

MONITORIZAÇÃO E MODELAÇÃO ESTATÍSTICA E NUMÉRICA DE VIBRAÇÕES DEVIDAS A DESMONTE COM EXPLOSIVOS

MONITORING AND STATISTICAL AND NUMERICAL MODELLING OF VIBRATION PROPAGATION FROM ROCK BLASTING

Resende, Ricardo, *LNEC, Lisboa, Portugal, rresende@lnec.pt*

Lamas, Luís, *LNEC, Lisboa, Portugal, llamas@lnec.pt*

Vieira de Lemos, José, *LNEC, Lisboa, Portugal, vlemos@lnec.pt*

Calçada, Rui, *FEUP, Porto, Portugal, ruiabc@fe.up.pt*

RESUMO

Esta comunicação descreve um trabalho de monitorização e estudo da geração e propagação das vibrações produzidas por uma operação subaquática de desmonte de rocha que teve lugar no Porto de Leixões em 2006. Terminada a monitorização, que exigiu um acompanhamento cuidadoso dos impactos dos rebentamentos na malha urbana circundante, definiram-se leis empíricas de atenuação e um modelo de inteligência artificial (redes neuronais perceptrão multicamada) que forneceram estimativas da velocidade máxima de vibração em função da carga e da distância. Estes métodos tornaram possível a definição de distribuições espaciais de vibração para todo o desenrolar da obra. Finalmente, desenvolveu-se um modelo dinâmico de diferenças-finitas tridimensional de parte da obra, no qual foram estudados diversos cenários de geração e propagação. Este modelo permitiu, por um lado extrair conclusões qualitativas interessantes sobre a propagação da vibração deste caso, e por outro comprovar a aplicabilidade da modelação numérica nesta classe de problemas, tanto em obras superficiais como em obras subterrâneas, tais como a escavação de túneis e cavernas em rocha.

ABSTRACT

This work describes the monitoring and study of the generation and propagation of blast vibration due to an underwater rock blasting excavation work that took place in 2006 at the Leixões Harbour. After the blasting, which was carefully followed, empirical vibration attenuation laws and a neural network model were defined. Both models deliver an estimation of the peak particle velocity corresponding to a determined blast charge weight and distance, thus allowing the definition of a spatial distribution of peak velocities for the whole duration of the excavation works. Finally, a tridimensional dynamic finite-difference model of a part of the harbour was developed and some vibration generation and propagation scenarios were modeled, simulating the way vibration propagates into the surrounding area. This kind of three-dimensional dynamic numerical analysis delivers important qualitative insights on the vibration propagation, and is useful both in surface and underground (tunnels and caverns) rock excavation.

1. INTRODUÇÃO

O desmonte de rocha em ambiente urbano causa sempre impactos negativos no ambiente, impactos que devem ser cuidadosamente estudados e minimizados para níveis aceitáveis.

As vibrações geradas pela detonação de explosivos propagam-se através do terreno podendo atingir edificações, populações e equipamentos. O nível de vibrações que causa incómodo ou dano varia, por um lado, com as características das estruturas ou pessoas atingidas e, por outro lado, com a amplitude, frequência e duração das vibrações, que são função da carga máxima por retardo, da distância ao alvo e das propriedades mecânicas dos terrenos atravessados. Outros factores que afectam de forma menos importante a geração de vibrações são o tipo de rocha onde a explosão tem lugar e a configuração do rebentamento: geometria, existência de superfícies livres, profundidade dos furos, etc.

Na maior parte das situações não é possível monitorizar todas as estruturas que poderão ser atingidas de forma significativa. Assim, devem-se escolher locais de medição tendo em vista dois objectivos distintos: a protecção imediata da envolvente e a recolha de dados que possibilitem o tratamento e determinação do nível de vibrações nos restantes locais. Infelizmente, é por vezes difícil encontrar locais que satisfaçam ambas exigências e onde seja possível instalar a aparelhagem de forma segura.

A empreitada de aprofundamento do Porto de Leixões envolveu o rebentamento de um grande volume de rocha submersa num ambiente fortemente urbanizado. Na monitorização das vibrações foram empregues diversos sismómetros que foram posicionados de acordo com um plano de instrumentação que foi ajustado ao longo da obra.

Após a compleição dos trabalhos, foi necessário fornecer ao Dono de Obra, a Administração dos Portos do Douro e Leixões, elementos que permitissem avaliar a justeza das reclamações de proprietários de edificações, na sua maioria relacionadas com danos cosméticos (fissuração ligeira) nos revestimentos de paredes e tectos de habitações. Os valores de vibração medidos foram extrapolados e determinaram-se valores de pico da velocidade do terreno em toda a envolvente do porto, através de dois métodos. O primeiro consistiu no estabelecimento de leis empíricas de propagação de velocidade de pico com a formulação geral $PPV=f(W,R)$, onde PPV (*Peak Particle Velocity*) é o valor máximo da norma do vector velocidade de vibração no terreno, W é a massa máxima de explosivo por retardo e R é a distância à explosão. O segundo método consistiu na calibração de Redes Neurais Percepção Multicamada para os mesmos parâmetros. A partir das leis de atenuação obtidas pelos dois métodos traçaram-se mapas de isolinhas de velocidade no terreno que estão de acordo com outras medições efectuadas.

Finalmente, foram empregues modelos numéricos tridimensionais dinâmicos de diferenças finitas para modelar a geração e propagação das vibrações neste meio, tendo-se tirado conclusões interessantes sobre a forma como as ondas de tensão se propagam e interagem com o terreno.

2. CONTROLO DE VIBRAÇÕES DURANTE A EMPREITADA DE APROFUNDAMENTO DO PORTO DE LEIXÕES

O Porto de Leixões, instalado na foz do rio Leça, divide as localidades de Matosinhos (a Sul) e Leça (a Norte), sendo cruzado (a Este) pela A28, auto-estrada com 6 faixas (figura 1).

As características geomecânicas do terreno circundante não são conhecidas, pelos autores, de forma detalhada. O substrato rochoso consiste em granito alcalino fracturado na zona terrestre, ocorrendo xistos na transição para o mar. O porto foi definido através da instalação de paredes de contenção nas margens do rio e posterior deposição de rocha e solo incoerente, encontrando-se a área circundante quase completamente construída. Contactos com a população indicaram que um número significativo de edifícios, alguns deles bastante antigos, tem fundações superficiais em areia.



Figura 1 - Vista aérea do Porto de Leixões e envolvente urbana (retirado de www.apdl.pt)

2.1. Trabalhos de desmonte e monitorização das vibrações

O objectivo do desmonte foi aumentar a profundidade do porto de forma a permitir a sua utilização por navios de maiores dimensões (classe Panamax). Os desmontes a fogo analisados tiveram lugar durante todo o ano de 2006, tendo estado envolvidas três empresas, cada uma operando uma plataforma. O modo de operação foi semelhante, com algumas excepções de pormenor. Cada rebentamento consistiu na detonação sucessiva de furos de profundidade variável dispostos numa malha regular com espaçamento de 2,0 a 2,5 m. Foram empregues detonadores electrónicos para reduzir a carga instantânea, mas nas ocasiões em que houve um elevado número de furos, duas ou mais colunas tiveram de ser detonadas com o mesmo retardo.

A área de rebentamento incluiu todo o porto e a bacia de rotação, tendo por isso os pontos de monitorização sido colocados entre os rebentamentos e as zonas construídas e ainda em algumas das tipologias estruturais mais representativas ou sensíveis. Foram usados três macrosismómetros de 16 bit da marca Geosig, modelo GSR-16. A sua localização evoluiu com o desenrolar da obra, queixas da população e localização dos rebentamentos. Os sismómetros foram configurados para reter os registos em que a aceleração excedesse um limite estabelecido para cada uma das três direcções, escolhido de acordo com as características e o nível de ruído de cada local.

Cada registo teve a duração de cinco segundos, dos quais o primeiro corresponde à vibração antes do pico que dá origem ao registo. A duração efectiva de cada onda foi na maioria dos casos de algumas décimas de segundo mas chegou, dependendo do ponto de medida, da carga rebentada e da sequência de tiro, até quase dois segundos. A taxa de amostragem foi de 250 Hz, o que permite a identificação de frequências até 125 Hz. Dadas as distâncias, o tipo de terreno atravessado pelas ondas, o tipo de rebentamento e as estruturas em causa, considera-se que esta frequência é suficiente.

2.2. Dados recolhidos

Foram efectuados 997 tiros que resultaram em 2006 registos. A figura 2 apresenta um registo típico.

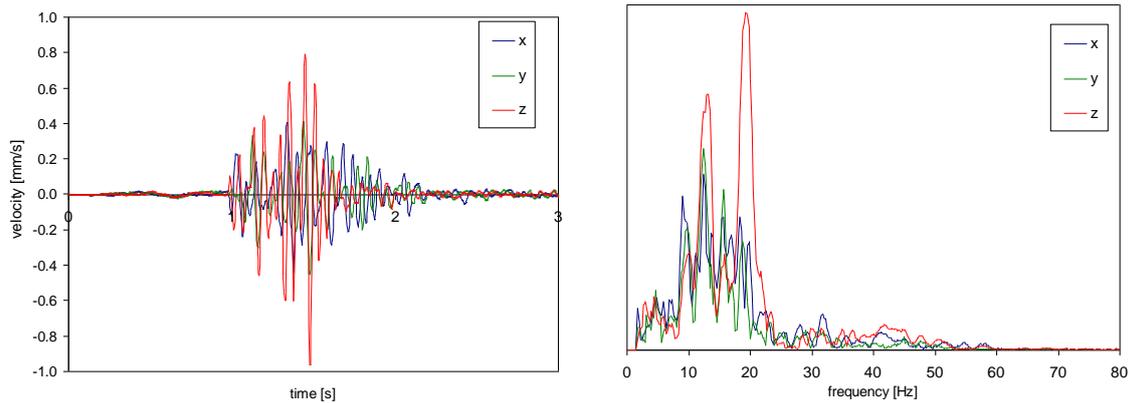


Figura 2 - Registo de vibração: série temporal de velocidade (esq.) e respectivo conteúdo em frequência (dir.)

A figura 3 caracteriza distâncias e massas de explosivo e a dispersão da velocidade de pico em função da distância escalada com a raiz cúbica da massa de explosivo. As cargas instantâneas variaram entre 5 e 95 kg e as distâncias entre 95 e 1200 m. A velocidade de vibração máxima foi da ordem dos 20 mm/s mas mais de 95% dos valores de pico foram inferiores a 6 mm/s.

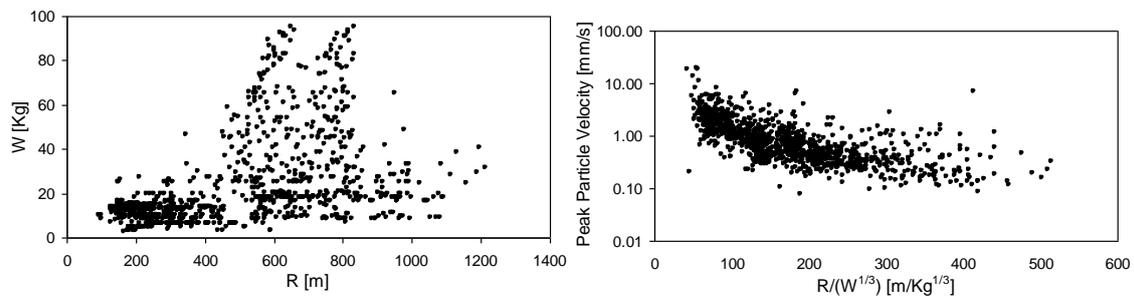


Figura 3 - Massa de explosivo por rebentamento vs distância (esq.) e velocidade de pico vs distância escalada com a carga (dir.)

3. MODELOS DE ATENUAÇÃO

3.1. Lei de Atenuação

Segundo Dowding (1996) e outros autores, é possível definir leis que caracterizam a atenuação da velocidade máxima de vibração (PPV):

$$PPV = k \cdot R^m \cdot W^n \quad [1]$$

onde k , m e n são parâmetros que dependem das características do caminho de propagação e do rebentamento. Esta lei fornece o valor médio das velocidades, correspondendo em termos probabilísticos, a valores cuja probabilidade de não serem excedidos é de 0,5. Como o objectivo desta análise é determinar os valores máximos de velocidade ocorridos, achou-se que deveria ser parametrizada uma equação que indicasse valores de PPV cuja probabilidade de não serem excedidas fosse superior a 0,95. A metodologia está descrita em Resende (2010). Existe uma vantagem significativa na utilização da lei majorada, uma vez que se calculam as cargas máximas através de uma lei média, em 50% dos casos os valores de vibração pretendidos serão excedidos.

Do conjunto de 2006 registos foram eliminados pontos de monitorização que apresentavam comportamento anómalo, causado por condições locais excepcionais. As leis resultantes e os pontos observados estão representados na figura 4.

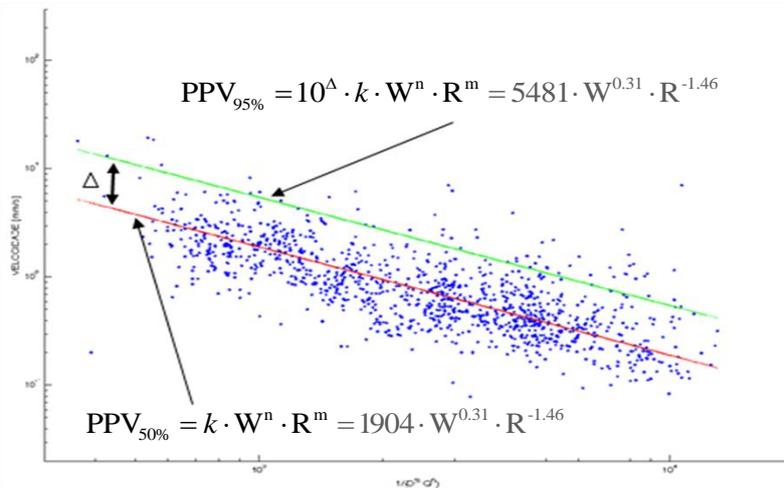


Figura 4 - Leis de atenuação calculadas através de regressão

3.2. Redes Neurais

Com base na eficiência dos processos levados a cabo pelo cérebro e inspirada no seu funcionamento, a Teoria das Redes Neurais Artificiais tem sido desenvolvida e utilizada para modelar padrões de comportamento que se pensam poder ser apreendidos por mecanismos semelhantes aos do cérebro humano.

Nas redes testadas, as ligações são do tipo estritamente directa e todos os neurónios de uma camada estão ligados a todos os neurónios da camada seguinte. As entradas consideradas são o inverso da distância entre o ponto de monitorização da vibração e o ponto da explosão ($1/R$) e a massa do explosivo (W), sendo a velocidade de pico (PPV) a saída considerada. As redes neuronais perceptrão multicamada aprendem através de um processo iterativo de minimização do erro por ajuste dos pesos sinápticos das ligações. Como critério de paragem do processo de aprendizagem utilizou-se a validação cruzada: a rede é treinada para um subconjunto dos dados de aprendizagem, sendo os restantes dados usados para controlo da qualidade do ajuste. Mais detalhes sobre a parametrização da rede podem ser encontrados em Resende (2008).

A figura 5 mostra a que velocidade de pico resultante da rede neuronal e a equação de atenuação é semelhante nas zonas com maior concentração de pontos. Fora dessa zona, a equação empírica mostra-se mais rígida, não acompanhando a rede neuronal, que não está “presa” a uma forma pré-estabelecida.

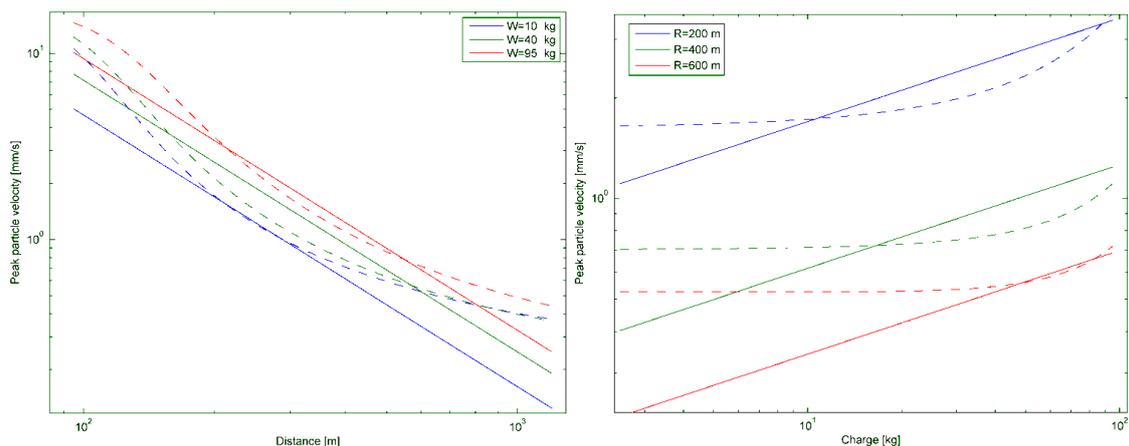


Figura 5 -Variação das velocidades de pico com a distância (esq.) e carga (dir.). As linhas contínuas correspondem à equação $PPV_{50\%} = 1904 R^{-1.46} W^{0.31}$ e linhas a traço interrompido correspondem à rede neuronal

A figura 6 mostra a distribuição das velocidades de pico na área envolvente do porto. Ambos modelos forneceram resultados em geral semelhantes e de acordo com os valores máximos medidos no terreno. Algumas explosões resultaram, no entanto, em valores de PPV muito superiores à média. O interesse em descobrir o que está por trás desta dispersão levou ao desenvolvimento de um modelo dinâmico numérico simples que explore os mecanismos que conduzem a resultados singulares.



Figura 6 - Linhas de iso-velocidade correspondentes à equação $PPV_{50\%} = 1904 R^{-1.46} W^{0.31}$ (a cheio) e à rede neuronal (a traço interrompido)

4. MODELO DINÂMICO TRIDIMENSIONAL

Gerou-se um modelo tridimensional de diferenças finitas que representa uma secção do porto na zona do canal interior, que tem nesta zona aproximadamente 100 m de largura e 15 m de profundidade (figura 7). O modelo foi desenvolvido no programa FLAC3D e tem um comprimento total, na direcção x , de 850 m: 250 m para o lado de Leça e 500 m para o lado de Matosinhos. A largura e altura são 90 e 165 m. O modelo contém quase 500.000 zonas de forma cúbica com lado de 3 m. Sendo a velocidade de propagação das ondas de compressão e de corte 3000 e 1500 m/s, respectivamente, são correctamente reproduzidas ondas com frequências até 125 Hz (Itasca, 2008). Foram instaladas fronteiras absorventes nas quatro fronteiras laterais e na base.

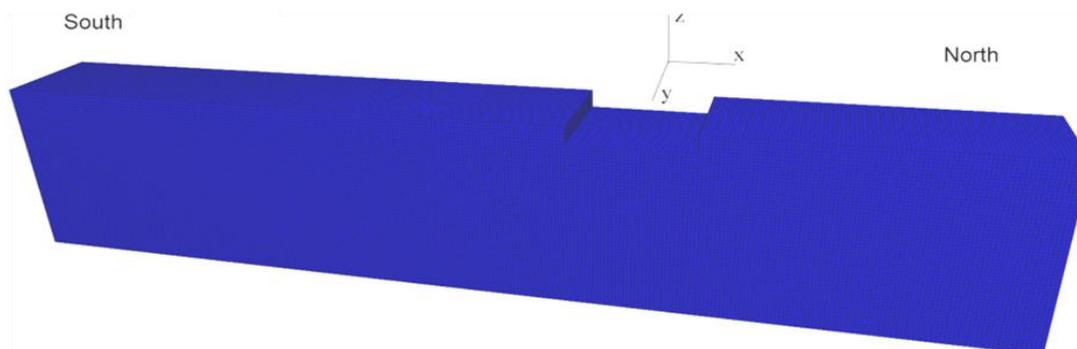


Figura 7 - Modelo de diferenças-finitas

O carregamento foi simulado por uma onda exponencial negativa (figura 8) aplicada no interior de um elemento escavado no centro do canal. Os carregamentos reais consistem em múltiplos rebentamentos sequenciais próximos, mas considera-se que o intervalo de tempo entre eles é suficiente para que cada rebentamento dê origem a uma onda distinta, podendo assim simular-se apenas a explosão que provoca a onda de maior amplitude (Resende, 2010).

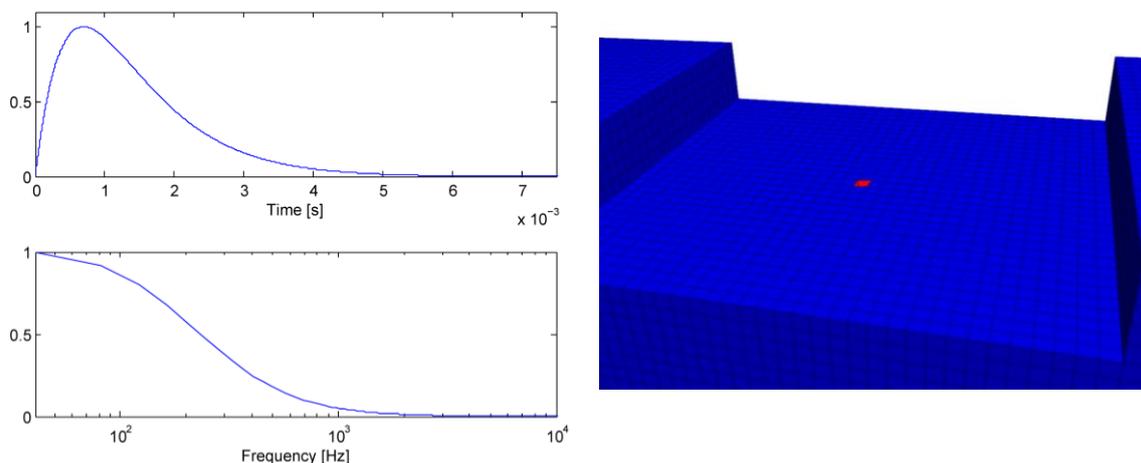
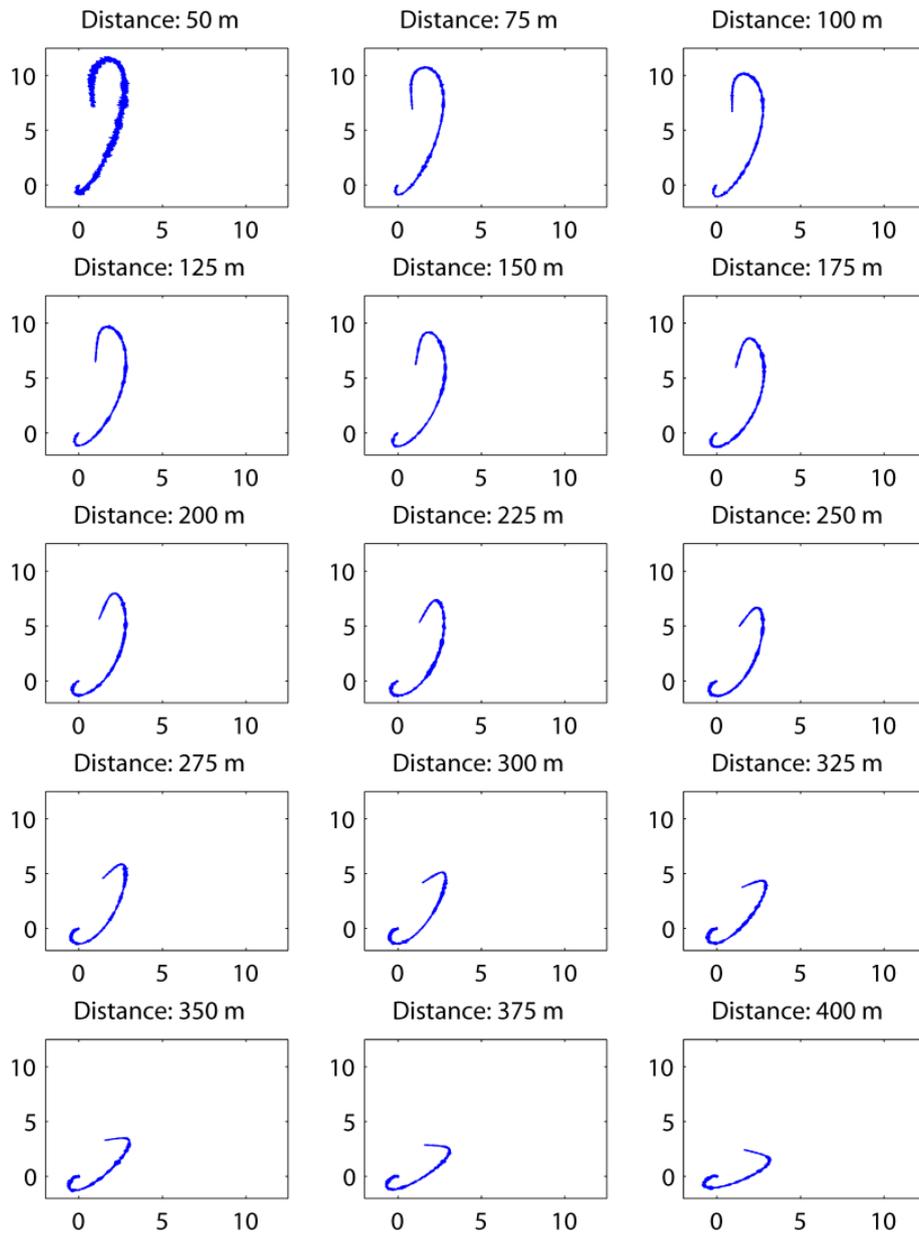


Figura 8 - Função de carga e respectivo conteúdo em frequência (esq.), local de aplicação da carga na base do canal (dir.)

4.1. Modelo de referência

A figura 9 mostra o deslocamento horizontal e vertical (na direcção x) ao longo de um alinhamento de 500 m com início na superfície, no topo do canal. A forma elíptica da curva é típica das ondas superficiais de Rayleigh.



Displacements are in 10^6 m

Figura 9 - Deslocamento horizontal vs deslocamento vertical ao longo da superfície do modelo (a progressão da onda é no sentido positivo horizontal)

A figura 10 mostra a evolução dos máximos da velocidade de vibração no mesmo alinhamento e, para comparação, a lei de atenuação média. Ao contrário da lei de atenuação, a curva do modelo numérico não é linear (no espaço logarítmico), pois, não estando preso a uma determinada forma o modelo enuncia uma reprodução da realidade mais fiel, em especial na proximidade da fonte.

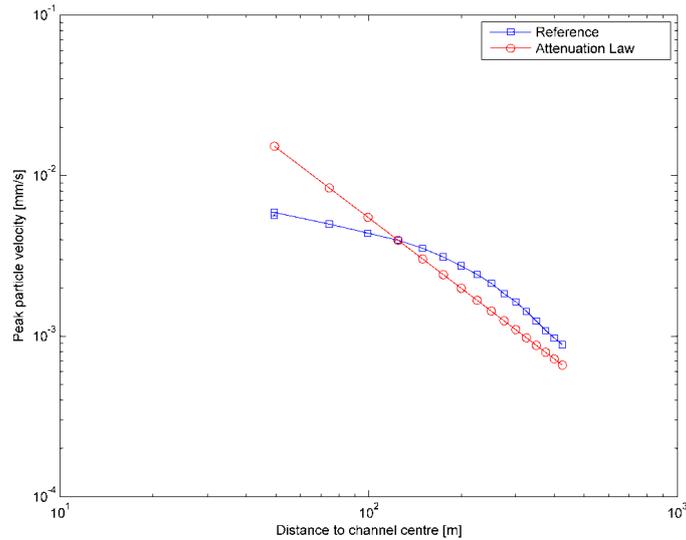


Figura 10 - PPV vs distância ao eixo do canal do modelo numérico e da lei de atenuação média

4.2. Influência de falha no terreno

Neste cálculo, testou-se a influência de uma falha vertical no terreno a 60 m do canal preenchida por material com pouca qualidade (figura 11). Testou-se, para um enchimento com rigidez 500 vezes inferior à da rocha, a influência da possança da falha, e para uma falha de 3 m, a influência da rigidez do material de preenchimento (100, 500 e 1000 vezes menos rígido). A figura 12 mostra que esta singularidade causa a reflexão das ondas com perda de amplitude após a falha e aumento de amplitude antes, na zona onde as ondas incidentes e reflectida se sobrepõem. Como seria de esperar, a reflexão é tanto mais pronunciada quanto maior é a possança da falha e menos competente o preenchimento.

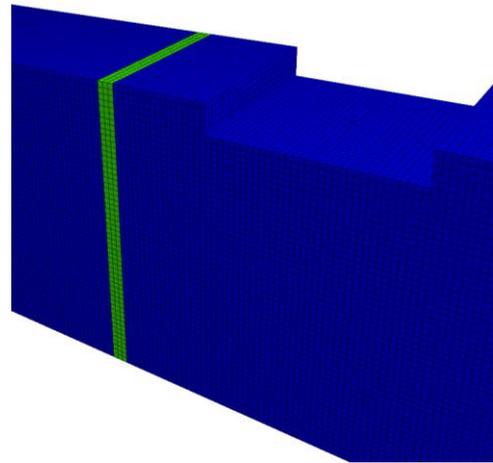


Figura 11 - Pormenor da representação da falha no modelo

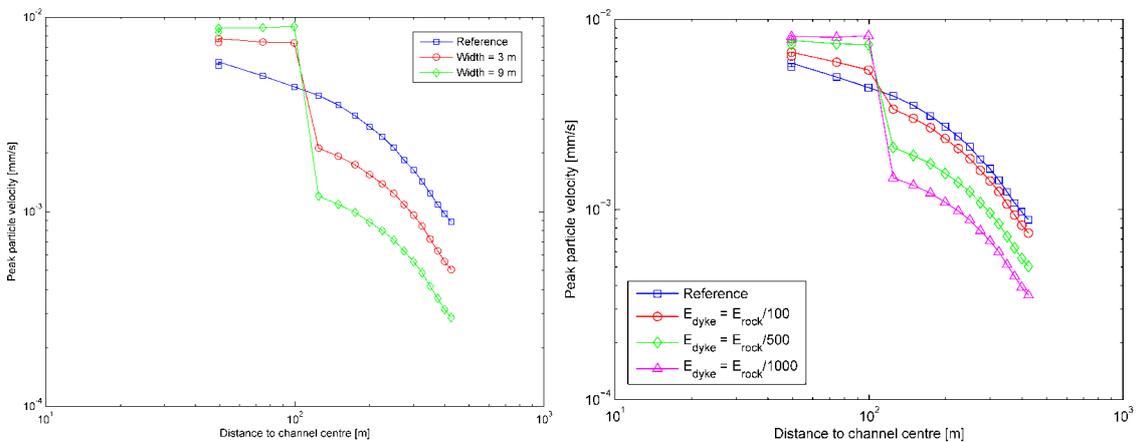


Figura 12 - Evolução da velocidade de pico com variação da espessura da falha (esq.) e com rigidez do material de preenchimento (dir.)

4.3. Influência da modelação do canal

Neste cálculo testou-se a forma como um maior detalhe na representação do cais influencia a propagação das vibrações. Modelou-se, assim, o material de enchimento do cais do canal, atribuindo-lhe uma rigidez 100 e 500 vezes inferior à rocha (figura 13). A figura 14 mostra que ocorre um aumento local da intensidade de vibração, aumento esse que desaparece com a distância ao cais, denotando que as ondas de superfície se podem gerar a uma maior distância do cais.

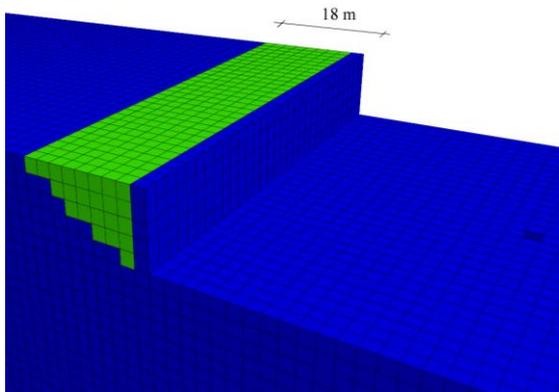


Figura 13 - Modelação do material de enchimento do cais do canal do porto

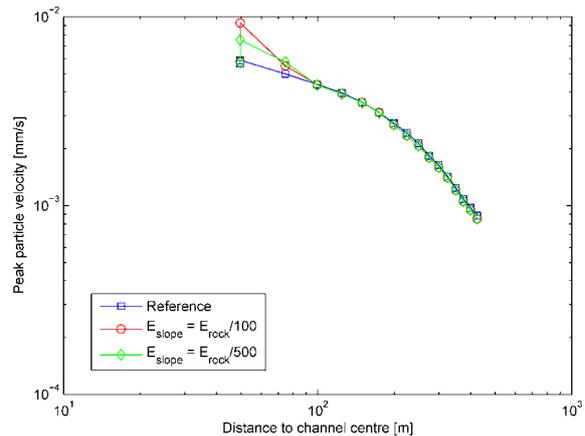


Figura 14 - Evolução da vibração com rigidez do material de preenchimento do cais

5. APLICAÇÃO A OBRAS SUBTERRÂNEAS

A modelação numérica descrita simula o fenómeno de geração e propagação de vibrações devidas ao desmonte de rocha. Uma vez que os principais mecanismos se mantêm quer a escavação e a propagação se dêem à superfície ou no subsolo, os modelos numéricos podem ser aplicados à escavação de túneis e cavernas, tal como é feito em Resende (2010), onde se simulam testes de propagação de vibrações efectuados no complexo subterrâneo da Central Hidroeléctrica da Bemposta.

Nestes casos, em que as geometrias são tridimensionais e a propagação de vibrações é mais complexa, a modelação numérica apresenta ainda mais vantagens que nos casos superficiais. Também nestes casos a representação da geometria e a qualidade da propagação das ondas devem ser cuidadosamente estudadas, sendo os modelos muito exigentes do ponto de vista computacional.

6. CONCLUSÕES

Desenvolveu-se uma análise detalhada dos dados recolhidos ao longo da monitorização da zona circundante a um extenso desmonte de rocha. Da recolha e análise dos dados, regista-se a dificuldade em obter uma distribuição espacial conveniente dos valores medidos e a elevada dispersão, habitual neste tipo de situações. Foi definido um modelo de atenuação clássico consistindo em leis empíricas correspondentes a diferentes níveis de confiança, que foram extremamente úteis ao Dono de Obra para gerir as reclamações apresentadas.

Paralelamente, foi desenvolvido um modelo baseado em Redes Neurais Perceptrão Multicamada. Ambos modelos forneceram distribuições espaciais da velocidade de pico

semelhantes, mas às quais está associada uma grande incerteza, tendo sido calibrada também uma lei que majora 95% dos registos, de forma a minimizar para um valor aceitável as probabilidades de ultrapassagem dos limites legais.

Um modelo numérico de diferenças-finitas demonstrou como singularidades do terreno podem provocar variações consideráveis na amplitude da vibração. Foram estudados mais cenários, referentes ao modo de carga, outros tipos de singularidades, que não são apresentados nesta comunicação por falta de espaço, podendo estes estudos ser encontrados em Resende (2010).

Da utilização destes modelos, há a reter algumas conclusões. Em primeiro lugar, a sua precisão é proporcional ao grau de conhecimento existente sobre as acções e o terreno, sendo que a forma como se consideram e utilizam os resultados devem reflectir a qualidade dos dados de entrada. Em segundo lugar, devido à tridimensionalidade inerente a este fenómeno e às exigências de um cálculo dinâmico, até modelos simples resultam custosos do ponto de vista computacional, principalmente no que diz respeito à memória necessária.

É opinião dos autores que é necessário desenvolver modelos de explosões de rebentamentos em situações controladas, comparando resultados dos modelos com a realidade, de forma a aferir a sua precisão.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e foi co-financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do Projecto POCTI/ECM/57495/2004 e da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/36212/2007. Os autores agradecem à Administração dos Portos do Douro e Leixões (APDL) a autorização para a publicação dos resultados.

REFERÊNCIAS

- Dowding, C.H. (1996). *Construction Vibrations*. Prentice-Hall.
- IPQ - Instituto Português de Qualidade (1983). NP 2074:1983 - Avaliação da Influência em Construções de Vibrações Causadas por Explosões ou Solicitações Similares.
- Itasca, C.G. (2008). *FLAC3D User Manual*. Mineapolis, USA.
- R. Resende, J. Mata, J. Gomes, J. P. Neves (2008). Vibration control of underwater blasting works using artificial neural networks. The 12th Int. Conf. of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). Goa, India.
- Resende, R. (2010). *An Investigation of Stress Wave Propagation through Joints and Rock Masses*. Tese de Doutoramento, FEUP.