

# NOTA TÉCNICA RELATIVA À APLICAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS EXPLOSIVAS EM DESMONTES DE MACIÇOS ROCHOSOS (CASO DA PEDREIRA DE ARCENA – CIMPOR)

Pretende-se analisar a propagação de vibrações, devidas a desmontes com explosivo, nas imediações de uma futura pedreira de calcário (**Arcena** da CIMPOR). Procura-se esquematizar o problema, respondendo às seguintes questões:

- 1) qual o enquadramento técnico do fenómeno em apreço (vibrações)?
- 2) quais os limites legais, relativos às amplitudes vibratórias (velocidade de vibração), que podem ser verificados nas imediações?
- 3) quais as cargas máximas admissíveis (de explosivo por retardo) que podem ser usadas, de modo a que não sejam ultrapassados esses limites?
- 4) quais as técnicas aplicáveis, neste tipo de actividade, que podem legitimar, do ponto de vista legal, os eventos vibratórios nessa pedreira?
- 5) uma vez aplicadas essas técnicas, no sentido de cumprir esses limites, afigura-se possível a exploração da pedreira recorrendo a substâncias explosivas?

Procurando, então, as respostas:

- 1) As solicitações dinâmicas transmitidas através dos terrenos, sejam por causas naturais (sismos) ou por acções humanas (por exemplo: detonações em maciços rochosos, impactos relativos à cravação de estacas para fundações, etc.), ocorrem por meio de vibrações que se propagam na forma ondulatória, até se atenuarem, a uma certa distância. No caso das detonações, esta atenuação depende do maciço rochoso em apreço e das cargas explosivas usadas por cada retardo (temporização).

Os problemas ocasionados por estes fenómenos colocam-se a dois níveis: perturbações causadas às pessoas que se encontram nas proximidades (incluindo as que ocupam edifícios que vibram) e danos em estruturas e/ou em equipamentos, sítos na vizinhança.

No que se refere às perturbações causadas às pessoas, sabe-se que são menos gravosas na medida em que os seres humanos estão habituados, na sua rotina, a serem sujeitos a situações vibratórias, muito mais intensas que as motivadas por detonações (na gama de distâncias a que geralmente se posicionam, por motivos de segurança relacionados com outros efeitos). Por exemplo, ao utilizar os meios de transporte ferroviários ou mesmo rodoviários os seres humanos podem ser sujeitos a amplitudes vibratórias 100 vezes (ou mais) superiores aquelas que resultam de desmontes com explosivo aquelas distâncias. Prova disso é que não existe lei específica no nosso país para limitar as vibrações ocupacionais (leia-se sentidas à distância), devido a situações de incomodidade humana, embora existam normas (e leis) para limitar este efeito para quem opera (directamente) equipamentos vibratórios (sistema braço-mão, por exemplo: nos martelos pneumáticos manuais).

Contudo, atendendo à definição de substância perigosa, são fáceis de compreender as razões que levam a considerar as substâncias explosivas dentro desse conceito, pois são consideradas potencialmente nocivas ou perigosas, mas para quem as manuseia e se (e só se) não possui os conhecimentos necessários à sua manipulação sem risco. Assim, todas as actividades humanas que, de alguma forma, envolvam a utilização destes produtos, como é o caso particular de minas, pedreiras e certas obras geotécnicas, são objecto de especial atenção por parte das populações, que dificilmente ficam tranquilas sabendo que existem trabalhos, nas suas imediações, fazendo uso desses produtos.

Relativamente aos efeitos das vibrações sobre as estruturas construídas, à luz dos princípios éticos da Engenharia, a sua segurança tem de ser garantida, constituindo uma das preocupações básicas da Geotecnia. Nas obras geotécnicas, a especificidade da segurança estrutural reside, antes de mais, no carácter muito particular que as estruturas apresentam e os diversos domínios de ocorrência espacial (tanto de superfície, como subterrâneo). Em qualquer dos casos, os movimentos nas estruturas, resultantes dos movimentos do terreno, dependem (como antes referido) de uma multiplicidade de factores, entre os quais se destacam:

- a quantidade de energia libertada no fenómeno que as ocasionou;
- a distância entre a origem e o ponto onde se registam os seus efeitos;
- as propriedades transmissoras ou dissipadoras dos terrenos envolvidos e
- a resistência dinâmica da estrutura e dos seus componentes mais frágeis.

- 2) Em Portugal, vigora a Portaria nº 457/83, de 19 de Abril, que instituiu a Norma Portuguesa nº 2074, 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.

Assim, esta norma (NP2074) estabelece o valor limite para a velocidade da vibração de pico, conforme indicado na tabela seguinte.

Tabela 1 – Limites estabelecidos na NP 2074, para a velocidade da vibração de pico (mm/s)

Tipos de construção	Características do terreno					
	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	
	$c_p < 1.000$ m/s		$1.000$ m/s $< c_p < 2.000$ m/s		$c_p > 2.000$ 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	<b>10,00</b>	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
<b>OBSERVAÇÕES</b>	<i>Coluna 1</i>	<i>Coluna 2</i>	<i>Coluna 3</i>	<i>Coluna 4</i>	<i>Coluna 5</i>	<i>Coluna 6</i>

Legenda:  $c_p$  - Velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais no terreno (rocha ou solo)

**Nota:** se se efectuarem mais de três detonações diárias, em cada situação, a constante  $\gamma$  é aplicada no sentido de reduzir em 30% os valores da velocidade vibratória

Aplicando esta norma ao caso em apreço, verifica-se que:

- Estaremos em condições de considerar a Coluna 5 (assinalada) da tabela anterior, já que:
  - em torno da futura pedreira (Arcena – CIMPOR), o maciço é rochoso, o que motiva e justificará a aplicação de substâncias explosivas nos desmontes, dessa pedreira e
  - como habitualmente, em qualquer pedreira, não são expectáveis mais de 2 desmontes por dia útil de trabalho, situação com a qual a pedreira, certamente, se poderá comprometer.
- Dentro da Coluna 5 (assinalada) da tabela anterior, há que apurar o tipo de construções que existem nas imediações. Em primeiro lugar, deve ter-se em conta que existe um aterro sanitário, situado a menor distância, para além de edificações diversas, construídas a maior distância. Na ausência de qualquer outro documento legal, orientador para a definição de limites das velocidades vibratórias, considera-se que esta obra geotécnica se enquadra no conceito de “construção” (humana), para a qual falta apenas definir a sua sensibilidade. A classificação das construções deve ser efectuada, de modo muito conservador, mediante análise, 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 essenciais) e
  - pelo estado de conservação (por exemplo, considerando sensíveis edificações antigas ou com revestimentos cerâmicos colados com argamassa).

Acresce a esta análise o facto de, geralmente, serem consideradas reforçadas apenas as construções em betão armado (que tenham uma finalidade industrial) e correntes as estruturas mais comuns (como por exemplo, os edifícios de habitação que existem, a SE, nas imediações da futura pedreira de Arcena). Assim, por exclusão de partes considerar-se-á como sensível (numa perspectiva conservadora) o aterro sanitário em apreço. Note-se que, por se tratar de uma construção recente e devidamente licenciada, se considera que esse aterro atende aos melhores princípios de dimensionamento e construção, designadamente, respeitando os ângulos de repouso natural dos materiais que aí foram/são depositados e que os níveis freáticos são devidamente drenados por camadas subjacentes (por exemplo: geo-compósitos drenantes). Idealmente, deverá ser feito um estudo de estabilidade dinâmica deste aterro, em particular, em que tais pressupostos sejam confirmados, assim como os valores de velocidade vibratória a que podem ser sujeitos. Pelo exposto e até indicação em contrário, considera-se este aterro sanitário como uma construção sensível, cujo limite de amplitude que o pode atingir é de 10 mm/s (ver tabela anterior).

Para finalizar esta abordagem, refira-se que toda a comunidade técnica concorda em classificar esta norma como muito conservadora, orientada para a protecção de todos e quaisquer danos nas estruturas, incluindo os cosméticos, para além dos estruturais, que raramente ocorrem, já que até se previnem os anteriores.

- 3) A carga máxima de explosivo admissível por retardo que pode ser usada, de modo a que não seja ultrapassado o limite antes definido (10 mm/s), deve de ser cuidadosamente pré-estabelecida, observando os requisitos legais, especialmente quando se encontram reduzidas as distâncias envolvidas entre determinadas zonas da pedreira e estruturas adjacentes. Na ausência de uma adequada caracterização dinâmica aplicável aos terrenos da zona da futura pedreira, pode ser estimada a velocidade previsível nesse caso usando a equação seguinte, para calcários (Dinis da Gama, 1998<sup>\*</sup>):

$$v = 580.Q^{0,6}.D^{-1,4} \quad \text{(Equação 1)}$$

em que 'v' é a velocidade vibratória (comparável com os valores da NP 2074 – em mm/s, constando da Tabela 1), 'Q' é a carga máxima admissível (considerando os retardos a usar – em kg de explosivo, por cada instante) e 'D' é a menor distância entre o desmorte e a fundação da estrutura a proteger (em m). A equação anterior permite, para as diversas situações de distância (porque as frentes de desmorte são dinâmicas, no espaço da pedreira) antever a carga máxima por retardo a usar, de modo a que não seja ferida a recomendação da NP 2074 (estrutura sensível, fundada em rocha).

No caso de ser considerada a distância mínima possível de 30 m, entre o aterro e os limites da pedreira, assim como o limite de 10 mm/s, anteriormente referido e contextualizado, chega-se a um valor aproximado de 3,22 kg/# (ver tabela seguinte) de explosivo a usar em cada retardo. Contudo, é preciso ter em conta que este valor é o mais conservador, válido apenas nos desmontes existentes nos limites da pedreira, pelo que se entende que os desmontes subseqüentes (mais afastados desse limite), podem ver a carga por retardo (kg/#) crescer substancialmente (ver tabela seguinte), com a distância verificada (m). Com base nos desmontes realizados em 2011, na pedreira do Bom Jesus, verifica-se que a CIMPOR utilizou (até ao momento), 52.750 kg de explosivo e 1079 detonadores. Assim, considerando que não se repetem temporizações em cada desmorte, pelo quociente destes dois valores, verifica-se que a pedreira do Bom Jesus apresenta uma carga média por retardo de aproximadamente 49 kg/retardo.

Tabela 2 – Cargas máximas por retardo, estabelecidas para diversas distâncias e para o limite de 10 mm/s

D (m)	10	20	<b>30</b>	40	50	60	70	80	90	100
Q (kg/#)	0,248	1,249	<b>3,218</b>	6,296	10,598	16,217	23,237	31,732	41,769	53,410*
D (m)	150	200	250	300	350	400	450	500	750	1000
Q (kg/#)	137*	269*	453*	693*	993*	1356*	1785*	2283*	5880*	11506*

\* cargas por retardo superiores às usadas na pedreira do Bom Jesus

Tal valor de carga por retardo, habitual na pedreira do Bom Jesus, é conseguido exactamente aos 96 m de distância ao aterro, situação que corresponde a uma estreita faixa (com orientação Norte-Sul) com limitações a este nível das vibrações. Considerando que a pedreira tem uma dimensão (E-W) de aproximadamente 1250 m, verifica-se que a faixa dos 96 m, onde as cargas por retardo a usar teriam de ser inferiores às da pedreira do Bom Jesus é de cerca de 8%. De modo a poder trabalhar “normalmente” nesta faixa, do ponto de vista geotécnico, ou seja, utilizar o método da escavação do maciço com explosivos, pode (e deve) ser usado um conjunto de técnicas bem conhecidas, no sentido de limitar este efeito. Estas técnicas são tratadas em seguida.

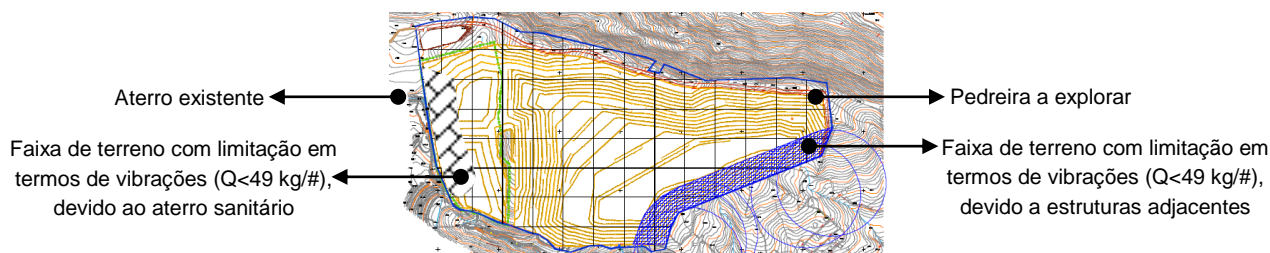


Figura 1 – Faixas de terrenos na pedreira devido a limitações adjacentes

\* Dinis da Gama, C. (1998). “Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos”. Comunicações do 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro. Portugal

- 4) As técnicas aplicáveis, neste tipo de actividade, que podem legitimar, do ponto de vista legal, os eventos vibratórios nesta pedreira são:
- A utilização de iniciação múltipla (mais do que um detonador por furo)
  - A utilização de explosivos de reduzida carga linear
  - A utilização de detonadores electrónicos (de modo a anular os erros devidos aos atrasos pirotécnicos) e
  - A utilização de pré-corte (de modo a introduzir uma barreira física à propagação de vibrações),
  - entre outras...

Sobre estas técnicas há que referir que:

- A utilização de iniciação múltipla (prevendo a existência de mais do que um detonador por furo) permite reduzir substancialmente a carga por retardo, pois garante-se que a carga associada a cada detonador é diminuída até ao valor desejado, de modo a não ultrapassar o limite da velocidade vibratória legalmente admissível. Esta situação, à partida, não está prevista na Lei, tal como sugere o artº 97º do Decreto-Lei nº 162/90, de 22 de Maio (*ponto 1.a*) *Nas operações de carregamento não é permitido: Introduzir no mesmo furo mais de um cartucho escorvado excepto em condições especiais fixadas pelo director técnico*, mas sabe-se que a entidade competente (DGEG – do Ministério da Economia e Inovação e do Desenvolvimento) aceita que em condições devidamente justificadas (como é certamente o caso desta) se possa conseguir a autorização para a utilização de tal técnica. No passado (note-se que este Decreto-Lei tem mais de 20 anos), esta técnica era “mal vista” pelas autoridades (e pela comunidade técnica) devido à baixa fiabilidade dos sistemas de iniciação (detonadores), tornando perigoso a inserção de mais que um detonador por furo, o que hoje não acontece, antes pelo contrário é recomendado ou mesmo obrigatório, a nível legal, em muitos países Europeus. De facto, refira-se a propósito que a maior Mina portuguesa, aplica este método, com a autorização da DGEG, em todas as suas bancadas.
- A utilização de explosivos de reduzida carga linear, isto é, encartuchados, devido a densidades baixas ou muito baixas, tem permitido obter reduções importantes a nível das vibrações registadas nas imediações dos desmontes. A figura seguinte ilustra uma situação em que se comparam duas emulsões explosivas de baixa densidade (EMULIGHT *standard* e EMULIGHT V, ambas com massas volúmicas inferiores a 1 t/m<sup>3</sup>).

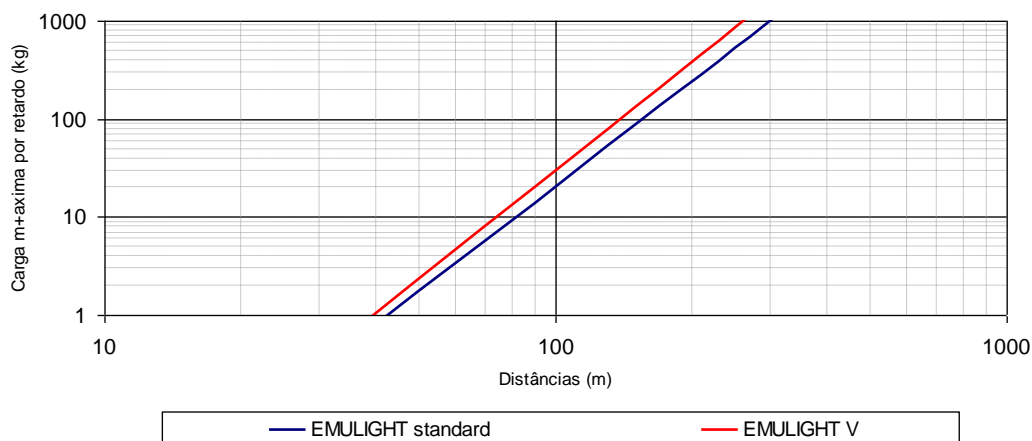


Figura 2 – Comparação de leis de propagação em calcário (obtidas para a mesma velocidade de vibração), para diferentes explosivos, usados como carga de coluna – Fonte: SEC, SA (2009)

Verifica-se que o explosivo designado por EMULIGHT V permite aumentar as cargas máximas por retardo a usar em desmontes, quando considerada a mesma distância e a mesma velocidade vibratória resultante. Assim, sugere-se a utilização de um explosivo de nova geração, deste tipo, que permita funcionar com cargas aplicadas por retardo, ligeiramente superiores às actuais e, ademais, melhor distribuídas no furo, devido à sua menor densidade.

- A utilização de detonadores electrónicos pretende eliminar os erros devidos aos atrasos pirotécnicos (sempre existentes nos restantes tipos de detonadores). De facto, as pastas retardadoras, existentes nos elementos de atraso dos detonadores, apresentam sempre desvios em termos da velocidade de combustão, que geram erros relativos aos atrasos que cada detonador visa proporcionar. De facto, os novos detonadores electrónicos, permitem anular esses atrasos já que essas temporizações são asseguradas pela presença de um *chip* no detonador, que substitui a tradicional pasta retardadora. Ademais, tem a vantagem de permitir ao utilizador definir (ele próprio) a temporização que quer verificar, não ficando na dependência dos atrasos pré-definidos que os detonadores tradicionais (eléctricos e não-eléctricos) têm no mercado.

Podem, inclusive, ser definidos tempos diferentes para o mesmo diagrama de fogo, tendo em conta furos de uma mesma fiada ou de fiadas distintas, situação que permite melhorar substancialmente a eficácia do desmonte e/ou eventualmente alterar as frequências impostas ao maciço rochoso (pela variação da temporização, corresponde ao Período do fenómeno ondulatório, tido como quase-harmónico, devido à presença habitual de um enorme número de detonadores num único desmonte). A figura seguinte ilustra a anulação dos desvios inerentes aos atrasos, o que impede a acumulação de efeitos no mesmo instante.

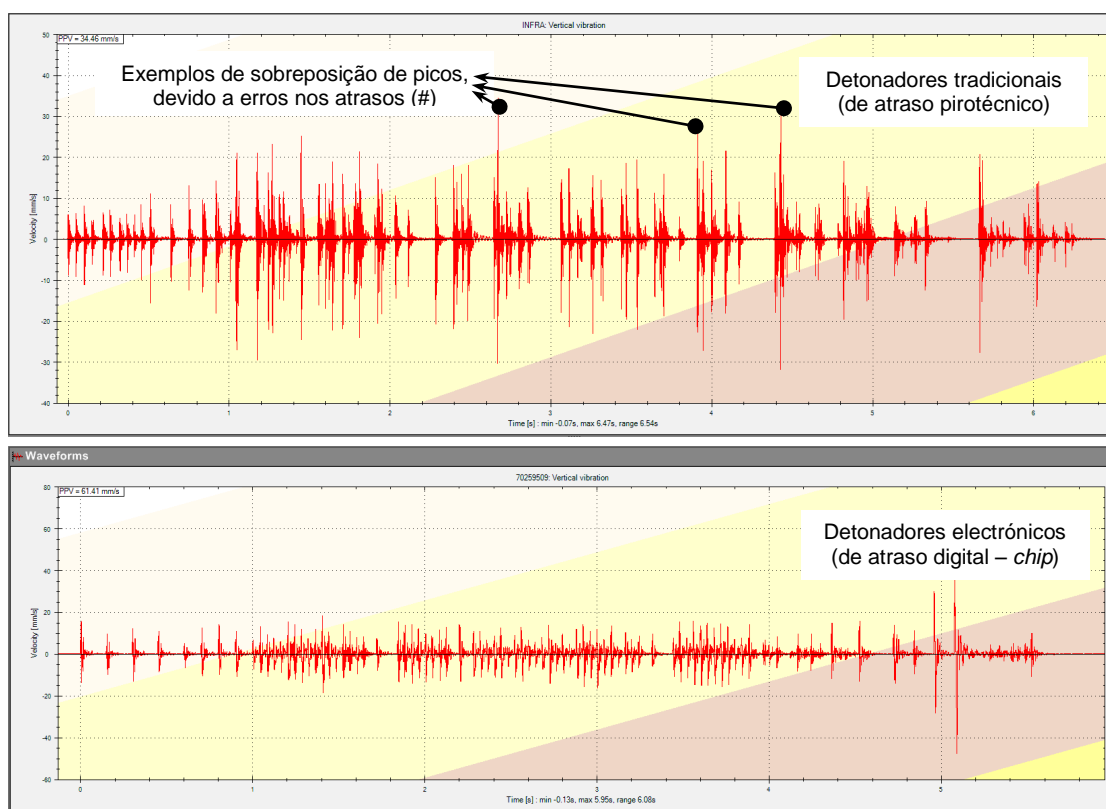


Figura 3 – Comparação de curvas de variação da velocidade (neste caso: componente vertical) com o tempo, usando diferentes sistemas de iniciação (fonte: ORICA, 2011)

- A utilização da técnica de pré-corte (introduzindo uma barreira física à propagação de vibrações) é uma técnica bem conhecida para reduzir a propagação de vibrações nas imediações dos desmontes. Tal é conseguido, mediante a utilização de uma série de contorno, a disparar primeiro, de forma a criar uma superfície de descontinuidade entre o desmonte e o maciço, em que se encontram as construções a proteger. O preenchimento dessa descontinuidade com água (do maciço ou de escorrência superficial) pode acontecer, nem que seja sazonalmente, sendo essa a situação mais desfavorável. A criação do citado plano de corte permite minimizar a amplitude das ondas que se propagam na rocha, após detonações. Com efeito, comprova-se tecnicamente que o efeito da existência do plano de corte se traduz por uma redução da energia das ondas para cerca de um terço do seu valor inicial (mais precisamente 38%). Se o maciço rochoso em que são realizados os desmontes for o mesmo que o maciço de fundação dos receptores sensíveis às vibrações, considera-se que tal redução se aplica à redução da velocidade vibratória, ou seja, também para 38% do seu valor inicial. Tal asserção permite formular a seguinte questão: qual a carga máxima por retardo, que pode ser usada, caso exista uma descontinuidade criada pela técnica de pré-corte, para verificar a mesma velocidade vibratória (limite = 10 mm/s) à mesma distância (mínima ao aterro = 30 m)? A resposta a esta questão pode ser obtida através:
  - do cálculo da velocidade vibratória que atinge o plano criado pelo pré-corte (do lado do desmonte) – se 10 mm/s corresponde à velocidade vibratória refractada nesta descontinuidade (preenchida com água, na situação mais conservadora), qual seria a velocidade vibratória antes da redução efectivada? Tendo em conta que a redução é de 38%, a velocidade vibratória original (antes da sua redução) é de 26,31 mm/s e
  - do cálculo da carga máxima por retardo para esta nova velocidade de vibração, que pode ser verificada do lado do desmonte, mas que será atenuada (para 38% do seu valor inicial) pela descontinuidade criada pela utilização da técnica de pré-corte – observando a equação 1 verifica-se que, para  $v = 26,31$  mm/s e  $D = 30$  m, se poderá usar uma carga de 16,14 kg por cada retardo, significativamente superior àquela que tinha sido antes calculada (3,22 kg/retardo).

5) Em conclusão: poder-se-á explorar a pedreira recorrendo a substâncias explosivas, através da aplicação das medidas de minimização das vibrações antes referidas, sempre cumprindo os limites legalmente exigíveis. De facto, de acordo com o plano de pedreira, preconiza-se a utilização de uma carga de explosivo variando entre 38 kg/furo e 87 kg/furo. Na situação mais desfavorável (38 kg/furo), certamente junto aos limites sensíveis, a Oeste (compreendendo as distâncias dos 30 aos 100 m ao aterro sanitário) e Sudoeste da pedreira (em que existem edifícios habitados a distâncias mínimas de 80 m), recomenda-se:

- A utilização de pré-corte,
- A utilização de iniciação múltipla (usando até 3 detonadores por furo, dependendo da distância)
- A utilização de detonadores electrónicos
- A utilização de explosivos de reduzida carga linear

Foram referidas outras técnicas, capazes de minimizar as vibrações, que importa aqui considerar, como acessórias às já antes referidas, como por exemplo a redução dos afastamentos à face livre (ver figura seguinte).

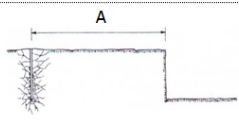
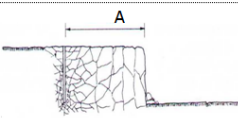
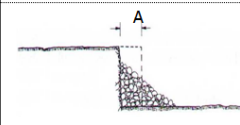
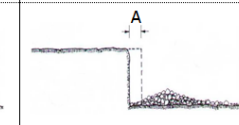
$A \gg 60\varnothing_f$	$A \approx 60\varnothing_f$	$25\varnothing_f < A < 40\varnothing_f$	$A < 20\varnothing_f$
			
Intensidade de vibração muito significativa. Sem desmorte, e com fragmentação localizada nas imediações do furo	Intensidade de vibração significativa. Sem desmorte, mas com intensa fragmentação entre o furo e a face livre	Intensidade de vibração pouco significativa. Com desmorte, da rocha entre o furo e a face livre, equilibrado e bem deslocado	Intensidade de vibração insignificante. Desmorte, da rocha entre o furo e a face livre, sobre-fragmentado e deslocado
Sobredimensionado		Correcto	Subdimensionado

Figura 4 – Influência do afastamento na geração de vibrações

À medida que os trabalhos se afastem dos receptores sensíveis, para o interior da pedreira, poderá abdicar-se da utilização das técnicas de pré-corte e de iniciação múltipla, mas recomenda-se a utilização de todas as outras antes referidas (isto é, utilização de detonadores electrónicos, explosivos de reduzida carga linear e menores afastamentos), cuja respectiva argumentação terá ficado patente neste documento.

Para finalizar esta nota técnica, deve referir-se que a deposição de resíduos em explorações mineiras é uma prática comum, a nível nacional e internacional. De facto, há numerosos exemplos de explorações em funcionamento regular que aceitam receber tais resíduos a título definitivo, ocupando áreas já exploradas, como por exemplo: a mina subterrânea de sal-gema de Asse (na Alemanha) ou a pedreira de agregados graníticos da Quinta do Moinho nº 2, mais conhecida por Pedreira da Madalena (em Vila Nova de Gaia), propriedade da SOLUSEL. Nesta pedreira, a exploração ocorre desde 1971 e, no mesmo local, é explorado um aterro de resíduos inertes, desde Setembro de 1996. Este último caso materializa o esquema conceptual de funcionamento, designado por “Sistema Pedreira-Aterro de Resíduos” (S.P.A.R.), proposto por Dinis da Gama (em 1999).

Esperando ter contribuído, de alguma forma, para o esclarecimento das dúvidas inerentes a este problema, coloca-se o autor desta nota técnica ao dispor para o esclarecimento de quaisquer outras que possam surgir.

  
 Pedro Alexandre Marques Bernardo\*

2011-05-18

\* breve resumo biográfico do autor:

- Eng. de Minas (1992)
- Mestrado (MSc) em Mineralurgia e Planeamento Mineiro (1995)
- Doutoramento (PhD) em vibrações decorrentes de desmontes de rocha com explosivos (2004)
- Professor Auxiliar no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa (desde 1992)
- Director Técnico dos Serviços de Aplicação da SEC, SA (desde 2006)
- Especialista em Geotecnia pela Ordem dos Engenheiros (desde 2007)
- Perito, designado pelo Conselho Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros (desde Novembro de 2008), em situações envolvendo substâncias explosivas (para uso civil), relacionadas com os trabalhos de Engenharia inerentes à escavação de maciços rochosos, quer a nível da aplicação (dimensionamento), quer a nível dos efeitos colaterais (impactes ambientais).
- Outras informações em: pedro.bernardo@ist.utl.pt e/ou pedrobernardo@sec-sa.pt.

\* Dinis da Gama, C. (1999). “Abordagens Inovadoras para os Problemas Ambientais da Indústria Mineira”. Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros, II série, nº 38, Junho de 1999, pp 76-79. Lisboa