

**Capitão-de-Corveta (EN) Newton Fagundes de Carvalho**

Engenheiro Civil Geotécnico
Encarregado da Seção de Estruturas da DOCM

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense (UFF), Mestre em Geotecnia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e Mestre em Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas pela Universidade Federal Fluminense (UFF).

**Engenheiro Civil Geotécnico Habib Georges Jarrouge Neto**

Gerente de Projetos da GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente e Coordenador da Divisão de Geotecnia e Mecânica dos Solos do Instituto de Engenharia de São Paulo

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná e Especialista em coordenação e projeto de túneis, fundações, estabilização de encostas e escavações.

**Engenheiro Civil Geotécnico Roberto Kochen**

Diretor Técnico da GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente e Professor Doutor do Departamento de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica da USP

Graduação em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), Mestre em Engenharia de Estruturas pela Escola Politécnica da USP, Doutor em Engenharia de Solos pela Escola Politécnica da USP e Pós-doutorado em Escavações em Rocha pela Universidade de Toronto, Canadá.

ESCAVAÇÕES EM TÚNEIS - DETONAÇÕES E INTERFERÊNCIAS

1 - INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta ao público em geral alguns aspectos relacionados às perturbações nas estruturas/edificações vizinhas, ocasionadas pelas vibrações geradas durante os desmontes a fogo nas frentes de escavação de túneis em maciços rochosos.

Não se pretende esgotar tal assunto, uma vez que se trata de um tema de grande complexidade, objeto de longos estudos e análises por parte de profissionais da engenharia geotécnica, merecendo destaques em publicações científicas internacionais.

2 - ESCAVAÇÕES DE TÚNEIS

A escolha da metodologia a ser adotada para a escavação de um túnel em rocha está relacionada a fatores condicionantes, tais como a geomorfologia local, as características geológicas e geotécnicas (geomecânicas) do maciço, as dimensões do túnel, os prazos para sua execução, os custos envolvidos e finalmente os limites de perturbações ao meio ambiente, entre outros.

Porém, apesar de hoje contarmos com equipamentos modernos, como o *Tunnel Boring Machine* (TBM), no qual se emprega o movimento de rotação conjugado com a alta pressão, ainda encontramos o largo emprego da tradicional metodologia *Drill and Blast* (D&B), sobretudo nos maciços rochosos das classes I, II, III e IV (BARTON *et al*, 1974), na qual são utilizadas as técnicas de perfuração em rocha e detonação de explosivos nas frentes de escavação de túneis em rochas (Figuras 1 e 2).

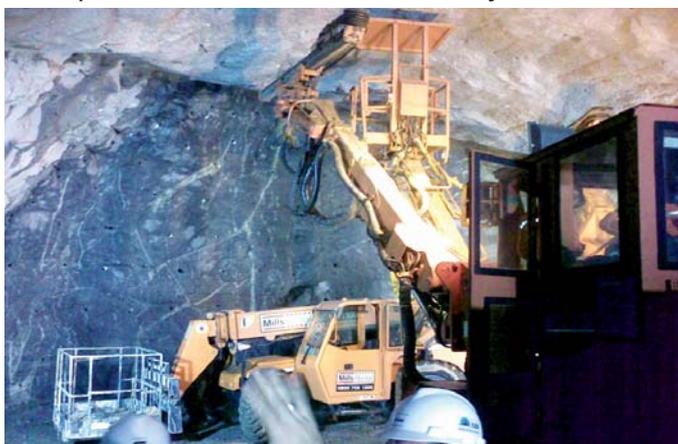


Figura 1 – Execução da metodologia *Drill and Blast* na escavação de trecho do túnel do Estaleiro e Base Naval (EBN) para o submarino de propulsão nuclear da Marinha do Brasil.



Figura 2 – Classificação do maciço (BARTON *et al*, 1974), durante a execução das escavações do túnel do EBN.

Dessa forma, a seguir são mostrados conceitos básicos para o monitoramento e o controle das vibrações em estruturas/edificações vizinhas, a fim de minimizar ou evitar as patologias causadas pela utilização de explosivos nas escavações subterrâneas para a construção de túneis. A Tabela 1 indica alguns efeitos em rochas, estruturas de residências e elementos em gesso, de acordo com a incidência das vibrações, traduzidas pelas respectivas velocidades de partícula de pico V_p , que serão definidas adiante. A referida tabela não deve ser utilizada como padrão absoluto para relações de causa e efeito, mas apenas como indicações, uma vez que tais efeitos ou patologias variam em função de diversas condicionantes ambientais (condições de campo), além das frequências de vibração.

Tabela 1 – Efeitos/patologias em estruturas/edificações vizinhas causadas por detonações em escavações.

V_p (mm/s)*	Aplicações	Efeitos	Referências
<250	Maciços rochosos	Sem fraturas da massa de rocha sã (intacta)	[3]
>300		Quedas de blocos de rocha em túneis subterrâneos	[11]
610		Fraturas no maciço	[11]
250 a 630		Pequenos desmontes no maciço	[3]
635		Possibilidade de danos ao maciço rochoso	[16]
630 a 2540		Fissuras de tração e radiais	[3]
>2540		Completo rompimento da massa de rocha	[3]
1		Estruturas residenciais	Equivalente a andar sobre uma laje de piso
8	Equivalente a pular sobre uma laje de piso		[17]
13	Equivalente a uma porta batendo		[17]
<50	Sem danos perceptíveis		[6]; [14]
50 a 100	Pequenas fissuras em elementos em gesso		[11]
110	Pequenas fissuras nos revestimentos em gesso		[11]
100 a 180	Danos menores		[14]
160	Trincas em alvenarias e revestimentos de gesso		[11]
>180	Danos maiores		[14]
230	Trincas graves		[11]
50	Gessos		Nível seguro de vibrações (sem danos)
80		Limitado a pequenas fissuras	[15]
115		Trincas menores	[15]
140		Possibilidade (50%) de ocorrerem pequenos danos	[7]
190		Possibilidade (50%) de ocorrerem maiores danos	[7]
200		Trincas maiores	[15]

*Números aproximados (unidades originais: polegadas por segundo).

3 - VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS VIZINHAS

Por ocasião da ação de explosivos no desmonte de rocha, a fase dinâmica corresponde à incidência das ondas de choque que provocam a ruptura brusca do material. Como consequência, são geradas ondas sísmicas que se propagam pelo maciço/terreno e que são gradualmente atenuadas com a distância. As ondas sísmicas ocorrem como o resultado da natureza elástica dos materiais rochosos, os quais retomam a posição original após a sua passagem. Essas ondas podem ser assim classificadas:

- Ondas primárias P ou de compressão,
- Ondas secundárias S ou de cisalhamento, e
- Ondas de superfície Rayleigh e Love.

As ondas primárias P são as de maior velocidade, e deformam a rocha na mesma direção de propagação, provocando um movimento comparado ao das molas. As ondas secundárias S são mais lentas, e fazem a rocha vibrar perpendicularmente à direção de propagação. As ondas Rayleigh e Love são aquelas que podem se propagar em qualquer superfície de contato entre dois materiais distintos, como rocha-ar, rocha-água e rochas com diferentes características, entre outros (Figura 3).

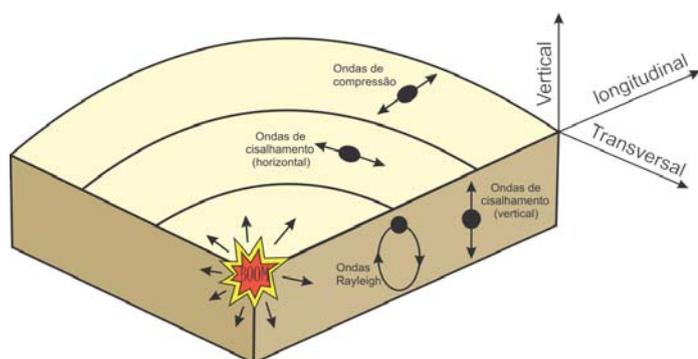


Figura 3 – Propagação de ondas sísmicas a partir da detonação de explosivos no maciço rochoso; adaptado de RICHARDS e MOORE (2012).

A detonação de explosivos na frente de uma escavação de túneis gera altas pressões instantâneas. Porém, apenas uma parte da energia de detonação (cerca de 20% a 30%) é a responsável pela fragmentação e lançamento da massa rochosa (SINGH *et al*, 1993). Outra parte dessa energia liberada é transformada em ondas mecânicas que se propagam no meio sólido e elástico, transmitindo vibrações que podem afetar as estruturas/edificações próximas às escavações.

Além das vibrações de grandes áreas, também podem ser citados outros impactos ambientais ocasionados pelas detonações sem controle, quais sejam: os recalques das áreas sobre o túnel em escavação, a instabilidade do maciço remanescente, a projeção de fragmentos e a produção de poeiras e de ruídos.

No caso específico das vibrações, não se pode impedir que essas alcancem as edificações vizinhas. Porém, alguns fatores que influenciam na sua propagação podem ser trabalhados, ou alterados, de forma a se interferir positivamente no sentido de amenizar ou reduzir os seus efeitos na vizinhança.

Dessa forma, existem variáveis controláveis que influenciam sensivelmente na propagação das vibrações de origem nas detonações de explosivos em túneis (frentes de escavação), dentre as quais o diâmetro e o comprimento dos furos (perfuração) e a carga máxima de explosivos utilizada por retardo. Nesses casos, embora cada situação no campo mereça uma análise particular, MARTINS (1997) propõe uma série de medidas para minimizar os efeitos das vibrações, como:

- Reduzir a carga de explosivo por unidade de micro-retardo,
- Reduzir o número de furos com detonadores instantâneos,
- Utilizar um tempo de retardo entre furos que evite grande sobreposição de ondas e permita o deslocamento suficiente da rocha,
- Dispor as frentes de escavação com a maior superfície livre possível, e
- Criar barreiras ou discontinuidades entre as estruturas a proteger e os maciços a desmontar.

Por outro lado, ressalta-se ainda a existência de variáveis que também influenciam diretamente na propagação das vibrações, mas que não são controláveis, como a geologia local, as propriedades geomecânicas do maciço rochoso e a distância entre o local da detonação e a estrutura/edificação vizinha, entre outras.

Uma vez que as detonações podem provocar danos às edificações/estruturas vizinhas e ao próprio maciço rochoso, a partir da geração de vibrações e impactos de ar, faz-se necessário o controle das operações com explosivos, a fim de reduzir a parcela de energia liberada responsável pela propagação das ondas pelo terreno. Dessa forma, a instrumentação sísmica, realizada a partir da instalação de sismógrafos, é de fundamental importância nas tarefas de monitorar e controlar as vibrações.

A maioria dos estudos do comportamento das ondas sísmicas nos maciços rochosos adota a velocidade de partícula como o parâmetro que melhor caracteriza a propagação de vibrações no seu interior. Assim, tal parâmetro é utilizado como base para a verificação da possibilidade de danos estruturais (patologias) em edificações.

4 - MONITORAMENTO E CONTROLE DAS VIBRAÇÕES

Visando-se ao monitoramento e controle das vibrações, são essenciais os registros dos seguintes parâmetros na instrumentação sísmica (GERALDI, 2011):

- Amplitude e frequência do movimento;
- Pulsos de ar, e
- Velocidade de partícula.

A amplitude está relacionada à quantidade de explosivos detonados no mesmo instante e à distância desses ao local de instrumentação. A frequência do movimento varia conforme as características físicas e condições geomecânicas do meio (maciço rochoso). Os pulsos de ar são causados pela energia de detonação que atinge a atmosfera e, embora não sejam tratados neste artigo, vêm sendo considerados como um dos responsáveis pelos danos causados às estruturas/edificações vizinhas, juntamente com os movimentos vibratórios das partículas no terreno. Estes, por sua vez, são traduzidos pela velocidade de vibração induzida pela detonação à partícula do maciço.

A forma atual de se mensurar a magnitude das vibrações no terreno, produzidas pelas detonações, é por meio da determinação da velocidade de partícula. Essa é, então, comparada com os limites máximos estabelecidos por normas e demais recomendações técnicas, visando-se a preservar as edificações nas proximidades das escavações em áreas urbanas. Tais limites dependerão ainda de fatores como o tipo de fundação existente, o porte e a idade da edificação, entre outros. Porém, é comum se adotar a velocidade de partícula entre 20mm/s e 30mm/s como um limite de alerta para as edificações localizadas nos centros urbanos, distantes até 50m da detonação. Especificamente quanto à preservação das condições físicas do maciço em escavação, o limite aceito internacionalmente é de 100mm/s. Quanto às vibrações pelo ar (impactos), o nível máximo de ruídos considerado de alerta é de 134db (*United States Bureau of Mines*).

A equação 1 (LANGFORS e KIHLLSTROM, 1978) é uma das formas de se estabelecer uma primeira projeção (estimativa) para a velocidade de

partícula v a ser atingida num determinado ponto do terreno ou maciço rochoso, conforme a seguir:

$$v = \frac{kQ}{R^{3/2}} \quad (1)$$

onde

Q = quantidade de explosivos, em kg, por retardo,
 R = distância, em metros, da frente de escavação no maciço ao ponto de interesse no terreno (estrutura/edificação), e

k = coeficiente adotado conforme o tipo de rocha do maciço.

A Tabela 2 fornece alguns valores para o coeficiente k , conforme o tipo de rocha.

Tabela 2 - Valores de referência para k .

TIPOS DE ROCHA	k
Granitos/Gnaisses/Basaltos densos	500 a 700
Xistos/Rochas metamórficas duras	300 a 500
Rochas sedimentares/rochas alteradas	100 a 300

A equação 2 também é muito utilizada como uma primeira aproximação da lei de atenuação das vibrações originadas pelas detonações. Assim, uma vez conhecidas a distância da frente de escavação à estrutura/edificação e a velocidade de vibração máxima a ser respeitada, pode-se estimar a carga máxima a ser empregada por retardo (JOHNSON, 1971).

$$V_p = aQ^b D^c \quad (2)$$

onde

V_p = velocidade vibratória de pico da partícula, em mm/s,

D = distância entre os pontos de solicitação e monitoramento, em metros,

Q = peso da carga explosiva por retardo, em kg, e
 a , b e c = constantes características, dependentes dos tipos de rocha, dos explosivos e das técnicas de desmonte empregadas.

Os valores de referência para constantes a , b e c , para diversas litologias, podem ser pesquisados em DINIS DA GAMA (1979 e 1997), HOLMBERG (1982) e REMÍSIO (1994), entre outros. Porém, tratam-se apenas de orientações iniciais, sendo indispensável a determinação dessas constantes por meio de instrumentação (sismógrafos), uma vez que

dependem das características físicas do local e das técnicas de desmonte.

Inicialmente, tendo em vista a ausência de dados (registros) referentes às vibrações, a equação 3 pode ser utilizada para a determinação de uma distância de segurança (Figura 4), conforme a carga de explosivos utilizada por retardo (*United States Bureau of Mines*).

$$D_{1,2} \geq 22,5Q^{0,5} \quad (3)$$

onde

$D_{1,2}$ = distâncias entre os pontos de solicitação e monitoramento, em metros, e

Q = peso da carga explosiva por retardo, em kg.

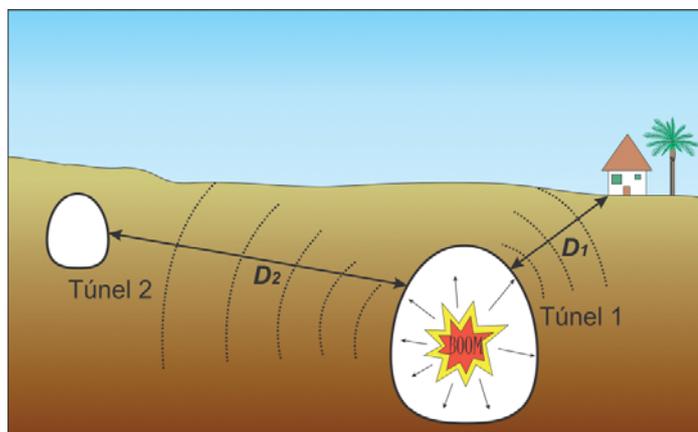


Figura 4 – Ilustração: distâncias de segurança D_1 e D_2 .

Após as primeiras detonações, dimensionadas a partir da equação 2, deve-se proceder às retro análises a fim de se estabelecerem as constantes a , b e c , em função da melhor correlação possível, utilizando-se as leituras dos sismógrafos instalados nos locais apropriados (de interesse) e das medições das distâncias e das cargas explosivas utilizadas por retardo.

O equipamento indicado para o monitoramento das atividades de desmonte por explosivos é o sismógrafo (Figura 5).



Figura 5 – Sismógrafo Instantel (Fonte: www.instantel.com).

Os resultados obtidos por meio dos sensores de vibração (sismógrafos) visam à análise dos riscos de danos induzidos pelas vibrações do terreno, e são avaliados considerando-se a magnitude e a frequência da velocidade de vibração de partícula de pico. Os sismogramas fornecem, além das frequências, a velocidade vibratória de pico segundo as componentes ortogonais longitudinal, transversal e vertical. A resultante dessas componentes (soma vetorial) é utilizada como o valor máximo da velocidade vibratória que atinge o local em monitoramento. Esse valor máximo é calculado a partir das componentes registradas no mesmo instante, e não a partir das componentes máximas verificadas em momentos distintos.

Assim, a velocidade de vibração de partícula de pico é comparada com os limites aceitáveis para que não ocorram danos às estruturas/edificações vizinhas. As normas técnicas pertinentes estabelecem os limites para a velocidade de vibração de partícula de pico e respectivas frequências (Figura 6).

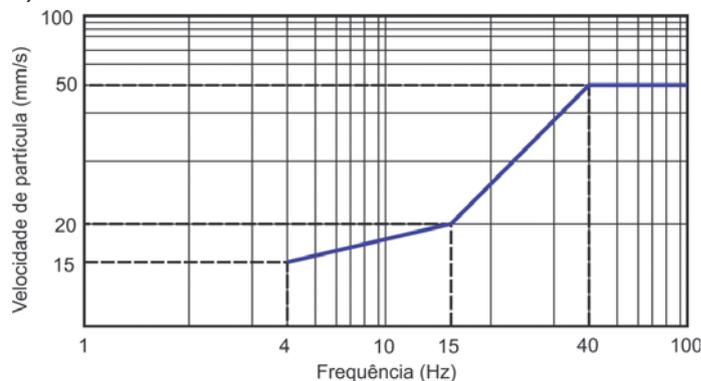


Figura 6 – Limites de velocidade de vibração de partícula de pico e faixas de frequências (ABNT NBR 9653,2005).

Um exemplo de utilização do sismógrafo no monitoramento das escavações em maciços rochosos é o caso do acompanhamento dos trabalhos no túnel do Estaleiro e Base Naval da Marinha (EBN), em Itaguaí-RJ. Nesse caso, os dados estão sendo coletados e analisados tanto pelos técnicos responsáveis pela execução do empreendimento no campo, como também por engenheiros do Corpo de Engenheiros da Marinha (Figuras 7 e 8). Esse controle das vibrações no maciço é de fundamental importância, tendo em vista a proximidade do túnel executado pela mineradora MMX ao túnel do EBN (aproximadamente 13m de distância acima).

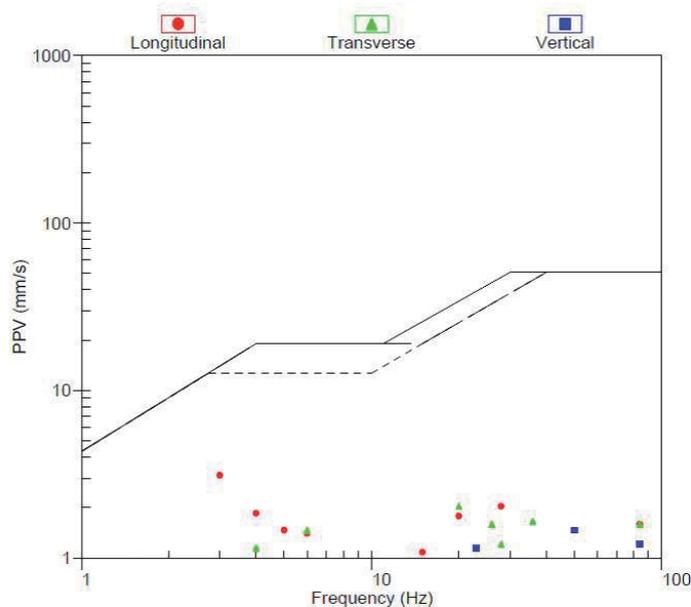


Figura 7 – Gráfico: velocidade de vibração de partícula (PPV) x frequência. Exemplo de resultado do monitoramento de vibrações, efetuado por ocasião das escavações no túnel do EBN, em Itaguaí-RJ. Nessa detonação, a velocidade de vibração de partícula de pico (resultante) foi igual a 3,24mm/s no ponto de medição, localizado no interior do túnel da MMX.



Figura 8 – Construção do túnel do EBN, em Itaguaí-RJ.

Outro caso onde a utilização de sensores de vibração se faz necessária, por ocasião de eventuais detonações de explosivos nas escavações, é na implantação do túnel (mergulhão) próximo às instalações da Marinha do Brasil, objeto das obras do Porto Maravilha, no Rio de Janeiro-RJ (Figura 9). O monitoramento das vibrações nas edificações do Primeiro Distrito Naval deverá ser acompanhado pelo Corpo de Engenheiros da Marinha, por meio da Divisão de Estruturas da DOCM.



Figura 9 – Vista das obras de construção do túnel (mergulhão) do Porto Maravilha, no Rio de Janeiro - RJ, com escavações próximas às edificações da MB.

5 - CONCLUSÃO

O monitoramento das vibrações nas escavações em túneis, executado por meio da instrumentação de campo, é um dos procedimentos técnicos básicos para que se tenha o controle desse fenômeno que pode vir a causar sérios danos às estruturas/edificações vizinhas. Sem dúvida alguma a engenharia geotécnica hoje pode lançar mão de equipamentos portáteis de alta tecnologia e custos razoáveis, não cabendo dispensá-los quando se pretende realmente exercer a engenharia com responsabilidade e embasamento técnico-científico.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 9653 - Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*, 2005.
- [2] BARTON, N. R.; LIEN, R.; LUNDE, J. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 6/4. pp.189-236. 1974.
- [3] BAUER, A. e CALDER, P. N. *Open Pit and Blast Seminar*. Kingston, Ontario, Canada, 1978.
- [4] DINIS DA GAMA, C. *Estudo das vibrações e níveis de ruído resultantes dos desmontes da Mina de Águas Claras*. VIII Simpósio de Mineração. Belo Horizonte. in Revista "Geologia e Metalurgia", Setembro/Octubro de 1979, São Paulo. pp. 1-13. 1979.
- [5] DINIS DA GAMA, C. *O relatório geotécnico e a sua importância para o projecto de túneis*. 6º Congresso Nacional de Geotecnia, IST, Lisboa. 15-18 de Setembro de 1997. Vol. 2. pp. 897-904. 1997.
- [6] EDWARDS, A. T. and NORTHWOOD, T. D. *Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures*. *The Engineer*, 1960.
- [7] E. I. DU PONT DE NEMOURS & CO. *Blaster's Handbook*, 1977.
- [8] GERALDI, J. L. P. *O ABC das Escavações de Rocha*. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- [9] HOLMBERG, R. *Blasting - Charge calculations for tunneling*. *Underground Mining Methods Handbook*. Society of Mining Engineers. pp. 1580-1589. 1982.
- [10] JOHNSON, S. M. *Explosive Excavation Technology*, U.S. Army Engineer Nuclear Cratering Group, Livermore, 1971.
- [11] LANGEFORS, U.; ULF; KIHLSSTROM, B. and WESTERBERG, H. *Ground Vibrations in Blasting*, 1948.
- [12] LANGEFORS, U. e KIHLSSTROM, B. *The Modern Techniques of Rock Blasting*. Nova Iorque: John Wiley & Sons Inc., 1978.
- [13] MARTINS, A. R. *Segurança na aplicação de explosivos na indústria da construção civil*. 1º Curso de especialização em segurança, higiene e saúde no trabalho. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 1997.
- [14] NICHOLLS, H. R.; JOHNSON, C. F.; DUVALL, W. I. *Blasting vibrations and their effects on structures*. *Bureau of Mines Bulletin (USBM)*, 656: 105, 1971.
- [15] NORTHWOOD, T. D.; CRAWFORD, R. and EDWARDS, A. T. *Blasting Vibration and Building Damage*. *The Engineer*, 1963.
- [16] ORIARD, L. L. *Dynamic Effect on Rock Masses From Blasting Operations*. *Slope Stability Seminar*, Univ. of Nevada, 1970.
- [17] REMÍCIO, A. *Controlo dos impactos ambientais (vibrações) resultantes da escavação de um túnel*. Seminário Luso-Brasileiro de Geotecnia Ambiental. IST, Lisboa, 30 e 31 de Março de 1997. pp. 133-145. 1995.
- [18] RICHARDS, A. B.; MOORE, A. J. *Blast vibration course: measurement, assessment, control*. Terrock Consulting Engineers (Terrock Pty Ltd). Australia, 2012.
- [19] SINGH, B.; PAL ROY, P.; SINGH, R. B.; BAQCHI, A.; SINGH, M. M. *Blasting in Ground Excavations and Mines*. Aa Balkema, New Delhi, India, 1993.
- [20] STAAG, M. S.; SISKIND, D. E.; STEVENS, M. G. and DOWING, C. H. *Effects of Repeated Blasting on a Wood Frame House*. *Bureau of Mines R I 8896*, 1980.