo que a energia de um campo sonoro reverberante estacionário leva a decair 60 dB após a extinção da fonte sonora, expresso em segundos [1], ou seja, é o tempo que a intensidade sonora demora a diminuir para 1 milionésimo ($10 \log 1.000.000 = 60 \text{ dB}$) [6]. No entanto, raramente as condições práticas permitem medir um decaimento de 60 dB, já que

sobreposição do ruído de fundo faz com que a extinção do som emitido não chegue a variar os 60 dB, sendo para isso necessário emitir um som de uma intensidade desaconselhável que cubra este ruído de fundo. Dado este facto, é usual obter apenas um decaimento de 30 dB, ou mesmo 20 dB, devido à sua versatilidade e simplicidade, e extrapolar para o tempo de reverberação de decaimento de 60 dB, T ou T_{60} , obtendo assim um tempo de reverberação T_{30} e T_{20} associado à extrapolação do decaimento de 20 ou 30 dB (Fig. 2.7). Esta metodologia só é possível graças à linearidade do decaimento de um meio difuso, o que torna relacionáveis os valores dos decaimentos T_{20} , T_{30} e T . Com este parâmetro é possível quantificar o rasto de som próprio dum compartimento e quantificar a reverberação do seu espaço sonoro [1, 6].

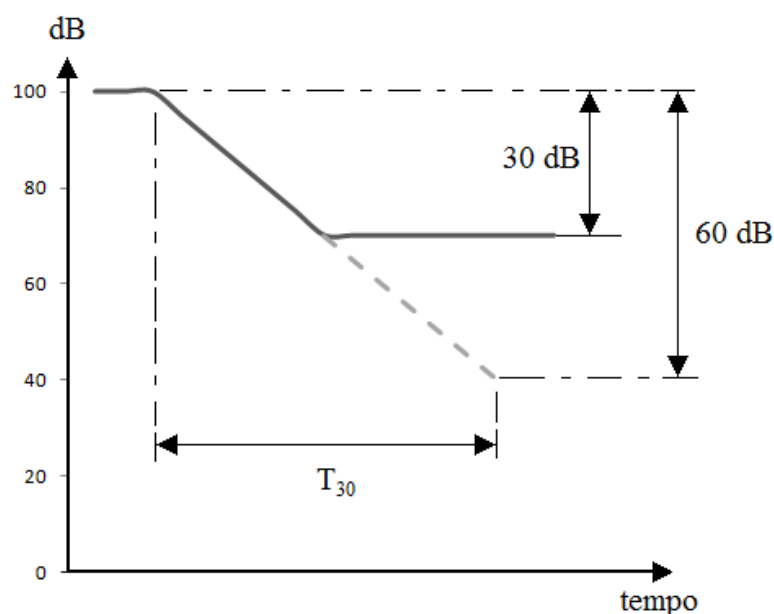


Fig. 2.7 – Definição do Tempo de Reverberação T através de extrapolação

Na determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado em laboratório, é importante saber o tempo de reverberação do compartimento recetor de maneira a avaliar a influência desse espaço na captação dos níveis de pressão sonora. Para que os resultados possam ser normalizados, a área de absorção sonora equivalente desse compartimento (A) é obtida através da aplicação da *Fórmula de Sabine* (equação 2.6) ao tempo de reverberação medido, para que assim lhe possa ser admitida uma ponderação relativa à área de absorção sonora equivalente de referência (A_0). Assim torna-se essencial a medição do tempo de reverberação no processo de avaliação do isolamento sonoro a ruídos de percussão.

2.1.3.2. Fórmulas de previsão

A noção de que cada espaço tem um tempo característico desde o instante em que se cessa um fonte sonora até desaparecer o seu som foi inicialmente introduzida pelo físico americano Wallace Clement Sabine, que após ter descoberto que melhorava a oralidade de uma sala de aula com problemas de inteligibilidade da palavra através da colocação de almofadas de assentos de bancos como revestimento das paredes [12], conseguiu desenvolver uma importante expressão na área da Acústica,

a *Fórmula de Sabine* (equação 2.5) [6], demonstrando que o tempo de reverberação é relacionável com o volume, a temperatura (celeridade) e a absorção sonora equivalente dum dado compartimento em questão, permitindo o cálculo rigoroso do seu valor [1, 6].

$$T = \left(\frac{24 \cdot \ln 10}{c} \right) \cdot \frac{V}{A} \quad (\text{s}) \quad (2.5)$$

onde V é o volume do compartimento (m^3), c é a celeridade em função da temperatura (equação 2.1), em m/s , e $A = \sum_{i=1}^n (S_i \cdot \alpha_i)$ é a área de absorção sonora equivalente do compartimento. Considerando temperaturas correntes (15 a 25 °C) é possível obter o valor de c e obter a equação 2.6 que é uma simplificação da equação 2.5.

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A} \quad (\text{s}) \quad (2.6)$$

Contudo, esta equação sofre algumas limitações dado que não se aplica a todos os tipos de espaços, sendo apenas enunciada para ambientes reverberantes com campos sonoros difusos e com um valor médio do coeficiente de absorção sonora inferior a 0,2, apresentando nestas condições valores muito próximos da realidade [6]. Como as câmaras reverberantes dos laboratórios de Acústica têm α baixos, esta formulação é uma grande ferramenta para avaliar a área de absorção sonora equivalente (A) da câmara reverberante recetora aquando de ensaios laboratoriais.

Posteriormente, outros autores desenvolveram novas expressões para determinação do tempo de reverberação através da *Fórmula de Sabine*, mas com outras potencialidades. Como exemplo disso: Carl Eyring, que desenvolveu uma equação que permite obter valores mais próximos da realidade para situações em que todas as superfícies do compartimento em estudo tenham coeficientes de absorção sonora idênticos, Millington-Sette, enunciando uma formulação adequada a situações em que fossem evidentes as diferenças entre os coeficientes de absorção das várias superfícies, Kuttruf através da sua dedução em função da geometria do espaço, entre outros [6]. Porém, de todas as teorias desenvolvidas no âmbito do tempo de reverberação, a equação 2.6 é aquela que ganhou maior importância no campo da Acústica, especialmente no campo da análise laboratorial.

No entanto, a aplicabilidade desta expressão é limitada, não podendo ser usada em espaços amplos uma vez que não contempla dois aspetos importantes: a absorção localizada, como é o caso de mesas, cadeiras e pessoas, que provocam uma determinada área de absorção sonora, e a absorção sonora do ar em função da humidade relativa, embora seja desprezável para frequências inferiores a 1 kHz. Assim, adaptando a equação 2.6 aos efeitos anteriormente mencionados, obtém-se a expressão 2.7, resultado da sistematização da *Fórmula de Sabine* para o cálculo genérico do tempo de reverberação [1, 6].

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^m A_j + m \cdot V} \quad (\text{s}) \quad (2.7)$$

em que A_j é a absorção sonora localizada j , em m^2 , e m é a absorção sonora relativa do ar, em m^{-1} .

2.1.3.3. Meios de medição

Para avaliar o tempo de reverberação é fundamental que a fonte sonora tenha uma potência elevada para induzir um decaimento suficientemente perceptível, mesmo com a influência do ruído de fundo. Para produzir um som com intensidade adequada à medição do tempo de reverberação, existem dois métodos básicos: o uso de ruídos instantâneos, tais como um tiro seco de revólver, um estouro de um balão ou mesmo pequenos canhões (para grandes espaços) e o uso de ruídos contínuos, tais como impulsos de banda estreita ou de espectro largo (ruído rosa ou ruído branco), através de altifalantes ou faíscas elétricas, que são interrompidos subitamente [6, 17]. No entanto, de entre os equipamentos enunciados, os mais usados na determinação do tempo de reverberação são os altifalantes, emitindo uma certa banda de frequência ou emitindo todo o espectro (ruído branco ou rosa), e as pistolas de pólvora seca [17].

2.2. ISOLAMENTO SONORO

2.2.1. CARACTERIZAÇÃO

Uma das formas de controlar a propagação do ruído em edifícios é através do isolamento acústico das fronteiras do ambiente em causa. O isolamento sonoro tem como objetivo o tratamento da envolvente de um compartimento, com o intuito de diminuir a propagação de sons desse compartimento para outros contíguos e vice-versa, ou até mesmo sons vindos do exterior [6]. Existem dois tipos distintos, o isolamento sonoro a:

- Ruídos de percussão – quando há solicitação mecânica aplicada diretamente sobre superfícies rígidas ou mais densas que o ar, deslocando-se por essas superfícies e parcialmente pelo ar;
- Ruídos de condução aérea – com origem numa fonte sonora que irradia energia no espaço, produzindo a vibração do meio elástico.

A maioria das fontes produz tanto ruído aéreo como ruído de percussão, mas de entre estes dois ruídos o que tem maior taxa de propagação ao longo da estrutura de um edifício é o ruído de percussão, uma vez que a estrutura do edifício responde à solicitação mecânica como uma “via rápida” de transmissão sonora, onde as superfícies dos compartimentos recetores irradiam o ruído como resultado da propagação das ondas de vibração [2, 6, 18].

O ruído de percussão nas habitações mais frequente é provocado por solicitações verticais, sendo as solicitações horizontais atuantes nas paredes, de pouco interesse de tratamento. É por este motivo que o ruído mais perturbador, o ruído de percussão em elementos horizontais, deve ser tratado através de medidas construtivas adequadas que visem a absorção das ondas de vibração criadas pelo impacto [8].

Os mesmos ruídos podem subdividir-se em duas formas de transmissão:

- Via Direta – propagação da energia sonora pelo elemento separador de compartimentação entre espaços adjacentes ou até mesmo entre o interior e o exterior e vice-versa;
- Via Marginal – propagação da energia sonora, que não é radiada diretamente pelo elemento separador de compartimentação, através de outros elementos circundantes a esse elemento separador.

A quantificação da transmissão do ruído de percussão por estas duas vias é um assunto de alguma complexidade, porém, é possível simplificá-la graças à utilização de modelos teóricos que se baseiam nas propriedades acústicas dos constituintes de cada elemento [12]. De entre as duas vias, a transmissão marginal é a mais difícil de quantificar uma vez que varia em função do método

construtivo das junções, quer estruturais quer não estruturais, e das relações entre as massas superficiais dos elementos de compartimentação [8]. Apesar deste tipo de transmissão ter uma pequena influência no isolamento sonoro entre dois ambientes distintos, o caso torna-se mais gravoso quando existem junções de elementos horizontais pesados com elementos verticais leves, onde as frentes de onda que atingem o elemento horizontal pesado não têm grande intensidade para fazer vibrar perfeitamente o elemento, acabando por se propagar até aos elementos verticais leves que difundem o ruído até aos ambientes vizinhos [8, 19].

Na figura 2.8 estão esquematizadas tais variações da transmissão marginal em função da massa superficial dos elementos vertical e horizontal, onde L_d representa qualitativamente a transmissão que ocorre por via direta e L_f a transmissão de se processa por via marginal (*flanking*).

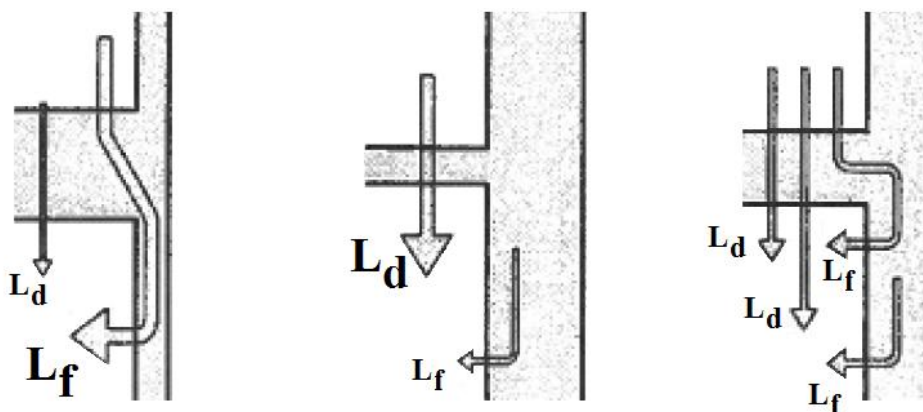


Fig. 2.8 – Representação esquemática da influência da transmissão sonora em função das características do elemento separador entre compartimentos (L_d – transmissão direta, L_f – transmissão marginal) [Adaptado de 8]

É de salientar que, numa conjugação de um elemento horizontal com um elemento vertical, o aumento do isolamento sonoro de um dos elementos não faz com que o ruído, que antes se propagava por esse elemento, passe a transmitir-se pelo outro. O que acontece é que quando se aumenta o isolamento sonoro de um elemento, ocorre uma maior dissipação da energia nesse componente, sendo assim menor a quantidade de energia transmitida por esse elemento em relação à energia que o outro elemento propaga.

2.2.2. RUÍDO DE PERCUSSÃO

O ruído de percussão gerado num pavimento é originado por impactos ou excitações dinâmicas de natureza diversificada, fazendo com que o próprio pavimento vibre e produza ruído dentro de um amplo intervalo de frequências, dissipando parte da energia através do seu amortecimento e transferindo outra parte para os outros elementos rigidamente conectados. Normalmente o impacto é resultado de um estímulo de curta duração, repetitivo mas não periódico. Exemplo disso é o caso de pessoas a caminhar, dançar ou pular sobre o pavimento, queda de objetos, arrastar móveis, etc. As vibrações periódicas são normalmente produzidas por máquinas e equipamentos de movimento rotativo, como máquinas de lavar, ar condicionado, etc., sendo para isso necessário que estes equipamentos sejam instalados sobre materiais especiais, molas ou elastómetros. Além da excitação do piso, o ruído de percussão também provoca a vibração das superfícies que comunicam com o

pavimento através da propagação das ondas mecânicas pelo meio sólido circundante, funcionando assim como amplificadores do ruído de percussão [18].

Este tipo de ruído depende das características do objeto causativo do impacto e das características do sistema de piso. Se a rigidez da superfície do elemento horizontal e do objeto que cai sobre ele for alta, o ruído resultante será significativamente predominante nas altas frequências e de curta duração. Se o objeto e o piso forem constituídos por um material menos rígido, o ruído produzido será reduzido, sendo apenas um pouco mais prolongado [18].

O ruído de percussão pode ser uma fonte de reclamações entre vizinhos de edifícios multifamiliares, especialmente em construções leves, onde o incômodo pode ser bastante preocupante. No entanto, os efeitos da excitação dinâmica do piso não se limitam apenas ao ambiente inferior que partilha o mesmo elemento separador. Um bom exemplo disso é o caso dos ginásios com aeróbica que contribuem significativamente para uma maior propagação da vibração por todos os elementos estruturais, chegando a produzir vibrações que podem ser sentidas a 30 m de distância no plano horizontal da estrutura e a 10 pisos de distância [12].

Ao contrário do ruído aéreo, onde a medição do isolamento sonoro do elemento separador entre dois espaços limita-se à diferença entre os níveis de pressão sonora do espaço emissor e do espaço recetor, na medição do ruído de percussão tal metodologia não pode ser adotada uma vez que só existe uma pequena relação dentro de uma estreita gama de frequências, entre o ruído produzido no espaço emissor e o ruído alcançado no espaço recetor [6, 8].

A avaliação do isolamento sonoro a ruídos de percussão de um elemento horizontal pode ser realizada de duas maneiras: medição laboratorial, sem a presença da contribuição das transmissões marginais, e medição *in situ*, considerando a presença do efeito das transmissões marginais. Qualquer uma das avaliações baseia-se num ensaio de percussão que consiste na utilização de uma máquina de impactos normalizada que, tal como uma fonte sonora, produz um estímulo sonoro através do impacto de percussão (Fig. 2.9). Esta máquina não é mais que um sistema mecanizado que deixa cair alternadamente pequenos martelos de uma altura padrão, com uma certa periodicidade no pavimento em estudo, provocando um ruído, característico desse piso, que é medido no compartimento inferior [6].

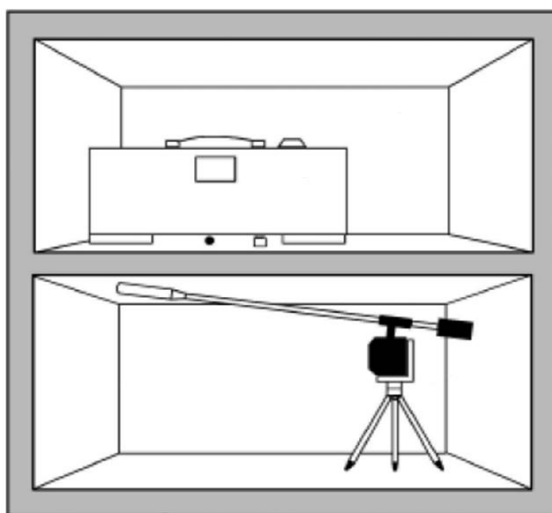


Fig. 2.9 – Esquema do ensaio de caracterização do isolamento sonoro a ruído de percussão com máquina de impactos normalizada [20]

2.2.3. ONDAS EM MEIO SÓLIDO

Como as ondas sonoras originadas pelo ruído de percussão têm uma alta taxa de difusão no meio sólido, é de extrema importância perceber o seu comportamento nesse meio aquando do choque resultante da ação entre um corpo e o piso, para que assim se possam adotar soluções que diminuam a sua propagação.

Embora a abordagem do comportamento das ondas em meio sólido se enquadre no âmbito de desenvolvimentos físicos e matemáticos complexos que ultrapassam o âmbito deste trabalho, é feita uma breve referência aos conceitos mais importantes deste tema.

Quando se tenta perceber o comportamento das ondas em meio sólido, admite-se que a propagação da onda respeita um comportamento laminar passível de ser estudada sob a forma bidimensional, envolvendo apenas as variações ocorridas nas duas direções ortogonais. Na Acústica de Edifícios, os elementos laminares que mais interessam são aqueles que permitem a compartimentação de espaços individualizados, ou seja, as paredes e os pavimentos que confinam cada compartimento. Dos vários tipos de propagações das ondas sonoras (longitudinais, quasi-longitudinais, transversais, flexão, *Rayleigh*, *Love*), as que mais contribuem para a transmissão da energia sonora entre compartimentos são as ondas de flexão, devido à sua grande capacidade de irradiação sonora [8]. Apesar das ondas sonoras em meio gasoso terem apenas uma propagação longitudinal devido à inaptidão deste meio em suportar comportamentos de cisalhamento ou de flexão, quando as mesmas ondas são propagadas num meio sólido, existe um embricamento das suas partículas que lhes permite um maior leque de movimentos [12]. Este tipo de propagação tem um carácter híbrido entre as ondas longitudinais e as ondas transversais, dado que assume um comportamento variado entre a coincidência e a perpendicularidade das direções de propagação e das direções de vibração das partículas (Fig. 2.10).

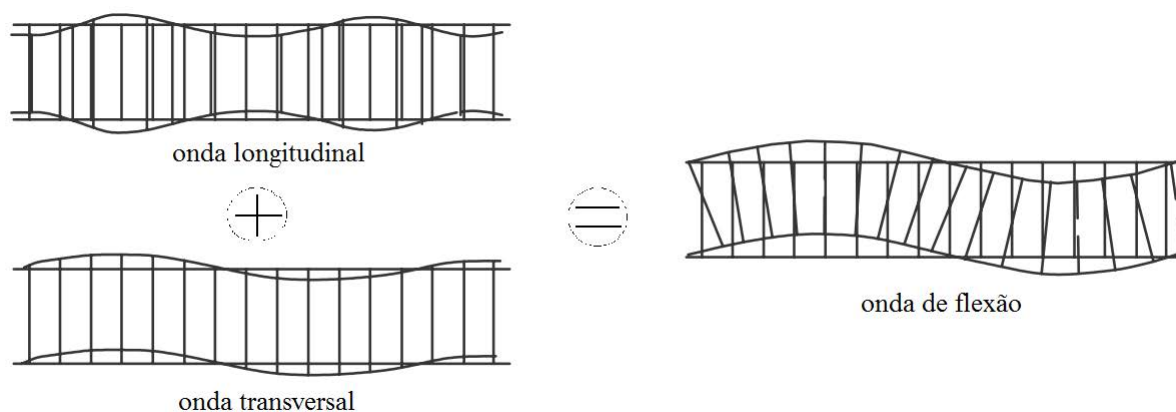


Fig. 2.10 – Composição de uma onda de flexão e sua configuração da propagação [8]

A velocidade de uma onda de flexão (c_b) pode ser alcançada através do conhecimento da sua frequência angular (ω), da rigidez do elemento plano de propagação (D) e da sua massa superficial (m'), segundo a equação 2.8 [8].

$$c_b = \omega^{1/2} \cdot (D/m')^{1/4} \quad (2.8)$$

Assim, a velocidade de propagação de uma onda de vibração em meio sólido pode chegar a ser 10 vezes maior que a velocidade num meio gasoso como o ar, sendo na madeira 11 vezes maior e no aço 15 vezes ([21] citado em [18]).

Como o ruído de percussão tem origem no meio sólido, meio com uma alta taxa de difusão sonora, para impedir a propagação da vibração é necessário separar o elemento em dois, passando a ser bloqueada a transmissão da onda de vibração e acabando esta por se refletir inúmeras vezes no elemento percutido até a onda cessar. Como na construção tal caso é impossível de se realizar, devido à necessidade de apoios estruturais entre os elementos, a única hipótese de impedir tal propagação é através da inclusão de material resiliente no caminho de difusão. Apesar dos elementos comunicarem entre si e da energia sonora transmitir-se através do material resiliente, a fração de potência acústica que se propaga é inferior àquela que se transmitiria sem a inserção do material resiliente (Fig. 2.11). Essa diminuição da transmissão sonora é possível graças às propriedades elásticas do material resiliente que lhe permite absorver grande parte da energia mecânica [18].

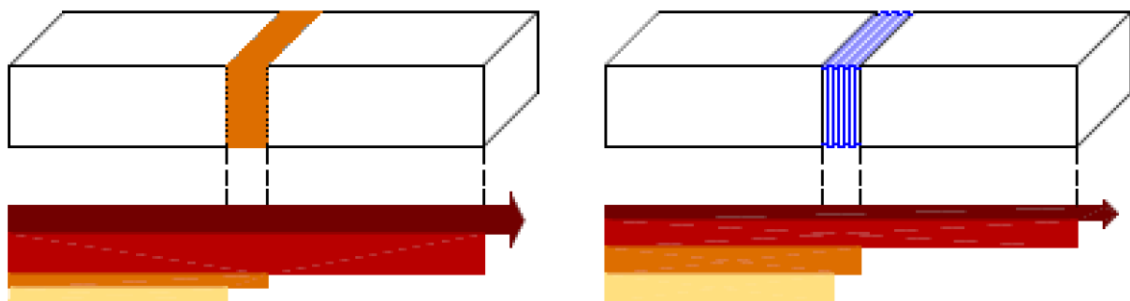


Fig. 2.11 – Influência da elasticidade do material resiliente na atenuação da propagação: material rígido (esquerda) e material elástico (direita) ([22] citado em [23])

No entanto, os recursos despendidos na diminuição da transmissão do ruído de percussão podem ser postos em risco caso exista um caminho alternativo ao material resiliente, uma “ponte acústica” (Fig. 2.12). Assim, na presença de uma ligação rígida, a onda de vibração que não se conseguiu propagar pelo material resiliente, encontra um caminho alternativo que lhe permite difundir a maior parte da energia, eliminando a eficácia do material resiliente ([22] citado em [18]).



Fig. 2.12 – Comportamento de uma ponte acústica entre dois elementos rígidos, “inserida” num material de características elásticas ([Adaptado de 22] citado em [18])

2.2.4. MITIGAÇÃO DO RUÍDO DE PERCUSSÃO

Para controlar a transmissão do ruído de percussão, existe uma diversidade de soluções na área do isolamento sonoro distribuídas por três áreas genéricas de intervenção:

- Na Fonte – afastar a fonte de vibração de zonas sensíveis, reduzir a sua potência, aplicar camadas resilientes na superfície sujeita a impacto (ex: alcatifa – Fig. 2.13), etc.;
- No Caminho de transmissão – criar discontinuidades estruturais ou até completa separação estrutural, separação dinâmica de componentes, aumentar a rigidez estrutural nos pontos de excitação (ex: sistema flutuante – Fig. 2.13), aplicar tratamento à estrutura de maneira a aumentar o seu amortecimento, etc.;
- Perto do Recetor – cobrir as superfícies radiantes (ex: teto resiliente suspenso – Fig. 2.13), etc.

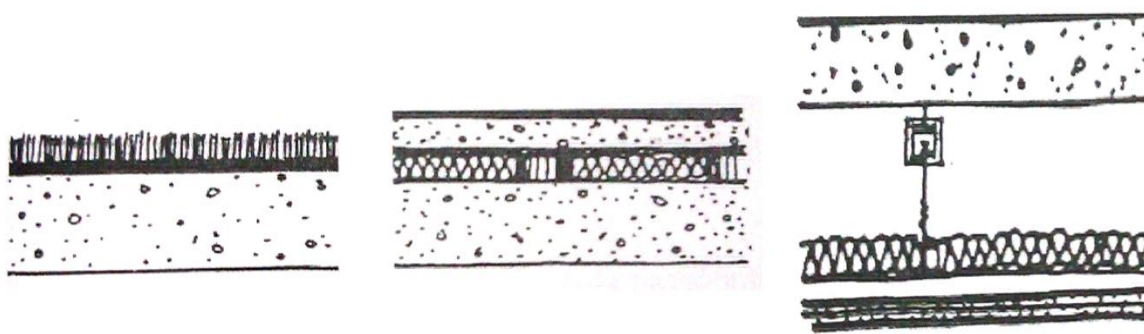


Fig. 2.13 – Três tipos de situações de melhoramento do isolamento sonoro a ruídos de percussão atuando distintamente em três áreas genéricas de intervenção (alcatifa, sistema flutuante e teto resiliente suspenso) [6]

Cada um destes sistemas pode proporcionar um certo isolamento a ruídos de percussão. Os elementos acima da laje estrutural conferem a capacidade de absorver o impulso inicial em torno do ponto de impacto, enquanto o elemento abaixo atenua a irradiação através do piso provocada pela excitação do impulso.

No caso em que é necessário o máximo isolamento sonoro a ruídos de percussão, a incorporação simultânea de um sistema flutuante revestido superiormente com alcatifa e com teto resiliente suspenso inferiormente é a solução mais eficaz, no entanto esta prática não é usual devido ao seu elevado custo.

Uma das formas de diminuir o nível sonoro do ruído de percussão dos pavimentos consiste na introdução de um sistema flutuante apoiado sobre uma camada elástica resiliente. Esses sistemas podem ser lajes flutuantes ou pavimentos flutuantes [24].

Dos tipos de soluções anteriormente anunciados, o pavimento flutuante, do grupo dos sistemas flutuantes, é aquele que é objeto de estudo neste trabalho. Tendo como principal vantagem o aumento do isolamento sonoro a ruídos de percussão, especialmente nas altas frequências, o pavimento flutuante não é mais do que um segundo pavimento apoiado sobre a laje estrutural, separado por um material resiliente que lhe confere o amortecimento às vibrações mecânicas. Em geral, é constituído por três camadas: o revestimento de piso (decorativo), o pavimento de suporte (elemento resistente) e uma camada elástica possivelmente resiliente (*underlay*) (Fig. 2.14).

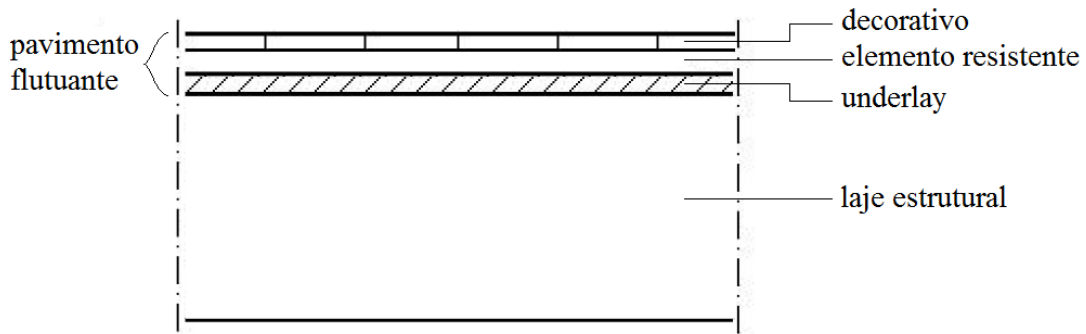


Fig. 2.14 – Constituição de um pavimento flutuante apoiado sobre uma laje estrutural [Adaptado de 25]

A inclusão de um pavimento flutuante faz diminuir o ruído produzido no ambiente recetor, especialmente nas altas frequências, sendo a sua eficácia avaliada quantitativamente através da diferença dos índices $L_{n,r,w}$ [26] calculados segundo as medições com e sem o sistema de revestimento de piso em estudo, obtendo-se assim a redução do nível de ruído de percussão ponderado, ΔL_w , do pavimento em questão (equação 2.9).

$$\Delta L_w = L_{n,r,w} \text{ (sem revestimento)} - L_{n,r,w} \text{ (com revestimento)} \text{ (dB)} \quad (2.9)$$

Em pavimentos flutuantes com aglomerado de cortiça, a eficiência pode variar entre 10 a 17 dB consoante a massa volumica e a espessura [6]. Para aumentar a eficácia do pavimento flutuante é recomendável que se evite qualquer contacto não resiliente entre o elemento resistente e qualquer outro elemento comunicante com a estrutura do edifício, quer seja laje estrutural, paredes circundantes, rodapés e até mesmo atravessamentos de canalizações, para que assim se possa evitar a ocorrência de “pontes acústicas”.

2.3. O Ruído

2.3.1. TIPOS DE RUÍDOS

O ouvido externo, constituído pelo pavilhão auricular e meato acústico externo, permite a captação das ondas de vibração produzidas por uma fonte sonora, transmitindo-as ao ouvido médio onde um sistema mecânico de alavancas proporcionado pelos ossículos difunde as ondas até ao ouvido interno, sistema este que traduz as vibrações mecânicas em impulsos nervosos que são enviados ao cérebro para posterior interpretação. No entanto, os impulsos sonoros podem ter diferentes efeitos no ser humano em função das suas características. Um sinal sonoro de longa duração é analisado pelo ouvido humano com uma intensidade idêntica à intensidade real do impulso sonoro, enquanto o sinal impulsivo (curta duração) quase não é perceptível pelo ouvido. No entanto, se esse ruído impulsivo tiver uma grande intensidade sonora, pode provocar um trauma auditivo devido à sua instantaneidade, podendo não permitir a ativação do reflexo acústico do ouvido humano como defesa do seu sistema auditivo [6, 27].

A caracterização de um ruído é realizada através do registo do seu comportamento em pequenos períodos de tempo, de maneira a poder dar uma perspetiva do seu efeito a longo prazo. Nos casos em que o tempo de medição coincide com o tempo de duração total do ruído, pode-se admitir que se

obteve uma medição em contínuo. Para uma devida caracterização do ruído, o intervalo de medição deve englobar uma adequada variabilidade temporal dos níveis sonoros de maneira a potenciar o seu claro reconhecimento. Graças a esta variabilidade é possível categorizar o ruído em quatro tipos distintos: ruído contínuo ou estacionário (Fig. 2.15 esq.), associado a fontes de emissão contínua constante, por exemplo uma máquina de lavar roupa; ruído intermitente em patamares (Fig. 2.15 dir.), como o som de uma torneira a gotejar; ruído impulsivo (Fig. 2.16 esq.), com picos instantâneos de níveis sonoros elevados intercalados com períodos mais alargados de tempo com níveis sonoros inferiores; e ruído flutuante aleatório (Fig. 2.16 dir.), mais comum uma vez que ocorre quando a variação dos níveis sonoros é aleatória e elevada.

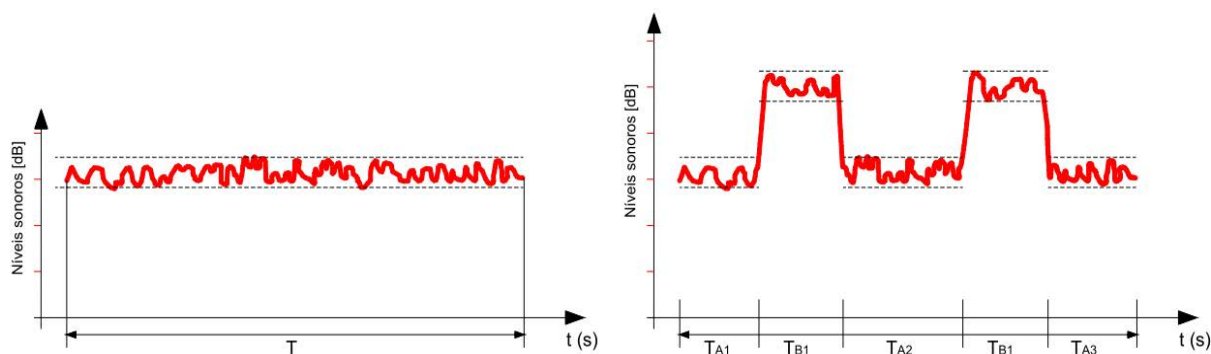


Fig. 2.15 – Oscilograma de um ruído contínuo ou estacionário (esq.) e de um ruído intermitente em patamares (dir.) [27]

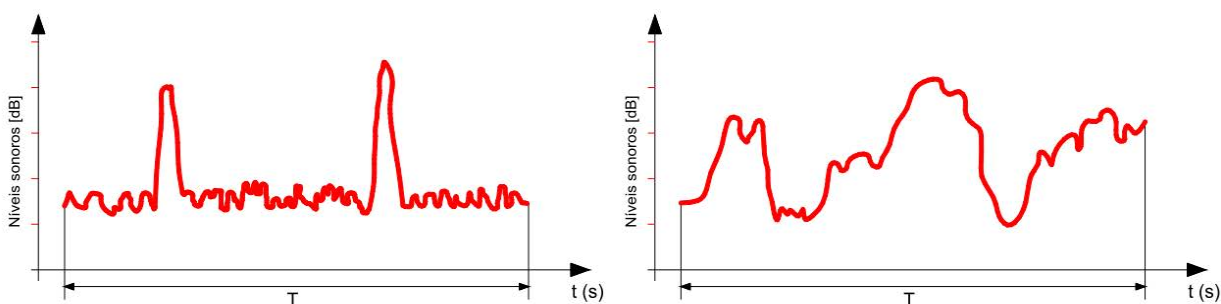


Fig. 2.16 – Oscilograma de um ruído impulsivo (esq.) e de um ruído flutuante aleatório ou de fundo (dir.) [27]

Quando o ruído é contínuo ou estacionário, a sua caracterização pode ser efetuada usando amostras de curta duração já que o mesmo apresenta um comportamento muito constante. No caso em que o ruído é intermitente ou impulsivo, os registos devem ser o mais prolongado possível, à exceção dos casos em que os ritmos de repetição das fontes sonoras sejam conhecidos. Quando o ruído é flutuante, tais simplificações não podem ser aplicadas, sendo aconselhável a medição em contínuo durante todo o intervalo em estudo [27].

Além da caracterização do ruído através do nível sonoro em função do tempo (oscilograma), é muito usual caracterizar o impulso através do seu nível sonoro em função da banda de frequência (Fig. 2.17).

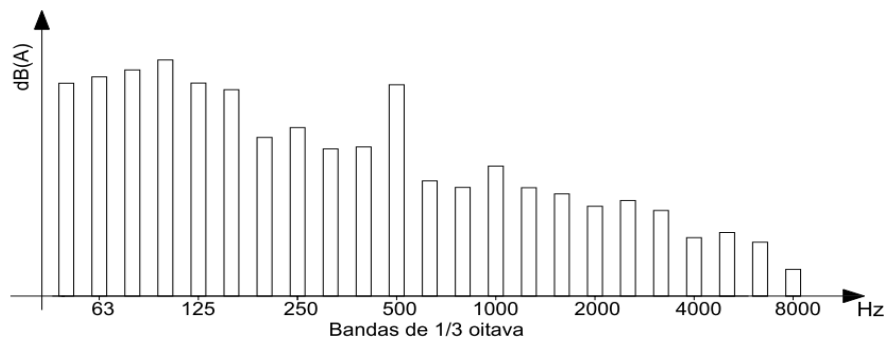


Fig. 2.17 – Espectro rico em baixas frequências, com relevo tonal na banda dos 1/3 de oitava dos 500 Hz [27]

Graças a esta representação é possível avaliar a composição frequencial de um ruído, analisar quais os intervalos de bandas de frequências mais predominantes que caracterizam o ruído e verificar se existem bandas estreitas de frequência bastante salientes relativamente às adjacentes (Fig.2.17) [27].

2.3.2 EFEITOS DO RUÍDO NO HOMEM

Com a evolução socioeconómica compreendeu-se com facilidade a importância que pode assumir para o Homem o saber localizar-se no mundo sonoro - como e quando ouve, como e quando o som passa da ferramenta útil da socialização ao ruído incómodo ou mesmo traumático. Porém, considera-se a capacidade de ouvir com a mesma despreocupação que a de respirar e, enquanto a função auditiva não apresente deficiências, a sua proteção não é aspeto que preocupe a sociedade em geral [10].

A exposição do Homem a ruídos é uma das razões do mal-estar social, gerando dentro da sociedade problemas psíquicos e físicos. Contudo, a reação provocada por esse estímulo sonoro nos indivíduos não é universal, existindo por isso quatro fatores que influenciam tal efeito:

- Nível de intensidade sonora;
- Tempo de exposição ao ruído;
- Frequência do ruído;
- Suscetibilidade do indivíduo.

Com o aumento do peso de cada um destes quatro fatores, os efeitos registados num indivíduo alastram do campo das atitudes aos dos comportamentos, culminando no domínio da fisiologia, e na eventualidade de provocar traumas [10, 28]. Quando um mesmo indivíduo se submete a tais condições, a reação face ao ruído pode-se manifestar segundo as seguintes perturbações:

- Afetação da audição;
- Perturbações fisiológicas diversas (alterações no aparelho circulatório e digestivo, modificação do sistema endócrino, imunológico e nervoso, etc.);
- Alteração do sono;
- Perturbação de atividades várias;
- Interferência na comunicação oral;
- Incomodidade e afetação da privacidade;
- Alteração da capacidade de concentração e relaxação.

Em geral, um estímulo sonoro provoca maior incomodidade quando se trata de um ruído noturno, uma vez que o nível de pressão sonora do ruído de fundo é menor, devido à baixa atividade social nesse

período que mascara tanto o ruído noturno. Este género de ruído é o causador de uma das maiores perturbações, a alteração do sono [10].

O sono, como descanso vital à sanidade dos indivíduos, é decomposto em quatro fases de adormecimento, num padrão repetitivo mas variável com o estado físico ou psicológico da pessoa adormecida. Sempre que a pessoa se encontrar na fase I de adormecimento, atinge um estado de “Sono Paradoxal” (Fig. 2.18) caracterizado pelo aparecimento de sinais eletroencefalográficos semelhantes aos que se detetam numa pessoa acordada, acompanhados de movimentos oculares, onde a resistência a acordar é muito menor em relação às outras fases.

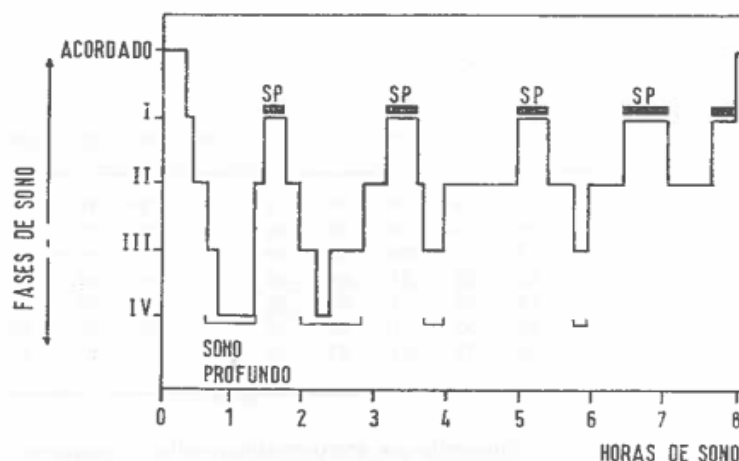


Fig. 2.18 – Evolução média das fases I, II, III e IV do sono num adulto (SP - Sono Paradoxal) [10]

Assim, com o sistema nervoso central em constante funcionamento, a resposta motora só ocorre para estímulos sonoros de intensidade elevada durante certas fases do sono [10].

Um dos ruídos noturnos mais comuns e incomodativos em habitações multifamiliares é o ruído de percussão criado pela queda de objetos, saltos altos, arrastar de móveis, etc., que por ter uma alta taxa de difusão estrutural, invade facilmente a privacidade de várias habitações familiares de um edifício. Por isso, é importante tratar esse ruído através da adoção de soluções de isolamento sonoro capazes de o atenuar, como por exemplo, a inclusão de um sistema de pavimento flutuante sobre a laje estrutural.

As alterações de sono geradas pelo ruído podem criar diferentes reações, como:

- Dificuldade em adormecer;
- Reações de natureza vegetativa reversíveis (dilatação das pupilas, hipertensão sanguínea, mudanças gastrointestinais, reação da musculatura do esqueleto, vasoconstricção das veias, mudança na produção de hormonas e proteínas), com consequências de ordem física ou psicológica, sentidas nos períodos de vigília subsequentes ao sono perturbado;
- Aumento do sentimento de medo e *stress*, irritabilidade, desconforto, baixa produtividade e baixa eficiência laboral.

Porém, é de notar que a perturbação do sono varia em função de outros casos particulares. Assim, para o mesmo estímulo sonoro, varia positivamente com o exercício físico, associado ao cansaço físico e psíquico, e negativamente com a idade. Além disso, a adaptação a sons de frequências características e de periodicidade constante baixam o estímulo perturbador do sono, diminuindo a possibilidade de ocorrência de perturbações ao nível do sono [10].

3

PAVIMENTOS FLUTUANTES

3.1. O PAVIMENTO

Um pavimento é um elemento geralmente horizontal com função estrutural, com ou sem revestimento na sua superfície superior. Existem três tipos fundamentais de pavimentos: pavimentos de madeira, pavimentos metálicos e pavimentos mistos (metal e betão) [12].

Os pavimentos mais antigos, que vêm de uma tecnologia construtiva ancestral, são os pavimentos de madeira. Este tipo de pavimento é constituído por um piso superior de madeira apoiado em vigas de madeira resistentes, estando as suas extremidades apoiadas em paredes resistentes, podendo ter também na sua constituição um painel de teto, conhecido como forro. Este tipo de piso distingue-se dos outros tipos de pisos pela sua grande capacidade de absorção das vibrações laterais, limitando a propagação da vibração ao elemento horizontal [12].

Os pavimentos metálicos são pavimentos muito pouco usados dada a sua baixa capacidade de isolamento sonoro. A sua aplicação limita-se a ambientes industriais onde a propagação do ruído não é uma preocupação.

Os pavimentos mistos são pavimentos compostos por betão e ferro e têm uma grande capacidade de absorção de vibrações graças à sua heterogeneidade de materiais. Existem várias combinações de pavimentos mistos, desde laje maciça, fungiforme, aligeirada, etc., mas uma das novas tecnologias construtivas de pavimentos são as lajes colaborantes. Este tipo de pavimento é composto por betão enformado numa forma de folhas metálicas não recuperáveis que servem de apoio à resistência à tração/flexão do piso. Apesar de serem pouco espessas e leves, o seu isolamento sonoro fica muito aquém do desejado [12].

O caminhar ou o simples salto de uma pessoa sobre um piso produz uma vibração no meio sólido da laje, propagando-se instantaneamente pelos elementos estruturais circundantes e irradiando um ruído de percussão predominante nas altas frequências [12]. Nesse instante, o piso flete de maneira estática ou dinâmica devido ao carregamento realizado pela pessoa e, sob estas condições, comporta-se como um grande sistema duplamente encastrado, respondendo periódica ou impulsivamente ao carregamento. Caso a parte inferior da laje estrutural esteja exposta ao ambiente inferior recetor, o movimento de desvio estrutural irradia um ruído de baixa frequência diretamente para dentro do espaço de receção. Este ruído assemelha-se ao som de um grande bombo, complementando o espectro de frequências do ruído de percussão, caracterizado pela propagação nas altas frequência [12].

Um dos métodos mais usuais na obtenção de valores admissíveis do isolamento a ruídos de percussão é o revestimento do piso através da colocação de um sistema flutuante sobre a laje estrutural. Este sistema não é mais que um segundo pavimento apoiado sobre a laje, suportado por um material

resiliente que permite uma separação desse pavimento com o resto da estrutura e que tem como função atenuar a propagação das vibrações criadas pelo impacto de um qualquer objeto à superfície do pavimento [18]. Estes sistemas flutuantes podem ser de dois tipos: laje flutuante (lajeta armada apoiada sobre o material resiliente) ou pavimento flutuante (painéis leves revestidos inferiormente com material resiliente). Porém, o baixo custo dos pavimentos flutuantes, o seu reduzido tempo de colocação, a sua fácil aplicação (Fig. 3.1) graças ao seu sistema de encaixe tipo clipe macho-fêmea, a não necessidade de mão-de-obra especializada, a baixa perda de volume ocupacional em obras de reabilitação e o diminuto peso na estrutura base, fazem deste tipo de pavimento uma das soluções mais competitivas no mercado da construção [25].



Fig. 3.1 – Facilidade de aplicação do pavimento flutuante tipo *parquet*, que foi objeto de estudo no presente trabalho, proporcionada pelo seu sistema de encaixe macho-fêmea

Atualmente as exigências estruturais limitam a utilização de qualquer tipo de revestimento, dando preferência a soluções de revestimento leve (pavimento flutuante), de maneira a aproveitar e rentabilizar o espaço, principalmente em obras de reabilitação. Porém, a aplicação de pavimentos flutuantes encontra-se também condicionada pela ocupação do edifício. Exemplo disso é o caso de pisos que tenham incorporado um pavimento flutuante para isolar o ruído de percussão e não cumpram os requisitos mínimos de isolamento sonoro regulamentares na legislação em vigor. Nesse caso, devem ser adotadas novas soluções que complementem a falha de isolamento sonoro a ruídos de percussão, quer pela substituição desse pavimento flutuante por outro mais eficaz ou pela colocação de uma alcatifa, de um teto resiliente suspenso ou de outro sistema que propicie a diminuição da propagação do ruído de percussão [12].

Para o caso de ser necessário o máximo isolamento sonoro, uma boa técnica é a conjugação de todos os sistemas construtivos plausíveis de se aplicar, ou seja, aplicar no mesmo elemento horizontal material resiliente superficial e pavimento flutuante na parte superior do piso e teto suspenso na parte inferior. Assim é possível tirar o máximo partido da capacidade absorvente das vibrações mecânicas conferida pelos elementos superiores (alcatifa e pavimento flutuante) e da capacidade de absorção do ruído aéreo produzido pela superfície inferior do piso (teto resiliente suspenso). Esta solução é muito usual em espaços onde são requeridos altos valores de isolamento sonoro, tais como estúdios de gravação e salas de concerto, com o intuito de atender às necessidades acústicas desses mesmos espaços [25].

3.2. ESTADO DE ARTE

A evolução e o aumento das exigências de conforto acústico a ruídos de percussão por parte da sociedade fez com que desde 1971 se começassem a realizar ensaios regulares em laboratório, cujos resultados têm vindo a contribuir para um maior conhecimento do comportamento dos vários elementos [18]. Desde essa época, têm sido produzidos inúmeros estudos relacionados com o ruído de percussão, tendo os seus autores contribuído para que fosse possível evoluir na área da Acústica.

Há já algumas décadas, em 1963 Heckl e Rathe ([29] citado em [18]) descobriram uma relação entre a perda por transmissão e o isolamento sonoro a ruídos de percussão em pavimentos flutuantes através da aplicação do princípio da reciprocidade em pisos com superfícies de alta rigidez.

No ano de 1971, Vér ([30] citado em [18]) deu o primeiro passo na padronização dos ensaios de ruído de percussão, usando pela primeira vez uma máquina de impactos. Os seus resultados mostraram que há um aumento do isolamento sonoro a ruídos de percussão quando são adicionadas diferentes superfícies elásticas ao piso estrutural.

Quatro anos depois (1975), Silva [31] começou a dar os primeiros passos na análise laboratorial de lajes flutuantes assentes em aglomerado negro de cortiça, concluindo que a eficácia da laje flutuante é influenciada pela frequência de ressonância do sistema lajeta-camada resiliente.

Posteriormente, Cremer *et al.* (1988) ([32] citado em [18]) examinaram espectros de ruídos criados pela máquina de impactos incidindo num piso homogêneo de grande impedância¹, obtendo resultados satisfatórios para uma grande gama de frequências.

Em 1997 surgiram as primeiras críticas a medições do isolamento sonoro com a máquina de impactos normalizada em pisos de madeira, argumentando Shi *et al.* ([33] citado em [18]) que tal ensaio não simulava realmente o efeito do caminhar humano, especialmente nas baixas frequências. Para resolver tal problema, os mesmos investigadores ensaiaram o impacto de uma bola de areia, *sand ball*, que é largada a uma determinada distância do pavimento de madeira em estudo, criando assim um ruído de percussão bastante próximo da realidade.

No ano de 1998, Vafiadis [34] ensaiou pavimentos flutuantes de diferentes tipos de revestimentos, combinados com variados tipos de *underlay* de aglomerado composto de cortiça (Fig. 3.2) num compartimento comum de um edifício, com o intuito de avaliar a qualidade do isolamento sonoro a ruídos de percussão dos vários tipos de pavimentos. Baseando-se nos seus resultados, o autor mostrou que a utilização de um *underlay* num pavimento melhora o comportamento acústico ao isolamento sonoro a ruídos de percussão. Apesar do tipo de piso estrutural de teste ter influência nos resultados, o autor conseguiu adaptar as condições de ensaio, comparar os diferentes pavimentos e obter resultados fidedignos. Segundo os seus resultados, com a adição de um *underlay* de aglomerado composto de cortiça nos diferentes pavimentos, obtém-se um aumento médio da redução do nível de ruído de percussão ponderado, ΔL_w , de 20 dB. Verificou também que o aumento da espessura do *underlay* não é diretamente proporcional à eficiência do isolamento sonoro, pois segundo os seus resultados é obtido uma maior melhoria no isolamento do ruído de percussão nos produtos com *underlay* de 3 mm de espessura do que nos produtos de 5 mm [34].

Assim, com o seu estudo foi possível desenvolver fórmulas de previsão fundamentadas na análise estatística resultante dos diversos ensaios, mostrando a dependência do isolamento a ruídos de

¹ A impedância é como uma medida de resistência à propagação do som. Quando se diz que um material deve ter uma grande impedância, quer dizer que esse material tem uma baixa velocidade de propagação das ondas sonoras, absorvendo parte da energia dessas e atenuando a sua propagação [7].

percussão em função da espessura do *underlay* e do seu peso específico, podem ser usadas na previsão do comportamento acústico de pavimentos idênticos aos estudados e ter uma noção do seu isolamento sem ter que usar ensaios laboratoriais [34].



Fig. 3.2 – Pavimentos da AcoustiCork ensaiados por Vafiadis [34]

No ano de 2000, a fim de estudar sumariamente a quantificação do efeito da transmissão marginal em três edifícios distintos, Patrício [19] ensaiou nas instalações do LNEC um painel de laje homogénea de espessura 0,10 m, constituída por betão C20/25, apoiado sobre uma parede de alvenaria adjacente de tijolo de 11 cm rebocada em ambas as faces, definindo uma junção estrutural tipo T, com o intuito de simular o comportamento dos elementos estruturais desses três edifícios. Para tal, efetuou medições dos níveis de vibração através da utilização de dois acelerómetros – um no painel de laje e outro na parede – aquando da criação de impulsos no painel de laje por parte da máquina de impactos normalizada. Graças aos meios de medição individuais de cada elemento, foi possível descrever a variação do nível de vibração no domínio da frequência (Fig. 3.3).

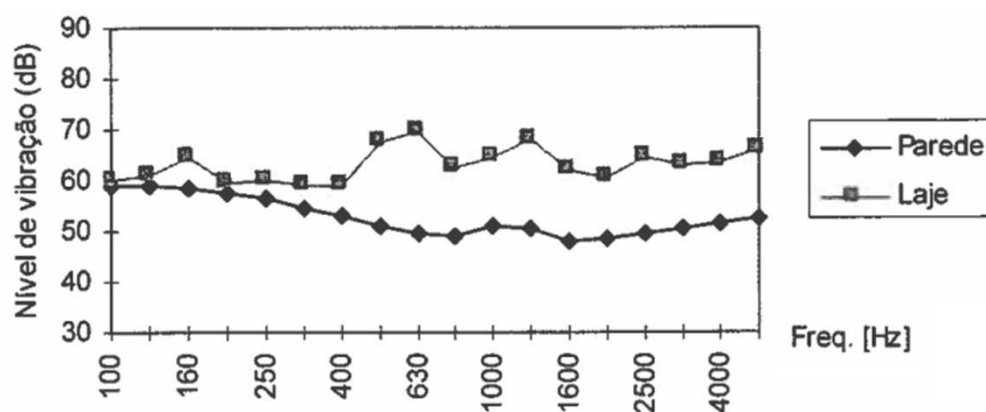


Fig. 3.3 – Níveis de vibração médios medidos numa laje e numa parede adjacente quando excitadas pela máquina de impactos normalizada [19]

Segundo a investigação, em ambos os elementos os níveis de vibração encontram-se muito próximos nas bandas de baixa frequência, começando a divergir significativamente a partir da banda dos 400 Hz com valores acima dos 10 dB. Por este facto, Patrício evidenciou que a transmissão marginal é mais importante nas bandas de baixa frequência do que nas altas [19]. Após variadas análises, este investigador chegou à conclusão que a influência da transmissão marginal na determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ($L_{n,r,w}$) em pisos não revestidos (sem alcatifa ou sem sistemas flutuantes) pode ser irrelevante. Porém, nos casos em que o piso é revestido, tal influência já não é desprezável dado que a energia resultante da transmissão direta diminui e a energia gerada pela transmissão marginal ganha relevância [19].

No ano de 2002, com o objetivo de analisar o desempenho ao isolamento sonoro a ruídos de percussão dos variados materiais geralmente utilizados como revestimentos de pisos na construção civil, Conrad ([35] citado em [18]) ensaiou amostras de revestimentos para pisos com materiais sintéticos, borracha, carpetes com várias espessuras, piso laminado de madeira, entre outros. Segundo a sua análise, os materiais que apresentaram melhor comportamento ao isolamento a ruídos de percussão nem sempre foram os que tinham maior espessura, mas sim aqueles que eram mais resilientes.

No mesmo ano, como alternativa à reciclagem de resíduos sólidos procedentes das indústrias do calçado, sobras da fabricação de solas, entressolas e palmilhas, Hax ([36] citado em [18]) usou placas de granulado de EVA (Etil Vinil Acetato), ensaiou e comparou os seus resultados laboratoriais do isolamento sonoro a ruídos de percussão com os resultados da lã de vidro, para as mesmas espessuras, verificando que as placas de EVA tinham um melhor comportamento de isolamento sonoro com ganhos de 14 dB em relação à amostra referencial e com mais 2 dB de isolamento que as placas de lã de vidro.

No ano de 2003, Fuchs *et al.* ([37] citado em [18]) desenvolveram outros métodos mais simples para a medição do isolamento sonoro a ruídos aéreos e de percussão. O procedimento para a avaliação do ruído de percussão consistia no uso de uma fonte aplicada no centro do ambiente emissor, constituída por um peso rotativo de 200 g de material sintético, rodando a uma velocidade angular de 120 rpm. Não foi possível conhecer as condições de ensaio mas sabe-se que tal ensaio só pode ser aplicado caso o ruído ambiente do compartimento recetor não exceda o limite de 60+3 dB(A).

No mesmo ano, Machado ([38] citado em [18]) estudou o ruído estrutural e os níveis de aceleração causados pelo caminhar de pessoas em pisos de betão leve e experimentou avaliar o seu desempenho acústico variando a espessura da camada resiliente de polietileno. Com tal estudo, este investigador concluiu que para o polietileno o isolamento sonoro a ruídos de percussão não é proporcional ao aumento de espessura, apresentando um comportamento logarítmico já que à medida que a espessura aumentava, a redução sonora a ruídos de percussão diminuía, sendo essencial uma análise custo-benefício para a seleção da espessura ideal da camada resiliente

Em 2004, tendo em conta que o nível de pressão sonora resultante do ruído de percussão depende do som direto irradiado pelo piso excitado e pela transmissão às paredes laterais, Semprini *et al.* ([39] citado em [18]), com o objetivo de investigar a importância do tipo de junção entre o piso e as paredes da sala de receção no nível de isolamento sonoro a ruídos de percussão, ensaiaram um piso de betão armado com 14 cm de espessura e fizeram várias experiências com e sem material resiliente, e pisos com duas e quatro ligações estruturais nas bordaduras com os elementos verticais do compartimento inferior, para averiguar a importância e a contribuição dos caminhos de transmissão das ondas de vibração. Graças a esta experiência, verificaram que o piso com camada resiliente e conectado com os elementos verticais do compartimento recetor em todas as extremidades do piso obteve o melhor desempenho acústico no isolamento sonoro a ruídos de percussão devido ao facto de que, nestas

condições, o elemento estrutural horizontal ficava “travado” pelas suas ligações estruturais, não vibrando tanto e diminuindo a estimulação sonora criada no ambiente recetor.

No ano de 2005, Rushforth *et al.* ([40] citado em [18]) analisou as propriedades viscoelásticas de materiais manufaturados através da reciclagem de resíduos de carpete no isolamento ao ruído de percussão, comparando o seu desempenho com o de materiais vulgarmente utilizados em pavimentos flutuantes. Fruto desse estudo, criaram uma formulação que permitiu otimizar o isolamento sonoro a ruídos de percussão usando esse material, obtendo níveis de isolamento superiores aos obtidos com os materiais comercialmente empregados.

No mesmo ano de 2005, Mateus [41] estudou a influência do ruído aéreo originado pela máquina de impactos normalizada, o “eco de impactos”, sendo este um ruído significativo nos ensaios *in situ* a pavimentos flutuantes de madeira, podendo conduzir a níveis de ruído elevados no compartimento de emissão que podem interferir no ruído medido no compartimento recetor. Para garantir a não interferência deste “eco de impactos” na determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, construiu uma capotagem (enclausuramento) para a máquina de percussão com material fonoabsorvente (não previsto nas normas em vigor) e verificou o seu efeito. Porém a capotagem não fez grande diferença, podendo ser desprezado a influência do ruído aéreo do “eco de impactos” na medição do ruído de percussão.

Em 2006, para estudar o comportamento dos sistemas piso-forro em estruturas leves de pavimentos de madeira típicos dos edifícios multifamiliares da América do Norte, Nash ([42] citado em [18]) analisou diversas conexões de teto falso suspenso em pavimentos de madeira, concluindo que é muito importante uma montagem cuidada do subsistema de forro. Nas suas experiências, descobriu dois fatores importantes que ainda não tinham sido documentados nos ensaios em laboratório e nas quais obtiveram bons resultados no isolamento sonoro a ruídos de percussão: o primeiro ressalta do facto de que em tetos suspensos deve-se manter uma separação entre a placa de gesso cartonado e as paredes, devendo esse espaço ser selado a vácuo com uma calafetagem flexível; o segundo facto refere que os elementos de suporte do teto devem ter uma geometria em Z e ser constituídos por material resiliente. Nos casos onde o sistema seja instalado incorretamente, podem ocorrer sérios problemas no isolamento sonoro, principalmente em baixas frequências.

No mesmo ano, Hale ([43] citado em [18]) executou variados estudos comparativos sobre ensaios de múltiplos sistemas de pavimentos em edifícios, concluindo que, para pavimentos flutuantes, a combinação de materiais resilientes com superfícies de alta rigidez apresentam o melhor desempenho no isolamento a ruídos de percussão.

Ainda no ano de 2006, Jeon *et al.* ([44] citado em [18]) estudaram o comportamento dos materiais resilientes no isolamento a ruídos de percussão em vários pavimentos de edifícios, tendo observado que os materiais resilientes tradicionalmente usados em pavimentos flutuantes comportam-se como amplificadores do ruído nas frequências abaixo dos 100 Hz. Como solução deste problema, os mesmos investigadores sugeriram a utilização de um material com comportamento igual ao de um líquido viscoelástico incorporado na estrutura, dado que, comparativamente com outros materiais tradicionais, esse material absorve mais a energia oriunda da vibração mecânica.

Em 2007 na Universidade de Coimbra, para prever o isolamento sonoro a ruídos de percussão (e também aéreos), Tadeu *et al.* ([45] citado em [18]) desenvolveram equações analíticas que se assimilam (comprovadamente) aos resultados experimentais obtidos segundo ensaios a pisos com camadas resilientes suspensas na parte inferior do pavimento, à exceção dos resultados em baixas frequências perto da faixa do efeito de ressonância. Graças a estas soluções analíticas, é possível

prever o comportamento acústico de combinações de camadas estruturais simples com tetos suspensos.

3.3. MODELO ANALÍTICO

O desempenho do isolamento sonoro a ruídos de percussão dum pavimento flutuante está intimamente relacionado com as propriedades da camada resiliente [25]. Em teoria, este pavimento pode ser simplificado a um sistema dinâmico massa-mola-amortecedor, de oscilador de um grau de liberdade, submetido a um sistema de forças aplicadas em um ou mais pontos do pavimento provocando um movimento vertical (Fig. 3.4). O movimento da massa M (corpo rígido do pavimento) é condicionado por dois elementos: uma mola de rigidez s e um amortecedor viscoso de amortecimento d (representando o atrito interno do material resiliente), os quais representam o desempenho mecânico da camada resiliente [18, 25]. Quando uma força é aplicada no sistema dinâmico massa-mola-amortecedor, a vibração percorre o elemento resistente de massa m até chegar à camada resiliente que dissipa a sua energia graças à sua propriedade viscoelástica e às perdas do amortecimento interno [12].

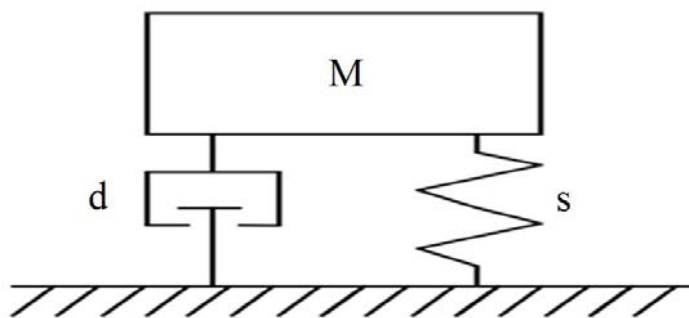


Fig. 3.4 – Modelo físico básico do comportamento de um pavimento flutuante [25]

Apesar dos pavimentos flutuantes não serem sistemas massa-mola-amortecedor puros, o modelo físico básico é uma analogia muito útil para a compreensão do seu funcionamento dinâmico.

Existe outra teoria que diz que um pavimento flutuante não é mais do que um sistema de duas placas: uma muito rígida e bloqueada nas suas extremidades e outra simplesmente sobreposta à anterior, separadas por uma camada central de baixa rigidez com capacidade de dissipação da energia em função das suas propriedades elásticas e da espessura das placas exteriores [25]. Porém, de modo a realizar uma abordagem simplista sobre a temática em questão, apenas é comentado o modelo físico básico do comportamento de um pavimento flutuante.

A colocação de um pavimento extra sobre o pavimento estrutural, além de aumentar o isolamento sonoro a ruídos de percussão, também fornece uma massa adicional à atenuação do ruído aéreo, apesar de não ser tão significativa como a redução sonora do ruído de percussão [18].

Para que se possa compreender, à luz da teoria, o funcionamento do sistema do pavimento flutuante é fundamental examinar a ressonância e o amortecimento do seu sistema. Como esta abordagem se enquadra na extensão de desenvolvimentos matemático-físicos e que ultrapassam o âmbito deste trabalho, fica unicamente uma breve referência aos conceitos mais importantes deste tema.

Neste tipo de sistema linear, o movimento é estimulado por uma força impulsiva atuante sobre a massa m e graças a formulações teóricas é possível calcular a resposta geral do conjunto [12]. Assim, sabe-se que quando a frequência de excitação do pavimento é próxima da frequência própria do sistema, o mesmo entra em ressonância, provocando uma ampliação da resposta dinâmica (Fig. 3.5) e consequentemente um aumento do ruído de percussão. No entanto, se a frequência própria do sistema for menor que a frequência de excitação, a resposta do sistema aumenta a sua eficácia de amortecimento para frequências acima da sua frequência crítica. Então, para que o pavimento flutuante tenha um funcionamento harmónico otimizado, a sua frequência própria deve ser a mais baixa possível de maneira que seja bastante inferior às frequências de solicitação [25].

Mesmo em situações de ressonância, uma das maneiras de contrariar o aumento da resposta dinâmica do pavimento flutuante é através do uso de camadas resilientes (conjunto mola-amortecedor) com coeficientes de amortecimento ξ elevados que permitam baixar o pico da amplitude da resposta dinâmica (Fig. 3.5). Assim, quanto mais amortecedora for a camada resiliente, maior será a eficiência do isolamento a vibrações, ou seja, maior será o isolamento sonoro a ruídos de percussão [25].

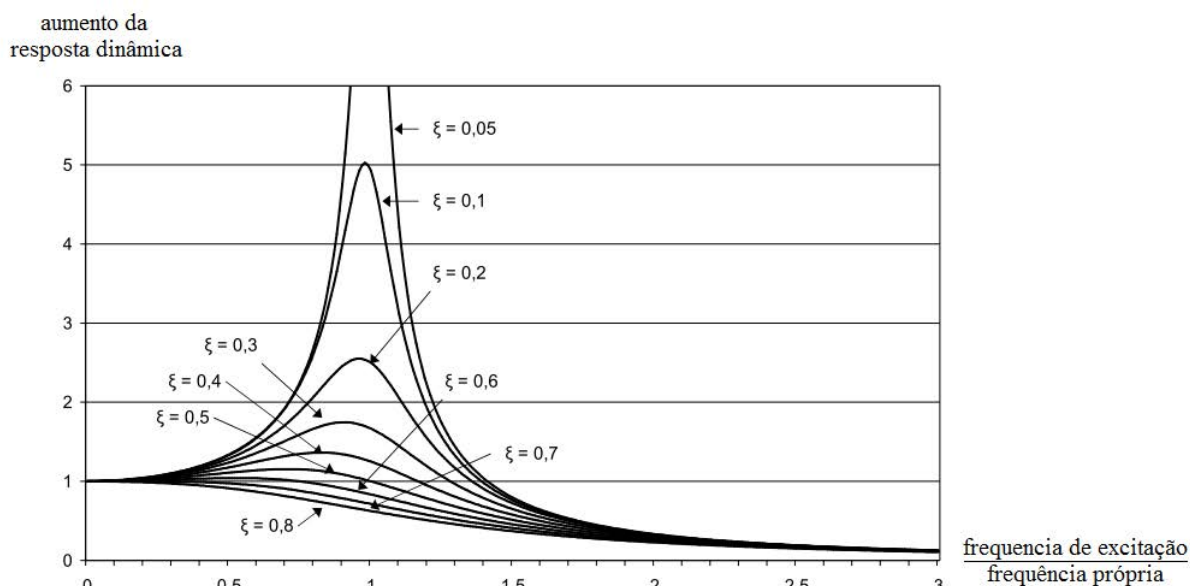


Fig. 3.5 – Resposta dinâmica de um sistema de um grau de liberdade para vários coeficientes de amortecimento ξ [25]

No entanto, os materiais de construção tradicionais têm baixos coeficientes de amortecimento (ξ), levando à necessidade de desenvolvimento de novos produtos mais resilientes que permitam um maior isolamento sonoro [25].

Apesar de todas estas simplificações, o estudo de um sistema de pavimento flutuante não é de fácil análise, já que a frequência própria do sistema varia de sistema para sistema, ou seja, um análise teórica de um pavimento é característico exclusivamente daquele pavimento, sendo função do material constituinte, do tipo de apoios, da rigidez da camada resiliente e da massa do elemento resistente [25].

Recentemente, Bistafa (2006) ([46] citado em [18]) formulou uma expressão (equação 3.1) que visa a determinação da frequência de ressonância fundamental (f_1) do sistema de pavimento flutuante, quando o material resiliente cobre toda a superfície do piso [18].

$$f'_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{s}{m'}} \quad (\text{Hz}) \quad (3.1)$$

onde:

f'_1 – frequência de ressonância (Hz);

s' – rigidez dinâmica por unidade de superfície do material elástico (N/m^3) segundo a norma ISO 9052 ([47] citado em [18]);

m' – massa por unidade de superfície de pavimento flutuante (kg/m^2).

Nos casos em que o material resiliente é apenas aplicado em determinados pontos do pavimento flutuante, como por exemplo amortecedores, Pujolle (1978) ([48] citado em [18]) enunciou a equação 3.2 que visa o cálculo da frequência de ressonância fundamental nessa situação.

$$f'_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s''+s'}{m}} \quad (\text{Hz}) \quad (3.2)$$

onde f'_1 , s' e m correspondem aos mesmos parâmetros usados na equação (3.1) e s'' é rigidez dinâmica da camada de ar (N/m^3).

Em pavimentos flutuantes, para afastar a frequência de ressonância da gama de frequências mais incomodativas ao ser humano (altas frequências), é importante que o material resiliente seja o mais elástico possível, tendo para tal que diminuir a rigidez dinâmica s' desse material. Contudo, do ponto de vista de estabilidade, o mesmo material não pode ser muito elástico, já que deve resistir às cargas permanentes e às sobrecargas do espaço em que se encontra inserido sem sofrer grandes deformações.

Além do isolamento sonoro conferido pelos sistemas tradicionais (revestimento, pavimento flutuante e teto resiliente suspenso), uma outra forma de diminuir a propagação do ruído de percussão é por atuação na ligação dos elementos estruturais. Como quanto maior for a vibração da laje no plano vertical, maior é a amplitude da vibração criada no ar do ambiente recetor e maior é o ruído aí registado, para controlar a vibração do pavimento é importante limitar a amplitude máxima de vibração do elemento estrutural de suporte. Para tal deve-se aumentar a rigidez das vigas que suportam a laje estrutural e rigidificar também as ligações estruturais entre estas e a laje. Todavia, o excesso de rigidez pode colocar em risco a resistência estrutural do edifício a sismos contínuos uma vez que a elevada rigidez pode levar à fendilhação ou até ao colapso da estrutura, sendo para isso necessário chegar a uma otimização do sistema [12].

3.4. ANÁLISE COMPORTAMENTAL

Para compreender o desempenho acústico teórico dos pavimentos flutuantes, a figura 3.6 apresenta uma comparação entre as curvas típicas dos níveis de pressão sonora do ruído de percussão para três tipos de soluções: considerando uma laje estrutural sem revestimento, com a adição de um sistema flutuante e com a combinação de um sistema flutuante e um revestimento superior de um material elástico (ex: alcatifa) ([49] citado em [18]).

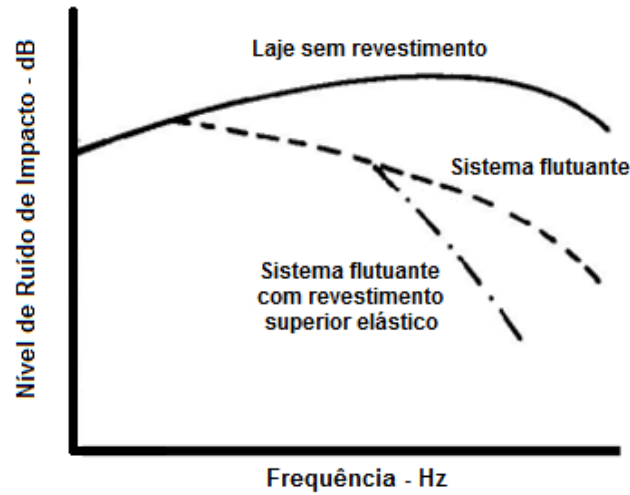


Fig. 3.6 – Curvas típicas da variação do nível de ruído de percussão para a situação de uma laje estrutural nua, com a sobreposição de um sistema flutuante e de um sistema flutuante superiormente revestido com um material elástico ([49] citado em [18])

Assim, a sobreposição de um pavimento flutuante sobre uma laje estrutural não influencia o isolamento sonoro nas baixas frequências, já que esta é uma zona de influência estrutural. Porém, o seu emprego permite aumentar significativamente o isolamento a ruídos de percussão nas médias-altas frequências, enquanto a colocação de alcatifa sobre o pavimento flutuante apenas ajuda a diminuir o ruído nas altas frequências [25].

Com o objetivo inicial de avaliar a influência da impedância resultante da massa do martelo no ensaio de percussão em pavimentos flutuantes, Cremer ([32] citado em [18]) formulou a equação 3.3 que permite obter o gráfico da redução do nível de pressão sonora do ruído de percussão normalizado, ΔL_n , em função da frequência, com resultados muito próximos da realidade nas altas frequências.

$$\Delta L_n = \left[40 \log \frac{f}{f_1} + 10 \log \left(1 + \left(\frac{f}{f_2} \right)^2 \right) \right] \text{ (dB)} \quad (3.3)$$

com

$$f'_1 = 160 \sqrt{\frac{s}{m}} \text{ (dB)} \quad (3.4)$$

e

$$f'_2 = \frac{Z_1}{2\pi \cdot m_0} \text{ (dB)} \quad (3.5)$$

onde f'_1 é a frequência de ressonância (Hz), dependente da massa superficial do sistema flutuante (m' em kg/m^2) e da rigidez dinâmica do material resiliente (s' em N/m^3), e Z_1 a impedância da placa no ponto de excitação, função da massa de um martelo m_0 .

O cálculo da impedância da placa engloba um conjunto de equações de carácter estrutural complexo, não sendo, por isso, expressas na presente dissertação.

Com esta equação é possível prever, com alguns desvios associados, o comportamento acústico teórico de pavimentos flutuantes.

Com a norma EN ISO 12354-2 ([50] citado em [24]), a expressão (3.3) foi substituída pela expressão (3.6), obtendo-se assim valores da redução sonora a ruídos de percussão mais conservadores.

$$\Delta L_n = 30 \log \frac{f}{f_1} \text{ (dB)} \quad (3.6)$$

Segundo Pujolle ([48] citado em [18]) os três principais fatores que influenciam a eficiência de um pavimento flutuante ao isolamento sonoro a ruídos de percussão são os seguintes:

- A natureza e a espessura do material resiliente – a rigidez dinâmica do material elástico de um pavimento flutuante é inversamente proporcional à sua espessura (quanto maior a espessura, menor é o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão);
- A natureza e a espessura da laje estrutural – a espessura da laje é proporcional à eficácia do isolamento sonoro, apesar de ser pouco significativo;
- A sobrecarga da laje – o aumento da sobrecarga devido a móveis ou máquinas pode alterar a frequência crítica do conjunto piso e pode também alterar a rigidez dinâmica do sistema.

De entre esses três fatores, o material resiliente (*underlay*) é o maior responsável pela redução da propagação do ruído de percussão em pavimentos flutuantes [18], devendo ser selecionados materiais com mais espessura e com menor densidade para a camada de *underlay*, uma vez que têm melhor comportamento acústico a ruídos de percussão. No entanto, a elasticidade da camada resiliente aliada à baixa rigidez, característica do elemento resistente do pavimento flutuante, torna o sistema flutuante mais flexível e leva a que os utilizadores pressintam pequenos movimentos quando caminham sobre eles, provocando assim desconforto. Por esse motivo, é muito importante a seleção adequada do material resiliente a aplicar como *underlay* do pavimento flutuante para que sejam evitados problemas de instabilidade superficial do pavimento [18].

Em relação ao teto resiliente suspenso, o pavimento flutuante fornece um isolamento sonoro a ruídos de percussão mais eficiente, chegando a ter até mais isolamento a ruídos aéreos devido ao seu acréscimo de massa [18]. Porém os dois sistemas complementam-se já que, enquanto o pavimento flutuante confere isolamento sonoro nas médias-altas frequências, a contribuição gerada pela colocação de um teto resiliente suspenso resume-se num ganho de isolamento sonoro nas baixas frequências, propiciado pelo existente afastamento entre a placa de teto e a laje estrutural [51].

3.5. ESTUDO DE PAVIMENTOS FLUTUANTES

A crescente preocupação acústica em obter maior isolamento sonoro a ruídos de percussão com a aplicação de soluções de pavimento flutuante em habitações multifamiliares tem fomentado a investigação de novos materiais mais resilientes, materiais esses que possam ser utilizados como *underlay* do pavimento flutuante, tornando-o acusticamente mais eficaz. Além das fibras minerais, tem-se verificado um crescente desenvolvimento de novos produtos com diversos materiais, como o aglomerado de cortiça, a borracha laminar ou em aparas, a lã de vidro e de rocha, as fibras vegetais de coco e de madeira, esponjas recicladas, espumas de polímeros, o poliuretano de célula aberta, poliuretano de célula fechada e poliestireno expandido elastificado e pré-comprimido, etc. [8, 12].

O grande paradigma da camada resiliente centra-se no facto de, para propiciar ao pavimento o máximo isolamento sonoro, o material resiliente deve ser o menos rígido possível. No entanto essa elasticidade torna o pavimento mais flexível, provocando deformações dinâmicas ao caminhar sobre ele ou até mesmo deformações permanentes por fluência criada pela carga pontual de móveis e mesas, levando a problemas de conforto e estabilidade. O oposto também se torna problemático pois se este material, com a preocupação de dar uma boa estabilidade ao pavimento, for demasiado rígido, verifica-se uma diminuição do seu isolamento sonoro a ruídos de percussão, provocado pela baixa resiliência do material constituinte da camada de *underlay*. Assim, é necessário que haja um balanço entre as propriedades acústicas e mecânicas, seleccionando o material que tenha o melhor desempenho geral.

Tradicionalmente, a camada resiliente dos pavimentos flutuantes apoia totalmente sobre a laje (Fig. 3.7 a), criando o máximo contacto entre o elemento resistente do pavimento flutuante e o piso estrutural. Além desta, existem outras configurações de *underlay*, variando o tipo de material, as dimensões, a espessura e as formas dessa camada, levando a variadas soluções consoante o desempenho acústico necessário ao conforto do espaço em que se insere e o custo de investimento desejado. Exemplo disso são os pavimentos que apoiam em molas metálicas rígidas (Fig. 3.7 b), blocos pontuais de suporte (Fig. 3.7 c), lâminas compactas de material resiliente elástico (Fig. 3.7 d) e também componentes pneumáticos de amortecimento dinâmico (Fig. 3.7 e) sendo estes componentes normalmente usados no isolamento de ações de choque em ambiente industrial, mais propriamente no suporte de máquinas [25].

É de notar que os constituintes das quatro últimas camadas de *underlay* (b, c, d e e) têm que estar dispostos com um espaçamento próprio entre si, em função da máxima eficiência e estabilidade funcional do pavimento [25].

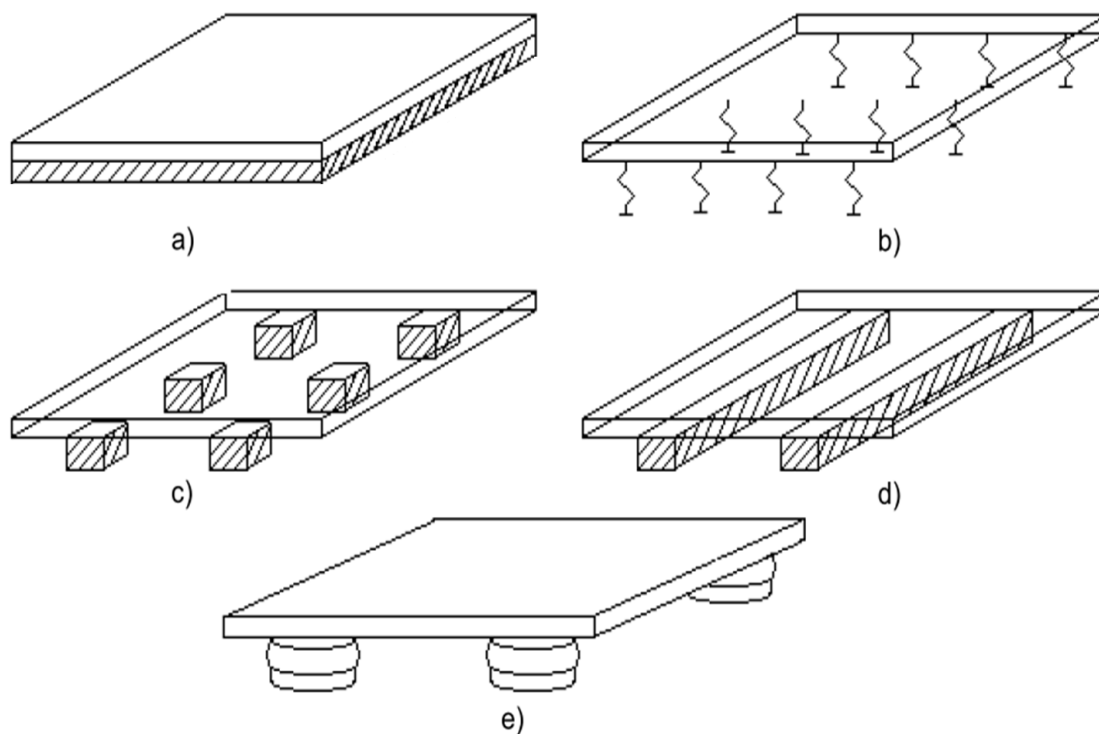


Figura 3.7 – Diversos tipos de camada resiliente/elástica: a) manta; b) molas; c) blocos; d) lâminas; e) amortecedores pneumáticos [25]

A avaliação da atenuação do ruído de percussão de um sistema de pavimento flutuante é quantificável graças aos avanços na área da Acústica, nomeadamente, na área tecnológica de medição, no desenvolvimento de novos sistemas construtivos e de novos materiais, aliados à crescente sensibilização de que o comportamento acústico dos pavimentos não é uma coisa que não possa ser estudada em laboratório. Tal avaliação é praticável através da realização de ensaios laboratoriais ao pavimento em questão, permitindo desse modo avaliar minuciosamente o isolamento sonoro a ruídos de percussão e determinar o seu índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado, parâmetro que possibilita a comparação do desempenho acústico entre pavimentos.

É de notar que, apesar de um pavimento gozar de uma grande redução do nível de ruído de percussão ponderado, ΔL_w , comprovada em ensaios laboratoriais, no caso de falta de preocupação na execução de bons remates de bordadura (Fig. 3.8 (1)) e de elementos que atravessem o pavimento (canos/conduatas, pilares, etc.) (Fig. 3.8 (2)), a sua eficácia pode ser posta em causa devido à possibilidade de ocorrência de “pontes acústicas”. Com esta ocorrência, a capacidade isolante do pavimento não é aproveitada ao máximo, dada a possibilidade da propagação do ruído de percussão através desses pontos para os elementos estruturais próximos. Para que tal não aconteça e à semelhança do que acontece com a laje flutuante, o elemento resistente do pavimento flutuante deve estar desligado de pontos rígidos que contactem com elementos estruturais, sendo para isso necessária a inclusão de material resiliente que separe mecanicamente os dois elementos.

A título de exemplo, expressa-se na figura 3.8 o exemplo das boas práticas de execução de remates construtivos para o caso de uma laje flutuante, caso análogo ao verificado no pavimento flutuante.

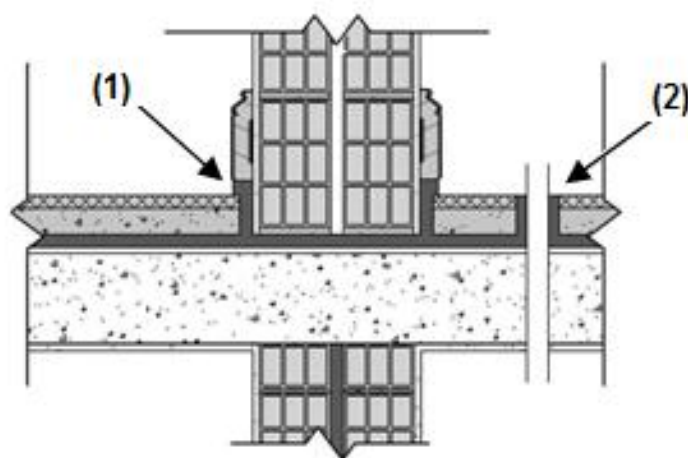


Fig. 3.8 – Exemplos de “pontes acústicas” em laje flutuante, representando o caso genérico dos sistemas flutuantes: (1) remate de rodapé; (2) remate de elementos que atravessam o pavimento [12, 52]

Normalmente, a seleção do sistema de isolamento por parte da entidade executante ou do dono de obra, baseia-se maioritariamente na solução mais económica ou aquela com que está mais familiarizado. Contudo, a escolha deve de ir ao encontro de um sistema de pavimento flutuante otimizado e em equilíbrio em termos de isolamento sonoro e em termos económicos [25]. Para isso compete ao projetista fazer uma seleção de pavimento fundamentada em valores obtidos em ensaios laboratoriais e adaptá-los às necessidades de isolamento que o edifício em projeto compreenda.

4

A CORTIÇA

4.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

O uso da cortiça no quotidiano das civilizações teve início há já muitos séculos atrás, sendo usada pelos egípcios como rolhão de ânforas para transportar líquidos como vinho, azeite, água ou até frutos secos, mel ou cereais, de maneira a preservá-los e mantê-los protegidos e confinados. Também os gregos usaram a cortiça como boias das redes de pesca, seguindo-se aos romanos no séc. I a.C., que a usaram como cortiço para os enxames de abelhas. Além desses, outros foram os destinos dados à cortiça, como o emprego nos coletes salva vidas dos pescadores e o contributo dado no séc. II como produto medicinal contra a calvície [53].

Com o passar dos séculos, a cortiça começou a ganhar importância na sociedade, acabando por ser usada no séc. XV como revestimento de zonas sensíveis de barcos, dada a sua resistência à podridão em ambientes húmidos, com capacidade para produção de malgas, gamelas e calçado, entre outros. Mas foram os frades que iniciaram a sua utilização em função das suas propriedades isolantes, usando a casca de sobreiro como revestimento térmico das paredes internas dos conventos [53]. Assim, foi possível dar o primeiro passo na utilização da cortiça com benefícios ligados à construção.

No ano de 1680, apesar da cortiça ter um uso pouco difundido na sociedade, o beneditino francês Dom Pierre Pérignon, procurador da abadia de Hautvillers, perto de Épernay (Champagne), deu um grande salto para o seu aproveitamento generalizado. Após ter verificado que os tampões de madeira saltavam frequentemente dos espumantes, o benedito francês experimentou usar cortiça em substituição da madeira, obtendo resultados surpreendentes, tanto na conservação como na qualidade, que vieram a impor o uso de rolha de cortiça generalizada nos seus vinhos [53].

Em Portugal, só em 1770 é que a rolha começou a ser indispensável aquando do início do comércio do vinho do Porto, tendo como mais-valia a preservação e o amadurecimento na garrafa de vidro, apesar de ser só através de manufatura artesanal. Porém, só no primeiro quarto do séc. XX é que a produção de cortiça começou a industrializar-se, tornando Portugal no primeiro produtor mundial.

Atualmente, Portugal mantém-se no primeiro lugar no sector corticeiro a nível mundial, o único produto que coloca o nosso país no topo do *ranking*, tanto na produção, transformação, inovação e exportação, como na investigação e desenvolvimento, com mais de 600 estabelecimentos fabris em atividade, evoluindo substancialmente o seu setor na industrialização e comercialização [3, 54]. Em 2010 registou-se uma produção mundial de aproximadamente 201.428 toneladas de cortiça, destacando-se Portugal com quase metade dessa produção (49,6%) (Fig. 4.1) [55], sendo, por isso, a cortiça parte integrante do património ecológico, natural e económico português.

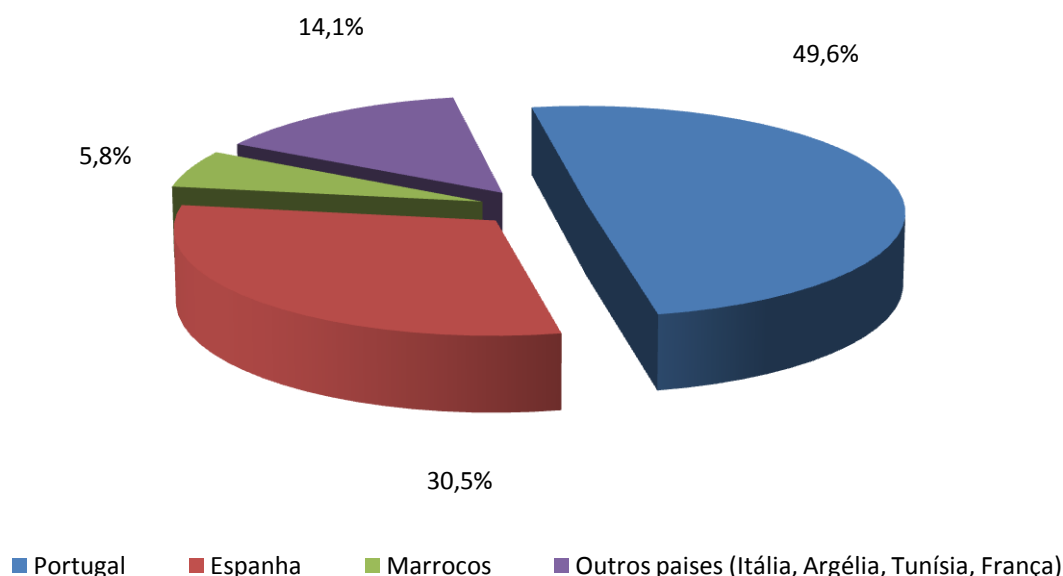


Fig. 4.1 – Distribuição da produção média anual de cortiça a nível mundial no ano de 2010 [55]

As empresas corticeiras distribuem-se por dez distritos, sendo Aveiro (Santa Maria da Feira) e Setúbal os maiores responsáveis pela geração de emprego neste setor, com 75% e 12% de um total de dez mil postos de trabalho criados pela indústria da cortiça. Segundo dados de 2008, existem aproximadamente 700 empresas a laborar no setor da cortiça em Portugal que produzem cerca de 40 milhões de rolhas por dia, sendo feitas 35 milhões no Norte do país (apesar destes valores terem decaído nos últimos anos) [4].

4.2. FABRICO DE CORTIÇA

4.2.1. O SOBREIRO

O sobreiro (Fig. 4.2) ou sobro, é uma planta dicotiledónea da família das fagáceas, que faz parte do género *Quercus*. De nome científico *Quercus suber* L., o sobreiro é uma árvore de crescimento lento e de grande longevidade, podendo atingir 250 a 300 anos, e é a única quercínea produtora de cortiça, distinguindo-se assim dos carvalhos devido à sua casca tão volumosa de tecido suberoso e à sua capacidade de se regenerar naturalmente após cada extração, na qual reside um grande interesse económico pela sua exploração [55]. Em Portugal, dos 88.705 km² de território, 1/3 encontra-se arborizado, ocupando o sobreiro o primeiro lugar de espécies predominantes, com 23,5 % dessa área (2005), seguindo-se o pinheiro-bravo com 22,6 % [55].

Característico da parte ocidental da bacia do Mediterrâneo (Fig. 4.2) devido às suas condições climáticas, o sobro ocupa uma área de 2,3 milhões de hectares em todo o mundo, podendo ser encontrado em grande quantidade no Norte de África, Sul de França, Itália, Espanha e especialmente em Portugal, sendo a árvore mais disseminada, desde Trás-os-Montes até ao Algarve, encontrando-se em maior número e qualidade nas zonas Centro e Sul do país [3, 53].

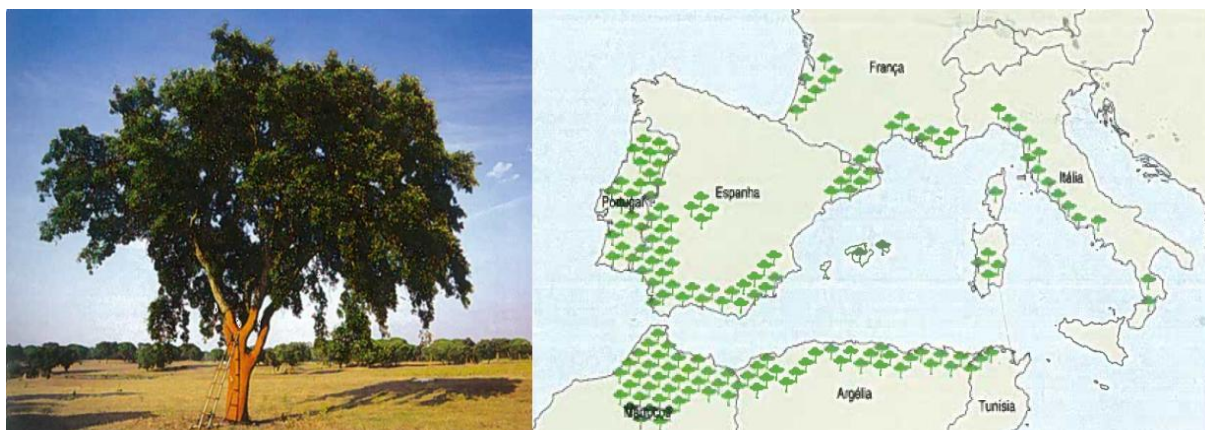


Fig. 4.2 – Sobreiro (esq.) e ocupação do sobreiro na bacia do Mediterrâneo (dir.) [53]

Caracterizado por ter um tronco curto e grosso que se bifurca a uma pequena altura do solo, revestido por profusa ramaria, o sobreiro pode ser decomposto em três partes distintas: raízes, tronco e copa. Distinguindo-se das outras partes do sobreiro por ser aquela com maior proveito económico, o tronco ou fuste, conhecido como a fonte de produção da cortiça natural, é formado por uma única peça cuja espessura pode chegar aos 12 metros de circunferência na base [3]. Transversalmente, é constituído por três grandes camadas (Fig. 4.3): o lenho, que apresenta minúsculos orifícios donde goteja um líquido quando o corte se efetua na Primavera ou no Verão, o entrecasco, que é uma camada pouco espessa que envolve o lenho e o protege das agressões ambientais, e a cortiça, que reveste o exterior do entrecasco, sendo uma parte da periderme e aquela que é de elevado interesse económico.

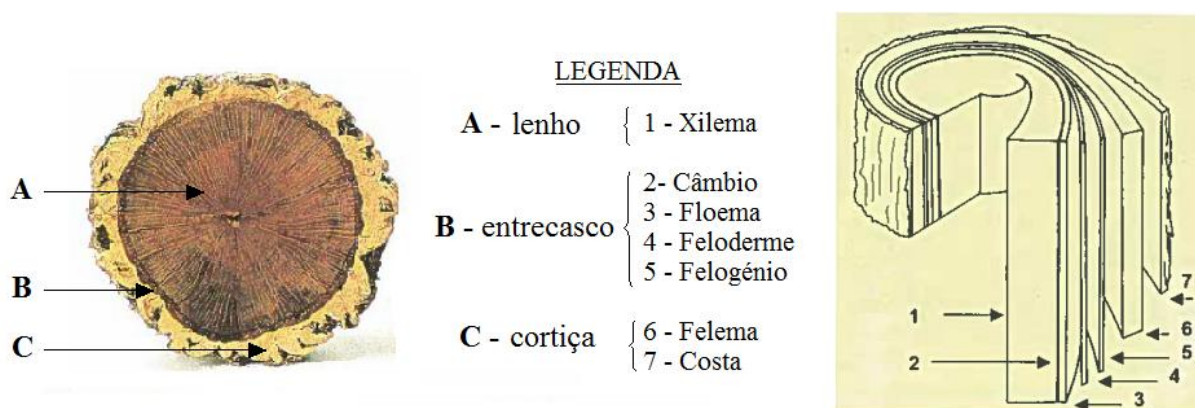


Fig. 4.3 – Constituição de um tronco de sobreiro com cortiça em reprodução [Adaptado de 3]

A árvore frutifica a partir dos 15 a 20 anos, altura em que se torna adulta e deixa de ser apelidada de chaparro – período em que a área de raizame é superior à área de copa. Porém só começa a lançar semente, a lande, em abundância depois de atingir os 30 a 40 anos, semente essa que é usada maioritariamente para alimentar o gado suíno. Mas o que torna o sobreiro tão único é a sua capacidade de produzir tecido suberoso até aos 150 ou mesmo 200 anos, possibilitando aproximadamente 15 a 18 descortiçamentos durante os seus longos anos de exploração [53].

Apesar do sobreiro apresentar tolerância a qualquer solo natural onde nenhuma outra cultura é rentável, cabe à subericultura (conjunto de conhecimentos e saberes ligados à geração, exploração e

resguardo do sobreiro) assumir cuidados especiais à produção do montado de sobreiro. Como o solo português não é muito adequado à sua proliferação e continuidade da espécie, desde há muitos anos que o sobreiro é considerado uma espécie protegida dada a sua importância para o país e para a prevenção da desertificação de zonas pouco férteis [53].

Com a crescente valorização e aumento do uso da cortiça, outros países fora da bacia mediterrânica ocidental tentaram cultivar o sobreiro mas tiveram pouca eficácia [53]. Em Portugal tem-se verificado uma diminuição da taxa de sobrevivência das novas plantações, apesar das políticas de reflorestação dos montados de sobreiro [54], facto que remete à necessidade de se tomarem medidas mais abrangentes de apoio à sobrevivência através de ajudas económicas à florestação e manutenção [3].

4.2.2. A CORTIÇA

A produção de cortiça engloba uma congregação de conhecimentos e saberes no que toca à sua extração, preparação e transformação, tudo com o objetivo de tirar o máximo proveito deste recurso tentando abraçar as bitolas de um desenvolvimento sustentável.

Sendo um tecido vegetal que a botânica denomina de *felema*, a cortiça tem como função proteger e isolar as camadas mais interiores que são sensíveis às intempéries [53]. Trata-se de uma matéria-prima única composta por uma estrutura celular alveolar compacta sem espaços intercelulares, disposta no formato de uma colmeia de pequenas células agrupadas em camadas sucessivas, preenchidas com uma mistura gasosa quase idêntica à do ar, contendo cada centímetro cúbico de cortiça, em média, 40 milhões de células [54, 56].

A *cortiça virgem* (Fig. 4.4) é a primeira camada produzida pelo sobreiro e é extraída quando a árvore tem condições para auferir um descortiçamento, aproximadamente entre os 20 e 35 anos de idade. Devido ao atrito gerado pela germinação do chaparro que faz com que ocorram fraturas no tronco da árvore, a primeira camada de descortiçamento não é adequada para o fabrico de rolhas, destinando-se à trituração e produção de aglomerado.

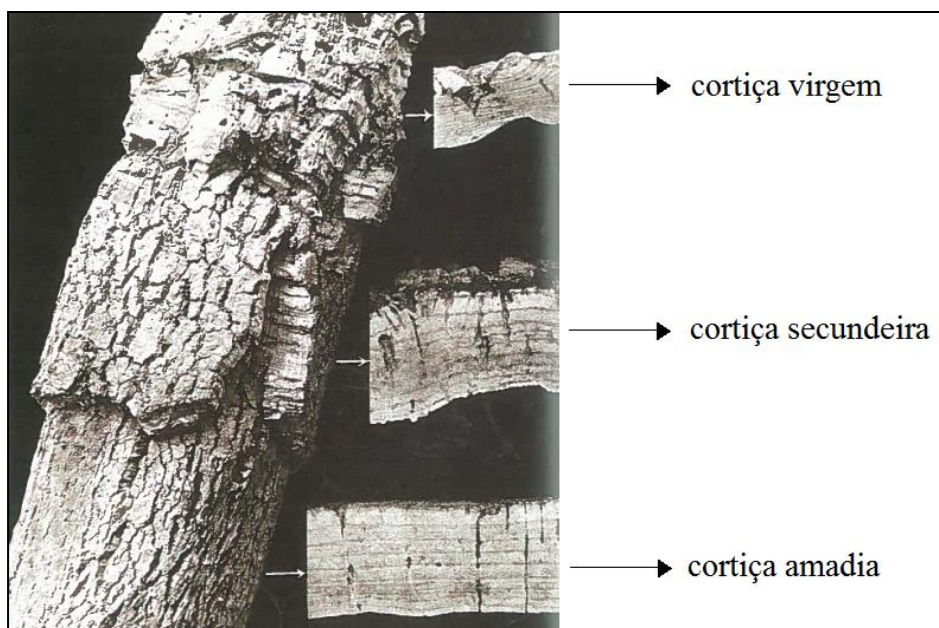


Fig. 4.4 – Diferentes tipos de cortiças obtidas a partir do sobreiro [53]

A segunda camada de cortiça produzida pelo sobreiro tem a designação de *cortiça secundária* (Fig. 4.4). Todavia esta cortiça também não é usada para rolhas uma vez que após o descortiçamento da *cortiça virgem*, o tronco sofre um forte engrossamento e fratura a segunda cortiça. Após o segundo descortiçamento e depois do período de produção de cortiça, obtém-se o último tipo, a *cortiça amadia* (Fig. 4.4), sendo esta uma camada de espessura uniforme com poucas fraturas de pequena profundidade muito por causa da diminuição das tensões resultantes do agora lento engrossamento do tronco. A matéria-prima desta última camada é aquela que é usada no fabrico de rolhas de cortiça natural e o seu material sobranter, em conjunto com a cortiça das duas primeiras camadas, é triturado e aglomerado para dar origem a novos produtos [3].

Após cada descortiçamento, o felogénio – uma das subcamadas do entrecasco responsável pela geração de cortiça – é destruído. No entanto, regenera-se uma nova camada de felogénio no interior do entrecasco que é responsável pela geração da nova cortiça. Graças a esta capacidade de regeneração do felogénio é possível fazer uma exploração do sobreiro de modo sustentável através das consecutivas extrações de cortiça. Estas extrações podem realizar-se em períodos regulares que devem permitir a obtenção de uma camada de cortiça com espessura adequada à exploração industrial.

Ao contrário do sobreiro que se encontra essencialmente no centro-sul do país, a indústria da cortiça concentra-se principalmente no norte [56]. Decenalmente, o valor médio de produção mundial de cortiça é aproximadamente 150 kg/hectare, contudo em Portugal esse valor pode chegar aos 5.000 kg/hectare [3]. No entanto, apesar da grande quantidade de cortiça aqui produzida, o aumento dos custos de extração tem vindo a dificultar a subsistência neste mercado [56].

A produção de cortiça depende principalmente da superfície a descortiar, tendo uma produtividade média de 8 a 11 kg/m² de área descortificada em cada ciclo de produção. À medida que os anos passam, a área superficial de tronco e de pernas aumenta, levando a um aumento da área descortificada e da produção de cortiça, sendo um dos factos justificáveis do aumento anual médio de 4% da produção de cortiça em Portugal [3, 54].

4.2.3. O DESCORTIÇAMENTO

O descortiçamento (Fig. 4.5) é uma operação delicada que consiste em extrair a camada exterior do sobreiro, a cortiça, através dum corte suave seguido de arrancamento da prancha de cortiça. A arte de descortiar é executada manualmente com um *machado corticeiro* com cortes em linhas verticais e horizontais em volta do tronco e das pernas, mediante golpes com força suficiente de maneira a penetrar na cortiça sem danificar o felogénio do entrecasco, permitindo retirar grandes pranchas retangulares que, com o auxílio do cabo ou da lâmina do machado, são alavancados [53].



Fig. 4.5 – Fases do descortiçamento de sobreiros adultos [3]

Ocorre no final da primavera ou durante o verão, devido à facilidade de separação das pranchas conferida pela formação de novas células na interface entre as pranchas e a nova cortiça e também à baixa humidade desta época que evita a degradação do entrecasco, não prejudicando o desenvolvimento da árvore [3, 53]. Além do descortiçamento do tronco do sobreiro no verão, no inverno também se descortiça outro tipo de cortiça, a *cortiça virgem de falca* dos ramos da poda, que tem como destino a produção de aglomerados. Porém, a produção deste tipo de cortiça tem decrescido progressivamente ao longo dos anos já que a sua extração é bastante trabalhosa e a rentabilidade económica bastante baixa.[3]

No entanto, o descortiçamento não é liberal, já que é proibido descortiar sobros com menos de 70 centímetro de perímetro e não é permitido extrair cortiça fora da sua idade legal, tendo um intervalo mínimo de nove anos de desenvolvimento [3, 53].

Após o descortiçamento e como meio de controlar e gerir a exploração dos sobros, marcam-se no tronco dos sobreiros descortçados, a tinta branca, o último algarismo do ano em que se realizou o descortiçamento para dar início a um período de repouso. Posteriormente, as pranchas de cortiça são ordenadamente empilhadas no campo, com a parte convexa para cima, de maneira a contrariar a curvatura da cortiça e a organizar a extração [3]. Aí permanecem expostas ao ambiente durante seis meses permitindo a sua maturação até dar-se a estabilização da cortiça.

4.3. PROPRIEDADES DA CORTIÇA

Já no séc. XV, Afonso de Albuquerque enaltecia a cortiça como sendo um material de características notáveis de impermeabilidade, pela sua estrutura resistente e por não se degradar em contacto com a água [53].

A cortiça oferece um conjunto de propriedades únicas que, até à atualidade, nenhum outro engenho humano conseguiu imitar ou ultrapassar. Apresenta-se como um material resistente e bastante leve (densidade aproximada de $0,2 \text{ kg/dm}^3$ [3]), de estrutura anisotrópica, impermeável graças à suberina das paredes das suas células, compressível e elástico, com excelente comportamento térmico, acústico e vibratório, de combustão lenta sem libertação de quaisquer gases tóxicos, resistente ao atrito, não poluente, inócuo para a saúde e com uma boa resistência a intempéries, dado que sob ação da humidade mantém-se inalterado e imputrescível. Mas, acima de tudo, é um material 100% natural, reciclável e renovável, três propriedades imprescindíveis quando a preocupação social é obter soluções cada vez menos poluidoras e mais amigas do ambiente. [4, 54]

As células da cortiça em estado de compressão sofrem três etapas: a deformação “elástica” com limite de tensão de 1 MPa, o colapso permanente das células por encurvadura das paredes celulares e o esmagamento/densificação das células [3]. Porém, a cortiça não tem um comportamento puramente elástico uma vez que após a aplicação de uma tensão não se obtém instantaneamente uma deformação, e após a tensão recupera gradualmente as suas dimensões iniciais em função da componente viscosa de deformação, embora perca a capacidade de reversibilidade total, sendo a sua irreversibilidade função do grau de deformação aquando da solicitação e da componente viscosa de deformação (Fig. 4.6). A este comportamento mecânico de elasticidade retardada dá-se o nome de viscoelasticidade [53, 54].

Para acelerar a velocidade de deformação, o aumento da temperatura e da humidade ajudam na deformação sob carregamento, e após cessar a solicitação, estimula a recuperação da cortiça à sua posição original. O mesmo acontece na fluência, ou seja na deformação lenta e progressiva sob a ação de uma tensão constante ao longo do tempo, por exemplo, a deformação num soalho de cortiça

provocada pelo efeito de um pé de mesa é amplificada quando a temperatura e da humidade excedem valores limites que propiciam tal efeito [3].

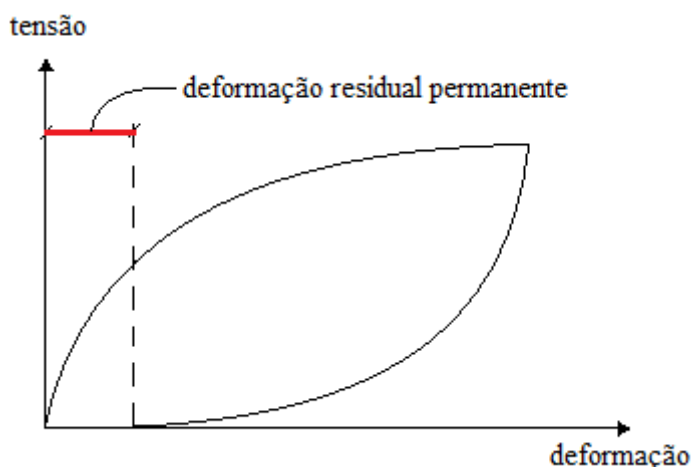


Fig. 4.6 – Gráfico esquemático do comportamento viscoelástico da cortiça [Adaptado de 3]

Tanto na relaxação como na fluência, a deformação é lenta e ocorre em pequenos reajustes a nível molecular das paredes celulares, conduzindo a pequenas deformações irreversíveis, dado que as moléculas tomam novas configurações e posições que levam a deformações macroscópicas que posteriormente tendem para uma estabilização da deformação. Em condições fixas, a velocidade de deformação diminui com o tempo, não havendo uma fluência estacionária linear, apenas um comportamento aproximado a uma curva logarítmica [3].

Uma das características da cortiça é o seu índice de vazios, já que uma prancha de cortiça amadia contém cerca de 60% de elementos gasosos, facto esse que explica a sua extraordinária leveza [4]. Todavia, apesar das células da cortiça serem hermeticamente fechadas com um gás nelas contido, poder-se-ia pensar que tal circunstância proporcionasse um “efeito almofada” como mecanismo de absorção mecânica. No entanto, tal não ocorre porque as paredes das células deformam-se antes que o ar interior expanda, propagando a vibração mecânica e diminuindo a sua capacidade absorvente [3]. Apesar desse facto não se processar, a cortiça continua a ter uma grande capacidade de absorção das ondas mecânicas.

4.4. PRODUTOS DA CORTIÇA

Atualmente, a parte mais valiosa do sobreiro é a sua casca, representando cerca de 3% das exportações portuguesas [54]. A cortiça que é extraída da casca é utilizada no fabrico de uma imensidão de produtos, onde a rolha é o produto de eleição (mais de 50%). De maneira a não gerar resíduos, os desperdícios são reduzidos a granulados e reutilizados nos mais diversos produtos, podendo até ser combinados com outros produtos, como a borracha, a fibra de coco, etc. [54]. Mas foi em 1891 que se deu o salto na elaboração de produtos corticeiros, quando o norte-americano John Smith acidentalmente descobriu a possibilidade de fabricar cortiça aglomerada, abrindo novos horizontes para a utilização da cortiça [53].

O descortiçamento dos sobreiros é uma atividade que produz variadíssimas qualidades de cortiça. Com a preocupação de maximizar o aproveitamento da matéria-prima, depois de retiradas as rolhas e os discos de cortiça natural, a matéria sobrando desse processo em conjunto com a cortiça de qualidade inferior (cortiça virgem, secundária e amadia de má qualidade) é triturada e aglomerada através de prensas, dando origem a vários produtos de características inigualáveis [5, 54].

Atualmente, estes aglomerados de cortiça dividem-se em duas categorias:

- Aglomerado Composto de Cortiça – também conhecido por “aglomerado branco”, é constituído por partículas de cortiça que são aglutinadas por ação conjunta de pressão, temperatura e um adesivo aglomerante de substância distinta da matéria do sobreiro – utilizado no fabrico de rolhas aglomeradas, revestimentos, painéis, blocos, juntas, vedações e revestimentos;
- Aglomerado Puro Expandido – vulgarmente conhecido por “aglomerado negro”, é obtido por auto-aglomeração térmica dos grânulos de cortiça graças a um aglomerante resinoso (suberina) obtido através da exsudação dos grânulos quando colocados em autoclaves e submetidos a grandes temperaturas e pressões – usa-se como material de isolamento térmico, acústico e vibratório [53, 57].

Além destes dois tipos de aglomerados, a adição de outros materiais ao Aglomerado composto de cortiça dá origem a outros tipos de produtos, por exemplo, o Aglomerado composto de cortiça com: borracha (*rubbercork*), plástico, asfalto, cimento, gesso, caseína, etc [57].

Estes produtos dão origem às mais variadas aplicações, podendo ser usados para produzir bóias, revestimentos, isolantes térmico, acústico e vibratório, apoios antissísmicos, juntas de dilatação, indústria do calçado, decoração, *parquets*, bolas desportiva, juntas de motores, etc. [54]. Na indústria da construção, a cortiça tem sido utilizada para diversos fins, desde o acabamento de pavimentos, passando pela absorção sonora em paredes e tetos, efeito decorativo, isolante térmico e acústico e até mesmo como material de preenchimento de juntas de dilatação.

Aplicando devidamente estes aglomerados de cortiça em pavimentos, obtém-se um produto de grande valor estético com elevado grau de conforto, tirando proveito das suas propriedades. Dos aglomerados anteriormente enunciados, o composto de cortiça é o mais comum entre os pavimentos flutuantes, servindo como revestimento e/ou *underlay* do elemento resistente do pavimento flutuante (Fig. 4.7), ou até mesmo como elemento integrante do pavimento [54, 58]. Graças aos avanços tecnológicos, é possível fabricar diversos aglomerados, variando a sua granulometria, densidade, aspeto e forma, abrindo assim novos horizontes à criação de novos produtos de pavimentos flutuantes.



Fig. 4.7 – Produtos comerciais de aglomerado composto de cortiça resultantes da aglomeração das partículas de cortiça que servem de revestimento e *underlay* de pavimentos flutuantes [58]

Apesar dos aglomerados terem na sua constituição cortiça que foi rejeitada da produção de rolhas de cortiça, a questão da má qualidade do produto não é posta em causa uma vez que a aglomeração das partes fracas da cortiça, através da coesão conferida pelo aglomerante entre os granulados, dá origem a um produto de elevada qualidade [3].

4.5. AGLOMERADO COMPOSTO DE CORTIÇA EM PAVIMENTOS

A seleção da solução de pavimento a adotar num edifício deve respeitar um vasto leque de exigências funcionais, especialmente a segurança, a habitabilidade e a durabilidade, tendo sempre o cuidado de garantir ao longo do tempo útil de utilização, as condições necessárias ao conforto dos utentes [5].

Hoje em dia, com a questão da sustentabilidade e da procura por matérias-primas renováveis, a cortiça tem sido considerada um produto de eleição por diversos profissionais, desde arquitetos, engenheiros, até comerciais, que têm mostrado interesse pela cortiça e pela sua aplicabilidade.

Uma das aplicações do aglomerado composto de cortiça tem sido no fabrico de pavimentos flutuantes (Fig. 4.8). Apesar da maciça utilização de polímeros expandidos, o aglomerado mantém-se persistentemente no mercado, sendo cada vez mais reconhecido pelas suas qualidades, tanto por ser um material renovável como pela capacidade de controlo da propagação do ruído de percussão proveniente das vibrações mecânicas induzidas por impacto no interior dos edifícios [3]. A dissipação de energia destes materiais resulta da componente viscosa da deformação conferida pela cortiça, influenciada pela rigidez e pelo fator de perda do aglomerado [25], podendo ser limitadamente controlável, por exemplo, através da densidade do aglomerado de cortiça [3].

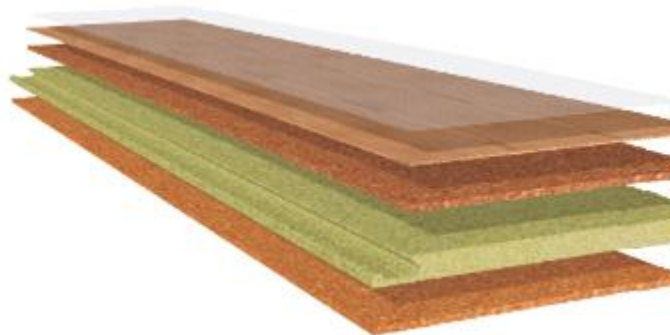


Fig. 4.8 – Decomposição de um pavimento flutuante constituído por um elemento resistente em MDF (a verde), revestido com aglomerado composto de cortiça, com envernizamento superior [52]

Apresentando as mesmas características que a cortiça natural, o aglomerado composto de cortiça apresenta uma boa resistência ao fogo e consegue manter as suas propriedades em função de mudanças moderadas da temperatura. Não liberta gases tóxicos quando entra em combustão, tem alta elasticidade, uma baixa condutividade térmica e a capacidade de absorver vibrações [3].

No que toca à constituição dos pavimentos flutuantes com aglomerado composto de cortiça, é importante que o decorativo de cortiça (Fig. 4.8 - camada superior do painel) seja rígido e denso para que a deformação causada por cargas de compressão elevadas seja pequena e parcialmente recuperável, sendo necessário que, para tal, a espessura de cortiça seja a mais fina possível dentro das

necessidades acústicas em causa. No caso em que a camada inferior do pavimento flutuante, *underlay*, seja em cortiça, a resiliência do aglomerado beneficia o desempenho acústico do pavimento já que lhe confere a capacidade de isolamento sonoro de vibrações mecânicas, principalmente a altas frequências. A sua granulometria, conjugada com a devida seleção de aglomerante e a tensão de prensagem conferem a este aglomerado uma alta taxa de dissipação de energia mecânica. No entanto não existe informação no caso em que todas as camadas do pavimento são compostas por cortiça. Apesar do conhecimento destas particularidades, não é fácil prever o comportamento deste aglomerado de cortiça já que carece de uma teoria unificada que permita prever o seu comportamento acústico a partir de valores de um pequeno número de propriedades [3].

Estes pavimentos têm como condições ambientais apropriadas 40 a 60% de humidade relativa a 20 °C. Nos casos em que se use intensamente o aquecimento, a humidade do ar pode baixar substancialmente, chegando a níveis que levam o pavimento a secar. Sendo a cortiça e a madeira materiais naturais, esta variação da humidade relativa pode levar à retração do pavimento. Para isso devem ser tomados todos os cuidados com a exposição do pavimento à luz do sol direta sob largos períodos, uma vez que um dos problemas associados aos aglomerados compostos de cortiça e também à madeira, é a tendência de variar as suas características visuais e resistentes sob a ação do Sol [5].

Atualmente, existem no mercado inúmeros pavimentos flutuantes com aglomerado de cortiça incorporado graças aos diversos métodos de laboração que cada fábrica possui, estando assim disponível uma grande gama de pavimentos de excelente qualidade, que apesar de serem mais caros que os revestimentos de cortiça colados, apresentam uma melhoria na redução a ruído de impactos [5].

5

DERIVADOS DE MADEIRA

5.1. TIPOS DE DERIVADOS

Ao longo dos tempos, a madeira tem tido uma grande aplicabilidade nas mais diversas áreas, sendo a área da Construção Civil a que mais emprega esta matéria-prima. No entanto alguns defeitos inerentes à madeira maciça comprometiam o seu bom desempenho, especialmente nos pavimentos. Na tentativa de encontrar uma alternativa à madeira maciça e graças aos avanços tecnológicos, surgiram os *derivados de madeira*, placas compostas de madeira aglutinada com resinas próprias [59].

As placas de derivados de madeira englobam um conjunto de diferentes materiais, desde o lenho, o ligante, até aos aditivos que lhe dão o carácter hidrófugo, ignífugo e de preservador. Existem vários tipos de placas no mercado, podendo estes ser classificados em função da atividade de produção a que estão associados [59]. Uma das classificações mais usadas tem por base a diferenciação das placas em função do grau de transformação a que se submeteu o material lenhoso de origem (Fig. 5.1).

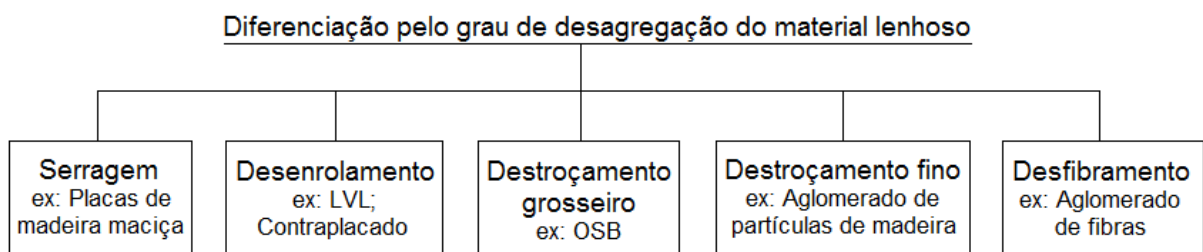


Fig. 5.1 – Diferenciação das placas de derivados de madeira em função do grau de desagregação da madeira (OSB – Oriented Strand Board, LVL – Laminated Venner Lumber) [59]

Graças a esta variedade de produtos de derivados de madeira, é possível cobrir uma larga gama de massas volúmicas com diferentes aplicabilidades, o que antes não se conseguia apenas com as espécies de madeira maciça existentes.

Como a massa volúmica influencia o desempenho da placa através do condicionamento das suas propriedades físicas e mecânicas durante o tempo útil de utilização, na escolha do tipo de placa a empregar num dado ambiente é importante que a seleção da massa volúmica tenha em conta as condições de utilização, desde a identificação da classe de serviço à classe risco. Graças a este leque de produtos, na Construção as placas de derivados de madeira podem ser utilizadas para diversos fins, como tetos, paredes ou mesmo pavimentos [60].

Tendo ganho reconhecimento pela sua leveza, versatilidade e resistência, os derivados de madeira deram origem aos pavimentos flutuantes, sistema que tem vindo a ser usado na construção e que tem sido uma mais-valia no conforto habitacional.

Os derivados de madeira apresentam as seguintes características:

- Boa estabilidade dimensional;
- Maior resistência no plano da placa;
- Grande homogeneidade de tensões ao longo dos três planos ortogonais;
- Elevada resistência à degradação e ao desgaste;
- Boa resistência à propagação das chamas;
- Grande variabilidade de conceção dimensional;
- Boa relação resistência/peso;
- Possibilidade de utilização industrial de madeira oriunda de espécies florestais secundárias;
- Diminui os desperdícios lenhosos, pois incorpora restos resultantes da serração e ainda uma percentagem de casca na produção das placas de derivados de madeira;
- Resistente ao choque, à humidade e com grande durabilidade [59].

Seguidamente são apresentados os dois derivados de madeira que fazem parte da constituição dos pavimentos flutuantes que servem de objeto de estudo desta dissertação, o contraplacado e o MDF (aglomerado de fibras).

5.2. DERIVADOS DE MADEIRA USADOS EM PAVIMENTOS FLUTUANTES

5.2.1. O CONTRAPLACADO

O contraplacado surgiu aquando da necessidade de criar um material mais homogêneo, com características muito idênticas à madeira maciça e que permitisse o aproveitamento de ramos, toros pequenos e de resíduos da maquinaria da madeira. Graças a esta evolução tecnológica, passou a ser possível fabricar painéis de contraplacado que são mais fáceis de trabalhar e mais económicos do que a madeira maciça [60].

O contraplacado resulta da colagem de várias folhas de madeira (podem ser de diferentes espécies de árvores) preparadas com os fios cruzados e geralmente com um ângulo reto, coladas e prensadas através de uma resina seleccionada em função do ambiente de exposição da placa (meio interior seco, interior húmido ou exterior), dando-lhe uma certa rigidez [59].

Dentro da família dos contraplacados, existem três tipos que se distinguem em função da sua composição: o Contraplacado – composto pela sobreposição de folhas de madeira coladas, o Contraplacado Lamelado – que é uma sanduíche de folhas com barrote, e o Contraplacado Laminado – que resulta de uma sanduíche de folhas com pechas de madeira laminada (Fig. 5.2).



Fig. 5.2 – Tipos de contraplacado em função da sua composição [59]

Dos três tipos de contraplacados descritos na figura 5.2, o contraplacado de folhas sobrepostas é o mais comum no campo de aplicação de pavimentos, sendo aquele que é usado nas pranchas de alguns pavimentos flutuantes que são alvo de estudo nesta dissertação.

O contraplacado é constituído por três elementos integrantes: a alma, a folha e o ligante. Do desenrolamento dos toros da madeira, ou por sucessivos cortes, obtêm-se camadas finas que se denominam por folhas, que são acopladas a uma folha central de maior espessura, a alma, através da utilização de resinas sintéticas como ligante e a prensagem sob fortes pressões [59].

São geralmente compostos por um número ímpar de folhas de 2 a 4 mm de espessura, de maneira a manter a simetria de ambos os lados em relação ao plano médio da folha central. As folhas são preparadas em camadas sobrepostas com a orientação das suas fibras perpendicularmente em relação às camadas adjacentes (Fig. 5.3), sendo que cada camada é composta por uma única folha de madeira ou por várias folhas dispostas no mesmo plano. No final é possível obter painéis de contraplacados de 3, 5, 7 ou até 9 camadas, de alta resistência à flexão e às deformações por empeno [59, 60].

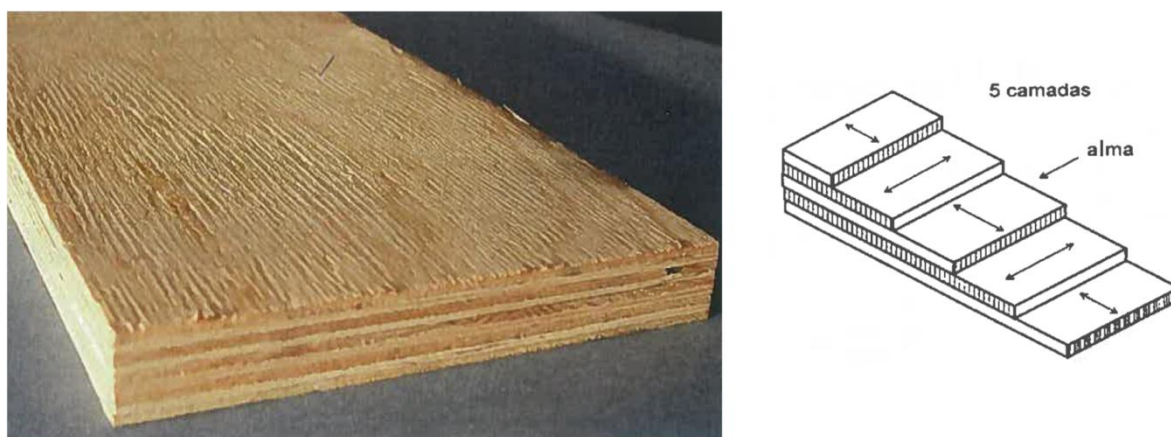


Fig. 5.3 – Placa de contraplacado e disposição da orientação perpendicular das fibras de cada folha em relação às camadas adjacentes [59]

Graças a esta sobreposição aliada ao cruzamento das fibras entre camadas é possível conferir ao contraplacado uma maior resistência à fissuração em relação aos outros tipos de derivados de madeira e uma maior estabilidade dimensional em relação às placas de madeira maciça, uma vez que a tendência das folhas incharem ou retraírem na direção perpendicular às fibras por aumento do teor de humidade é restringida pela resistência das folhas adjacentes. Além disso, quando são comparados dois contraplacados com a mesma espessura, aquele que tiver folhas mais finas tem mais estabilidade devido ao efeito de contraventamento e a probabilidade de ocorrência de fendimentos será menor. Porém, é de salientar que no que toca ao inchamento da placa associado ao aumento da espessura, o contraplacado apresenta um aumento dimensional igual ou superior ao valor do aumento radial da madeira maciça (5%) [59].

Geralmente produzido com uma massa volúmica entre 400 kg/m^3 e 700 kg/m^3 e com um teor em água de 8% a 10% [59], o contraplacado tem a vantagem de não comprometer a qualidade das folhas vizinhas na presença de um nó numa das suas folhas. Tal não acontece com as peças maciças uma vez que a presença de um nó implica a propagação negativa da sua presença às camadas vizinhas [59].

Os fatores que influenciam a durabilidade dos contraplacados são os seguintes:

- Espécie de madeira – no caso de contraplacado de diferentes espécies, a sua durabilidade é função da durabilidade natural da folha da espécie menos resistente;
- Borne e Cerne – o cerne (camada interna do tronco) é mais durável que o borne e quando se dá a presença de borne em contraplacados, a durabilidade biológica passa a ser comprometida pela resistência do borne;
- Espessura das folhas – a durabilidade pode ser acrescida para contraplacados constituídos por folhas finas e/ou de espécie permeável como resultado da maior penetração da cola nestas folhas, aumentando assim a sua durabilidade em relação a contraplacados de folhas mais grossas;
- Tipo de resina – resinas com propriedades fungicidas e inseticidas podem favorecer a durabilidade dos contraplacados;
- Qualidade do contraplacado – a presença de defeitos, como por exemplo falhas entre folhas ou nós nas folhas exteriores ou interiores, pode diminuir a durabilidade do contraplacado ao facilitar a entrada de água para o seu interior, permitindo a sua retenção e deterioração [59, 60].

5.2.2. AGLOMERADO DE FIBRAS - MDF

O MDF (*Medium Density Fibreboard*) é um tipo de placa de aglomerado de fibras que é originado pelo processo de fabrico por via seca. É fabricado a partir de fibras lenho-celulósicas sujeitas a altas condições de calor e pressão, que graças à coesão entre fibras através das suas propriedades adesivas, permite obter uma placa rígida. Este aglomerado distingue-se pelo seu comportamento isotrópico, de elevada estabilidade dimensional no plano da placa relativamente à madeira maciça devido à distribuição aleatória das fibras no seu interior. Apresenta uma aparência homogênea, de superfície suave com possibilidade de um acabamento perfeito em termos de bordadura [59].

Fazendo parte integral da classe das placas de aglomerado de fibras obtidas por via seca, tendo por isso um teor em água de aproximadamente 12% na altura final do seu fabrico, o MDF é decomponível em quatro tipos de placas em função da sua massa volúmica, conforme o quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Variação do tipo de MDF em função da sua massa volúmica [59]

Massa volúmica (kg/m ³)	[450; 550]	]550; 650]	]650; 800[	≥ 800
Tipo de MDF	MDF ultraleve	MDF leve	MDF	MDF denso
Simbologia	UL-MDF	L-MDF	MDF	H-MDF

O ambiente de aplicação das placas de MDF influencia o tipo de placa a ser usada, devendo ser usadas em ambientes secos, as placas MDF, L-MDF e UL-MDF, sendo aconselhável o uso de placas de H-MDF no caso de ambientes húmidos [59].

Apesar deste tipo de placa de aglomerado de fibras poder ser produzido utilizando quer espécie Resinosa, quer Folhosa, a Resinosa é aquela que predomina na produção atual. As suas placas são compostas por 82% de fibra virgem, 10% de resina sintética, 7% de águas, 1 % de parafina (derivado

do petróleo) e menos de 0,05% de silicone. Nos aglomerados de fibras, a sua composição é o que define a sua durabilidade, sendo importante controlar as dimensões das fibras, a sua preparação e as características e quantidades de resina [59].

Aquando da aplicação de placas de derivados de madeira, a questão da variação da estabilidade dimensional face à variação da temperatura e da humidade relativa do ar a que vão estar expostas deve ser estudada e comparada com a condição limite estudada em laboratório (Fig. 5.4), de maneira a minimizar possíveis problemas ao nível do desempenho do pavimento. Se essas variações forem excessivas, podem-se registar em serviço anomalias associadas ao inchamento, empeno, aberturas de folgas, destruição dos bordos, delaminação associada à rotura da linha de colagem e podridão da placa, levando assim a um decréscimo das suas propriedades mecânicas, tanto da resistência mecânica como da estabilidade dimensional [59].

Em situações mais severas onde se prevejam condições frequentes de elevada humidade relativa do ar, deve-se optar por placas mais resistentes (Fig. 5.4 – H-MDF) que suportem condições mais adversas. A placa H-MDF tem uma alta resistência à humidade devido à adição extra de resinas de melamina-formaldeído e para que tal seja identificável a olho nu, é-lhe dada uma coloração esverdeada através da adição de pigmentos.

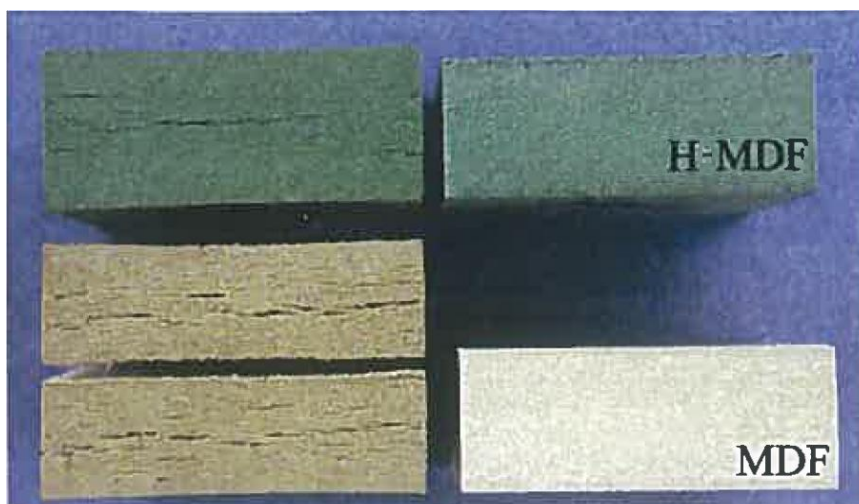


Fig. 5.4 – Provetes de MDF e H-MDF antes e após terem sido sujeitos a ensaios de resistência à humidade, com clivagem total no MDF, de acordo com a NP EN 321 ([61] citado em [59])

As placas de MDF são aplicadas em ambientes interiores secos, como é o caso de pavimentos flutuantes. Por não serem muito resistentes à humidade, a resina utilizada na sua laboração apresenta um preço bem mais baixo quando comparado com as outras resinas usadas na produção de outros aglomerados de fibras, tornando atrativo o seu preço de venda final [59].

Assim, e tal como o que acontece com a madeira maciça, por absorção ou perda de água, as placas de derivados de madeira tendem a entrar em equilíbrio com as condições ambiente em que se inserem. No entanto, a instabilidade dimensional dos derivados de madeira no seu plano vertical é muito maior do que nas peças maciças. Para que tal anomalia seja minimizada, é importante ter um especial cuidado na selagem dos bordos através de material hidrófugo e que haja um controlo do teor em água das placas aquando da sua aplicação, de maneira a prever o diferencial dimensional esperado durante a sua vida útil [59].

Para aumentar também a resistência ao fogo destas placas é comum adicionar produtos ignífugos durante a fase de produção, sendo para isso aditado um pigmento vermelho com o intuito de identificar perfeitamente essas placas [59].

5.3. CUIDADOS COM PAVIMENTOS FLUTUANTES

Apesar de não parecer muito importante o modo como são tratados os pavimentos com derivados de madeira desde a sua fabricação até ao final da sua colocação em obra, tal facto ganha importância quando se reconhece que um indevido manuseamento pode comprometer o futuro funcionamento da placa.

Neste subcapítulo não se pretende dar indicações exaustivas sobre os cuidados a ter durante o transporte, manuseio, armazenamento e aplicação de pavimentos flutuantes, mas sim apontar alguns cuidados básicos a ter segundo as suas características, não devendo ser excluídas as recomendações incluídas na ficha técnica do produto dada pelo fornecedor ou pelo fabricante.

Para minimizar possíveis danos nas placas de pavimentos flutuantes, o transporte e o manuseio das mesmas deve ser cuidadoso de maneira a evitar impactos nos cantos e bordos da placa, devendo ser usadas proteções adequadas.

No que toca a um armazenamento conveniente, as placas devem ser empilhadas deitadas, estando a placa da base afastada do solo e nunca apoiada somente pelos bordos (Fig. 5.5). Nos casos em que as placas empilhadas têm uma espessura maior que 6 mm, estas têm que ser apoiadas em réguas, sendo colocados grupos de réguas a separar conjuntos de dez a quinze placas, dispostas de maneira a ficarem no mesmo enfiamento (Fig. 5.5 a) e a evitar o empeno das placas e a destruição dos bordos. Quando a espessura das placas empilhadas é menor que 6 mm, o conjunto de placas não tem resistência para ser colocado sobre réguas, por isso é necessário um suporte que contacte com toda a superfície da placa inferior, suporte esse que é providenciado por uma placa resistente mais grossa (18 mm) na base da pilha. Quando se prever empilhar as placas apoiando-as nos bordos, deve-se providenciar um suporte que acompanhe o bordo e dê apoio à face das placas (Fig. 5.5 b). Nos casos em que sejam previstas condições ambientais extremas, em relação às condições finais de aplicação, a pilha deve ser protegida por meio de uma tela plástica (Fig. 5.5 c).

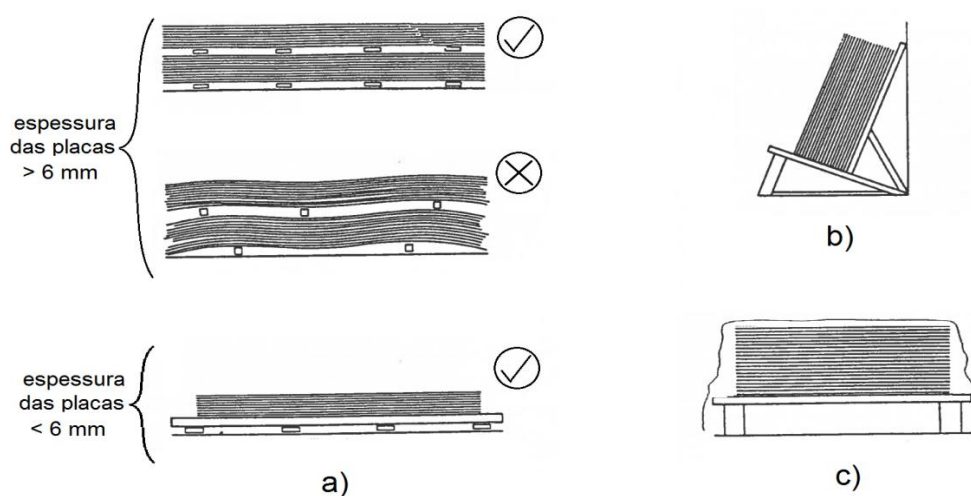


Fig. 5.5 – Esquemas recomendados do armazenamento de placas de pavimentos flutuantes de derivados de madeira [59]

Como as placas quando chegam à obra, geralmente, têm uma humidade relativa inferior à humidade relativa de equilíbrio originada pelas previstas condições de serviço, estas placas devem ser armazenadas de tal maneira que se evitem grandes variações higroscópicas. Estas variações, além de provocarem alterações dimensionais, também podem levar à diminuição das propriedades mecânicas das placas, provocada pela degradação biológica ou à perda de qualidade da colagem entre elementos, comprometendo assim o bom desempenho das placas [59]. Assim, quando a humidade do ambiente de armazenamento é muito diferente da do local de aplicação, é recomendável que uma semana antes da sua aplicação, o pavimento seja acondicionado no local de aplicação, devendo ser dispostas de tal maneira que permitam a circulação de ar entre elas. Só assim é que é possível que as placas atinjam uma humidade relativa igual à de equilíbrio, devendo para isso ser retiradas as proteções do lote no caso de as placas virem empacotadas com fita plástica.

Para um bom desempenho dos pavimentos flutuantes, a base de assentamento não deve ser irregular no momento de instalação e deve conter uma barreira para-vapor quando se trate de pisos térreos. A montagem das placas deve respeitar o método de encaixe do sistema macho-fêmea descrito nos folhetos comerciais, e na falta desse tipo de informação, deve-se ter o cuidado de não adotar métodos não apropriados, como por exemplo, martelar as placas pelos encaixes para facilitar a sua montagem. Estes métodos podem levar à degradação da placa, principalmente dos sistemas de encaixe macho-fêmea. Além disso, devem ser tomados em conta os cuidados de manutenção e conservação do revestimento do pavimento flutuante por envernizamento, enceramento e limpeza com o mínimo de água possível. Também deve ser evitada a exposição solar direta prolongada de zonas do pavimento, devendo para isso ser usadas proteções nos envidraçados que filtrem a radiação solar, uma vez que tal exposição pode levar à descoloração e perda de propriedades dessa zona do pavimento [5].

Só tomando todos estes cuidados é que será possível obter um bom desempenho por parte do pavimento, proporcionando níveis de conforto constantes ao longo da sua vida útil. Além disso, aumenta a garantia de que as suas características constantes nos folhetos comerciais, por exemplo o isolamento sonoro, sejam realmente sentidas pelos seus utilizadores.

6

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

6.1. AMOSTRAS

A realização deste estudo de pavimentos flutuantes com cortiça foi possível graças à colaboração da empresa corticeira SEDACOR [58] que forneceu os pavimentos que foram alvo de análise.

Neste estudo foram ensaiados 26 diferentes tipos de pavimento flutuante (em Abril de 2012), tendo todos eles na sua composição diversos produtos de cortiça produzidos pela mesma empresa, com maior predominância de produtos de aglomerados compostos de cortiça. Para tal, foram disponibilizados 16 pavimentos compostos de cortiça prontos a serem ensaiados (Pav. A ao P – Quadro 6.1), sendo cada pavimento constituído por um conjunto de sete pranchas retangulares de dimensões de 19x91,5 cm², totalizando uma área de 1,217 m² (Fig. 6.1).



Fig. 6.1 – Pranchas e pavimento antes da montagem (atrás) e depois da montagem (à frente) pronto a colocar sobre a laje laboratorial para ensaio

Foi também disponibilizado um pavimento sem *underlay* e diversos subprodutos das linhas de montagem da SEDACOR, para que fossem feitas algumas experiências sugeridas pelo autor da presente tese, criando assim diferentes tipos de *underlay* a partir de combinações de subprodutos da cortiça, originando um total de oito diferentes tipos de pavimentos (Pav. Q ao X – Quadro 6.1).

No entanto, os dezasseis pavimentos e o pavimento sem *underlay* anteriormente mencionados não estavam prontos a aplicar em obra já que, por questões logísticas, o envernizamento final de proteção da camada superior do pavimento não foi aplicado. Porém tal facto não inviabilizou a metodologia de comparação dos vários pavimentos. Para avaliar o efeito do envernizamento no desempenho acústico deste tipo de pavimentos, envernizaram-se os pavimentos G e H, criando assim os pavimentos Q e R (Quadro 6.1). Os resultados do $L_{n,r,w}$ dos pavimentos Q e R são os únicos que poderiam assim ser colocados no folheto comercial uma vez que apenas estes dois pavimentos é que passaram por todas as etapas de fabrico da linha de produção, tornando os seus resultados mais realísticos com a situação final.

Os pavimentos em estudo designam-se comercialmente por “*parquet* flutuante (sistema macho-fêmea)” e são compostos por três camadas distintas (Fig. 6.2): o decorativo – camada superior constituída por aglomerado composto de cortiça; o elemento resistente – que pode ser contraplacado ou MDF; e o *underlay* – subcamada inferior que contacta com o piso estrutural, constituída por aglomerado composto de cortiça.

Todos os pavimentos são dotados de um sistema de encache macho-fêmea que permite a fácil conexão entre as pranchas (Fig. 6.2).

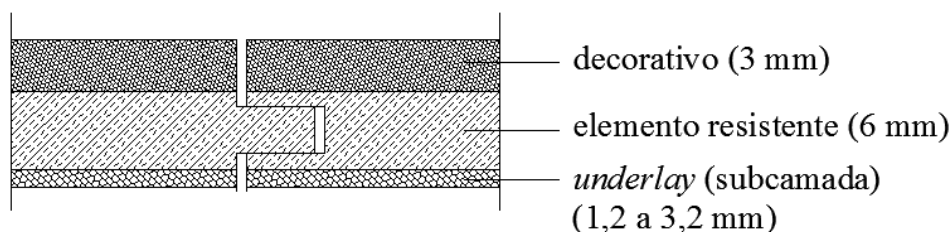


Fig. 6.2 – Corte esquemático das várias camadas dos pavimentos flutuantes de cortiça e do tipo de encaixe

Ao longo dos ensaios, a espessura das camadas do decorativo (3 mm) e do elemento resistente (6 mm) manteve-se constante, variando apenas a espessura do *underlay* consoante o ensaio que era considerado (entre 1,2 e 3,2 mm).

Além desta disposição de camadas, foi ensaiado um outro pavimento (Pav. N) que visa ser totalmente feito de cortiça, constituído apenas por duas camadas de cortiça, uma de alta densidade que desempenha o papel de elemento resistente e de *underlay* (HDC – High Density Cork), substituindo assim o elemento resistente de MDF ou de Contraplacado, e uma outra fina camada de cortiça de média densidade que serve como decorativo. Com o pavimento de duas camadas de cortiça ganha-se algo muito importante: o controlo integral do início ao fim da linha de montagem, não havendo a necessidade de comprar outros produtos para produzir o pavimento flutuante.

Para avaliar a influência do tipo de material em cada uma das camadas, estudou-se diferentes pavimentos com diferentes materiais em cada camada. Com tal metodologia e graças a uma variedade de pavimentos flutuantes e de diversos produtos de aglomerado composto de cortiça, foi possível idealizar alguns casos de estudo combinando os diversos pavimentos expostos no quadro 6.1.

Os resultados do quadro 6.1 estão agrupados em três grupos: Pav. A a P – grupo de pavimentos comerciais integrantes do estudo da influência das diversas camadas; Pav. Q e R – pavimentos envernizados usados para avaliar o efeito do envernizamento; Pav. S a Z – pavimentos propositadamente desenvolvidos para este estudo (não comerciais) onde o que varia é o *underlay*.

Quadro 6.1 – Constituição dos 26 diferentes pavimentos ensaiados (A a P – pavimentos comerciais sem verniz; Q a R – pavimentos comerciais com verniz; S a Z – pavimentos desenvolvidos pelo autor)

Designação do pavimento	Decorativo (3 mm)	Elemento resistente (6 mm)	<i>Underlay</i>	Espessura do <i>underlay</i> (mm)
Pav. A	52 CLK	MDF	51 PL	1,2
Pav. B	52 CLK	MDF	12 PL	1,2
Pav. C	52 CLK	MDF	25 MS	1,2
Pav. D	52 CLK	Contraplacado	51 PL	1,2
Pav. E	52 CLK	Contraplacado	12 PL	1,2
Pav. F	52 CLK	Contraplacado	25 MS	1,2
Pav. G	52 CLK	MDF	51 PL	2,2
Pav. H	52 CLK	MDF	12 PL	2,2
Pav. I	Mono 215	MDF	51 PL	2,2
Pav. J	Mono 215	MDF	12 PL	2,2
Pav. K	012	MDF	51 PL	2,2
Pav. L	012	MDF	12 PL	2,2
Pav. M	52 CLK	MDF	40 BR	1,2
Pav. N	52 CLK	----- HDC -----		-
Pav. O	52 CLK	MDF	12 PL	3,2
Pav. P	52 CLK	MDF	51 PL	3,2
Pav. Q	52 CLK	MDF	51 PL + verniz	2,2
Pav. R	52 CLK	MDF	12 PL + verniz	2,2
Pav. S	52 CLK	MDF	Tira de amortecedor	-
Pav. T	52 CLK	MDF	2/3 de tira de amortecedor	-
Pav. U	52 CLK	MDF	1 tira de 15 MS	-
Pav. V	52 CLK	MDF	2 tiras de 15 MS	-
Pav. W	52 CLK	MDF	Meio bastão	-
Pav. X	52 CLK	MDF	Meio bastão + lâ de rocha	-
Pav. Y	52 CLK	MDF	Folha de 15 MS furada com elipses	-
Pav. Z	52 CLK	MDF	Granulado	-

Todas as designações indicadas nas camadas de cada pavimento são códigos comerciais usados na identificação dos subprodutos fabricados na SEDACOR.

O quadro 6.2 expõe as várias propriedades de alguns subprodutos constituintes dos 26 pavimentos.

É de notar que o material HDC descrito nos quadros 6.1 e 6.2 é uma cortiça de alta densidade e está em fase de desenvolvimento por parte da SEDACOR e a sua ficha técnica ainda não está completa.

Quadro 6.2 – Subprodutos da SEDACOR usados na laboração dos pavimentos descritos no quadro 6.1 [58]

Nomenclatura comercial	Densidade (kg/m ³)	Recuperação mínima (%)	Granulado (mm)	Compressão (%)	Tensão de rotura à tração (kPa)	Humidade (%)
12 PL	220 – 240	65	1 – 2	20 – 40	≥ 200	4 – 6
51 PL	220 – 220	65	0,5 - 1	20 – 40	≥ 200	4 – 6
52 CLK	410 – 450	70	0,5 – 2	20 – 30	≥ 800	4 – 6
Mono 215	≥ 500	70	---	20 – 30	≥ 800	4 – 6
012	≥ 500	70	---	20 – 30	≥ 800	4 – 6
40 BR	580 – 620	80	Cortiça e borracha (0 – 0,8)	10 – 20	≥ 800	4 – 6
Granulado	65 – 70	---	5 – 8	---	---	0 – 10
15 MS	200 – 240	65	1 – 5	20 – 40	≥ 200	4 – 6
25 MS	180 – 220	65	2 – 5	20 – 40	≥ 200	4 – 6
52 MS	200 – 240	70	0,5 – 2	20 – 30	≥ 200	4 – 6
HDC	≥ 800	Não testado (preveem ser 70)	0,2 – 2	Não testado (preveem ser 20-40)	Não testado (preveem ser ≥ 800)	4 – 6

Além destes materiais, foram usadas umas placas de MDF, conhecidas como FIBRANOR® (um produto externo à SEDACOR e produzido pela empresa FINSA), como elemento resistente das placas dos pavimentos. Sendo um painel de fibras de madeira de alta densidade e sem revestimento para uso em ambiente húmido, de baixo teor de formaldeído, o MDF dá estabilidade ao pavimento, devido às suas características peculiares (Quadro 6.3) [62].

Quadro 6.3 – Características mais importantes do MDF FIBRANOR® usado como elemento estrutural dos pavimentos ensaiados descritos no quadro 6.1 [62]

Densidade (kg/m ³)	Ligação interna (N/mm ²)	Resistência à flexão (N/mm ²)	Módulo de elasticidade (N/mm ²)	Inchamento em espessura 24h (%)	Absorção da superfície (mm)	Teor de humidade (%)
880	1,5	45	3800	18	> 150	7 ± 3

O outro elemento estrutural usado é o Contraplacado, contudo não é possível apresentar as propriedades deste produto específico porque este derivado de madeira está em fase de testes, sendo que não foi fornecida informação discriminativa. Por indicação da SEDACOR, as placas de contraplacado são de madeira de choupo, têm 6 mm de espessura e são compostas por 5 folhas, apresentam uma densidade de cerca de 420 kg/m^3 , com módulo de elasticidade de 4 kN/mm^2 e uma resistência à flexão de 36 N/mm^2 .

Além dos materiais descritos no quadro 6.2, foram usados “bastões”, um subproduto da SEDACOR do fabrico de rolhas de cortiça de espumante. Como é um produto intermédio, não existe ficha técnica do produto, apenas se sabe que apresenta uma granulometria de 4/6 mm. Também foi usada lã de rocha de 30 kg/m^3 existente no armazém do Laboratório de Acústica da FEUP.

6.2. MÉTODO

6.2.1. NORMALIZAÇÃO

Ao longo deste subcapítulo tenta-se clarificar o método utilizado para a determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado ($L_{n,r,w}$) e a redução da transmissão de ruídos de percussão de revestimentos de piso em condições normalizadas (ΔL_w) para cada uma das amostras dos diferentes pavimentos, segundo a NP EN ISO 140-8 [63] e a NP EN ISO 717-2 [26].

A série de normas ISO 140-X tem vindo a ser substituída por uma nova série ISO 10140-Y (X e Y correspondem às partes das diferentes séries, não sendo X necessariamente coincidente com Y) sem significativas alterações técnicas, tendo a ISO 10140-3 vindo substituir a anterior ISO 140-8 [64]. Apesar de tal atualização da normalização, ao longo da presente dissertação foi usada a antiga NP EN ISO 140-8 como método de ensaio em câmara reverberante.

A metodologia de ensaio inerente à determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão de pavimentos tem por base a norma NP EN ISO 140-8, que estabelece um método laboratorial normalizado com diretrizes e limitações que visam uniformizar as condições de ensaio, para homologação de todos os ensaios. Este método consiste na utilização de uma máquina de impactos normalizada (Fig. 6.5), cujas características estão especificadas na norma NP EN ISO 140-7 [65].

De acordo com a NP EN ISO 140-8, as medições do nível de pressão sonora criado pela percussão da máquina de impactos em ensaios laboratoriais devem ser efetuadas com filtros de bandas de um terço de oitava centradas nas seguintes frequências (em hertz) [63]:

100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000

Como são utilizados diferentes microfones em diferentes posições no espaço da câmara para cada banda de frequências, o nível médio de pressão sonora por frequência deve ser obtido através da equação 6.1, segundo uma média energética dos níveis de pressão sonora em bandas de terço de oitava (L_i) registados nos diferentes microfones [63].

$$L_b \text{ ou } L_{sb} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) \quad (\text{dB}) \quad (6.1)$$

onde:

L_b é o nível de pressão sonora do ruído de fundo (dB);

L_{sb} é o nível de pressão sonora da combinação do sinal de percussão com o ruído de fundo (dB).

Com o intuito de assegurar que as medições efetuadas na câmara recetora não seriam influenciadas por ruídos perturbadores vindos do exterior, mediu-se o nível do ruído de fundo para ter em conta a sua influência nos resultados [63]. Nas bandas de frequência em que a diferença entre a combinação do nível do ruído de fundo com o nível do sinal e o nível do ruído de fundo seja inferior a 15 dB mas superior a 6 dB, aplica-se a seguinte expressão [63]:

$$L = 10 \log(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \quad (\text{dB}) \quad (6.2)$$

onde L é o nível de pressão sonora do sinal corrigido (dB)

Quando a mesma diferença seja menor ou igual a 6 dB, aplica-se uma correção de $-1,3$ dB à combinação de níveis. Com tal procedimento possibilita-se a obtenção de resultados sem a influência do ruído de fundo [63].

Para adaptar os diferentes ensaios ao ambiente reverberante do laboratório, os valores de L obtidos pela equação 6.2 devem ser normalizados a uma área de absorção sonora equivalente, A_0 (10 m^2), em função da absorção da sala recetora [12], através da equação 6.3. A área de absorção sonora equivalente da câmara recetora, A , é obtida através da geração de um impulso de grande intensidade na câmara reverberante, em conformidade com a ISO 354 [66], que permite calcular o tempo de decaimento sonoro, tempo de reverberação, que com a aplicação da *Fórmula de Sabine* (2.6) permite chegar ao valor da absorção sonora. Com tal valor é possível calcular o nível de pressão sonora normalizado (L_n) para cada frequência [63].

$$L_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB}) \quad (6.3)$$

Com esta uniformização, é possível obter resultados normalizados e comparar os diversos resultados laboratoriais realizados nas mesmas condições de ensaio.

Mediante o cumprimento das exigências laboratoriais descritas na NP EN ISO 140-8 e baseando-se nos seus resultados, a NP EN ISO 717-2 faz referência ao método de cálculo para a determinação do índice de isolamento sonoro a ruído de percussão normalizado ($L_{n,r,w}$) assim como a redução do nível de ruído de percussão ponderado (ΔL_w) [26, 65].

Após a normalização criada pela equação 6.3, segundo a NP EN ISO 717-2 a redução do nível de pressão sonora a ruídos de percussão normalizado, por banda de frequência (ΔL_n) pode ser obtida aplicando a equação 6.4 [26].

$$\Delta L_n = L_{n,0} - L_n \quad (\text{dB}) \quad (6.4)$$

em que $L_{n,0}$ é o nível de pressão sonora normalizado da laje não revestida, para cada frequência.

De facto, a redução do nível de ruído de percussão ponderado (ΔL_w) conferida pelos pavimentos flutuantes no momento de ensaio sobre a laje de betão homogénea não devia depender do isolamento sonoro a ruídos de percussão do pavimento não revestido. Porém, até certo, o ΔL_w de um pavimento ensaiado depende do isolamento conferido pela laje, tanto pela variedade da espessura, como do material constituinte da laje, da morfologia interior da câmara, etc. Portanto, com o intuito de uniformizar e obter resultados independentes das características do laboratório, que pudessem ser comparáveis entre laboratórios, é necessário adaptar os valores da redução do ruído de percussão (ΔL) já normalizados segundo a absorção sonora (equação 6.3), a um pavimento de referência normalizado (Quadro 6.4) [26].

Apesar de se medirem os níveis de pressão sonora para a gama dos 100 aos 5000 Hz de bandas de um terço de oitava [63], no cálculo do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado só são usadas as bandas dos 100 aos 3150 Hz [26].

Quadro 6.4 – Nível de pressão sonora normalizado do pavimento de referência ($L_{n,r,0}$) em função da banda de frequência de terço de oitava, conforme a NP EN ISO 717-2 [26]

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

Por frequência, os resultados de ΔL de cada pavimento são adaptados aos valores do pavimento de referência (Quadro 6.4), segundo a equação 6.5, permitindo assim obter o nível de pressão sonora normalizado definido para o pavimento de referência, $L_{n,r}$:

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad (\text{dB}) \quad (6.5)$$

Após a adaptação dos resultados ao pavimento de referência, os pavimentos são classificados segundo o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado, definido para o pavimento de referência ($L_{n,r,w}$) e obtido através de ajustamentos da curva de referência descrita na figura 6.3 aos valores de $L_{n,r}$ [26].

Na figura 6.3 apresenta-se a curva de referência para resultados obtidos por bandas de frequência com largura de um terço de oitava. Os valores correspondentes aos pontos das curvas em questão, encontram-se expressos no quadro 6.5.

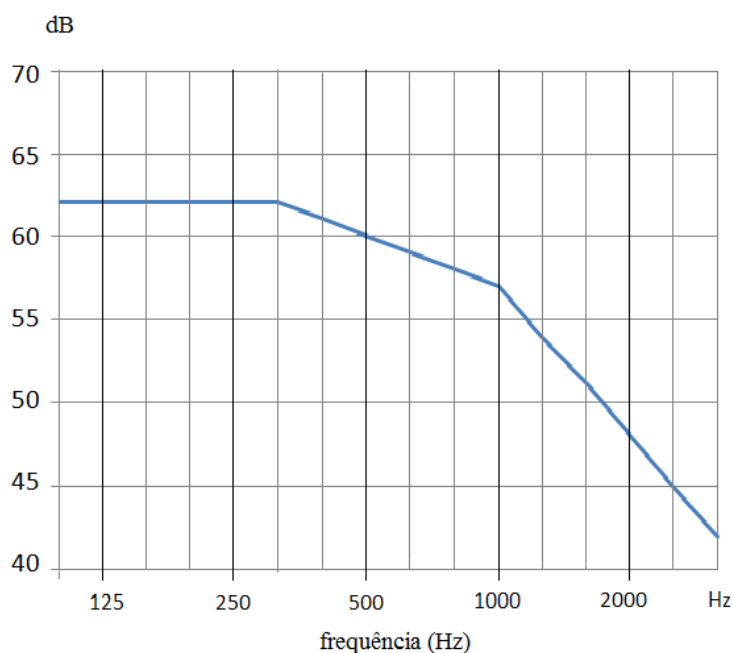


Fig. 6.3 – Curva de referência para ruídos de percussão para bandas de frequência com largura de um terço de oitava, conforme a NP EN ISO 717-2 [26]

Quadro 6.5 – Valores da curva de referência para ruídos de percussão para bandas de frequência com largura de um terço de oitava, expressa na figura 6.3 [26]

Frequência (Hz)	Bandas de terços de oitava (dB)	Frequência (Hz)	Bandas de terços de oitava (dB)
100	62	630	59
125	62	800	58
160	62	1000	57
200	62	1250	54
250	62	1600	51
315	62	2000	48
400	61	2500	45
500	60	3150	42

O $L_{n,r,w}$, que tem por base os valores do $L_{n,r}$ obtidos da normalização dos valores de L_i e da adaptação da redução do ruído de percussão do pavimento em estudo ao pavimento de referência $L_{n,r,0}$, obtém-se através do seguinte ajuste [6, 26]:

- 1 – Obter o $L_{n,r}$ (dB/terço de oitava) com uma casa decimal;
- 2 – Arbitrar uma primeira curva de referência (Quadro 6.5) com valores sem casas decimais;
- 3 – Ajustar, por iterações sucessivas e com incrementos múltiplos da unidade, a curva de referência de maneira a que a soma dos afastamentos positivos (apenas os afastamentos

calculados quando a curva de referência está abaixo da curva dos $L_{n,r}$) a dividir pelo número de bandas de frequência utilizadas, 16, seja o maior possível sem ultrapassar o valor de 2,0.

4 – O valor do $L_{n,r,w}$ corresponde à ordenada para a banda de frequência dos 500 Hz, sem casas decimais, da curva de referência ajustada.

O processo de cálculo anteriormente enunciado está representado na figura 6.4 para uma melhor compreensão.

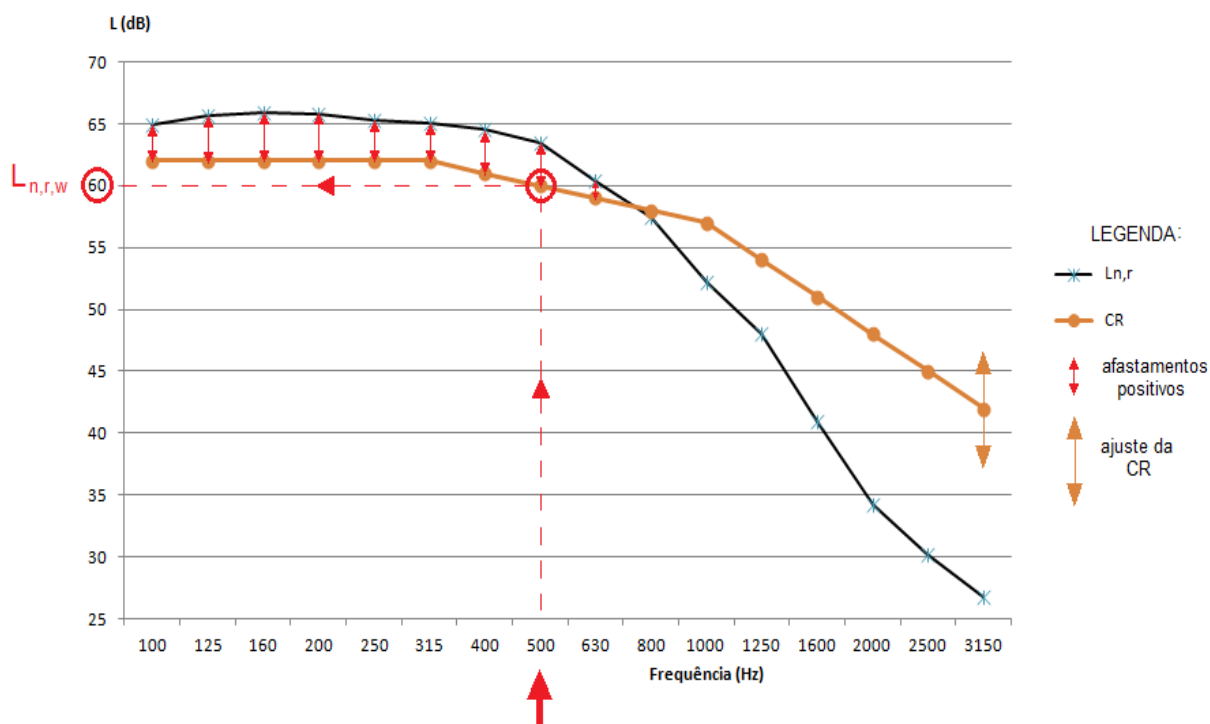


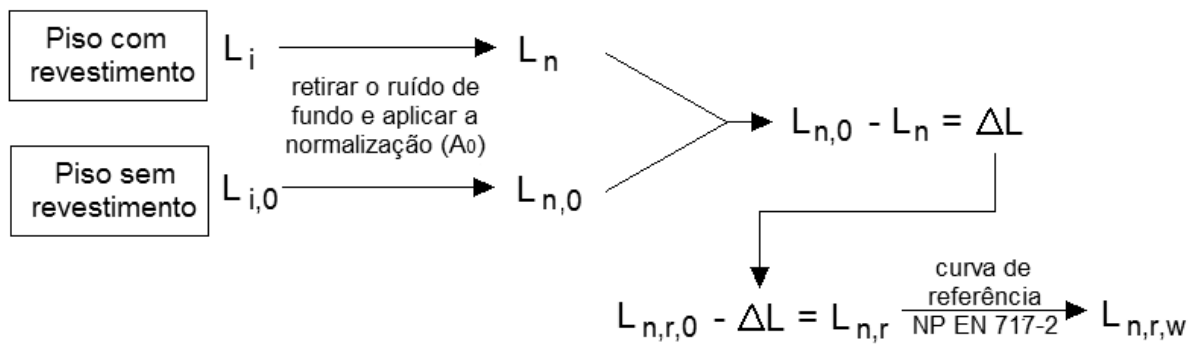
Fig. 6.4 – Método de cálculo do $L_{n,r,w}$ segundo a NP EN ISO 717-2

Além destes procedimentos, é aconselhável que uma qualquer banda de frequência da curva dos $L_{n,r}$ não se destaque em relação às vizinhas em mais do que 8 dB [12].

Este valor de $L_{n,r,w}$ é adequado para a caracterização do ruído de percussão criado pelo caminhar das pessoas sobre pisos, quer de madeira, quer betão com acabamento em carpete, quer em pavimentos flutuantes e, quanto maiores forem os valores do $L_{n,r}$, maior é o ruído percebido no compartimento recetor e maior será o valor do $L_{n,r,w}$ [65]. Com isto pode-se concluir que quanto menor for o valor de $L_{n,r,w}$, melhor será a classificação do isolamento sonoro a ruídos de percussão.

Em suma, a NP EN ISO 140-8 normaliza as medições em função das condições de ensaio e a NP EN ISO 717-2 serve-se desses valores para determinar o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, normalizado a uma situação de referência.

Por fim, resumiu-se na figura 6.5 um esquema simples dos procedimentos normativos, explicados anteriormente, necessários à obtenção do $L_{n,r,w}$ de qualquer pavimento ensaiado.



LEGENDA

- L_i - nível de pressão sonora do pavimento com revestimento (dB)
 L_n - nível de pressão sonora normalizado do pavimento com revestimento (dB)
 $L_{i,0}$ - nível de pressão sonora do pavimento sem revestimento (dB)
 $L_{n,0}$ - nível de pressão sonora normalizado do pavimento sem revestimento (dB)
 ΔL - redução sonora a ruídos de percussão (dB)
 $L_{n,r,0}$ - nível de pressão sonora normalizado definido para o pavimento de referência (dB)
 $L_{n,r}$ - nível de pressão sonora normalizado definido para o pavimento de referência com o revestimento de piso (dB)
 $L_{n,r,w}$ - índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado definido para o pavimento de referência com o revestimento de piso (dB)

Fig. 6.5 – Esquema da metodologia utilizada em cada ensaio, desde as medições laboratoriais até ao cálculo do $L_{n,r,w}$ [26, 63]

Após a obtenção do $L_{n,r,w}$, a redução do nível de ruído de percussão ponderado (ΔL_w) é obtida segundo a NP EN ISO 717-2 baseando-se na diferença entre o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão do pavimento de referência sem revestimento ($L_{n,r,0,w}$) e com revestimento ($L_{n,r,w}$) (equação 6.6). O valor de $L_{n,r,0,w}$ também resulta do ajuste da curva de referência à curva característica do pavimento de referência, sendo o seu valor de 78 dB já tabelado [26, 65].

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} \quad (\text{dB}) \quad (6.6)$$

sendo:

$L_{n,r,0,w}$ - Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado definido para o pavimento de referência sem o revestimento de piso ($L_{n,r,0,w} = 78$ dB);

$L_{n,r,w}$ - Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado definido para o pavimento de referência com o revestimento de piso (dB).

Para comparar o desempenho acústico entre duas soluções de pavimento flutuante, o emprego da equação anterior é essencial para que possam ser obtidos os diferentes níveis de redução sonora do ruído de percussão e assim compará-los [65].

Além de todos os passos descritos anteriormente, também se deve ter em conta as características típicas do espectro específico de ruído de passos, sendo necessário utilizar uma correção. Esta consiste em adicionar um termo de adaptação espectral, C_I , em dB, ao índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado ao pavimento de referência com revestimento, $L_{n,r,w}$, ou à redução do nível de ruído de percussão ponderado, ΔL_w , para ter em consideração os picos de ruído nas baixas frequências e a incomodidade sentida pelos ocupantes dos edifícios, vindo assim substituir a regra do 8 dB utilizado na edição da anterior NP EN ISO 717-2 [8, 26, 65].

Apesar de não se ter considerado o efeito do ruído de passos no âmbito desta dissertação, ficam aqui algumas noções sobre o termo de adaptação espectral, C_I .

Esse termo C_I é calculado através da diferença entre o nível de pressão sonora normalizado equivalente ($L_{n,eq}$) e o índice de isolamento sonoro, normalizado ($L_{n,r,w}$) do ruído de percussão, subtraída de 15 dB, como mostra a equação 6.7 [65]:

$$C_I = L_{n,eq} - L_{n,r,w} - 15 \quad (\text{dB}) \quad (6.7)$$

e

$$L_{n,eq} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^k 10^{L_n/10} \right) \quad (\text{dB}) \quad (6.8)$$

em que L_n é o nível de pressão sonora normalizado do pavimento com revestimento causado pela ação de percussão e medido na câmara recetora, em cada banda de frequência.

É de notar que o valor de $L_{n,eq}$ é usual ser calculado numa base energética para bandas de frequência entre 100 e 2500 Hz para larguras de bandas de terço de oitava, e entre 125 e 2000 Hz para bandas de uma oitava. No entanto, se a soma energética for calculada com base em valores do espectro alargado (para bandas de frequência inferiores às frequências *standard*), deve-se explicitar a gama de frequências utilizadas conjuntamente com o valor de C_I , por exemplo, na forma $C_{I, 50-2500}$, para bandas de terço de oitava considerando as bandas 50, 63 e 80 Hz, ou $C_{I, 63-2000}$, para bandas de oitava considerando a banda de 63 Hz [8].

Para caracterizar pavimentos ou revestimentos de pavimentos, deve-se aplicar os seguintes termos de adaptação espectral [65]:

- $C_{I,r}$ - Termo de adaptação espectral do pavimento de referência com o revestimento de piso a ensaiar (dB)

$$C_{I,r} = L_{n,eq} - L_{n,r,w} - 15 \quad (6.9)$$

- $C_{I,0}$ - Termo de adaptação espectral do pavimento de referência sem revestimento de piso (dB)

$$C_{I,0} = -10 \text{ dB} \quad (6.10)$$

- $C_{I,\Delta}$ - Termo de adaptação espectral da redução do nível de ruído de percussão (dB)

$$C_{I,\Delta} = C_{I,0} - C_{I,r} \quad (6.11)$$

No final, em termos de isolamento a ruídos de percussão, é de esperar que o valor de C_1 seja ligeiramente positivo para pavimentos de madeira com máximos de radiação predominantes nas baixas frequências do espectro, seja próximo de 0 para pavimentos de betão ou outros pavimentos homogêneos com revestimentos de piso eficazes e que se situe entre -15 dB e 0 dB para pavimentos de betão não revestidos ou com revestimentos de piso pouco eficazes. [8, 65]

6.2.2. MÁQUINA DE IMPACTOS NORMALIZADA

Para proceder aos ensaios laboratoriais e como não existe um “passo” padrão que possa ser facilmente reproduzido, as cargas impulsivas são geradas pela máquina de impactos normalizada, coerente com os requisitos específicos na NP EN ISO 140-6 [67] e na NP EN ISO 140-8 [63], que produz impactos rápidos e contínuos sobre os pavimentos em estudo (Fig. 6.6).

A máquina de impactos consiste numa estrutura de suporte de uma fileira de cinco martelos cilíndricos com 500 g de peso cada, que são levantados por um mecanismo que os faz cair sequencialmente a partir de uma altura de 4 cm sobre a superfície do pavimento. O mecanismo é impulsionado por um motor elétrico cronometrado que produz 10 impactos por segundo num ciclo constante [6, 12].

O ensaio laboratorial consiste na colocação da máquina de percussão perto do centro do piso em análise para poder obter a máxima vibração da laje estrutural. Após o início da percussão produzida pela máquina de impactos, na sala inferior são medidos os níveis de pressão sonora médios em terços de oitava nas bandas de 100 Hz a 5 kHz. Por indicação da NP EN ISO 140-8 [63], as leituras de ensaio de cada pavimento devem ser realizadas segundo um número mínimo de posições da máquina de impactos em função do tipo de pavimento a ensaiar, sendo arbitrária a disposição das posições da máquina. No entanto, segundo bibliografia americana [12], é aconselhável que sejam realizadas no mínimo 4 posições de ensaio com posições específicas no espaço (Fig. 6.6 - direita).

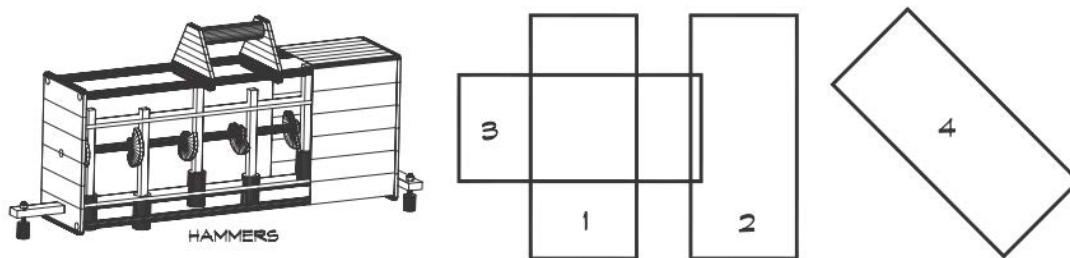


Fig. 6.6 – (esq.) – Máquina de impactos normalizado; (dir.) – Propostas de posições de ensaio [sugeridas em 12]

No final, os valores dos níveis de pressão sonora analisados pelo sistema de medição representam a quantidade de energia produzida pela carga impulsiva da máquina de impactos, que atravessou os elementos rígidos e se propagou pelo ambiente recetor até ao sistema de medição [12].

6.2.3. OUTRAS NORMAS EM VIGOR

Atualmente existem noutros países fora da Europa comunitária, outras normas em vigor para a caracterização do ruído de percussão. Exemplo disso é a norma norte-americana ASTM E989 -

Standard Classification for Determination of Impact Insulation Class – IIC ([68] citado em [18]) que determina a Classificação Padrão para Determinação da Classe de Isolamento de Impacto.

Esta Classe de Isolamento de Impacto (IIC) aplica-se a bandas de um terço de oitava entre 100 e 3150 Hz e pode ser aplicada quer em ensaios laboratoriais como *in situ*. Para tal, é necessário registar os níveis de pressão sonora medidos no compartimento inferior ao piso percutido em função das bandas de frequência e “movimentar” verticalmente a curva de referência de IIC (Fig. 6.7) em relação aos valores medidos, posicionando-a o mais alto possível, validando o facto de que a soma dos desvios acima da curva de referência não exceda 32 dB e que o desvio máximo em cada frequência não ultrapasse 8 dB. O valor final de IIC é obtido através da subtração de 110 com o valor lido na curva de referência na banda de frequência dos 500 Hz.

A figura 6.7 da esquerda retrata uma curva de referência, apresentando-se como uma “mesa de trabalho” onde é possível ler o valor do IIC após translação da mesma curva.

Devido a este facto ($L_{n,r,w} = 110 - IIC$) é que, ao invés do $L_{n,r,w}$ calculado pela NP EN ISO 717-2, quanto maior for o valor de IIC, melhor é o isolamento ao ruído de percussão do pavimento ensaiado com a máquina de percussão. É de notar que, para edificações residenciais, os pavimentos são considerados ótimos quando a classificação IIC for igual ou superior a 65 dB [18].

O *ASTM Committee E33* também propôs um outro ensaio que consiste na colocação de um único microfone a 1 metro abaixo do ponto médio do teto, sendo a sala de receção isolada através da colocação de material absorvente nas suas paredes e piso, produzindo impacto com três tipos de fontes: o caminhar de um indivíduo masculino, a queda de uma bola pesada e a de um pequeno pneu (tipo *scooter*). Do outro lado do planeta, a norma japonesa JIS A 1418-2 [69] especifica um ensaio de percussão através de um pneu de pequenas dimensões, montado num braço ligado a um motor que levanta o pneu e que posteriormente o deixa cair no chão (Fig 6.7 – dir). Além deste método, a mesma norma também remete para outro ensaio que consiste na queda de uma bola *Tachibana* sobre o piso [12].

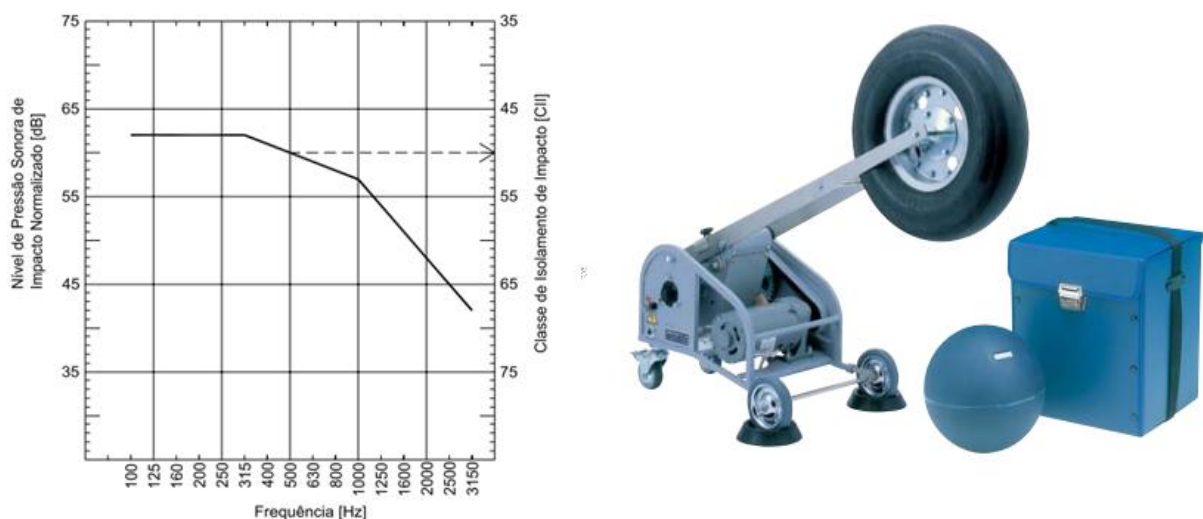


Fig. 6.7 – Recursos utilizados para a caracterização do ruído de percussão, exigidos noutras normas fora da Europa comunitária: (esq.) – Curva de referência IIC, segundo a norma ASTM E989 ([68] citado em [18]); (dir.) – Pneu acoplado a um sistema mecânico e bola *Tachibana* [69, 70]

6.3. METODOLOGIA DE ENSAIO

As medições do isolamento sonoro a ruídos de percussão foram realizadas nas instalações do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). O ambiente de ensaio é composto por duas câmaras reverberantes adjacentes, dispostas verticalmente uma em cima da outra mas dissociadas estruturalmente por um material resiliente (Fig. 6.8).

O compartimento superior, denominado por câmara emissora E2 (Fig. 6.8) comunica com o compartimento inferior R1 (Fig. 6.8) unicamente através de um piso de referência de betão armado, homogêneo e plano, com 40 cm de espessura e uma área de $4,21 \times 3,46 \text{ m}^2$, medida pela superfície superior (Fig. 6.10), pavimento esse que corresponde ao caminho comunicante do ruído de percussão entre as duas câmaras. A câmara recetora R1 (compartimento inferior) é caracterizada por ter um volume de aproximadamente 216 m^3 , não sendo as suas paredes paralelas entre si, acesso com o propósito de evitar a sobreposição de frequências modais e maximizar a criação de um campo difuso.

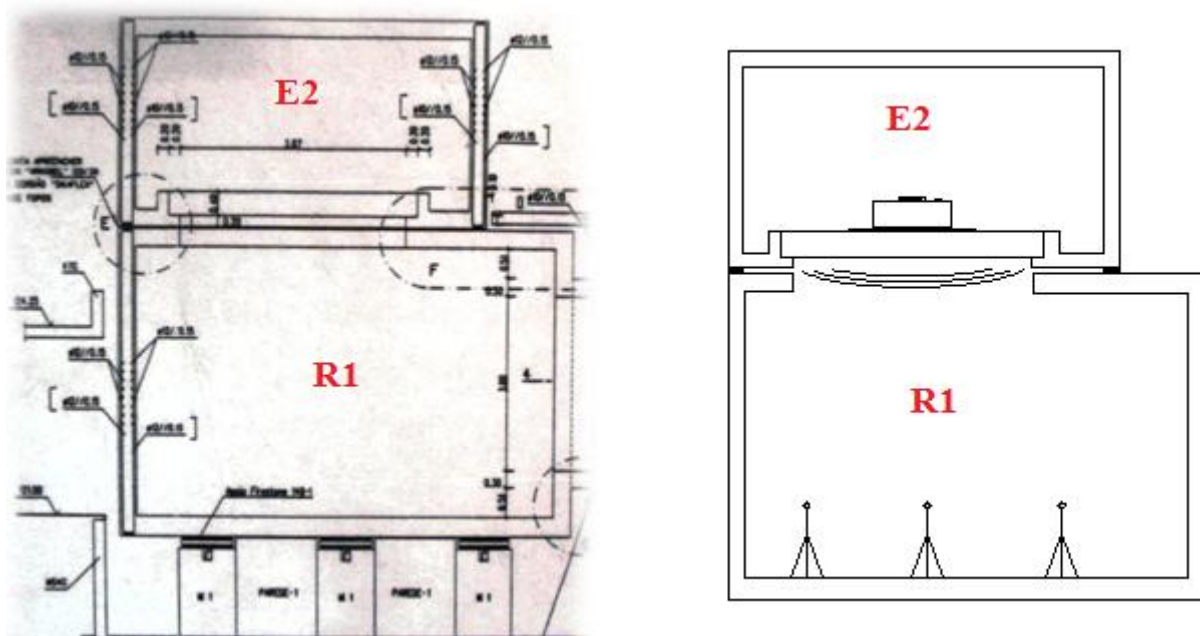


Fig. 6.8 – Esquema da interação entre as Câmaras Reverberantes E2 e R1 e o conceito de medição do ruído de percussão associado a pavimentos flutuantes [71]

Para avaliar o comportamento ao isolamento sonoro a ruídos de percussão de pavimentos flutuantes em laboratório, tanto o próprio pavimento de ensaio como a máquina de impactos normalizada foram colocados no piso da câmara superior, a câmara emissora, e na câmara recetora localizada abaixo da sala emissora, foram colocados medidores sonoros (microfones) que captaram os níveis de pressão sonora criados pela máquina de impactos, que passaram através do elemento separador, a laje de betão armado (Fig. 6.8) [34]. Com este ensaio foi possível medir a transmissão sonora direta da vibração de percussão criada pela máquina de impactos normalizada.

As medições foram realizadas em bandas de largura de um terço de oitava, entre as frequências 16 Hz e 12,5 kHz. Porém o tratamento e discussão dos resultados só foram fundamentados sobre as frequências dos 100 Hz aos 5 kHz, conforme a NP EN ISO 140-8 [63]. A caracterização do índice de

redução sonora a ruídos de percussão foi obtido para frequências entre os 100 Hz e os 3,15 kHz, como consta na NP EN ISO 717-2 [26].

Segundo a classificação constante na NP EN ISO 140-8 em função do tipo de pavimento flutuante, os pavimentos ensaiados pertencem à categoria II uma vez que são pavimentos compostos por camadas de diferentes propriedades em que pelo menos uma das camadas é rígida, que no caso dos pavimentos ensaiados corresponde à camada do elemento resistente (Fig. 6.2). Também é apontado nessa mesma norma que para ensaiar devidamente estes pavimentos é necessário que todo o provete de ensaio cubra a superfície do piso totalizando uma área de 10 m^2 . A razão pela qual se ensaiam 10 m^2 de pavimento em laboratório, reside no facto dos compartimentos habitacionais correntes compreenderem habitualmente dimensões de pavimentos de 10 a 12 m^2 [19]. No entanto, tal disponibilidade de material seria de elevados custos para a SEDACOR. Por isso os pavimentos foram todos ensaiados com menores dimensões mas nas mesmas condições para que fosse possível ter uma ideia do valor muito aproximado do desempenho acústico de cada pavimento e poder comparar o comportamento dos diversos pavimentos entre si, apesar de não se estar a cumprir exatamente a NP EN ISO 140-8. Para tal, a empresa associada desmobilizou sete pranchas de cada tipo de pavimento para ensaios, totalizando uma área de apenas $1,217 \text{ m}^2$.

Por indicação da mesma norma, estes pavimentos compostos devem ser ensaiados sob o efeito de cargas que simulem o peso de um mobiliário normal. Para tal, a mesma norma remete à utilização de uma carga uniformemente distribuída de 20 a 25 kg/m^2 , com pelo menos um ponto de aplicação por metro quadrado. Como todos os pavimentos em estudo tinham uma área de $1,217 \text{ m}^2$, o intervalo de carga compreendia-se entre 24,3 kg e 30,4 kg. Para tal efeito, foram colocados quatro provetes cúbicos de betão de 15 cm (Fig. 6.9), com pesos correspondentes de: Peso 1 – 7,47 kg; Peso 2 – 7,51 kg; Peso 3 – 7,60 kg; peso 4 – 7,71 kg. Com estes pesos foi possível obter uma carga de aproximadamente 30,29 kg, valor dentro do aconselhado pela NP EN ISO 140-8.

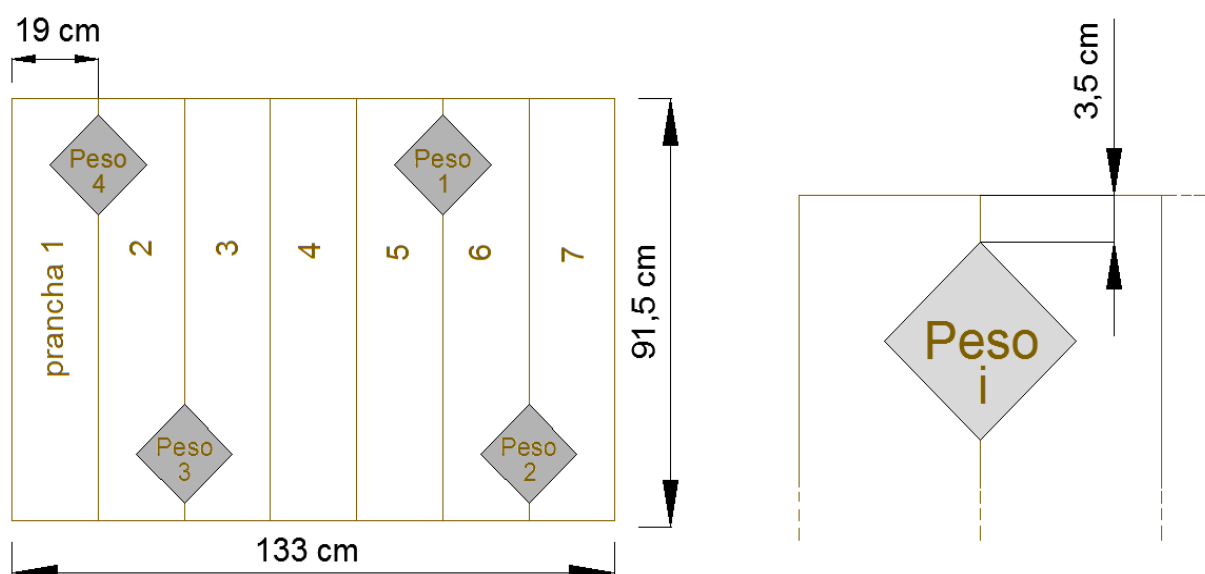


Fig. 6.9 – Disposição típica dos pesos 1, 2, 3 e 4 ($\approx 7,6 \text{ kg/cada}$) sobre as sete pranchas de cada amostra de pavimento ensaiado

Os pesos foram colocados sobre as juntas de encaixe da pranchas em posições opostas e alternadas por junta, a 3,5 cm da extremidade (Fig. 6.9) de maneira a facilitar a propagação das vibrações desde as pranchas centrais percutidas até às pranchas vizinhas.

Segundo a NP EN ISO 140-8, para se obter resultados confiáveis em ensaios laboratoriais de ruído de percussão, é necessário realizar, para cada pavimento da categoria II, ensaios com quatro posições de microfones diferentes combinadas com quatro posições da máquina de percussão [63], totalizando um mínimo de 16 medições por pavimento. No entanto, para tornar os resultados mais fidedignos, por cada pavimento foram realizados ensaios com dois conjuntos de posições de três diferentes microfones (6 medições) (Fig. 6.10 e Fig. A.2) combinados com quatro posições da máquina de percussão (Fig. 6.11), obtendo-se assim um total de 24 medições por pavimento. Porém, o algoritmo informático de tratamento dos dados não potencializou a capacidade de medição dos equipamentos eletrónicos uma vez que estava programado para obter apenas 20 das 24 possíveis medições. Todavia esse número de medições cumpre os requisitos impostos pela citada norma, não inviabilizando o presente estudo.

Com tal metodologia apoiada em variadas posições de microfones, foi possível colmatar o facto do nível de pressão sonora ser dependente do ponto onde é medido devido à desigual energia libertada pelas diferentes frentes de onda, determinando-se posteriormente a sua média energética por frequência, de todos os ensaios.

De maneira a manter os microfones sempre no mesmo local aquando da mudança de posição das medições, foram colocadas cruces de fita adesiva no piso da R1 (Fig. 6.10 - direita) para ajudar na colocação exata dos microfones para cada ensaio. No piso da E2 também foi colocada fita adesiva (Fig. 6.10 - esquerda) para que em todos os ensaios, os pavimentos fossem minuciosamente colocados na mesma posição e no mesmo local para que não houvesse discrepâncias nos resultados relativos ao ponto de aplicação da vibração na laje da E2. No que toca aos microfones utilizados nas medições, estes têm características omnidireccionais e de incidência aleatória, de uma tecnologia avançada que faz com que o ruído elétrico do sistema recetor seja anulado nestes microfones laboratoriais. Além disso, o cuidado de colocar os microfones afastados entre si no mínimo de 0,7 m durante os ensaios foi tido em conta.

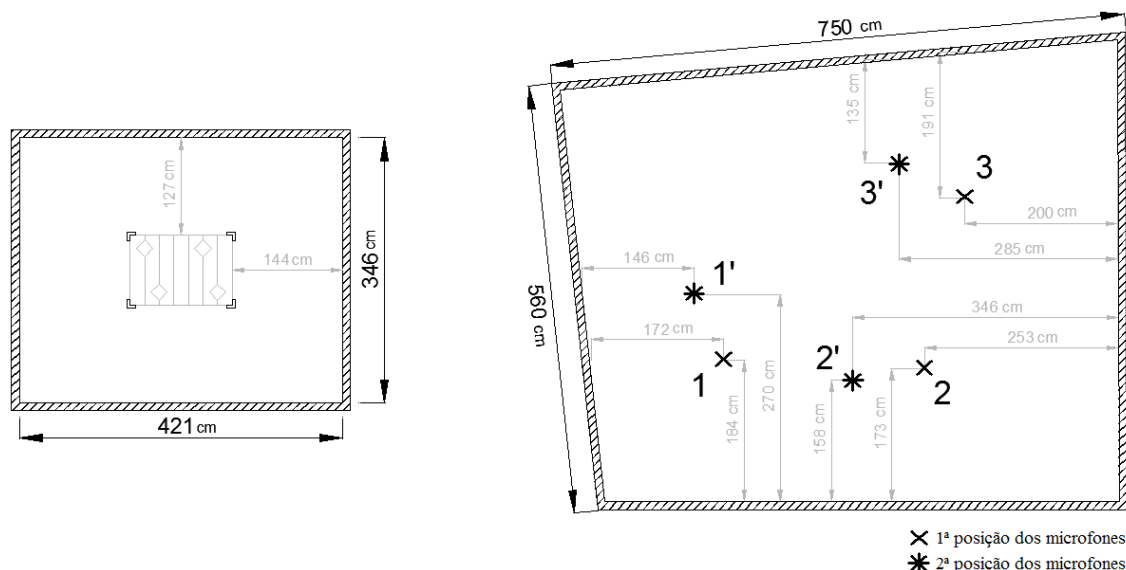


Fig. 6.10 – Planta esquemática das Câmaras Reverberantes do Laboratório de Acústica da FEUP: câmara de emissão E2 (esquerda) com a posição absoluta dos diversos pavimentos ensaiados, e câmara de receção R1 (direita) [72] com as posições dos microfones para os dois tipos de medições

Para manter as mesmas condições de ensaio em todos os pavimentos, os quatro cubos de betão foram minuciosamente colocados sempre na mesma posição, em todos os pavimentos ensaiados, sobre as juntas das pranchas e a uma distância do limite de 3,5 cm (Fig. 6.9) e procedeu-se à realização dos quatro ensaios com a máquina de percussão sempre no centro do pavimento, realizando apenas rotações em torno do ponto central do pavimento (Fig. 6.11 e Fig. A.1). Para garantir que a máquina ficava sempre no centro, foi usada uma fita métrica que ajudava no posicionamento da mesma no centro do pavimento. O posicionamento oblíquo não foi realizado através da medição dos ângulos no pavimento, consistiu apenas no alinhamento das faces laterais da máquina de percussão com os vértices dos cubos que durante todo o ensaio não mudavam de posição.

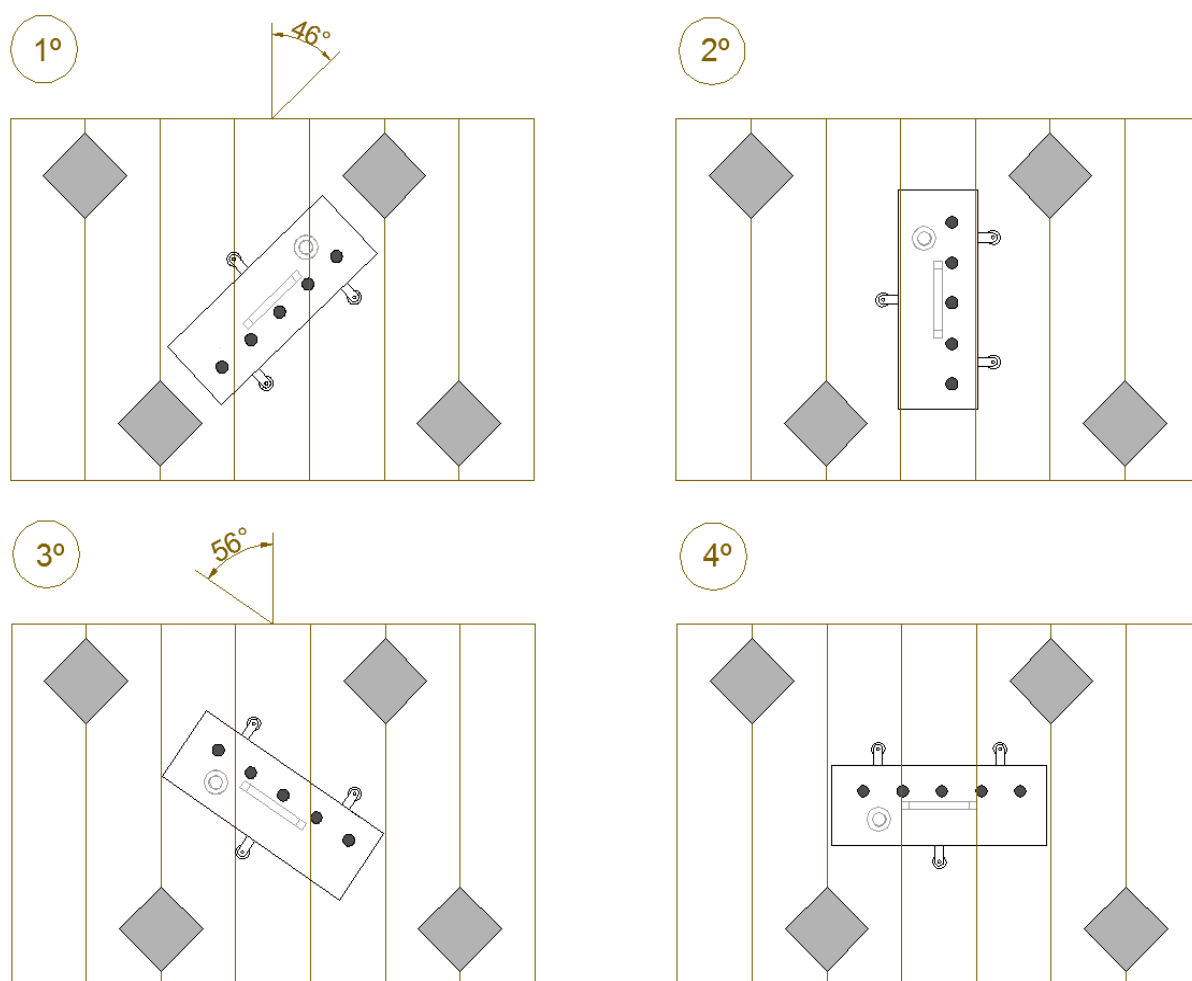


Fig. 6.11 – Representação esquemática das quatro posições de ensaio da máquina de percussão e das zonas de impacto dos martelos sobre o pavimento

Com o intuito de manter o máximo de contacto entre as pranchas e o piso de referência da Câmara Reverberante E2, durante todos os ensaios foi tomado em atenção o nível plano das pranchas dos pavimentos, tendo sido em alguns casos necessário realizar uma contra-flexa antes do ensaio para garantir um maior contacto entre o pavimento percutido e o piso de referência, aumentando assim a veracidade e homogeneidade dos parâmetros de ensaio.

Em todos os ensaios verificou-se que a superfície dos pavimentos aparentava ter resistência ao impacto da máquina de percussão, dado que após cada ensaio mantinha-se inalterada. Também foi tido sempre o cuidado de não deixar qualquer material residual debaixo do pavimento flutuante ou mesmo por baixo da máquina de percussão, de maneira a normalizar os ensaios para que não houvesse discrepâncias nos resultados e que pudessem ser comparáveis entre si nas mesmas condições de ensaio.

Para a realização dos ensaios, foi utilizado o seguinte equipamento:

- Sistema de aquisição de dados Brüel & Kjaer *PULSE* – Tipo 3560-D;
- *Software* de aquisição de dados e tratamento de dados Brüel & Kjaer *PULSE* v. X;
- Amplificador *LABGRUPPEN LAB 300*;
- 3 Microfones Brüel & Kjaer ½” – Tipo 4190 (Fig. 6.12 b);
- Máquina de percussão marca Brüel & Kjaer modelo 3204 (Fig. 6.12 a);
- Fonte sonora, marca Brüel & Kjaer modelo 4224;
- Termo-Higrómetro *TESTO* 435-2;
- Calibrador Brüel & Kjaer – Tipo 4226.

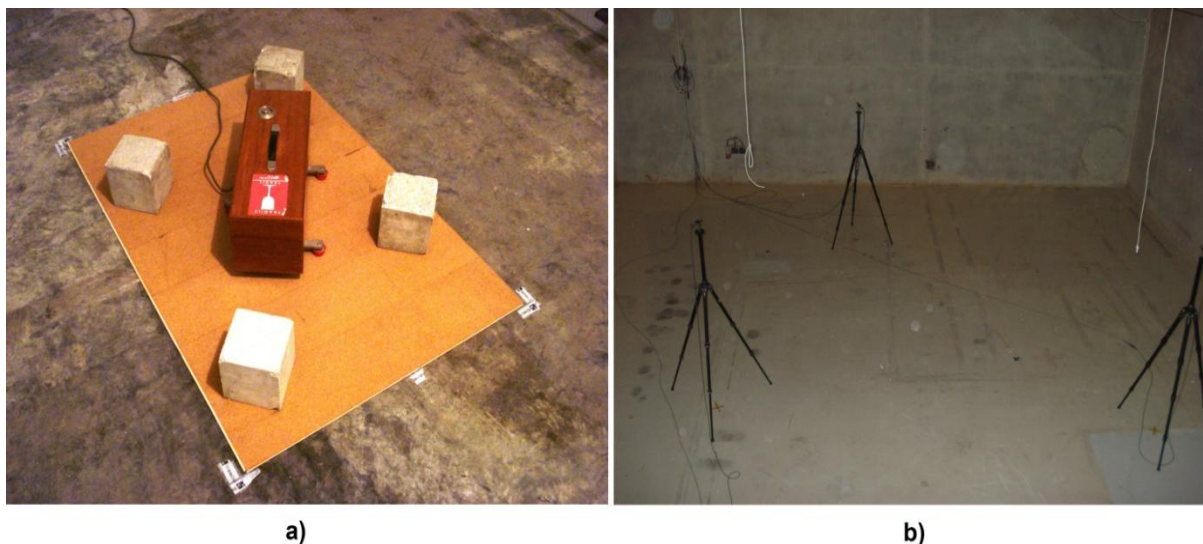


Fig. 6.12 – a) ensaio dos pavimentos na câmara emissora E2; b) disposição dos microfones na câmara recetora R1

6.4. RESULTADOS

6.4.1. ANÁLISE PRELIMINAR DOS RESULTADOS

Como explicado anteriormente, pretendeu-se ensaiar diversos pavimentos tentando perceber a influência de cada camada constituinte dos pavimentos flutuantes em estudo no isolamento sonoro a ruídos de percussão. Para tal a empresa forneceu uma série de diferentes pavimentos (A a P) onde variava o tipo de material de cada camada de forma a determinar o seu contributo na propagação do ruído.

De acordo com a NP EN ISO 140-8 [63], para assegurar que as medições na câmara recetora não foram influenciadas por ruídos perturbadores, foi necessário medir o ruído de fundo e aplicar uma

correção em função da diferença de nível entre a combinação do sinal e do ruído de fundo e o próprio ruído de fundo isolado. Tal correção compreende uma diferença energética entre o valor do pavimento e o valor do ruído de fundo para diferenças de nível entre 15 dB e 6 dB, e uma correção de 1,3 dB para diferenças de nível inferiores a 6 dB, como citado no subcapítulo 6.2.1.

A título de exemplo demonstra-se na figura 6.13 a influência do ruído de fundo no valor do nível de pressão sonora medido nos ensaios do pavimento A, sendo que tal comportamento é idêntico na maioria dos pavimentos.

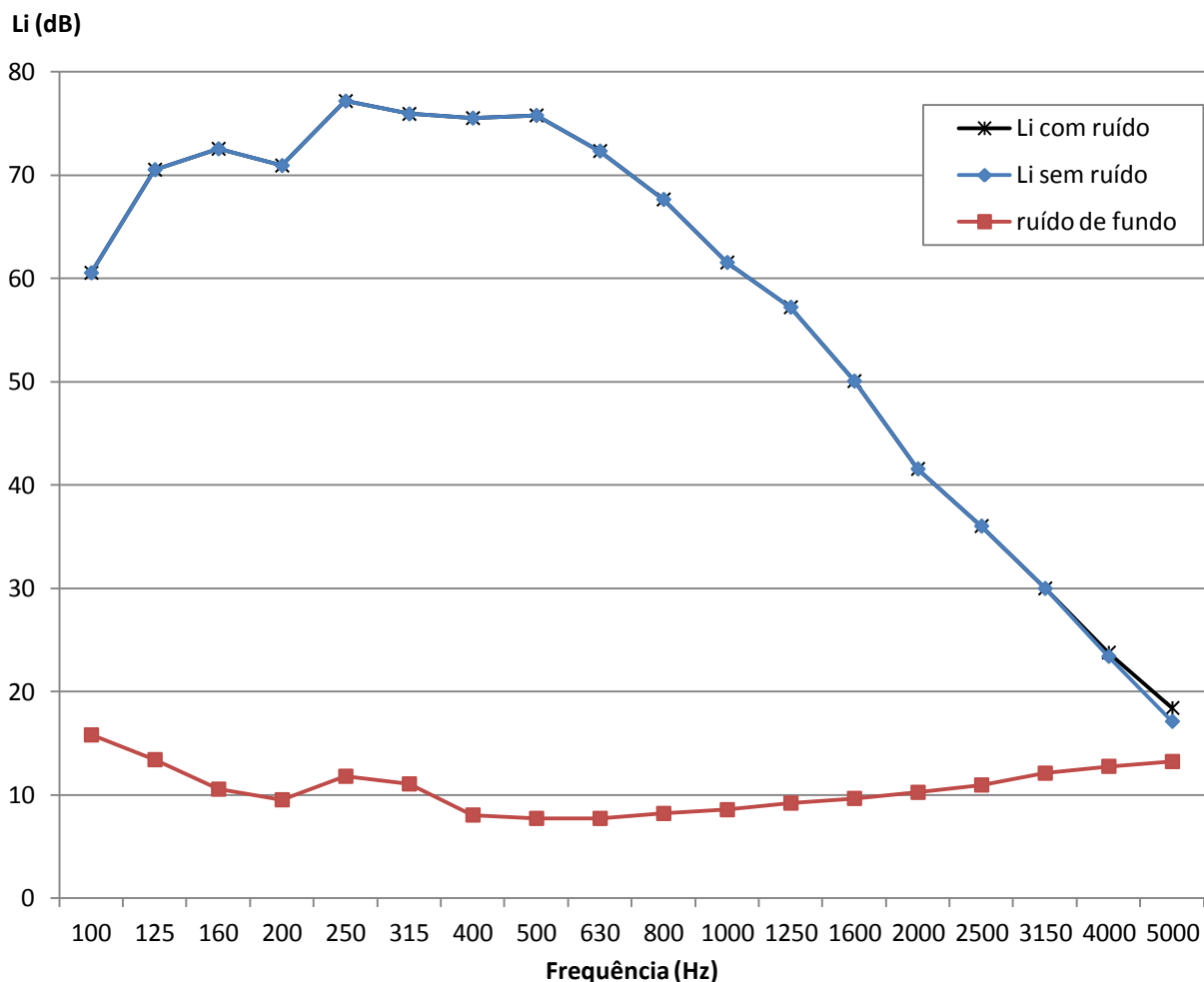


Fig. 6.13 – Influência do ruído de fundo nos valores do nível de pressão sonora Li do pavimento A

Após análise dos pavimentos ensaiados verificou-se que, dentro da gama de frequências em análise, o ruído de fundo não tem uma influência significativa nos resultados medidos durante os ensaios. Em média ocorreram correções à volta dos 0,5 dB na banda de frequência dos 4 kHz e correções de 1,3 dB para a banda de frequência dos 5 kHz.

É de notar que todos os resultados aqui posteriormente apresentados já têm a correção do ruído de fundo.

Após a análise de todos os espectrogramas de cada um dos pavimentos ensaiados, foi possível resumir as características mais comuns e apresentar um espectrograma (Fig. 6.14) com todos os valores

medidos no laboratório em função das quatro posições da máquina de percussão (descrita na figura 6.11), representando esse espectrograma o comportamento mais habitual dentro da amostragem.

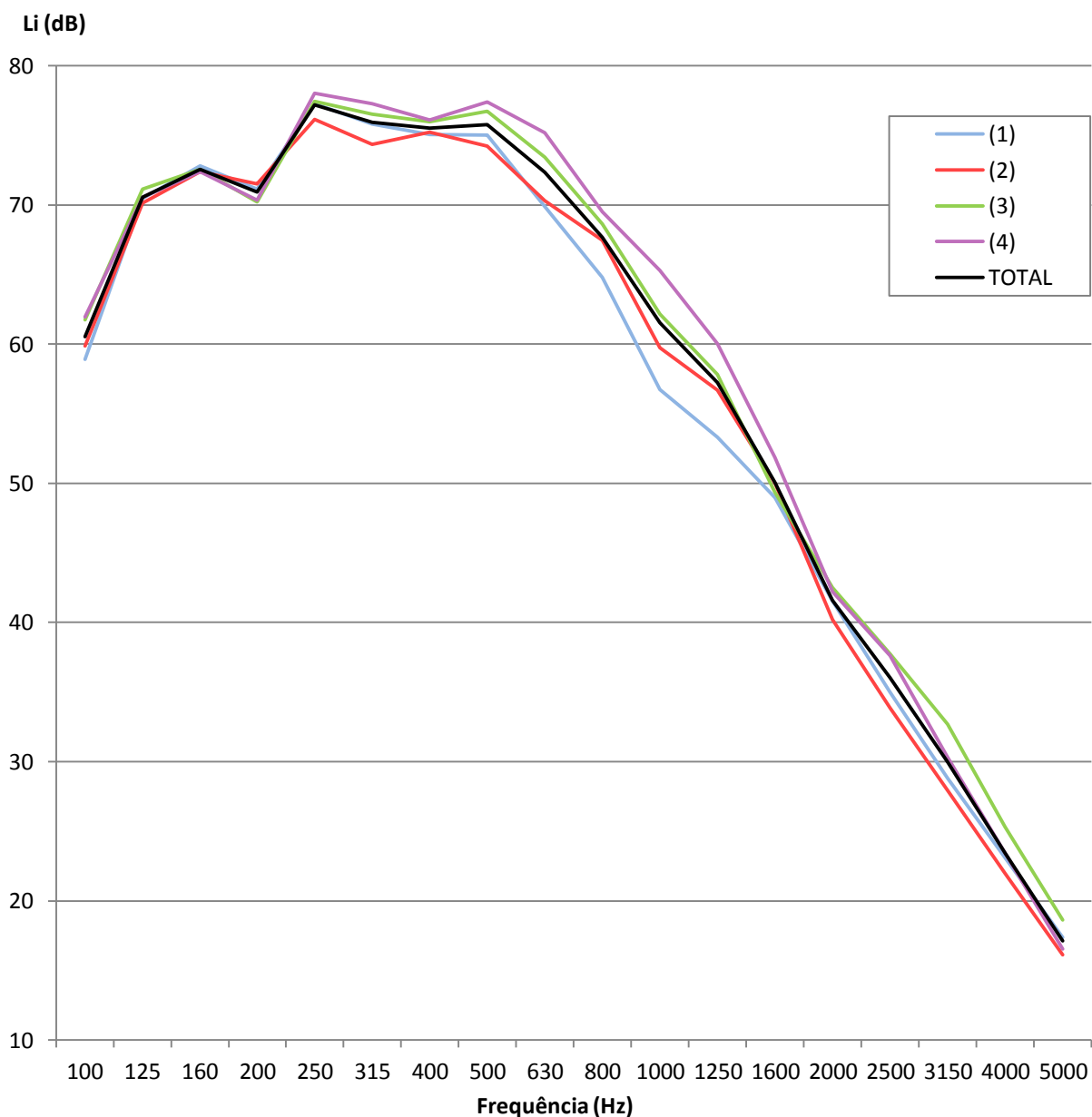


Fig. 6.14 – Espectrograma do pavimento A representativo do comportamento mais comum do ruído de percussão dos pavimentos ensaiados sem a contribuição do ruído de fundo em função das quatro posições da máquina de percussão descritas na figura 6.11

Com isso foi possível estudar o espectrograma mais comum na maioria dos casos e decompor as suas partes mais importantes: uma elevação aos 160 Hz, seguida de outra mais elevada em patamar entre os 250 Hz e os 500 Hz, com posterior descida quase linear até aos 5 kHz. A possibilidade das placas dos pavimentos não estarem perfeitamente assentes sobre a laje estrutural pode ter originado, em algumas

bandas de frequência, picos de Li em função das posições da máquina de percussão, levando a uma maior ou menor propagação do ruído em determinadas frequências.

Segundo os gráficos avaliados, na maior parte dos pavimentos, para frequências superiores a 500 Hz, a posição 1 colaborava na diminuição do ruído de percussão (a figura 6.14 não retrata perfeitamente tal facto), enquanto com a posição 4ª se obtinha um maior nível de pressão sonora.

Além disso, nos variados resultados verificou-se uma grande disparidade entre as posições da máquina de percussão entre as bandas dos 500 Hz e dos 3,25 kHz. Presume-se que tais discrepâncias nessa zona tenham ocorrido devido às zonas de impacto dos martelos da máquina de percussão sobre as pranchas do pavimento e sobre as juntas de ligação entre as pranchas, com algum contributo da variedade da proximidade da zona de impacto dos martelos e a posição dos cubos. Tentou-se analisar os pontos de contacto entre os martelos e o pavimento e as suas juntas e a proximidade com os cubos (Fig. 6.11), no entanto devido a constrangimentos de tempo não foi possível averiguar a influência das diversas posições da máquina de percussão nas medições do nível de pressão sonora.

Para que fosse possível normalizar os resultados obtidos e usá-los no cálculo dos vários parâmetros constantes na NP EN ISO 717-2, foi calculado o tempo de reverberação (T_{30} – subcapítulo 2.1.3.1) da câmara reverberante recetora (R1) para posterior cálculo da área de absorção sonora equivalente através da *Fórmula de Sabine* (equação 2.5), admitindo que o volume de R1 é 216 m³. Assim, obtiveram-se os níveis de pressão sonora normalizados de cada pavimento (Quadro B.1 e B.2 – Anexo B).

Apesar de serem apenas necessários, para o estudo do índice de isolamento sonoro a ruído de percussão, os valores da área de absorção sonora equivalente, A , na gama de frequências entre os 100 Hz e os 3150 Hz [26], são apresentados os valores da mesma área de absorção para as bandas de frequência dos 4 kHz e dos 5 kHz (Quadro 6.6) para que quem tiver interesse em aplicar outras normas internacionais aos resultados tratados nesta dissertação, o possa fazer sem que haja problemas de falta de informação.

Quadro 6.6 – Tempo de reverberação e área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante recetora R1 em função da frequência

f (Hz)	TR (s)	A (m ²)	f (Hz)	TR (s)	A (m ²)
100	10,3	3,4	800	8,7	4,0
125	9,8	3,5	1.000	7,9	4,4
160	10,1	3,4	1.250	7,4	4,7
200	10,0	3,5	1.600	6,7	5,1
250	9,8	3,5	2.000	6,0	5,8
315	10,5	3,3	2.500	5,1	6,7
400	10,1	3,4	3.150	4,3	8,0
500	10,2	3,4	4.000	3,5	10,0
630	10,1	3,4	5.000	2,7	13,0

Além da análise do espectrograma total nas diferentes posições da máquina de impactos normalizada (Fig. 6.14), também se procedeu à análise do isolamento sonoro, verificando-se que a evolução da redução do nível de pressão sonora a ruído de percussão normalizado (equação 6.4) mantinha uma tendência idêntica nos vários pavimentos ensaiados. Por isso, resumiu-se o comportamento típico comum do ΔL_n nos vários pavimentos, com o exemplo do isolamento sonoro do pavimento A nas várias frequências (Fig. 6.15).

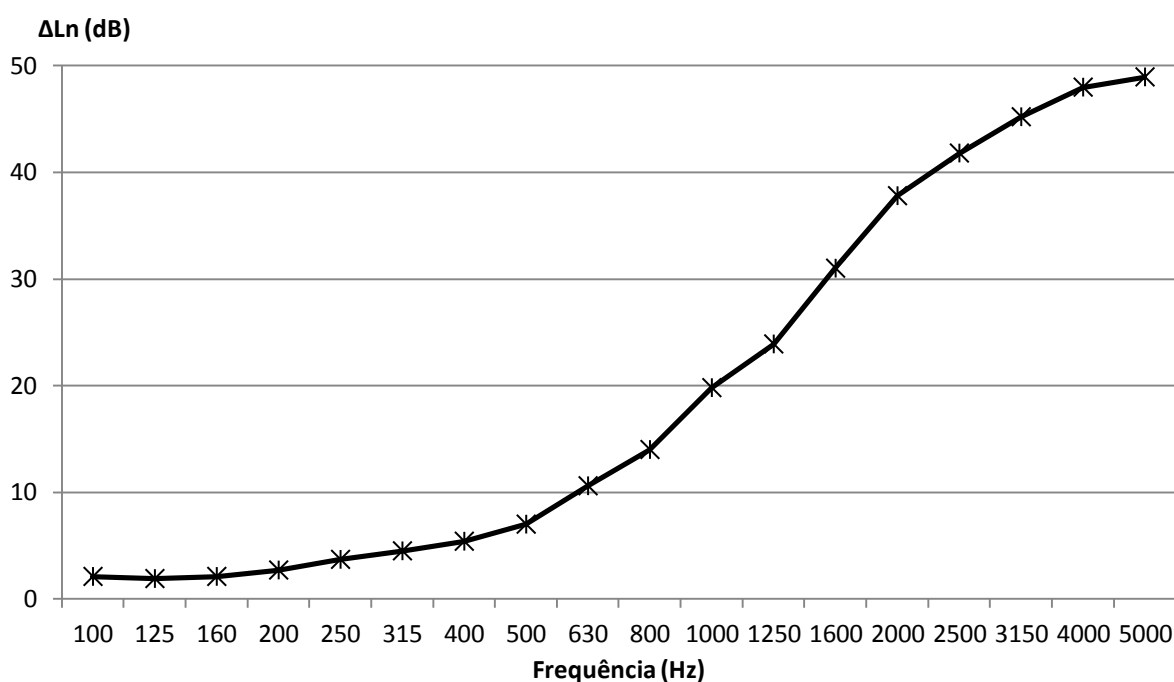


Fig. 6.15 – Espectrograma da redução sonora a ruídos de percussão do pavimento A representativo do comportamento mais comum dos pavimentos ensaiados

Segundo a figura 6.15, os pavimento flutuantes de aglomerado de cortiça reduzem bastante a propagação do ruído nas altas frequências, com valores de 40 a 50 dB. Ao invés disso, a sua eficácia não é tão evidente nas baixas frequências, tendo valores inferiores a 5 dB para frequências abaixo dos 315 Hz.

6.4.2. ANÁLISE DOS PAVIMENTOS COMERCIAIS

6.4.2.1. Metodologia

Para avaliar o comportamento dos pavimentos comerciais disponibilizados pela SEDACOR, foram ensaiados dezasseis pavimentos (A a P) e realizadas posteriormente quatro análises: avaliar a influência do tipo de decorativo, a influência do tipo elemento resistente, a influência do tipo de *underlay* e a influência da espessura do *underlay*, variando para isso os materiais das diferentes camadas. Além disso, foram desenvolvidos oito novos pavimentos (S a Z) em que o *underlay* é constituído por subprodutos de cortiça.

Ao longo de cada análise foram colocados esquemas elucidativos de rápida compreensão da composição dos pavimentos comparados, podendo ser assim facilmente identificável a camada que

está a ser variada uma vez que é aquela que não tem trama. A designação “Pav. i” em cada esquema remete à sua identificação do pavimento através da leitura do quadro 6.2.

As análises foram feitas entre as bandas de frequência dos 100 Hz e os 5 kHz, limite mínimo imposto pela NP EN ISO 140-8 [63].

Nesta dissertação, os resultados de alguns ensaios de pavimentos foram usados na discussão de mais do que uma análise. Exemplo disso é o “Pav. A” que é alvo de discussão quando se avalia a influência do elemento resistente, do *underlay* e da espessura do *underlay*.

Os pavimentos envernizados não são usados em comparação com os demais pavimentos sem verniz, apenas servem para avaliar o efeito do envernizamento no desempenho acústico dos pavimentos antes e depois da aplicação do verniz.

6.4.2.2. Influência do tipo de decorativo

Para estudar a influência do decorativo, avaliou-se o comportamento ao isolamento sonoro a ruídos de percussão de seis pavimentos distintos. Mantendo o “MDF” como elemento resistente, combinou-se os decorativos “52 CLK”, “Mono 215” e “012” com os *underlay* “51 PL” e “12 PL”, podendo assim ensaiar-se seis tipos de pavimentos distintos (Fig. 6.16).

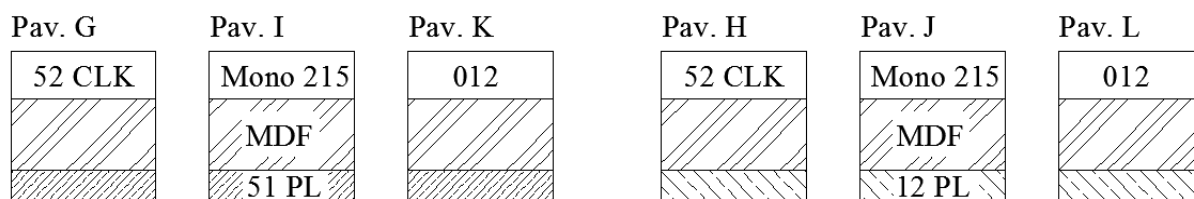


Fig. 6.16 – Pavimentos (G, I, K, H, J e L) que serviram de base para a avaliação da influência do tipo de decorativo nos pavimentos flutuantes

É de notar que as espessuras das camadas foi sempre a mesma, os pavimentos respeitaram a disposição descrita na figura 6.16 e em todas as amostras o *underlay* (51 PL ou 12 PL) apresentava uma espessura de 2,2 mm.

Como os resultados dos pavimentos com *underlay* de “51 PL” e de “12 PL” não evoluíam com o mesmo incremento aquando da variação do decorativo, expõe-se nas figuras 6.17 e 6.18 a variação do nível de pressão sonora normalizado em função do tipo de decorativo para os dois tipos de *underlay*.

Além disso estão representados na tela anexa a cada figura, os valores do nível de pressão sonora normalizado devido à excitação de impacto, calculado para o pavimento de referência com pavimento flutuante em ensaio, $L_{n,r,w}$ [26], dos diferentes pavimentos que sustentam esta análise. No entanto, como esses valores são iguais na maioria dos pavimentos ensaiados (≈ 60 dB) e para que se possa fazer uma leitura comparativa mais pormenorizada e interessante dos resultados, decidiu-se seguir o método de determinação do $L_{n,r,w}$ disposto na NP EN ISO 717-2 mas criando uma pequena modificação: em vez de realizar incrementos de 1 dB à curva de referência, movimentou-se a curva com incrementos de uma casa decimal (0,1 dB). Apesar de não se estar a cumprir a norma descrita anteriormente, consegue-se obter valores *Não Normativos* ($L_{n,r,w}$ NN) que tornam mais fácil a diferenciação dos pavimentos e tornar a sua leitura mais interessante.

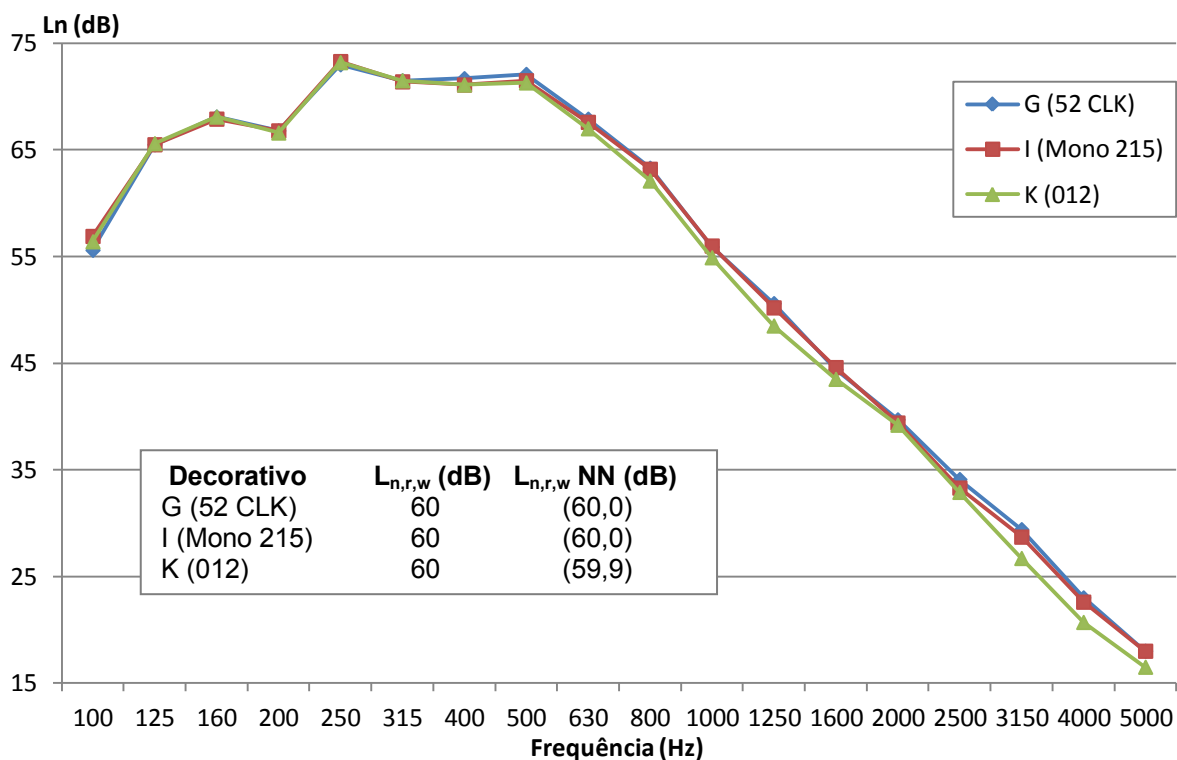


Fig. 6.17 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais de *underlay* “51 PL” (G, I e K) estudados para averiguar a influência do tipo de decorativo (52 CLK, Mono 215 e 012) em câmara reverberante

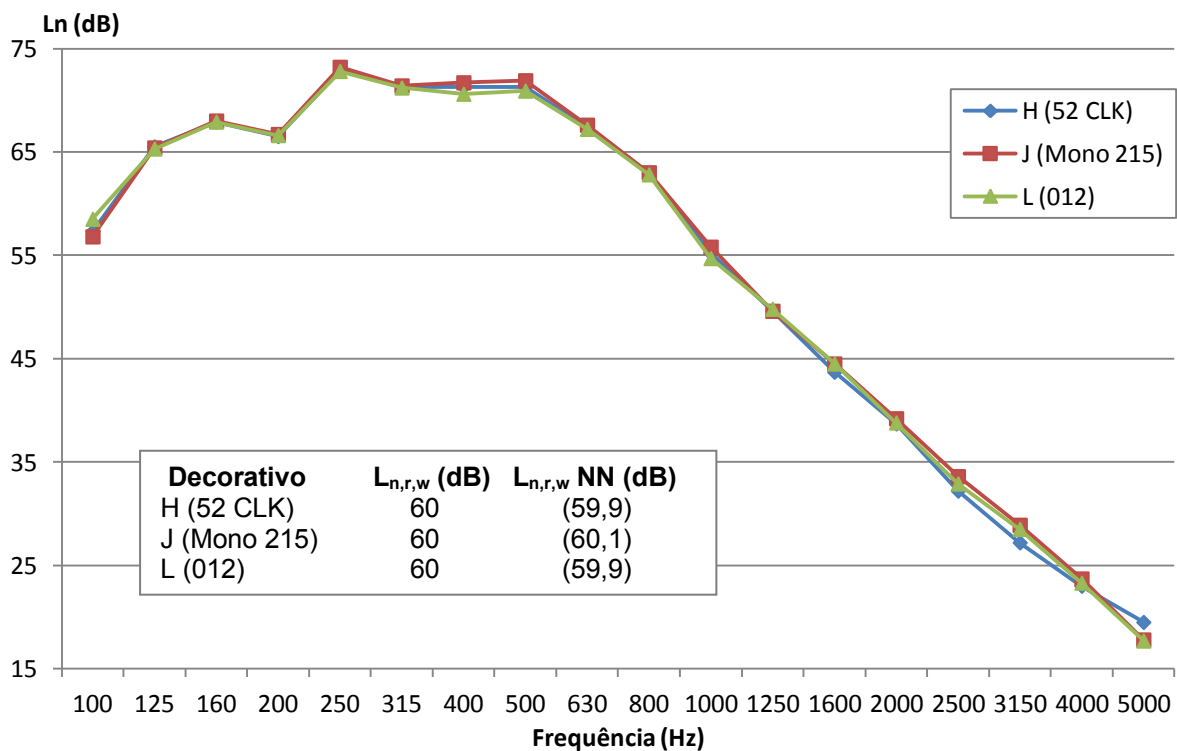


Fig. 6.18 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais de *underlay* “12 PL” (H, J e L) estudados para averiguar a influência do tipo de decorativo (52 CLK, Mono 215 e 012) em câmara reverberante

Através da análise das figuras 6.17 e 6.18 verifica-se que o comportamento dos pavimentos ensaiados é idêntico, porém, em ambos os tipos de *underlay*, o decorativo “012” apresenta uma ligeira melhoria no desempenho acústico dos pavimentos. Assim, com *underlay* “51 PL”, o pavimento propicia um acréscimo de isolamento sonoro nas bandas acima dos 500 Hz, chegando a diminuir a propagação do ruído em 2 dB para frequências superiores a 2,5 kHz, em relação aos outros pavimentos. No *underlay* “12 PL”, o decorativo “012” não gerou uma melhoria tão acentuada do isolamento sonoro, sendo esse acréscimo de isolamento menor que 1 dB e não tão predominante na maioria das bandas de frequências, como o que aconteceu com o caso do *underlay* “51 PL”.

Dado que o espectrograma dos pavimentos das duas figuras são idênticos, o valor do $L_{n,r,w}$ não varia, mantendo-se nos 60 dB para os pavimentos anteriormente descritos. Contudo, se a análise fosse permitida com uma casa decimal, seriam visíveis pequenas diferenças, conforme exposto nos valores denominados $L_{n,r,w}$ NN (Não Normativos) nas telas das figuras 6.17 e 6.18. No entanto, as variações são tão pequenas ($60 \pm 0,1$ dB) que demonstram a grande proximidade dos valores de $L_{n,r,w}$ dos pavimentos anteriormente estudados.

6.4.2.3. Influência do tipo de elemento resistente

Para perceber se o tipo de elemento resistente do pavimento flutuante influencia o desempenho acústico, analisou-se os ensaios de seis amostras com o mesmo decorativo “52 CLK”, variando o elemento resistente entre “contraplacado” e “MDF”. Com o intuito de obter resultados mais abrangentes, repetiu-se essa variação para três tipos de *underlay* distintos, “51 PL”, “25 MS” e “12 PL” (Fig. 6.19), tendo todos eles uma espessura de 1,2 mm.

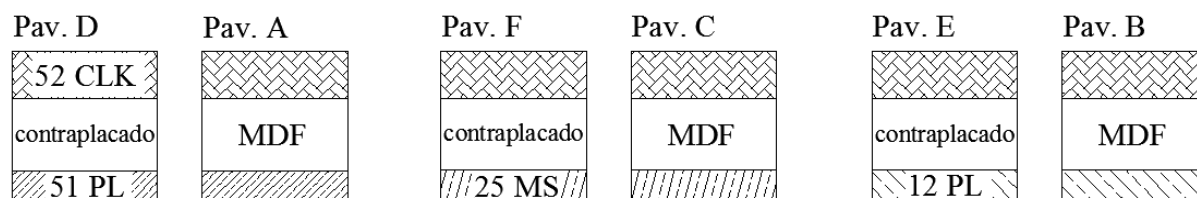


Fig. 6.19 – Pavimentos (D, A, F, C, E e B) que serviram de base para a avaliação da influência do tipo de elemento resistente nos pavimentos flutuantes

Após os ensaios dos anteriores pavimentos, analisaram-se os diversos espectrogramas expressos na figura 6.20, e verificou-se que a diferença entre os dois elementos resistentes não era proporcional entre os vários tipos de *underlay*, apesar dos seus espectrogramas serem similares. Por isso, resumiram-se na figura 6.21 os resultados da melhoria acústica do “contraplacado” em relação ao “MDF” em função do tipo de *underlay*, para uma melhor compreensão do ganho associado ao uso de um ou outro elemento resistente.

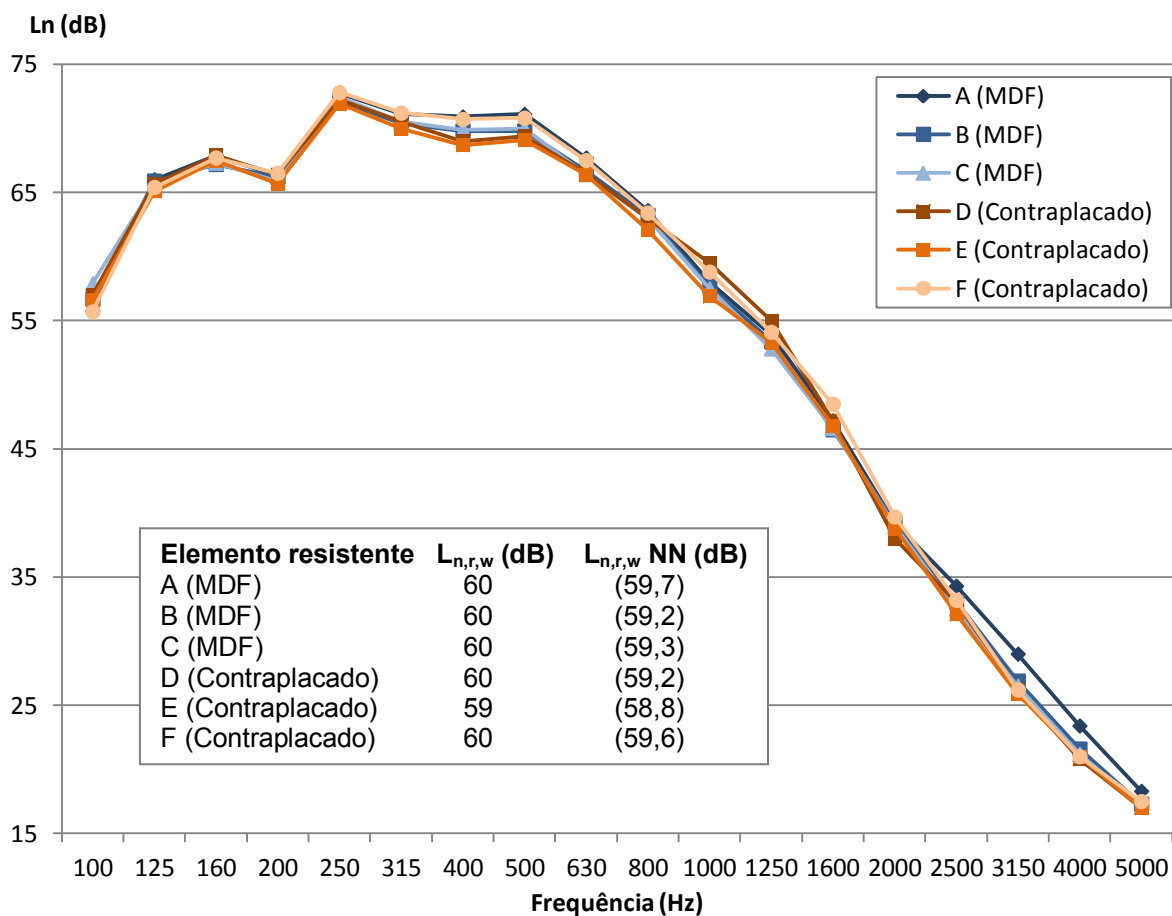


Fig. 6.20 – Níveis de pressão sonora normalizados e, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (A, B, C, D, E e F) para averiguar a influência do tipo de elemento resistente (MDF e contraplacado) em câmara reverberante

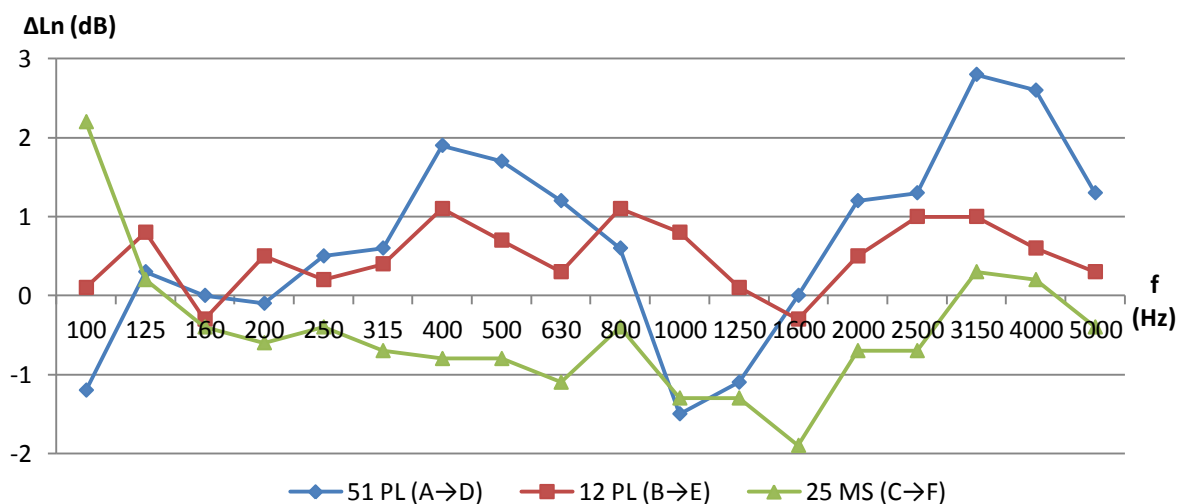


Fig. 6.21 – Redução dos níveis de pressão sonora normalizados do Contraplacado em relação ao MDF ($\Delta L_n = L_{MDF} - L_{cont.}$) em função do tipo de *underlay* (51 PL, 12 PL e 25 MS), fundamentada nos ensaios dos pavimentos comerciais (A, B, C, D, E e F) para averiguar a influência do tipo de elemento estrutural (MDF e contraplacado) em câmara reverberante

Segundo a figura 6.20, verifica-se que os espectrogramas são muito parecidos, no entanto o pavimento E (Contraplacado + 12 PL) apresenta uma melhoria na maior parte das bandas de frequências, porém tal melhoria não chega a ser maior que 0,5 dB, sendo por isso tal ganho de isolamento sonoro insignificante.

Pela análise da figura 6.21 verifica-se que não existe um ganho de isolamento sonoro generalizado entre o “MDF” e o “contraplacado”, todavia é possível aferir que os ganhos de isolamento sonoro a ruídos de percussão são maiores que as perdas quando é combinado o “contraplacado” com o *underlay* “51 PL” ou “12 PL” (Pav. D ou Pav. E). Como o “contraplacado” e o “25 MS” têm mais perdas de isolamento sonoro do que ganhos, deduz-se (por leitura inversa do gráfico da figura 6.21) que a combinação do “MDF” com o *underlay* “25 MS” (Pav. C) propicia mais ganhos de isolamento sonoro do que perdas.

Assim como aconteceu com a análise da influência do tipo de decorativo, os espectrogramas da figura 6.20 são idênticos, levando à obtenção do mesmo valor de 60 dB para o $L_{n,r,w}$ à exceção do pavimento E que tem um valor de 59 dB devido ao seu ganho subtil de isolamento sonoro em relação aos outros pavimentos, na maioria das frequências. No entanto, quando são analisados os valores de $L_{n,r,w}$ NN, verifica-se que dos cinco pavimentos que obtiveram um $L_{n,r,w}$ de 60 dB, os dois que têm pior classificação são os pavimentos A e F (59,7 e 59,6 dB respetivamente), reforçando assim a ideia anteriormente exposta de que não se deve conjugar “MDF” com “51 PL” (Pav. A) e “contraplacado” com “25 MS” (Pav. F).

6.4.2.4. Influência do tipo de *underlay*

Segundo alguns investigadores [18, 25], o maior responsável pela transmissão do ruído de percussão em pavimentos flutuantes é o *underlay*, que quanto mais resiliente for, maior será a sua absorção às vibrações, diminuindo assim a propagação das vibrações e o ruído produzido pela percussão no pavimento. Para tornar o *underlay* de cortiça mais resiliente, é necessário uma de duas coisas: adicionar um outro material resiliente ao aglomerado de cortiça (ex: borracha), ou aumentar o índice de vazios do material dessa camada. No entanto, tal camada não pode ter um índice de vazios elevado uma vez que tal pode levar a deformações localizadas no pavimento ao longo do tempo, quando este está sujeito a cargas estáticas, por exemplo, a perna de um armário.

Para entender melhor o comportamento dos pavimentos flutuantes em função do *underlay*, ensaiou-se quatro tipos de pavimentos distintos onde se manteve as mesmas condições e os mesmos materiais, à exceção do tipo de *underlay*, tendo-se por isso ensaiado camadas de 1,2 mm de “51 PL”, “25 MS”, “12 PL” e “40 BR”. Além desses pavimentos, ensaiou-se o pavimento feito totalmente de cortiça, onde o MDF e o *underlay* foram substituídos por cortiça de alta densidade, “HDC” (Fig. 6.22).

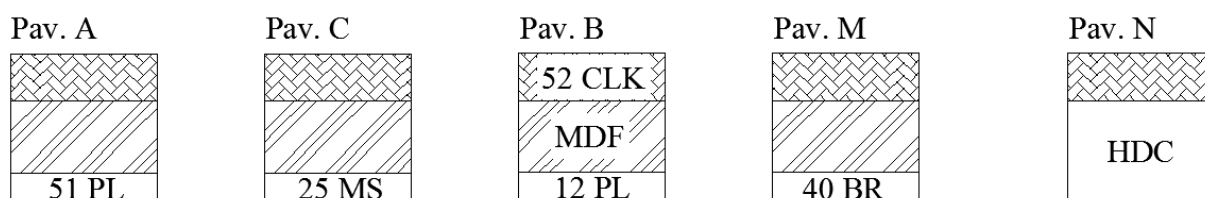


Fig. 6.22 – Pavimentos (A, C, B, M e N) que serviram de base para a avaliação da influência do tipo *underlay* nos pavimentos flutuantes

Para melhor entender o contributo do *underlay* no isolamento a ruídos de percussão em pavimentos flutuantes, analisou-se os cinco pavimentos descritos na figura 6.22, obtendo-se assim a figura 6.23 que serve de base para uma melhor análise dos resultados obtidos.

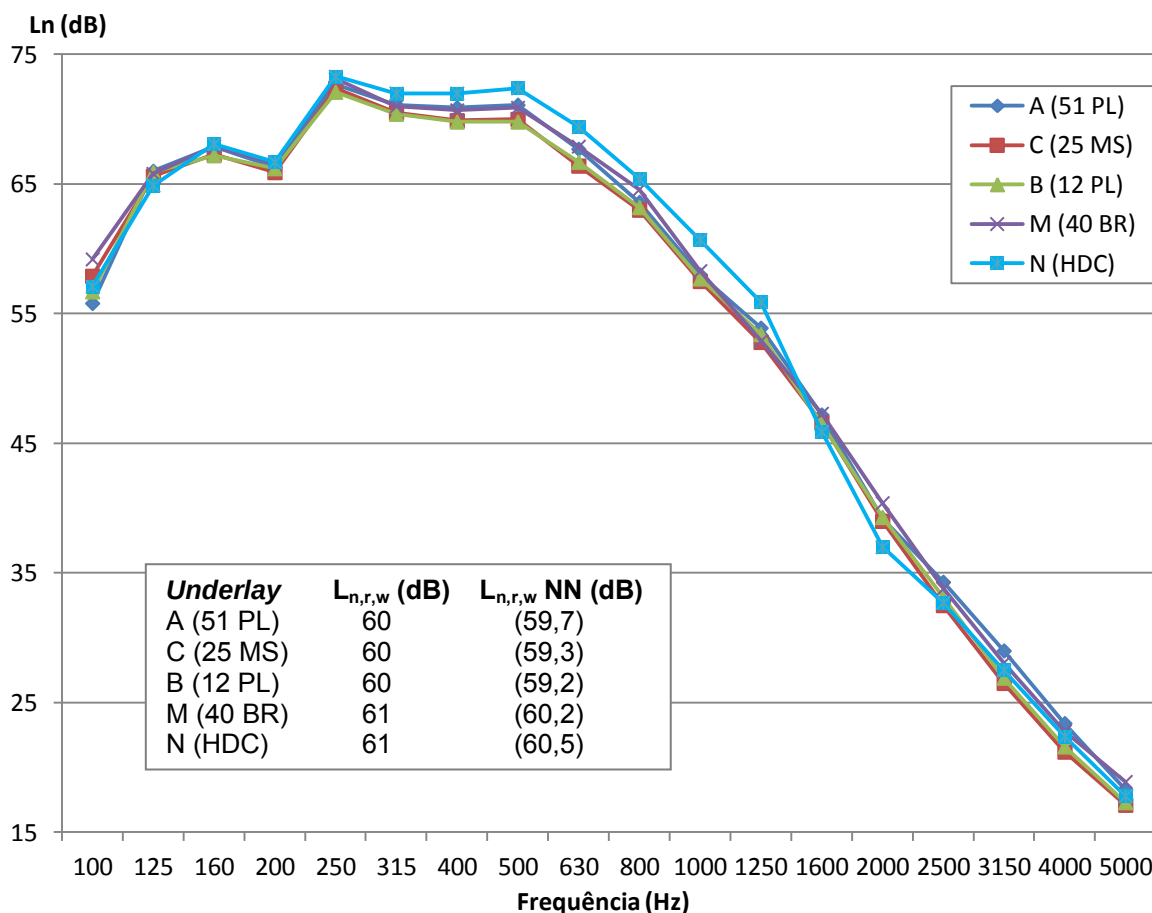


Fig. 6.23 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (A, B, C, M e N) para averiguar a influência dos cinco tipos de *underlay* (51 PL, 25 MS, 12 PL, 40 BR e HDC) em câmara reverberante

Pela figura 6.23, verifica-se que o pavimento de cortiça de alta densidade “HDC” tem um pior comportamento entre as bandas de frequência 315 Hz e 1,25 kHz, com maior amplitude nos 1 e 1,25 kHz, chegando a aumentar o ruído em 2,5 dB em relação aos outros pavimentos, um pouco devido à sua composição rígida que aumenta a transmissão das vibrações originadas pela máquina de percussão. Na banda de frequência dos 2 kHz, o mesmo pavimento tem um abaixamento do ruído de percussão em 2 dB. O pavimento do *underlay* de “40 BR” também tem um ligeiro aumento do ruído ao longo das frequências, quando comparado com o grupo de pavimentos com comportamento mais idêntico. Os outros pavimentos apresentaram comportamentos muito similares, ressaltando-se que os pavimentos com o *underlay* “25 MS” e “12PL” obtiveram um melhoramento do isolamento sonoro, rondando 1 dB nas bandas de frequência dos 400 aos 630 Hz e dos 2,5 aos 5 kHz.

No que toca ao $L_{n,r,w}$ e seus valores Não Normativos (NN), os pavimentos com “40 BR” e “HDC” têm um índice de isolamento sonoro de 61 dB devido ao facto da sua forma que aumenta o valor do seu índice, sendo o “HDC” aquele que tem o pior $L_{n,r,w}$ NN (60,5 dB). Dos outros pavimentos que obtiveram um $L_{n,r,w}$ de 60 dB, aqueles que têm o melhor índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão são os que têm *underlay* “12 LP” (Pav. B – 59,2 dB) ou “25 MS” (Pav. C – 59,3 dB).

6.4.2.5. Influência da espessura do *underlay*

Além da análise do tipo de *underlay*, também se investigou a influência da espessura do *underlay* no desempenho acústico do pavimento. Para tal, foi medida e analisada a evolução do isolamento sonoro em pavimentos com *underlay* de “51 PL” e “12 PL”, combinados com espessuras de 1,2 a 3,2 mm (combinações criadas pelos pavimentos A, G, P, B, H e I) (Fig. 6.24). Após análise e tratamento dos resultados, foi possível representar os dados finais na figura 6.25.

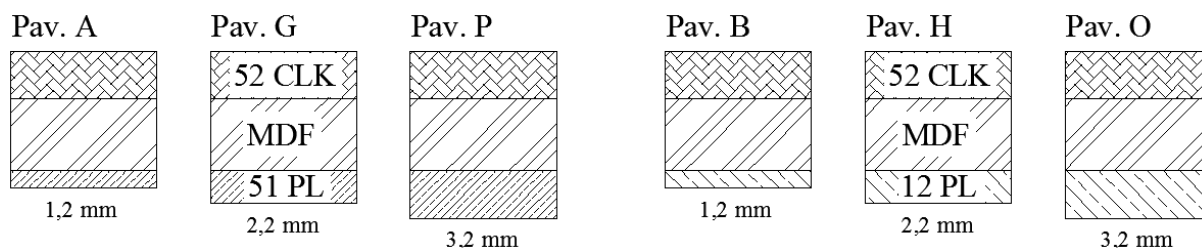


Fig. 6.24 – Pavimentos (A, G, P, B, H e O) que serviram de base para a avaliação da influência da espessura do *underlay* nos pavimentos flutuantes (1,2 a 3,2 mm)

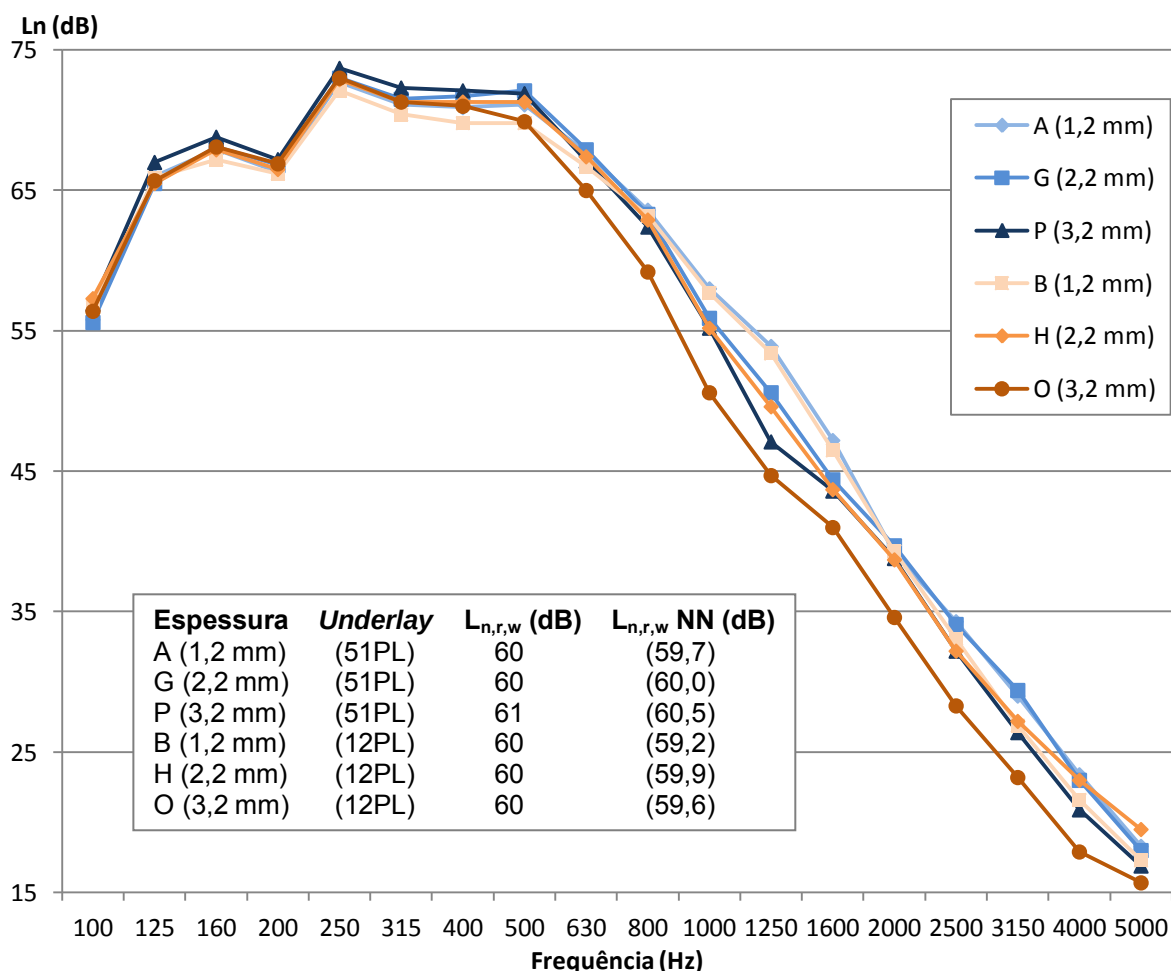


Fig. 6.25 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (A, G, P, B, H e O) para averiguar a influência da espessura do *underlay* (1,2 a 3,2 mm) em câmara reverberante

Através da interpretação da figura 6.25, pode-se apurar que para frequências entre os 800 e os 2000 Hz, o aumento da espessura aumenta o isolamento sonoro a ruídos de percussão. Verifica-se também um substancial destacamento do pavimento O em relação aos outros pavimentos para frequências superiores a 500 Hz.

Como a evolução dos espectrogramas em função da espessura não permitiram tirar grandes conclusões e após se ter verificado que os incrementos de espessura tinham uma evolução idêntica nos dois tipos de *underlay* (51 PL e 12 PL), analisou-se a redução sonora criada pelo aumento da espessura do *underlay* de 1,2 para 2,2 mm e de 2,2 para 3,2 mm, tendo-se realizado a média aritmética dos dois tipos de *underlay* segundo a evolução da espessura, representando-se tais resultados na figura 6.26.

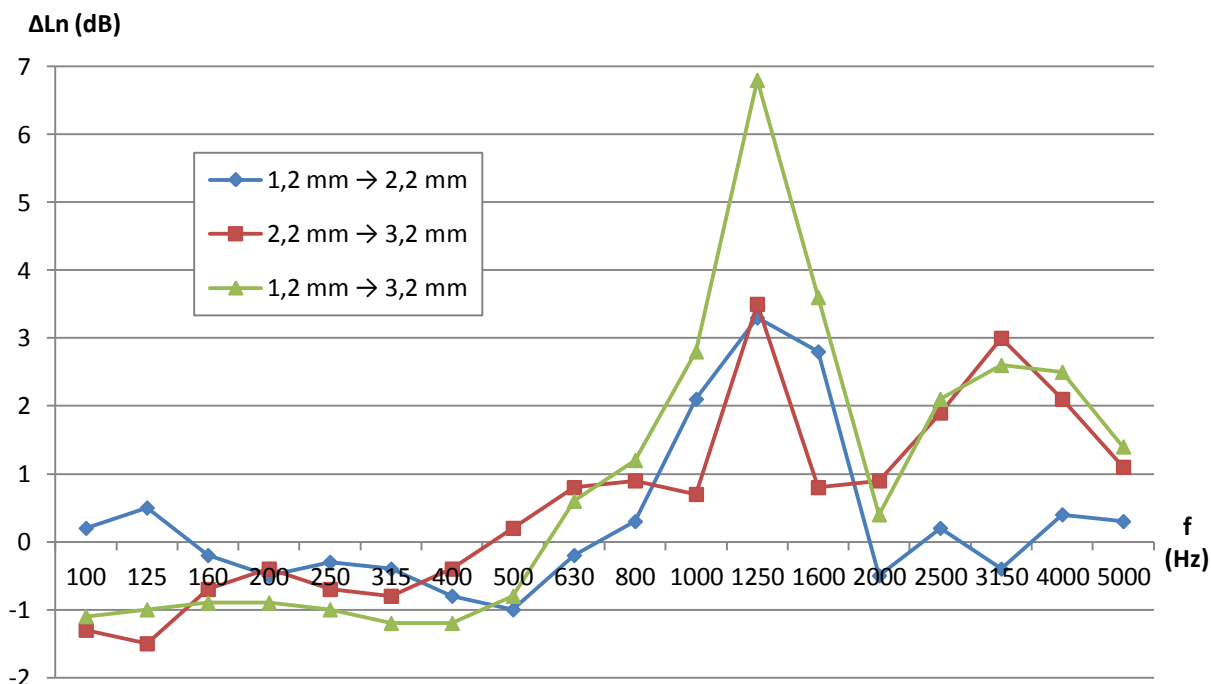


Fig. 6.26 – Redução média dos níveis de pressão sonora normalizados, criada pela variação da espessura do *underlay* dos pavimentos comerciais (A, B, G, H, O e P) para averiguar a influência da espessura do *underlay* (1,2 a 3,2 mm) em câmara reverberante

Pela figura 6.26 averigua-se que a variação do ΔL_n não é proporcional ao aumento da espessura do *underlay*. Apesar disso, em cada incremento de espessura verifica-se um aumento significativo do isolamento entre as bandas de frequência dos 800 e dos 2000 Hz, tendo-se registado apenas no segundo incremento (2,2 mm → 3,2 mm) um outro aumento substancial do isolamento sonoro para bandas de frequência superiores a 2 kHz. No entanto, quanto maior a espessura do *underlay*, maior é a propagação do ruído para frequências entre os 125 e os 500 Hz, prejudicando assim o valor do $L_{n,r,w}$. No final, o aumento de 2 mm do *underlay* propicia, em média, um aumento do isolamento sonoro a ruídos de percussão para frequências superiores a 500 Hz, chegando a atingir uma redução de quase 7 dB nos 1,25 kHz, apesar de aumentar ligeiramente o ruído para frequências iguais ou inferiores a 500 Hz.

Em síntese, o aumento da espessura proporciona um aumento do isolamento sonoro nas altas frequências e uma pequena diminuição nas baixas frequências. No entanto, como o ser humano é mais sensível na gama de frequências dos 1,25 a 5 kHz (considerando apenas as frequências em estudo), as

vantagens aí registadas são mais importantes do que as pequenas desvantagens em baixas frequências, onde a reação auditiva é menor. Por isso, o aumento da espessura do *underlay* é uma boa solução para aumentar o conforto acústico dos ocupantes que se inserem nos espaços onde se implementa tal solução.

No que toca ao $L_{n,r,w}$, à exceção do pavimento P que teve o pior valor, 61 dB, uma vez que foi aquele que teve o pior desempenho acústico para frequências inferiores a 500 Hz, todos os outros pavimentos tiveram um índice de 60 dB. Quando se analisaram os valores do índice não normativo, $L_{n,r,w}$ NN, averiguou-se que o pavimento B é aquele que apresenta o menor índice de todos os pavimentos (59,2 dB), dado que, apesar de aumentar o ruído nas altas frequências, tem o menor ruído nas baixas frequências, zona maioritariamente responsável pela caracterização desse índice.

Embora o pavimento O (3,2 mm) apresente uma grande redução sonora do ruído de percussão em mais de 5 dB em relação ao análogo de menor espessura (Pav. B de 1,2 mm) para frequências superiores a 500 Hz (Fig. 6.27), o valor do $L_{n,r,w}$ NN deste pavimento (59,6 dB) é maior que o do pavimento B (59,2 dB). Este resultado do pavimento com *underlay* de 1,2 mm é alcançado graças à diminuição do ruído ($\approx 0,5$ dB/frequência) para frequências inferiores aos 500 Hz (zona com forte influência a caracterização do índice), desprezando o contributo do isolamento sonoro nas altas frequências e levando a crer que o pavimento B tem melhor desempenho acústico.

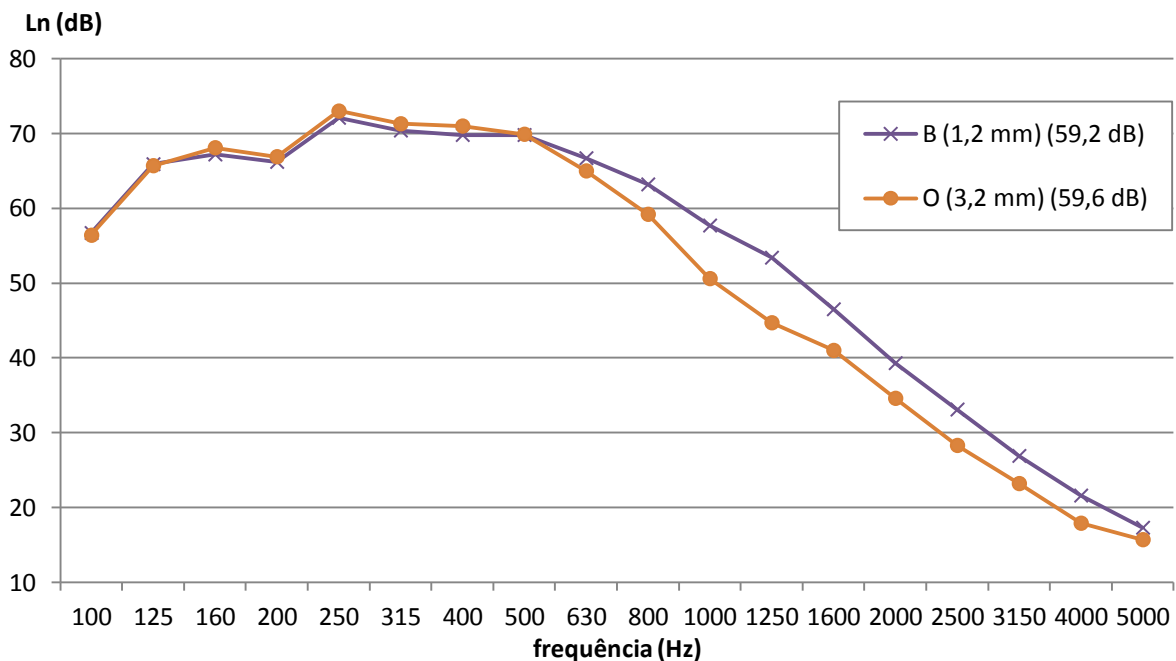


Fig. 6.27 – Níveis de pressão sonora normalizados e $L_{n,r,w}$ NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (B e O) para averiguar a influência do aumento da espessura do *underlay* de 1,2 mm para 3,2 mm

Com esta atual caracterização normativa e com o facto da produção comercial centrar os seus objetivos no aumento da classificação do pavimento flutuante ($L_{n,r,w}$ menores), é claramente evidente que a produção focará o tratamento do ruído nas baixas frequências (zona em que o Homem não é tão sensível) com o objetivo de diminuir o seu $L_{n,r,w}$, ao invés da preocupação da diminuição do ruído nas altas frequências (onde o ser humano é mais sensível), quando a verdadeira preocupação deveria ser o oposto: focar a investigação no aumento do conforto acústico dos ocupantes através da diminuição do ruído nas frequências mais incomodativas, as altas frequências.

Nos subcapítulos 6.4.3.3 e 7.2.2 são feitas algumas considerações sobre uma adaptação do atual método descrito na NP EN ISO 717-2 através da utilização do filtro A, considerando assim a reação auditiva do ser humano na classificação do desempenho acústico de um sistema flutuante.

No final da análise individual das influências das camadas constituintes dos pavimentos, foi possível construir um gráfico geral (Fig. 6.28) com todos os resultados dos ensaios dos pavimentos comerciais

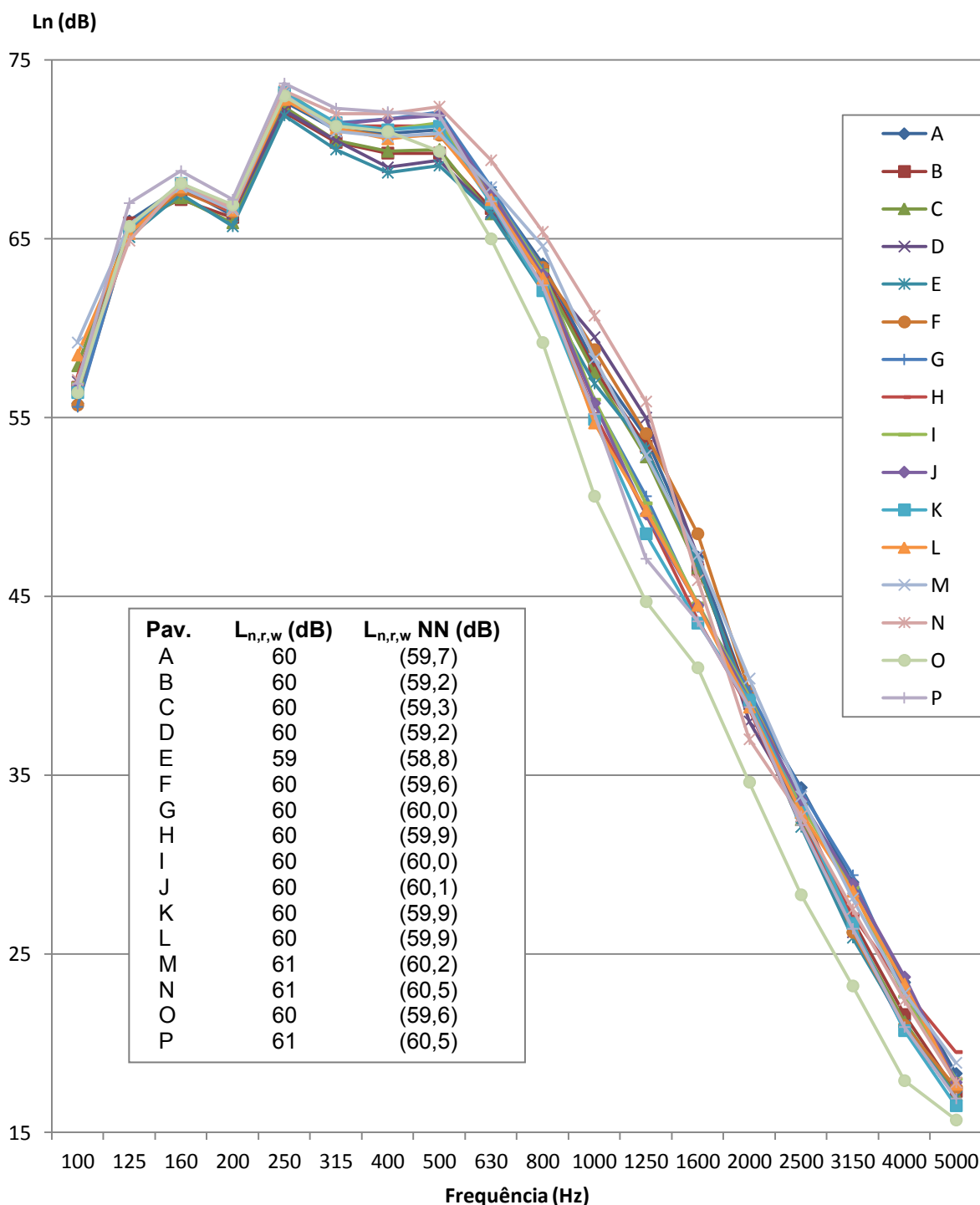


Fig. 6.28 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) de todos os dezasseis pavimentos comerciais ensaiados em câmara reverberante

Com a representação da figura 6.28, pode-se concluir que todos os pavimentos têm um comportamento muito idêntico para frequências até aos 500 Hz ($\Delta L < 4$ dB). Porém as grandes diferenças verificam-se nos valores obtidos para frequências superiores a 500 Hz, chegando-se a registar uma variação do ruído de percussão de 11 dB. É de notar que todos os pavimentos com *underlay* de espessura superior a 1,2 mm demonstraram melhorias no isolamento sonoro na banda de frequências 1,25 kHz, principalmente o pavimento O (52 CLK + MDF + 12 PL (3,2 mm)). Este mesmo pavimento é o que apresenta melhor comportamento acústico acima dos 500 Hz, com melhorias na ordem dos 4 dB. Porém este pavimento não é o que oferece um menor valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão (60 dB, igual ao valor médio das amostras comerciais) devido ao facto de apresentar valores de níveis de pressão sonora um pouco altos nas frequências abaixo dos 500 Hz, zona essa maioritariamente responsável pela classificação do ruído de percussão de pavimentos. Assim, aquele que tem o melhor $L_{n,r,w}$ é o pavimento E pois ostenta os menores valores de L_n para frequências inferiores a 630 Hz, zona que mais influencia o resultado do $L_{n,r,w}$. Os pavimentos N e P, através da análise dos valores não normativos ($L_{n,r,w}$ NN), são aqueles que têm o maior índice de todos os pavimentos comerciais (60,5 dB). Isto acontece porque o pavimento P tem um aumento do ruído nas baixas frequências (e diminuição nas altas frequências, apesar de desprezável) e o pavimento N por acarretar altos níveis de pressão sonora normalizada na maior parte das frequências, especialmente abaixo dos 1,6 kHz.

6.4.2.6. Efeito do envernizamento

Como já descrito anteriormente, os pavimentos A a P não são produtos finais da linha de montagem uma vez que lhes falta dar o remate final de envernizamento. Como tal envernizamento não estava disponível no período de ensaios por razões logísticas, procedeu-se à medição dos anteriores pavimentos mesmo sem terem sido submetidos a envernizamento, não inviabilizando a comparação entre eles desde que mantidas as mesmas condições de ensaio, quer procedimentos quer condição e preparação da amostra.

Algum tempo depois dos ensaios dos pavimentos comerciais, foi possível envernizar e ensaiar dois dos dezasseis pavimentos comerciais sem verniz (G e H) e analisar os resultados dos pavimentos após envernizamento (Q e R) (Fig. 6.29), com o objetivo de avaliar o efeito do envernizamento no desempenho acústico dos pavimentos selecionados. O envernizamento é composto por duas camadas primárias de resinas acrílicas fotopolimerizáveis, diluentes reativos, fotoiniciadores e aditivos em proporções adequadas (50 e 30 g/m² para a 1ª e 2ª camada), e uma terceira camada de revestimento (20 g/m²) baseada em oligómeros de uretano-acrilato alifático e monómeros acrílicos fotopolimerizáveis, com secagem através de radiação ultravioleta.

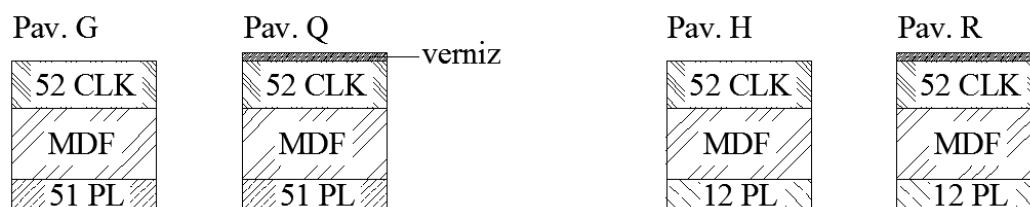


Fig. 6.29 – Pavimentos (G, Q, H e R) que serviram de base para a avaliação do efeito do envernizamento nos pavimentos flutuantes

Após o registo e tratamento das medições do ruído de percussão em câmara reverberante, foi possível representar os resultados dos pavimentos sem verniz (G e H) e com verniz (Q e R) na figura 6.30.

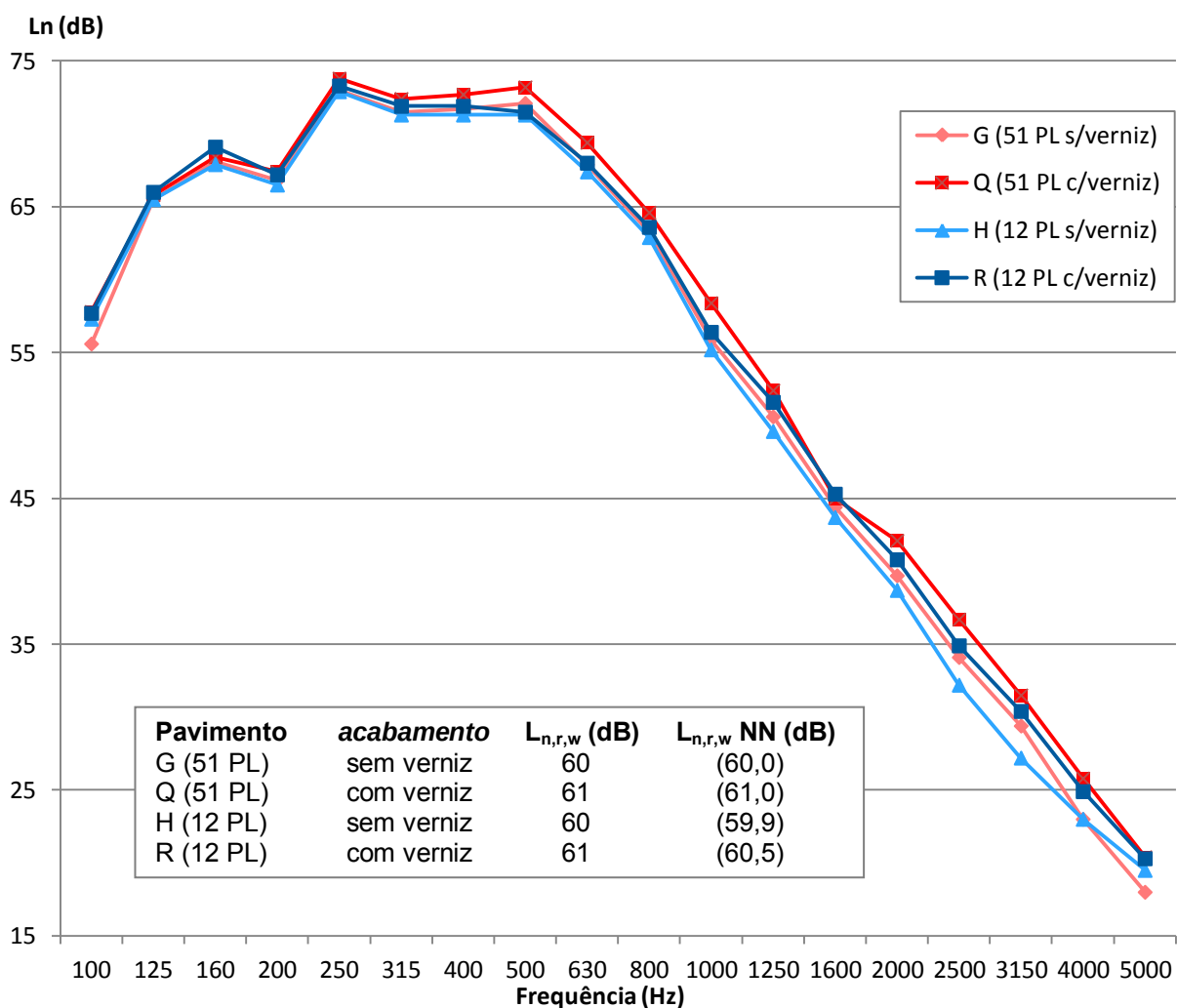


Fig. 6.30 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos pavimentos comerciais (G, H, Q e R) para averiguar o efeito do envernizamento nos pavimentos comerciais em câmara reverberante

Segundo a figura 6.30, a aplicação do verniz nos pavimentos comerciais faz aumentar a propagação do ruído em todas as frequências, especialmente nas bandas de frequência iguais ou superiores a 1 kHz, em valores de até 3 dB. No caso do pavimento com *underlay* “51 PL”, o aumento do ruído (mais de 1dB) faz-se sentir desde os 400 Hz e no caso do “12 PL” esse aumento verifica-se a partir da banda de frequência dos 1 kHz. Além disso, neste caso, o envernizamento fez subir 1 dB o valor do $L_{n,r,w}$ de cada um dos pavimentos. Como o envernizamento do pavimento G (51 PL) aumentou o ruído nas bandas próximas dos 500 Hz (≈ 1 dB), o valor do $L_{n,r,w}$ NN aumentou 1 dB, enquanto o mesmo envernizamento no pavimento H (12 PL), por aumentar menos o ruído nas baixas frequências, conduziu a um aumento do mesmo índice de apenas 0,6 dB.

Para perceber se o efeito do envernizamento seria mais significativo num ou noutro tipo de *underlay*, analisou-se o incremento do nível de pressão sonora normalizado nas várias frequências entre os pavimentos G e Q (51 PL) e os pavimentos H e R (12 PL), registando tais incrementos na figura 6.31.

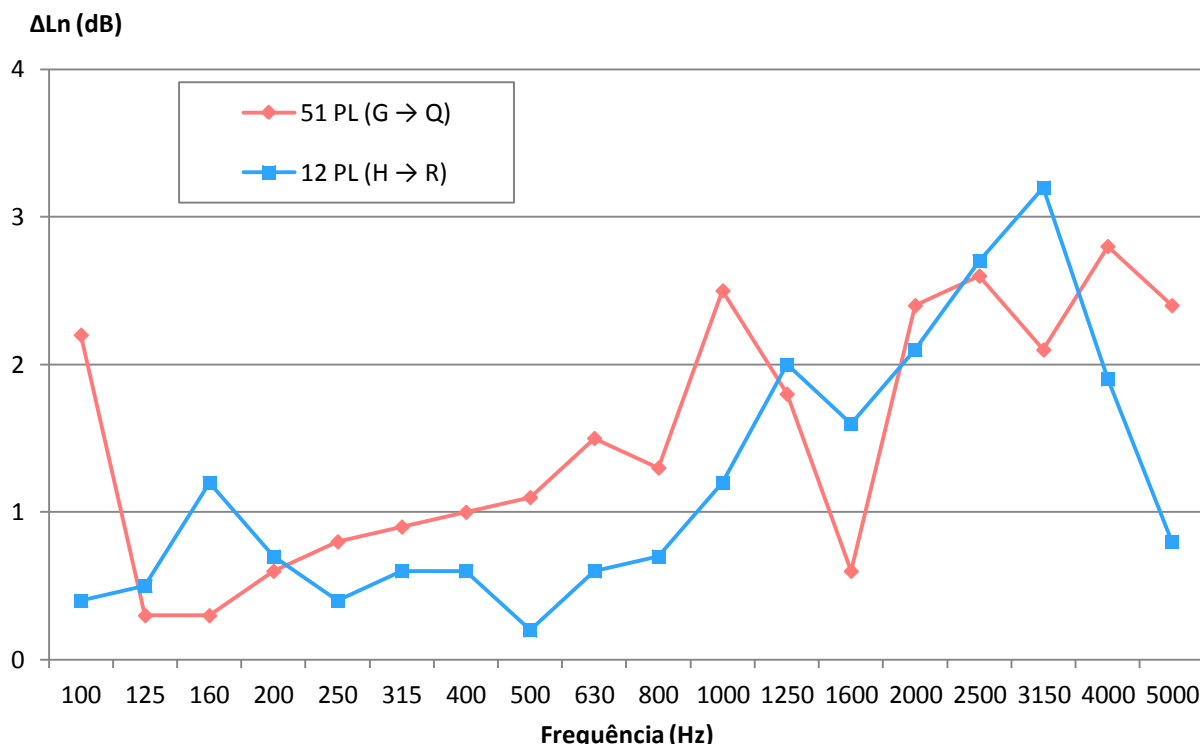


Fig. 6.31 – Aumento do nível de pressão sonora normalizado dos pavimentos G e H quando submetidos a envernizamento, em função do tipo de *underlay*

Pela análise da figura 6.31 averigua-se que o aumento do L_n não se acentua maioritariamente num só tipo de *underlay*, sendo alternado entre os dois tipos. Porém é possível analisar uma tendência crescente em frequência, ou seja, nas médias-baixas bandas de frequências o incremento ronda valores abaixo do 1 dB (salvo o incremento do “51 PL” nos 100 Hz) e nas médias-altas frequências o incremento localiza-se à volta dos 2 dB.

Por isso, pela análise dos resultados presume-se que o efeito do envernizamento não depende do tipo de *underlay*. Pode possivelmente depender do método de aplicação do verniz, da temperatura de secagem, da viscosidade, da espessura, etc.

6.4.3. ANÁLISE DOS PAVIMENTOS DESENVOLVIDOS

6.4.3.1. Metodologia

Além dos 18 pavimentos comerciais fornecidos pela empresa SEDACOR (A a R), foram desenvolvidos oito novos pavimentos (S a Z) a partir de um pavimento comercial sem *underlay*, onde foram criados, colados, ensaiados e retirados diversos *underlays* no mesmo pavimento de ensaio, podendo assim avaliar o comportamento do pavimento flutuante em função do tipo e forma de *underlay*.

Durante esta análise, os pavimentos são discutidos em função da sua evolução temporal de ensaio, explicando-se a relação construtiva entre os pavimentos e o seu aprimoramento em função dos resultados laboratoriais.

6.4.3.2. Experiência 1 – Tiras e amortecedores

Durante a realização da presente dissertação, surgiu a ideia de avaliar o comportamento acústico de um pavimento que tivesse uma menor área de contacto entre o pavimento flutuante e o piso estrutural, com o intuito de averiguar se no caso em que se retira área de contacto é possível diminuir a propagação do ruído, surgindo assim a ideia de ensaiar um pavimento composto por tiras de cortiça como *underlay*. Porém não é possível criar grandes espaçamentos entre os ripados uma vez que pode ocorrer flexão por fadiga. Para contornar tal problema, reproduziram-se alguns ensaios preliminares de estabilidade que levaram à escolha de um pavimento constituído por um *underlay* de tiras de uma folha de cortiça “15 MS” de 2 mm de espessura (Fig. 6.32 – Pav. U), que detinha 51% de área de pavimento sem contacto com o piso.

Todavia, não havia um pavimento comercial que tivesse os mesmos materiais, em todas as camadas, que os do pavimento desenvolvido, diferenciando-se dos outros já ensaiados apenas no *underlay*. Como a empresa não pode fornecer nem pavimentos com *underlay* de “15 MS” de 2 mm, nem folhas de “51 PL”, “12 PL” ou “25 MS” para poder criar as tiras de cortiça e para poder comparar o comportamento desse novo pavimento com os pavimentos da empresa já ensaiados, compararam-se os resultados deste novo pavimento com a média energética dos pavimentos que aparentavam ter características idênticas, os pavimentos G e H, que têm o mesmo decorativo, o mesmo elemento resistente, mas não o mesmo *underlay*: não é constituído por “15 MS”, mas sim por “51 PL” e “12 PL” respetivamente.

Porém admite-se poder haver uma muito pequena dissimilaridade entre os resultados obtidos usando o 15 MS como *underlay* e usando a média energética dos resultados com o “51 PL” e com o “12 PL”, podendo ser desprezável tal diferença.

Após os ensaios do Pavimento U, pensou-se em duplicar a espessura do *underlay* para averiguar se haveria uma melhoria ao nível do isolamento sonoro. Por isso decidiu-se colocar uma nova camada de tiras de 2 mm de “15 MS” por cima das anteriores (Fig.6.32 – Pav. V) de maneira a poder avaliar o seu comportamento.

Além da duplicação da espessura das tiras do *underlay*, e com o intuito de melhorar o desempenho acústico do piso anterior, acrescentaram-se entre as tiras de 15MS, duas tiras finas de 2 mm de cortiça de alta densidade (HDC – produto desenvolvido recentemente), com o objetivo de conferir-lhes resiliência suficiente para amortecer as vibrações, criando assim uma espécie de amortecedores de cortiça (Fig. 6.32 – Pav. S).

Para complementar esta caracterização dos amortecedores de cortiça decidiu-se diminuir a área de contacto com o piso e avaliar se o seu comportamento melhorava. Retirou-se uma faixa central de 6 cm de largura ao longo de cada prancha, dividindo cada tira de amortecedor em dois (Fig.6.32 – Pav. T), aumentando a percentagem de espaços vazios de 51 % para 66%. As questões de estabilidade do pavimento foram tidas em consideração através da colocação pontual de pesos em zonas críticas de flexão, levando à conclusão que tal pavimento tinha um comportamento estável e satisfatório.

Após o ensaio dos variados pavimentos descritos anteriormente, procedeu-se ao tratamento dos resultados e posterior representação gráfica (Fig. 6.33) para uma melhor comparação entre os diversos pavimentos flutuantes.

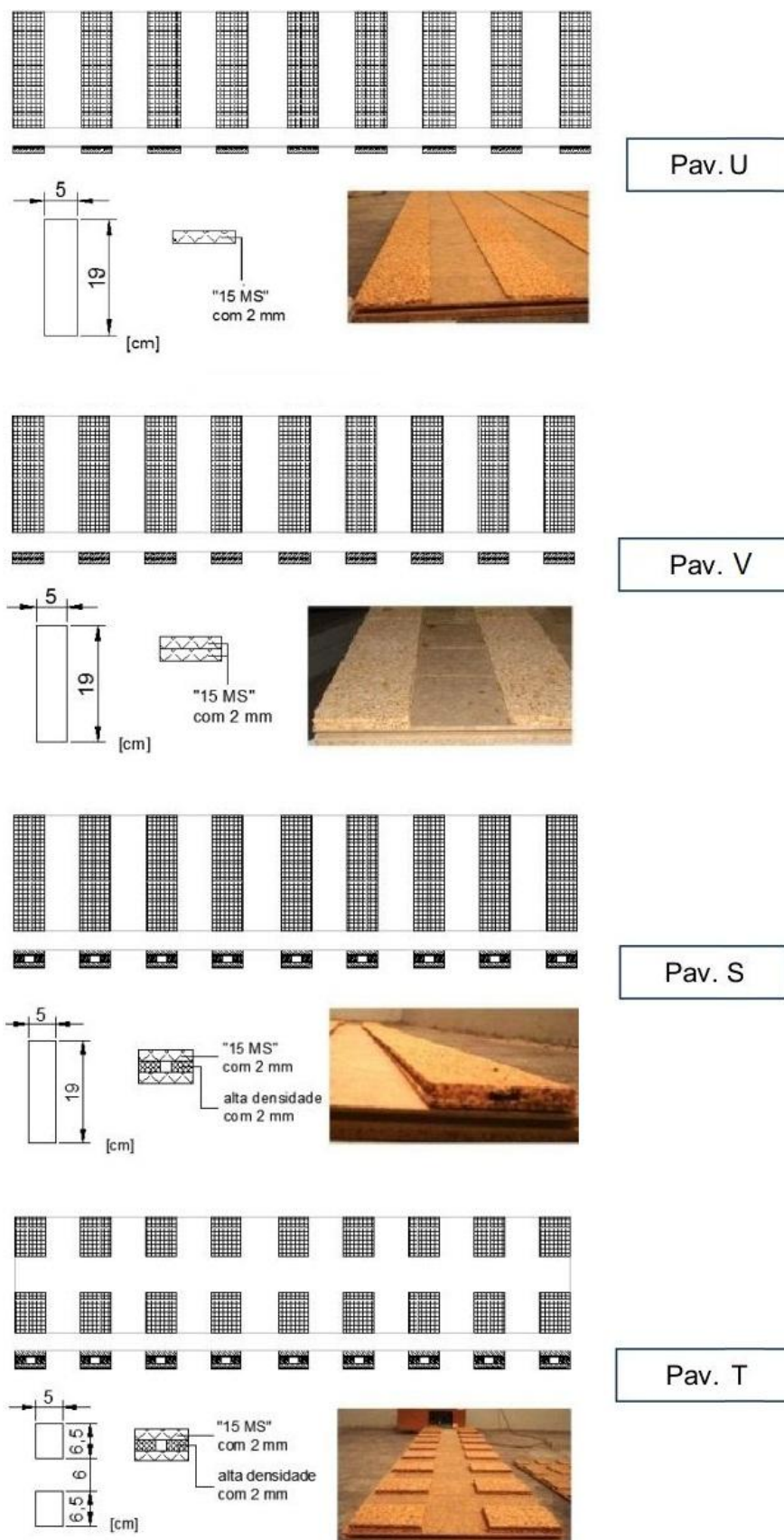


Fig. 6.32 – Esquema dos quatro pavimentos desenvolvidos a partir de algumas combinações de tiras de cortiça (U, V, S e T)

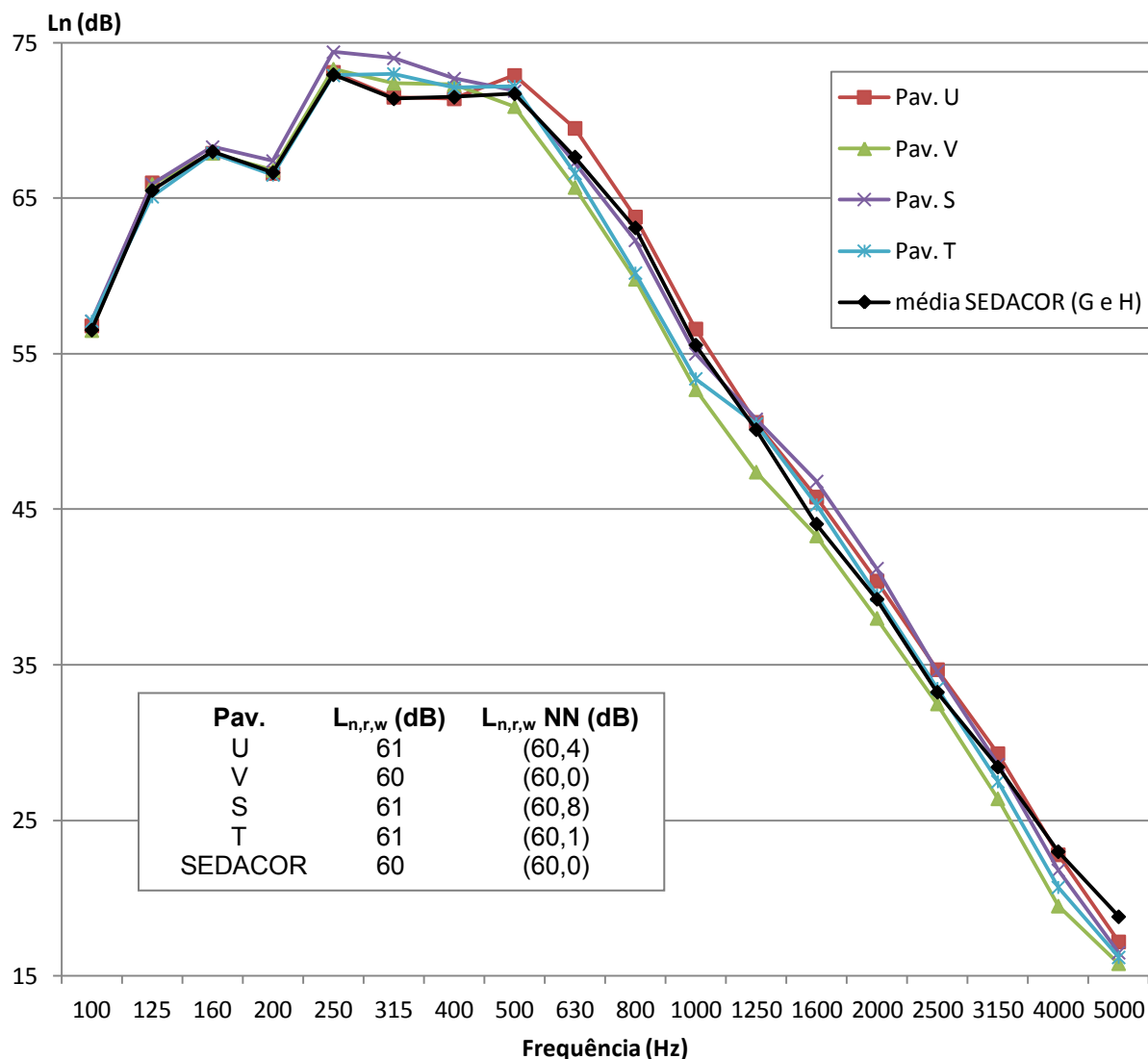


Fig. 6.33 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) dos quatro pavimentos desenvolvidos a partir de tiras de cortiça (U,V,S e T) ensaiados em câmara reverberante, comparados com a média energética dos pavimentos comerciais G e H fabricados pela SEDACOR

Pela interpretação da figura 6.33, pode-se averiguar que a diminuição da área de contacto entre o pavimento flutuante e o piso prejudicou em média 1 dB no desempenho acústico ao isolamento sonoro a ruídos de percussão do pavimento U nas bandas de frequência dos 500 Hz aos 3,15 kHz em relação à média energética dos pavimentos G e H, tendo porém um comportamento idêntico nas frequências abaixo dos 400 Hz. Dado que este pavimento tem uma morfologia que favorece o aumento da área contributiva na caracterização do $L_{n,r,w}$ (níveis superiores de ruído em algumas frequências abaixo dos 630 Hz), o seu valor normativo ($L_{n,r,w}$) e não normativo ($L_{n,r,w}$ NN) são ligeiramente superiores aos valores médios dos pavimentos comparativos da SEDACOR, tendo uma adição de 1 e 0,4 dB respetivamente.

Verifica-se que a duplicação da espessura das tiras de *underlay* no pavimento V não tem grande diferença nas frequências abaixo dos 400 Hz. Todavia, para frequências superiores a 500 Hz, à exceção das bandas 1,6 kHz e 2,5 kHz, apresenta uma melhoria no isolamento em mais de 2 dB, tendo

algumas delas valores superiores a 3 dB. Além disso, apresenta um valor de $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo (NN) igual ao registado pelos pavimentos médios da SEDACOR (60 e 60,0 dB respetivamente). Apesar disso, o pavimento V demonstra ser uma boa solução em relação a todos os outros pavimentos, mesmo em relação àqueles que fazem parte da média da SEDACOR, pois tem a menor propagação do ruído na maior parte das bandas de frequência, especialmente nas altas frequências onde o ser humano é mais sensível, embora tal melhoramento não tenha grande influência no cálculo do $L_{n,r,w}$.

A inclusão de tiras de cortiça de alta densidade no pavimento não melhorou o desempenho acústico. Ao invés disso, o pavimento S aumentou o ruído de percussão em todas as frequências em relação ao pavimento V, chegando a ter um aumento de 2 dB a 3,5 dB para frequências superiores a 800 Hz, revelando-se ser uma má opção de *underlay* para pavimento. A somar ao facto de ter um ruído maior que a média da SEDACOR na maior parte das frequências, é de salientar que este pavimento detém um alto índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, quer normativo (61 dB), quer Não Normativo (60,8 dB), tendo também o maior valor de entre os pavimentos comerciais e os desenvolvidos.

Apesar da redução da área de contacto entre o pavimento e o piso criada pelo pavimento T, que levou a uma diminuição do L_n de cada frequência em relação ao pavimento S, os resultados obtidos demonstraram que tal estratégia não foi suficiente para obter um maior isolamento que o pavimento V, tendo (em relação ao pavimento V) aumentado em 1 dB o ruído nas bandas dos 1,25 kHz aos 4 kHz, chegando a criar nas bandas de frequência 1,25 kHz e 1,6 kHz, uma perda de isolamento de 3 dB e 2 dB respetivamente.

6.4.3.3. Experiência 2 – Elipses e bastões

Além da ideia de explorar as potencialidades do uso de tiras de cortiça como *underlay*, surgiu a ideia de criar um padrão de recortes na cortiça (Fig. 6.34 – Pav. Y) que ao contrário das tiras de cortiça, que tinham os espaços vazios comunicantes entre si, com este novo *underlay* podia haver a possibilidade de aproveitar os espaços de ar fechados como molas amortecedoras, diminuir a propagação do ruído de percussão e aumentar a eficiência do isolamento [25]. Com tal inovação seria possível obter 46% de área de pavimento que não estivesse em contacto com o piso estrutural.

Posteriormente foi idealizada a utilização de bastões de cortiça (varas cilíndricas de cortiça prensada que dão origem às rolhas de cortiça de espumante) cortados ao meio e colados no pavimento em substituição das zonas de cortiça do anterior pavimento (Fig. 6.34 – Pav. W), mas sem a possibilidade de tirar proveito do possível amortecimento derivado da criação de espaços de ar fechados, simulando assim a morfologia do comum soalho flutuante apoiado em ripado. Com tal pavimento diminuiu-se fortemente o contacto entre o pavimento e o piso, havendo em teoria apenas uma linha de contacto entre os bastões e o piso. Porém, devido à compressibilidade dos bastões, na realidade existe uma pequena área de contacto, e, no máximo, considerando uma hipotética área de contacto com largura de 1 cm paralela ao comprimento do bastão obtém-se 86% de espaços vazios.

Após o ensaio do anterior pavimento, ensaiou-se o mesmo pavimento mas desta vez com lã de rocha de 30 kg/m³ a preencher os espaços vazios entre os meios bastões (Fig. 6.34 – Pav. X) com o intuito de baixar o pico do nível de pressão sonora verificado nos 250 Hz, obtendo assim um pavimento com caixa-de-ar preenchida.

Após tratamento dos resultados dos ensaios laboratoriais, foi possível representar os diferentes valores na Fig. 6.35.

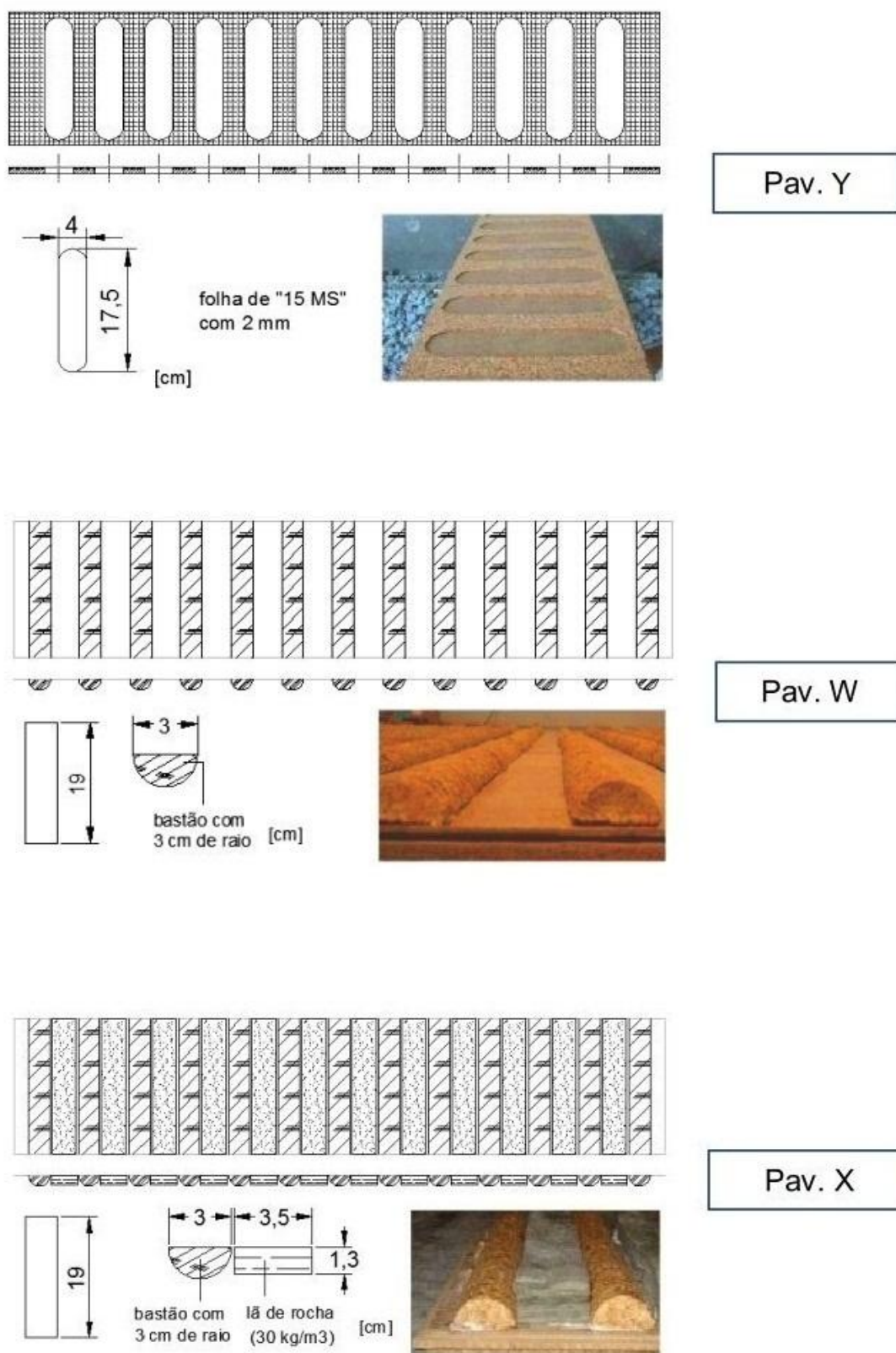


Fig. 6.34 – Esquema dos três pavimentos desenvolvidos a partir da ideia dos espaços de ar fechados como maneira de obtenção de um amortecimento extra (Y, W e X)

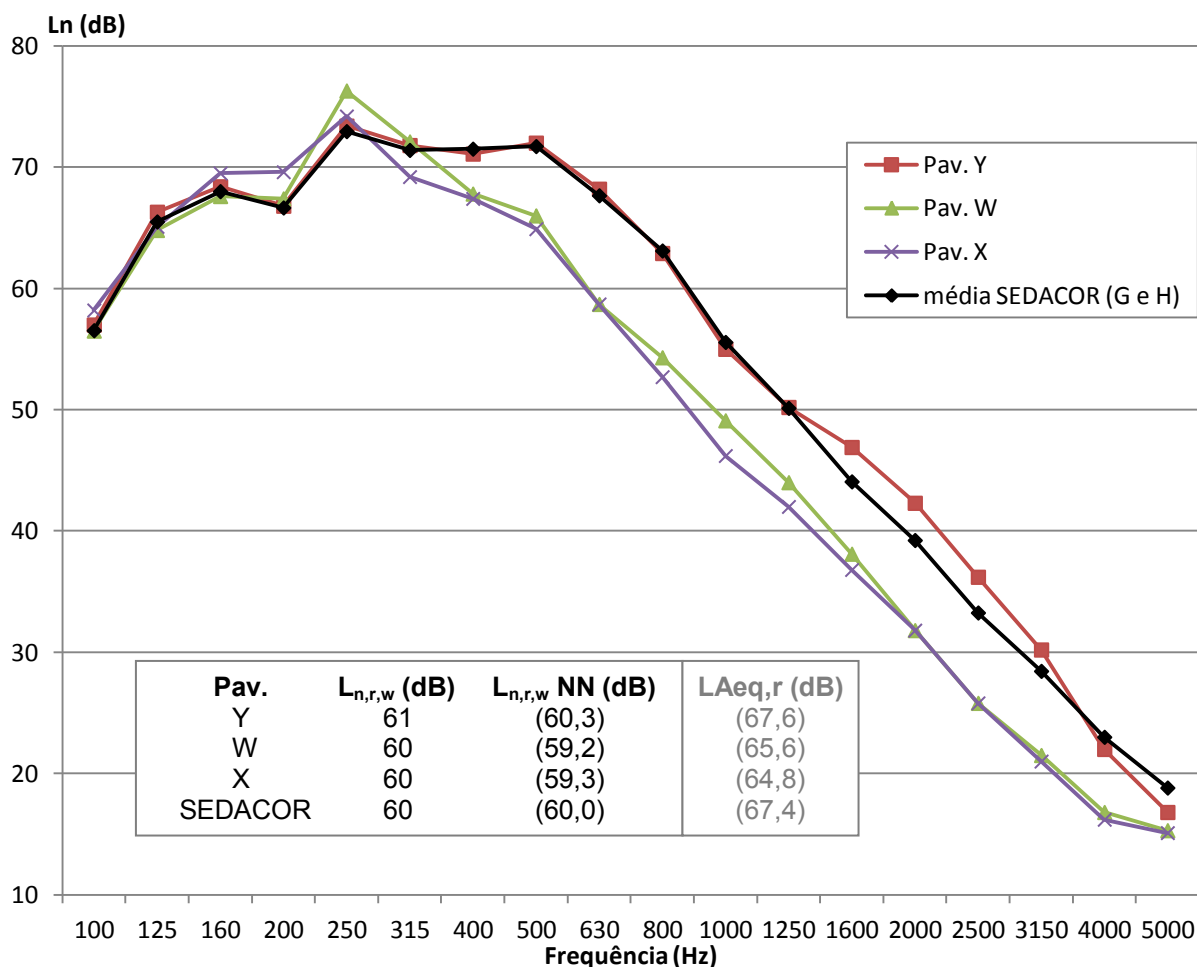


Fig. 6.35 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) e $LA_{eq,r}$ dos três pavimentos desenvolvidos a partir da ideia dos espaços de ar fechados como maneira de obtenção de um amortecimento extra (Y, W e X) ensaiados em câmara reverberante, comparados com a média energética dos pavimentos comerciais G e H fabricados pela SEDACOR

Através da figura 6.35 é possível verificar que o pavimento Y, ao qual foram retiradas elipses no *underlay*, teve um comportamento pior que o pavimento de comparação (Pav. G e H), aumentando o ruído em 3 dB entre as bandas 1,6 kHz e 3,15 kHz, apesar de ter uma melhoria de 2 dB nos 5 kHz. Tanto no valor $L_{n,r,w}$ normativo como no valor Não Normativo (NN), este pavimento teve a pior classificação de entre os pavimentos em análise, tendo valores superiores aos obtidos através da média dos pavimentos da SEDACOR, com um incremento de 1 dB ($L_{n,r,w}$) e 0,3 dB ($L_{n,r,w}$ NN).

Ao invés disso, o pavimento W (meios bastões) apresentou uma grande melhoria nas frequências acima dos 400 Hz, tendo na maioria das frequências uma diminuição de mais de 6 dB. Porém, teve um aumento singular de 3 dB na banda dos 250 Hz, possivelmente devido à ressonância da caixa-de-ar, aumentando assim o pico de ruído característico deste tipo de pavimento flutuante.

Embora se expectasse, pela análise do seu espectrograma, um abaixamento considerável no valor do $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo (NN) do pavimento W em relação ao valor médio dos pavimentos G e H da SEDACOR, tal facto não se verificou uma vez que o seu valor normativo manteve-se nos 60 dB e o Não Normativo (NN) teve um pequeno abaixamento de 0,8 dB (em relação a G e H), tendo índices iguais aos pavimentos B e D. Este facto é explicável dada a forma pontiaguda do gráfico de W

numa zona que tem forte influência no valor do $L_{n,r,w}$ e tornando insignificante a influência da diminuição do ruído nas bandas superiores aos 400 Hz.

No entanto, como as variações do ruído nas altas frequências (1 a 5 kHz) – zona onde o ser humano é mais sensível – são muito mais importantes que as variações do ruído nas baixas frequências – onde o Homem tem menor reação auditiva – e como a atual normalização despreza o contributo do isolamento sonoro a ruídos de percussão nas altas frequências, é entendido que o método do $L_{n,r,w}$ não se ajusta à reação auditiva dos indivíduos que usufruem de sistemas flutuantes, não dando ênfase às necessidades de conforto inerentes aos seus utilizadores. Para tal, adaptando o atual método descrito na NP EN ISO 717-2, pegou-se na curva dos $L_{n,r}$ de cada pavimento já apropriado ao pavimento de referência, aplicou-se o filtro A (Quadro 2.2) e aplicou-se uma soma energética a esses valores, obtendo-se assim o Nível sonoro contínuo equivalente ponderado A, aplicado ao pavimento de referência ($LA_{eq,r}$) [73]. Com este novo método é possível comparar os diferentes pavimentos tendo em conta a reação auditiva do ser humano, obtendo assim uma caracterização do ruído mais direcionada nas frequências centrais.

Por este novo parâmetro, o pavimento Y (67,6 dB) tem um ligeiro incremento de 0,3 dB em relação ao pavimento médio da SEDACOR. Porém, a diferença entre estes dois pavimentos e o W é muito maior, tendo-se obtido um valor de 65,6 dB ($\Delta L \approx 2$ dB) graças à redução sonora nas frequências centrais deste pavimento, frequências que são maioritariamente responsáveis pela classificação do parâmetro $LA_{eq,r}$ (subcapítulo 7.2.2). Com este novo parâmetro, o pavimento W mostrou ser bastante melhor que os pavimentos G e H (média da SEDACOR em comparação) e Y.

Para colmatar a possível ressonância da caixa-de-ar que aumentou o ruído de percussão do pavimento W na banda de frequência dos 250 Hz, criou-se um outro pavimento (Pav. X) onde foi adicionada lâ de rocha nos intervalos entre os meios bastões do pavimento W para tentar absorver a tal ressonância.

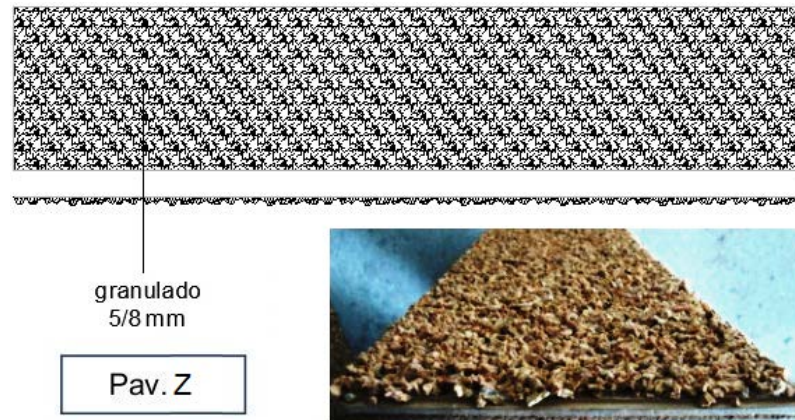
Com a lâ de rocha, apesar de ocorrer um aumento de 2 dB nas frequências dos 160 Hz e 200 Hz, foi possível obter um abaixamento de 2 dB no pico dos 250 Hz em relação ao valor verificado no pavimento W, tendo nessa frequência um comportamento próximo da média do pavimento G e H. Além disso, a adição da lâ de rocha permitiu baixar um pouco mais a fasquia mínima do nível de intensidade sonora atingido pelo pavimento W nas bandas de frequência dos 250 Hz aos 1,6 kHz.

Ainda que, no geral, o pavimento X tenha um melhoramento em quase todas as frequências em relação ao pavimento W, tal melhoramento não tem um forte contributo no cálculo do seu $L_{n,r,w}$ (60 dB), chegando a ter um pequeno aumento do mesmo índice Não Normativo ($\Delta L = 0,1$ dB) graças ao aumento do ruído nas bandas abaixo dos 250 Hz, apesar da atenuação no resto das bandas de frequência. No entanto, como este parâmetro ($L_{n,r,w}$) não se adequa a casos onde existe redução sonora a ruídos de percussão nas altas frequências, analisou-se o pavimento X segundo o $LA_{eq,r}$, o mesmo parâmetro utilizado na caracterização do pavimento W. Assim, o pavimento X obteve um $LA_{eq,r}$ de 64,8 dB, menos 0,8 dB que o pavimento W e menos 2,6 dB que a média da SEDACOR.

Em suma, dos pavimentos analisados na experiência 2, o pavimento X é claramente o melhor pois reduz substancialmente o ruído de percussão nas altas frequências, zona de alta sensibilidade auditiva humana, obtendo assim um baixo valor de $LA_{eq,r}$.

6.4.3.4. Experiência 3 – Granulado / Resumo dos Resultados

Por último, foi desenvolvido um pavimento composto por granulado de cortiça de calibre 5/8 mm colado como *underlay* (Fig. 6.36), de maneira a tirar partido do amortecimento do granulado e da baixa área de contacto entre este e o piso, expectando obter-se o melhor isolamento sonoro.

Fig. 6.36 – Esquema do pavimento Z desenvolvido com *underlay* em granulado 5/8 mm

Para avaliar os resultados obtidos com este pavimento, comparou-se os mesmos com os valores obtidos nos ensaios dos sete pavimentos desenvolvidos e analisados anteriormente (Fig. 6.37).

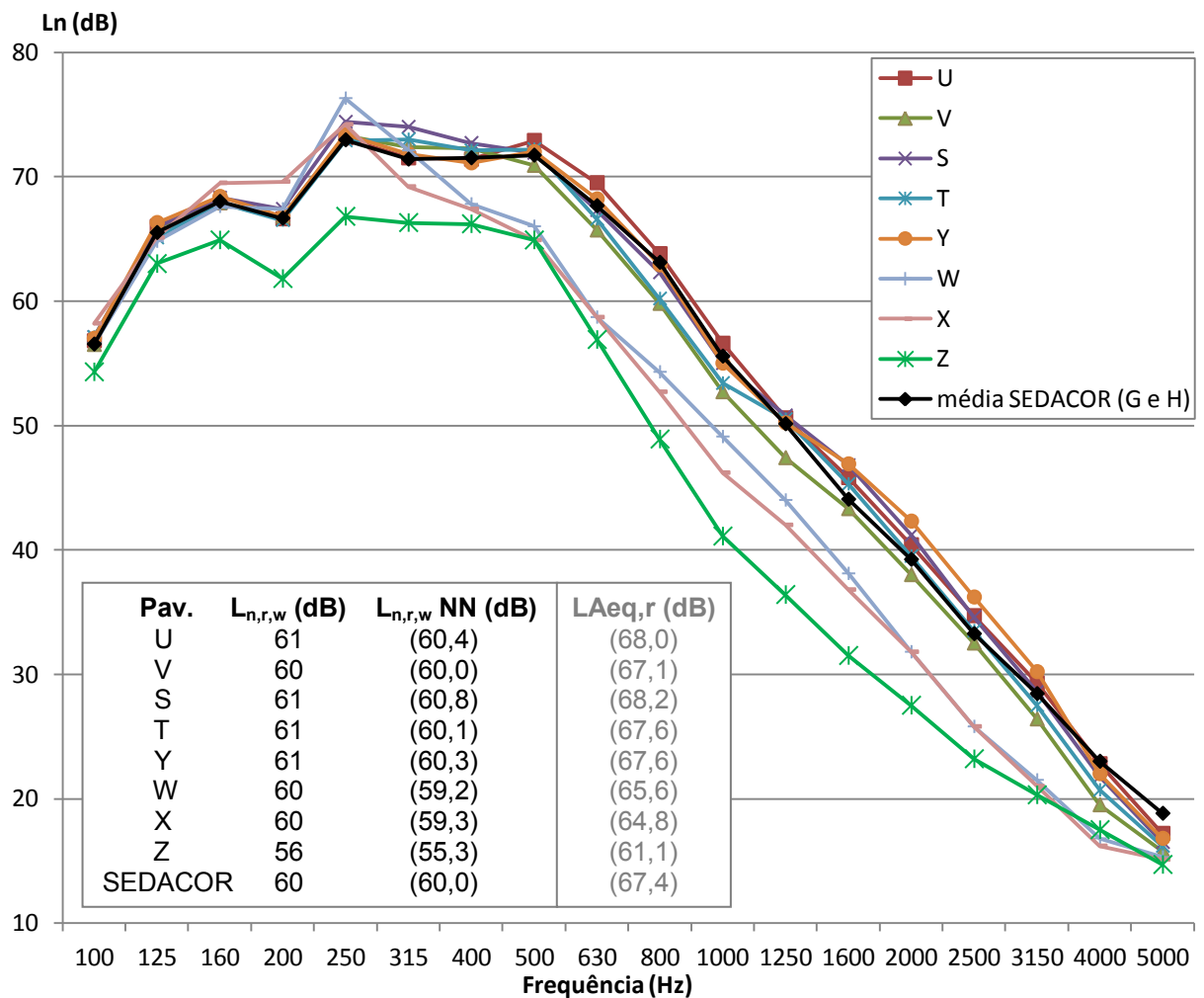


Fig. 6.37 – Níveis de pressão sonora normalizados, $L_{n,r,w}$ normativo e Não Normativo – NN (com uma casa decimal) e $LA_{eq,r}$ de todos os oito pavimentos desenvolvidos (U, V, S, T, Y, W, X e Z) comparados com a média energética dos pavimentos comerciais G e H fabricados pela SEDACOR

Pela figura 6.37, verifica-se que quase todos os pavimentos têm comportamentos acústicos semelhantes, à exceção dos pavimentos W, X e Z. O pavimento Z é o pavimento que melhores resultados obteve, tendo uma melhoria do isolamento sonoro em todas as frequências, com um melhoramento de mais de 10 dB entre as bandas dos 630 Hz e dos 2,5 kHz em relação à média energética dos pavimentos G e H.

Com o pavimento Z conseguiu-se obter o melhor valor de $L_{n,r,w}$ de todos os pavimentos ensaiados, 56 dB, tendo-se também destacado no índice não normativo ($L_{n,r,w}$ NN) com um valor de 55,3 dB, aproximadamente menos 4 dB que o pavimento X, que anteriormente foi destacado pelos seus bons resultados. Este valor foi concretizável graças ao abaixamento do nível de pressão sonora normalizado nas frequências abaixo dos 500 Hz, chegando a diminuir 6 dB em algumas dessas frequências. Com tal morfologia foi possível deslocar a curva de referência citada na NP EN ISO 717-2 para valores inferiores aos registados nos anteriores pavimentos. Pela análise do $L_{Aeq,r}$, o “pavimento granulado” apresentou-se como aquele que obteve o melhor valor (61,1 dB), destacando-se do pavimento X com uma diferença de mais de 3 dB e de mais de 6 dB em relação à média dos pavimentos da SEDACOR (G e H).

Por esse motivo, o pavimento Z é o melhor de todos os pavimentos ensaiados, apresentando-se assim como uma ótima solução de isolamento sonoro a ruídos de percussão.

Porém, apesar do pavimento Z apresentar os melhores resultados, é de todos os pavimentos aquele que aparenta ser o mais instável à fluência, dado que o granulado não foi compactado e os grãos de cortiça têm a liberdade de comprimir sob tensão constante ao longo do tempo, levando a deformações localizadas do pavimento. Além disso surgiram alguns problemas relacionados com a sua estabilidade horizontal após a realização dos ensaios, assim como é descrito no subcapítulo 7.2.3.

6.4.4. RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para uma melhor comparação e interpretação do desempenho acústico entre os pavimentos, resumiram-se os dados numéricos de todos os 26 pavimentos (anexo B) e representaram-se tais valores na figura 6.38 (pavimentos comerciais a traço contínuo e pavimentos desenvolvidos a traço interrompido) e no quadro 6.7 os valores do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado ($L_{n,r,w}$) e da redução do nível de ruídos de percussão ponderado (ΔL_w) e os seus valores não normativos ($L_{n,r,w}$ NN e ΔL_w NN), calculados para o pavimento de referência com pavimento flutuante em ensaio, assim como os valores do $L_{Aeq,r}$ de cada pavimento.

Quadro 6.7 – Valores de $L_{n,r,w}$ e ΔL_w de todos os 26 pavimentos ensaiados, segundo a NP EN ISO 717-2, bem como os valores de $L_{n,r,w}$ NN e ΔL_w NN (Não Normativos) e $L_{Aeq,r}$

Pav.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
$L_{n,r,w}$ (dB)	60	60	60	60	59	60	60	60	60	60	60	60	61
$L_{n,r,w}$ NN (dB)	59,7	59,2	59,3	59,2	58,8	59,6	60,0	59,9	60,0	60,1	59,9	59,9	60,2
ΔL_w (dB)	18	18	18	18	19	18	18	18	18	18	18	18	17
ΔL_w NN (dB)	18,3	18,8	18,7	18,8	19,2	18,4	18,0	18,1	18,0	17,9	18,1	18,1	17,8
$L_{Aeq,r}$ (dB)	67,2	66,4	66,4	66,3	65,8	67,1	67,6	67,2	67,3	67,5	67,1	66,9	67,3

Pav.	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
$L_{n,r,w}$ (dB)	61	60	61	61	61	61	61	61	60	60	60	61	56
$L_{n,r,w}$ NN (dB)	60,5	59,6	60,5	61,0	60,5	60,8	60,1	60,4	60,0	59,2	59,3	60,3	55,3
ΔL_w (dB)	17	18	17	17	17	17	17	17	18	18	18	17	22
ΔL_w NN (dB)	17,5	18,4	17,5	17,0	17,5	17,2	17,9	17,6	18,0	18,8	18,7	17,7	22,7
$L_{Aeq,r}$ (dB)	68,4	66,3	67,7	68,7	67,7	68,2	67,6	68,0	67,1	65,6	64,8	67,6	61,1

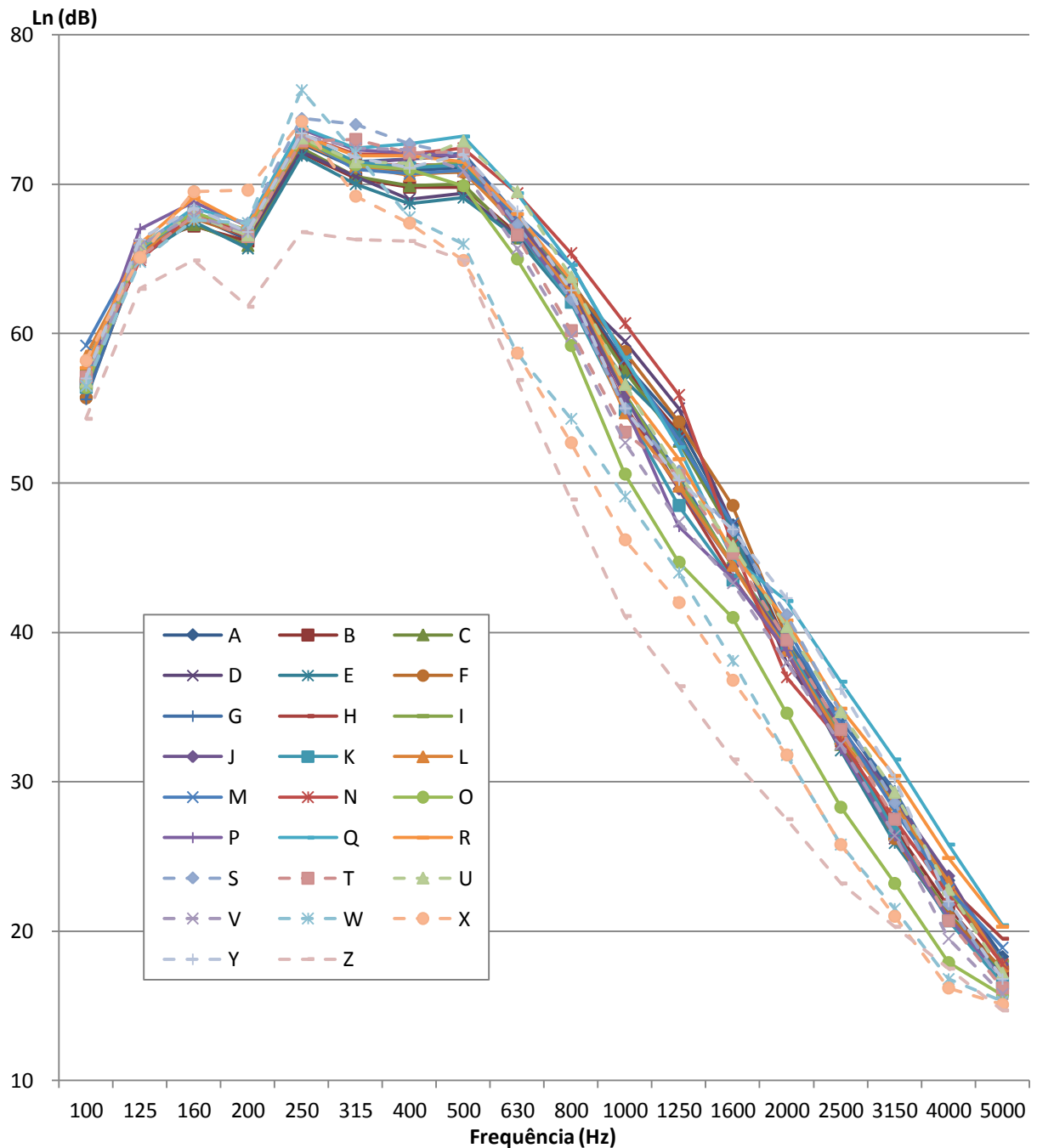


Fig. 6.38 – Espectrograma geral com todos os resultados de todos os 26 pavimentos ensaiados em câmara reverberante (pavimentos desenvolvidos a tracejado)

Como ponto culminante do estudo deste trabalho, a figura 6.38 vem mostrar que o aspeto do espectrograma do nível de pressão sonora do ruído de percussão de um pavimento flutuante com estas características é idêntico entre a maioria dos pavimentos comerciais. O mesmo espectrograma apresenta um ponto mais elevado na banda dos 250 Hz devido à possível ressonância do sistema pavimento-piso, uma pequena elevação entre os 100 Hz e os 200 Hz, um patamar entre os 250 Hz e os 500 Hz e uma queda constante depois da banda dos 500 Hz, tendo muitas semelhanças com a curva de referência de ajuste descrita na NP EN ISO 717-2 para o cálculo do $L_{n,r,w}$. Além disso, a mesma figura mostra a razão pela qual a gama de frequências de medição imposta pela NP EN ISO 140-8 é dos 100 aos 5000 Hz, dado que os pavimentos têm um comportamento variado dentro dessa gama de frequências, tendo nas frequências extremas (100 e 5000 Hz) um comportamento mais restrito com valores de L_n dentro de uma zona que não varia mais que 6 dB, levando a confirmar a ideia de que a gama de frequências que é influenciada pela presença de um pavimento flutuante, corresponde às bandas dos 100 Hz aos 5 kHz.

Verifica-se que, de entre todos os pavimentos ensaiados, os que sobressaem com resultados mais animadores são os pavimentos W, X e Z, que foram desenvolvidos empírica e laboratorialmente, apresentando diminuições substanciais do ruído de percussão na maioria das frequências, especialmente nas altas frequências. Dos pavimentos comerciais estudados, o pavimento O foi o que sobressaiu, proporcionando um aumento do isolamento sonoro nas bandas de frequência superiores a 800 Hz (zona de frequências de alta sensibilidade humana) e atenuando a incomodidade produzida nos ocupantes dos espaços adjacentes ao pavimento percutido. Denota-se ainda nas bandas dos 1 kHz e 1,25 kHz a diferença entre o ruído de percussão transmitido pelos pavimentos com 1,2 mm e os de 2,2 mm, já discutido anteriormente no estudo da espessura do *underlay*.

Além disso, fazendo uma observação pertinente, durante a análise dos resultados concluiu-se que o pavimento Z aparenta ter um abaixamento concordante com o pavimento O, ou seja, o pavimento Z parece ser o pavimento O com abaixamento de distribuição normal ao longo das frequências de análise.

Após uma análise pormenorizada dos resultados laboratoriais de todos os pavimentos, verificou-se que os pavimentos C, L, M e X têm um aumento do ruído ($\Delta L_w \leq 1,3$ dB) na banda de frequência dos 100 Hz em relação ao ruído da laje sem pavimento flutuante, no entanto este agravamento não se torna preocupante dado tratar-se de uma diferença diminuta, localizada nas baixas frequências (zona de baixa sensibilidade auditiva humana).

Pelo quadro 6.7 pode-se verificar que a redução sonora a ruídos de percussão dos pavimentos comerciais não varia mais que 1 dB em torno do valor médio dos 18 dB, sendo que os espectrogramas desses pavimentos, à exceção do caso do pavimento O, são muito idênticos. Porém, com tais pavimentos não foi possível obter mais do que $\Delta L_w = 19$ dB (Pav. E). É de notar que a maioria dos pavimentos que obtiveram um $L_{n,r,w}$ de 60 ou 61 dB estão no limite entre esses dois valores, tendo apenas uma diferença acumulada de menos de 2 dB do ruído de percussão nas bandas de frequência abaixo dos 630 Hz (frequências responsáveis pela caracterização do $L_{n,r,w}$). Devido a essa igualdade de valores entre pavimentos, foi possível realizar uma análise mais “fina” através dos valores do $L_{n,r,w}$ NN. Além dessa metodologia de caracterização dos pavimentos, também se analisaram os valores de $LAeq,r$ de cada pavimento, tendo já sido a sua adoção anteriormente explicada.

Com tais métodos, foi possível criar os gráficos da figura 6.39 com os valores não normativos do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão (com uma casa decimal) e os valores do nível sonoro contínuo equivalente ponderado A em relação ao pavimento de referência ($LAeq,r$) dos diversos pavimentos ensaiados, agrupando-os de três maneiras: os pavimentos comerciais da

SEDACOR que foram alvo de comparação quanto à sua constituição, os pavimentos que serviram ao estudo do envernizamento da SEDACOR e os pavimentos desenvolvidos pelo autor da dissertação.

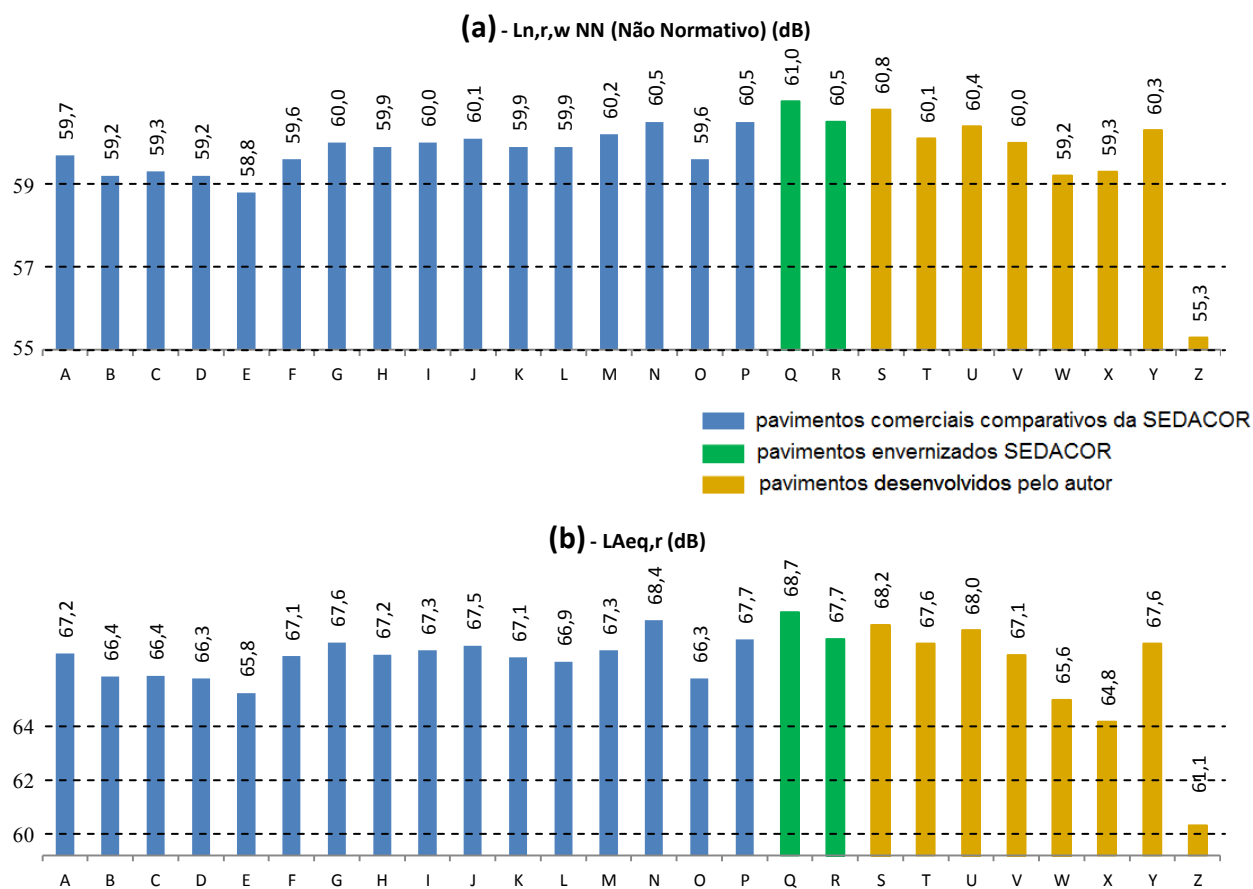


Fig. 6.39 – Gráficos de barras: (a) do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão Não Normalizados ($L_{n,r,w}$ NN), adaptado do método da NP EN ISO 717-2 para se obter uma casa decimal, e (b) do nível sonoro contínuo equivalente ponderado A em relação ao pavimento de referência ($L_{Aeq,r}$), dos 26 pavimentos ensaiados em câmara reverberante

No que toca ao parâmetro Não Normativo ($L_{n,r,w}$ NN), a diferença entre os pavimentos comerciais (17,5 a 19,2 dB) não é muito expressiva, sendo inferior a 1,8 dB. Porém, dos pavimentos comerciais desenvolvidos pela SEDACOR, o pavimento E [52 CLK + Contraplacado + 12 PL (1,2 mm)] mantém-se com o melhor resultado, 58,8 dB (Fig. 6.39 a), estando os pavimentos N e P nas piores posições (60,5 dB). Avaliando o $L_{Aeq,r}$ deste grupo de pavimentos, averigua-se que o pavimento E continua a ser o melhor, apresentando um resultado de 65,8 dB (Fig. 6.39 b), passando o pavimento N a destacar-se como sendo aquele com pior resultado (68,4 dB). Além do pavimento E, os pavimentos B, C, D e O também oferecem um bom isolamento a ruídos de percussão ($L_{Aeq,r} \approx 59,3$ dB e $L_{n,r,w}$ NN $\approx 66,4$ dB)

Quanto aos envernizados (G→Q e H→R) e segundo o disposto no subcapítulo 6.4.2.6, o envernizamento de um pavimento aumenta mais o ruído de percussão nas altas frequências do que nas baixas frequências. Verifica-se também que quanto maior for o $L_{n,r,w}$ NN ou $L_{Aeq,r}$ do pavimento sem envernizar, maior será o valor de cada um desses parâmetros depois de envernizado o pavimento. Em média, o envernizamento aumenta o $L_{n,r,w}$ NN e o $L_{Aeq,r}$ em aproximadamente 0,8 dB.

No caso dos novos pavimentos desenvolvidos o caso repete-se, tendo estes pavimentos apresentando valores de $L_{n,r,w}$ superiores ao espectável (60 e 61 dB), à exceção do pavimento Z que teve o melhor resultado de todos os pavimentos ensaiados (56 dB). Além disso, salienta-se o facto dos pavimentos S, T, U, V e Y ostentarem valores de $L_{n,r,w}$ NN superiores à média dos pavimentos comerciais (59,8 dB), acontecendo o mesmo em relação à média dos valores de $LA_{eq,r}$ dos pavimentos comerciais (67,0 dB) (Fig. 6.39).

Como já anteriormente discutido, os pavimentos W e X têm um $L_{n,r,w}$ igual ao de muitos dos pavimentos ensaiados (60 dB), apesar do abaixamento considerável dos valores de L_i para frequências superiores a 400 Hz. O caso torna-se mais interessante quando se analisam os valores do mesmo índice, mas desta vez Não Normativo, e se compara com os valores dos outros pavimentos. Pelo gráfico de barras dos $L_{n,r,w}$ NN (Fig. 6.39 a), é possível verificar que os pavimentos W e X têm valores (59,2 e 59,3 dB) acima do que foi obtido com o pavimento E (58,8 dB), devido ao ligeiro aumento do ruído em algumas baixas frequências, levando a crer que o pavimento E é melhor que os W e X. No entanto, esta reflexão não traduz a realidade pois é mais importante a variação do ruído nas bandas de frequência mais incomodativas (altas frequências) do que nas bandas menos incomodativas (baixas frequências). Com a análise dos $LA_{eq,r}$ (Fig. 6.39 b) conseguiu-se obter uma classificação mais realista tendo em conta a reação auditiva dos indivíduos. Assim, com este parâmetro, os pavimentos W e X obtiveram um valor de 65,6 e 64,8 dB respetivamente, destacando-se substancialmente da média dos pavimentos comerciais (67,0 dB) e estando abaixo do valor do melhor desses pavimentos (Pav. E = 65,8 dB).

Pelos gráficos da figura 6.39 verifica-se que a razão entre os valores dos pavimentos para cada uma das adaptações normativas ($L_{n,r,w}$ NN e $LA_{eq,r}$) mantém-se constante, ou seja, a relação entre as barras de cada um dos gráficos para cada um dos pavimentos é idêntica. Como não existem fortes discrepâncias entre a morfologia dos dois gráficos, por analogia, pode-se dizer que a adaptação normativa associada ao parâmetro $LA_{eq,r}$ demonstra ser um método útil dado que tem uma razão de classificação entre pavimentos idêntica à registada com o $L_{n,r,w}$ NN (que se baseia no $L_{n,r,w}$ – normativo) e a mesma classificação tem em conta a reação auditiva do ser humano, uma vez que, ao contrário dos anteriores métodos ($L_{n,r,w}$ e $L_{n,r,w}$ NN), dá mais importância ao isolamento sonoro nas altas frequências, zona de alta sensibilidade humana.

O pavimento Z é o que tem o melhor desempenho acústico de todos os pavimentos desenvolvidos e de todos os ensaiados durante esta dissertação já que apresentou um espectrograma achatado, auferindo um valor de $L_{n,r,w}$ bastante diminuto, com uma redução do nível de ruído de percussão ponderado (ΔL_w) de 22 dB, aumentando o seu valor em cerca de 4 dB face à generalidade dos pavimentos comerciais. Tirando os pavimentos W, X e Z, todos os outros pavimentos desenvolvidos (63%) têm um índice ΔL_w NN inferior a 18,0 dB, intervalo que apenas engloba 38% dos pavimentos comerciais. À exceção de Z, mais nenhum pavimento desenvolvido conseguiu ter um índice maior que o melhor pavimento comercial (E), apesar dos pavimentos W e X terem um valor muito próximo. De todos os pavimentos ensaiados, o pior pavimento, excluindo os pavimentos envernizados que têm como objetivo avaliar a influência do envernizado, é o S, pois obteve o pior $L_{n,r,w}$ NN (60,8 dB) e o segundo pior valor de $LA_{eq,r}$ (68,2 dB, atrás do Pav. N de 68,4 dB), não mostrando ser uma boa opção de *underlay*.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

A presente investigação teve como objetivo o desenvolvimento e análise de soluções comerciais de pavimentos flutuantes com aglomerado de cortiça, de desempenho acústico otimizado. Foram utilizados diversos pavimentos já comercializados pela SEDACOR para os estudos preliminares e alguns derivados de cortiça para o desenvolvimento de novos pavimentos flutuantes.

Com os novos pavimentos desenvolvidos pretendeu-se aumentar o isolamento sonoro a ruídos de percussão através de hipóteses experimentais baseadas em vários tipos de *underlay* criados a partir da combinação de diversas disposições e formas de alguns materiais derivados da cortiça.

Para tal, procurou-se entender a propagação do ruído, quer em meio gasoso quer em meio sólido, a sua caracterização, bem como o papel dos sistemas de isolamento sonoro, comentando o efeito do ruído de percussão no quotidiano do indivíduo e a necessidade de tomar medidas para o mitigar. Tendo como fundamento a avaliação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado, $L_{n,r,w}$, foram apresentadas algumas noções teóricas associadas ao seu desenvolvimento, tais como o tempo de reverberação aliado à área de absorção sonora equivalente.

Da mesma maneira foi importante uma abordagem mais detalhada sobre as propriedades e características dos pavimentos flutuantes, a sua constituição e o seu comportamento teórico de maneira a clarificar o papel dos diferentes constituintes.

Como matéria-prima base deste estudo, também se apresentaram as propriedades e características da cortiça, desde a sua origem, formação, até à transformação em aglomerado composto de cortiça, o produto usado nos pavimentos flutuantes em análise. Além disso, apresentaram-se as características principais de alguns derivados de madeira usados como elemento resistente dos pavimentos.

Dado que se trata de um trabalho com carácter experimental, foi avaliada a influência da disposição de alguns tipos e espessuras de aglomerados de cortiça combinados com dois tipos de placas de derivados de madeira e no posterior desenvolvimento do *underlay* dos pavimentos descreveram-se as etapas que seguiram o raciocínio da evolução dos diferentes tipos de pavimentos, com posterior análise do seu desempenho acústico. No total procedeu-se ao ensaio de vinte e seis amostras de diferentes tipos de pavimentos flutuantes.

Em relação à metodologia de ensaio, seguiram-se as normas NP EN ISO 140-8 e 717-2 para a determinação da redução sonora a ruídos de percussão normalizada, utilizando três microfones para quatro posições distintas da máquina de percussão e para cada um dos vinte e seis pavimentos

ensaiados, onde se mediu o nível de pressão sonora em bandas de frequência de terço de oitava na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da FEUP.

Os resultados obtidos das medições foram corrigidos para ter em consideração a interferência do tempo de reverberação nas medições e adaptados a uma laje de referência para que os resultados finais pudessem ser comparados com outros pavimentos analisados noutros laboratórios.

Realizaram-se algumas comparações examinando a influência: do tipo de aglomerado como decorativo, do tipo de derivado de madeira como elemento resistente, do tipo de aglomerado como *underlay*, da espessura do próprio *underlay* e o efeito do envernizamento. Depois de analisados os pavimentos comerciais, analisou-se o desempenho dos pavimentos desenvolvidos, constituídos por diversos tipos de *underlay*, comparando a eficiência desses pavimentos com a eficiência dos pavimentos comerciais com as características mais idênticas aos pavimentos desenvolvidos.

Salienta-se o facto de que as questões económicas e comerciais da fabricação e conceção, durabilidade, resistência, e as conformidades com outros parâmetros exigenciais não foram tomadas em consideração como critérios de avaliação dos mesmos pavimentos.

Pelos resultados obtidos, verifica-se que a inclusão de um pavimento flutuante de aglomerado composto de cortiça não reduz o ruído em mais do que 5 dB para frequências inferiores a 400 Hz. No entanto, confere ao piso um “tremendo” isolamento de mais de 30 dB para frequências superiores a 1,6 kHz, confirmando a teoria do capítulo 3 de que o pavimento flutuante propicia um isolamento crescente à medida que a frequência aumenta. Graças a este pavimento é possível reduzir o ruído transmitido nas altas frequências, as frequências de maior incomodidade auditiva para o ouvido humano.

Do estudo da influência do tipo de aglomerado como decorativo, verificou-se que, de entre a oferta comercial em estudo, os pavimentos de cada decorativo apresentaram um comportamento acústico similar entre si. No entanto, o decorativo “012” foi o que apresentou melhores resultados, tendo no caso do *underlay* “51 PL” reduzido o ruído para bandas de frequência superiores a 500 Hz, chegando a atenuar a propagação do ruído em mais de 2 dB para frequências superiores a 2,5 kHz. No caso do *underlay* “12 PL”, o “012” continuou a marcar a diferença na maior parte das frequências (especialmente as bandas centrais), porém tal diferença não foi maior que 1 dB.

Pela análise dos resultados do estudo da influência do tipo de elemento resistente, verificou-se que não há um ganho significativo e generalizado do isolamento sonoro em todas as frequências por parte do “MDF” ou do “Contraplacado”. Apesar disso, apurou-se que a combinação do “contraplacado” com *underlay* “51 PL” ou “12 PL” e a combinação do “MDF” com *underlay* “25 MS” proporciona um melhoramento do isolamento sonoro a ruídos de percussão na maior parte das bandas de frequência. É de notar que durante a montagem dos pavimentos em laboratório, sentiu-se uma maior facilidade de colocação e uma maior estabilidade das pranchas de “Contraplacado”, dando a sensação de maior estabilidade.

Segundo a análise da influência do tipo de aglomerado como *underlay*, verifica-se que não há um tipo de *underlay* que se sobressaia dos outros, já que a diferença entre os tipos de *underlay* é mínima. No entanto, pode-se concluir que de entre os pavimentos estudados, aqueles que tiveram o *underlay* “25 MS” e “12PL” obtiveram um melhoramento do isolamento sonoro, rondando 1 dB nas bandas de frequência dos 400 aos 630 Hz e dos 2,5 aos 5 kHz.

O pavimento composto unicamente por cortiça de diferentes densidades, apesar de melhorar o isolamento em 2 dB na banda dos 2 kHz, apresenta um agravamento do ruído nas bandas centrais dos

315 Hz aos 1,25 kHz, chegando a aumentar o ruído em 2,5 dB em relação aos outros pavimentos nas bandas dos 1 e 1,25 kHz, mostrando não ser a melhor opção.

No que toca à análise da variação da espessura do *underlay*, verificou-se que o aumento da espessura em 1 mm propicia um aumento significativo do isolamento sonoro entre as bandas de frequência dos 800 e dos 2000 Hz, chegando a atingir mais de 3 dB de redução do nível de pressão sonora por cada incremento, tendo porém originado uma ligeira diminuição do isolamento sonoro ($\Delta L \approx 1$ dB) para frequências inferiores aos 500 Hz. Esta melhoria das altas frequências e perda das baixas prejudica o valor da redução do isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado uma vez que esta zona é a mais influenciadora dos resultados apurado segundo a NP EN ISO 717-2. No entanto, como o ser humano é mais sensível na gama de frequências dos 1,25 a 5 kHz, a variação nas altas frequências é mais importante do que a variação nas baixas frequências, demonstrando que o aumento da espessura do *underlay* é uma boa solução.

Em relação ao envernizamento, concluiu-se que a submissão dos pavimentos a esse processo aumenta a propagação do ruído em todas as frequências, chegando a aumentar o ruído em mais de 2 dB na maior parte das altas frequências em análise, enquanto nas baixas frequências, no geral, o incremento ronda valores abaixo do 1 dB. No entanto, tal conclusão não pode ser fortemente vinculada porque o número de amostras não é suficiente para que se possam tirar conclusões seguras. Este aumento do ruído, apesar de não significativo, pode influenciar o cálculo do ΔL_w , baixando a sua classificação em relação aos outros pavimentos. Além disso, estes pavimentos demonstram que, segundo os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais e para este tipo de sistema flutuante já prontos a colocar em obra, o valor do ΔL_w ronda os 17 dB para os pavimentos comerciais.

Os pavimentos Q e R, como são, de entre todos os pavimentos, os únicos que seguiram toda a linha de montagem, têm comportamento e valores dos parâmetros mais próximos dos resultados normativos obtidos com a totalidade da amostragem (10 m²). Assim, estes pavimentos são os únicos a que se pode dizer que o $L_{n,r,w}$ obtido é muito próximo do valor final a colocar no folheto comercial do material, já que o ensaio foi realizado no pavimento final pronto a colocar em obra. Porém, os valores descritos no quadro 6.7 referentes aos índices Não Normativos (NN) não podem ser interpretados como resultados reproduzidos à luz da NP EN ISO 717-2, o que se fez foi adaptar o método de cálculo do $L_{n,r,w}$ para a situação em questão, não podendo esses valores ser usados nem encontrados em folhetos comerciais.

Fazendo uma análise à redução do nível de ruído de percussão ponderado (ΔL_w) dos pavimentos comerciais, pode-se concluir que a melhor combinação de decorativo, elemento resistente e *underlay* pertence ao pavimento E (52 CLK + Contraplacado + 12 PL), com um valor de 19 dB. Os pavimentos com *underlay* de “40 BR”, “HDC” e o “51 PL” de 3,2 mm são os que têm o pior valor (17 dB). No entanto, as diferenças não são significativas porque a maioria destas amostras que têm um índice de redução de 18 dB encontra-se no limite da classificação entre os 17 e os 18 dB. Quanto à análise não normativa, o pavimento E continua a realçar-se dos outros (58,8 dB), enquanto os pavimentos N (HDC) e P (“51PL” de 3,2 mm) tiveram o pior valor (60,5 dB).

É de notar que apesar do pavimento O ter um alto $L_{n,r,w}$, por esta análise conclui-se que o mesmo é o que tem o melhor comportamento acústico de todos os pavimentos comerciais, tendo reduzido consideravelmente o ruído de percussão nas médias altas frequências, em relação aos outros pavimentos.

No que toca aos pavimentos desenvolvidos, à exceção dos pavimentos W, X e Z, todos os outros pavimentos tiveram um comportamento idêntico ao dos pavimentos comerciais, tendo o pavimento V

obtido o melhor resultado (60,0 dB) e pavimento S o pior resultado (60,8 dB). Os três melhores pavimentos tiveram um grande abaixamento do ruído para frequências superiores a 500 Hz, chegando a ter mais de 10 dB de diferença em algumas dessas frequências. No entanto, para frequências inferiores a 500 Hz, os pavimentos W e X obtiveram um ligeiro agravamento do ruído, perturbando assim o cálculo da redução do nível de ruído de percussão ponderado ($\Delta L_w = 18,8$ e $18,7$ dB respetivamente). O único pavimento que reduziu consideravelmente o ruído de percussão em todas as frequências foi o pavimento Z, que graças à sua capacidade de absorção das vibrações conferida pelos grânulos de cortiça, conseguiu aumentar 4 dB o seu ΔL_w (22 dB) em relação à média de todos os pavimentos (18 dB) e 4,4 dB o seu valor não normativo (55,3 dB) em relação à média (59,7 dB).

É de salientar que, apesar de se poupar cortiça com a execução do pavimento U e obter um comportamento idêntico aos pavimentos comercializados pela SEDACOR, o mesmo não se torna viável devido à possível complexidade de execução e alto custo de produção.

Com a elaboração desta dissertação conclui-se também que não é fácil realizar uma investigação em meio empresarial, dado que as ideias e os sonhos que tanto se projetam ficam condicionados com os interesses da entidade financiadora, conjugado também com o curto tempo de realização da própria dissertação, limitando o estudo de novas soluções que possam vir a ser uma mais-valia para a sociedade e indústria.

Em suma, de entre os produtos estudados, pode-se concluir que não existe um material ideal para cada camada do pavimento flutuante, existe sim algumas combinações ideais. Por este facto, no fabrico de pavimentos flutuantes aconselha-se que ao decorativo “012” seja agregada a combinação de placas de “contraplacado” com *underlay* de “51 PL” ou “12 PL” e placas de “MDF” com *underlay* de “25 MS”, tendo uma espessura de *underlay* igual à espessura máxima estudada neste trabalho (3,2 mm).

Conclui-se que a maior parte das ideias teóricas de tipos de *underlay* desenvolvidos pelo autor não deram bons resultados, no entanto os pavimentos com *underlay* de meios bastões e de granulado de cortiça apresentam um ótimo desempenho.

Pelos métodos de classificação dos pavimentos, conclui-se que o atual método normativo do $L_{n,r,w}$ não proporciona uma distinção entre pavimentos, mas com a adaptação NN, passou-se a obter mais detalhe na classificação dos pavimentos, propiciando uma dissemelhança entre os valores dos mesmos.

No entanto, apura-se que tanto o atual método da NP EN ISO 717-2, como a adaptação Não Normativa (NN), não se encaixam com situação real, já que se preocupam apenas em classificar os sistemas flutuantes em função do comportamento típico de um sistema flutuante de referência (Curva de Referência), não tendo em conta a reação auditiva dos indivíduos e desprezando a redução sonora a ruídos de percussão nas altas frequências, onde o ouvido humano é mais sensível à intensidade sonora.

Com a nova metodologia de caracterização sugerida pelo autor ($L_{Aeq,r}$) demonstrou ter uma relação entre pavimentos idêntica à relação obtida com a atual normalização (Fig. 6.39) e, além disso, realçou a importância do ganho de isolamento sonoro nas altas frequências (zona de alta sensibilidade auditiva humana), como é o caso dos Pav. W e X, mostrando assim ser um bom método para a caracterização de pavimentos flutuantes.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.2.1. NOVOS ESTUDOS PARA A DIMINUIÇÃO DO VALOR DE $L_{n,r,w}$

Apesar do largo leque de ensaios realizados durante esta dissertação, existem questões pertinentes que, para que sejam esclarecidas e possam contribuir para um melhor conhecimento deste tipo de pavimentos, necessitam de mais ensaios laboratoriais, segundo os seguintes tópicos:

- Estudar mais aprofundadamente o caso da variação da espessura do *underlay*, já que o intervalo de espessuras disponibilizado não permitiu tirar as conclusões pretendidas, uma vez que, segundo Vafiadis [34], é possível atingir-se um valor ótimo de espessura de *underlay*, como o que aconteceu na análise dos resultados dos seus ensaios, tendo descoberto que o aumento da espessura do *underlay* não é diretamente proporcional à eficiência do isolamento sonoro, obtendo uma maior melhoria no isolamento do ruído de percussão nos produtos com *underlay* de 3 mm de espessura do que nos produtos de 5 mm;
- No estudo da influência do tipo de *underlay*, a análise incidiu sobre pavimentos flutuantes de variados tipos de *underlay*, tendo todos eles o “MDF” como elemento resistente. Porém, como descrito no subcapítulo 6.4.2.3, o desempenho acústico de um pavimento varia em função da combinação do tipo de elemento resistente com o tipo de *underlay*. Assim, esta parte do estudo torna-se parcialmente redundante, sendo interessante explorar toda a sua potencialidade através da combinação do “contraplacado” com os demais tipos de *underlay* em estudo.
- Sendo o pavimento N (composto totalmente por cortiça) um pavimento inovador na área dos pavimentos flutuantes de aglomerado composto de cortiça, é de extrema importância esmiuçar o seu comportamento e explorar formas, densidades e várias disposições de camadas de diferentes granulometrias, de maneira a encontrar a melhor eficiência deste tipo de pavimento;
- Apesar de não ter sido possível avaliar o comportamento acústico de todos os pavimentos com envernizamento, seria importante que na realização de posteriores ensaios, os pavimentos já viessem envernizados, para que os resultados não dependessem de possíveis discrepâncias provocadas pelo envernizamento. Só assim seria possível obter resultados próximos do real desempenho dos pavimentos flutuantes;
- Por último, quem tiver interesse em prosseguir o estudo do desenvolvimento de novos pavimentos flutuantes, é de extrema importância tentar minimizar o ruído transmitido, principalmente nas baixas frequências, daqueles pavimentos que tiveram uma melhoria do isolamento (W, X e Z), para assim se poder limar algumas arestas que, por falta de tempo, não foram tratadas nesta dissertação.

Para que o estudo dos pavimentos apresente resultados satisfatórios, e como o parâmetro que melhor identifica e distingue comercialmente os pavimentos é a redução do nível de ruído de percussão ponderado (ΔL_w), é importante aumentar o seu valor através do abaixamento do valor do $L_{n,r,w}$, para que assim se possa destacar o seu desempenho acústico.

A título de exemplo, demonstra-se na figura 7.1 as hipóteses de abaixamento do nível de pressão sonora normalizada em determinadas frequências do pavimento A, espectrograma muito idêntico ao registado na maioria dos pavimentos ensaiados. Para tal, aos valores originais de L_n (Fig. 7.1 (a)) foram retirados 5 dB às bandas de frequência superiores a 500 Hz e medido o seu $L_{n,r,w}$ (Fig. 7.1 (b)) e feito o mesmo procedimento aos valores originais, mas desta vez às bandas de frequência não superiores a 500 Hz e medido posteriormente o seu $L_{n,r,w}$ (Fig. 7.1 (c)).

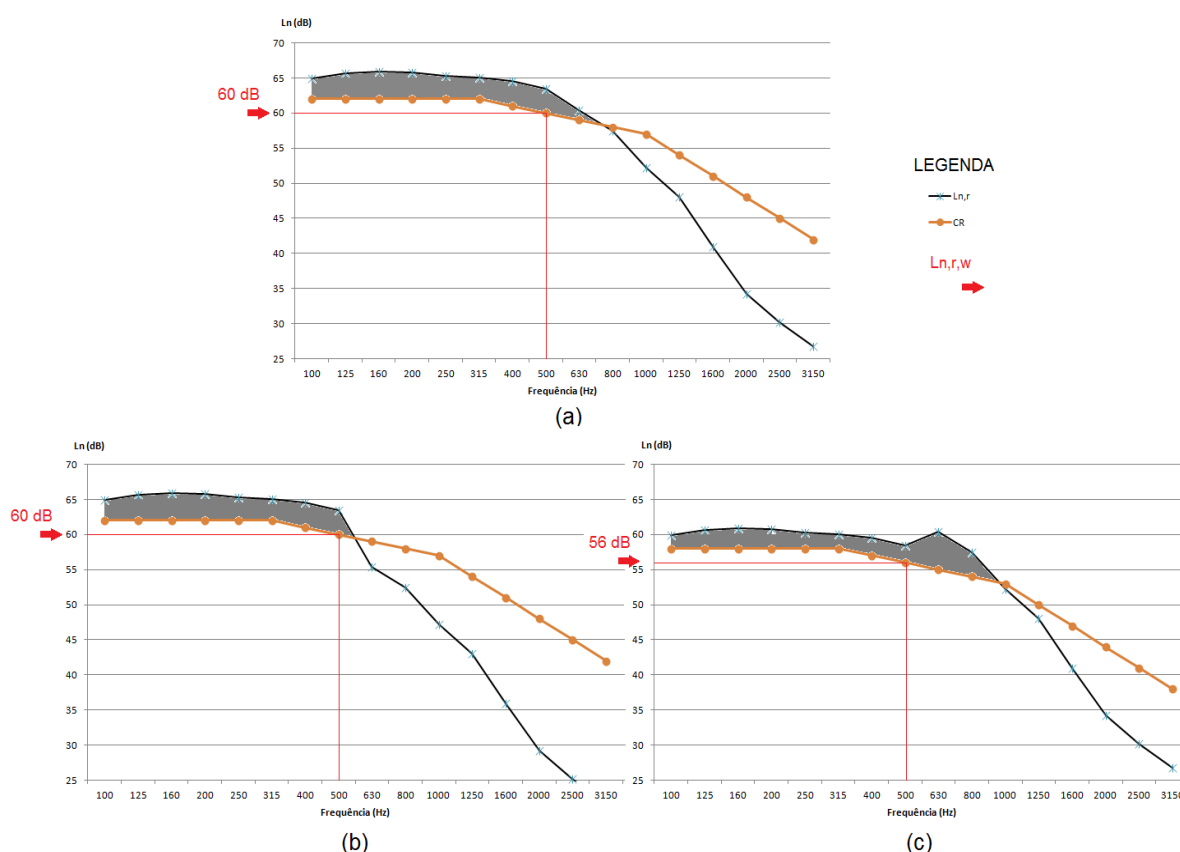


Fig. 7.1 – Exemplificação do cálculo do $L_{n,r,w}$ do pavimento A (a), em função do campo de atuação: (b) diminuindo 5 dB às bandas de frequência dos 630 aos 3150 Hz; (c) diminuindo 5 dB dos 100 aos 500 Hz

Pela figura 7.1 deve-se focar a zona de atuação nas médias baixas frequências, ou seja, para frequências iguais ou inferiores a 500 Hz, já que para frequências superiores o tratamento não tem um efeito tão significativo no cálculo do $L_{n,r,w}$.

Após o tratamento desta gama de frequências, talvez aí compense tratar as médias-altas frequências para baixar ainda mais o valor de $L_{n,r,w}$, podendo assim aumentar o valor da redução da transmissão de ruídos de percussão de revestimentos de piso em condições normalizadas, ΔL_w .

7.2.2. ADAPTAÇÃO DA ATUAL NORMALIZAÇÃO

Pela figura 7.1, verifica-se que a atual norma NP EN ISO 717-2 incentiva o tratamento do ruído de percussão nas baixas frequências, não dando importância ao tratamento do ruído nas altas frequências. No entanto, como o ser humano é mais sensível às altas frequências do que às baixas frequências, conclui-se que o atual método despreza o contributo do isolamento sonoro a ruídos de percussão nas altas frequências, não se ajustando assim à reação auditiva dos indivíduos que usufruem de sistemas flutuantes, desprezando as suas necessidades de conforto.

Para tal, como já descrito no subcapítulo 6.4.3.3, é proposta uma adaptação ao atual método de caracterização dos sistemas flutuantes, descrito na NP EN ISO 717-2. Esta nova metodologia consiste em adicionar à curva dos $L_{n,r}$ de cada pavimento, já apropriado ao pavimento de referência, os valores

da curva de ponderação do filtro A (Quadro 2.2) e aplicar uma soma energética a esses valores, obtendo-se assim o Nível sonoro contínuo equivalente ponderado A, aplicado ao pavimento de referência ($L_{Aeq,r}$) [73]. Com esta nova metodologia é possível classificar o desempenho acústico de um sistema flutuante tendo em conta a reação auditiva do ser humano

A título de exemplo, expressa-se na figura 7.2 a mudança da curva dos $L_{n,r}$ no pavimento flutuante A, aquando da adição dos valores da curva de ponderação do filtro A.

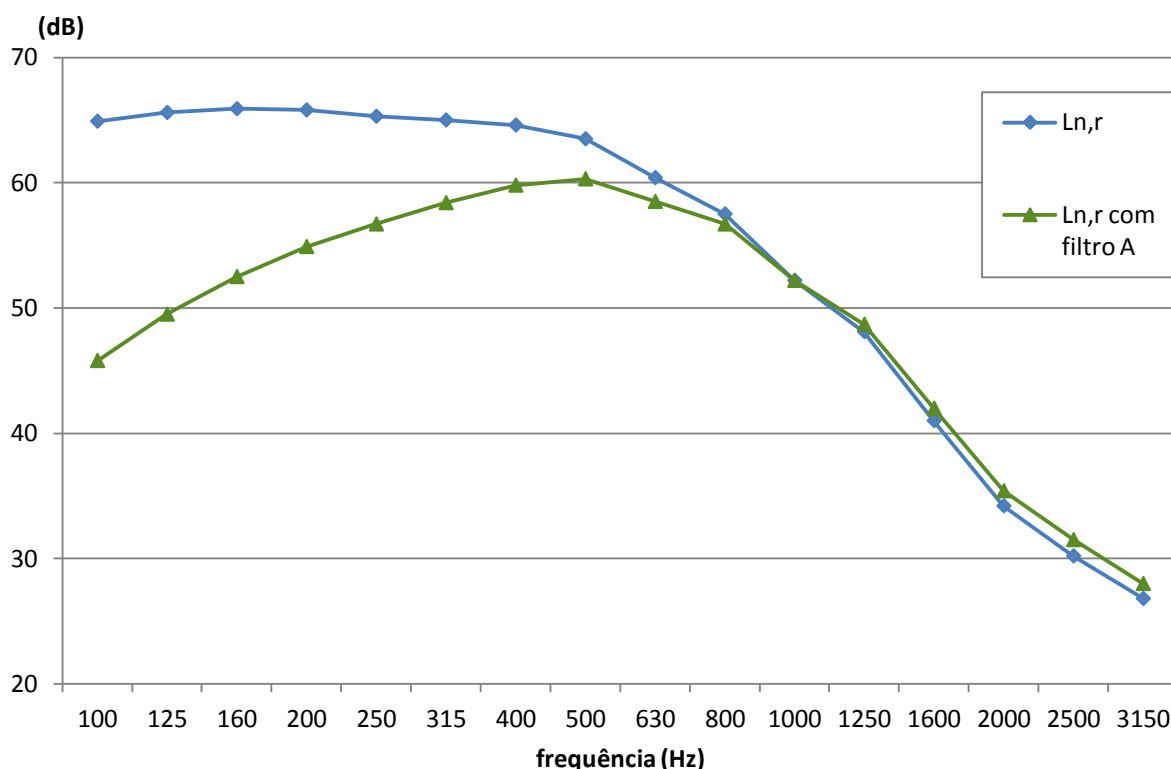


Fig. 7.2 – Curva dos níveis de pressão sonora normalizados em relação ao pavimento de referência ($L_{n,r}$), antes e depois da aplicação dos valores da curva de ponderação do filtro A, usada para a obter o valor nível sonoro contínuo equivalente ponderado A ($L_{Aeq,r}$)

Pela figura 7.2, verifica-se que com a adição do filtro A, a curva dos $L_{n,r}$ passou a deslocar o seu pico de ruído para a banda de frequência dos 500 Hz, obtendo-se assim uma caracterização do ruído em função das frequências centrais (frequências com diferença entre o seu valor e o valor do pico de ruído inferior a 10 dB: 160 Hz a 1 kHz). Com esta metodologia, a gama de frequências influenciadoras na classificação deste pavimento flutuante passou do intervalo dos 100 aos 630 Hz (Fig. 7.1 a) para o intervalo dos 160 Hz ao 1 kHz (Fig. 7.2), sendo este intervalo mais próximo da zona de frequências mais audíveis para o ser humano (altas frequências). Assim, com este novo método é possível classificar e comparar o desempenho acústico dos diferentes pavimentos tendo em conta a reação auditiva do ser humano à intensidade sonora frequencial do ruído de percussão.

Já no final da realização deste trabalho, surgiu uma outra ideia de uma possível adaptação da norma. A metodologia associada a esta adaptação é idêntica à sugerida anteriormente pelo método do $L_{Aeq,r}$ (aplicar os valores da curva de ponderação do filtro A (Quadro 2.2) à curva dos $L_{n,r}$ de cada pavimento, já adaptada ao pavimento de referência), contudo, a diferença reside na posterior aplicação

da curva de referência (Fig. 7.3 CR – f), descrita na NP EN ISO 717-2, aos valores da curva dos $L_{n,r}$ ponderados com o filtro A (Fig. 7.3 $L_{n,r} - f$).

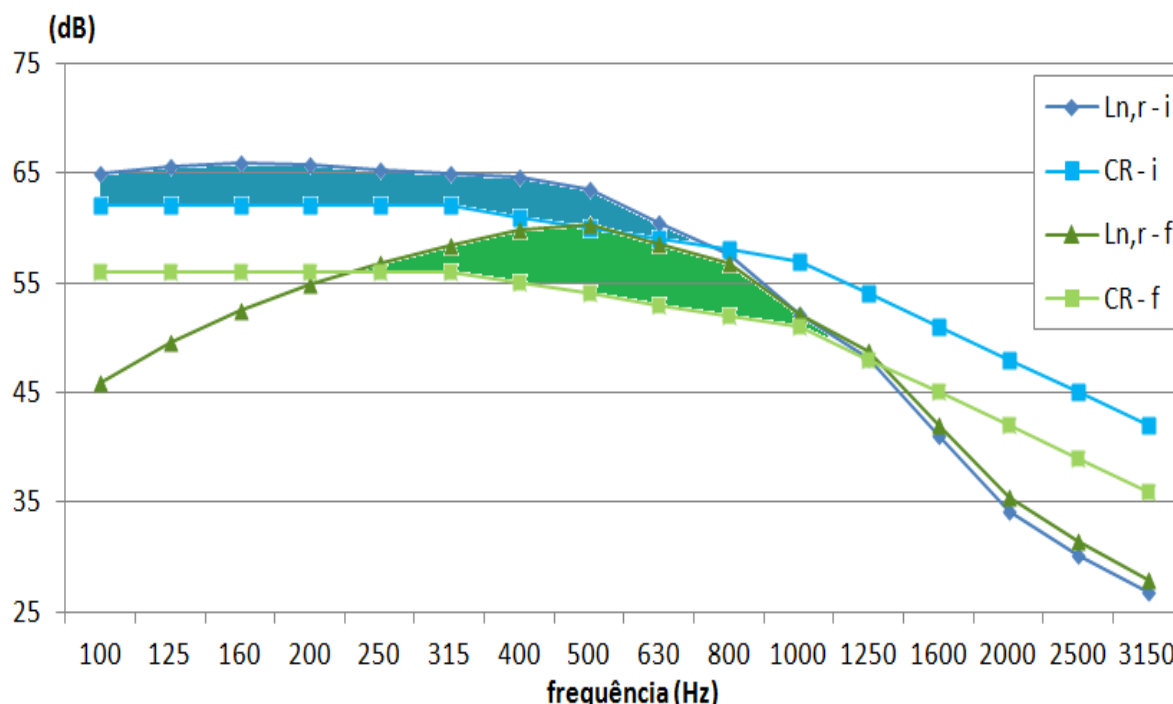


Fig. 7.3 – Zonas de influência do cálculo do $L_{n,r,w}$ a partir dos valores de $L_{n,r}$ do pavimento A com (sufixo “- f”) e sem (sufixo “- i”) a aplicação da curva de ponderação do filtro A

Com esta nova metodologia, seria possível, com a Curva de Referência, aproximar a gama de frequências responsável pela obtenção do $L_{n,r,w}$ à zona de frequências mais sensíveis ao ouvido humano (altas frequências), fazendo assim com que a classificação deste índice focasse mais a reação auditiva do ser humano.

É de salientar que até à conclusão deste texto, não foi possível avaliar todos os casos e analisar a informação bibliografia desta área, informação essa que seria importante para analisar os problemas inerentes a tal adaptação normativa. No entanto, fica aqui a ideia sobre a possibilidade de aplicabilidade desta adaptação normativa, para o caso de surgir alguém interessado em analisar a viabilidade deste método e prosseguir o seu estudo.

7.2.3. ENCURVAMENTO DO PAVIMENTO Z

Após se ter desenvolvido e ensaiado o pavimento Z, deixou-se o mesmo estendido no chão da zona de circulação do laboratório de Acústica, protegido de qualquer acidente que envolvesse água. Com o tempo o pavimento começou a encurvar no sentido da zona onde foi aplicada a cola e o *underlay*, chegando a deter 7 mm de flexa a meio vão (Fig. 7.4). Com tal deformação, o pavimento tornou-se sensível às solicitações, chegando a assentar quando se caminha sobre ele, criando um desconforto.



Fig. 7.4 – Fotos do estado final do pavimento Z após ter ficado 15 dias sobre o piso plano da zona de circulação do laboratório de Acústica

Pelas fotos da figura 7.4 verifica-se que o encurvamento é acentuado e visualmente desconfortável. Após ter-se analisado o pavimento, tentou-se perceber a razão de tal acontecimento, especulando que tal deveu-se possivelmente à grande quantidade de cola usada em toda a área do pavimento para colar o granulado 5/8 mm. Pensa-se que a cola quando secou, diminuiu de volume por expulsão da água devido à sua secagem e forçou a parte inferior da placa a acompanhar a contração da cola, obrigando a placa a curvar-se (Fig. 7.5).

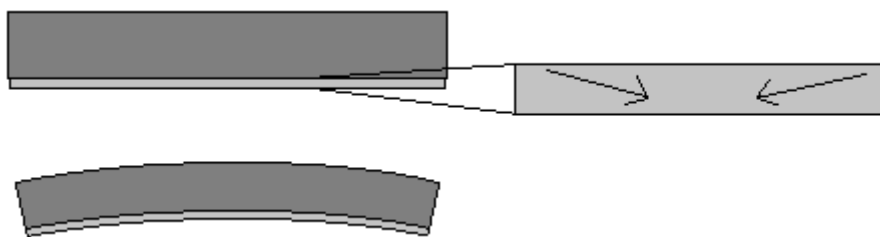


Fig. 7.5 – Esquema do possível comportamento das placas do pavimento Z aquando da secagem da cola do *underlay*

Uma outra hipótese residiu na possibilidade da água da cola ter-se impregnado na placa de MDF e após a secagem da cola e da placa, as fibras de madeira da face inferior do MDF comprimiram e provocaram a curvatura da placa.

Para averiguar tal facto, era interessante experimentar outro tipo de cola para verificar se o mesmo caso sucedia, com diferentes camadas de cola e com diferentes tipos de MDF, passando pelo MDF hidrófugo (apesar de ser consideravelmente mais caro).

Para contornar esse efeito e a particularidade deste pavimento sofrer algumas deformações quando carregado devido à compressão livre das arestas do granulado, em colaboração com a SEDACOR, pensou-se fazer um pavimento de granulado de cortiça numa linha de produção da empresa que consegue misturar o granulado e a cola em proporções mínimas, e aí nivelar o granulado. Assim diminui-se a deformação por compressão do granulado e avalia-se o efeito da cola no elemento de MDF. No entanto, até à conclusão deste texto não houve informação sobre a possibilidade de prosseguir com este estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Henrique, L., *Acústica Musical*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002.
- [2] Gomes, J., *Comportamento acústico de revestimentos de piso - desenvolvimento de modelo de previsão de características*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST, 1992.
- [3] Fortes, M., Rosa, M., e Pereira, H., *A cortiça*, IST, Lisboa, 2004.
- [4] APCOR - Associação Portuguesa de Cortiça, www.apcor.pt, acedido a 22-05-12.
- [5] Reis, A., *Revestimentos de Pisos em Aglomerado de Cortiça*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Área de Especialização em Edificações, ISEL, 2011.
- [6] Carvalho, A., *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Edição 8.1, FEUP, 2011.
- [7] Oliveira, P., *Desenvolvimento e caracterização acústica de elementos autoportantes para absorção sonora em espaços tipo open space*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, 2009.
- [8] Patrício, J., *Isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão: metodologias de caracterização*, LNEC, Lisboa, 1999.
- [9] Everest, F. e Pohlmann, K., *The master handbook of acoustics*, McGraw Hill, New York, 2009.
- [10] Silva, P., *Os efeitos do ruído no Homem*, Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa, 1980.
- [11] *Conversa com Carla Barbosa e Raquel Esteves*, 13-03-2012.
- [12] Long, M., *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, Burlington, MA, 2006.
- [13] *aula de novembro de Acústica Ambiental e de Edifícios*, 2011.
- [14] Costa, N., *Grandezas Acústicas Características*, 28-04-2011, <http://soundzonemagazine.blogspot.pt/2011/04/grandezas-acusticas-caracteristicas.html>, acedido a 06-02-2012.
- [15] Disciplina de "Acústica aplicada" da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, <http://sme.dcm.fct.unl.pt/u/dias/docencia/Acustica/AcusticaAplic0405.htm>, acedido a 25-03-2012.
- [16] Domingues, O., *A Acústica nos Edifícios - Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, LNEC, Lisboa, 2005.
- [17] NOVA CON, www.novacon.com.br/audioreverb.htm, acedido a 23-03-2012.
- [18] Ferraz, R., *Atenuação de ruído de impacto em pisos de edificações de pavimentos múltiplos*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, DEES - UFMG, 2008.
- [19] Patrício, J., *Algumas considerações sobre a influência da transmissão marginal no valor do índice de isolamento sonoro a sons de impacto*, LNEC, Lisboa, 2000.
- [20] Teoria Engenharia Acústica Ltda., <http://www.acusticateoria.com.br/linha-residencial02.asp>, acedido a 19-05-2012.

- [21] Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A., e Sanders, J., *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [22] Meisser, M., *Acustica de los Edificios*, Editores técnicos associados, Barcelona, 1973.
- [23] Pedroso, M., *Estudo comparativo entre as modernas composições de pisos flutuantes quanto ao desempenho no isolamento ao ruído de impacto*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFSM, RS, 2007.
- [24] Galante, R., *Análise comparativa dos métodos normalizados de previsão da transmissão sonora por via estrutural*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST, 2010.
- [25] Lopes, G., *Isolamento Activo a Ruídos de Percussão em Pavimento Flutuante*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST, 2009.
- [26] Norma NP EN ISO 717-2: 2009 "*Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção - Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão*".
- [27] Mateus, D., *Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído*, FCTUC, 2008.
- [28] Souza, H., *Análise experimental dos níveis de ruído produzido por peça de mão de alta rotação em consultórios odontológicos: possibilidade de humanização do posto de trabalho do cirurgião dentista*, Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 1998.
- [29] Heckl, M. e Rathe, J., *Relationship between the transmission loss and the impact-noise isolation of floor structures*. Journal of Acoustical Society of America, 1963, Vol 35 , pág. 1825-30.
- [30] Vér, I., *Impact noise insulation of composite floors*. Journal of Acoustical Society of America, 1971, Vol 50 , pág. 1043-1050.
- [31] Silva, P., *Pavimentos flutuantes ensaio em modelo para qualificação do isolamento à transmissão de ruídos de percussão*, LNEC, Lisboa, 1975.
- [32] Cremer, L. e Heckl, M., *Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies*, Berlin, Springer-Verlag, 1988.
- [33] Shi, W., Johansson, C., e Sundback, U., *An investigation of the characteristics of impact sound sources for impact sound insulation measurement*. Applied Acoustics, Vol 51, 1997, pág. 85-108.
- [34] Vafiadis, C., *The use of agglomerated cork as underlay for improvement of impact sound insulation in buildings*, Mestrado em Engenharia de Construção Europeia, FEUP, 1998.
- [35] Conrad, L., *Estudo comparativo entre diversos revestimentos para pisos quanto ao isolamento do ruído de impacto*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2002.
- [36] Hax, S., *Estudo do potencial dos resíduos de E.V.A. no isolamento de ruído de impacto nas edificações*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2002.
- [37] Fuchs, G. e Stasyszyn, N., *Airborne and impact noise level criteria for buildings*. Applied Acoustics, 2003, Vol 12, pág. 187-194.

- [38] Machado, J., *Análise de Vibração e ruído estrutural em piso slim floor de edifícios de aço para atender requisitos de conforto*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- [39] Semprini, G. e Cocchi, A., *Investigation on the flanking transmission of impact sound insulation of floor*. Journal of Acoustical Society of America, 2004, Vol 115, pág. 2581.
- [40] Rushforth, I., Horoshenkov, M., Miraftab, M., e Swift, M., *Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste*. Applied Acoustics, 2005, Vol 66, pág. 731-749.
- [41] Mateus, D., *Influência do ruído aéreo gerado pela percussão de pavimentos na determinação de $L'_{n,w}$* , CONTRAruido – Acústica e Controlo de Ruído, Coimbra, 2005.
- [42] Nash, A., *Resilient ceiling construction in residential buildings*. Journal of Acoustical Society of America, 2006, Vol 120, pág. 3146.
- [43] Hale, M., *Comparative results of field impact isolation testing of numerous resilient underlayment systems for hard-surfaced flooring*. Journal of Acoustic Society of America, 2006, Vol 120, pág. 3147.
- [44] Jeon, J., Yoo, S., e Lee, P., *The effect of damping materials on heavy-weight floor impact in apartment buildings*. Journal of Acoustical Society of America, 2006, Vol 120, pág. 3146.
- [45] Tadeu, A., Pereira, A., Godinho, L., e Antonio, J., *Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multilayer systems using analytical expressions*. Applied Acoustics, 2007, Vol 68, pág. 17-42.
- [46] Bistafa, S., *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*, Ed. Edgar Blücher, São Paulo, 2006.
- [47] ISO 9052: 1989 *"Determinação da rigidez dinâmica - Parte 1: Materiais utilizados sob pavimentos flutuantes em habitações"*.
- [48] Pujolle, J., *La pratique de l'isolation acoustique des batiments.*, Ed. Moniteur, Paris, 1978.
- [49] Sancho, V. e Sencherms, A., *Acustica en arquitectura*, COAM - Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid, 1982.
- [50] EN ISO 12354-2: 2000 *"Estimativa das características acústicas dos edificios a partir das características dos seus elementos - Parte 2: Isolamento sonoro a ruídos de percussão entre compartimentos"*.
- [51] Pereyron, D. e Santos, J., *Laje nervurada: análise da performance acústica para ruído de impacto* 8 a 10 de Agosto de 2007, IX Encontro Nacional e V Latini Americano de Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto, pág. 1461-1465.
- [52] AcoustiCORK, www.acousticork.eu, acessado a 22-04-2012.
- [53] Oliveira, M. e Oliveira, L., *A cortiça*, Corticeira Amorim S.G.P.S., Rio de Mouro, 2000.
- [54] Grupo AMORIM, www.amorim.com, acessado a 17-03-12.

- [55] *Boletim da Rede Ibérica - Edição estatística de Fevereiro de 2012*. WWF - World Wide Fund for nature, 2012.
- [56] Portugal Ambiente, www.portugalambiente.com, acedido a 23-03-2012.
- [57] Chiebao, F., *Manual Técnico: Materiais de Construção e Decoração*, APCOR, Santa Maria das Lamas, 2011.
- [58] JPSCORKgroup, www.jpscorkgroup.com, acedido a 02-03-2012.
- [59] Machado, J., *Placas de derivados de madeira tipos de placas e sua especificação*, LNEC, Lisboa, 2005.
- [60] Portal da Madeira: Aspectos técnicos e curiosidades, <http://portaldamadeira.blogspot.pt/2010/01/contraplacado-definicao-e-processo-de.html>, acedido a 29-04-2012.
- [61] Norma NP EN 321: 2010 "*Placas de derivados de madeira determinação da resistência à humidade através de ensaios cíclicos*".
- [62] MDF Fibranor® FB Hidrófugo - FINSA, www.finsa.es/publicaciones/textosweb.nsf/nombre-pt/Fibranor%C2%AE%20FB%20Hidr%C3%B3fugo?OpenDocument&L=PT&C=Madeira%20t%E9cnicaMDF&F=Madeira%20t%E9cnica&V=webdatos_soporte-es, acedido a 17-05-2012.
- [63] Norma NP EN ISO 140-8: 2008 "*Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção - Parte 8: Medição em laboratório da redução de transmissão sonora de revestimento de piso em pavimento normalizado*".
- [64] *Conversa com professor Oliveira de Carvalho*, 02-05-2012.
- [65] Domingues, O., *A acústica nos edifícios - Pavimentos e revestimentos de pavimentos, isolamentos a sons de percussão*, LNEC, Lisboa, 2009.
- [66] Norma NP EN ISO 354: 2007 "*Medição da absorção sonora em câmara reverberante*".
- [67] NP EN ISO 140-6: 2000 "*Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção - Parte 6: Medição, em laboratório, do isolamento sonoro de pavimentos a sons de percussão*".
- [68] ASTM E989: 2006 "*Standard Classification for Determination of Impact Insulation Class (IIC)*".
- [69] JIS A 1418-2: 2000 "*Measurement of floor impact sound insulation of buildings - Part 2: Method using standard heavy impact sources*".
- [70] RION, http://www.rion.co.jp/dbcon/pdf/sound_5-e.pdf, acedido a 13-06-2012.
- [71] *imagem do poster de apresentação afixado no Laboratório de Acústica da FEUP*.
- [72] Maio, D., *Desenvolvimento de "tinta" com pó de cortiça com desempenho acústico optimizado*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, 2010.
- [73] *Conversa com professor Oliveira de Carvalho*, 13-06-2012.

ANEXO A

REGISTO FOTOGRÁFICO

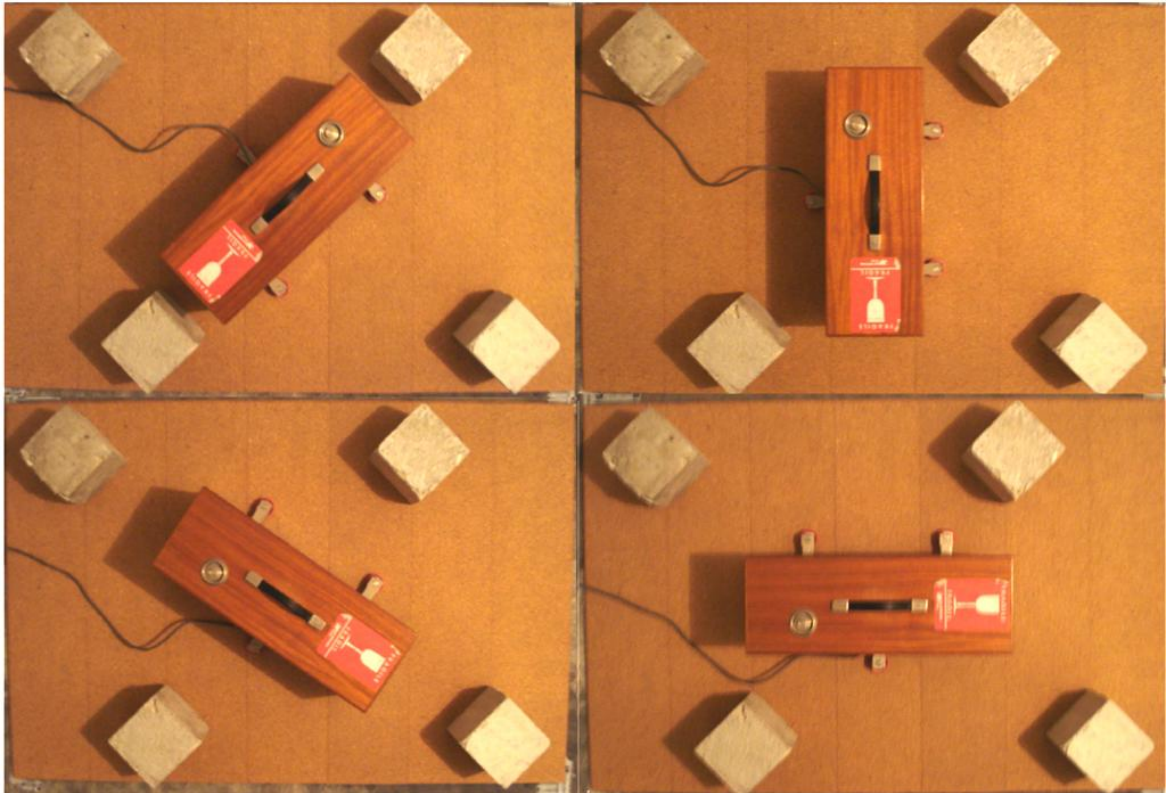


Fig. A.1 – Posições da máquina de impactos normalizada aquando dos ensaios de percussão dos pavimentos flutuantes na câmara emissora E2



Fig. A.2 – Disposição dos microfones na câmara recetora R1



Fig. A.3 – Colagem das tiras de cortiça no pavimento U da “Experiencia 1 – Tiras e amortecedores”



Fig. A.4 – Aspeto final do pavimento T da “Experiencia 1 – Tiras e amortecedores”

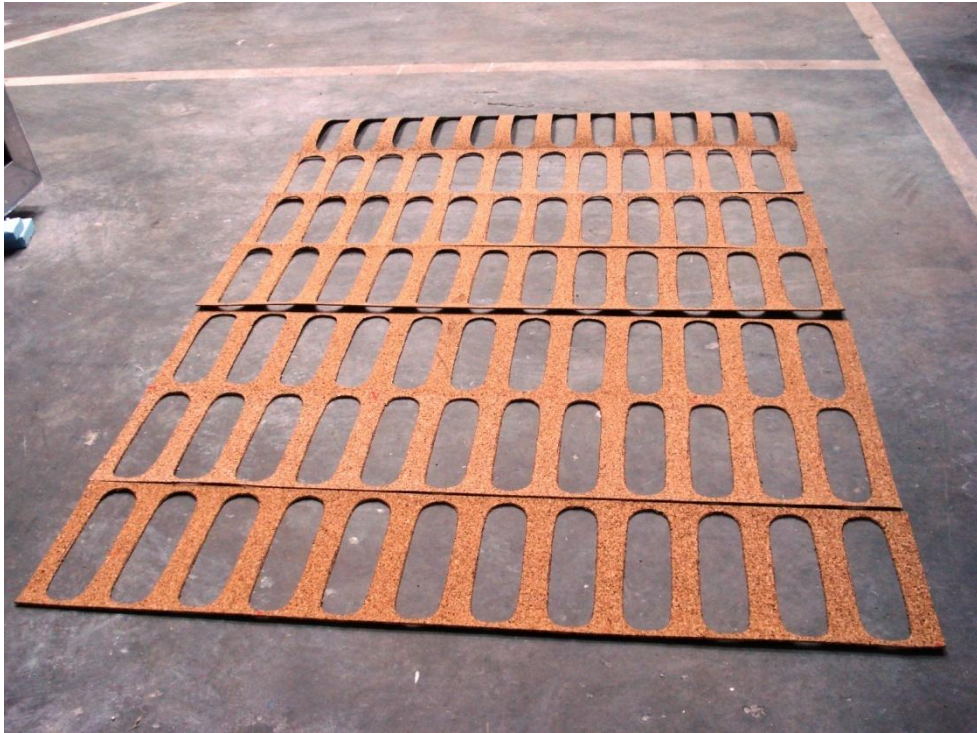


Fig. A.5 – *Underlay* do pavimento Y da “Experiência 2 – Elipses e bastões”

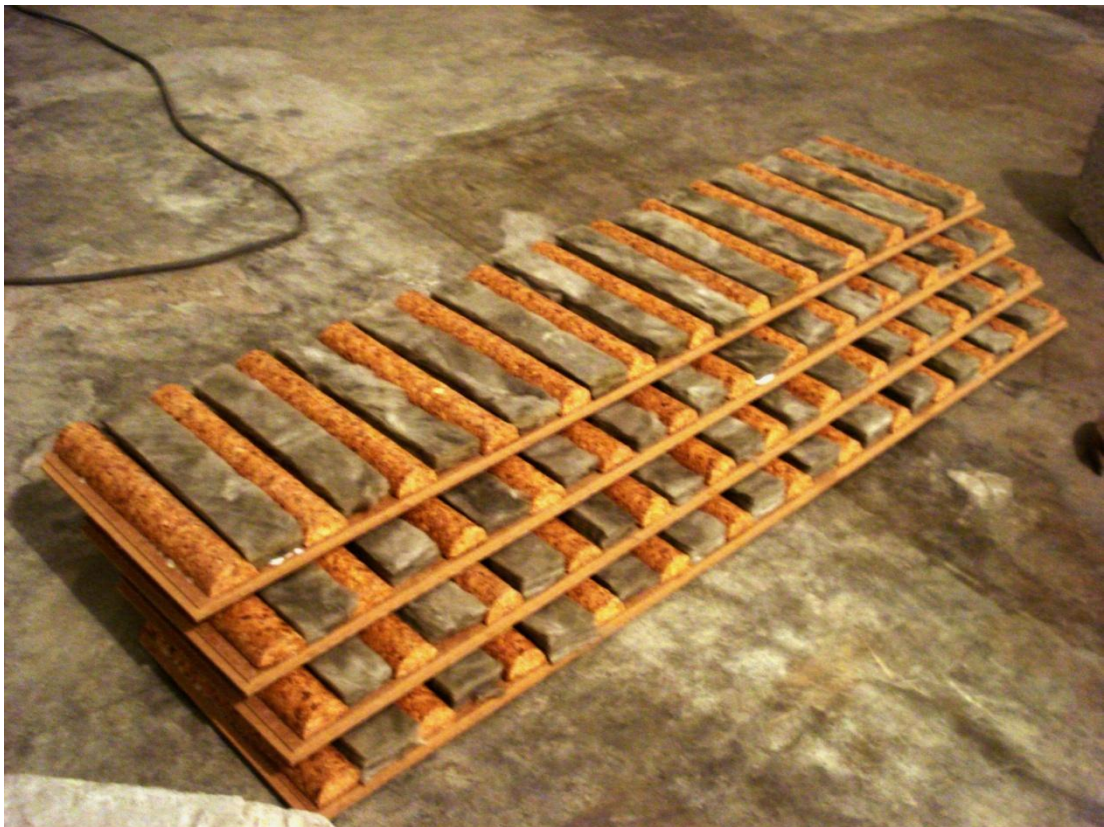


Fig. A.6 – Vista do *underlay* do pavimento X da “Experiência 2 – Elipses e bastões”



Fig. A.7 – Método usado na prensagem do granulado ao elemento resistente, para dar origem ao pavimento Z



Fig. A.8 – Aspeto final do pavimento de granulado de cortiça colada (Pav. Z)

ANEXO B

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Quadro B.1 – Níveis de pressão sonora normalizados, L_n , em bandas de terço de oitava (dB), dos pavimentos flutuantes A a N, aquando da percussão com a máquina de impactos normalizada

Designação	Banda de frequência (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1,25 k	1,6 k	2 k	2,5 k	3,15 k	4 k	5 k
Pav. A	55,8	66,0	67,9	66,3	72,7	71,1	70,9	71,1	67,7	63,6	58,0	53,9	47,2	39,2	34,3	29,0	23,4	18,3
Pav. B	56,7	65,9	67,2	66,2	72,1	70,4	69,8	69,8	66,7	63,2	57,7	53,4	46,5	39,3	33,1	26,9	21,6	17,3
Pav. C	57,9	65,6	67,3	65,9	72,4	70,5	69,9	70,0	66,4	63,0	57,5	52,8	46,6	39,0	32,5	26,5	21,2	17,1
Pav. D	57,0	65,7	67,9	66,4	72,2	70,5	69,0	69,4	66,5	63,0	59,5	55,0	47,2	38,0	33,0	26,2	20,8	17,0
Pav. E	56,6	65,1	67,5	65,7	71,9	70,0	68,7	69,1	66,4	62,1	56,9	53,3	46,8	38,8	32,1	25,9	21,0	17,0
Pav. F	55,7	65,4	67,7	66,5	72,8	71,2	70,7	70,8	67,5	63,4	58,8	54,1	48,5	39,7	33,2	26,2	21,0	17,5
Pav. G	55,6	65,5	68,1	66,8	73,0	71,5	71,7	72,1	67,9	63,3	55,9	50,6	44,4	39,7	34,1	29,4	23,0	18,0
Pav. H	57,3	65,5	67,9	66,5	72,9	71,3	71,3	71,3	67,4	62,9	55,2	49,6	43,7	38,7	32,2	27,2	23,0	19,5
Pav. I	56,9	65,5	67,9	66,8	73,3	71,4	71,1	71,5	67,6	63,2	56,0	50,2	44,6	39,4	33,3	28,7	22,6	18,0
Pav. J	56,8	65,4	68,0	66,7	73,2	71,4	71,7	71,9	67,6	63,0	55,8	49,6	44,5	39,2	33,6	28,9	23,7	17,8
Pav. K	56,4	65,6	68,1	66,6	73,2	71,5	71,1	71,3	67,0	62,1	54,9	48,5	43,5	39,2	32,9	26,7	20,7	16,5
Pav. L	58,5	65,3	67,9	66,6	72,8	71,2	70,6	70,9	67,2	62,8	54,7	49,8	44,5	38,8	32,9	28,5	23,3	17,7
Pav. M	59,2	65,8	67,9	66,6	73,1	71,0	70,7	70,9	67,9	64,6	58,3	52,9	47,3	40,4	33,8	28,1	22,8	18,9
Pav. N	57,1	64,9	68,1	66,7	73,3	72,0	72,0	72,4	69,4	65,4	60,7	55,9	45,9	37,0	32,7	27,5	22,4	17,8

Quadro B.2 – Níveis de pressão sonora normalizados, L_n , em bandas de terço de oitava (dB), dos pavimentos flutuantes O a Z e da laje simples, aquando da percussão com a máquina de impactos normalizada

Designação	Banda de frequência (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1,25 k	1,6 k	2 k	2,5 k	3,15 k	4 k	5 k
Pav. O	56,4	65,7	68,1	66,9	73,0	71,3	71,0	69,9	65,0	59,2	50,6	44,7	41,0	34,6	28,3	23,2	17,9	15,7
Pav. P	56,9	67,0	68,8	67,2	73,7	72,3	72,1	71,9	67,1	62,4	55,2	47,1	43,6	38,8	32,2	26,4	20,9	16,9
Pav. Q	57,8	65,8	68,4	67,4	73,8	72,4	72,7	73,2	69,4	64,6	58,4	52,4	45,0	42,1	36,7	31,5	25,8	20,4
Pav. R	57,7	66,0	69,1	67,2	73,3	71,9	71,9	71,5	68,0	63,6	56,4	51,6	45,3	40,8	34,9	30,4	24,9	20,3
Pav. S	57,1	65,9	68,3	67,4	74,4	74,0	72,7	71,9	67,3	62,3	55,0	50,8	46,8	41,2	34,6	28,6	21,8	16,5
Pav. T	57,1	65,1	67,9	66,5	72,9	73,0	72,1	72,2	66,6	60,2	53,4	50,5	45,3	39,5	33,5	27,5	20,7	16,2
Pav. U	56,8	66,0	67,9	66,6	73,1	71,5	71,4	72,9	69,5	63,8	56,6	50,6	45,8	40,4	34,7	29,3	22,8	17,2
Pav. V	56,5	65,9	67,9	66,8	73,3	72,4	72,3	70,9	65,7	59,8	52,7	47,4	43,3	38,0	32,5	26,4	19,5	15,8
Pav. W	56,5	64,8	67,6	67,4	76,3	72,1	67,8	66,0	58,7	54,3	49,1	44,0	38,1	31,8	25,8	21,5	16,8	15,3
Pav. X	58,2	65,1	69,5	69,6	74,2	69,2	67,4	64,9	58,7	52,7	46,2	42,0	36,8	31,8	25,8	21,0	16,2	15,1
Pav. Y	57,0	66,3	68,4	66,8	73,4	71,8	71,1	72,0	68,2	62,9	55,0	50,2	46,9	42,3	36,2	30,2	22,0	16,8
Pav. Z	54,3	63,0	64,9	61,8	66,8	66,3	66,2	64,9	56,9	48,9	41,1	36,4	31,5	27,5	23,2	20,3	17,5	14,7
Laje simples	57,9	67,9	70,0	69,0	76,4	75,6	76,3	78,1	78,3	77,6	77,8	77,8	78,2	77,0	76,1	74,2	71,4	67,2

Quadro B.3 – Valores do ΔL do Pav. A e valores do ΔL_n das várias análises de influência, em bandas de terço de oitava (dB)

		Banda de frequência (Hz)																	
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 k	1,25 k	1,6 k	2 k	2,5 k	3,15 k	4 k	5 k
Redução sonora a ruídos de percussão do pavimento A (Fig. 6.15)																			
ΔL (Pav. A)		2,1	1,9	2,1	2,7	3,7	4,5	5,4	7,0	10,6	14,0	19,8	23,9	31,0	37,8	41,8	45,2	48,0	48,9
Redução dos níveis de pressão sonora normalizados do Contraplacado em relação ao MDF em função do tipo de <i>underlay</i> : 51 PL, 12 PL e 25 MS (Fig. 6.21)																			
51 PL (A $\rightarrow$ D)		-1,2	0,3	0,0	-0,1	0,5	0,6	1,9	1,7	1,2	0,6	-1,5	-1,1	0,0	1,2	1,3	2,8	2,6	1,3
12 PL (B $\rightarrow$ E)		0,1	0,8	-0,3	0,5	0,2	0,4	1,1	0,7	0,3	1,1	0,8	0,1	-0,3	0,5	1,0	1,0	0,6	0,3
25 MS (C $\rightarrow$ F)		2,2	0,2	-0,4	-0,6	-0,4	-0,7	-0,8	-0,8	-1,1	-0,4	-1,3	-1,3	-1,9	-0,7	0,3	0,2	0,2	-0,4
Redução média dos níveis de pressão sonora normalizados, criada pela variação da espessura do underlay: 1,2 a 3,2 mm (Fig. 6.26)																			
1,2 mm $\rightarrow$ 2,2 mm		0,2	0,5	-0,2	-0,5	-0,3	-0,4	-0,8	-1,0	-0,2	0,3	2,1	3,3	2,8	-0,5	0,2	-0,4	0,4	0,3
2,2 mm $\rightarrow$ 3,2 mm		-1,3	-1,5	-0,7	-0,4	-0,7	-0,8	-0,4	0,2	0,8	0,9	0,7	3,5	0,8	0,9	1,9	3,0	2,1	1,1
1,2 mm $\rightarrow$ 3,2 mm		-1,1	-1,0	-0,9	-0,9	-1,0	-1,2	-1,2	-0,8	0,6	1,2	2,8	6,8	3,6	0,4	2,1	2,6	2,5	1,4
Aumento do nível de pressão sonora normalizado dos pavimentos G e H quando submetidos a envernizamento, em função do tipo de <i>underlay</i> (Fig. 6.31)																			
51 PL (G $\rightarrow$ Q)		2,2	0,3	0,3	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,5	1,3	2,5	1,8	0,6	2,4	2,6	2,1	2,8	2,4
12 PL (H $\rightarrow$ R)		0,4	0,5	1,2	0,7	0,4	0,6	0,6	0,2	0,6	0,7	1,2	2,0	1,6	2,1	2,7	3,2	1,9	0,8

