TECNIACUSTICA VALENCIA · 2015

46º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON VIRTUAL ACOUSTICS AND AMBISONICS

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE VIBRAÇÕES AMBIENTAIS NA ESTRUTURA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS - DOIS CASOS DE ESTUDO

PACS: 43.40.Kd

Diogo Mateus; Telmo Dias Pereira
Departamento de Engenharia Civil, FCT da Universidade de Coimbra
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade, 3030-788 Coimbra, Portugal
Tel. +351-239797196
Fax +351-239797190
diogo@dec.uc.pt ; telmo@dec.uc.pt

ABSTRACT

The general increase in noise emissions, and in particular from environmental vibrations in the vicinity of structurally sensitive buildings, as with the majority of architectural and historical heritage, is a degradation factor of these buildings. In this paper we present two case studies, where we proceeded to monitoring vibrations and ambient noise in order to assess the impact of any excessive noise levels and vibration on the structure of two old buildings. The used noise sources correspond to the performance of live music shows, with very high sound levels and issued within close distance of such buildings.

RESUMO

O aumento generalizado das emissões de ruído e em especial de vibrações ambientais na proximidade de edifícios estruturalmente sensíveis, como acontece com a generalidade do património arquitetónico e histórico, constitui um fator de degradação destes edifícios. No presente artigo são apresentados dois caso de estudo, onde se procedeu à monitorização de vibrações e de ruído ambiente, com vista a avaliar o impacto de eventuais níveis sonoros excessivos e de vibrações sobre a estrutura de dois edifícios antigos. As fontes principais consideradas corresponderam à realização de espetáculos de música ao vivo, com níveis sonoros muito elevados e emitidos a curta distância dos referidos edifícios.

1. INTRODUÇÃO

A exposição de edifícios a vibrações ambientais, decorrentes de solicitações externas e internas, pode traduzir-se não só num fator de incomodidade, em particular para utilizações sensíveis como os edifícios habitacionais, como também num fator de degradação para os próprios edifícios, em particular em edifícios estruturalmente sensíveis. 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.

Neste contexto, é apresentado de seguida um resumo dos critérios de admissibilidade previstos em documentação de referência nacional e em normas internacionais, e, nos pontos seguintes, são apresentados e avaliados dois casos de estudo sujeitos a vibrações elevadas, mas nestes casos devido essencialmente a níveis de ruído excessivos, emitidos na sua proximidade. Apesar destas fontes não se enquadrarem nas fontes tradicionais de solicitações dinâmicas dos edifícios, em situações extremas, a sua influência sobre os edifícios e sobre os seus ocupantes pode ser preocupante.

O primeiro caso de estudo é referente ao Mosteiro de Santa Clara a Velha, construído em Coimbra durante o século XIV, onde se procedeu à monitorização de vibrações e de ruído ambiente, com vista a avaliar o impacto de eventuais níveis sonoros excessivos e de vibrações sobre a estrutura deste monumento (no âmbito de uma prestação de serviços através da ACIV, sediada no DEC-FCTUC). Este estudo foi realizado na sequência do desprendimento e queda de um elemento construtivo da abóbada deste monumento. Neste caso as principais fontes de ruído e de vibrações ambientais correspondem ao tráfego rodoviário em vias próximas, ao funcionamento pontual de equipamentos mecânicos nas proximidades, à realização esporádica de espetáculos musicais com níveis sonoros muito elevados (nas proximidades e mesmo no seu interior) e a fogo-de-artifício nas proximidades (aquando da celebração de algumas festividades da cidade). As medições de vibrações, e simultaneamente de ruído ambiente, foram realizadas para quatro tipos de situações distintas: para a situação normal, do dia-a-dia, onde a principal fonte corresponde ao tráfego rodoviário; para uma situação de ruído excessivo no interior do Mosteiro; para uma situação de realização de espetáculos de música ao vivo, com níveis sonoros muito elevados; e para a situação de fogo-de-artifício.

O segundo caso corresponde a um edifício antigo classificado (com um corpo habitacional e uma capela, do século XVII), numa pequena aldeia no norte de Portugal, cuja solicitação principal avaliada correspondeu à realização das festas populares de verão, que decorem anualmente durante cerca de uma semana. Apesar de níveis de ruído excessivos não constituírem geralmente um problema para a estrutura dos edifícios, neste caso, dada a grande proximidade entre o edifício monitorizado e o palco montado para essa festa popular (cerca de 10 m) e a elevada potência do sistema de som utilizado, que hoje em dia é bastante frequente neste tipo de festividades, mesmo em pequenos espetáculos musicais, como é o caso, as velocidades de vibração da estrutura do edifício podem atingir valores preocupantes.

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<1000m/s)	Incoerentes compactos e coerentes duros (1000m/s<c<2000m/s)	Coerentes rijos (c>2000m/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 de velocidade de vibração eficaz (continuada), segundo a componente mais significativa, propostos pela CT28 para futura publicação de norma.

v_{ef} (mm/s) Tipo vibração ► ▼ Tipo de construção	Duração inferior a 1 hora/dia	Duração superior a 1 hora/dia
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], a 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
	Na fundação do edifício			Pontos altos	*Toda a estrutura*
	De 1 a 10 Hz	De 10 a 50 Hz	> 50 Hz	Global	Global
Ed. industriais e construções estruturalmente similares	20	20 (f=10Hz) a 40 (f=50 Hz)	40 (f=50Hz) a 50 (f≥100 Hz)	40	10
Ed. residenciais e construções similares	5	5 (f=10Hz) a 15 (f=50 Hz)	15 (f=50Hz) a 20 (f≥100 Hz)	15	5
Ed. sensíveis (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 de 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
$0{,}11 < v_{ef} < 0{,}28$	Percetível, 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 de ruído ambiente e de vibrações, cujos resultados se apresentam no presente artigo, foram realizadas utilizando o seguinte equipamento (ver Figuras 1 e 2):

- 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).
- Sonómetro integrador (Solo Premium - 01dB, com microfone MCE212 e pré-amplificador PRE21S).
- Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica de ruído aéreo (DO12 – 01dB; ML 800 – INTER; RD10 – 01dB), apenas para o primeiro caso de estudo, para simulação de níveis de ruído ambiente muito elevados, no interior do Mosteiro.

Em ambos os casos de estudo as vibrações foram registadas sob a forma de acelerações, no domínio do tempo (incluindo medição áudio com 1250 leituras por segundo) e em frequência. Para obtenção das correspondentes velocidades de vibração, ao longo do tempo, a partir do registo das acelerações, foi aplicado um algoritmo FFT para obtenção da resposta em frequência da aceleração, calculada a velocidade em frequência e, finalmente aplicado o algoritmo inverso IFFT, para obtenção da resposta no tempo para a velocidade de vibração.

Figura 1 - 1º caso de estudo: locais de emissão de ruído e equipamentos de emissão e de medição: a) fonte omnidirecional; b) sonómetro no interior; c) analisador p/ registo de vibrações; d) sonómetro com tripé de 3 m no exterior.

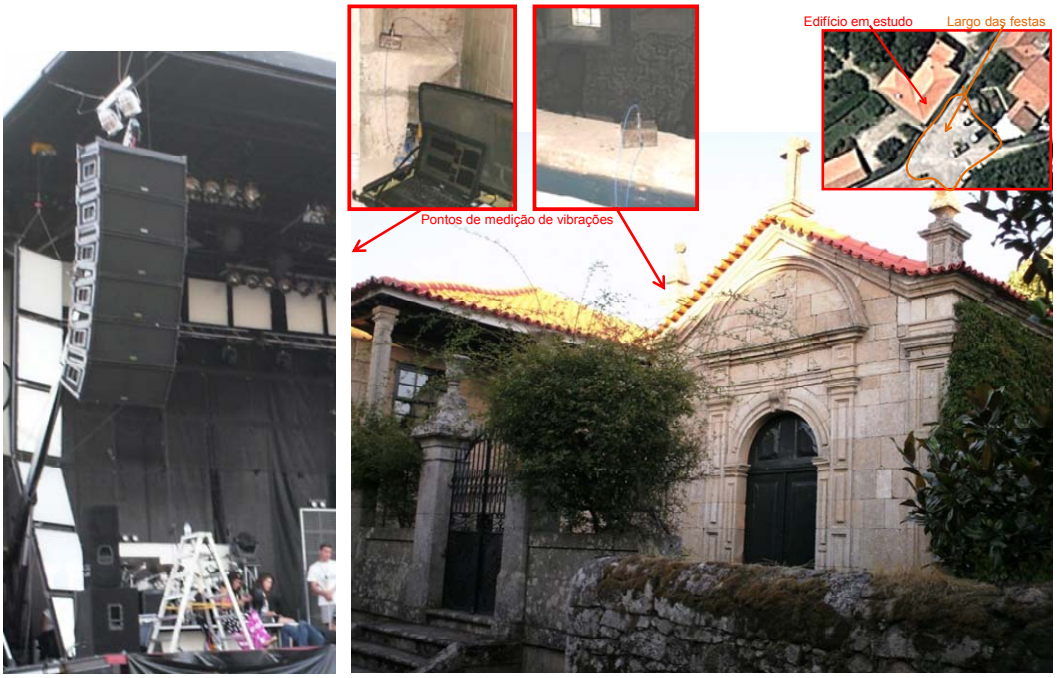

Figura 2 - 2º caso de estudo: fotografias ilustrativas do edifício monitorizado, da dimensão do palco e do sistema de som utilizado e do equipamento de medição utilizado.

4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES ACÚSTICAS E DE VIBRAÇÕES

As medições realizadas nos dois casos de estudo aqui apresentados, para diferentes condições de ensaio e de solicitações, permitiram obter grande quantidade de informação e uma análise exaustiva de ambas as situações, que foram objeto de estudos específicos anteriormente realizados. No âmbito do presente artigo apenas se apresentam alguns dos resultados considerados mais relevantes e exemplificativos.

4.1 Mosteiro de Santa Clara a Velha

Na Figura 3 são apresentados os níveis sonoros médios obtidos sobre a cobertura do mosteiro, no domínio da frequência, respetivamente para a parte mais desfavorável dos concertos e para o fogo-de-artifício. Na Figura 4 são apresentados os valores instantâneos da velocidade da vibração (no domínio do tempo), obtidos segundo o eixo horizontal (na direção perpendicular ao desenvolvimento do elemento em planta) para o ponto da estrutura situado na cobertura do Mosteiro (mais sensível às emissões exteriores) e para as duas situações mais desfavoráveis (períodos mais desfavoráveis dos concertos (a) e do fogo-de-artifício (b)). Na Figura 5 são apresentados os valores máximos da velocidade de vibração em frequência, também no ponto da estrutura da cobertura do Mosteiro, para dois concertos distintos e para o fogo-de-artifício. Refira-se que, a distância do palco dos concertos ao Mosteiro é da ordem de 170m e os rebentamentos do fogo-de-artifício ocorreram sensivelmente a 400m do Mosteiro.

Considerando todas as medições de vibrações efetuadas, e os diferentes cenários avaliados em cada ponto de medição, resultam aproximadamente os valores máximos de pico e valores médios (para situações de nível de som "quase contínua") da velocidade de vibração, para a componente mais desfavorável e para o global nas direções x, y e z, conforme indicado na Tabela 4. Além dos registos das vibrações, foram registados em simultâneo os níveis sonoros no exterior, sobre a cobertura do mosteiro, onde se registaram, para a situação de concerto mais desfavorável, que ocorreu entre as 02 e as 04h de 09/05/2013, valores médios de LAeq próximos de 72 dB(A), que por si só já é muito elevado, mas com a agravante do correspondente valor sem ponderação “A” (Leq) atingir cerca de 87 dB.

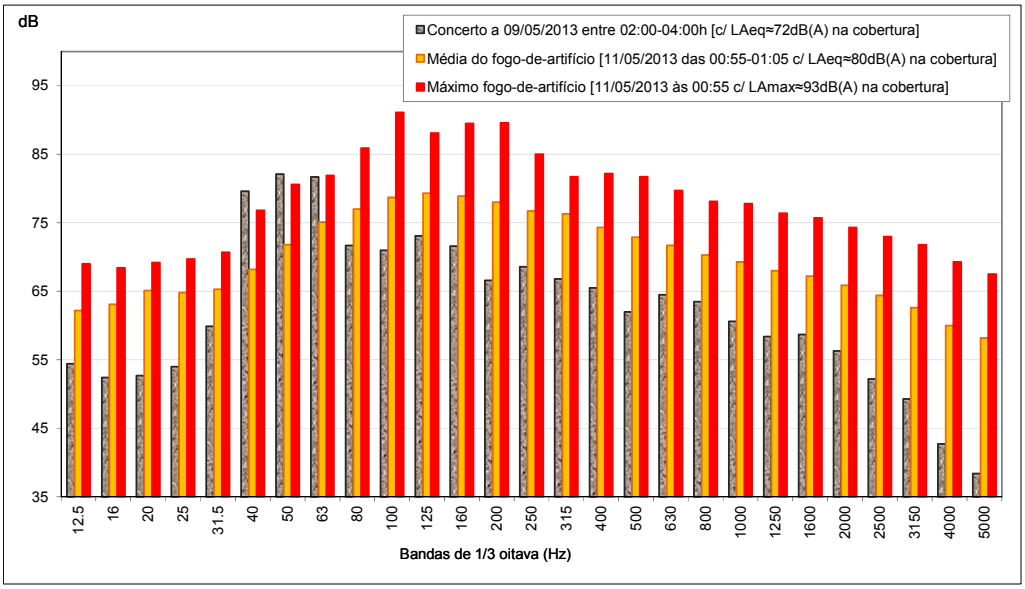

Figura 3 –Níveis sonoros médios (em dB), no domínio da frequência e o valor global LAeq, obtidos no exterior, sobre a cobertura do Mosteiro.

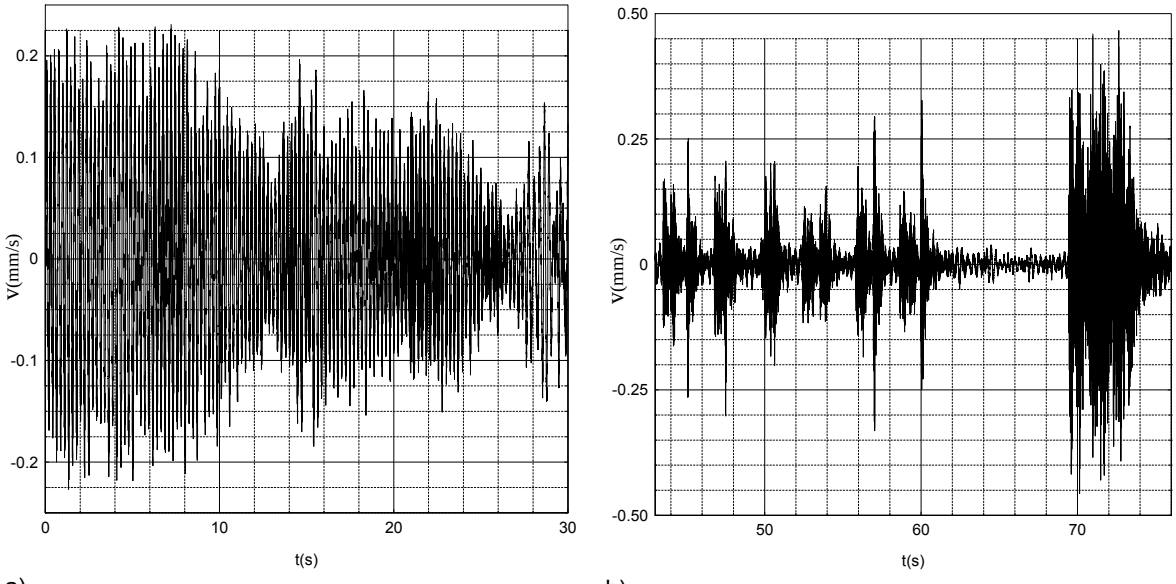

Figura 4 - Velocidade da vibração instantânea (componente horizontal), na cobertura do Mosteiro: a) para a parte mais desfavorável do concerto [LAeq≈73dB(A)]; b) para o fogo-de-artifício [com LAeq(10min)≈80dB(A) e LAeq(max.10s)≈93dB(A)].

Tabela 5. Velocidades máximas de pico e valores médios (em mm/s) no Mosteiro, para a componente mais desfavorável e para o global nas direções x, y e z, para os cenários avaliados mais desfavoráveis.

Situação	Tipo de velocidade de vibração	No interior (arco intermédio do Mosteiro)	No exterior (cobertura do Mosteiro)
Situação mais desfavorável com concerto	máxima de pico - horizontal	0,20	0,25
	máxima de pico - global	0,30	0,36
	média - horizontal	0,03	0,07
	média - global	0,05	0,10
Com fogo-de-artifício	máxima de pico - horizontal	-	0,50
	máxima de pico - global	-	0,70

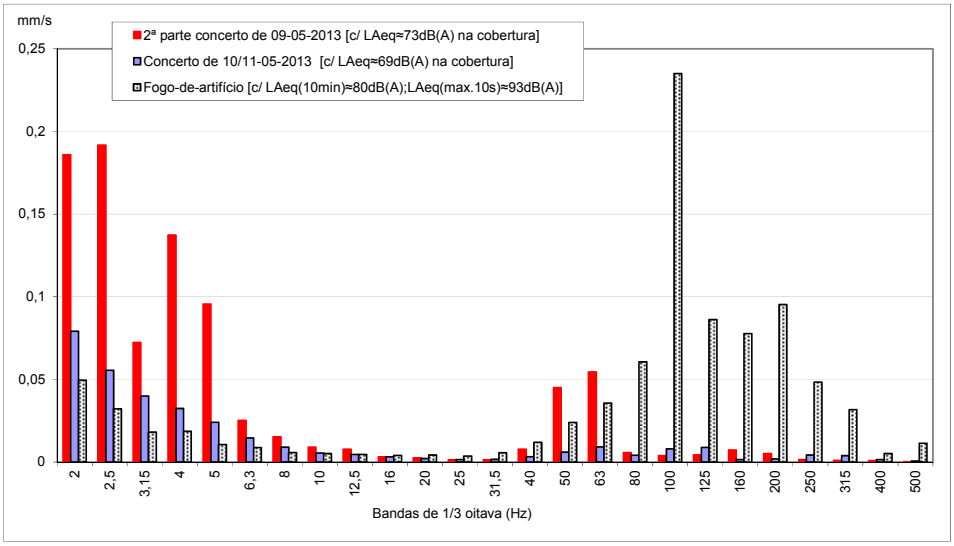

Figura 5 - Valores máximos da velocidade de vibração em frequência (componente horizontal, para o pico máximo, com $\Delta t = 20ms$), na cobertura do Mosteiro, para 2 concertos distintos e para o fogo-de-artifício.

Da análise dos resultados obtidos no Mosteiro, é possível concluir que, mesmo para as situações e cenários mais desfavoráveis, a amplitude das velocidades de vibração é inferior aos respetivos limites, indicados nas diferentes normas que serviram de referência a este trabalho. Na situação mais desfavorável (concerto no Parque da Canção) obteve-se um valor da velocidade efetiva (longa duração) próximo de 10% do limite aplicável. Para o caso do fogo-de-artifício (curta duração) o valor obtido foi próximo de 9% do limite aplicável.

4.2 Edifício habitacional antigo e capela do século XVII

No segundo caso de estudo, foram realizadas medições do mesmo tipo, mas neste caso com o registo de níveis sonoros muito superiores devido à grande proximidade entre os recetores sensíveis e o palco (localização das fontes principais de ruído), onde a distância era da ordem de 10 m no caso do edifício antigo e de cerca de 20 m no caso da capela. Na Figura 6 são apresentados os resultados de medições de ruído ambiente, no exterior, e de vibrações estruturais, na parede de fachada do edifício antigo classificado (num ponto mais desfavorável), registados durante as referidas festas populares de verão.

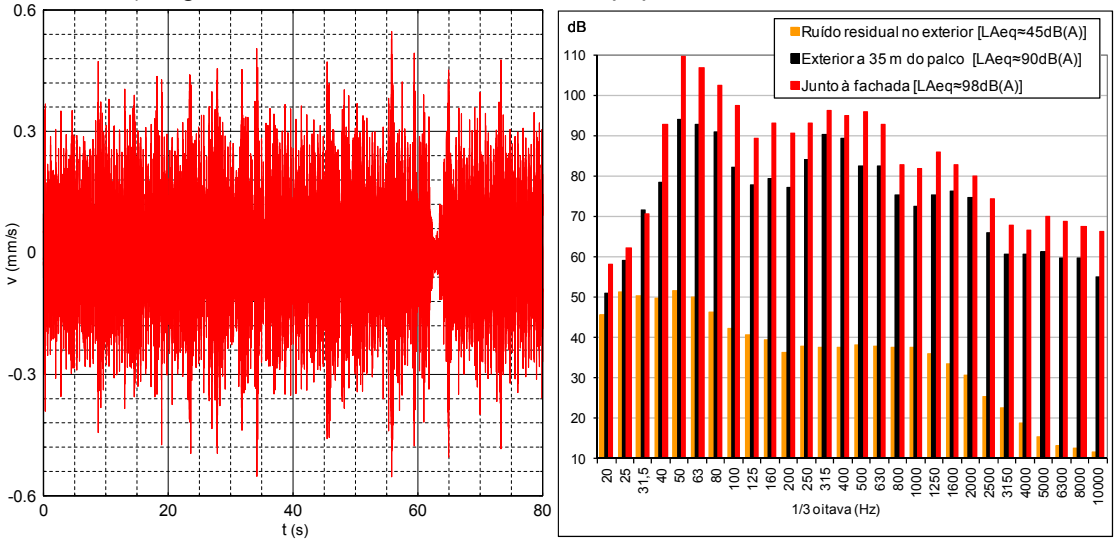

Figura 6 – Velocidade de vibração instantânea registada na parede de fachada do edifício antigo (à esquerda) e média dos espetros dos níveis de ruído (à direita), registados no exterior antes e durante a atuação de uma das bandas, nas festas populares de verão.

Da análise dos resultados anteriores, complementada com os restantes resultados obtidos durante os ensaios, verifica-se que, embora a velocidade de vibração, que no exemplo apresentado corresponde à componente horizontal, registada a cerca de 3 m acima da cota de piso exterior, seja significativamente inferior aos limites indicados na normalização aplicável, a sua continuação acelera o processo de degradação, com possibilidade de destacamento e queda de eventuais elementos instáveis. Neste ponto de medição, a velocidade máxima de pico global (x, y e z) foi próxima de 0,8 mm/s, enquanto que a velocidade efetiva na direção mais desfavorável (horizontal) foi próxima de 0,08 mm/s. Estes valores correspondem a cerca de 32% e 11% dos respetivos limites aplicáveis, para estruturas sensíveis. Nos elementos construtivos mais leves no interior do edifício, nomeadamente no pavimento em madeira, as velocidades de vibração eram muito superiores, configurando uma situação de incomodidade de vibrações, mas aqui a incomodidade relativamente ao ruido era muito mais intensa, passando de valores médios de LAeq no interior do edifício inferiores a 25 dB(A), na ausência das referidas festividades, para valores próximos de 60 dB(A), durante as festividades.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram apresentados dois casos de estudo (mosteiro e edifício antigo classificado), ambos estruturalmente sensíveis e com vibrações elevadas originadas por níveis de ruído excessivos, emitidos na sua proximidade. Apesar das velocidades de vibração não atingirem valores muito alarmantes para a estrutura destes edifícios, os valores registados são bastante relevantes no que se refere a eventuais “danos estéticos”. Para uma ação continuada deste tipo de solicitações, com amplitudes semelhantes às registadas neste trabalho, é natural o aparecimento e desenvolvimento de alguma fissuração na estrutura e nos elementos de compartimentação destes edifícios, podendo também verificar-se uma aceleração do processo de degradação e eventual queda de elementos mais instáveis, nomeadamente os de maior esbelteza, suspensos, de extremidade ou que se encontrem fissurados.

Face aos resultados obtidos, e ainda que não sejam muito alarmantes, em situações semelhantes às aqui analisadas, é recomendável a implementação de medidas para minimização de ruído e vibrações. Para o efeito, é importante a limitação dos níveis sonoros emitidos, em particular para baixas frequências (controlando os “sub graves”). No caso do fogo-de-artifício, este controlo poderá ser concretizado com a limitação das cargas explosivas a utilizar. São também muito importantes, nestes casos, as inspeções regulares e detalhadas, de forma a identificar eventuais situações de maior fragilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[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 fur 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.