

AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES AMBIENTAIS EM EDIFÍCIOS PROVOCADAS POR SOLICITAÇÕES DINÂMICAS IMPULSIVAS – CASO DE ESTUDO

PACS no. 43.40.Kd

Diogo Mateus¹; Andreia Pereira¹

¹ CICC, Universidade de Coimbra, e-mail: {diogo, apereira, lgodinho} @dec.uc.pt
Departamento de Engenharia Civil, Pólo 2, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal

ABSTRACT

The generalized increase of noise emissions and particularly environmental vibrations constitutes cause of annoyance and is also an important factor of buildings' degradation which may even endanger human lives. Traditionally these dynamic loads occurred outside buildings that need protection, but with the increase of certain activities and equipments inside buildings, which are able to generate significant vibrations it is increasingly common the coexistence of the vibration source and of the space that needs protection in the same building. Within this scope, in the present work an evaluation assessment and vibration control are carried out taking into account a case study concerning the practice of weightlifting in a gymnasium located in the ground floor of a multi-storey building.

RESUMO

O aumento generalizado das emissões de ruído e em particular de vibrações ambientais constitui não só um fator de incomodidade, como também um fator de degradação dos edifícios, podendo mesmo colocar em risco vidas humanas. Tradicionalmente estas solicitações dinâmicas ocorriam fora dos edifícios a proteger, mas, com a multiplicidade de equipamentos e atividades no interior dos edifícios, é cada vez mais frequente a coexistência da fonte de vibração e dos recetores sensíveis no mesmo edifício. Neste contexto, é apresentado neste trabalho um estudo de avaliação e controlo de vibrações, num caso de estudo, referente à prática de halterofilismo em ginásio.

1. INTRODUÇÃO

A exposição de edifícios a vibrações ambientais, decorrentes de solicitações externas e internas, pode traduzir-se não só num fator de degradação para os edifícios como também, cada vez com mais frequência, num fator de incomodidade, em particular para utilizações sensíveis, nomeadamente em edifícios habitacionais. São exemplos de fontes tradicionais de

solicitações dinâmicas dos edifícios: os sismos; o desmonte de maciços; a exploração de pedreiras; a cravação de estacas; a demolição de edifícios por implosão; o tráfego ferroviário, algumas atividades industriais; e o funcionamento de equipamentos com partes rotativas de elevada potência [1,2,3]. No interior dos edifícios, a multiplicidade de equipamentos mecânicos, nomeadamente em instalações técnicas, pode originar também vibrações significativas, mas estas traduzem-se geralmente sobretudo sob a forma de ruído, não tendo habitualmente impacto significativo sobre a sua estrutura.

No presente artigo, é apresentado um caso de estudo, onde para além de excesso de ruído transmitido por via aérea e estrutural, existe uma fonte/atividade específica que origina a transmissão de vibrações significativas ao edifício, e para a qual se centra este artigo. Esta fonte/atividade corresponde à prática de aulas de “crossfit” em ginásio integrado em edifício habitacional, mais especificamente treinos de halterofilismo. Efetivamente a queda de halteres com massa superior a 100 kg, de uma altura muitas vezes superior a 1.5 m, acima do piso, pode introduzir um impacto muito significativo na estrutura do edifício, quer para a estabilidade do edifício, quer sobretudo de incomodidade para os ocupantes do edifício. Antes da apresentação deste caso de estudo é ainda apresentado neste artigo um resumo dos critérios de admissibilidade previstos em documentação de referência nacional e em normas internacionais, e que foram considerados como referência no presente trabalho. Na parte final do artigo é também apresentada uma solução construtiva de minimização de vibrações, e avaliado o seu previsível desempenho.

2. DOCUMENTAÇÃO NORMATIVA APLICÁVEL

Apesar de existir no nosso país legislação específica e detalhada para a prevenção e controlo de ruído (no Regulamento Geral do Ruído, aprovado pelo Decreto Lei nº 9/2007, de 17 de Janeiro), não existem requisitos regulamentares com vista ao controlo de vibrações excessivas em edifícios, existindo apenas uma norma Portuguesa, publicada há mais de 30 anos, que se aplica especificamente a vibrações impulsivas e cuja propagação ocorre sobretudo através do solo de fundação (NP 2074:1983). Deste modo, nos parágrafos seguintes são apresentados, de forma sumária, diferentes critérios de admissibilidade indicados em documentos técnicos nacionais e internacionais, na avaliação de vibrações. Estes critérios baseiam-se na medição da velocidade de vibração (em mm/s), expressa na generalidade dos casos no valor máximo de pico (p.p.v.) e pontualmente no valor eficaz (r.m.s.).

De acordo com a norma NP2074 [4], a grandeza utilizada corresponde à velocidade máxima de pico, medida na fundação do edifício, durante a ocorrência da solicitação, e determinada a partir das três componentes da velocidade máxima de vibração, medidas nas três direções (x, y e z). Para efeitos de avaliação, este valor máximo não deve exceder o valor da velocidade de vibração limite, definido em função das características do terreno de fundação, do tipo de construção e do número médio de solicitações diárias, conforme indicado na Tabela 1. Esta norma foi entretanto revista, sem que exista a sua publicação oficial, tendo sido propostas pequenas alterações a estes limites, decorrentes em particular da introdução de um novo intervalo de solicitações, com a inclusão de um número de solicitações diárias superior a 100 e a criação de correspondentes limites inferiores de velocidade máxima da vibração, com valor próximo de metade do valor indicado para 3 ou menos solicitações diárias [2,3].

Tabela 1 - Valores limites da velocidade máxima (em módulo) da vibração impulsiva na base da edificação, impostos pela norma NP2074.

V_L (mm/s) Tipo de solo ► ▼ Tipo de construção	Incoerentes soltos e coerentes moles ($c < 1000$ m/s)	Incoerentes compactos e coerentes duros (1000 m/s $< c < 2000$ m/s)	Coerentes rijos ($c > 2000$ m/s)
Sensíveis	1,75 - 2,5	3,5 - 5	7 - 10
Correntes	3,5 - 5	7 - 10	14 - 20
Reforçadas (de betão armado)	10,5 - 12,5	21 - 30	42 - 60

Nota: Os primeiros valores são adequados para um número diário de solicitações superior a 3; e os segundos para três ou menos solicitações diárias.

No caso de vibrações continuadas, e apesar de também ainda não ter sido publicado em norma, a comissão CT28 elaborou um documento onde propôs os limites de velocidade de vibração eficaz, segundo a componente mais significativa, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Valores limite velocidade de vibração eficaz (continuada), segundo a componente mais significativa, propostos pela CT28 para futura publicação de norma.

v_{ef} (mm/s)	Tipo vibração ►	Duração inferior a 1 hora/dia	Duração superior a 1 hora/dia
▼ Tipo de construção			
Sensíveis (monumentos e outros edifícios históricos, hospitais, casas antigas em centros históricos, depósitos de água, chaminés de alvenaria, etc.)		1	0,7
Correntes (edifícios de habitação em boa alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc.)		2	1,8
Reforçadas (edifícios com estrutura em betão armado, edifícios industriais recentes, etc.)		5	5

Vários países da europa adotaram também limites para a velocidade de vibração de pico, onde se destaca a norma alemã DIN 4150 [5], a norma italiana UNI 9916 [6], e as normas inglesas BS 7385 [7,8] e BS 5228 [9]. Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos limites da velocidade de vibração de pico apresentados por estas normas, considerando apenas os limites mais restritivos, neste caso, retirados das normas DIN 4150 e UNI 9916. A norma BS 5228 apresenta também limites com vista a evitar danos estéticos, que supostamente são mais restritivos que os referentes a danos estruturais, mas, nesta norma, estes acabam por ser menos conservadores que os indicados nesta Tabela 3.

Tabela 3 - Valores limites da velocidade de vibração de pico (em mm/s) propostos pelas normas DIN 4150 e UNI 9916.

Tipo de edifício	Danos estruturais para vibrações de curta duração				Danos estruturais para vibrações permanentes
	<i>Na fundação do edifício</i>			Pontos altos	<i>Toda a estrutura</i>
	De 1 a 10 Hz	De 10 a 50 Hz	> 50 Hz	Global	Global
Edifícios industriais e construções estruturalmente similares	20	20 (f=10Hz) a 40 (f=50 Hz)	40 (f=50Hz) a 50 (f≥100 Hz)	40	10
Edifícios residenciais e construções similares	5	5 (f=10Hz) a 15 (f=50 Hz)	15 (f=50Hz) a 20 (f≥100 Hz)	15	5
Edifícios sensíveis, como monumentos e outros edifícios históricos	3	3 (f=10Hz) a 8 (f=50 Hz)	8 (f=50Hz) a 10 (f≥100 Hz)	8	2,5

Em relação à incomodidade para os seres humanos, no interior dos edifícios onde se requer concentração e sossego, não existe normalização portuguesa aplicável, mas o LNEC propõe o critério indicado na Tabela 4 [3].

Tabela 4 - Valores limite velocidade de vibração eficaz (continuada), segundo a componente mais significativa (em mm/s), propostos pelo LNEC para situações de incomodidade [3].

v_{ef} (mm/s)	Sensação
$v_{ef} < 0,11$	Nula
$0,11 < v_{ef} < 0,28$	Perceptível, suportável para pequena duração
$0,28 < v_{ef} < 1,10$	Nítida, incómoda, podendo afetar as condições de trabalho
$v_{ef} > 1,10$	Muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho

3. CONDIÇÕES DE ENSAIO E EQUIPAMENTO UTILIZADO

As medições vibrações, cujos resultados se apresentam no presente artigo, foram realizadas utilizando o seguinte equipamento (Figura 1):

- Analisador portátil (Symphonie - 01dB), ligado a um PC portátil, com a aquisição e o tratamento das medições efetuados através de software específico;
- Acelerómetros do tipo ICP (PCB Piezotronics 352B).

O edifício onde se encontra instalado o ginásio em estudo é composto por duas caves de estacionamento, os pisos 0 e 1 destinados a comércio e/ou serviços e os pisos 2 a 5 destinados a habitação (existindo algumas habitações no piso 5 em duplex, com habitação ao nível do Piso 6). Os pontos de medição considerados foram na própria laje de piso do ginásio (ao nível do piso 0 do edifício, conforme Figura 1, sensivelmente a 3 m de distância da zona de impacto), na laje de piso de estabelecimento comercial situado ao nível do piso 1 (sobre a zona de queda de pesos) e na laje de piso da habitação do último piso (Piso 5, na prumada vertical sobre a zona de queda de pesos).

As fontes utilizadas nos ensaios corresponderam à queda de pesos (halteres), a cerca de 1.7 m de altura acima do piso, com massas que variaram entre os 60 e os 100 kg. Para a massa mais elevada de 100 kg, para além da queda dos pesos diretamente sobre o piso, foi também testada a queda sobre placas flexíveis com cerca de 40 mm de espessura, com vista a averiguar qual o benefício destas placas, que já existiam no ginásio e que, por vezes, eram utilizadas.

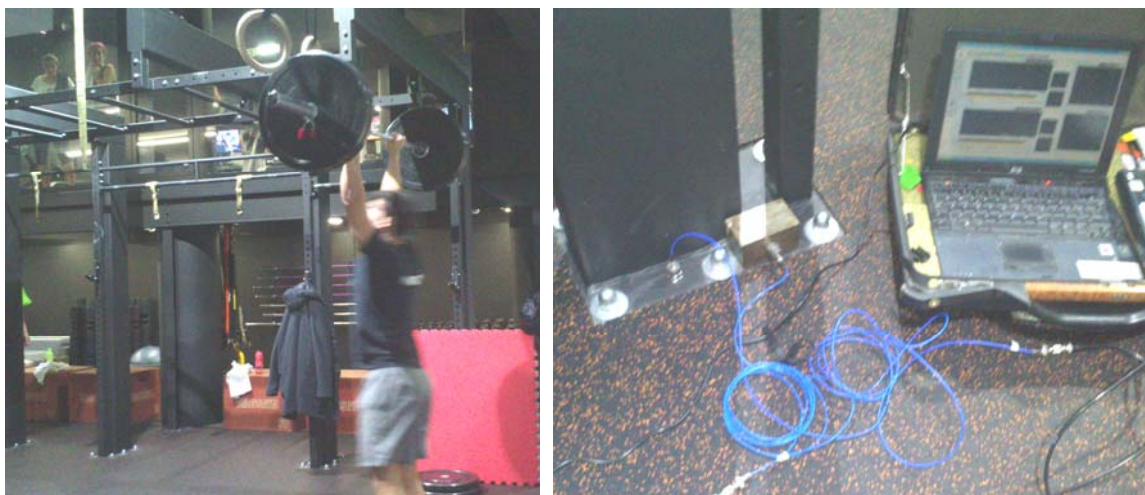


Figura 1 – Imagem ilustrativa do levantamento e queda dos halteres, e local de medição ao nível do Piso do ginásio (piso 0 do edifício).

4. RESULTADOS

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados alguns dos resultados obtidos para os valores instantâneos (no domínio do tempo) da velocidade da vibração segundo a componente vertical (z), obtidos com o levantamento e queda de halteres sobre a laje de piso do ginásio, para diferentes massas de halteres e com e sem a utilização de placas flexíveis de amortecimento dos pesos. Foram também avaliadas as componentes horizontais de vibração, mas os valores de pico obtidos, como seria de esperar, foram substancialmente inferiores. No caso das medições ao nível da laje do Piso 1, estas foram realizadas sem o conhecimento dos responsáveis do ginásio, pelo que não foi possível saber qual o peso correspondente e a altura de queda. Estas corresponderam a medições de “longa duração” e serviram também para avaliar a frequência com que este tipo de solicitação ocorria ao longo do dia e da semana, pelo que não são apresentados resultados neste artigo. Contudo, as amplitudes máximas registadas foram um pouco inferiores a duas vezes o registado no Piso 5, para a situação de altura de queda de 1,7 m e 100 kg de peso, sobre o piso. O espetro correspondente a estes picos

máximos apresentava uma variação em frequência com alguma semelhança com o registado na laje do Piso 0, com a gama de maior amplitude centrada sensivelmente nos 100 Hz.

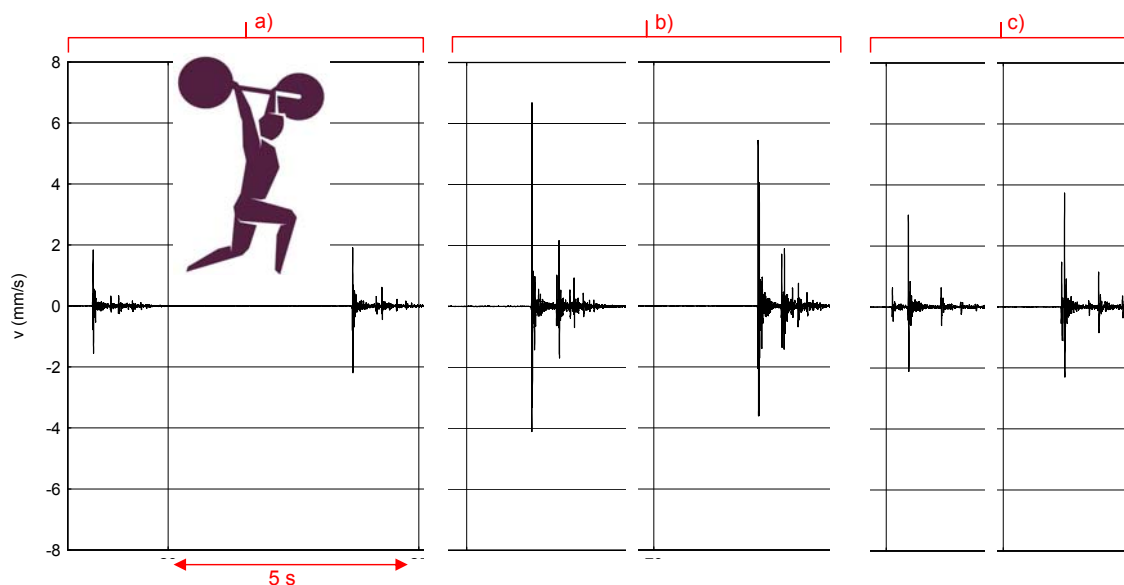


Figura 2 – Valores instantâneos da velocidade de vibração (componente vertical) registados na laje do Piso 0, na sala de halteres, para a situação de queda de halteres a cerca de 1.7m de altura com massa total próxima de: a) 60 kg sobre o piso; b) 100 kg sobre o piso; c) 100 kg sobre placas flexíveis de 40 mm, sobre o piso.

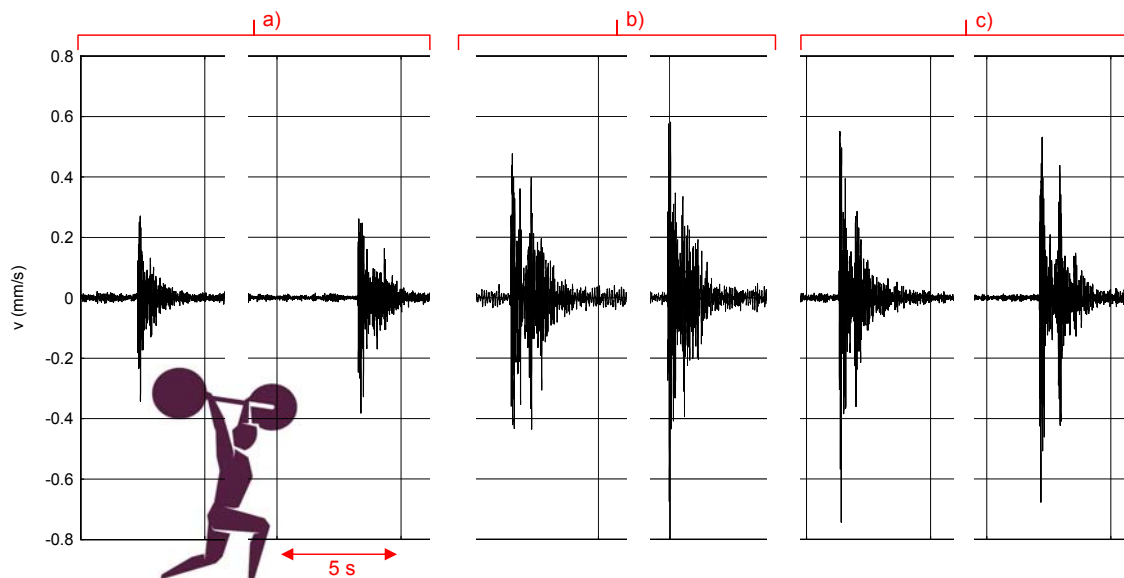


Figura 3 – Valores instantâneos da velocidade de vibração (componente vertical) registados na laje do Piso 5 para a situação de queda de halteres a cerca de 1.7m de altura com massa total próxima de: a) 60 kg sobre o piso; b) 100 kg sobre o piso; c) 100 kg sobre placas flexíveis de 40 mm, sobre o piso.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os espectros em frequência, obtidos nas mesmas condições dos resultados apresentados respetivamente nas Figuras 2 e 3. Para cada espectro são considerados apenas os valores máximos em cada banda de frequência. Estes resultados foram determinados a partir dos valores máximos da aceleração (divididos por $2\pi f$) dos multiespectros adquiridos com $\Delta t = 20ms$ (com 50 espectros adquiridos por segundo).

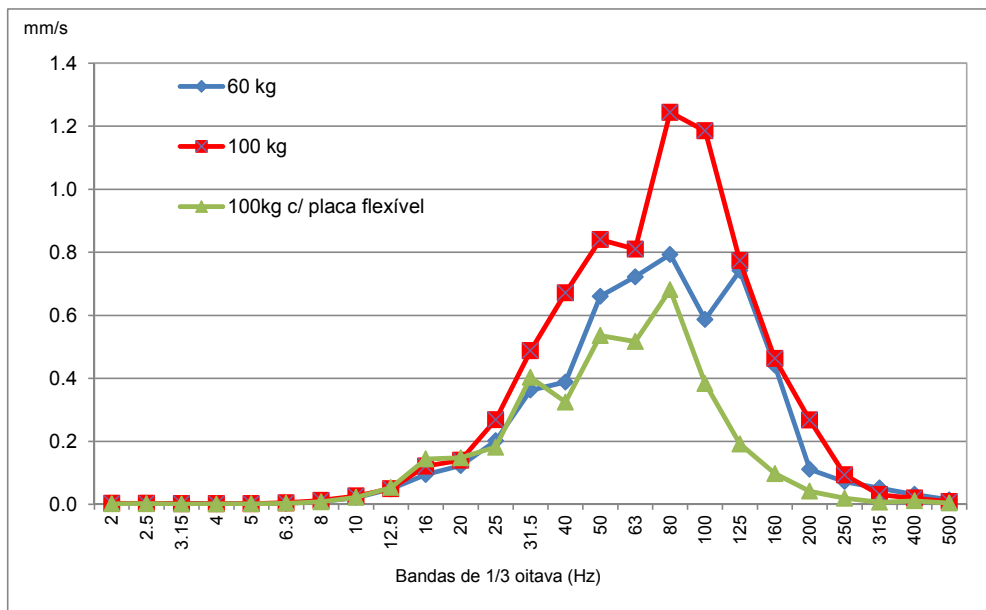


Figura 4 – Valores máximos da velocidade de vibração (componente vertical), para o pico máximo, no domínio da frequência, registados no próprio piso da sala de halteres, para a queda de halteres de 60 e 100 kg, incluindo a queda de 100 kg sobre placa flexível.

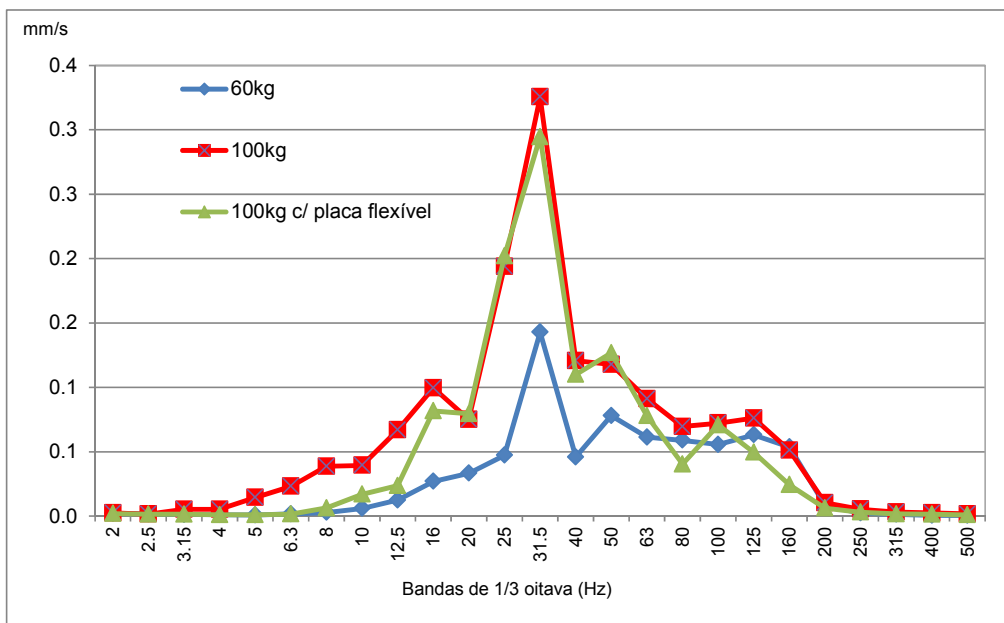


Figura 5 – Valores máximos da velocidade de vibração (componente vertical), para o pico máximo, no domínio da frequência, registados na laje do Piso 5, para a queda de halteres de 60 e 100 kg, incluindo a queda de 100 kg sobre placa flexível.

Da análise dos resultados obtidos é possível verificar que a velocidade máxima de pico atinge valores próximos de 1 mm/s (contabilizando as direções x, y e z), na laje de piso da habitação do 5º Piso, e de 9 mm/s na própria laje de piso do ginásio (a cerca de 3 m da zona de queda dos halteres). Na habitação, a gama principal de frequências abrange sobretudo as bandas de 1/3 de oitava de 25 e 31,5 Hz. No ginásio, junto à zona de emissão, a gama é mais alargada, abrangendo sobretudo as bandas de 1/3 de oitava entre 31,5 e 160 Hz. A aplicação de placas flexíveis no piso, como amortecimento da queda dos halteres, minimiza significativamente a vibração ao nível da laje de piso do ginásio (junto à emissão), mas conduz a uma redução de vibrações praticamente desprezável ao nível da habitação do 5º Piso.

Face aos resultados registados durante a queda dos halteres, verifica-se que ao nível da habitação do 5º Piso as amplitudes das velocidades máximas de vibração são inferiores aos

diversos limites apresentados no ponto 2 deste artigo. Contudo, do ponto de vista da incomodidade e de eventuais “danos estéticos”, os valores obtidos podem já considerar-se excessivos. Ao nível da laje do Piso 0, no interior do Ginásio, as amplitudes das velocidades máximas de vibração já atingem valores consideráveis, podendo ser consideradas excessivas, mesmo do ponto de vista estrutural, em particular para solicitações muito repetidas e prolongadas no tempo.

5. SOLUÇÕES DE MINIMIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Com vista à minimização da transmissão de vibrações ao edifício foi proposta a construção de uma plataforma antivibratória em toda a área da sala de treino de halterofilismo, sobre a qual se aplicaria o revestimento de piso pretendido. Uma vez que as solicitações registadas ao nível dos locais de ocupação sensível do edifício apresentam uma forte componente em frequências muito baixas, com particular relevância nas bandas de frequência centradas em 25 e 31.5Hz, a solução antivibratória a adotar deverá apresentar uma frequência de ressonância claramente inferior a 10 Hz, e uma conseqüente grande espessura. Entre várias soluções estudadas, umas com apoios antivibratórios discretos, e outras com um material flexível contínuo, optou-se pela solução com placas contínuas de aglomerado de espuma de poliuretano flexível com 120 mm de espessura e, sobre estas, a aplicação de uma plataforma em derivados de madeira com cerca de 40 mm de espessura total (materializada com duas placas cruzadas de 20+20 mm, e com juntas desencontradas). Sobre esta plataforma será aplicado o revestimento de piso pretendido para este tipo de local, que será também constituído por material resiliente (à base de aglomerado de borracha) com espessura não inferior a 10mm. A plataforma em derivados de madeira deverá ficar rigidamente desligada de todos os elementos construtivos do edifício (paredes e estrutura), através da criação de uma junta vertical flexível com cerca de 30 mm de espessura.

A execução desta solução tem sofrido alguns atrasos e à data de conclusão deste artigo ainda não se encontrava executada, pelo que não foi possível apresentar resultados experimentais obtidos após a execução da solução proposta. Prevê-se, no entanto, que, para as situações mais desfavoráveis, a redução da transmissão de vibrações possa atingir valores da ordem de 10 dB, ao nível do Piso 5 do edifício, e de 20 dB, na própria laje de piso da sala de treino de halterofilismo (Piso 0). Ou seja, na velocidade de vibração máxima, prevê-se uma diminuição dos valores de pico da ordem de 3 vezes, ao nível do Piso 5, e de 10 vezes, ao nível do Piso 0. Nos restantes pisos superiores, entre o Piso 1 e o Piso 4, para locais sensivelmente na mesma prumada vertical, prevê-se uma diminuição da velocidade de vibração ligeiramente superior à do Piso 5, tanto mais elevada quanto menor for o nível do piso em questão. Futuramente, após a execução da solução construtiva adotada, prevê-se a realização de medições acústicas, para situações análogas às indicadas no ponto 3 deste artigo, que permitirá avaliar com rigor as efetivas melhorias conseguidas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi apresentado um caso de estudo, correspondente ao funcionamento de uma atividade de um ginásio, mais especificamente numa sala de treino de halterofilismo, onde se verificava uma forte transmissão de vibrações a todo o edifício onde se inseria o ginásio. Apesar dos valores de pico das velocidades de vibração não atingirem valores muito alarmantes para a estrutura do edifício, os valores registados são bastante relevantes no que se refere à incomodidade e aos eventuais “danos estéticos”, que podem começar a aparecer no interior do edifício. Do ponto de vista da incomodidade os valores obtidos aproximavam-se do limiar indicado para a sensação de “muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho”. Relativamente aos eventuais danos estéticos, a ação continuada deste tipo de solicitações, com a amplitude registada, poderá também originar o aparecimento de fissuração, sobretudo em elementos não estruturais e mais próximos da zona do ginásio, e a deterioração de alguns revestimentos interiores. Apesar do piso do ginásio na zona de halteres ser constituído por revestimento com algum amortecimento, à base de aglomerado de borracha, este revelou-se insuficiente na redução de transmissões à estrutura. Mesmo que apresentasse uma espessura maior ou se aplicasse sobre ele uma camada flexível suplementar,

provavelmente não seria o suficiente para minimizar a transmissão de vibrações para valores considerados aceitáveis, como demonstrado através dos ensaios com placas flexíveis com cerca de 4 cm de espessura.

Face aos resultados obtidos, foi proposta uma solução para minimização da transmissão de vibrações ao edifício, mas que ainda não foi executada. Esta solução passou pela criação de uma plataforma de piso antivibratória, com 120 mm de material resiliente, 40 mm de derivados de madeira e um revestimento de piso igualmente resiliente, à base de aglomerado de borracha, com uma espessura não inferior a 10 mm. Após a correta execução desta solução prevê-se uma redução significativa das vibrações transmitidas ao edifício, que será tanto maior quanto maior for a proximidade do ponto recetor à sala de treino de halterofilismo. Apesar de esperar que a queda de pesos continue a ser perceptível no interior das habitações do edifício, após a implementação da solução proposta, é previsível que a amplitude das velocidades de vibração possa ser considerada aceitável, ficando muito abaixo dos limites apontados pelos vários documentos normativos aplicáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] Bachmann, H., Ammann, W., Vibrations in Structures Induced by Man and Machines. IABSE Structural. Engineering Documents, 1987.
- [2] Bernardo, P., Gama, D., Sugestões para melhoria da Norma Portuguesa de controle de vibrações em construções. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, 2006.
- [3] Schiappa F., Patrício J., Critérios de Danos e de Incomodidade no Domínio das Vibrações Ambientais. Ingenium, 2ª Série, Nº 72, Janeiro 2003, p. 84-88.
- [4] NP 2074:1983. Valores limite da velocidade máxima em módulo da vibração na base da edificação. Normas: IPQ, Portugal, 1983.
- [5] DIN 4150-1,3:1999. Structural vibration. Part 1: Prediction of vibration parameters. Part 3: Effects of vibration on structures. Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1999.
- [6] UNI 9916:2004. Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2004.
- [7] BS 7385-1:1990. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings. British Standards Institution, London, 1990.
- [8] BS 7385-2:1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings - Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration. British Standards Institution, London, 1993.
- [9] BS 5228-1,2:2009. Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites. Part 1: Noise, Part 2: Vibration. British Standards Institution, London, 2009.