

SUGESTÕES PARA MELHORIA DA NORMA PORTUGUESA DE CONTROLE DE VIBRAÇÕES EM CONSTRUÇÕES

SUGGESTIONS TO IMPROVE THE PORTUGUESE STANDARD FOR VIBRATION CONTROL IN CONSTRUCTIONS

Bernardo, Pedro; *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, pedro.bernardo@ist.utl.pt*
Dinis da Gama, Carlos; *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, dgama@ist.utl.pt*

RESUMO

Em Portugal vigora a NP2074, que visa limitar os efeitos nocivos que as vibrações podem causar em estruturas vizinhas aos trabalhos de escavação com explosivos, de cravação de estacas, ou de outros da mesma índole. Esta norma estabelece o valor limite para a velocidade da vibração de pico através de três factores, destinados a contemplar o tipo de construção, o tipo do terreno de fundação e a periodicidade diária das solicitações, diferindo da maioria das outras normas. Ademais, a ausência da frequência ondulatória, constitui uma limitação significativa à sua aplicação, dada a extrema e comprovada importância desse parâmetro, que é considerado necessário no contexto da maioria dos critérios de dano vigentes a nível internacional. Existe um projecto de revisão da Norma em apreço, o qual é aqui discutido, designadamente quanto à pressuposta relação intrínseca entre as litologias e as gamas de frequência expectáveis.

ABSTRACT

In Portugal, the NP2074 is used to prevent damage in constructions caused by vibrations, due to rock blasting excavation works, pile driving methods or similar geotechnical works. This standard fixes the maximum peak particle velocity, throughout three parameters, to consider structure sensitiveness, ground geology and quantity of solicitations per day, differing from similar international standards. Additionally, the absence of vibration frequency, comprise a severe limitation to his application, given to extreme and verified importance of this particular parameter, considered necessary in most vibration induced damage criteria, all over the world. A project of revision for this standard exists, which is here discussed, namely regarding the presumed inherent relation between ground geology and the expected range of frequencies.

1. INTRODUÇÃO

Genericamente, uma vibração é um movimento oscilatório de um material, sólido ou fluido, que foi afastado da sua posição de equilíbrio. Em Geotecnia, a vibração é tida como uma resposta elástica do terreno, constituído por solos e/ou rochas, à passagem de uma onda de tensão, com origem directa ou indirecta numa solicitação dinâmica, de génese natural ou artificial.

Na origem, as vibrações resultam da aplicação, aos terrenos, de forças exteriores, com um tempo de actuação muito curto, ou de forças aplicadas de modo contínuo, mas cuja intensidade seja muito variável ao longo do tempo. Sarsby [1] classifica as vibrações dos terrenos em três grupos:

- contínuas – quando um nível de vibração aproximadamente constante é mantido por um longo período de tempo (caso dos maciços de fundação de máquinas de regime alternativo, como bombas ou compressores, em funcionamento regular);

- transitórias – se os níveis de vibração resultam de um impacto súbito, seguido de um tempo de repouso relativamente prolongado (caso dos terrenos submetidos a compactação dinâmica ou a detonação de cargas explosivas isoladas); e
- intermitentes – no caso de se verificar uma sucessão de eventos vibratórios, cada um dos quais com pequena duração (caso da detonação de cargas explosivas microrretardadas, ou, perfurações por percussão).

Geralmente, as normas consideram apenas as vibrações contínuas e transitórias, designando-as por vibrações continuadas e impulsivas, respectivamente. Por exemplo, a ISO 4866 (1990), relativa a edifícios, distingue essas duas classes pela duração da solicitação e relaciona-as com a taxa de amortecimento relativo do edifício em apreço.

Para além das detonações de cargas explosivas, uma multiplicidade de outros eventos pode induzir um tipo de resposta semelhante nos terrenos. A consideração de outras fontes na origem do fenómeno, reveste-se de particular importância, quer para a análise de situações em que se verifique uma acumulação de efeitos, quer para estabelecer a situação de referência apropriada para a avaliação dos impactes causados pelas referidas detonações. De entre essas fontes cumulativas, destacam-se os sismos, o deslizamento súbito de massas rochosas ao longo de falhas geológicas, a cravação de estacas, a demolição de edifícios (particularmente, com explosivos), a utilização de equipamentos diversos e de veículos motorizados, cujas potências têm vindo a aumentar, para satisfazer propósitos de rentabilidade, etc. Esta acumulação de fontes conduz à presença e importância crescente das vibrações mecânicas como um factor de degradação ambiental, com implicações a nível de incomodidade para as pessoas, causa de danos no património arquitectónico e paisagístico, e origem da afectação de outros descritores, sensíveis às vibrações.

Os factores que concorrem para a diminuição das vibrações com a distância (Figura 1), são [1]: a expansão geométrica das ondas, a progressiva separação das três componentes (que provém das diferentes velocidades de propagação), a presença de descontinuidades nos maciços (causando reflexões, refrações, difracções e dispersões) e o atrito interno dinâmico característico das rochas.

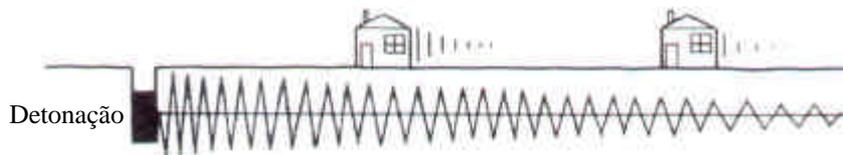


Figura 1 - Atenuação das vibrações com a distância [2]

Contudo, na prática, as ondas nem sempre se atenuam com a distância. Por exemplo, em meios estratificados e se a sua geometria o favorecer, as ondas podem concentrar-se ou sobrepor-se a outras reflectidas, chegando a medir-se maiores valores de amplitude da vibração em pontos sucessivamente mais afastados [3].

Porém, os efeitos das vibrações sobre as estruturas não dependem só da distância e do tipo da estrutura, mas também de outros factores, de entre os quais se destaca a litologia dos terrenos de fundação, sobre os quais as estruturas assentam, dado que os efeitos locais prevalecem [4]. A Figura 2 sugere diferentes efeitos das vibrações, em dois edifícios similares, equidistantes de uma detonação, um fundado em rocha e outro em solo.

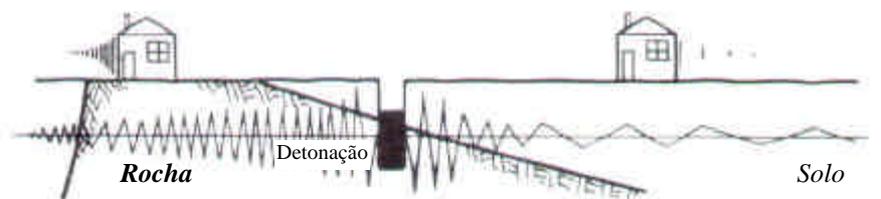


Figura 2 - Efeito da litologia do terreno de fundação nas velocidades vibratórias, em duas estruturas equidistantes duma detonação (modificado de [2])

Demonstra-se que, se a velocidade vibratória que atinge o edifício fundado em rocha (Figura 2), for v_r , que se considera igual à velocidade emitida pela detonação (em rocha), a velocidade vibratória que atinge o edifício fundado em solo (refractada na interface geológica), é dada pela seguinte expressão [5]:

$$v_s r_s c_s = \frac{2}{1 + \frac{r_r c_r}{r_s c_s}} v_r r_r c_r \Rightarrow v_s = \frac{2n}{1+n} v_r \quad (\text{Equação 1})$$

Obtida esta relação, conclui-se que, para as mesmas cargas detonadas às mesmas distâncias, as formações geológicas mais atenuadoras das amplitudes das ondas, dão origem a maiores velocidades vibratórias do que as formações menos dissipadoras de energia vibratória. Esta aparente contradição resulta do tipo de relação entre as velocidades vibratórias e as tensões dinâmicas (Equação 2).

$$\sigma_d = \rho \cdot c \cdot v \quad (\text{Equação 2})$$

Por este motivo, as litologias mais atenuadoras possuem simultaneamente menores valores de impedância ($\rho \cdot c$), o que explica como neles as tensões dinâmicas (σ_d) se atenuam mais rapidamente, embora o mesmo não ocorra para as velocidades vibratórias (v).

As normalizações vigentes em diversos países, inerentes às vibrações, são concordantes em admitir que os danos estruturais se correlacionam com a amplitude das ondas sísmicas presentes e que, de entre as grandezas físicas que a caracterizam, são as velocidades vibratórias que melhor se ajustam à referida correlação [6]. Dowding [7] também considera que, pelo facto de o dano estrutural resultar das tensões induzidas, o valor máximo da velocidade pode ser usado como um indicador das tensões dinâmicas verificadas (Equação 2).

Assim, um limite superior de $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ parece garantir a segurança dos edifícios construídos com uma resistência normal. Certos estudos estatísticos [6] revelam que, mais de 97 % dos casos de dano real estão associados a velocidades vibratórias superiores a $71 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Segundo esses estudos, 50 % das ocorrências de danos são verificados em construções submetidas a velocidades vibratórias da ordem de $137 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Verifica-se que existe um nítido efeito de filtragem, causado pelos terrenos de fundação, e que aparenta ser directamente proporcional à respectiva velocidade de propagação das ondas sísmicas [8]. Contudo, é claro que a relação típica frequência vs. litologia é importante e deve ser considerada para preconizar, mas não para normalizar, à partida.

2. A NORMA PORTUGUESA 2074

Em Portugal, vigora a Portaria n° 457/83, de 19 de Abril, que instituiu a Norma Portuguesa (NP) n° 2074 [9], intitulada "Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por

explosões ou solicitações similares", que visa limitar os efeitos nocivos que as vibrações podem motivar em estruturas vizinhas aos trabalhos de escavação com explosivos, de cravação de estacas, ou de outros da mesma índole. Esta norma estabelece, de um modo conservador, o valor limite para a velocidade da vibração de pico (v_L), como um produto de três factores (Equação 3), destinados a contemplar o tipo do terreno de fundação (α), o tipo da construção (β), e a periodicidade diária das solicitações (γ).

$$v_L = \alpha \beta \gamma \cdot 10^{-2} \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (\text{Equação 3})$$

Com o auxílio da equação anterior e dentro da gama possível das constantes α , β e γ , podem ser resumidas todas as situações previstas, e os correspondentes valores admissíveis, previstos na referida norma, conforme se ilustra na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites estabelecidos na NP 2074, para a velocidade da vibração de pico (mm.s^{-1})

Tipos de construção (que afectam os valores da constante β)	Características do terreno (que afectam os valores da constante α)					
	Solos incoerentes; areias e misturas areia-seixo bem graduadas; areias uniformes; solos coerentes moles e muito moles		Solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos; areias e misturas areia-seixo graduadas; areias uniformes		Rocha e solos coerentes rijos	
	$c_p \leq 1.000 \text{ m/s}$		$1.000 \text{ m/s} < c_p < 2.000 \text{ m/s}$		$c_p \geq 2.000 \text{ m/s}$	
	$\gamma = 1,0$	$\gamma = 0,7$	$\gamma = 1,0$	$\gamma = 0,7$	$\gamma = 1,0$	$\gamma = 0,7$
Construções sensíveis	2,50	1,75	5,00	3,50	10,00	7,00
Construções correntes	5,00	3,50	10,00	7,00	20,00	14,00
Construções reforçadas	15,00	10,5	30,00	21,00	60,00	42,00

Legenda: c_p - Velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais no terreno (rocha ou solo)
Nota: Em cada situação, a constante γ é aplicada no sentido de reduzir em 30% ($\gamma=0,7$) os valores da velocidade, caso se efectuem mais de três detonações diárias, ou seja, se for aplicada uma fonte vibratória permanente ou quase

A NP 2074 difere da maioria das outras normas, por envolver as características do terreno, em que as estruturas estão fundadas, e o número de eventos diários. O valor máximo admissível (da NP 2074) alcança 60 mm.s^{-1} , incorporando um elevado factor de segurança, apenas justificável para a prevenção de danos cosméticos nas estruturas. Contudo, a subjectividade na classificação do grau de resistência das estruturas pode tornar arbitrário o estabelecimento dos valores limite admissíveis. Ademais, a ausência da frequência ondulatoria nessa norma, constitui uma limitação significativa, dada a extrema importância desse parâmetro. De facto, a frequência da vibração é um parâmetro considerado necessário no contexto da maioria dos critérios de dano, vigentes a nível internacional, apresentados e discutidos em fase posterior deste trabalho.

Uma vez conhecido o limite a respeitar, com base no critério de prevenção de danos estruturais vigente, é necessário determinar a lei de propagação das vibrações adequada ao local, de modo a poder extrapolar a carga máxima que se poderá usar por retardo, desde que se encontre bem definida a distância à estrutura a proteger.

3. CRITÉRIOS INTERNACIONAIS

Para definir margens de segurança para as estruturas sujeitas a vibrações, existem numerosas normas e critérios, em vários países, descritos em diversos trabalhos ([10], [11], [2], [6], etc.), cuja principal função consiste em estabelecer limites admissíveis para os parâmetros envolvidos nos fenómenos vibratórios. A Tabela 2 resume alguns dos critérios mais conhecidos e permite ter uma ideia acerca da evolução dos mesmos, em termos dos parâmetros que utilizam para prever o dano estrutural.

Tabela 2 - Critérios de dano para estruturas submetidas a vibrações [6]

Parâmetros	Autores	Critério
Aceleração das vibrações (g: aceleração da gravidade)	Thoenen & Windes (1942)	$< 0,1 \text{ g} \Rightarrow$ segurança $0,1 \text{ a } 1 \text{ g} \Rightarrow$ precaução $> 1 \text{ g} \Rightarrow$ perigo
Relação de energia $R.E. = (a/f)^2$ (a: aceleração, f: frequência)	Crandell (1949)	$R.E. < 3 \Rightarrow$ segurança $3 < R.E. < 6 \Rightarrow$ precaução $R.E. > 6 \Rightarrow$ perigo
Velocidade de vibração máxima ou de pico (v)	Langefors (1958) Edwards (1960) Duvall e Fogelson (1962)	$0 < v < 5 \text{ cm.s}^{-1} \Rightarrow$ segurança $5 < v < 10 \text{ cm.s}^{-1} \Rightarrow$ danos menores $10 < v < 16 \text{ cm.s}^{-1} \Rightarrow$ danos moderados $16 < v < 23 \text{ cm.s}^{-1} \Rightarrow$ danos sérios $v > 23 \text{ cm.s}^{-1} \Rightarrow$ colapso parcial/total
Velocidade vibratória de pico e frequência (v,f)	USBM - RI 8507 (1981) Office of Surface Mining (1983) - EUA Norma UNE 22-381 (1993) - Espanha	$v < 0,2 \text{ cm.s}^{-1}; f < 1 \text{ Hz} \Rightarrow$ segurança $v < 2 \text{ cm.s}^{-1}; 1 < f < 10 \text{ Hz} \Rightarrow$ segurança $v < 5 \text{ cm.s}^{-1}; f > 30 \text{ Hz} \Rightarrow$ segurança

Os primeiros critérios utilizavam a aceleração das vibrações, que, mais tarde, foi substituída pela velocidade vibratória de pico, uma vez que as correlações com os danos observados assim o sugeriam.

Não é de estranhar que assim tenha acontecido pois, como já foi referido, existe uma proporcionalidade directa entre a velocidade de vibração e a tensão dinâmica associada às ondas sísmicas (Equação 2), e esta última é mais facilmente correlacionável com a resistência dinâmica das estruturas. De facto, os materiais usados nas fundações de estruturas, os quais têm diferido bastante ao longo da história da construção (madeira, alvenaria e, hoje, principalmente, betão) e que podem ser expressos pelas impedâncias que o caracterizam, reagem de forma distinta a uma mesma velocidade de vibração das partículas, em termos da tensão dinâmica verificada (Equação 2), face às resistências dinâmicas que apresentam.

Mesmo o critério de Crandell pode ser entendido como um critério relativo à velocidade, uma vez que a relação de energia que propôs (R.E.), é semelhante a cerca de $40.v^2$ atendendo a que

$$a=2.\pi.f.v. \quad (\text{Equação 4})$$

Como já foi referido, para além da velocidade, a maioria dos critérios de dano actuais envolve também a frequência característica das vibrações, essencialmente devido ao fenómeno da ressonância. Outro passo no sentido do desenvolvimento e aperfeiçoamento dos critérios, foi a introdução do tipo de estrutura a proteger, independentemente do tipo de terreno em que ela se encontra fundada. Este tipo de consideração tornou-se tão importante como a frequência de vibração, como pretendem demonstrar os seguintes exemplos (referidos em [3]):

- a norma alemã (DIN 4150) estabelece, para vibrações de curta duração, limites para o valor máximo de qualquer das três componentes da velocidade, entre 3 e 50 mm.s^{-1} , em função da sensibilidade do edifício e da frequência dominante;
- a norma suíça (SN 640312) estabelece valores limite admissíveis entre 3 e 40 mm.s^{-1} , conforme o tipo de construção, o tipo de vibração (impulsiva ou continuada) e a(s) frequência(s) dominante(s);
- a norma britânica (BS 7385) considera que, abaixo do valor de pico de $12,5 \text{ mm.s}^{-1}$ de qualquer uma das três componentes da velocidade de vibração, medida junto às fundações, há pouca probabilidade de ocorrência de danos, e os seus limites variam dos 15 aos 20 mm.s^{-1} , conforme o tipo de edifício e as frequências presentes.

A apresentação destas normalizações internacionais permite, por comparações levadas a cabo relativamente a cenários típicos, discutir a influência do parâmetro frequência da vibração, ausente na normalização portuguesa [9].

Por exemplo, considerando uma construção corrente, na óptica da NP 2074 (de acordo com a Tabela 1), próxima de um desmonte, atingida por uma vibração com a velocidade resultante de pico igual a 15 mm.s^{-1} , verifica-se que a admissibilidade legal deste valor é dependente de outros factores, isto é, do tipo do terreno de fundação ou da frequência da vibração, conforme se trate da NP 2074 ou do critério USBM (Tabela 2), respectivamente. Se for calculado o quociente entre as velocidades vibratórias admissíveis e esse valor de pico, como critério de aceitação (quando maior que a unidade), nos casos que a Tabela 3 ilustra, verifica-se uma incongruência.

Tabela 3 - Comparação de diferentes cenários com velocidade vibratória de pico igual (15 mm.s^{-1})

Fundação	Frequência (Hz)	$V_{NP\ 2074} / v$	V_{USBM} / v	Resultado
Solo	10	$10/15=0,67$	$12/15=0,80$	Inseguro, pelos dois critérios
Solo	50	$10/15=0,67$	$50/15=3,33$	NP não aceita, USBM aceita
Rocha	10	$20/15=1,33$	$12/15=0,80$	NP aceita, USBM não aceita
Rocha	50	$20/15=1,33$	$50/15=3,33$	Seguro, pelos dois critérios

Os valores da Tabela 3 sugerem que, na NP 2074, a inclusão do tipo do terreno (factor α) é imprópria, já que os valores da velocidade vibratória devem ser medidos sobre um elemento da fundação da estrutura, e isso já incorpora os efeitos que o terreno impõe na propagação e refração das ondas; é por este motivo que mais nenhum outro critério de dano inclui o tipo de terreno. Ademais, a Norma USBM (bem como qualquer uma das outras similares) conduzem a acelerações admissíveis muito diferentes para as várias frequências; de facto, com base na Equação 4, verifica-se que a relação entre as acelerações admissíveis para as altas e para as baixas frequências é cerca de 21 ($[2\pi \cdot 50 \cdot 50] / [2\pi \cdot 10 \cdot 12] = 20,8$); também em termos das tensões dinâmicas admissíveis (Equação 2), a relação entre as mais altas frequências e as baixas frequências é aproximadamente igual a 4 ($[\rho \cdot c \cdot 50] / [\rho \cdot c \cdot 12] = 4,16$); logo, os critérios que usam a variável frequência, também conduzem a certas incongruências, quando os seus valores admissíveis se expressam em termos das acelerações do movimento vibratório, ou das tensões dinâmicas associadas às ondas.

Parece pertinente discutir a necessidade de incluir o parâmetro frequência no critério de dano vigente em Portugal, à semelhança do que já acontece em outros países. De facto, a legislação em vigor noutros países (Tabela 2), ressalta a importância da aplicação deste parâmetro como medida essencial à prevenção de danos em estruturas por acção de vibrações, sendo, conseqüentemente, de consideração fundamental nos diagramas de fogo a projectar. A explicação física que suporta essa importância, está patente em numerosos estudos (referidos por [12]), que concordam em considerar a frequência da vibração como um parâmetro essencial no comportamento dinâmico da estrutura, particularmente se a frequência dominante da perturbação ondulatória (por exemplo, devida a uma detonação no terreno) for próxima da frequência natural da estrutura em apreço (fenómenos de ressonância).

Sabe-se que as respostas estruturais ocorrem não só por acção das solicitações dinâmicas transmitidas pelo terreno (actuando ao nível das fundações), mas também pelas que são transportadas na onda aérea (com conseqüências mais imediatas na designada superestrutura) cujo efeito, numa pega de fogo bem dimensionada e convenientemente executada (traduzida, essencialmente, num bom confinamento e atacamento das cargas), em termos de potencial de dano estrutural, é diminuto, quando comparado com as vibrações do maciço.

4. EFEITO DE FILTRAGEM DOS MACIÇOS

Usando um modelo simplificado, que exprime as propriedades dinâmicas de um maciço, por meio de um sistema com um grau de liberdade, constituído por uma massa associada a uma mola e um amortecedor, pode deduzir-se [8] que a frequência natural se exprime através da Equação 5, que aplicada aos terrenos de fundação traduz o efeito da espessura da camada de rocha aflorante (H) e da natureza dos terrenos definida através da sua velocidade de propagação das ondas longitudinais (c_p), sugerindo uma relação íntima entre a frequência natural e a litologia e volumetria da própria camada.

$$f_n = \frac{C_p}{2pH} \quad (\text{Equação 5})$$

Independentemente da espessura da camada em apreço, certos autores (por exemplo, Sarsby [1]) sugerem gamas de frequência preferenciais, em função da litologia do maciço. A Tabela 5 ilustra a ordem de grandeza dessas gamas de frequências, comparadas com as que podem ser obtidas pela Equação 5, para duas espessuras de terreno diferentes e para valores de c_p típicos.

Tabela 4 - Frequências preferenciais na transmissão de vibrações nos terrenos [8]

Tipo de terreno	C_p (m.s ⁻¹)	F r e q u ê n c i a s (H z)		
		Preferenciais (Sarsby, 2000)	de acordo com a Equação 5	
			H = 5 m	H = 10 m
Lama e argila, muito brandas	400	5 – 20	12,73	6,37
Argila branda e areias soltas	600	10 – 25	19,10	9,55
Britas, areias compactadas e argilas duras	1.250	15 – 40	39,79	19,89
Rochas brandas	2.500	30 – 80	79,58	39,79
Rochas duras	5.000	> 50	159,15	79,58

Verifica-se uma boa concordância entre os resultados obtidos com a Equação 5, que foram estabelecidos para maciços de fundação de estruturas, geralmente com alturas inferiores a 10 m, e os valores das frequências preferenciais para os vários tipos de terreno [1]. As referências bibliográficas a estas relações (frequência vs. litologia) são escassas e, na sua maioria, qualitativas, não definindo o tipo de rochas que, concretamente, têm lugar dentro de cada uma daquelas tipologias. Ademais, as gamas de frequências consideradas típicas intersectam-se entre si, dificultando a análise nos extremos dos intervalos sugeridos. Por exemplo, com base na Tabela 4, uma frequência qualquer entre 15 e 20 Hz poderá ser característica de qualquer um dos três primeiros tipos de terreno indicados na tabela. Tais abordagens qualitativas devem-se essencialmente à interferência de outros factores, sempre presentes, para além da litologia dos terrenos de fundação, que afectam igualmente a filtragem exercida pelo maciço, onde se destacam as suas heterogeneidades, descontinuidades, anisotropias e anelasticidade. Certos autores ([13] e [7]) desenvolveram numerosos estudos experimentais, realizados nos EUA, e referem que as explorações mineiras, ligadas à extracção de inertes a céu-aberto (Figura 3), tendem a produzir vibrações com menores frequências preferenciais do que as típicas das obras.

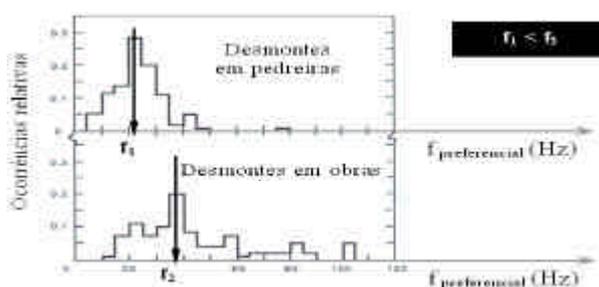


Figura 3 - Frequências preferenciais em obras de escavação (adaptado de [13])

Tal constatação leva a considerar que outros factores, para além da litologia, podem estar na base destas desigualdades, designadamente o factor de escala, traduzido pela dimensão dos desmontes e as distâncias entre as escavações e as estruturas mais próximas. De facto, as obras envolvem, geralmente, menores volumes de rocha a detonar (por retardo) e, também, menores distâncias às estruturas, aspectos que estão relacionados com o seu enquadramento físico, muitas vezes urbano. Assim, estes dois parâmetros juntam-se à litologia (tal como sugere a Equação 5) quando há que estimar a frequência preferencial de um qualquer terreno.

5. ACTUALIZAÇÃO DA NP 2074 (DISCUSSÃO DO PROJECTO DE REVISÃO EXISTENTE E APRESENTAÇÃO DE NOVA PROPOSTA DE REVISÃO DA NP 2074)

No que concerne à actualização da NP 2074, parece consensual que o parâmetro frequência deverá ser introduzido na atribuição dos valores admissíveis de velocidade vibratória, embora de forma indirecta, por serem os elementos de fundação das estruturas que deverão ser instrumentados e não os terrenos de fundação. De facto, parece incorrecto forçar a normalização do valor da velocidade vibratória admissível à litologia, a qual tem significativa importância na determinação da frequência, tal como foi referido, mas que é afectada por outros factores, nomeadamente pela distância verificada entre os pontos de solicitação e registo. Assim, por exemplo, pode acontecer que a determinadas distâncias da solicitação, considerando um maciço rochoso granítico, se verifiquem valores de frequência que seriam típicos de um calcário. Se esta diferença rondar o limite que está previsto para a separação dos dois tipos de terreno, no projecto de revisão da NP 2074 (Tabela 5), ou seja 40 Hz, pode-se cair numa situação de incumprimento, já que, por um lado, se tem um terreno “rijo”, com velocidade de propagação superior a 2000 m.s^{-1} , e por outro, se está em presença de uma frequência inferior a 40 Hz, devido a outros factores que não a litologia (tal como o demonstram estudos de campo levados a cabo por Bernardo, 2004). Esta situação implica, considerando o projecto de revisão da NP2074, uma diferença que é igual ao dobro, em termos de velocidade vibratória admissível no alvo.

Tabela 5 - Projecto de revisão da NP2074 (adaptado de [3] e [14])

v_L (mm.s^{-1})	Frequência predominante no espectro de $ v_i(t) $		
	$f < 10 \text{ Hz}$	$10 < f < 40 \text{ Hz}$	$f > 40 \text{ Hz}$
	Tipos de terrenos		
Tipos de Construção:	Solos fracos (s_1) $c < 1.000 \text{ m.s}^{-1}$	Solos médios (s_2) $1.000 < c < 2.000 \text{ m.s}^{-1}$	Solos rijos (s_3) $c > 2.000 \text{ m.s}^{-1}$
Construções sensíveis (e_1)	1,3 - 1,8 - 2,5	2,5 - 3,5 - 5,0	5,0 - 7,0 - 10,0
Construções correntes (e_2)	2,5 - 3,5 - 5,0	5,0 - 7,0 - 10,0	10,0 - 14,0 - 20,0
Construções reforçadas (e_3)	6,5 - 9,0 - 12,5	12,5 - 17,5 - 25	25,0 - 35,0 - 50,0
Notas: 1 – os primeiros valores são adequados para um número total de vibrações superior a cem; os segundos para um número diário de vibrações superior a três; e os terceiros valores valem para três ou menos vibrações diárias; 2 – a grandeza a medir é a componente mais significativa da velocidade de vibração (PPV); 3 – “f” é a frequência predominante no espectro de velocidade.			

Outra peculiaridade da normalização portuguesa é a consideração do número de eventos diários (através da constante γ), que aliás aparece no projecto de revisão da norma com a sua importância acrescida (Tabelas 1 e 5). A este propósito, compreende-se, de certo modo, a preocupação em estabelecer valores máximos admissíveis conservadores para muitas solicitações diárias (superior a cem) o que estará relacionado com as operações de cravação de estacas ou desmonte mecânico de maciços, particularmente quando se recorre a martelos hidráulicos de impacto. Porém, nestes casos as velocidades vibratórias serão certamente mais baixas, do que as correspondentes velocidades vibratórias para o desmonte com explosivos, para

as mesmas distâncias. De facto, verifica-se a ausência deste factor nas normalizações estrangeiras em vigor (Tabela 2).

Também a subjectividade na classificação do grau de resistência das estruturas pode tornar arbitrário o estabelecimento dos valores limite admissíveis.

A opção de passar a considerar a componente da velocidade vibratória mais significativa pode ser discutível, na medida em que diferentes situações podem justificar um e outro critério. Por exemplo, a velocidade vibratória resultante é a mesma (20 mm.s^{-1}) nos seguintes casos:

- 1º) $v_T=11,55 \text{ mm.s}^{-1}$; $v_L=11,55 \text{ mm.s}^{-1}$; $v_V=11,55 \text{ mm.s}^{-1}$; e
- 2º) $v_T=20 \text{ mm.s}^{-1}$; $v_L=0 \text{ mm.s}^{-1}$; $v_V=0 \text{ mm.s}^{-1}$.

Os efeitos sobre as estruturas, deverão ser agravados no segundo caso, mas na presença de uma situação do primeiro tipo, o critério actualmente usado na NP 2074 é mais conservador.

A opção de considerar as frequências por cada direcção, é importante nos casos em que as normas estabelecem os valores máximos da velocidade através apenas da maior amplitude dos picos, o que se preconiza no projecto de revisão, em detrimento do maior vector resultante (como na actual NP 2074). A este propósito parece conveniente assinalar que, nos termos da análise que pode ser levada a cabo acerca dos modos de vibração, especialmente se se tratarem de fundações esbeltas (por exemplo estacas profundas), a consideração de uma única frequência, associada ao pico, pode não ser representativa e pode não ser a mais conservadora, pelo que se recomenda sempre o recurso às análises da transformada de Fourier (FFT), procurando o valor da frequência dominante correspondente. A frequência pode ser prevista, para efeitos de dimensionamento dos esforços dinâmicos máximos a aplicar (por exemplo, através do cálculo das cargas explosivas máximas a usar por retardo), através de recurso a casos de obra que digam respeito a situações similares ou através de um conjunto de cargas teste, levadas a cabo especificamente para o efeito.

Assim, com base no que foi referido e tirando partido do conhecimento de outras normalizações similares, designadamente a norma alemã (DIN 4150), sugere-se uma revisão da NP2074, relativamente mais simples e consentânea com o actual estado dos conhecimentos, procurando evitar situações de arbitrariedade relativamente a parâmetros cujas relações com as respectivas respostas estruturais não são bem conhecidas.

Tabela 6 – Proposta de revisão da NP2074, para a velocidade da vibração de pico (mm.s^{-1}) medida num elemento da estrutura solidário com a fundação da mesma

Tipo de estrutura*	v_L (mm.s^{-1})	Frequência dominante - obtida por FFT		
		$f \leq 10 \text{ Hz}$	$10 < f \leq 50 \text{ Hz}$	$f > 50 \text{ Hz}$
Estruturas sensíveis		2,5	5	10
Estruturas correntes		5	10	20
Estruturas reforçadas		15	30	60

O gráfico mostra a velocidade de vibração de pico (PVS) em mm/s em função da frequência em Hz. Há três níveis de vibração representados por linhas tracejadas: Est. sensíveis (nível mais baixo, cerca de 10 mm/s), Est. correntes (nível intermédio, cerca de 20 mm/s) e Est. reforçadas (nível mais alto, cerca de 60 mm/s). O eixo horizontal varia de 0 a 100 Hz, e o eixo vertical varia de 0 a 60 mm/s.

* A classificação das estruturas deve ser efectuada, de modo conservador, mediante análise de diversos factores designadamente, da respectiva esbeltez (por exemplo, considerando sensíveis chaminés e torres), pelo conteúdo (por exemplo, considerando sensíveis hospitais ou locais de trabalho intelectual), pelo valor patrimonial (por exemplo, considerando sensíveis monumentos ou infra-estruturas de transporte) e pelo estado de conservação (por exemplo, considerando sensíveis edificações antigas ou com revestimentos cerâmicos colados com argamassa). Serão consideradas correntes as estruturas mais comuns, como por exemplo, edifícios de habitação ou escritórios, que não sejam demasiadamente esbeltos (altos). Devem ser consideradas reforçadas apenas as construções em betão armado, os quais tenham uma finalidade industrial.

6. CONCLUSÕES

Justifica-se a actualização premente da Norma Portuguesa 2074, na linha dos critérios vigentes noutros países fazendo intervir criteriosamente a frequência das vibrações que atingem as estruturas, juntamente com a amplitude da velocidade de vibração, constituindo os dois parâmetros essenciais de segurança, contra este relevante impacte ambiental proveniente da aplicação de explosivos industriais e de outras operações que geram vibrações.

Tal como foi referido, um dos problemas mais graves da actual NP 2074, resulta do facto de esta envolver as características do terreno, em que as estruturas estão fundadas. Acredita-se que tal constatação é válida no novo cenário, considerando que a prazo se incluirá a frequência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sarsby, R. (2000). "Environmental Geotechnics". Thomas Telford, Londres. Reino Unido.
- [2] Jimeno, C. L. & Jimeno, E. L. & Carcedo, F. J. A. (1995). "Drilling and Blasting of Rocks". A.A. Balkema/ Rotterdam.
- [3] Azevedo, F.S. & Patrício, J. (2003). "Critérios de Danos e de Incomodidade no Domínio das Vibrações Ambientais". Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros, II série, nº72, Janeiro de 2003.
- [4] Correia, R. M. (2003). "Efeitos locais de amplificação sísmica pelos solos". Geotecnia Nº 97 (Março 2003). ISSN 0379-9522. pp 5-44. Revista da SPG. LNEC. Lisboa.
- [5] Dinis da Gama, C. (2003). "VIBRAÇÕES DOS TERRENOS: DA GERAÇÃO AO CONTROLE". Curso da FUNDEC "Vibrações em Geotecnia - Geração, Monitorização, Impactes Ambientais, Critérios de Dano e sua Mitigação". IST, Lisboa.
- [6] Dinis da Gama, C. (1998). "Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos". Comunicações do 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. IGM. Portugal
- [7] Dowding, C. H. (1992). "Rock Breakage: Explosives – Monitoring and Control of Blast Effects". SME Mining Engineering Handbook. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Hartman, H. L. (Editor). 2a Edição. Volume 1, pp 746-760. Littleton, Colorado. E.U.A.
- [8] Bernardo, P. A. M. (2004). "Impactes Ambientais do Uso de Explosivos na Escavação, com Ênfase nas Vibrações". Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas. I.S.T. – U.T.L., Lisboa.
- [9] Norma Portuguesa NP 2074 (1983). "Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares". Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa.
- [10] ITGE – Instituto Tecnológico Geominero de España (1989). "Manual de Restauracion de Terrenos y Evaluacion de Impactos Ambientales en Minería". Ministerio de Industria y Energia. Madrid.
- [11] Esteves, J. Moura (1993). "Controlo de Vibrações Provocadas por Explosões na Indústria de Construção". LNEC, Lisboa.
- [12] Svinkin, M.R. & Shaw, A.G. & Williams, D. (2003). "Vibration Environmental Effect of Construction Operations". VibraConsult, Cleveland, E.U.A.
- [13] Siskind, D.E., et al. (1980). "Structures Response and Damage Produced by Airblast from Surface Mining," Report of Investigations 8485, US Bureau of Mines, Washington, DC. E.U.A.
- [14] Esteves, J. Moura (2003). "Sobre a Necessidade de Actualização da Norma Portuguesa 2074". Curso da FUNDEC "Vibrações em Geotecnia - Geração, Monitorização, Impactes Ambientais, Critérios de Dano e sua Mitigação". IST, Lisboa.