

# EXPERIÊNCIAS DE ÍNDOLE GEOTÉCNICA NUMA MESA VIBRATÓRIA

## GEOTECHNICAL EXPERIMENTS ON A SHAKING TABLE

Dinis da Gama, Carlos, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, dgama@ist.utl.pt*

Navarro Torres, Vidal, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, vnavarr@mail.ist.utl.pt*

### RESUMO

Descrevem-se diversos ensaios expeditos realizados com base em solicitações dinâmicas geradas por uma mesa vibratória de tipo laboratorial. Os ensaios são do âmbito geotécnico e aplicam-se tanto a solos quanto a rochas, tendo um carácter didático, por vezes constituindo parte de soluções de apoio para tratamento de problemas reais.

Em particular, é apresentado um caso de estudo que envolveu a estabilidade dinâmica de blocos rochosos em taludes sujeitos a vibrações.

### ABSTRACT

Several swift tests conducted with the involvement of dynamic stresses generated by a laboratory shaking table are described. The tests are mainly geotechnical in essence and they are applied to both soils and rocks, with didactic purposes, providing helpful contributions to the solution of real problems.

In particular, a case study involving the dynamic stability of rock blocks over slopes submitted to vibrations is presented.

### 1. INTRODUÇÃO

Sempre que se examina e pretende conhecer a essência de fenómenos naturais é conveniente presenciar os comportamentos previstos pelos modelos teóricos, através de simulações à escala laboratorial, nas quais os parâmetros envolvidos podem, dentro de determinados limites, ser definidos e controlados, possibilitando o estudo da sensibilidade do sistema, face às variações desses parâmetros.

No caso presente, procura-se avaliar a influência da variável tempo na resposta de estruturas típicas em Geotecnia sujeitas a solicitações dinâmicas, as quais são transmitidas por uma mesa vibratória de dimensão laboratorial. As estruturas ensaiadas procuram representar, em escala reduzida, revestimentos de túneis, taludes com planos de deslizamento prédefinidos, estruturas esbeltas fundadas sobre terrenos sujeitos à liquefação, etc. Na sequência destas observações laboratoriais, procurou-se também averiguar a influência de uma camada de areia, interposta entre a mesa e a estrutura em apreço, como elemento atenuador do sistema em estudo.

As características dinâmicas das solicitações impostas foram sistematicamente registadas por um sismógrafo de engenharia de oito canais, directamente instalado sobre a mesa ou sobre a camada de areia, quase sempre no sentido das baixas amplitudes, de modo a que o resultado de cada ensaio fosse analisado em função do tempo que durou essa solicitação.

Para além do óbvio aspecto didático, estudos deste tipo têm diversas aplicações práticas, designadamente as relacionadas com o estudo de respostas dinâmicas de estruturas adjacentes a

linhas férreas, as quais são sujeitas a vibrações de variada amplitude, devidas à passagem de composições ferroviárias mais ou menos extensas, mas que decorrem por intervalos de tempo consideráveis, acabando por afectar essas estruturas essencialmente por essa razão.

Algumas aplicações da mesa vibratória são apresentadas seguidamente.

## 2. PRINCIPAIS ENSAIOS DINÂMICOS EXECUTADOS

Os equipamentos para compreender os efeitos dinâmicos na Geotecnia podem ser semelhantes aos usados em Engenharia Sísmica, como as mesas vibratórias, que podem estar equipadas com sistemas de aquisição de dados, sensores e instrumentos de controle apropriados [2].

A mesa vibratória permite simular o efeito das vibrações para diferentes níveis de velocidade de vibração e frequências, observando em laboratório a instabilidade ocasionada para diversas estruturas, como o revestimento de túneis (Fig. 1), causar fenómenos de liquefacção em solos siltosos (Fig. 2) e provocar instabilidades de blocos (Fig. 3).



Figura 1 – Simulação da instabilidade dinâmica de um modelo de arco de revestimento de túnel



Figura 2 – Simulação da instabilidade dinâmica por liquefacção de um solo



Figura 3 – Simulação da instabilidade dinâmica de blocos de rocha em taludes

### 3 - ESTUDO DA ESTABILIDADE DINÂMICA DE BLOCOS ROCHOSOS

#### 3.1 Principais modos de rotura dos taludes

A nível geral, os taludes rochosos instabilizam-se [1] através dos seguintes mecanismos:

- Deslizamentos planares
- Instabilização de cunhas rochosas
- Deslizamentos circulares
- Tombamentos de blocos ("toppling")

As condições que conduzem à instabilização de blocos rochosos dependem consideravelmente da sua inserção nos taludes, ou seja, se existe ou não a sua separação física, ou se assentam sobre blocos maiores que funcionem como planos de deslizamento.

As condições que caracterizam tal situação de instabilidade são dadas, para cargas estáticas, através da conhecida representação gráfica que é mostrada na Fig. 4, onde  $\alpha$  é a inclinação da base do bloco,  $b$  a largura dessa base e  $h$  a sua altura.

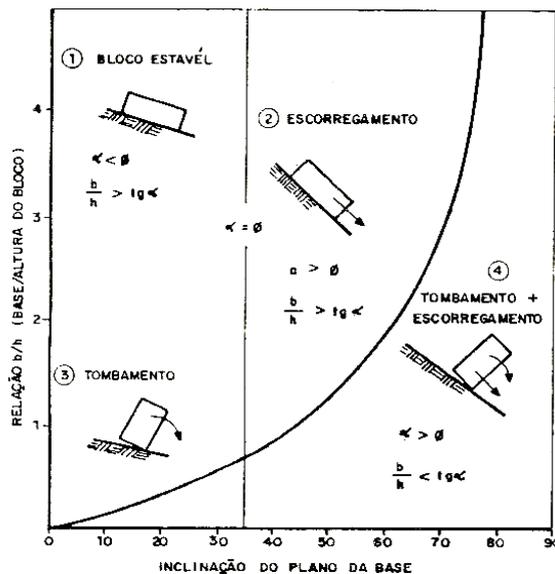


Fig. 4 - Quatro situações possíveis para o escorregamento e tombamento de blocos com um ângulo de atrito de 35° no plano de contacto. [1]

Os mecanismos acima referidos podem ocorrer associados na prática, tudo dependendo da grandeza dos parâmetros envolvidos. Assinale-se que as condições de instabilidade cinemática não exigem a aplicação de forças externas, estáticas ou dinâmicas, para desencadear fenômenos de tombamento ou de escorregamento, visto ser o peso próprio e a posição do centro de gravidade do bloco que determinam tais movimentos. Para os objectivos do presente estudo será adiante considerada a existência de vibrações na base de apoio dos blocos.

### 3.2 - Análise de estabilidade dinâmica de taludes em maciços fracturados

A instabilidade de taludes rochosos ocorre através dos mecanismos de deslizamentos planares, instabilização de cunhas rochosas, deslizamentos circulares e tombamentos de blocos ("toppling").

Actualmente, a estabilidade dinâmica de blocos de rocha nos taludes ou falésias, causada pelas vibrações dos trabalhos geotécnicos e sistemas de transporte, é um tema de interesse, porque o desenvolvimento da sociedade precisa a realização de empreendimentos ou utilizar sistemas de transporte mais dinâmicos, os que geram vibrações que podem causar a instabilidade de blocos rochosos dos taludes localizados em zonas de influência destas solicitações dinâmicas.

A análise da estabilidade dinâmica dos blocos rochosos baseia-se na determinação de factores de segurança que podem ser avaliados pelo quociente entre o somatório de forças resistentes e o somatório de forças motoras.

Para tal, considere-se um bloco assente sobre um talude de inclinação  $\alpha$ , em que a superfície de contacto comum tem um comprimento  $L$ . A Fig. 5 esquematiza essa situação.

A orientação da vibração é importante para o estudo de estabilidade, havendo diversas possibilidades: perpendicular ao plano de contacto, paralela ascendente, paralela descendente e horizontal. O caso mais desfavorável para a segurança é o de vibração horizontal, uma vez que proporciona factores de segurança menores que os restantes três casos, pelo que será utilizado na análise subsequente.

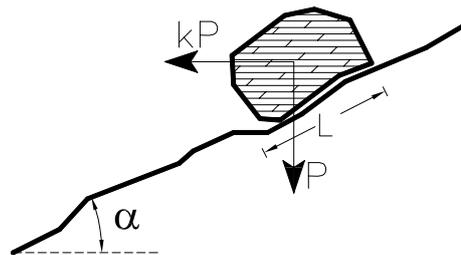


Fig. 5 - Condições geométricas da posição de um bloco rochoso de peso  $P$  sujeito a uma vibração horizontal  $kP$ , sobre um talude de inclinação  $\alpha$

A expressão que fornece o factor de segurança bidimensional quasi-estático de um bloco animado de uma vibração horizontal  $kP$  sobre um talude é dada por:

$$F_s = \frac{(P \cos \alpha - kP \sin \alpha) \operatorname{tg} \phi + cL}{P \sin \alpha + kP \cos \alpha} \quad (1)$$

em que  $P$  é o peso do bloco,  $c$  e  $\phi$  representam a coesão e o ângulo de atrito mobilizados no plano de contacto entre o bloco e o talude, cujo comprimento é  $L$ .

O parâmetro  $k$  é denominado coeficiente sísmico, sendo definido como o quociente entre a aceleração do movimento vibratório  $a$  e a aceleração da gravidade  $g$ . Para convertê-lo em função da velocidade vibratória  $v$ , e admitido uma perturbação sinusoidal, pode-se usar a relação seguinte:

$$k = \frac{a}{g} = \frac{2\pi f v}{g} \quad (2)$$

onde  $f$  traduz a frequência dominante das ondas sísmicas.

Nestas circunstâncias, é possível determinar a estabilidade de blocos rochosos, calculando o seu factor de segurança pela expressão acima indicada, para um vasto número de situações que sejam representativas do caso real.

#### 4. CASO DE ESTUDO DA ESTABILIDADE DINÂMICA DE BLOCOS DE ROCHAS NUMA FALÉSIA

##### 4.1 - Campanha de registos de vibrações

A análise dos dados obtidos com o registo de vibrações efectuados nas imediações da Pedreira de Calcário do Outão (Fig. 6) para a previsão dos efeitos que tais vibrações teriam sobre os taludes rochosos da Estrada Nacional 379-1, localizada junto ao litoral Sul da Serra da Arrábida. A tabela 1 engloba os valores característicos das três variáveis, tal como foram registados recentemente em torno da pedreira, neles se incluindo pontos localizados junto à EN 379-1 (distâncias superiores a 1.000 m).

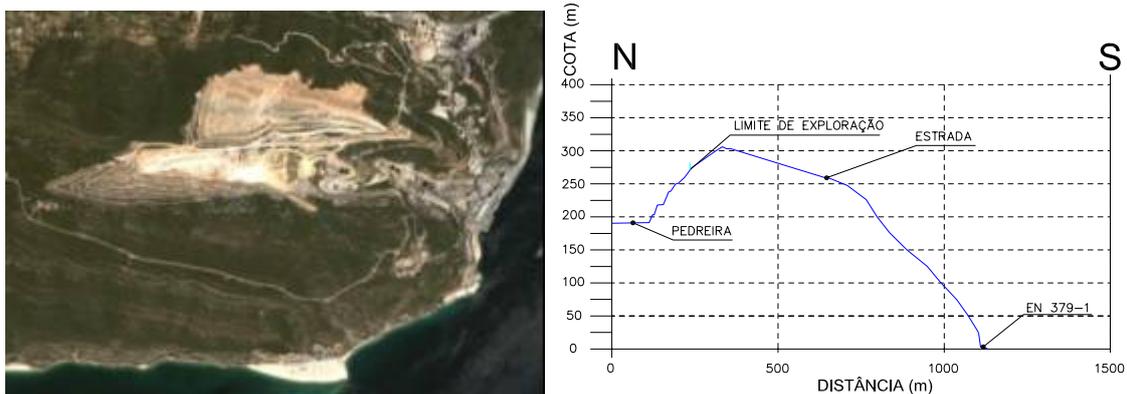


Figura 6 - Imagem de satélite da zona do Outão e perfil do corte no sentido N-S

A equação matemática que relaciona as três variáveis acima referidas é obtida por meio de análise de regressão múltipla, tendo neste caso a seguinte expressão com um coeficiente de correlação de 0.782:

$$v = 3.71 \times Q^{0.71} \times D^{-0.715} \quad (3)$$

Tabela 1 - Valores registados em alguns desmontes com explosivo efectuados na Pedreira de Calcário do Outão[3]

Nº de ordem	Velocidade de vibração (mm/s)	Carga máxima de explosivo (kg)	Distância (m)
1	0.520	50	500
2	1.230	75	500
3	0.785	111	1120
4	0.492	54.1	660
5	0.683	54.5	660
6	1.510	107	400
7	1.420	107	400
8	0.730	107	900
9	0.792	120	750
10	0.601	50	700
11	0.650	50	700

Esta relação, que poderá ser melhorada com a inclusão de mais registos, servirá para realizar previsões da ordem de grandeza das vibrações esperadas a uma certa distância do explosivo, para uma dada carga máxima detonada. Inversamente, pode determinar o peso seguro de explosivo quando houver que proteger alguma estrutura situada a uma distância conhecida.

Para maior facilidade de utilização é apresentado na Fig. 7 um gráfico envolvendo as três variáveis da equação de propagação de vibrações característica da zona da Pedreira de Calcário do Outão.

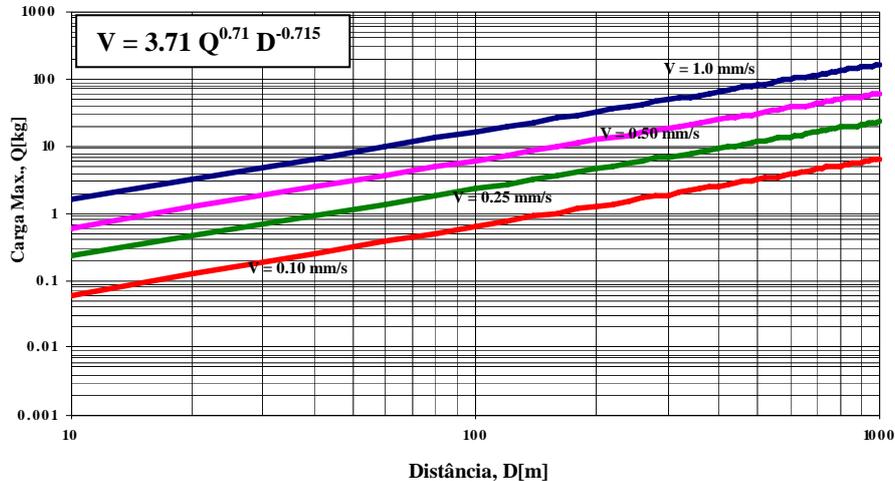


Fig. 7 - Representação gráfica da lei de propagação de vibrações [3].

#### 4.2 - Análise da estabilidade dinâmica

A análise da estabilidade dinâmica dos blocos rochosos é realizada calculando o seu factor de segurança pela expressão (1), para um vasto número de situações que sejam representativas do caso real. Assim, os dados básicos a considerar para a análise são (ver Figura 8):

- Valores constantes: Inclinação do talude da estrada  $\alpha = 80^\circ$   
 Ângulo de atrito do calcário =  $30^\circ$   
 Peso volúmico do calcário =  $25 \text{ kN/m}^3$   
 Frequência da vibração  $f = 50 \text{ Hz}$



Figura 8 - Modelo de instabilização de bloco calcário sobre diaclase, com medição de vibrações

- Variáveis: conforme indicado na tabela seguinte.

Tabela 2 - Valores das variáveis usadas na simulação numérica[3]

GRANDEZAS	PEQUENO	MÉDIO	ALTO
L (dimensão do bloco, m)	0.1	1	10
c (coesão do calcário, kPa)*	0	150	300
v (velocidade de vibração, mm/s)	0.1	1	10

(\*) Valores residuais típicos medidos em laboratório

O universo de soluções revela um conjunto de resultados de interesse que podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- O factor de segurança diminui com o tamanho dos blocos, considerando constantes a coesão e a velocidade de vibração.
- O factor de segurança aumenta fortemente com a coesão, considerando constantes o tamanho dos blocos e a velocidade de vibração.
- O factor de segurança diminui suavemente com a velocidade de vibração, considerando constantes a coesão e o tamanho dos blocos.
- Os mais baixos valores de  $F_s$  (todos menores que a unidade) são conseguidos através de combinações de grandes blocos ( $> 1m$ ), baixa coesão ( $< 150$  kPa) e alta vibração ( $> 1$  mm/s).
- Comparando os factores de segurança dinâmicos com os estáticos (estes obtidos na simulação quando  $k=0$ ) verifica-se que as diminuições de estabilidade crescem com o valor da velocidade de vibração, como seria de esperar, mas os decréscimos são reduzidos (para  $v=10$  mm/s, o  $F_s$  reduz-se 5,5% a 8,1% e para 1 mm/s essas diminuições não chegam a alcançar 1%).

f) Os casos extremos em que  $F_s < 0$ , resultam do numerador da expressão poder ser negativo, ou seja, quando:

$$(P \cos \alpha - kP \sin \alpha) \operatorname{tg} \phi + cL \leq 0$$

Tais situações são características de baixa coesão, reduzido contacto entre bloco e maciço, assim como elevadíssimas velocidades de vibração.

g) No caso particular de não existir coesão, a condição mais desfavorável para se obterem factores de segurança negativos ocorre quando:

$$k > \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$$

h) Para as ordens de grandeza das vibrações registadas na Pedreira de Calcário do Outão (ver Tabela 1), mantendo-se constantes as restantes variáveis, constata-se que as mesmas produzem ligeiro decréscimo dos factores de segurança estáticos que actualmente possuem os blocos rochosos (conforme indicado na alínea e), pelo que se deduz que o seu efeito instabilizador é insignificante.

A análise da estabilidade dinâmica dos blocos rochosos é baseada na determinação do factor de segurança considerando os parâmetros inerentes ao bloco, o atrito entre o bloco e o talude a distância entre o bloco e a solicitação das vibrações e a amplitude e frequências das vibrações.

Face aos dados coligidos nas campanhas de registo de vibrações provenientes das detonações efectuadas regularmente na Pedreira de Calcário do Outão, assim como as observações efectuadas nos taludes confinantes da EN379-1, considera-se não existir qualquer correlação de causa e efeito entre eventuais quedas de blocos que possam ocorrer nesses taludes e aquelas vibrações.

## 5. CONCLUSÕES

Com o objectivo de ilustrar a utilização de uma mesa vibratória em experiências geotécnicas de laboratório, foram descritas algumas aplicações, com destaque para a estabilidade dinâmica de blocos rochosos sobre taludes. Enfatiza-se a simulação sobre modelos à escala reduzida, como meio de obtenção de informações sobre o comportamento real desses fenómenos.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Hoek & Bray, 1977. Rock Slope Engineering. IMM, London.
- [2] Dyke, S.J., et al, 2005. Earthquake Engineering Education: A Modern Approach. Washington University in St. Louis.
- [3] Centro de Geotecnia, Relatório Outubro 2005. Estudo das vibrações causadas pelos desmontes com explosivos realizados na pedreira do Outão e dos seus efeitos sobre a estabilidade de blocos das falésias próximas.