



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

Atenuação de Vibrações em Pavimentos – Estudo Experimental

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

Autor

David Miguel Freire Tadeu

Orientadores

Julieta Maria Pires António

António José Barreto Tadeu

Colaboração Institucional



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

Coimbra, Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Com o culminar desta dissertação chega ao fim mais uma etapa da minha vida. Etapa pela qual tenho de agradecer a colaboração e o apoio recebido por parte de várias pessoas.

Desde já agradeço toda a disponibilidade, os conhecimentos e a paciência disponibilizados pela Professora Doutora Julieta António e pelo Professor Doutor António Tadeu. Ao ITeCons pela oportunidade que me foi dada de realizar o projeto sobre o qual surgiu este trabalho e ainda ao Eng^o José Nascimento pelo apoio fornecido.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra por a minha formação científica e a todos os Professores pelo apoio que me foi dado.

Agradeço ainda aos meus amigos, com os quais partilhei esta fase da minha vida e das quais guardarei muitas recordações. Quero agradecer de forma especial Ao Vítor Bruno Santos por toda a ajuda que também disponibilizou na realização desta dissertação, de forma incansável.

Agradeço também à CDM-Portugal por ter permitido que estes resultados fossem divulgados nesta dissertação.

Por último, quero deixar os meus agradecimentos aos meus pais, à minha irmã, aos meus avós e à minha namorada, por toda a motivação e apoio nas alturas em que tudo parecia mais difícil e por tudo o que fizeram por mim.

RESUMO

A evolução da construção aliada à evolução das tecnologias conduziu ao projeto de edifícios construídos com materiais mais leves e de alta resistência e com maiores vãos. Contudo, este tipo de edifícios é mais sensível a problemas relacionados com as vibrações.

A incomodidade provocada pelas vibrações em edifícios é mencionada, frequentemente, como uma causa de desconforto pelos seus utilizadores. As vibrações podem estar associadas ao aumento de atividades humanas (em ginásios, escritórios) à diminuição das frequências naturais dos pavimentos devido ao aumento dos vãos; e à diminuição da massa e do amortecimento dos pavimentos.

Em edifícios mistos, devido à coexistência de diferentes usos no mesmo edifício, é difícil prever, em fase de projeto, qual será a utilização dada aos espaços. Quando a atividade a ser instalada é geradora de vibrações incómodas e de grandes amplitudes torna-se necessário requalificar o espaço em questão (ex: ginásios).

Na presente dissertação apresenta-se um estudo experimental de soluções (de pavimento flutuante) de requalificação de pavimentos para os adaptar ao funcionamento de ginásios. Neste estudo é avaliada a atenuação de vibrações conferida por cada uma das soluções estudadas. Esta atenuação é dependente de diversos fatores tais como a massa da solução, a rigidez da base que os suporta e as características da excitação aplicadas sobre os pavimentos. As soluções estudadas baseiam-se na colocação de apoios resilientes discretos sobre os quais é aplicada uma solução de piso flutuante leve multicamada à base de painéis derivados de madeira e uma solução de piso flutuante pesada constituída por uma lajeta de betão armado. Durante o estudo avaliou-se a influência de diferentes parâmetros na atenuação de vibrações: o tipo de apoios resilientes discretos; o tamanho da caixa-de-ar; a presença ou não de lã de rocha na caixa-de-ar; o número de camadas de painéis de derivados de madeira e mantas resilientes.

ABSTRACT

Advancements in construction and technology have led to a greater number of new buildings being designed using lighter, more resistant, materials and larger glazing areas. However, this type of buildings is more prone to vibration related problems.

Annoyance caused by vibrations is often mentioned by building users to be a source of discomfort. Such vibrations may come from the increase of human activities (in gyms, offices), from the lowering of the floors' natural frequencies due to bigger spans, or from the floors' increasingly lower mass and damping characteristics.

In buildings which are both residential and commercial, due to their mixed nature, it is hard to predict the use of each space at the design stage. Often it is only after the activity within the building starts to generate a high level of unwanted vibration that measures are taken to retrofit the space in question (for example used as gyms).

In the present study an experimental campaign is performed on floating floors to be used as retrofitting solutions for gyms. The study focuses on evaluating the vibration reduction given by different solutions. This depends on various factors such as the mass of the solution, the rigidity of the support base and the characteristics of the excitation applied to the floor. The solutions under study consist in using discrete resilient supports, on top of which a light wood multilayered floating floor system, and a heavy concrete floating floor system, is applied. A number of parameters are changed (the type of discrete resilient supports, the size of the air space gap, the presence or absence of rock wool inside the air space, the number of layers of wood-based panels and resilient covers) and their influence on the vibration reduction is evaluated.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização do documento	3
2 Vibrações em Pavimentos	4
2.1 Introdução	4
2.2 Perceção das vibrações pelo ser humano / limites de conforto.....	4
2.3 Critérios de Projeto	6
2.4 Fontes de Vibração	7
2.4.1 Vibração do Solo	9
2.4.2 Efeito do Vento.....	10
2.4.3 Equipamentos nos Edifícios	11
2.4.4 Atividades Humanas.....	12
2.5 Vibração gerada por cargas de impacto	13
2.6 Vibração de Placas.....	15
2.6.1 Introdução.....	15
2.6.2 Tipos de Ondas	15
2.6.3 Modos locais.....	16
2.6.4 Amortecimento	18
2.6.5 Radiação Sonora.....	19
3 Programa Experimental	21
3.1 Introdução	21
3.2 Descrição das soluções ensaiadas	21
3.3 Descrição dos ensaios	26
3.4 Tratamento de resultados	28
4 Apresentação e análise de resultados.....	31
4.1 Introdução	31
4.2 Soluções leves.....	31
4.3 Soluções Pesadas	44

4.4	Comparação entre soluções leves e pesadas	51
4.5	Comparação dos revestimentos de pisos	54
4.6	Medições no topo da solução construtiva	57
5	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	60
6	Referências Bibliográficas.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Graus de incomodidade das vibrações sobre as pessoas (Silva, T., 2013)	5
Figura 2.2 – Sistema de coordenadas para avaliação das vibrações em seres humanos nos edifícios (BS6472, 1992)	6
Figura 2.3 – Tipos de Vibração (adaptado de: Griffin, M. J, 1990)	8
Figura 2.4 – Propagação das vibrações no solo para os edifícios (Hanson, Carl E et al, 2006) 9	
Figura 2.5 – Propagação de vibrações devido a equipamentos. (Gutierrez, F., 2008).	11
Figura 2.6 – Movimentos aeróbicos executados para excitar o pavimento. (Allen, 1990)	12
Figura 2.7 – Impulsos para as diferentes pontas do martelo em função do tempo (Brüel & Kjør Product Data Sheet – impact hammervtype 8206)	14
Figura 2.8 – Espectro de resposta dos impulsos ilustrados anteriormente (Brüel & Kjør Product Data Sheet – impact hammervtype 8206)	14
Figura 2.9 – Padrões de deformação gerados por vários tipos de ondas presentes em placas: a) ondas quase longitudinais; b) ondas transversais; c) ondas de flexão (Fahy, F. & Gardonio, P., 2007).....	16
Figura 2.10 – Resposta ao impulso por um oscilador simples (Cossolino, L. & Pereira, A., 2010).....	19
Figura 2.11 – Fatores de amortecimento (Cossolino, L. & Pereira, A., 2010).....	19
Figura 3.1 - a) Mola CDM CHR-3,5Hz-18500N; b) Mola por canto da laje	21
Figura 3.2 – Apoios resilientes discretos: a) apoios CDM80-L50 em calhas metálicas; b) apoios CDM79-L50 em calhas metálicas aparafusadas aos barros	24
Figura 3.3 – Materiais que constituem as camadas do pavimento das soluções leves: a) OSB; b) Contraplacado Marítimo; c) CDM-DAMP5; d) CDM-ACUSEAL.....	25
Figura 3.4 – Revestimentos de piso: a) R 2 – revestimento de piso Gym-Floor 10mm; b) R 3 – revestimento de piso com linóleo com 3mm; c) R 4 – revestimento de piso com CDM-GYM-ELAST-30 com 30mm de espessura	25
Figura 3.5 – Pormenores de montagem: a) apoios resilientes; b) sistema de apoio com sobre altura; c) caixa-de-ar preenchida com lã mineral; d) colocação de camada de OSB sobre as calhas metálicas do sistema de apoio; e) sobreposição de outras camadas de OSB; f) colocação de camada resiliente entre camadas.....	26

Figura 3.6 – Aspeto final da montagem das soluções construtivas: a) soluções leves; b) soluções pesadas	26
3.7 – Equipamento laboratorial: a) sistema de apoio da esfera; b) esfera de 30kg	27
Figura 3.8 – Equipamento de medição: a) acelerómetro; b) sistema de aquisição de sinal	27
Figura 3.9 – Posição dos acelerómetros sob e sobre a laje.....	28
Figura 3.10 – Aceleração no domínio do tempo	28
Figura 3.11 – Aceleração no domínio da frequência.....	29
Figura 3.12 – Representação gráfica do nível de aceleração para os três filtros.....	30
Figura 3.13 – Representação do nível médio da aceleração dos 3 acelerómetros em bandas de 1/3 de oitava-	30
Figura 4.1 - Análise comparativa entre as soluções leves L1 e L2: a) Esfera de 10 kg a 0.80m; b) Esfera de 30 kg a 0.80m; c) Esfera de 10kg a 2.00m; d) Esfera de 30kg a 2.00m	33
Figura 4.2 – Análise comparativa entre as soluções leves L3 e L4: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	34
Figura 4.3 – Análise comparativa entre as soluções leves L1 e L3: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	35
Figura 4.4 – Análise comparativa entre as soluções leves L2 e L4: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	36
Figura 4.5 - Análise comparativa entre as soluções leves L5 e L6 a) Esfera de 10 kg a 0.80m; b) Esfera de 30kg a 2.00m	37
Figura 4.6 – Análise comparativa entre as soluções leves L7 e L8: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	38
Figura 4.7 – Análise comparativa entre as soluções leves L2 e L5: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	39
Figura 4.8 – Análise comparativa entre as soluções leves L4 e L6: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	40
Figura 4.9 – Análise comparativa entre as soluções leves L5 e L7: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	41
Figura 4.10 – Análise comparativa entre as soluções leves L6 e L8: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	42
Figura 4.11 – Análise comparativa entre as soluções leves L5 e L9: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	43
Figura 4.12 – Análise comparativa entre todas as soluções leves: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m	44

Figura 4.13 – Análise comparativa entre soluções pesadas H1 e H2: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	45
Figura 4.14 - Análise comparativa entre soluções pesadas H2 e H3: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80.....	46
Figura 4.15 . Análise comparativa entre soluções pesadas H2 e H4: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	47
Figura 4.16 – Análise comparativa entre soluções pesadas H5 e H6: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	48
Figura 4.17 – Análise comparativa entre soluções pesadas H2 e H5: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	49
Figura 4.18 – Análise comparativa entre soluções pesadas H4 e H6: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	50
Figura 4.19 – Análise comparativa entre todas as soluções pesadas: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,8m.....	51
Figura 4.20 – Análise comparativa da solução leve L1 com a solução pesada H1: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	52
Figura 4.21 – Análise comparativa da solução leve L2 com as soluções pesadas H2 e H3: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	53
Figura 4.22 – Análise comparativa da solução leve L7 com a solução pesada H6: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	54
Figura 4.23 – Análise comparativa dos três revestimentos com a solução leve L4: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m.....	55
Figura 4.24 – Análise comparativa dos três revestimentos com a solução pesada H2: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m.....	56
Figura 4.25 – Análise comparativa dos três revestimentos com a laje de betão como base: a) Esfera de 10kg a 0,80; b) Esfera de 30kg a 2,00m.....	57
Figura 4.26 – Níveis de aceleração médios no topo da laje de betão armado.....	58
Figura 4.27 – Níveis de aceleração médios no topo da solução leve L4.....	58
Figura 4.28 – Níveis de aceleração médios no topo da solução pesada H2.....	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

Com o evoluir das tecnologias no sector construtivo, tanto a nível de materiais como a nível de técnicas de construção, os edifícios tendem a ser constituídos cada vez mais por materiais leves e de alta resistência. Este desenvolvimento tem conduzido à construção de estruturas que delimitam espaços cada vez mais amplos e de maiores vãos, e conseqüentemente ao aparecimento de problemas de vibrações incómodas e de grande amplitude. Os problemas relativos às vibrações tornaram-se, assim, uma questão de dimensionamento e uma questão de projeto. (Chen, Xu, & Zhang, 2014). Assim, o real uso dos edifícios deve ser tido em consideração durante a fase de projeto e de construção para que se adapte a solução estrutural, particularmente do pavimento, às funcionalidades exigidas.

As vibrações são originadas por inúmeras e diferentes fontes, tanto humanas, quando provocadas pelos próprios utilizadores, como mecânicas, quando produzidas por equipamentos ou mecanismos que se localizam no exterior ou no interior dos edifícios.

A problemática das vibrações apesar de não ser nova, tem vindo a aumentar, por um lado devido ao aumento das fontes de vibrações, por outro devido à esbelteza das estruturas e também devido à coexistência de diferentes usos no mesmo edifício (ex.: habitação, comércio, etc.).

Muitas vezes a real utilização que é dada aos espaços não foi contemplada na fase de projeto. Nas situações em que a atividade a instalar pode ser geradora de vibrações pode tornar-se necessário fazer adaptações ou reabilitações no espaço em questão. Um exemplo recorrente é a instalação de zonas destinadas a áreas desportivas, mais especificamente ginásios, em edifícios de utilização mista (habitação e comércio). Nos ginásios existem inúmeras fontes que induzem vibrações, desde o simples ato de saltar até à queda de pesos, que são transmitidas à estrutura do edifício e a outros elementos construtivos.

Estas vibrações podem tornar-se um fator de incómodo para os utilizadores/habitantes do edifício, não só devido aos deslocamentos induzidos, mas também ao ruído radiado. Para minimizar os potenciais incómodos é necessário, com frequência, aplicar soluções adicionais

no pavimento, para o adaptar ao novo uso, com o intuito de atenuar a transmissão de vibrações. Em edifícios com estrutura em betão armado, a solução adicional é colocada sobre a laje estrutural. Na presente dissertação, fez-se o estudo de soluções construtivas desenvolvidas para atenuar a transmissão de vibrações em pavimentos de ginásio quando existe uma solução base de laje em betão.

As soluções estudadas baseiam-se na colocação de apoios resilientes discretos sobre os quais é aplicada uma solução de piso flutuante. Estudaram-se dois tipos de piso flutuante: uma solução leve multicamada à base de painéis derivados de madeira e uma solução pesada constituída por uma lajeta flutuante em betão armado. Nas soluções leves foram também introduzidas mantas resilientes com o objetivo de contribuir para a atenuação das vibrações.

1.2 Objetivos

Como referido anteriormente, esta dissertação tem como finalidade o estudo experimental de soluções de requalificação de pavimentos para os adaptar ao funcionamento de ginásios.

As soluções estudadas baseiam-se na colocação de apoios resilientes discretos sobre os quais é aplicada uma solução de piso flutuante leve multicamada à base de painéis derivados de madeira e uma solução de piso flutuante pesada constituída por uma lajeta de betão armado.

O objetivo geral da dissertação é a caracterização da atenuação de vibrações conferida pelas diferentes soluções ensaiadas. No entanto, as soluções foram definidas em função de vários parâmetros que se pretendiam estudar. Com os ensaios realizados foi possível avaliar a influência de cada um desses parâmetros na transmissão/atenuação das vibrações. Os objetivos específicos da dissertação consistem, então, em avaliar a influência que vão ter na atenuação de vibrações: o tipo de apoios resilientes discretos; a espessura da caixa-de-ar; a presença ou não de lã de rocha na caixa-de-ar; o número de camadas de painéis de derivados de madeira e mantas resilientes.

As vibrações são induzidas, em cada sistema, pela queda de uma esfera. Como atualmente quase todas as instalações desportivas se encontram divididas em sectores, cujos pavimentos são sujeitos a solicitações diferentes, serão usadas duas massas. A mais leve, de 10kg, com o intuito de procurar simular o comportamento nos sectores menos solicitados das instalações desportivas e a mais pesada, de 30 kg, para simular o comportamento dos sectores mais solicitados. As vibrações são registadas com recurso a acelerómetros.

1.3 Organização do documento

A dissertação é composta por 5 capítulos que se encontram organizados em secções e subsecções. A descrição de cada um deles é apresentada, de seguida, de forma muito resumida.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento geral do tema da dissertação, apresentam-se os objetivos da mesma, e, por fim, procede-se à descrição da estrutura do documento.

No Capítulo 2 descrevem-se alguns conceitos relacionados com a vibração em pavimentos. Abordam-se aspetos relacionados com as fontes de vibração, a perceção das vibrações pelo ser humano, critérios de projeto e propagação da vibração, nomeadamente o tipo de ondas envolvidas.

No Capítulo 3 começa-se por apresentar as soluções ensaiadas e os materiais que as constituem, e de seguida são descritos os procedimentos de ensaios realizados, equipamentos necessários à realização dos mesmos e os processos de tratamento dos dados para posterior análise.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos para as soluções ensaiadas, realizando-se uma análise breve dos mesmos, o que permite comparar o desempenho das várias soluções.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões que se retiram do trabalho realizado.

Para terminar, indicam-se as referências bibliográficas às quais se recorreu como suporte para a realização deste trabalho.

2 VIBRAÇÕES EM PAVIMENTOS

2.1 Introdução

As vibrações não são mais do que movimentos oscilatórios, isto é, fenómenos mecânicos nos quais ocorrem oscilações alternadas em relação a uma posição de referência. Estas, da mesma maneira que os sons aéreos, tanto podem ser agradáveis como desagradáveis. Assim, quando perceptíveis pelo homem, as vibrações podem afetar de variadas formas a qualidade de vida de um indivíduo. As soluções construtivas leves e flexíveis, mais sensíveis aos efeitos vibratórios, implicam que se dê uma maior importância à temática das vibrações devido a requisitos de conforto de utilização e a requisitos de serviço estruturais.

Devido à maior leveza das estruturas, como referido no primeiro capítulo, a atenção atribuída ao comportamento dinâmico das estruturas tem aumentado. A maior flexibilidade das estruturas e a menor capacidade de amortecimento estrutural obrigam à análise da origem e modo de propagação das vibrações nos edifícios e dos efeitos que podem ter nos ocupantes (Mohamed Fahmy, Y. G., & Sidky, A. N. M., 2012)

2.2 Perceção das vibrações pelo ser humano / limites de conforto

As vibrações que ocorrem em estruturas e que sejam perceptíveis pelos seus utilizadores podem ser danosas, física e psicologicamente e, podem de certa forma afetá-los, reduzindo o conforto, qualidade de vida ou até mesmo a sua eficiência no trabalho.

Os movimentos vibratórios, provenientes de variadíssimas fontes, podem, ainda, afetar os edifícios provocando danos, tanto a nível estrutural resultantes da geração de tensões elevadas nos vários elementos construtivos. Para mitigar alguns destes fenómenos é frequente impor limites máximos de vibração em edifícios, permitindo salvaguardar o seu bom funcionamento estrutural e garantir um adequado nível de conforto humano (Falati, S., 1999).

O efeito da vibração, nos ocupantes dos edifícios, tanto pode ser agradável como desagradável, o que torna a estabilização da noção de desconforto humano face a vibrações uma tarefa bastante difícil. A noção de desconforto é bastante subjetiva visto o desconforto depender de inúmeras variáveis. A atividade a ser desenvolvida no momento, os fatores

ambientais e até mesmo a disposição psicológica do indivíduo em causa, na altura, influenciam a noção de desconforto.

Surge, então, a necessidade de definir níveis de vibração a partir dos quais se pode afirmar que se está perante níveis de vibração desconfortáveis e incómodos, permitindo garantir boas condições de utilização dos edifícios (Silva, T., 2013).

Ohlsson (1992) classifica as vibrações em diferentes níveis de perceptibilidade e incomodidade, relativamente a frequências e amplitudes (ver Figura 2.1) para oscilações contínuas e uniformes. Estes limites são uma mera aproximação empírica visto que não são considerados fatores tais como a posição do indivíduo e a frequência de vibração. Assim, os valores apresentados na Figura 2.1 devem ser tomados como valores de referência e não valores absolutos, devido à subjetividade de cada indivíduo em causa e das variadas condições que podem afetar a perceção das próprias vibrações.

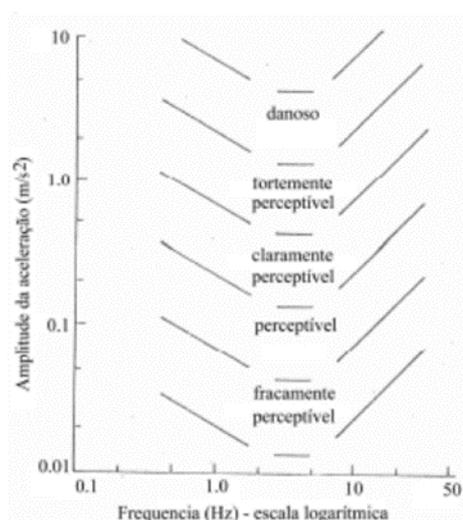


Figura 2.1 - Graus de incomodidade das vibrações sobre as pessoas (Silva, T., 2013)

A resposta humana à vibração é muito complexa. A norma ISO 2631-2, relativa à avaliação da exposição do corpo humano a vibrações, em edifícios, na sua versão anterior apresentava orientações sobre os critérios de aceitação de vibrações. No entanto, na atual versão já não são dadas orientações sobre as amplitudes aceitáveis, referindo que será necessário preceder á recolha de dados, através de medições, que tenham em conta os vários parâmetros (relacionados com a vibração) que afetam os seres humanos nos edifícios e dão origem a queixas.

Refira-se, também, que o ser humano é mais sensível às vibrações consoante a posição em que se encontra (ver Figura 2.2). Pode afirmar-se que quanto maior for a superfície de contacto do corpo com a superfície em que se propaga o fenómeno vibratório, maior será a sensibilidade do indivíduo a estas mesmas vibrações.

Para além da posição do corpo humano na presença das vibrações, a sensibilidade dos indivíduos às vibrações varia com as características da fonte de excitação como a amplitude, o conteúdo em frequência e a duração da excitação e ainda as características do sistema de pavimento, como a frequência própria, que dependem da rigidez e da massa, e do amortecimento. O tempo de exposição é também um fator a ter em conta, pois a tolerância humana à vibração diminui com o aumento da exposição. Outro parâmetro a considerar é a disposição psicológica com que se enfrentam as vibrações. Quanto mais esperada e conhecida for a vibração, menos incómoda se tornará, reduzindo a ansiedade e o desconforto do ser humano (Griffin, M. J, 1990).

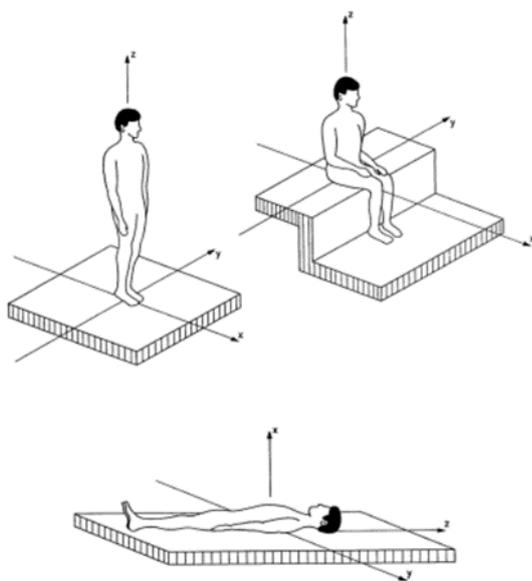


Figura 2.2 – Sistema de coordenadas para avaliação das vibrações em seres humanos nos edifícios (BS6472, 1992)

2.3 Critérios de Projeto

A tendência da construção atual consiste na construção de pavimentos esbeltos, formados por grandes vãos e muito leves que, como consequência dessa tendência, se tornam suscetíveis a vibrações em condições de serviço, provocados por cargas dinâmicas.

O projeto de pavimentos é realizado com base nos estados limites últimos e estados limites de utilização. Estes últimos relacionam-se com as vibrações, e são condicionadas pelas propriedades da estrutura, tais como a massa, amortecimento e também pelos mecanismos de excitação. Assim, para estruturas leves e esbeltas são os critérios de conforto definidos pelos estados limites de utilização que condicionam o seu dimensionamento.

A flecha máxima e a amplitude das vibrações constituem os dois parâmetros que mais condicionam o conforto humano. Contudo, nem todas as normas impõem limites para estes dois parâmetros.

Neste contexto, pode dizer-se que não é fácil criar um modelo numérico/analítico para cálculo de um pavimento dado que não são conhecidas com rigor as suas características dinâmicas, tais como a sua rigidez, massa e amortecimento. Existem, ainda, incertezas associadas às características da excitação introduzida no sistema, pois em fase de projeto não é conhecida, por vezes, a sua utilização futura (Hivoss, 2007).

Com o objetivo de auxiliar o projeto existem algumas normas de carácter geral de dimensionamento, embora limitadas relativamente ao isolamento das fontes de vibração, como por exemplo as normas AS3600, BS5950 e o Eurocódigo EN1992, que fornecem valores máximos das ações e limites para flechas dos elementos estruturais. Existem, ainda, normas diretamente relacionadas com as vibrações. Por exemplo, a norma australiana AS2670-2, relativa a vibrações contínuas e às provocadas por choques, apresenta curvas de acelerações limite. Existem outras normas que definem critérios para a avaliação de vibrações, como por exemplo a norma BS6472-1 que avalia a exposição humana às vibrações presentes em edifícios, apresentando valores de referência relativos a acelerações, métodos de medição e indicações para a previsão de vibrações. À semelhança da norma BS6472-1, a norma AS2670-2 apresenta curvas de referência que dizem respeito aos níveis de aceleração presentes em pavimentos. Existe, ainda, a norma ISO 10137 que também inclui valores de acelerações limite e sugere guias práticos e modelações numéricas para a determinação de acelerações em estruturas.

Existem, ainda, outros guias práticos tais como o American Institute of Steel Construction Design Guide 11 e o National Building Code of Canada que limitam as acelerações com base em valores de pico de aceleração (Thambiratnam, David P. et al, 2012).

2.4 Fontes de Vibração

As estruturas estão sujeitas a vibrações ao longo do seu tempo de vida útil devido a carregamentos dinâmicos quer exteriores ou interiores à edificação. Como casos de

carregamentos dinâmicos exteriores, ou fontes de vibração exteriores, temos o exemplo das vibrações que migram pelo solo até à estrutura. As fontes de vibração podem estar relacionadas com o tráfego rodoviário, a presença de caminhos-de-ferro ou de linhas de metro, a presença de obras de construção nas imediações da edificação, ou até mesmo com a existência de explosões resultantes de explorações de minas ou pedreiras. O vento também pode induzir vibrações de elevada amplitude nas estruturas, no caso de edifícios altos e esbeltos.

Em relação às fontes de vibrações interiores temos como exemplos as atividades humanas, que podem ter origem tanto no simples ato de caminhar como em atividades que introduzem maiores quantidades de energia de excitação, como é o caso de práticas desportivas realizadas em ginásios. No entanto, as fontes de vibração no interior dos edifícios não se devem unicamente a fatores humanos. Os equipamentos presentes nos edifícios também são fontes de vibração que, em períodos de funcionamento, devido ao contacto com o pavimento e/ou paredes transmitem as vibrações que migram pela estrutura (Gutierrez, F., 2008).

As vibrações resultantes de carregamentos dinâmicos podem ser classificadas como movimentos determinísticos ou aleatórios. Os primeiros são as ações cujas características são conhecidas, que se subdividem em movimentos periódicos ou não periódicos. Quando são movimentos repetitivos e conhecidos como o harmónico simples são designados como carregamentos periódicos. Por outro lado, os movimentos que não possam ser caracterizados como periódicos consideram-se como movimentos não-periódicos, podendo estes ser de curta duração ou impulsivos (ver Figura 2.3).



Figura 2.3 – Tipos de Vibração (adaptado de: Griffin, M. J, 1990)

Alguns laboratórios investigaram a reação humana a vibrações puramente sinusoidais. No entanto, na vida real as fontes de vibração geram vibrações com conteúdos em frequência alargados (Griffin, M. J, 1990).

2.4.1 Vibração do Solo

A propagação de vibrações no solo, independentemente da fonte de excitação, depende de vários fatores como o tipo ou tipos de solo presentes no local, a presença de água, entre outros. Como se pode observar pela Figura 2.4, a propagação das vibrações ocorre de maneira diferente consoante o tipo de solo que as ondas de vibração têm de atravessar desde a fonte até ao destino (Gutierrez, F., 2008).

Um exemplo problemático de vibrações que se transmitem pelo solo resulta da presença de caminhos-de-ferro situados em zonas urbanas e na proximidade de edifícios. Em zonas urbanas, a passagem de comboios subterrâneos provoca vibrações, que se propagam pelas paredes do túnel e solos circundantes até atingir os edifícios na vizinhança, podendo gerar incomodidade, podendo também afetar a operacionalidade de equipamentos sensíveis como os que são usados em laboratórios e indústrias (Nelson, J. T., 1996).

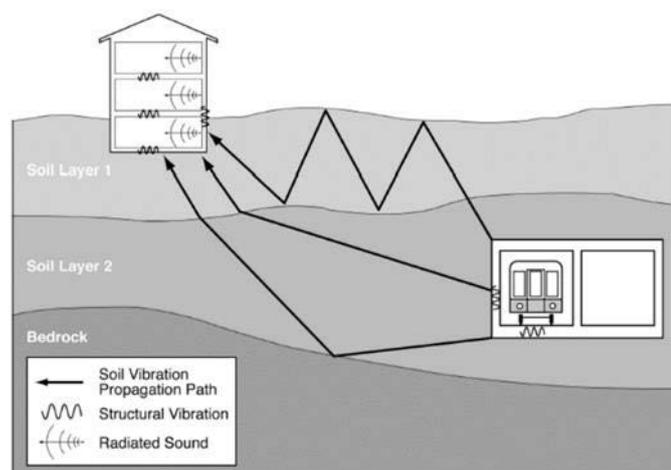


Figura 2.4 – Propagação das vibrações no solo para os edifícios (Hanson, Carl E et al, 2006)

Em 2007, S. Gupta et al., estudaram os problemas que a criação de uma nova linha de metro em Pequim iria provocar no Laboratório de Física da Universidade de Pequim, que se localizava nas imediações da nova linha, pois poderia afetar equipamentos sensíveis a vibrações, nomeadamente um microscópio bastante sensível. Foram, então, determinadas as

vibrações existentes dentro e fora do laboratório, quer provocadas por tráfego rodoviário existente nas proximidades quer pela movimentação de pessoas no edifício.

Foram também realizadas modelações numéricas com o objetivo de simular as vibrações que seriam introduzidas pela nova linha de metro. Para se conseguir validar os resultados obtidos através da modelação numérica foram feitas medições *in situ* num local semelhante onde já existia uma linha de metro. Concluíram que os resultados obtidos eram relativamente próximos e que as vibrações que a nova linha de metro iria introduzir implicariam a aplicação de medidas para mitigar essas vibrações.

Com o objetivo de minimizar as vibrações provocadas pelo metro consideraram a utilização de uma laje flutuante sob a linha de metro, que se encontrava assente em apoios de borracha ou molas metálicas. Através de análises feitas a uma laje flutuante semelhante, já aplicada noutro túnel da rede de metro, concluiu-se que, para o caso em questão, a laje iria ser eficaz para frequências acima da sua frequência própria. No entanto, para frequências que se situassem abaixo e na vizinhança da sua frequência própria, a colocação da laje provocaria um aumento de vibrações.

2.4.2 Efeito do Vento

O vento é, também, um dos fatores produtores de vibrações nas estruturas, pelo que afeta principalmente estruturas mais esbeltas e com menos massa, como algumas estruturas mais atuais, isto é, estruturas compostas por materiais mais leves e altas.

Essas estruturas, cada vez mais sensíveis ao efeito do vento, possuem frequências próprias de vibração baixas, classificando as estruturas como suscetíveis a excitações e turbulências, especialmente em edifícios localizados em regiões com velocidades altas de vento. A junção de excitações estruturais provocadas pelo vento com valores de amortecimento relativamente baixos faz com que, nestes edifícios, a sensibilidade e perceção da vibração pelos ocupantes possam aumentar, o que pode ser alarmante. Ao prolongar a exposição a estas vibrações os ocupantes podem sentir muito desconforto, afetando as suas tarefas do quotidiano.

Então, na fase de conceção e dimensionamento de edifícios altos, tornou-se como rotineiro a realização de testes em túneis de vento, realizados em modelos reduzidos, com o objetivo de se determinarem as cargas introduzidas pelo vento e conseguir responder a essas cargas oferecendo conforto aos ocupantes (Kwok et al, 2009).

Algumas medidas para mitigar as vibrações em edifícios muito altos é a colocação de amortecedores viscoelásticos ao nível dos pisos, amortecedores de massa sintonizados, amortecedores de líquidos sintetizadores, etc. Por exemplo, o edifício Taipei 101, em Taiwan,

com 508 m de altura tem um amortecedor de massa sintonizada do tipo pêndulo que, alegadamente, reduz a aceleração no topo do edifício em 30 a 40% (Chung, L. et al, 2013).

2.4.3 Equipamentos nos Edifícios

O principal objetivo ao introduzir serviços e equipamentos inovadores nos edifícios é o de proporcionar um aumento da qualidade de vida aos seus ocupantes. No entanto, alguns desses equipamentos podem transmitir vibrações na estrutura através da superfície com a qual mantêm contacto, quer seja o pavimento ou parede, provocando problemas de conforto. Mesmo em situações nas quais os aparelhos produtores de vibrações se encontrem isolados do seu suporte, quer por mantas resilientes quer por outros materiais que tenham o mesmo propósito, as variações da pressão do ar provocadas pelo funcionamento dos equipamentos podem ser suficientes para produzir vibrações nas suas proximidades (ver Figura 2.5). Os equipamentos industriais têm maior capacidade de produzir vibrações quando comparados com equipamentos domésticos. Como exemplo de equipamentos capazes de gerar vibrações significativas temos as máquinas centrifugadoras e equipamentos presentes em oficinas

No entanto, na generalidade dos casos, as vibrações provocadas por equipamentos não provocam problemas relacionados com a segurança estrutural dos edifícios (Silva, T., 2013).

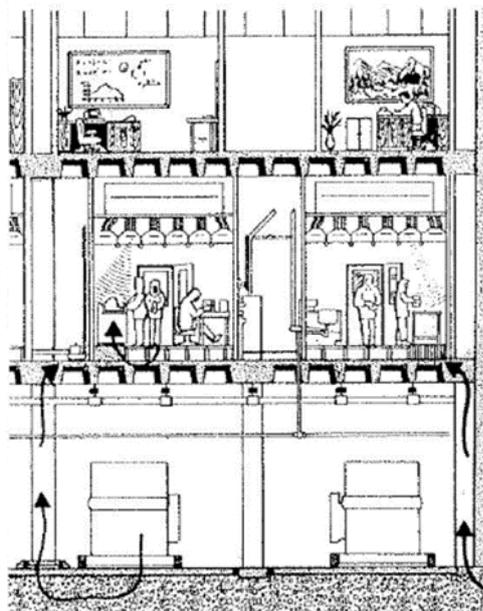


Figura 2.5 – Propagação de vibrações devido a equipamentos. (Gutierrez, F., 2008).

2.4.4 Atividades Humanas

Cada vez mais as vibrações induzidas por atividades humanas são uma questão de serviço e segurança nas estruturas modernas. As cargas dinâmicas são transmitidas às estruturas através do seu uso e ocupação mas, na maioria dos casos, as vibrações provocadas por ocupações variáveis no tempo não são consideradas em qualquer fase de projeto.

As atividades diárias dos ocupantes dos edifícios, como andar, saltar e correr, a prática de atividades desportivas ou até um simples arrastar de uma cadeira geram vibrações. Essas vibrações humano-induzidas são bastante comuns em edifícios como ginásios, escritórios, hospitais, etc. O simples ato de andar é a forma mais comum de provocar vibrações e varia de indivíduo para indivíduo consoante o físico, a idade, entre outros fatores característicos, visto que o movimento de andar é caracterizado pela frequência do passo, comprimento da passada, a velocidade da pessoa e o tempo de contacto (Racic, V. et al, 2009).

Bard et al (2010) efetuaram uma análise de passadas de diferentes indivíduos de diversas estaturas e idade e verificaram que as vibrações observadas variavam ligeiramente de indivíduo para indivíduo. Da mesma forma, observaram que para bandas de frequências mais elevadas, dentro da gama de interesse, as vibrações observadas eram independentes do indivíduo de teste.

Para além do ato de andar, que é a forma mais comum de provocar vibrações em pavimentos e também o mais estudado, existem outros tipos de movimento diretamente ligados a atividades desportivas, como dançar, aeróbica, quedas de massas nos pavimentos, etc..

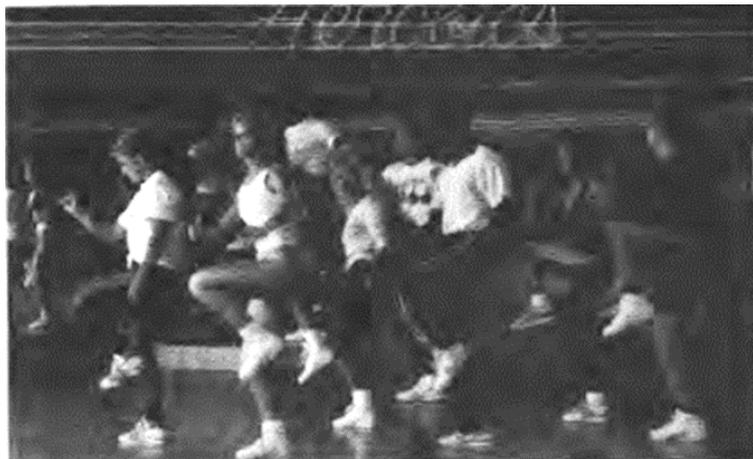


Figura 2.6 – Movimentos aeróbicos executados para excitar o pavimento. (Allen, 1990)

Refira-se que já foram executados vários trabalhos sobre vibrações provocadas por atividades desportivas. Ellis, B. R. e Ji, T. (1994) realizaram testes experimentais e numéricos com o objetivo de verificar a viabilidade de um modelo analítico usado para calcular vibrações produzidas pelo ato de dançar. Os testes foram realizados numa viga simplesmente apoiada.

Por sua vez, Gartenburg (2014) fez um estudo relativo à queda de uma massa em revestimentos de pisos destinados a fitness. Gartenburg implementou dois procedimentos com o objetivo de aferir a atenuação provocada pelos revestimentos. Primeiro colocou uma máquina de percussão sobre a laje e os revestimentos, bem como um microfone, numa câmara recetora, sob a laje, com o objetivo de medir os níveis de pressão sonora. De seguida instalou cinco acelerómetros sob a laje de betão armado, onde colocou os revestimentos a analisar e deixou cair uma esfera, com uma massa total de 7kg, da altura de 1,0m. Com base nos resultados obtidos concluiu que a queda da esfera era um método mais eficiente de calcular a atenuação provocada pelos revestimentos, pois a queda da esfera garantia a consistência e repetibilidade que a queda de halteres não permitia.

2.5 Vibração gerada por cargas de impacto

Pode definir-se a vibração consoante o seu comportamento ao longo do tempo, definindo-a como transitória (impulsiva), intermitente ou contínua. As vibrações transitórias ou impulsivas são vibrações provocadas por choques ou cargas de impacto. As vibrações transitórias ou impulsivas caracterizam-se pela rápida formação de um pico de amplitude seguida de um decréscimo, com a possibilidade de aparecimento de vários ciclos de vibração, consoante o amortecimento e a sua frequência (Griffin, M. J, 1990).

Vários têm sido os estudos realizados quanto ao isolamento sonoro dos pavimentos ao impacto e às fontes de impacto. Shi et al, 1995, compararam o impacto de uma bola de areia com o impacto provocado por uma máquina de percussão normalizada, chegando à conclusão que a máquina de percussão não representava o impacto provocada pela passada humana nas bandas de baixa frequência. Para cada fonte de impacto obtiveram um espectro de resposta diferente.

Os materiais de que são compostos os componentes que entram em choque, influenciam as características do impacto e conseqüentemente a resposta do sistema. Considere-se, por exemplo um martelo de impacto em que é possível alterar a sua ponta introduzindo diferentes materiais. Uma ponta mais rígida, de alumínio, por exemplo, gera uma força de curta duração e grande amplitude e um impulso mais instantâneo, quando comparada com uma ponta mais mole de borracha, por exemplo (ver Figura 2.7)

Aplicando a transformada de Fourier a cada um dos impulsos obtêm-se a resposta no domínio da frequência (ver Figura 2.8). Verifica-se que quanto maior for o tempo de contacto da fonte de impacto com a superfície mais estreito será o espectro de frequência da força introduzida.

Ao colocar revestimentos resilientes num pavimento, quando há um impacto provocado por algo rígido provoca-se um efeito semelhante ao descrito anteriormente. Ao aumentar o tempo de contacto entre o pavimento e a fonte impulsiva está-se a diminuir a amplitude da força introduzida e o conteúdo em frequência.

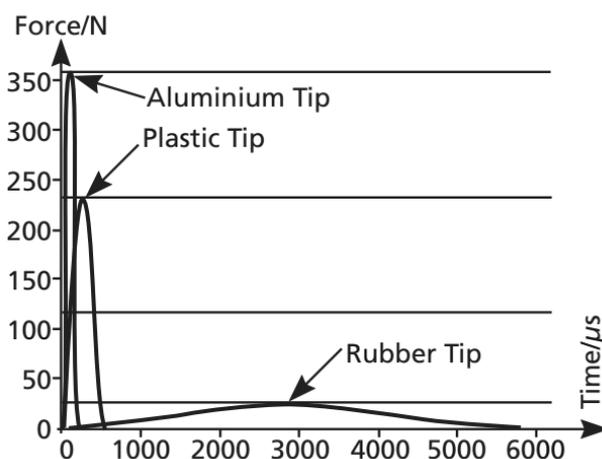


Figura 2.7 – Impulsos para as diferentes pontas do martelo em função do tempo (Brüel & Kjær Product Data Sheet – impact hammervtype 8206)

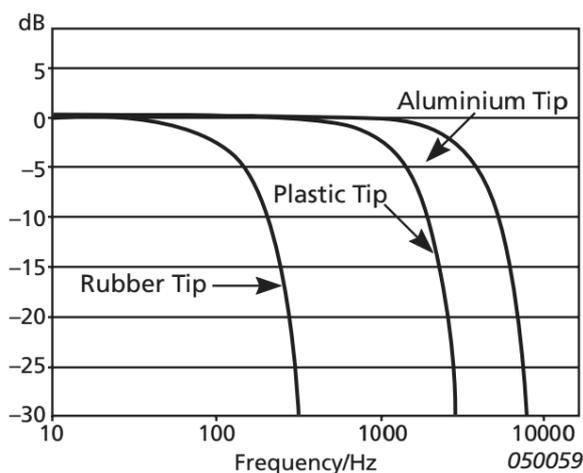


Figura 2.8 – Espectro de resposta dos impulsos ilustrados anteriormente (Brüel & Kjær Product Data Sheet – impact hammervtype 8206)

2.6 Vibração de Placas

2.6.1 Introdução

Os edifícios são essencialmente constituídos por vigas, colunas e placas. A vibração transmitida aos edifícios propaga-se através destes elementos. Um dos componentes principais a considerar para descrever os campos de vibrações são as placas. As divisórias dos compartimentos são placas na forma de paredes e pavimentos. As placas têm por isso um papel importante na radiação sonora e na transmissão de ruído estrutural. Sendo o objeto da presente dissertação o estudo de pavimentos pretendeu-se dar algum destaque à vibração de placas.

A maioria das paredes e pavimentos podem ser analisados como placas maciças mas na realidade existem outros tipos de placas a serem considerados, como as paredes executadas em alvenaria de tijolo com furação, lajes perfiladas com vazios. No entanto, considerando as placas como maciças podem obter-se valores de referência para os restantes tipos de placas (Hopkins, C., 2007).

2.6.2 Tipos de Ondas

Existem três tipos de ondas a serem considerados na vibração das placas, as ondas quase longitudinais, as ondas transversais e as ondas de flexão. Tanto as ondas quase longitudinais como as ondas transversais são consideradas como ondas que se propagam no plano da placa e têm então um papel mais importante na transmissão de vibrações do que na radiação de som.

Para as ondas quase longitudinais a propagação ocorre na mesma direção que o movimento de partículas. São chamadas de ondas quase longitudinais devido ao seu comprimento de onda ser consideravelmente superior à espessura das placas em análise. As ondas longitudinais (puras) apenas ocorrem em sólidos cujas dimensões em todas as direções são largamente superiores ao comprimento de onda. As ondas quase longitudinais provocam, principalmente deslocamento de material no eixo axial das placas e apesar de provocar deslocamento de partículas nos outros eixos, quando comparado com o provocado pelas ondas de flexão, é quase desprezável, e muitas vezes o som radiado por este tipo de ondas é ignorado, especialmente se o meio que envolve a placa é o ar. No entanto, este tipo de ondas tem um papel importante na transmissão de vibrações entre placas ligadas entre si.

Nas ondas transversais a direção da propagação é segundo o plano da placa e o deslocamento de partículas ocorre perpendicularmente ao eixo axial. Como o movimento da superfície da placa é tangencial ao ar adjacente, de maneira semelhante às ondas quase longitudinais, têm um papel preponderante na transmissão de ruído estrutural e vibrações para outros elementos

a que estão ligadas, e têm uma menor contribuição para a radiação de som através da placa (perpendicularmente).

As ondas de flexão pura ocorrem quando o comprimento de onda é grande, comparativamente com a espessura da placa. As ondas de flexão apresentam deslocamentos laterais superiores aos provocados pelas outras ondas e por isso possuem um papel mais importante na radiação de ruído (Hopkins, C., 2007).

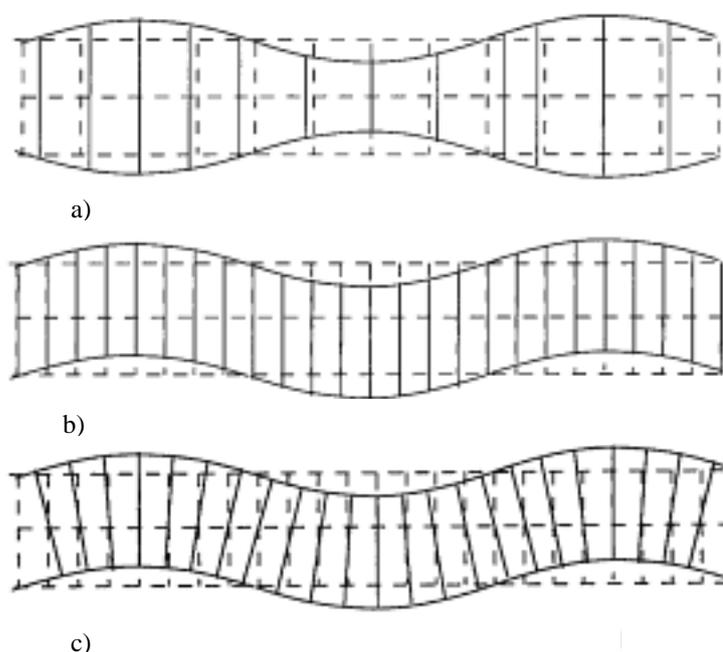


Figura 2.9 – Padrões de deformação gerados por vários tipos de ondas presentes em placas: a) ondas quase longitudinais; b) ondas transversais; c) ondas de flexão (Fahy, F. & Gardonio, P., 2007)

2.6.3 Modos locais

A descrição matemática do comportamento e das características dinâmicas de uma estrutura, segundo Ewins (1984) define-se como análise modal. Uma placa tem um número infinito de modos de vibração, tendo assim um número infinito de graus de liberdade. Assim, o comportamento dinâmico de um sistema pode resultar da convicção dos vários modos de vibração. Assumindo linearidade, a resposta de uma placa desacoplada pode ser obtida sobrepondo a resposta de todos os modos locais. A análise modal caracteriza os modos locais

de vibrações como um conjunto de movimentos independentes entre si que, por sua vez, definem o comportamento geral de um sistema linear.

Através da análise modal determinam-se as frequências próprias de uma estrutura. Essas frequências próprias correspondem a cada modo de vibração e, quando as estruturas são excitadas por qualquer fonte de vibração, tendem a vibrar nessas frequências, mesmo na ausência de carregamento.

Cada modo de vibração está associado a uma variação espacial de deslocamentos na placa. Para placas retangulares com os bordos simplesmente apoiados, a deformada do modo, ψ_{pq} , descreve os deslocamentos para o modo de flexão $f_{pq(B)}$. A satisfação das condições fronteira e da equação das ondas de flexão para uma placa homogênea, permite obter:

$$\psi_{pq} = \sin\left(\frac{p\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{q\pi y}{L_y}\right) \quad (1.1)$$

Com:

- $p = 1, 2, \dots$
- $q = 1, 2, \dots$
- x, y – coordenadas da placa
- L_x, L_y – dimensões da placa (em planta)

No cálculo de modos de vibrações, para ondas sonoras, em compartimentos ou cavidades, normalmente é suficiente considerar uma condição fronteira ideal, normalmente rígida. Para ondas sonoras estruturais existem várias condições de fronteira: livre, simplesmente apoiado e encastrado. As condições de fronteira de uma placa (laje) nos edifícios, são frequentemente desconhecidas o que torna complicada a estimativa rigorosa dos seus modos locais. No entanto, por vezes é suficiente uma estimativa aproximada quando se quer adotar uma abordagem estatística para a previsão da transmissão sonora. Uma solução prática, para placas, em edifícios, é assumir que as fronteiras são simplesmente apoiadas para ondas de flexão e as fronteiras são encastradas para ondas que se propagam no plano da placa. Esta suposição é, normalmente, razoável quando as fronteiras da placa estão rigidamente ligadas a outras placas. Uma placa que forme uma lajeta flutuante é uma exceção e pode assumir-se que as suas fronteiras são livres. Existem algumas fórmulas simplificadas e tabelas para o cálculo de modos de vibração e frequências próprias de placas retangulares.

No entanto, quando se pretendem calcular modos de vibração para placas de forma mais irregular ou com aberturas, por exemplo, é costume usar métodos numéricos como o MEF

(Método dos Elementos Finitos) pois se as características da estrutura são conhecidas, é possível construir o modelo em elementos finitos. A análise dos modos locais é importante na análise do som e da vibração, mas dá-nos uma perspectiva limitada porque ignora a interação com outras partes da estrutura com as quais a placa está acoplada. Assim, um sistema de paredes e pavimentos ligados tem também os seus modos próprios de vibração, os quais podem ser referidos como modos globais (Hopkins, C., 2007).

2.6.4 Amortecimento

O amortecimento, numa estrutura, determina o quão rápido a amplitude das vibrações diminui ou desaparece. Esta propriedade dos materiais e estruturas é muito importante pois a percepção e o conforto humano depende da duração das vibrações. O amortecimento é o mecanismo que transforma a energia da vibração em calor, provocando um decréscimo na resposta do sistema.

Todos os elementos estruturais possuem amortecimento próprio. No entanto, o amortecimento é fortemente dependente de elementos não estruturais presentes na estrutura, como revestimentos de pisos, mobílias, entre outros, e depende do número de elementos, do material do qual são feitos e das suas dimensões. Por vezes é necessário controlar as vibrações presentes nas estruturas e aumentar o amortecimento é a solução mais prática e económica.

Num pavimento o amortecimento total resulta da contribuição do amortecimento conferido pelos vários materiais que o compõem.

A capacidade de amortecimento pode ser determinada por vários métodos. Por exemplo, o método do decremento logarítmico e o método da largura de banda de meia potência.

O método do decremento logarítmico consiste em excitar o material ou estrutura e calcular o amortecimento a partir da atenuação da amplitude da resposta do material ao longo do tempo. Normalmente, a redução da amplitude do movimento segue uma tendência logarítmica (ver Figura 2.10)

O método da largura de banda de meia potência calcula o amortecimento analisando a frequência do sinal originado pela vibração forçada, relacionando a largura de banda correspondente a uma amplitude $1/\sqrt{2}$ da amplitude máxima, em torno da frequência de ressonância e a frequência central de ressonância.

Podemos ainda classificar os sistemas como criticamente amortecidos, super amortecido, sub-amortecido e não amortecido, quanto aos seus fatores de amortecimento, como se ilustra na Figura 2.11 (Cossolino, L. & Pereira, A., 2010).

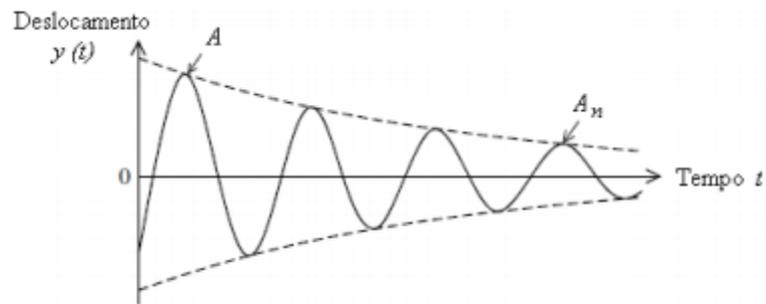


Figura 2.10 – Resposta ao impulso por um oscilador simples (Cossolino, L. & Pereira, A., 2010)

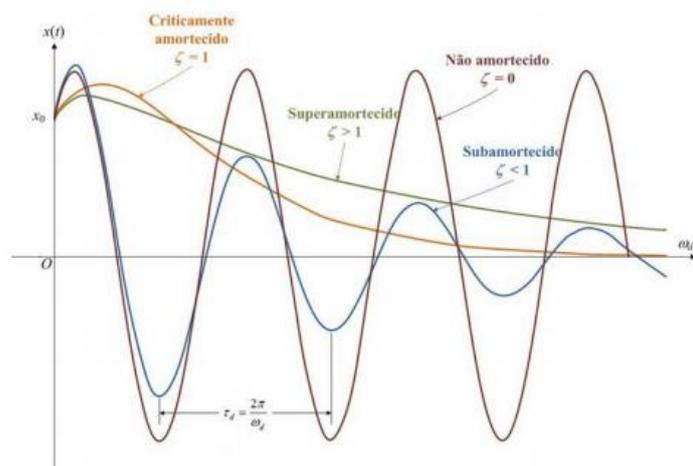


Figura 2.11 – Fatores de amortecimento (Cossolino, L. & Pereira, A., 2010)

2.6.5 Radiação Sonora

As vibrações de uma placa, inserida num fluido, geram diferentes efeitos, que podem ser adversos, nomeadamente o movimento da placa e a radiação de som para a envolvente. A radiação sonora está relacionada com a interação entre as ondas sonoras estruturais e as ondas sonoras no fluido adjacente. O som radiado pode ser diminuído se o amortecimento das placas for aumentado. Como já foi referido, as ondas de flexão são as grandes responsáveis pela radiação do som. Estas ondas são dispersivas e propagam-se com maiores velocidades para frequências mais altas. A frequência em que a velocidade da onda de flexão iguala a velocidade de propagação do som no ar denomina-se frequência crítica. No caso de placas infinitas, para comprimentos de onda da vibração da placa superiores ao comprimento de onda das ondas no meio acústico a eficiência de radiação é superior a 1 e abaixo da frequência

crítica não ocorre radiação. No caso de placas finitas, devido à reflexão das ondas de flexão nas extremidades da placa existe radiação mesmo abaixo da frequência crítica (mesmo sendo pouco eficiente). Abaixo da frequência crítica, a eficiência da radiação gerada por cada modo vai depender muito das condições fronteira do contorno da placa (Hopkins, C., 2007).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a descrição dos ensaios laboratoriais realizados com o intuito de caracterizar soluções de requalificação de pavimentos adaptados a ginásios. Foram construídas e ensaiadas em laboratório, sobre uma laje de betão armado de referência, soluções de piso flutuante leve multicamada à base de painéis de OSB e contraplacado marítimo e soluções de piso flutuante pesado constituído por uma lajeta flutuante em betão armado. Foram ainda introduzidas mantas resilientes nas soluções leves com o objetivo de aumentarem a atenuação das vibrações. Foi também introduzida em uma das soluções pesadas uma manta resiliente, com o intuito de se verificar qual o seu efeito comparando com outras soluções pesadas que não tenham na sua constituição qualquer manta resiliente. Na camada final serão colocados diferentes revestimentos também com o objetivo de se analisar a contribuição de cada um deles para a atenuação de vibrações.

3.2 Descrição das soluções ensaiadas

No âmbito dos trabalhos experimentais desenvolvidos em laboratório, para a caracterização da atenuação de vibrações atribuída por soluções de pavimento, foi avaliado o comportamento de diferentes sistemas construtivos. Consideraram-se soluções construtivas leves (L) e pesadas (H), aplicadas sobre uma laje estrutural de betão armado, laje de referência, apoiada em quatro molas CDM CHR-3,5Hz-18500N, uma mola por canto da laje, representados na Figura 3.1



a)



b)

Figura 3.1 - a) Mola CDM CHR-3,5Hz-18500N; b) Mola por canto da laje

As soluções construtivas são constituídas por apoios resilientes discretos, encaixados em calhas metálicas, barrotes de madeira com 70mm que possuem a função de aumentar a caixa-de-ar das soluções, painéis de contraplacado marítimo e de OSB e ainda mantas resilientes. É, ainda, usada uma lajeta de betão armado para as soluções pesadas.

A escolha das várias soluções a ensaiar teve por base uma série de parâmetros cuja influência na atenuação de vibrações se pretendia avaliar. Esses parâmetros são a existência de lã de rocha na caixa-de-ar, a altura da caixa-de-ar, a influência da rigidez do apoio, o número de camadas do piso e ainda o tipo de manta resiliente. Construíram-se nove soluções leves, numeradas de L1 a L9, de acordo com a seguinte lista.

- L1 – Apoios resilientes com 50mm (CDM79 L50) + Barrote de madeira com 70mm
Caixa-de-ar vazia
Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
- L2 – Apoios resilientes com 50mm (CDM79 L50) + Barrote de madeira com 70mm
Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha
Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
- L3 – Apoios resilientes com 50mm (CDM79 L50) + Barrote de madeira com 70mm
Caixa-de-ar vazia
Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
Reforço com tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
- L4 – Apoios resilientes com 50mm (CDM79 L50) + Barrote de madeira com 70mm
Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha
Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
Reforço com tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
- L5 – Apoios resilientes com 50mm (CDM79 L50)
Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha
Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
- L6 – Apoios resilientes com 50mm (CDM79 L50)
Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha
Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
Reforço com tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
- L7 – Apoios resilientes com 30mm (CDM79 L30)
Caixa-de-ar totalmente preenchida com lã de rocha
Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
- L8 – Apoios resilientes com 30mm (CDM79 L30)
Caixa-de-ar totalmente preenchida com lã de rocha
Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)
Reforço com tela amortecedora (5mm) + OSB (18mm)

L9 – Apoios resilientes com 50mm (CDM79 L50)

Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha

Contraplacado marítimo (19mm) + OSB (18mm) + 2 membranas de CDM-ACUSEAL + OSB (18mm)

Foram, também, construídas seis soluções pesadas, numeradas de H1 a H6, cujos parâmetros a avaliar são a rigidez do apoio, a altura da caixa-de-ar e presença de lã de rocha na mesma, e ainda a influência que uma manta resiliente pode introduzir quando colocada sob a lajeta de betão armado.

H1 – Apoios resilientes com 50mm (CDM80 L50) + Barrote de madeira com 70mm

Caixa-de-ar vazia

OSB (18mm) + Lajeta de betão (70mm)

H2 – Apoios resilientes com 50mm (CDM80 L50) + Barrote de madeira com 70mm

Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha

OSB (18mm) + Lajeta de betão (70mm)

H3 – Apoios resilientes com 50mm (CDM80 L50) + Barrote de madeira com 70mm

Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha

OSB (18mm) + tela amortecedora (5mm) + Lajeta de betão (70mm)

H4 – Apoios resilientes com 50mm (CDM80 L50)

Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha

OSB (18mm) + Lajeta de betão (70mm)

H5 – Apoios resilientes com 30mm (CDM80 L30) + Barrote de madeira com 70mm

Caixa-de-ar parcialmente preenchida com lã de rocha

OSB (18mm) + Lajeta de betão (70mm)

H6 – Apoios resilientes com 30mm (CDM80 L30)

Caixa-de-ar totalmente preenchida com lã de rocha

OSB (18mm) + Lajeta de betão (70mm)

Para as soluções construtivas leves, os materiais utilizados foram os apoios resilientes discretos CDM79-L50 e CDM79-L30 encaixados em calhas metálicas em U. Algumas das soluções possuem ainda, diretamente aparafusados às calhas metálicas, barrotes que atribuem às soluções uma sobre-altura (aumento da caixa de ar), como ilustrado na Figura 3.2.

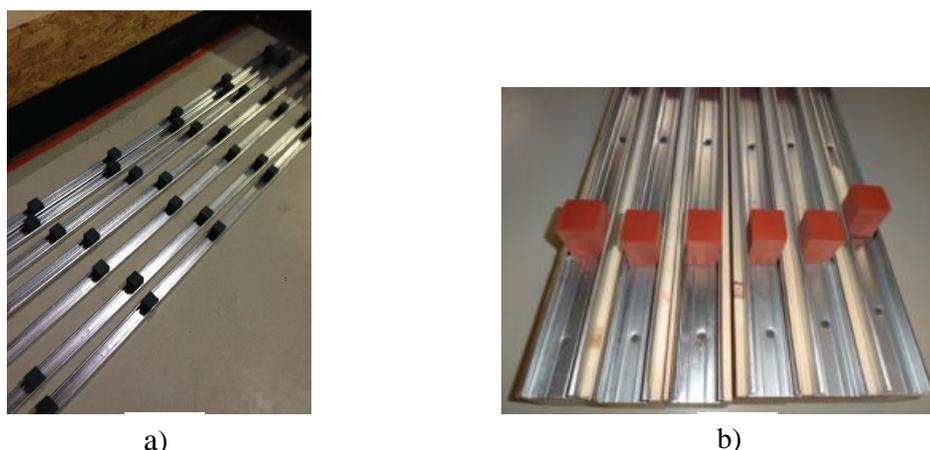


Figura 3.2 – Apoios resilientes discretos: a) apoios CDM80-L50 em calhas metálicas; b) apoios CDM79-L50 em calhas metálicas aparafusadas aos barrotes

Sobre as calhas metálicas ou sobre os barrotes, consoante a solução, colocam-se as camadas de pavimento. Para a construção dos diversos pavimentos serão usados materiais como contraplacado marítimo com 19mm de espessura (Figura 3.3 a)), placas de OSB com 18mm de espessura (Figura 3.3 b)), mantas de material resiliente compostos por aglomerados de cortiça e borracha CDM-DAMP5 (Figura 3.3 c)) e existe ainda uma solução onde a camada de CDM-DAMP5 é substituída por duas camadas de CDM-ACUSEAL (Figura 3.3 d)) que é, também, um material resiliente. Foram colocadas duas camadas de CDM-ACUSEAL ao invés de uma para perfazer a mesma altura que uma camada de CDM-DAMP5.

Para as soluções construtivas pesadas foram usados apoios resilientes discretos CDM80-L50 e CDM80-L503 em calhas metálicas. Novamente, em algumas soluções foram usados barrotes com 70 mm de altura, para atribuir uma sobre-altura. Como constituintes de pavimento usaram-se placas de OSB com 18 mm de espessura e uma lajeta de betão FF70. Foi ainda introduzida, para uma das soluções, uma tela resiliente CDM-DAMP5 entre a camada de OSB e a lajeta de betão.

Por fim, sobre todas as soluções, foram colocados e ensaiados três revestimentos diferentes para a comparação do comportamento das soluções consoante o revestimento considerado. Os revestimentos utilizados foram: Linóleo (3 mm), Gym Floor (10 mm) e CDM-GYM-ELAST-30 (30 mm), os quais se encontram ilustrados na Figura 3.4.

Todas as soluções construtivas caracterizadas foram instaladas sobre uma laje de betão armado com uma espessura nominal de 140mm e dimensões totais de 3.56 x 3.56m. As diferentes camadas são introduzidas pela ordem definida inicialmente, consoante a solução

construtiva em causa, ficando a montagem com uma ordem como a que é apresentada na Figura 3.5. As soluções ficam com o aspeto final apresentado na Figura 3.6

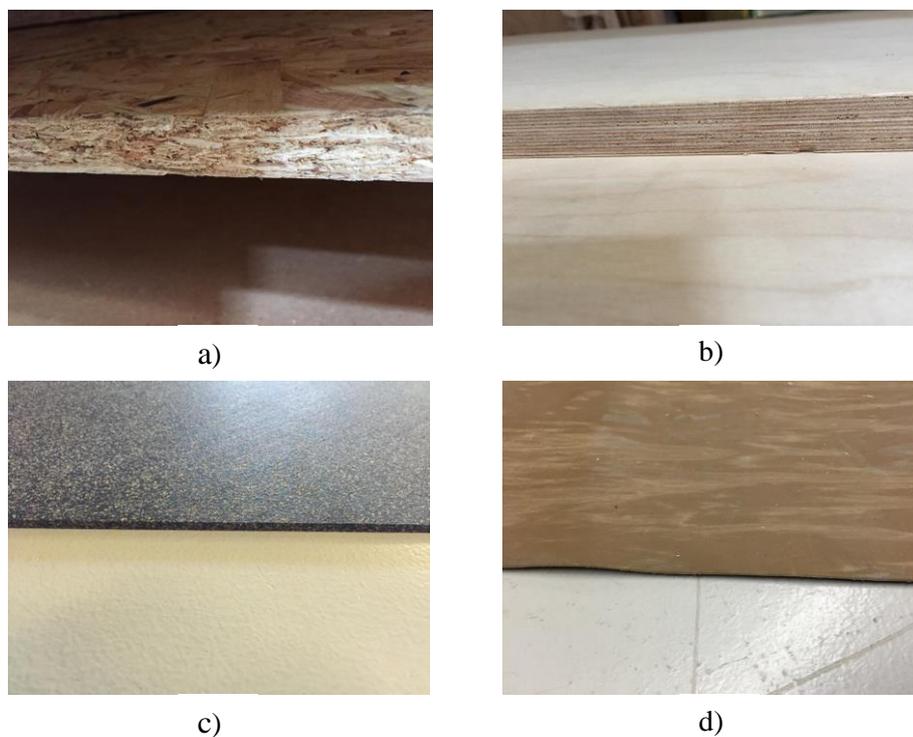


Figura 3.3 – Materiais que constituem as camadas do pavimento das soluções leves: a) OSB; b) Contraplacado Marítimo; c) CDM-DAMP5; d) CDM-ACUSEAL

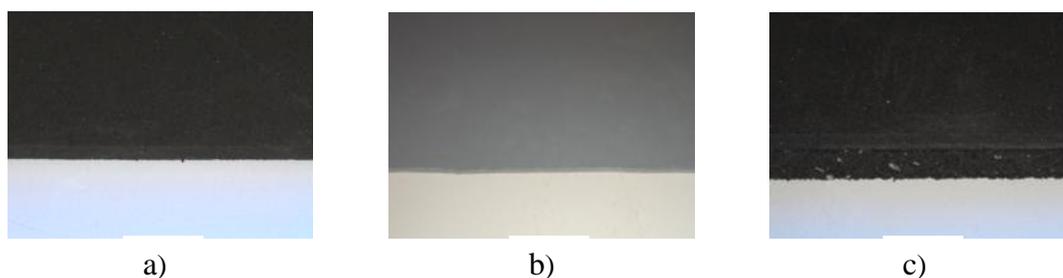


Figura 3.4 – Revestimentos de piso: a) R 2 – revestimento de piso Gym-Floor 10mm; b) R 3 – revestimento de piso com linóleo com 3mm; c) R 4 – revestimento de piso com CDM-GYM-ELAST-30 com 30mm de espessura

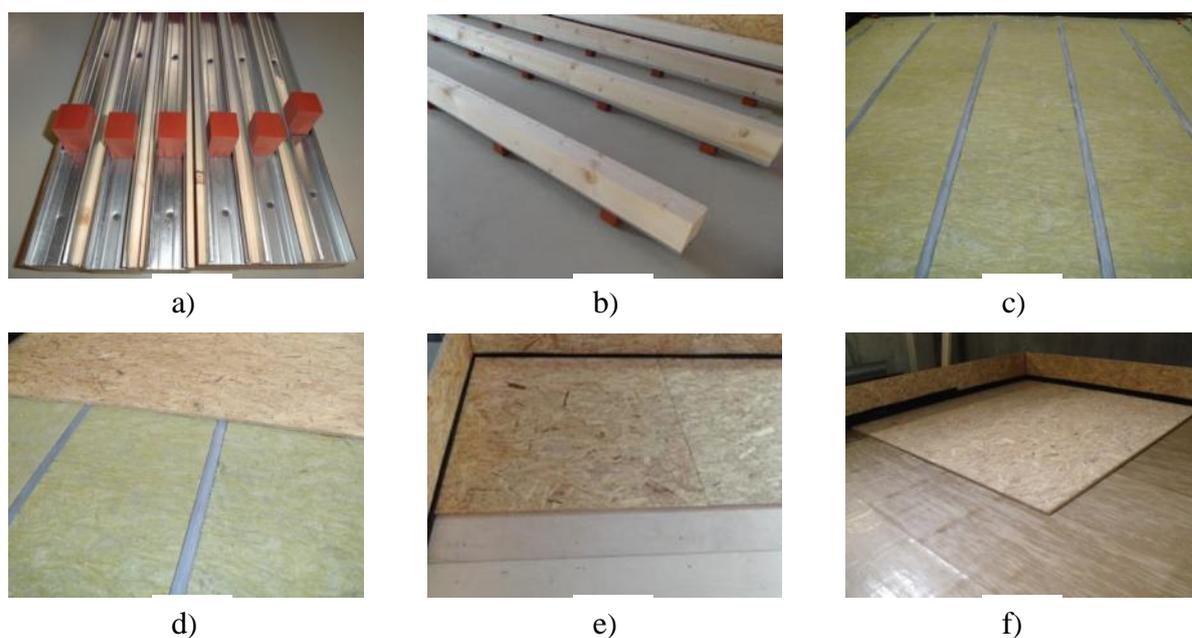


Figura 3.5 – Pormenores de montagem: a) apoios resilientes; b) sistema de apoio com sobre altura; c) caixa-de-ar preenchida com lã mineral; d) colocação de camada de OSB sobre as calhas metálicas do sistema de apoio; e) sobreposição de outras camadas de OSB; f) colocação de camada resiliente entre camadas

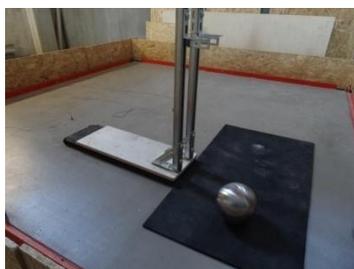


Figura 3.6 – Aspeto final da montagem das soluções construtivas: a) soluções leves; b) soluções pesadas

3.3 Descrição dos ensaios

Com recurso a duas esferas com massas de 10 e 30kg procedeu-se à excitação dos pavimentos construídos em laboratório. Como ilustra a FIGURA 3.1 as esferas são largadas de um suporte de onde partem em queda livre até atingirem o revestimento da solução, excitando assim o

sistema construtivo. As conseqüentes vibrações são então medidas com recurso a acelerómetros colocadas sob a laje de betão de referência e sobre a solução construtiva.



a)



b)

3.7 – Equipamento laboratorial: a) sistema de apoio da esfera; b) esfera de 30kg

Foram colocados três acelerómetros DeltaTron da marca Brüel & Kjær tipo 4526 (Figura 3.8 a)) no topo da solução construtiva e, sob a laje de betão armado também se colocaram três acelerómetros DeltaTron da marca Brüel & Kjær tipo 4526 com maior precisão do que os acelerómetros colocados no topo da solução construtiva. Ambos os pares de acelerómetros foram colocados com a disposição apresentada na Figura 3.9 Os acelerómetros estavam ligados a um sistema de aquisição da HBM, modelo QuantumX MX840A (Figura 3.8 b)), utilizando-se também uma interface operacional de software especializado (HBM-Catman®Easy) que permite acompanhar os registos num computador. O registo das vibrações no domínio do tempo foi efetuado com uma frequência de aquisição de 4800Hz.



a)



b)

Figura 3.8 – Equipamento de medição: a) acelerómetro; b) sistema de aquisição de sinal

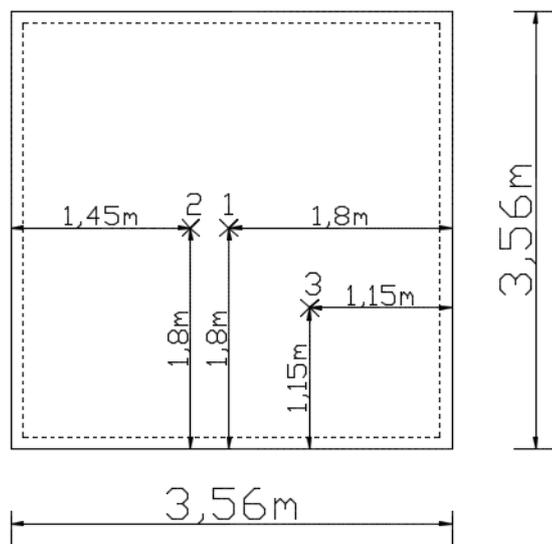


Figura 3.9 – Posição dos acelerómetros sob e sobre a laje

3.4 Tratamento de resultados

As vibrações adquiridas no domínio do tempo permitem obter um sinal como o apresentado na Figura 3.10, registado por um acelerómetro específico.

A aceleração no domínio do tempo é transformada para o domínio da frequência através da aplicação do algoritmo da transformada rápida de Fourier, FFT, (do inglês Fast Fourier Transform).

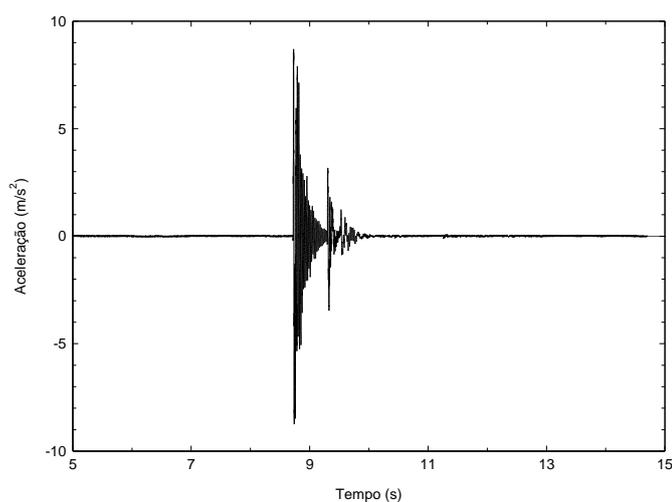


Figura 3.10 – Aceleração no domínio do tempo

Na Figura 3.11 apresenta-se o resultado da transformada de Fourier aplicada à aceleração da Figura 3.10.

A Figura 3.11 apresenta a aceleração com uma discretização em frequência de $\Delta f=0,0732\text{Hz}$. A aceleração (m/s^2) que foi registada, é transformada também em níveis de aceleração (dB). No entanto, este sinal foi integrado no domínio da frequência em bandas de 1/12 de oitava, 1/3 de oitava e oitava. Esta integração teve como objetivo tornar mais perceptíveis as diferenças entre os vários resultados. No próximo capítulo apresentam-se apenas resultados em bandas de 1/3 de oitava.

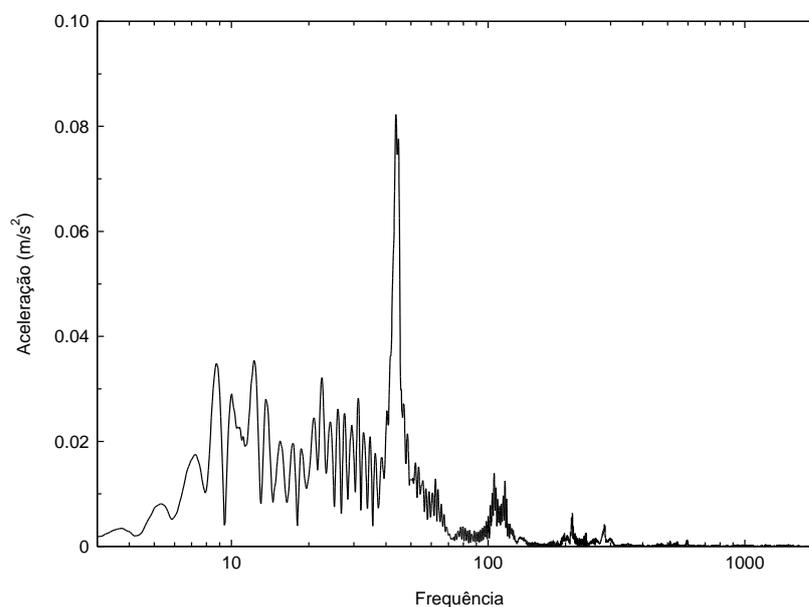


Figura 3.11 – Aceleração no domínio da frequência

Na Figura 3.12 é ilustrado o espectro de acelerações em frequência (Hz) e em níveis de aceleração considerando a integração para os três tipos de bandas referidos acima, para um determinado acelerómetro.

Analisando a Figura 3.12 verifica-se que o filtro de oitava esconde muita informação e portanto não será o filtro utilizado. Comparando então o filtro 1/3 de oitava com o filtro 1/12 de oitava observa-se que o filtro 1/12 de oitava apesar de apresentar a informação de uma forma mais detalhada, devido a “excesso” de informação pode tornar a comparação de resultados mais difícil de analisar. Optou-se então pelo filtro de 1/3 de oitava.

No capítulo seguinte, os resultados serão apresentados como a média das acelerações registadas em cada conjunto de três acelerómetros.

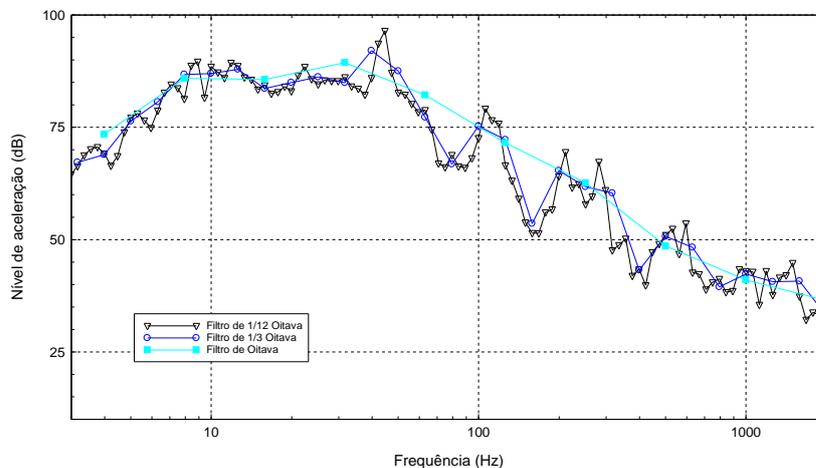


Figura 3.12 – Representação gráfica do nível de aceleração para os três filtros.

A Figura 3.13 mostra um exemplo que apresenta a média dos níveis de aceleração registados nos três acelerómetros em bandas de frequência de 1/3 de oitava.

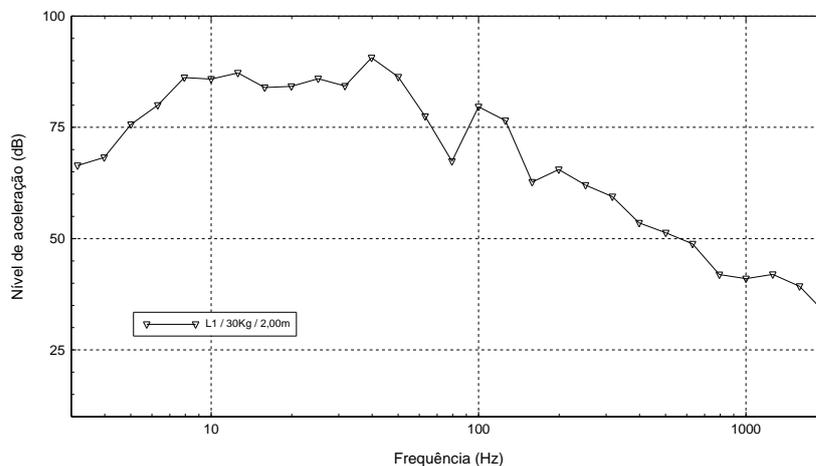


Figura 3.13 – Representação do nível médio da aceleração dos 3 acelerómetros em bandas de 1/3 de oitava-

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos para todas as soluções ensaiadas e faz-se a sua análise. São apresentados os valores médios dos níveis de aceleração (dB ref 10^{-6}m/s^2), em bandas de frequência de um terço de oitava compreendidos entre os 3 e 2000Hz, registados nos três acelerómetros localizados sob a laje de betão armado de referência.

Para algumas soluções específicas são também apresentados os valores médios dos níveis de aceleração registados na superfície superior da solução construtiva.

Apresentam-se comparações entre as diversas soluções de forma a avaliar a influência de cada parâmetro que se faz variar.

Com o objetivo de não tornar o presente documento demasiado longo são inicialmente apresentadas comparações de resultados para um único revestimento, R3. Posteriormente, o efeito do revestimento na vibração é analisado para algumas soluções selecionadas.

4.2 Soluções leves

Para se proceder à comparação do desempenho das soluções construtivas aligeiradas foi usado o revestimento R3 sob o local de queda da esfera. Serão identificados os elementos construtivos que diferenciam as diferentes soluções construtivas e analisada a contribuição de cada um para a atenuação da vibração.

Na Figura 4.1 apresenta-se a comparação dos níveis médios de aceleração das soluções L1 e L2, registados na base da laje. Estas soluções diferem pela presença de lã de rocha no interior da caixa-de-ar. A solução L1 não possui lã de rocha na caixa-de-ar enquanto a solução L2 possui.

Observando a figura verifica-se que a introdução de lã de rocha não provoca variações significativas na atenuação de vibrações exceto em algumas bandas de frequências. Para bandas de frequência mais baixas a solução construtiva L1 apresenta, em geral, maior atenuação de vibrações do que a solução L2. Para bandas de frequência mais altas existe uma maior variação de níveis de aceleração. No entanto, essa tendência não se verifica quando é

introduzida maior quantidade de energia ao sistema. Para a queda da esfera dos 30kg de 2,00m de altura, a solução L1 continua a apresentar melhores resultados, ou seja, níveis de aceleração mais baixos na maior parte das bandas de frequência (Figura 4.1 d). No entanto, para bandas de frequência muito altas verifica-se uma melhoria de comportamento com a solução L2.

Devido à existência de bastantes gráficos e resultados, através de uma análise prévia, tomou-se a decisão de continuar a ilustração dos gráficos/resultados apresentando apenas os correspondentes aos níveis de aceleração registados com a queda da esfera de 10kg de 0,80m de altura e com a esfera de 30kg de 2,00m de altura. Estas situações correspondem ao caso onde se introduz menos energia de excitação no sistema e ao caso onde se introduz mais energia.

As soluções construtivas L3 e L4 distinguem-se, também, pela presença de lã de rocha na sua caixa-de-ar.

Analisando a Figura 4.2, através da comparação dos níveis de aceleração das soluções construtivas L3 e L4, observa-se que quando se introduz pouca energia no sistema (Figura 4.2 a)), a introdução de lã de rocha na solução L4 provoca a atenuação de vibrações em algumas bandas de frequências. No entanto, para bandas de frequências mais baixas, a solução que não possui lã de rocha na sua constituição, solução L3, apresenta, na sua globalidade, menores níveis de vibração. Verifica-se, ainda, que para bandas de frequência mais altas, ambas as soluções construtivas apresentam níveis de aceleração próximos. No entanto, com o aumento da energia introduzida no sistema (Figura 4.2 b)), para bandas de frequência mais altas, a introdução de lã de rocha na caixa-de-ar da solução L4 provoca uma melhoria de comportamento da solução face à solução L3. A introdução de lã de rocha nas soluções construtivas apresenta um efeito positivo, embora ténue, nas bandas de frequência mais altas.

Outro elemento construtivo que diferencia algumas soluções é a introdução de reforço constituído por uma camada resiliente e uma camada de OSB adicionais. Com o intuito de se verificar qual a contribuição da camada de reforço no sistema construtivo comparam-se entre si as soluções L1 e L3, as soluções L2 e L4, as soluções L5 e L6 e ainda as soluções L7 e L8.

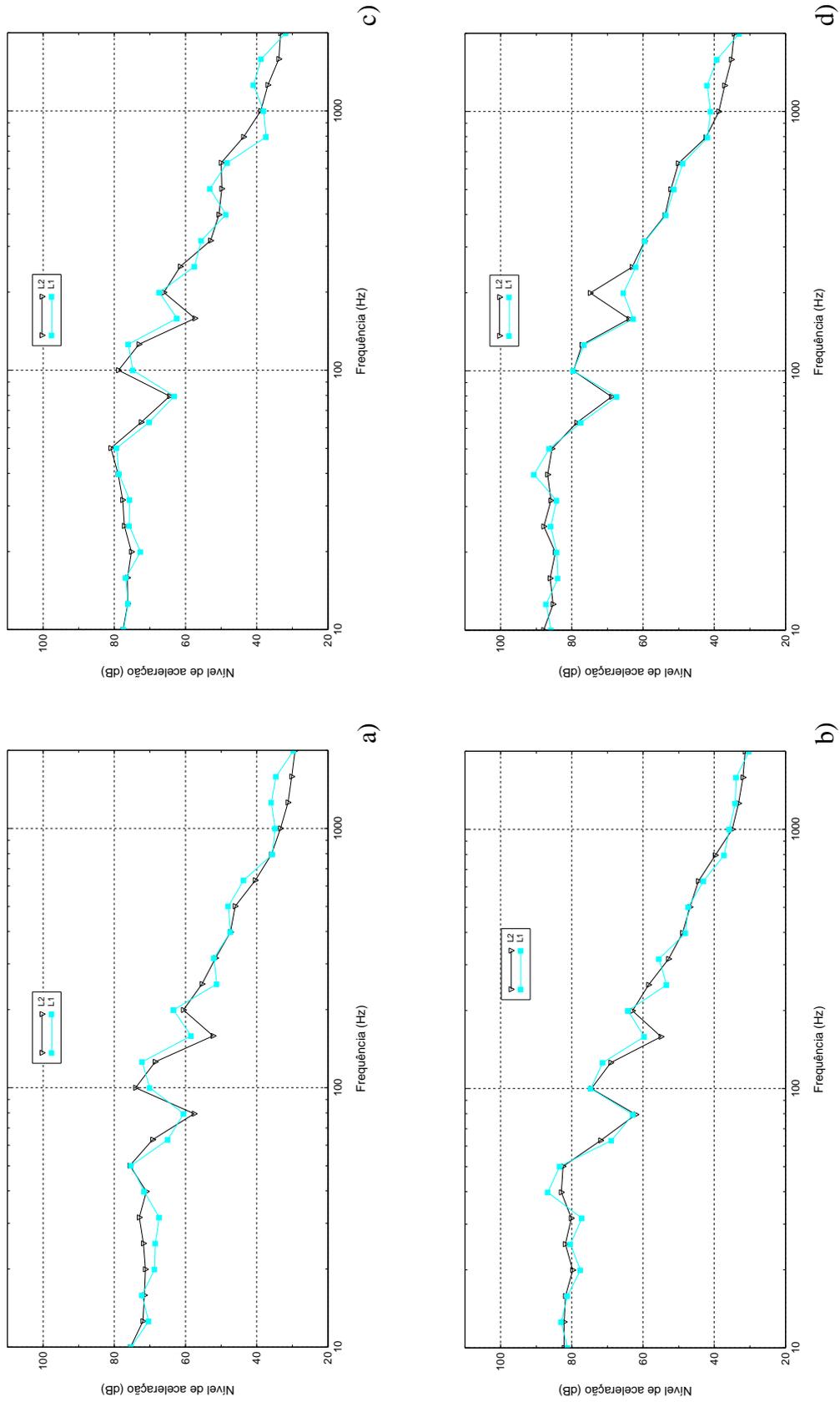


Figura 4.1 - Análise comparativa entre as soluções leves L1 e L2: a) Esfera de 10 kg a 0.80m; b) Esfera de 30 kg a 0.80m; c) Esfera de 10kg a 2.00m; d) Esfera de 30kg a 2.00m

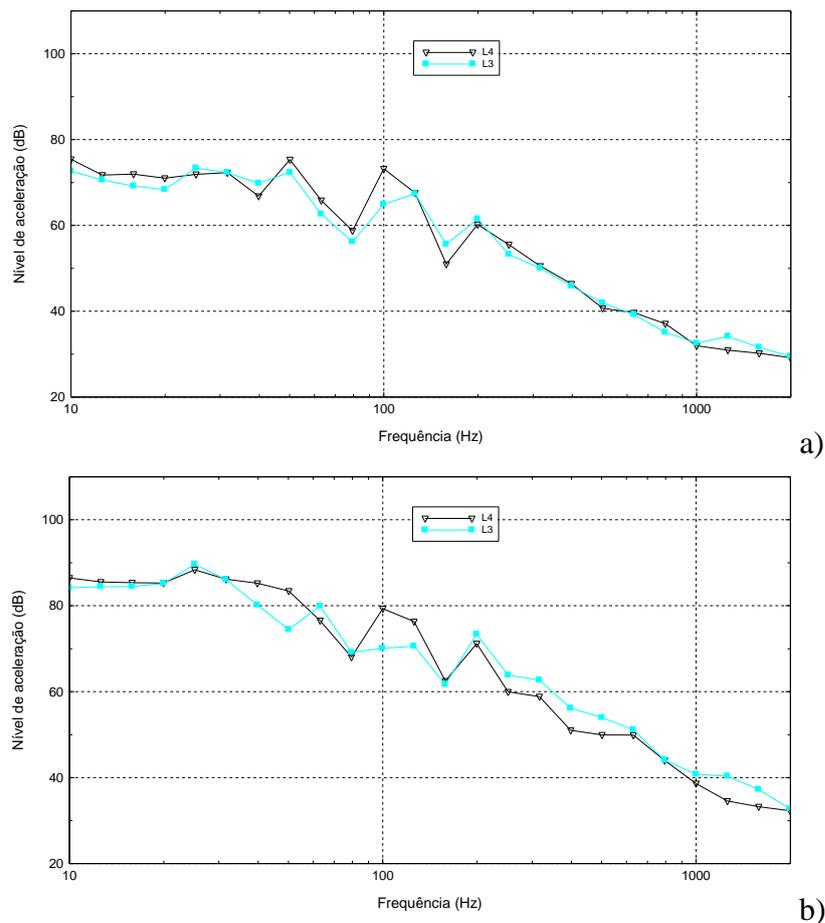


Figura 4.2 – Análise comparativa entre as soluções leves L3 e L4: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Comparando as soluções L1 e L3, na Figura 4.3, pode-se observar que, consoante a energia introduzida no sistema, a colocação de reforço na solução construtiva L3 conduz a diferentes comportamentos. Para níveis de energia baixos (Figura 4.3 a)), a solução L3 apresenta, na sua globalidade, melhores resultados. Com o aumento da energia introduzida no sistema, apesar de, para bandas de frequências mais baixas, a tendência se manter, o mesmo não se verifica para as bandas de frequência mais altas. Como se pode observar na Figura 4.3 b), para bandas de frequências mais altas, a introdução de uma camada de reforço no sistema construtivo provoca um aumento de níveis de aceleração da solução reforçada, solução L3.

Pela análise da Figura 4.4, onde é apresentada a comparação entre as soluções L2 e L4, verifica-se que para bandas de frequências baixas os níveis de aceleração são bastante semelhantes, independentemente da energia introduzida no sistema. Com o aumento de energia (Figura 4.4 b)), é visível que, apesar de uma ligeira atenuação da transmissão de

vibrações nas frequências mais altas, não existe uma variação significativa nos níveis de aceleração entre soluções.

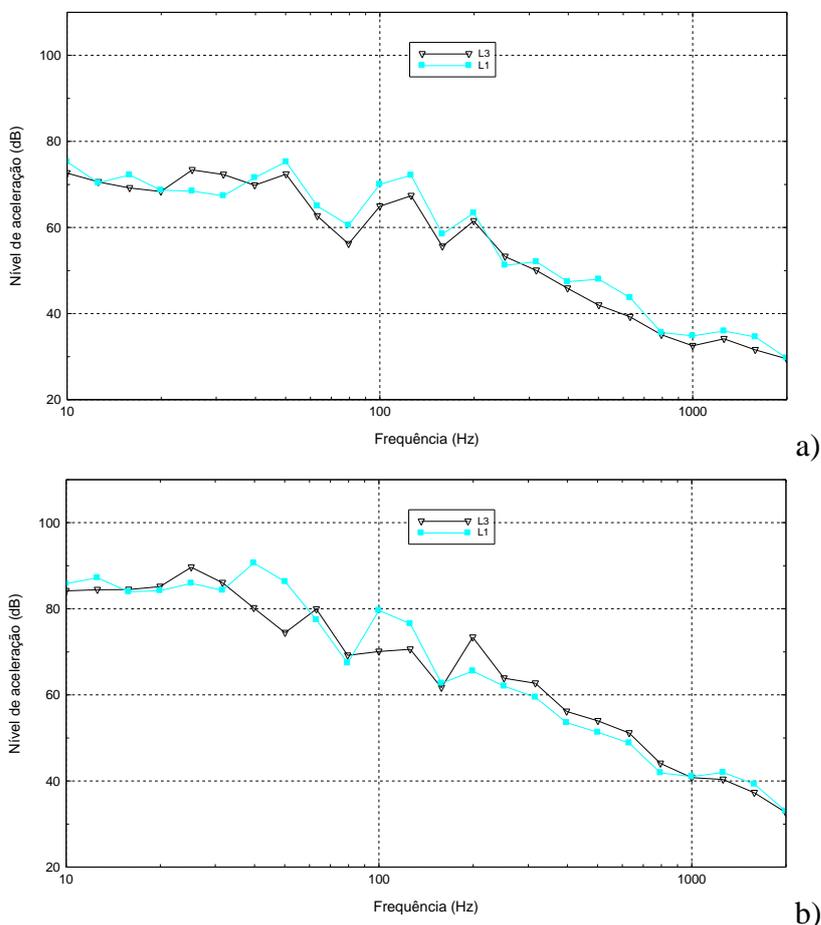


Figura 4.3 – Análise comparativa entre as soluções leves L1 e L3: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Na Figura 4.5 comparam-se as soluções L5 e L6. Nestas soluções a caixa-de-ar é só de 50mm e está preenchida com lã de rocha. Quando se comparam as duas soluções e a quantidade de energia introduzida no sistema é baixa não existe uma variação significativa do nível de acelerações em toda a gama de frequências, com a introdução de camadas adicionais. Ao se excitar o sistema com doses de energia maiores já são visíveis variações de maior amplitude, nomeadamente nas frequências mais altas, como se observa pela Figura 4.5 b). A solução L6 apresenta melhor comportamento face à solução L5 mostrando que é benéfica a colocação das camadas adicionais.

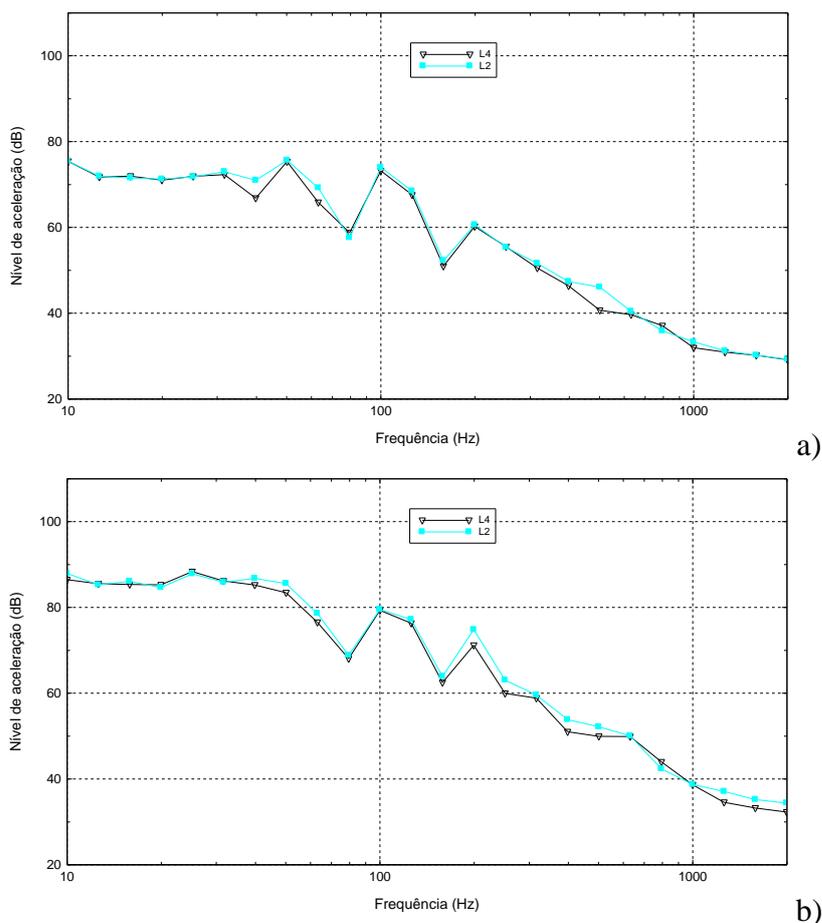


Figura 4.4 – Análise comparativa entre as soluções leves L2 e L4: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Para terminar a análise do efeito da camada de reforço, analisam-se as soluções L7 e L8. Podemos então observar na Figura 4.6 que para toda a gama de frequência e independentemente da energia introduzida no sistema, a solução reforçada, solução construtiva L8, apresenta menor transmissão de vibrações que a solução não reforçada. Embora para gamas de baixas frequências a diferença não seja evidente e, pela Figura 4.6 a), a solução L8 não apresente em toda a gama de frequência apresentados melhores resultados, para níveis de energia superiores (Figura 4.6 d)), a partir de um determinado ponto a diferença de níveis de aceleração entre soluções torna-se mais perceptível.

Refira-se que as soluções L7 e L8 só têm uma caixa de ar de 30mm, altura dos apoios, e estes são mais rígidos que os de 50mm. Conclui-se que quando os apoios são mais rígidos a colocação de camada de reforço, camada resiliente e de OSB, é benéfica para a atenuação de vibrações. Quando os apoios são mais resilientes e existe uma caixa-de-ar maior, os apoios

são os maiores responsáveis pela atenuação da vibração, não sendo perceptível a diferença introduzida pela colocação do reforço.

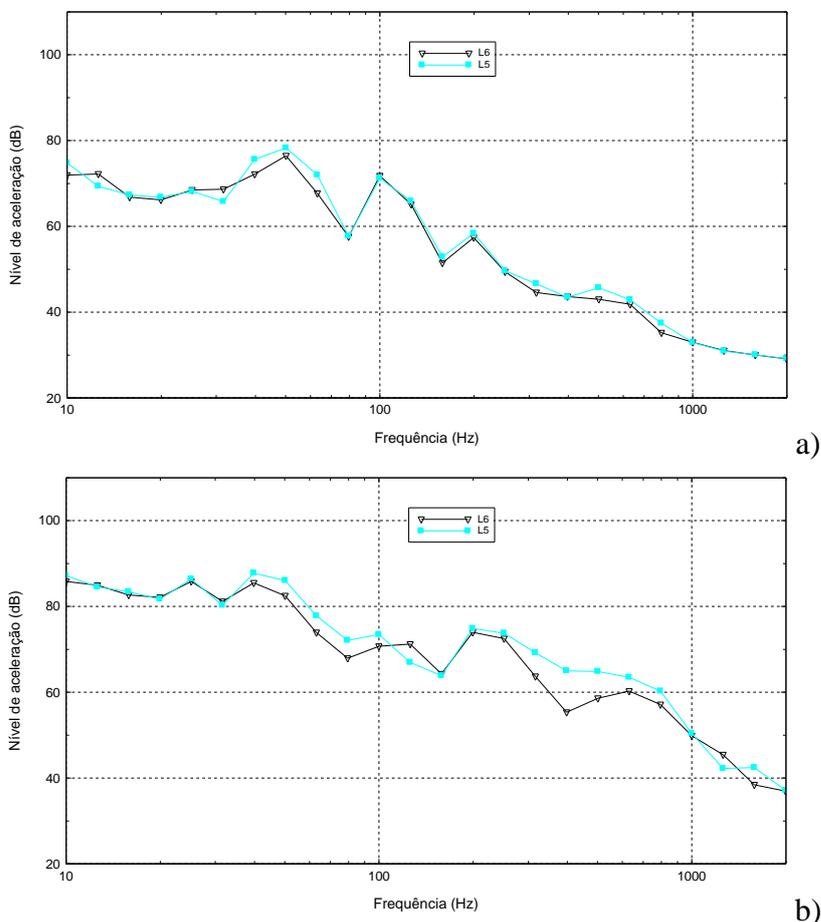


Figura 4.5 - Análise comparativa entre as soluções leves L5 e L6 a) Esfera de 10 kg a 0.80m; b) Esfera de 30kg a 2.00m

Para verificar o efeito da espessura da caixa-de-ar vão comparar-se soluções com os apoios de 50mm com outras às quais é adicionado o barrote de 70mm de altura acima dos apoios. Compara-se a solução L2 com L5, e a solução L4 com a L6 para verificar o efeito introduzido pela sobre-altura do barrote.

Da análise da Figura 4.7 verifica-se que, qualquer que seja o nível de energia introduzido no sistema, nas bandas de frequência mais baixas e em algumas outras bandas de frequência intermédias, a solução construtiva L5 confere uma menor transmissão de vibrações que a solução L2. A diferença entre as duas soluções torna-se mais evidente nas frequências mais altas, a partir de 100 Hz, quando se liberta a bola de 30kg da altura de 2,00m, introduzindo

mais energia ao pavimento. Nessa situação, a solução L2, com maior caixa-de-ar, apresenta-se como a solução com mais capacidade de atenuação de vibrações.

A comparação da solução L4 com a solução L6 evidencia que a remoção do barrote na solução construtiva L6 melhora o comportamento da solução em algumas bandas de frequência, especialmente nas frequências mais baixas. Ao introduzir maiores quantidades de energia no sistema (Figura 4.8 b)), para frequência mais altas a presença do barrote (aumento da caixa-de-ar) mostra-se benéfica na atenuação de vibrações.

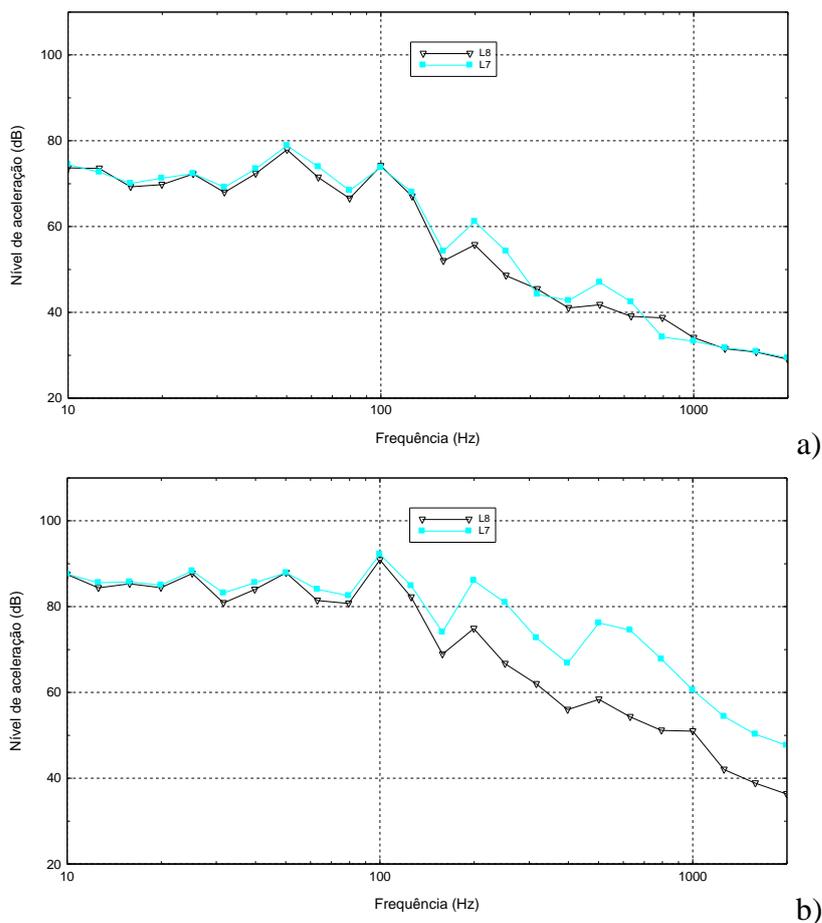


Figura 4.6 – Análise comparativa entre as soluções leves L7 e L8: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Tanto para as soluções não reforçadas, soluções L2 e L5, como para as soluções reforçadas, soluções L4 e L6, o aumento da espessura da caixa-de-ar é benéfico na atenuação de vibrações a partir de 160 Hz, quando se introduz uma grande quantidade de energia no pavimento.

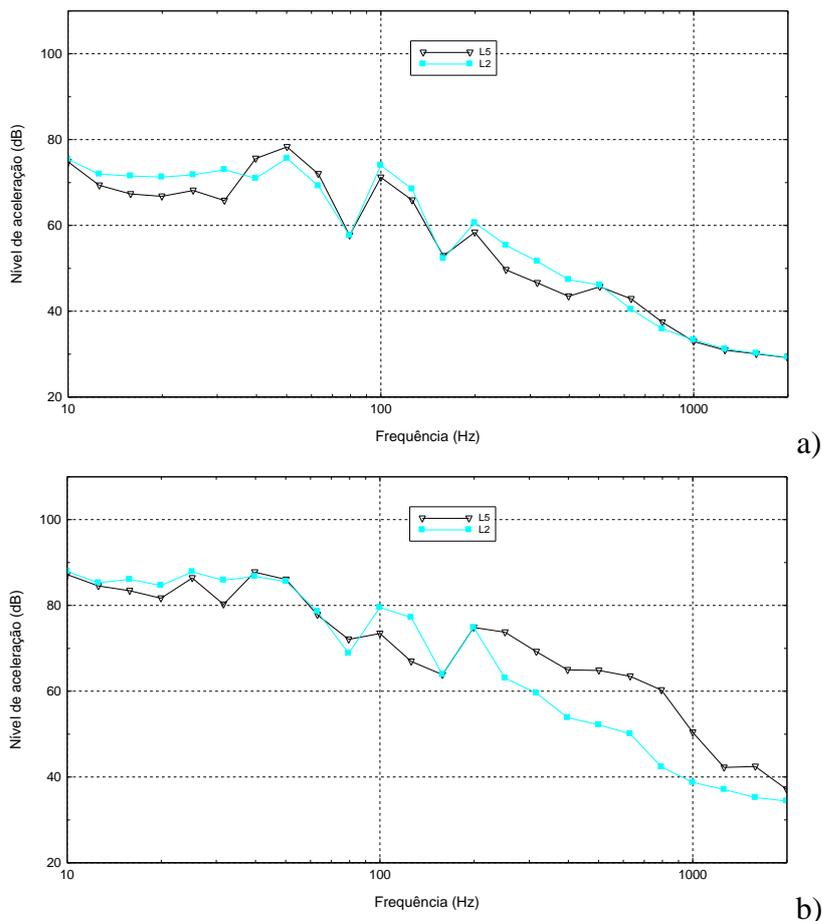


Figura 4.7 – Análise comparativa entre as soluções leves L2 e L5: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Um dos parâmetros que se variou nas soluções construtivas foi o tipo de apoio resiliente. Usaram-se os apoios de 50mm de altura, menos rígidos, e apoios de 30mm de altura, mais rígidos. Para verificar o efeito do tipo de apoio vai comparar-se a solução L7 com a solução L5 e a solução L8 com a solução L6.

Da análise da Figura 4.9, observa-se que a introdução de apoios de maior rigidez provoca um aumento da transmissão de vibrações em quase toda a gama de frequências. Esse efeito torna-se mais evidente com o aumento da energia introduzida no sistema. Para níveis de energia mais baixos (Figura 4.9 a)), a partir da frequência de 125Hz não existem diferenças significativas entre a solução L5 e a solução L7.

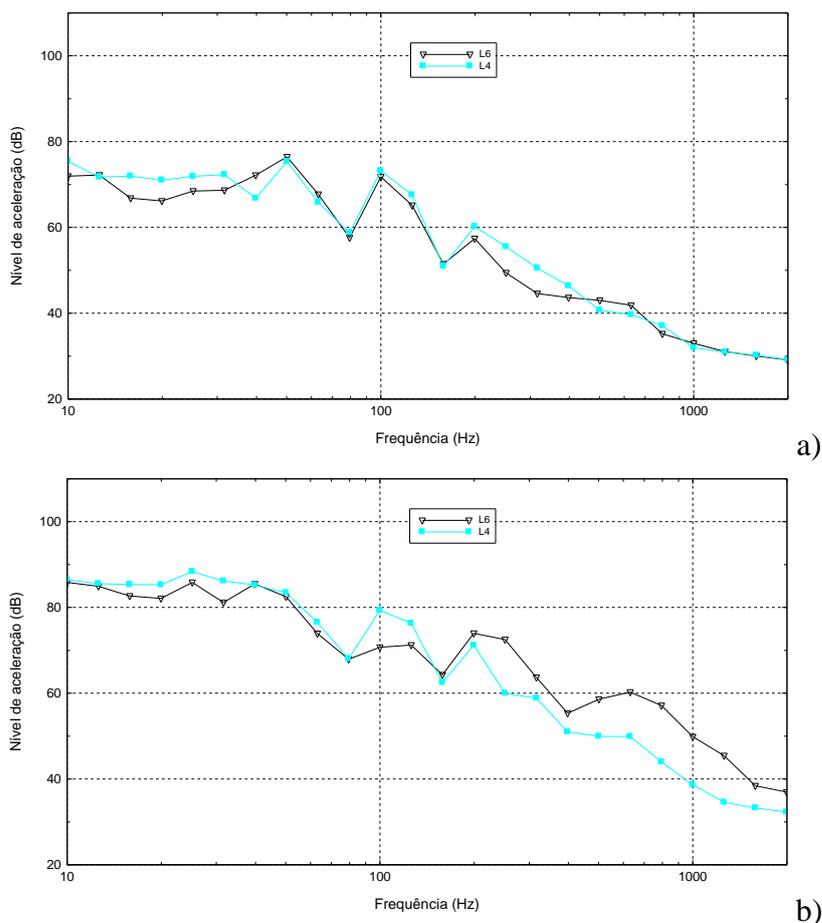


Figura 4.8 – Análise comparativa entre as soluções leves L4 e L6: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Ao analisar a comparação entre as soluções L6 e L8, Figura 4.10, observa-se que a solução com o apoio menos rígido, solução L6, apresenta melhores resultados para a grande maioria das bandas de frequência, relativamente à solução L8. Quando se introduz menos energia no sistema, para as bandas de frequência mais altas, não é perceptível, de um modo geral, a diferença entre uma e a outra solução. No entanto, com a queda da esfera de 30kg dos 2,00m (Figura 4.10 b)), a solução L8 apresenta menor transmissão de vibrações em comparação com a solução L6, nas frequências altas.

Pode concluir-se, de uma maneira geral, que a introdução de apoios mais flexíveis aumenta a atenuação de vibrações, nomeadamente quando se introduz mais energia no sistema e com maior evidência em soluções por si mais fracas, não reforçadas (soluções L4 e L6).

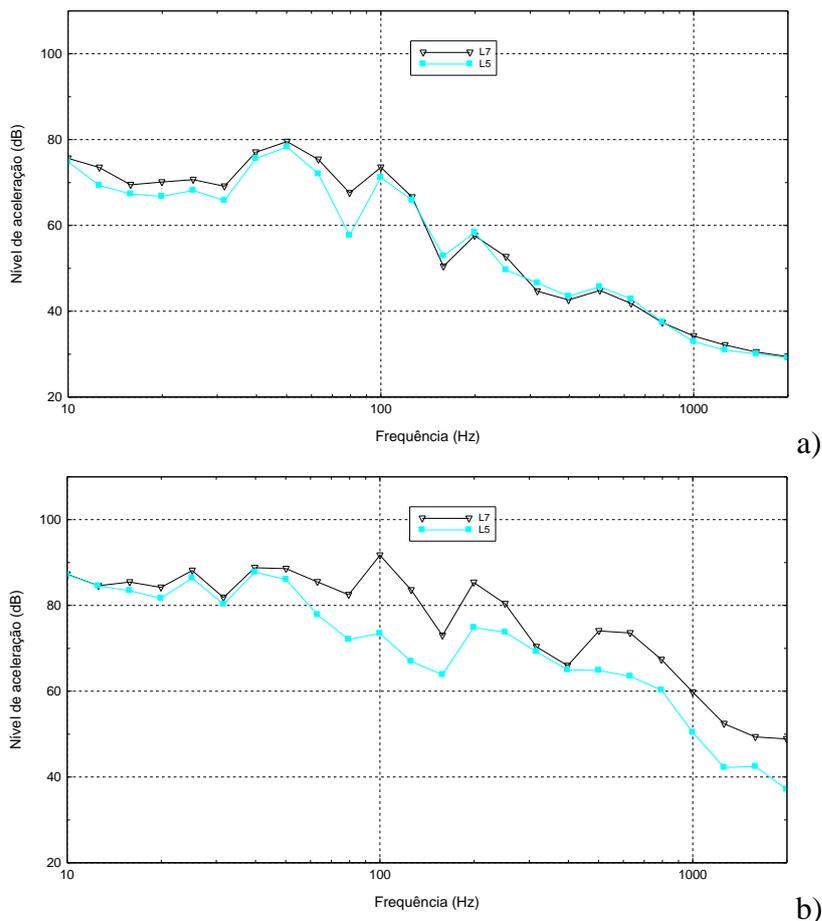


Figura 4.9 – Análise comparativa entre as soluções leves L5 e L7: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Numa das soluções ensaiadas variou-se ainda o tipo de material resiliente colocado entre as placas de OSB. Alterou-se a solução construtiva L5 substituindo a camada resiliente CDM-DAMP5 por duas camadas CDM-ACUSEAL. Foram colocadas duas camadas para perfazer a mesma altura que uma camada de CDM-DAMP5.

Comparando as soluções L5 e L9, na Figura 4.11, para baixos níveis de energia introduzidos no pavimento, não existem diferenças significativas entre as soluções. Com a introdução de maiores quantidades de energia no sistema (Figura 4.11 b)), a solução L9 começa a distanciar-se da solução L5, apresentando maiores atenuações de vibrações numa grande parte das frequências analisadas.

Na Figura 4.12 apresentam-se os níveis de aceleração obtidos com todas as soluções leves e obtida com a laje de betão apenas revestida com o revestimento R3 (SlabRef), com o objetivo

de verificar qual o incremento na atenuação de vibração, introduzido por estas soluções (em relação à laje).

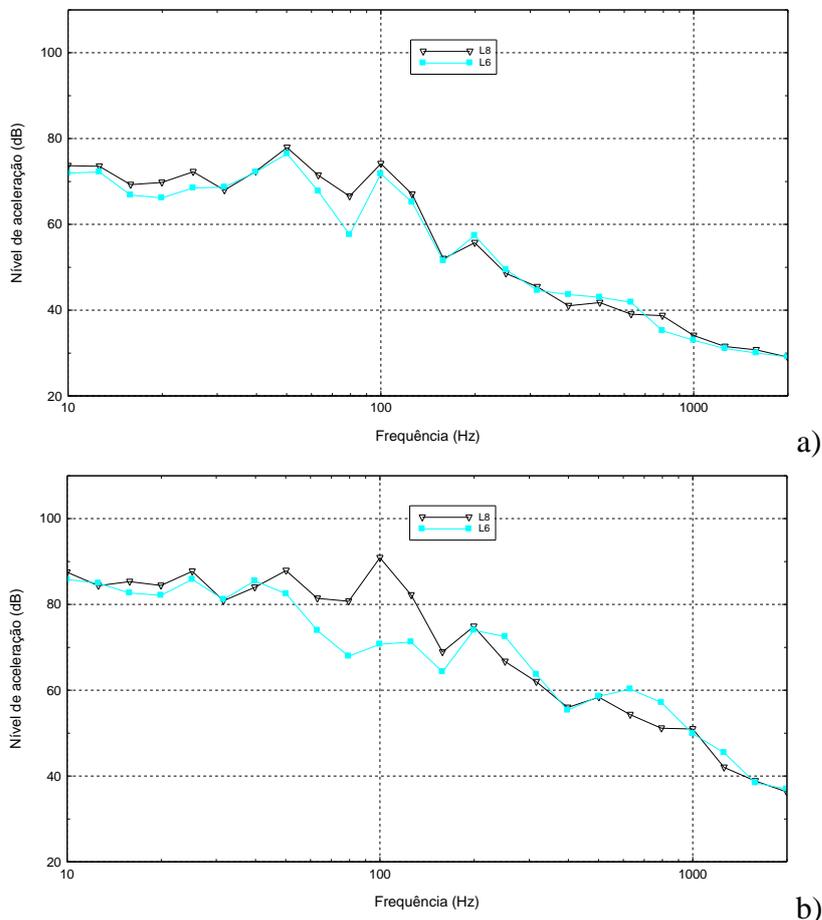


Figura 4.10 – Análise comparativa entre as soluções leves L6 e L8: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Analisando a Figura 4.12 é notória a melhoria introduzida por todas as soluções em comparação com a laje de betão somente revestida com o revestimento R3. Apesar de, quando se introduzem quantidades baixas de energia (Figura 4.12 a)), não se poder tirar conclusões óbvias relativamente à melhor ou pior solução, é observável que para algumas bandas de frequência a solução L7 é a que tem pior comportamento, e a solução L3 a que apresenta melhor comportamento, em bandas de frequência mais baixas. No entanto, com o acréscimo de energia com que se excita o sistema a análise dos níveis de vibração torna-se mais fácil, principalmente nas altas frequências. Embora nas frequências mais baixas a comparação entre soluções continue uma tarefa difícil, para bandas de frequência mais altas as diferenças entre soluções já são mais evidentes. Pela Figura 4.12 b), a solução L7 é notoriamente a solução

que apresenta pior comportamento. As soluções que apresentam menores transmissões de vibração são as soluções construtivas L1, L2 e L4.

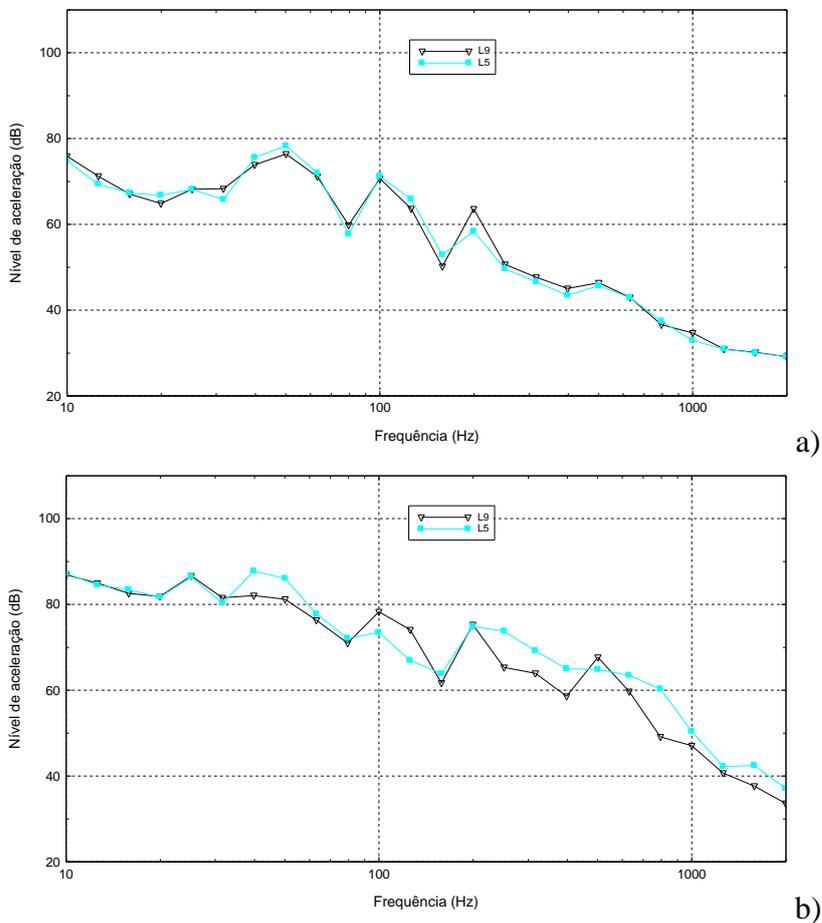


Figura 4.11 – Análise comparativa entre as soluções leves L5 e L9: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Se compararmos as Figura 4.12 a) e Figura 4.12 b), verifica-se que de uma maneira geral, quando a excitação contém menos energia as várias soluções têm desempenhos mais próximos e apresentam um grau de atenuação maior do que quando se introduz mais energia.

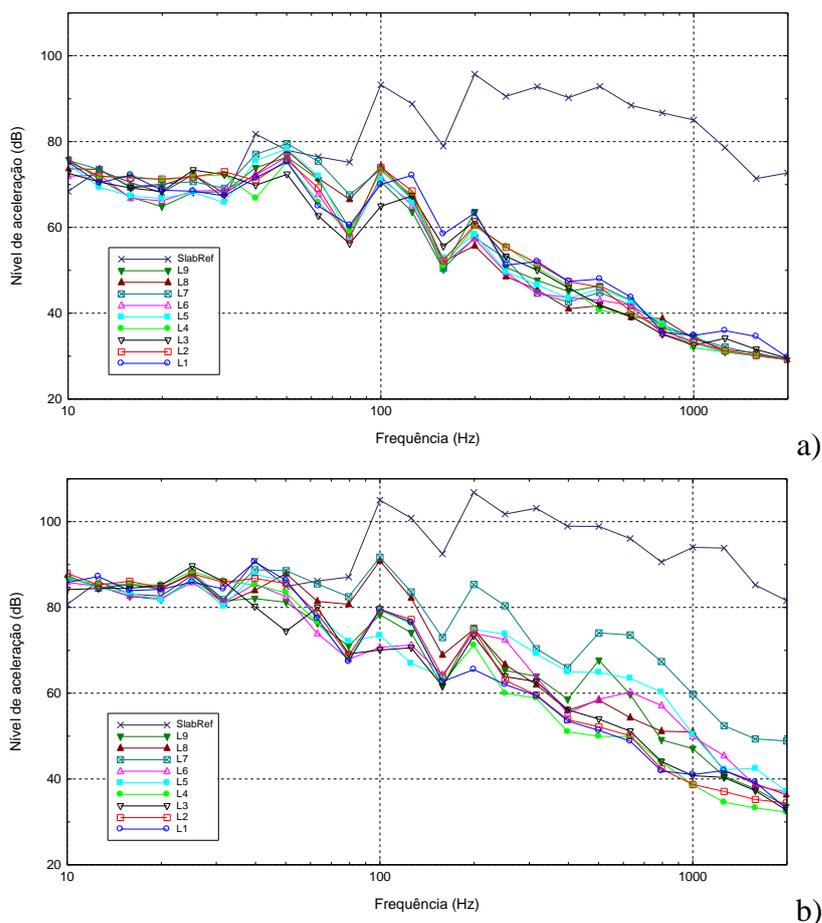


Figura 4.12 – Análise comparativa entre todas as soluções leves: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

4.3 Soluções Pesadas

À semelhança do que foi feito para as soluções construtivas leves, para comparar o desempenho das soluções pesadas, usou-se o revestimento R3 sob o local de queda da esfera e serão analisadas as contribuições dos diferentes elementos construtivos na transmissão de vibrações. Vai ser analisado o efeito que a lã de rocha, o barrote de madeira, a tela resiliente e os diferentes apoios introduzem na atenuação de vibração das soluções pesadas.

Refira-se que na realização dos ensaios das soluções pesadas devido à possibilidade da lajeta de betão poder partir foram eliminadas as quedas de 2,00 m de altura. Assim, só serão apresentados resultados das quedas das esferas de 10 e 30 kg dos 0,80 m de altura.

Na Figura 4.13 é analisada a influência do efeito da presença de lã de rocha na solução H2 comparando-a com a solução H1, cuja constituição é semelhante à solução H1, diferindo

apenas no facto de não possuir lâ de rocha. Para bandas de frequência mais baixa não existem diferenças significativas entre uma solução e outra. No entanto, para bandas de frequências mais altas a solução H2 apresenta menor transmissão de vibrações. Com o aumento de energia introduzida no sistema (Figura 4.13 b)) a tendência observada anteriormente mantém-se.

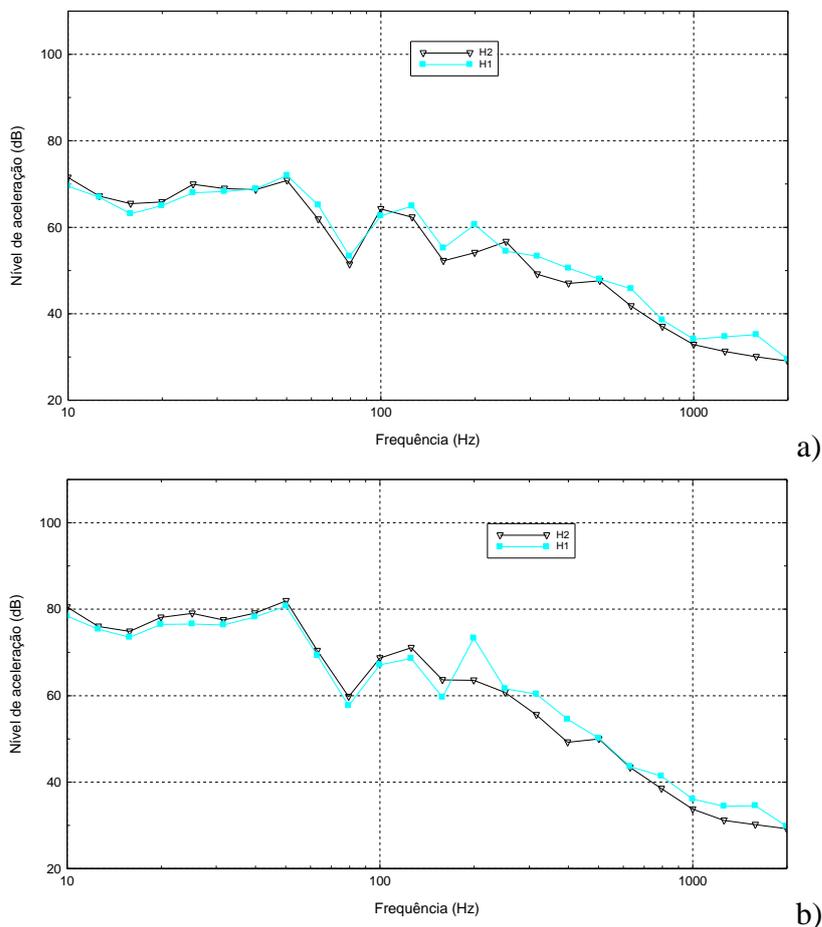


Figura 4.13 – Análise comparativa entre soluções pesadas H1 e H2: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

Na solução construtiva H3 foi introduzida uma tela resiliente CDM-DAMP5 entre a camada de OSB e a lajeta de betão. Na Figura 4.14 pretende-se avaliar o efeito introduzido pela adição dessa tela, comparando a solução H2 com a solução H3.

É observável que a introdução da tela amortecedora não provoca variações significativas no comportamento da solução. Quando se introduz maior quantidade de energia no sistema construtivo (Figura 4.14 b)), a tela resiliente provoca um acréscimo das transmissões de vibração, piorando assim o comportamento da solução H3 nas frequências mais altas. Refira-

se, no entanto, que a diferença entre as duas soluções é bastante pequena e em algumas frequências poderá ter a ver com questões de serem duas montagens distintas.

Para verificar o efeito da altura da caixa-de-ar, alterada com a introdução de um barrote, compara-se a solução H2 com a solução H4 na Figura 4.15, e ainda a solução H5 com a solução H6 na Figura 4.16.

Analisando a Figura 4.15 observa-se que, para frequências mais baixas, apesar de serem diferenças pouco significativas, a solução H4, solução que não possui barrote na sua constituição, apresenta níveis de aceleração mais baixos. Com o aumento da frequência essa tendência inverte-se, apresentando a solução H2 menor transmissão de vibrações. Este comportamento mantém-se com o aumento de energia introduzida no sistema (Figura 4.15 b)).

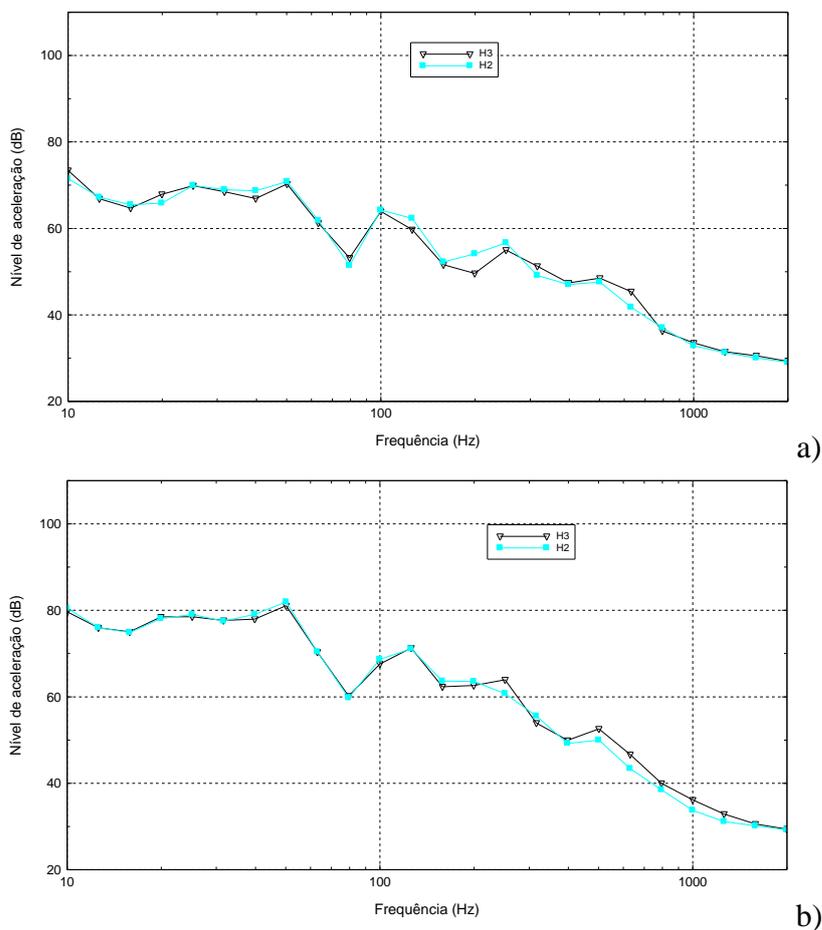


Figura 4.14 - Análise comparativa entre soluções pesadas H2 e H3: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80

Comparando as soluções H5 e H6 (Figura 4.16), que também diferem entre si pela presença de barrote na sua constituição, é observável que as conclusões tiradas para a comparação realizada anteriormente são validadas pelas conclusões que se tiram na presente comparação. Para frequências mais baixas, apesar de serem diferenças mínimas, a solução sem barrote, solução H6, apresenta melhores resultados, mas com o aumento das frequências a solução H5 (com caixa-de-ar maior) apresenta níveis de aceleração mais baixos, como se tinha verificado quando se compararam as soluções H2 e H4.

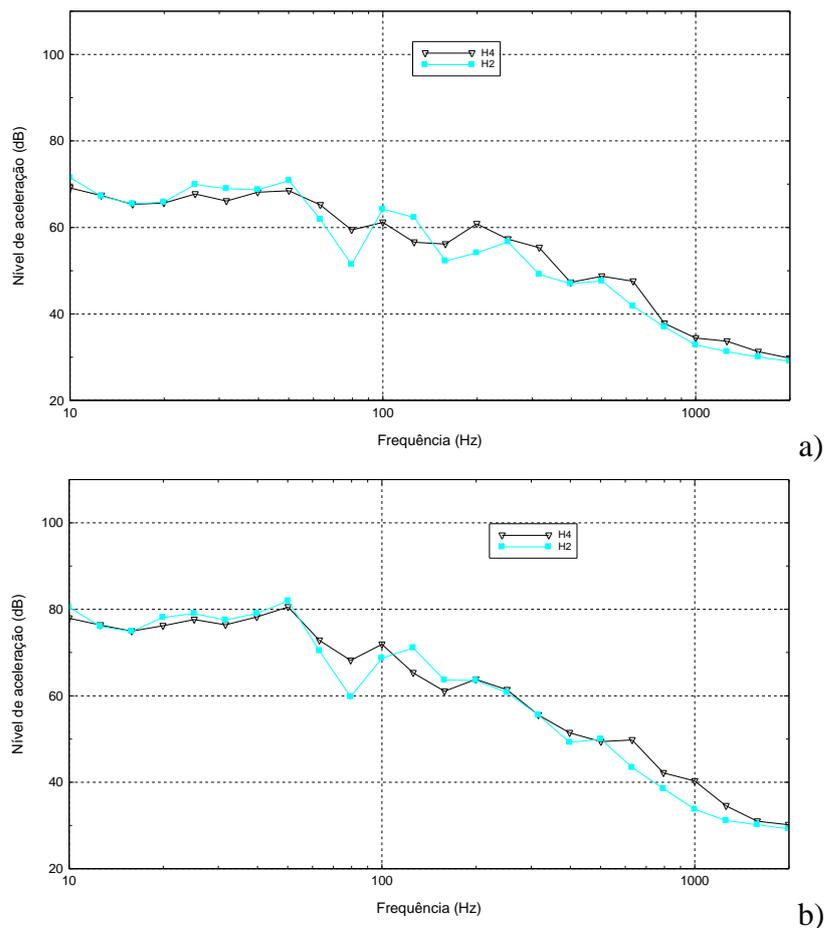


Figura 4.15 . Análise comparativa entre soluções pesadas H2 e H4: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

Por fim vai ser analisado o efeito do tipo de apoio resiliente nas soluções pesadas. Para isso serão, então, comparadas as soluções H2 e H4 com as soluções H5 e H6, respetivamente.

Comparando as soluções H2 e H5 na Figura 4.17, independentemente da energia introduzida no sistema, para bandas de frequência mais baixa não existem grandes diferenças de níveis de

aceleração. No entanto, na sua globalidade, a solução H2 que é constituída por apoios menos rígidos apresenta melhores resultados.

Observando a Figura 4.18 verifica-se os resultados obtidos com as duas soluções em causa não variam muito entre si. Para a maior parte das bandas de frequência, a solução que possui os apoios menos rígidos, é a solução que apresenta níveis de aceleração mais reduzidos (solução H4).

Conclui-se, então, que a colocação dos apoios menos rígidos é benéfica para a atenuação das vibrações.

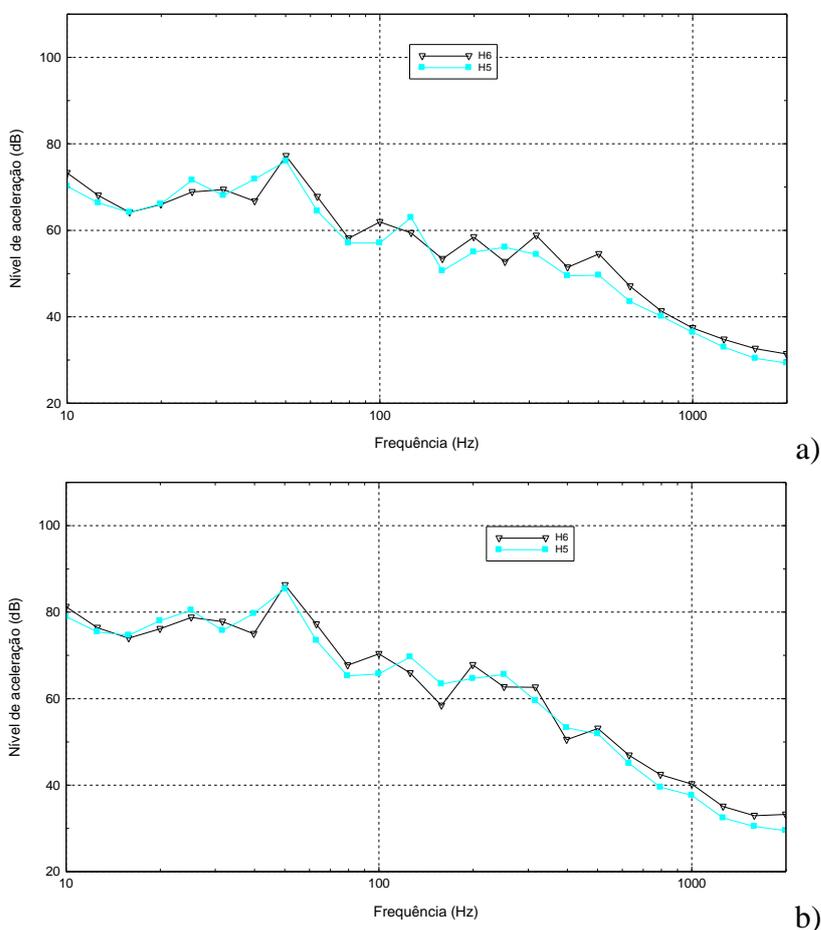


Figura 4.16 – Análise comparativa entre soluções pesadas H5 e H6: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

Por fim, comparam-se todas as soluções pesadas com a solução da laje de betão apenas revestida com o revestimento R3. Analisando a Figura 4.19 é notória a melhoria introduzida na atenuação de vibrações por todas as soluções face à laje de betão somente revestida com o

revestimento R3. Apesar de, para baixas quantidades de energia (Figura 4.19 a)), as diferenças entre soluções serem pouco significativas observa-se que para algumas bandas de frequência a solução construtiva H6 apresenta pior comportamento. No entanto, ao contrário do que acontece para as soluções leves (Figura 4.12), com o aumento da energia de excitação do sistema (Figura 4.19 b)), não se torna mais fácil distinguir qual a solução construtiva com maior ou menor atenuação de vibrações. Refira-se, no entanto, que nas soluções leves utilizou-se uma queda de altura superior. Pode observar-se, ainda, que quanto maior a quantidade de energia introduzida maior é a amplitude da vibração (comparar Figura 4.19 a) com 4.19 b)).

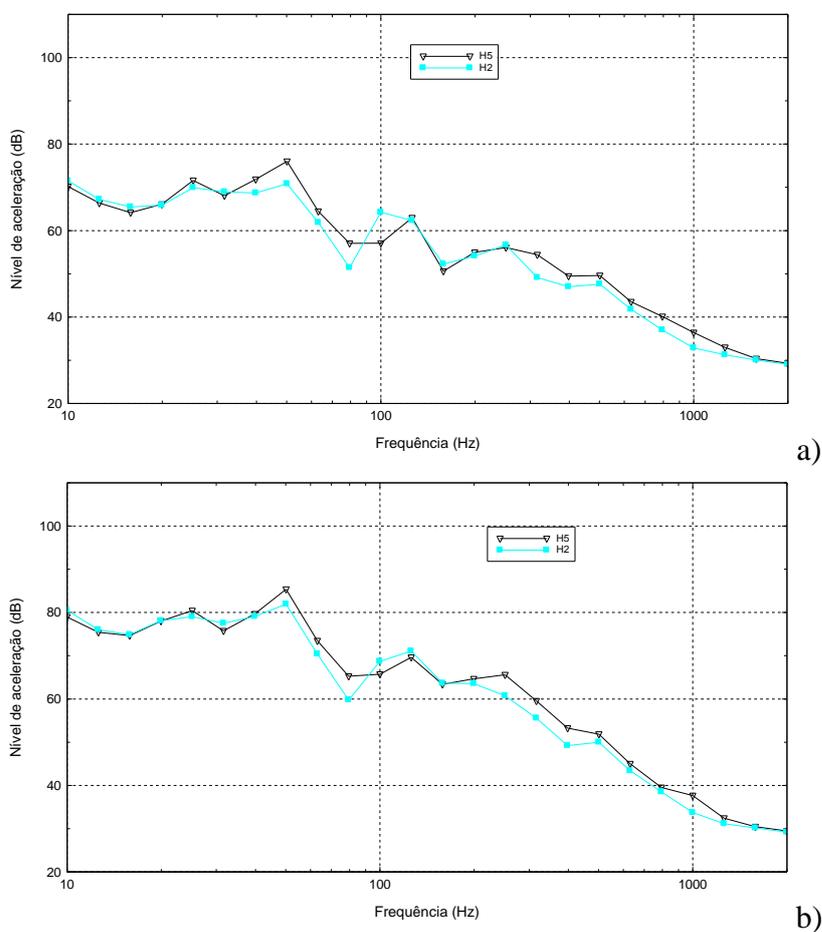


Figura 4.17 – Análise comparativa entre soluções pesadas H2 e H5: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

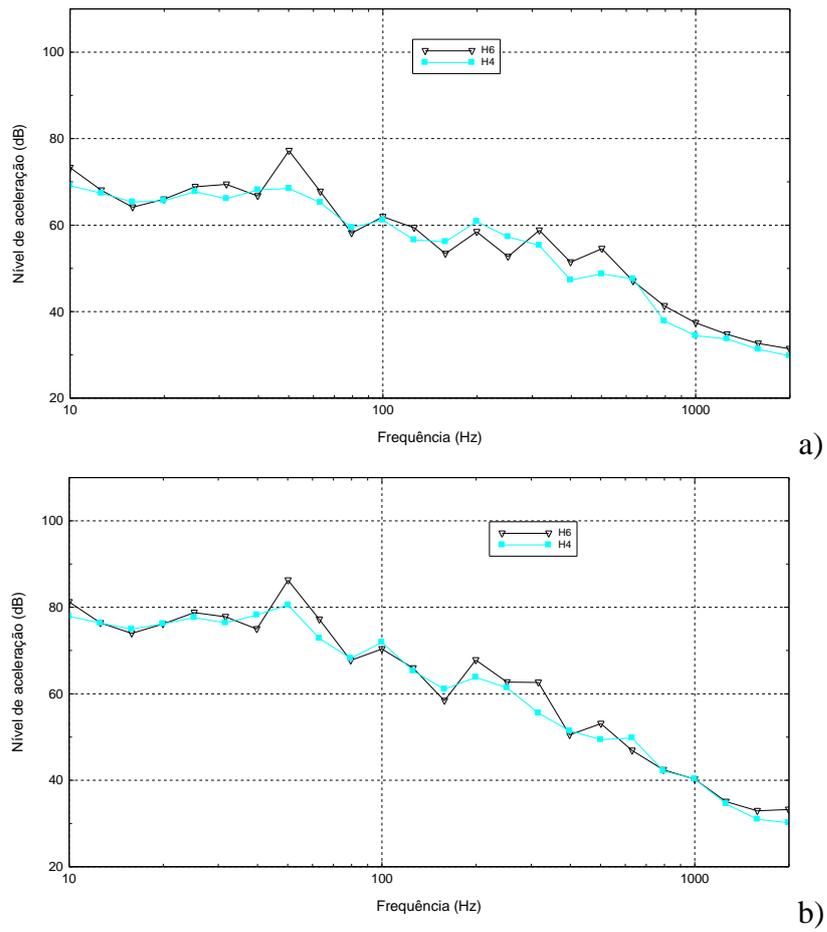


Figura 4.18 – Análise comparativa entre soluções pesadas H4 e H6: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

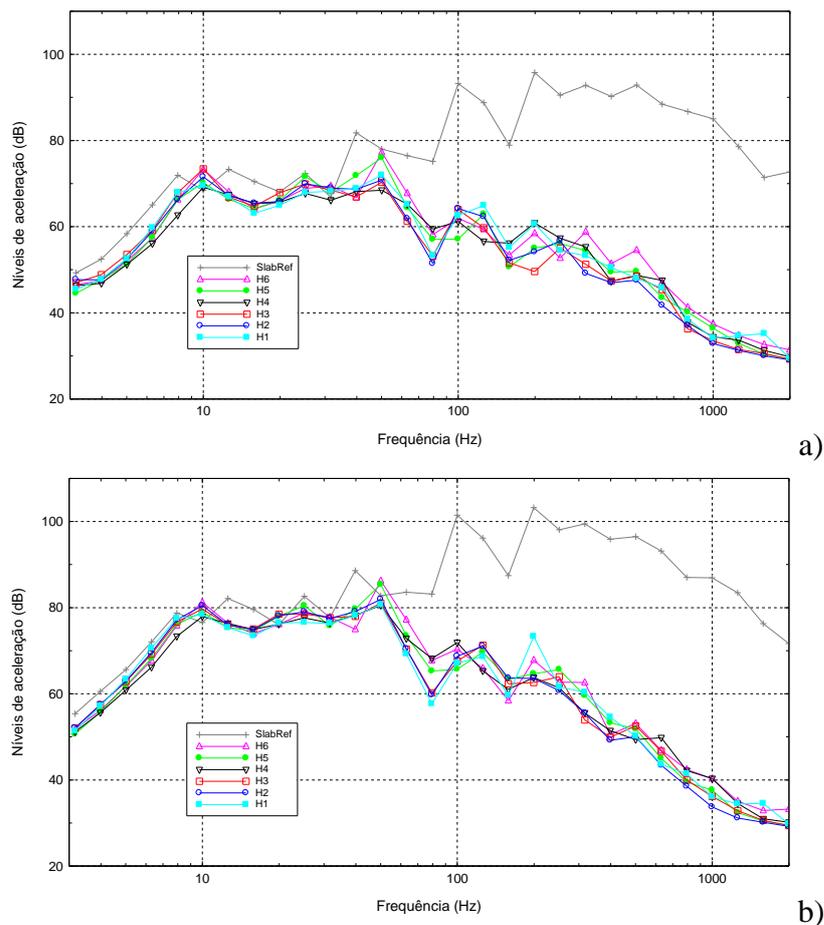


Figura 4.19 – Análise comparativa entre todas as soluções pesadas: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,8m

4.4 Comparação entre soluções leves e pesadas

De seguida compara-se soluções leves com pesadas quando existem alguns aspetos comuns entre soluções, como por exemplo a presença ou não de lã de rocha na caixa-de-ar ou o tamanho da caixa-de-ar. Verificou-se que a solução L1 pode ser comparada com a solução H1, que a solução L2 pode ser comparada com as soluções H2 e H3 simultaneamente e que a solução L7 é comparável com a solução H6.

Nestas comparações são apresentados resultados com a esfera de 10kg e a esfera de 30kg e uma queda de 0,80m.

Observa-se na Figura 4.20 que a solução pesada H1 apresenta níveis de aceleração mais baixos nas frequências mais baixas independentemente da energia introduzida no sistema. Nas frequências mais altas não existem variações significativas entre a solução L1 e a solução H1

quando é introduzida menor quantidade de energia. No entanto, quando é introduzida mais energia no sistema (Figura 4.20 b)), as diferenças entre as soluções tornam-se mais evidentes.

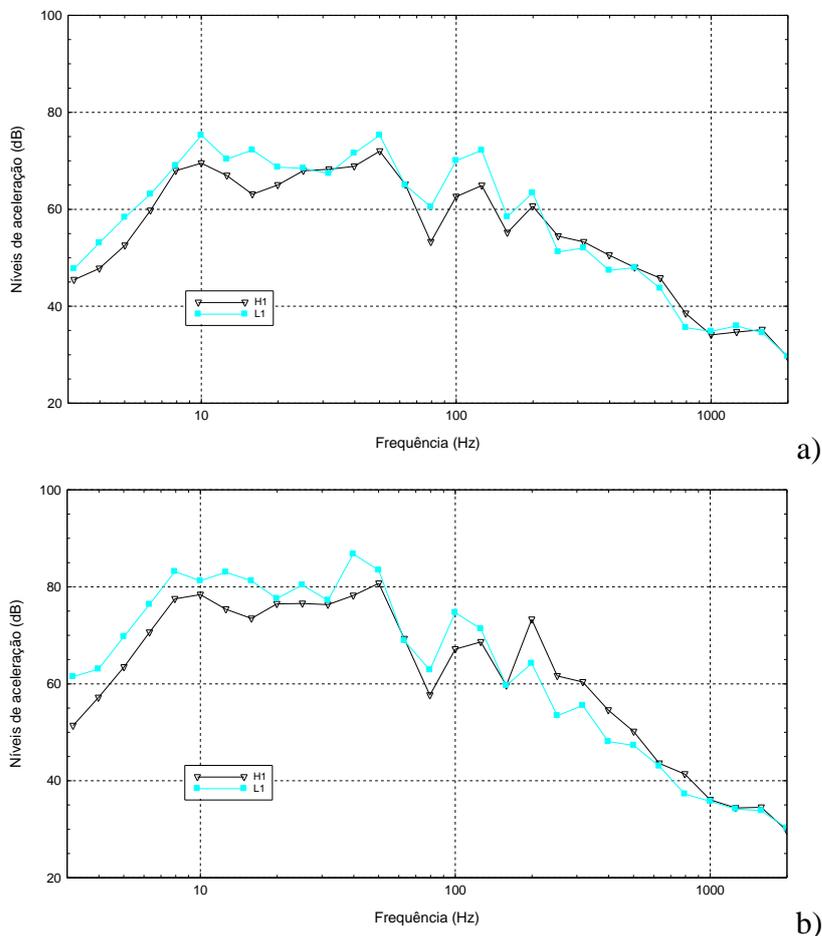


Figura 4.20 – Análise comparativa da solução leve L1 com a solução pesada H1: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

Na Figura 4.21 é apresentada a comparação da solução construtiva leve L2 com as soluções pesadas H2 e H3. À semelhança da comparação anterior, as soluções pesadas apresentam melhor comportamento nas bandas de frequência mais baixas, para qualquer nível de energia introduzido. Nas frequências mais altas as três soluções apresentam níveis de aceleração muito semelhantes entre si.

Da análise da Figura 4.22 observa-se, também, que para as frequências mais baixas a solução pesada apresenta melhor comportamento relativamente à atenuação de vibrações e para frequências mais altas a solução leve L7 exibe níveis de aceleração mais baixos. No entanto, quando se introduz maiores níveis de energia no sistema, Figura 4.22 b), as soluções apresentam pouca variação entre si, nas frequências mais altas.

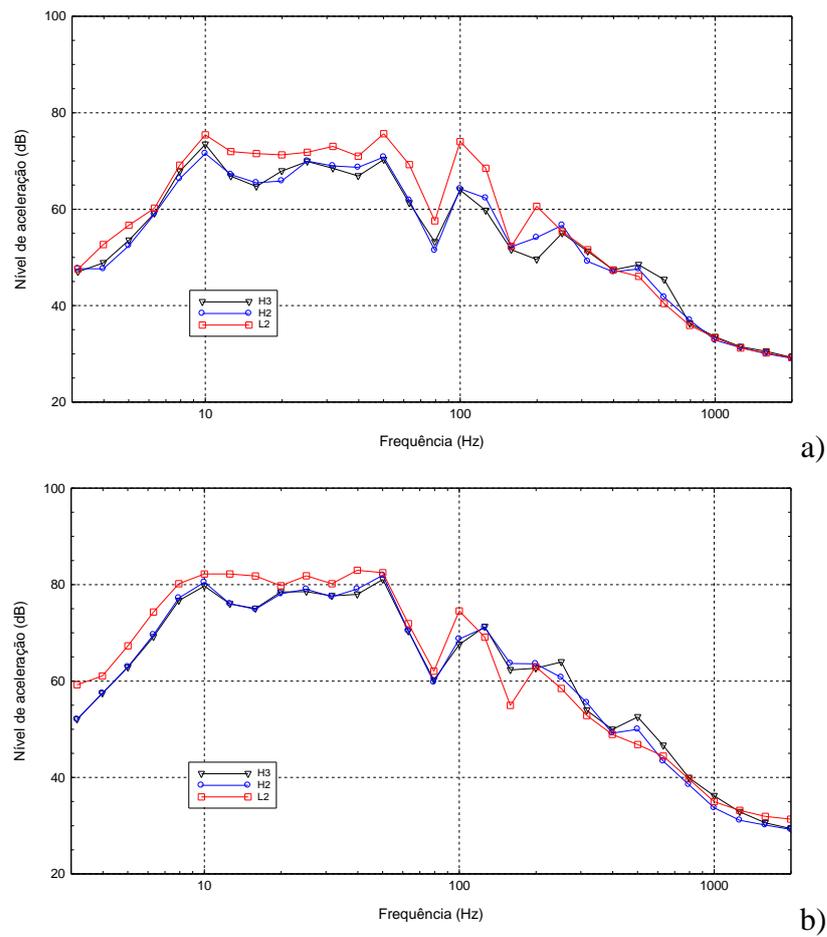


Figura 4.21 – Análise comparativa da solução leve L2 com as soluções pesadas H2 e H3: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

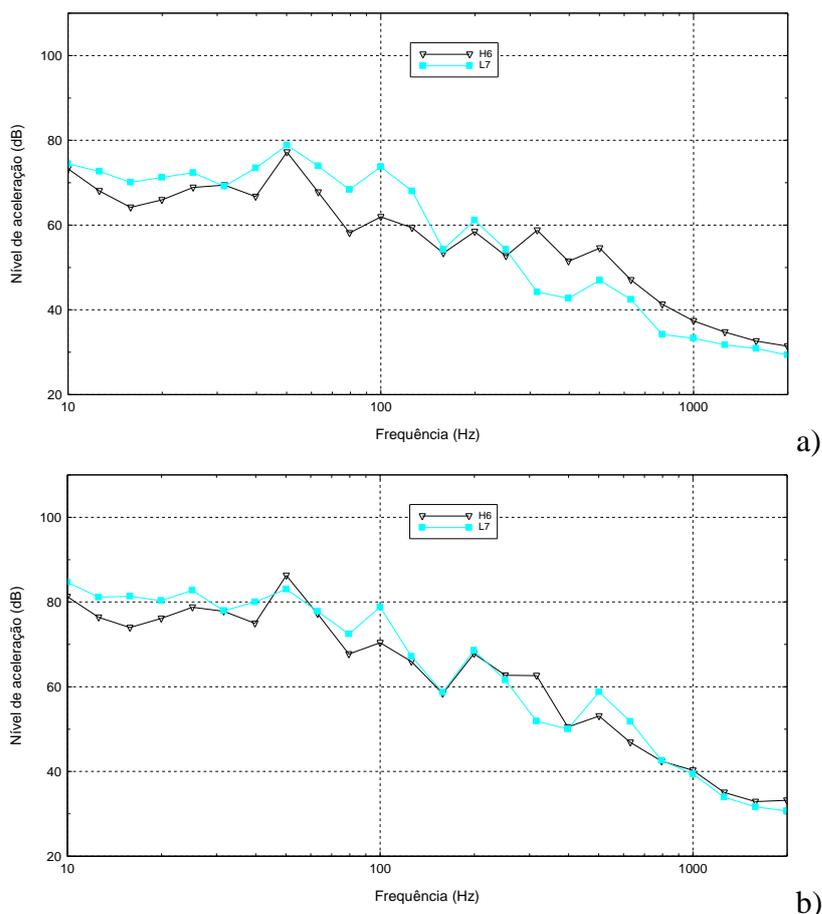


Figura 4.22 – Análise comparativa da solução leve L7 com a solução pesada H6: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

4.5 Comparação dos revestimentos de pisos

Nesta secção analisa-se o efeito do revestimento de piso no desempenho de algumas soluções específicas para não tornar a análise muito extensa. Apresentam-se os resultados obtidos, com os três revestimentos, para a solução construtiva leve L4, a solução construtiva pesada H2 e a laje de betão.

Na Figura 4.23 apresenta-se os níveis de aceleração registados quando se instala a solução L4 com os três revestimentos de piso R2, R3 e R4, respetivamente. Observa-se que o revestimento elástico de piso de 30mm, revestimento R4, melhora a atenuação da vibração na maioria das bandas de frequência em análise. Nas regiões extremas do espectro de frequências, os resultados obtidos são praticamente coincidentes e é visível que, independentemente da quantidade de energia introduzida no sistema, o revestimento R4 provoca a redução das vibrações no pavimento.

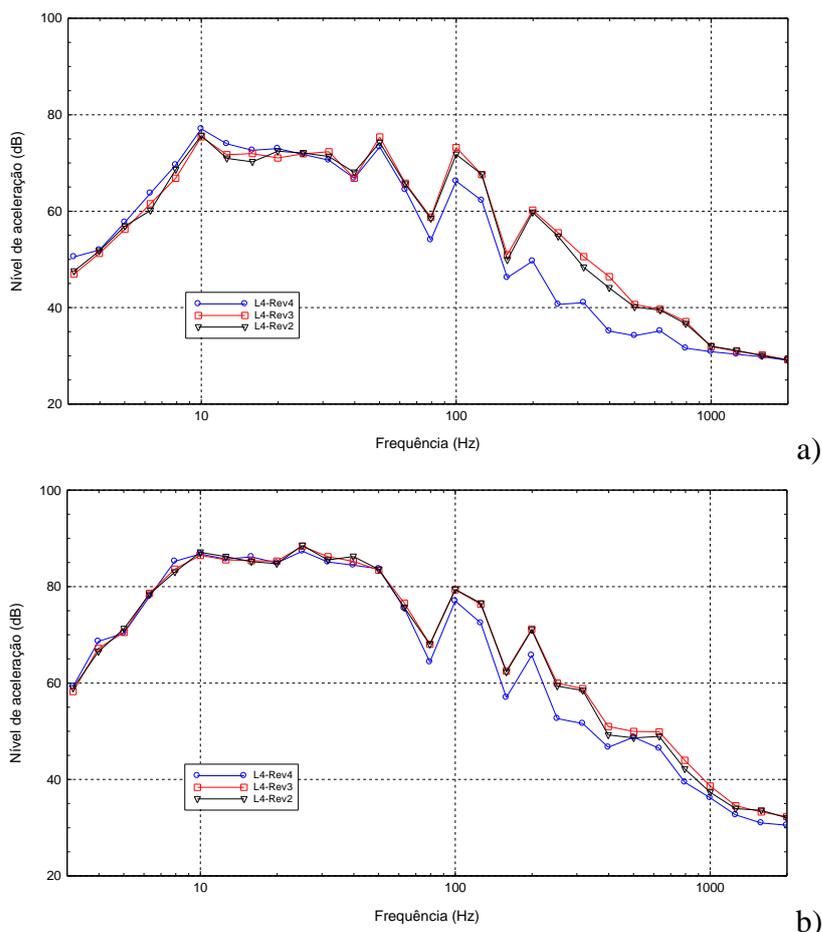


Figura 4.23 – Análise comparativa dos três revestimentos com a solução leve L4: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 2,00m

Apresenta-se na Figura 4.24 os níveis de aceleração registrados quando se instala a solução pesada H2 com cada um dos três revestimentos. Observa-se que o revestimento R3 possui melhor desempenho nas bandas de frequência mais baixas. O revestimento R4 apenas melhora o desempenho da solução construtiva em bandas de frequência mais altas. No entanto, para as frequências mais altas todos os revestimentos mostram ter um comportamento semelhante.

Por fim, a Figura 4.25 mostra os resultados obtidos nos ensaios realizados com os três revestimentos aplicados diretamente sobre a laje estrutural de betão armado. Obtêm-se melhores resultados com o revestimento R3 em muito baixas frequências. No entanto, com o revestimento R4 registam-se resultados significativamente melhores a partir da banda de frequência dos 100 Hz.

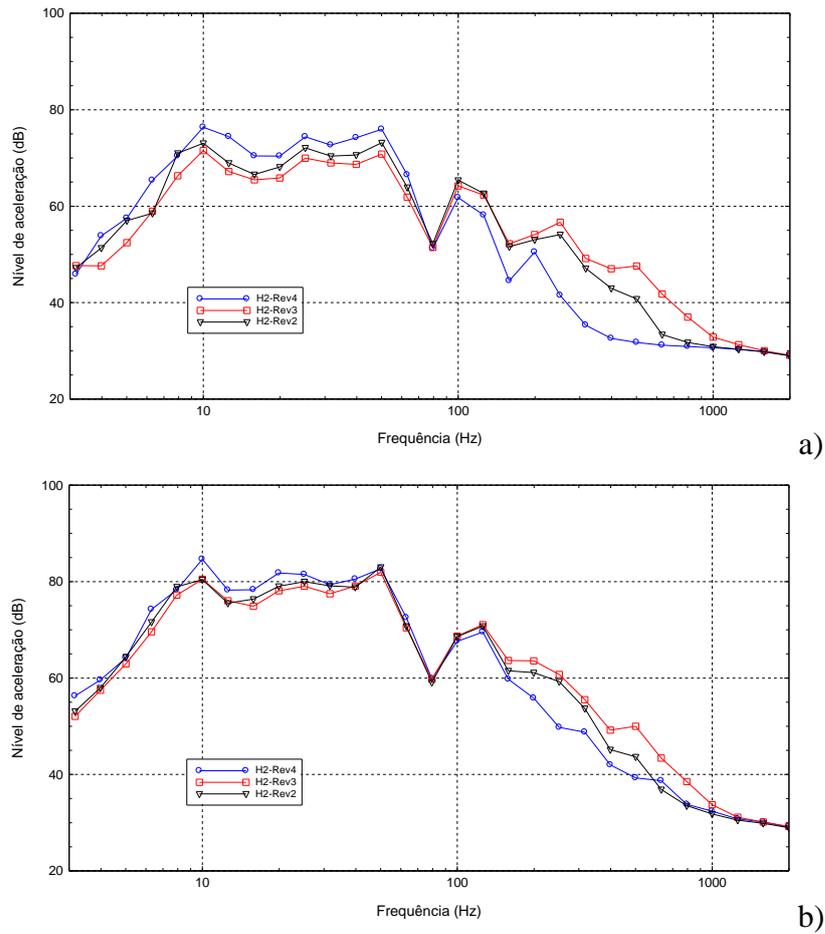


Figura 4.24 – Análise comparativa dos três revestimentos com a solução pesada H2: a) Esfera de 10kg a 0,80m; b) Esfera de 30kg a 0,80m

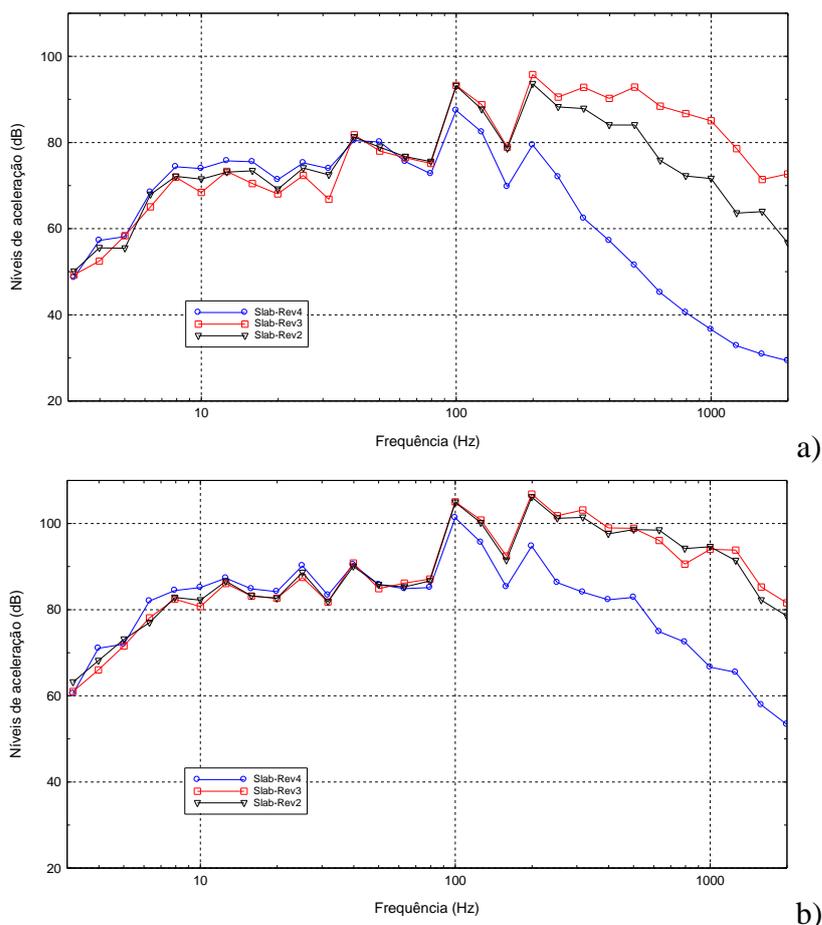


Figura 4.25 – Análise comparativa dos três revestimentos com a laje de betão como base: a) Esfera de 10kg a 0,80; b) Esfera de 30kg a 2,00m

4.6 Medições no topo da solução construtiva

Os níveis de aceleração no topo das soluções construtivas podem ser causadores de desconforto para os utilizadores do espaço onde elas são instaladas. Por questões de brevidade, escolheram-se, também, apenas algumas soluções específicas para fazer esta análise. Para cada solução será analisado o efeito do revestimento aplicado.

Apresentam-se resultados para a solução leve L4, a solução pesada H2 e ainda para a laje de betão armado. São apenas apresentados níveis de aceleração registados para a queda da esfera de 30kg da altura de 0,80m.

Na Figura 4.26 apresentam-se os níveis de aceleração registados na face superior da laje de betão armado com os três revestimentos. Verifica-se que, para bandas de frequências mais

baixas, o revestimento R3 tem melhor desempenho, mas para bandas de frequência mais altas o revestimento R4 apresenta menores níveis de vibrações.

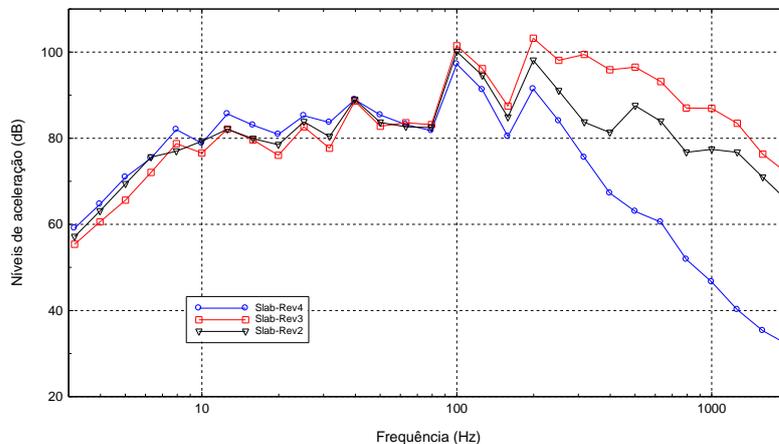


Figura 4.26 – Níveis de aceleração médios no topo da laje de betão armado

A Figura 4.27 apresenta os níveis de aceleração obtidos para a solução leve L4. É observável que o revestimento utilizado tem pouca influência no nível de vibração. No entanto, para bandas de frequências mais altas o revestimento R4 conduz a níveis de aceleração mais baixos.

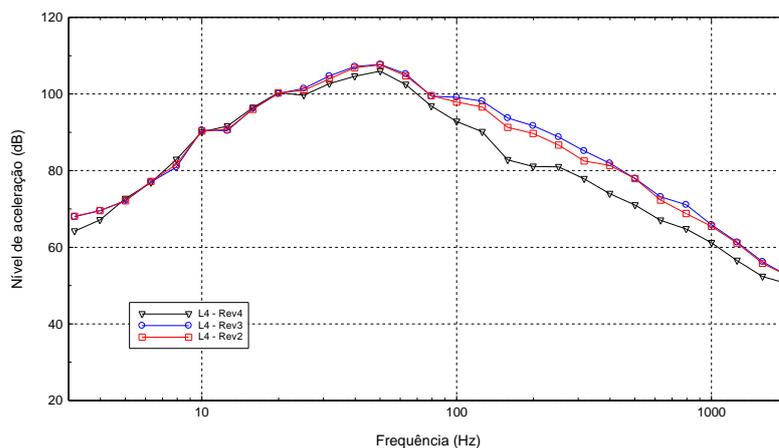


Figura 4.27 – Níveis de aceleração médios no topo da solução leve L4

A Figura 4.28 apresenta os níveis de vibração registados no topo da solução construtiva pesada H2. Para a solução H2 a influência dos diferentes revestimentos já se torna mais evidente. Para bandas de frequências mais baixas o revestimento R3 apresenta melhor comportamento face às vibrações. No entanto, comparando com a solução leve L4, nas frequências mais altas a influência dos três revestimentos já se torna mais evidente, sendo o revestimento R4 o que conduz a menores níveis de vibração.

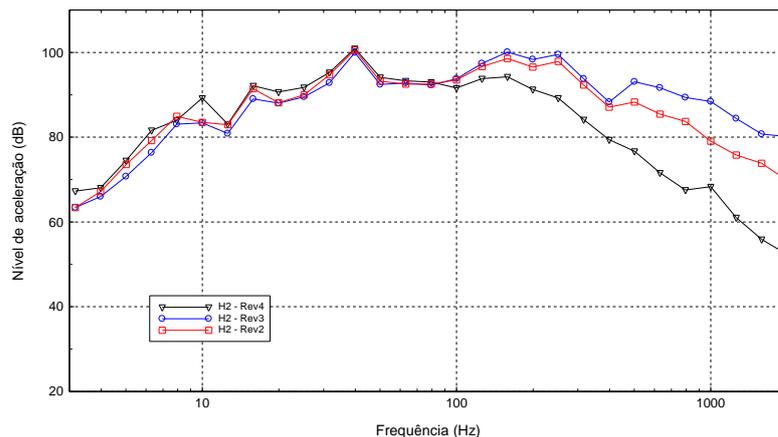


Figura 4.28 – Níveis de aceleração médios no topo da solução pesada H2

Comparando o nível de vibração, considerando apenas o revestimento R4, para as três situações apresentadas, verifica-se que para baixas frequências, até aos 100Hz, a solução leve é a que apresenta níveis de aceleração mais elevados. No entanto, para bandas de frequências mais altas, apresenta desempenho semelhante à solução pesada, mas pior comportamento comparando com a laje de betão armado despida. Verifica-se, assim, que nessa gama de frequências, um pavimento flutuante promove, em cima, um nível de vibração superior que um pavimento rígido.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A caracterização laboratorial da atenuação conferida por soluções de piso destinadas a instalações desportivas permitiu avaliar comparativamente diversas soluções construtivas de pavimentos flutuantes, leves e pesadas, com incorporação de apoios resilientes.

Na gama de frequências analisada, a presença de lã de rocha na caixa-de-ar tem muito pouca influência na atenuação de vibrações tanto para soluções leves como pesadas. No entanto, confere pequenas melhorias às soluções nas gamas de frequências mais altas.

Verificou-se que para soluções leves o aumento da caixa-de-ar aparenta não contribuir para o aumento da atenuação de vibrações. No entanto, quando é introduzida grande quantidade de energia no sistema, o aumento da caixa-de-ar apresenta-se benéfica para bandas de frequência mais altas. Para soluções construtivas pesadas, quanto maior for a caixa-de-ar menor é a atenuação de vibrações para bandas de frequências mais baixas mas, para bandas de frequências mais altas, o aumento da caixa-de-ar mostra-se benéfico.

Constatou-se que a diminuição da rigidez dos apoios melhora, globalmente, o desempenho das soluções, tanto para as tipologias leves como pesadas. Este efeito torna-se mais evidente com o aumento da energia introduzida no sistema, nas soluções leves. Nas soluções construtivas pesadas, a diminuição da rigidez dos apoios também contribui para a atenuação das vibrações em quase toda a gama de frequências.

A introdução das camadas de reforço nas soluções construtivas leves não introduz variações muito significativas nas soluções, embora melhore ligeiramente o comportamento das mesmas. No entanto, para maiores níveis de energia introduzidos no sistema, a solução reforçada apresenta pior comportamento em algumas bandas de frequência. A troca da camada resiliente de CDM-DAMP5 para CDM-ACUSEAL não provoca variações significativas nas baixas frequências mas para frequências mais altas o desempenho da solução tende a melhorar.

Nas soluções pesadas a colocação de uma tela resiliente entre as placas de OSB e a laje de betão não introduz variações significativas na atenuação das vibrações.

De entre os revestimentos analisados, a sua influência é notória quando são colocados sobre a laje de betão (laje de base), sendo o revestimento CDM-GYM-ELAST-30 aquele que

apresenta o melhor desempenho, especialmente nas altas frequências. Quando os revestimentos são colocados sobre uma solução leve ou pesada a sua influência não é tão evidente. Contudo, quando os revestimentos são colocados sobre a solução leve L4, de uma forma geral, o revestimento CDM-GYM-ELAST-30 destaca-se pela positiva. Quando os revestimentos são colocados sobre a solução pesada H4, continua a ser mínima a diferença de comportamento para bandas de frequências baixas. No entanto, para frequências mais altas o revestimento R3, linóleo com 3 mm de espessura, é o pior enquanto que o revestimento R4, CDM-GYM-ELAST-30 com 30mm de espessura, é aquele que evidencia um melhor desempenho.

Refira-se, ainda, que qualquer das soluções de isolamento combinadas estudadas, leves ou pesadas, apresentam um desempenho muito superior ao obtido apenas com a colocação do revestimento de piso sobre uma laje de betão.

No que toca às vibrações no topo das soluções construtivas observou-se que os níveis mais baixos de aceleração foram obtidos para o revestimento R3, linóleo com 3 mm de espessura, para frequências mais baixas e para o revestimento CDM-GYM-ELAST-30 nas frequências mais altas, para a laje de betão armado despida e para a solução pesada. Relativamente à solução leve, os revestimentos apresentaram menor influência na variação dos níveis de aceleração.

Como trabalhos futuros propõe-se a avaliação do isolamento a sons áreas e sons de percussão das soluções ensaiadas, da durabilidade dos sistemas a cargas cíclicas e a variações de humidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, D. E. (1990). Building Vibrations from Human Activities. *Concrete International: Design & Construction*, 12, 66-73.
- Bard, D., Davidsson, P., & Wernberg, P. (2010). Sound and Vibrations investigations in a multi-family wooden frame building, (August), 1–6
- BS6472, Evaluation Of Human Exposure To Vibration In Buildings (1 Hz to 80 Hz) - Guide For The Evaluation Of Human Exposure To Whole-Body Vibration, 1992.
- Chen, J., Xu, R., & Zhang, M. (2014). Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupant walking. *Journal of Sound and Vibration*, 333(15), 3564–3579
- Chung, L et al (2013). Semi-active tuned mass dampers with phase control. *Journal of Sound and Vibration*, 332, 3610-3625.
- Cossolino, L., & Pereira, A. (2010). "Amortecimento: classificação e métodos de determinação." ATCP Engenharia Física, São Carlos – Brasil
- Ellis, B. R. & Ji, T. (1994). Floor vibration induced by dance-type loads: verification. *The Structural Engineer*, 72
- Ewins, D. J. (1984). "Modal Testing: Theory and Practice". Research Studies Pres LTD, England
- Fahy, F & Gardonio, P. (2007). "Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response". Academic Press, Elsevier
- Falati, S. (1999). "The contribution of non-structural coponents to the overall dynamic behaviour of concrete floor slabs". Doctoral Thesis, New College, Oxford
- Gartenburg, P. (2014). Comparing low frequency impact noise using a tapping machine and heavy / hard impact source on various fitness floor assemblies, *Inter Noise*
- Griffin, M. J. *Handbook of Human Vibration*. Elsevier Academic Press, London, 1990.
- Gupta, S. et al (2007). Prediction of vibrations induced by underground railway traffic in Beijing. *Journal of Sound and Vibration*, 310, 608–630.
- Gutierrez, F. (2008). "Vibration Serviceability of Floors for sensitive occupancies", Master Dissertation, University Of Sheffield, Sheffield

-
- Hanson, Carl E. et al (2006). “Transit Noise and Vibration Impact Assessment”. U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, Report Number FTA-VA-90-1003-06
- Hivoss. (2007). Human Induced Vibration of Steel Structures Vibration Design of Floors Background Document.
- Hopkins, Carl (2007). “Sound Insulations”. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- ISO 2631-2 – “Evaluation of human exposure to whole-body vibration – part 2: continuous and shock induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz)”, International Standard Organization, 2003
- Kwok et al (2009). Perception of Vibration and occupant comfort in wind-excited tall buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, 97, 368 – 380.
- Mohamed Fahmy, Y. G., & Sidky, A. N. M. (2012). An experimental investigation of composite floor vibration due to human activities. A case study. *HBRC Journal*, 8(3), 228–238
- Nelson, J. T., (1996). Recent Developments in Ground-Bourne Noise and Vibration Control *Journal of Sound and Vibration*, 193, 367–376.
- Ohlsson, S. U. – “*Floor vibrations and Human discomfort*”, department of structural engineering, Chalmers University of Technology, 1982
- Racic, V. et al (2009). Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review. *Journal of Sound and Vibration*, 326(1-2), 1–49.
- Shi, W., et al (1996). Assessment of the sound insulation of a wood joist construction due to different types of impact sources. *Applied Acoustics*, 48(3), 195–203
- Silva, T. (2013). “Avaliação da transmissão de vibração num edifício existente”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Técnico de Lisboa, Lisboa
- Thambiratnam, David P. et al, (2012) Human activity-induced vibration in slender structural systems. *Structural Engineering International*, 22(2), pp. 238-245.