

ANÁLISE DE QUEDA DE BLOCOS ESCARPA DAS FONTAÍNHAS

ROCKFALL ANALYSIS FONTAÍNHAS ROCK SLOPE

Pereira, Pedro, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, ec00012@fe.up.pt*
Veiga, Isabel, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, ec00048@fe.up.pt*
Campos e Matos, António, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, acm@fe.up.pt*

RESUMO

O Outono de 2000 e o Inverno de 2000/2001 foram períodos particularmente preocupantes no que diz respeito a problemas de estabilidade de taludes em Portugal devido à intensidade e quantidade da precipitação ocorrida. A escarpa das Fontainhas, no Porto, foi uma zona especialmente afectada, pois sofreu movimentos de massas de blocos significativos. Este trabalho consiste num estudo geral deste tipo de instabilidades discutindo as eventuais soluções e formas de análise das mesmas. Para realizar o estudo recorreu-se ao software *Rockfall* da *Rocscience* que tem em conta alguns parâmetros, de avaliação complexa, e que se encontram associados a este tipo de instabilidade.

ABSTRACT

The year 2000 Autumn and the Winter of 2000/2001 were particularly preoccupying periods to the rock slope stability in Portugal due to intensity and amount of the precipitation verified in these periods. An especially preoccupying zone was the rock slope of Fontainhas, situated in the centre of the city of Porto which suffered significant mass movements in the form of rock blocks. This work consists of a general study of this type of instabilities, providing some possible solutions and types of possible analysis to the problem. For the study it was used the software *Rockfall* from *Rocscience*, which deals with complex parameters common to this type of rock mass instabilities.

1. INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade permite dimensionar um talude, consoante o cálculo de um factor de segurança, e definir o tipo de medidas correctivas e estabilizadoras que devem ser aplicadas em caso de instabilidades potenciais. É necessário o conhecimento geológico, geomecânico e hidrogeológico dos materiais que formam o talude, os possíveis modelos de rotura que podem ter lugar e os factores que influenciam, condicionam e desencadeiam as instabilidades.

Existem dois tipos de taludes, os naturais e os artificiais. O estudo vai basear-se no primeiro tipo que muitas vezes necessita de ser estabilizado pois, ao longo do tempo vai perdendo a sua capacidade de suporte e pode originar grandes acidentes com grandes implicações a nível social, económico e ambiental.

São muitos os factores que controlam os movimentos dos taludes. Incluem-se nestes todos aqueles que são capazes de modificar as forças internas e externas que actuam no terreno. Podem estes factores dividir-se em condicionantes e desencadeantes. Os primeiros são

intrínsecos aos materiais naturais e incluem-se os geométricos, geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos. Os segundos são as acções externas que actuam nos materiais e alteram as suas características e propriedades.

2. TALUDE DAS FONTAÍNHAS

O Outono de 2000 e o Inverno de 2000/2001 foram períodos particularmente preocupantes no que diz respeito a problemas de estabilidade de taludes em Portugal devido à intensidade e quantidade da precipitação verificada nesses períodos. Uma zona especialmente afectada foi a zona da escarpa das Fontainhas, situada no centro da cidade do Porto que sofreu movimentos de massas nesse Inverno. A Câmara Municipal do Porto acompanhou o fenómeno desde Janeiro de 2001 através de observações e estudos que permitiram seleccionar um conjunto de medidas correctivas para manter a estabilidade dos taludes em causa e, consecutivamente, os edifícios situados na zona. Alguns resultados desta ocorrência são visíveis nas fotos 1 e 2. [1,5,6]



Figuras 1 e 2 – Abertura de fendas e movimento do muro na zona das Fontainhas

3. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ESCARPA DAS FONTAÍNHAS

A escarpa das Fontainhas situa-se na margem direita do Rio Douro entre a ponte Luíz I e a ponte D. Infante. Tem uma extensão próxima de 110 metros paralela ao rio e uma altura média cerca de 50 metros, entre o Passeio das Fontainhas e a Avenida Gustavo Eiffel, com uma inclinação geral de 40-45° na direcção do rio. Em algumas zonas mais específicas tem uma inclinação quase vertical com cerca de 20 metros de altura. [1] A figura 3 apresenta uma visão geral da escarpa já após o acidente ocorrido em 2000/2001.

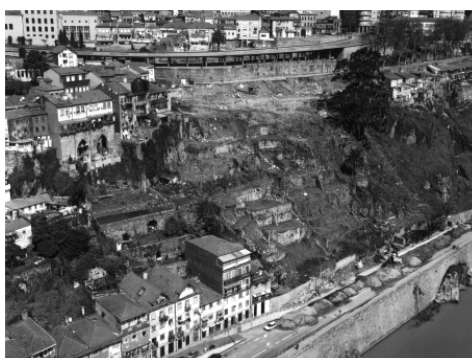


Figura 3 – Vista geral da escarpa das Fontainhas cedida pelo GEG (Fevereiro 2001)

A escarpa é composta por um maciço rochoso aflorante caracterizado por um granito de duas micas de grão médio conhecido por granito do Porto. De um modo geral, o maciço ao longo da escarpa encontra-se medianamente alterado a alterado [1]. Em algumas zonas ele apresenta-se mesmo vertical.

4. FACTORES DE INSTABILIDADE

No caso específico da Escarpa das Fontainhas, a fracturação é o aspecto dominador da dinâmica da escarpa. O escoamento no interior do maciço, causado por chuvadas longas e intensas, origina enormes forças de pressão por causa da insuficiente capacidade de escoar água. Estas pressões reduzem a intensidade quando se formam novos canais para o escoamento da água. A formação destes canais só é possível com a própria rotura do maciço. Isto explica o comportamento instável da zona ao longo dos anos, favorecendo o movimento do terreno de acordo com a orientação das descontinuidades. A rotura do maciço é facilitada pelo efeito da meteorização, que começa por diminuir a capacidade resistente nas descontinuidades e que se estende para o restante maciço. Com base em estudos já realizados na zona é possível verificar uma coincidência entre as épocas de grande pluviosidade e os acidentes que ocorreram em outros anos.

5. ESTUDO DA INSTABILIDADE DE BLOCOS

A taludes com elevado grau de fracturação encontra-se associado o risco de queda de blocos. Uma vez iniciado o movimento de queda do bloco, o factor que mais influencia a trajectória do bloco é a geometria do talude. A existência de faces quase verticais nos taludes provoca um aumento da velocidade horizontal do bloco que provoca um grande afastamento do talude aquando a sua queda. A capacidade de travagem dos materiais designa-se por coeficiente de restituição e assume um valor elevado quando se trata de materiais rochosos pouco alterados e o inverso quando se trata de solos, gravilha e mesmo granito muito alterado. É por este motivo que muitas vezes são utilizadas camadas de gravilha para amortecer as mencionadas quedas de blocos. Existem também outras técnicas passíveis de ser aplicadas dependendo do fim a que se destina o talude e dependendo também do risco permitido e do orçamento existente. A figura 4 esquematiza alguns desses procedimentos de estabilização.

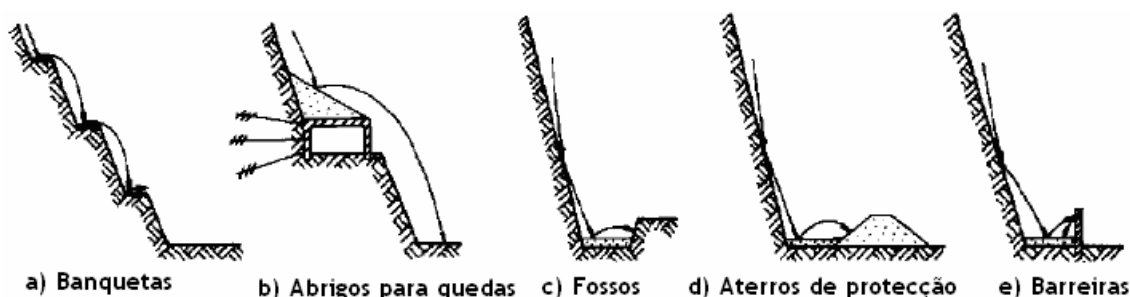


Figura 4 – Medidas estabilizadoras para quedas de blocos [3]

A solução e) representa a utilização de barreiras dinâmicas colocadas em zonas especificamente escolhidas com o objectivo de recolher o maior número de blocos. A escolha das barreiras depende da energia cinética acumulada pelos blocos e das alturas atingidas pelos blocos. A utilização desta solução tem sofrido um aumento progressivo devido à facilidade construtiva e grande capacidade de suporte. A obra nas Fontainhas tinha condicionantes a nível de espaço de manobra e orçamento, razão pela qual foram adoptadas barreiras dinâmicas. Além disso, esta estabilização foi temporária pois, só foi necessária durante as obras para evitar a queda de blocos para a estrada,

No âmbito do estudo da estabilidade da Escarpa das Fontainhas foi realizado um estudo que visa analisar estas quedas de blocos e estudar as soluções ideais comparativamente com as soluções adoptadas. Para isso foi utilizado o programa *RocFall*, incluído no conjunto de ferramentas da *RocScience*. Pretende-se esclarecer algumas considerações que o programa leva em

consideração para conseguir calcular este tipo de instabilidade. É possível verificar que alguns parâmetros destabilizadores não são possíveis de contabilizar de uma forma concreta.

5.1 Definição das trajectórias analisadas

Como a queda de um bloco é um fenómeno extremamente variável e imprevisto, a análise elaborada não se pode cingir a um único perfil. Foram escolhidos três perfis distintos, apresentados na figura 5, todos eles na zona da escarpa que apresentava maiores probabilidades de queda de blocos. Pretende-se que os perfis consigam cobrir a maior parte dessa zona e que caracterizem a variabilidade de relevo.

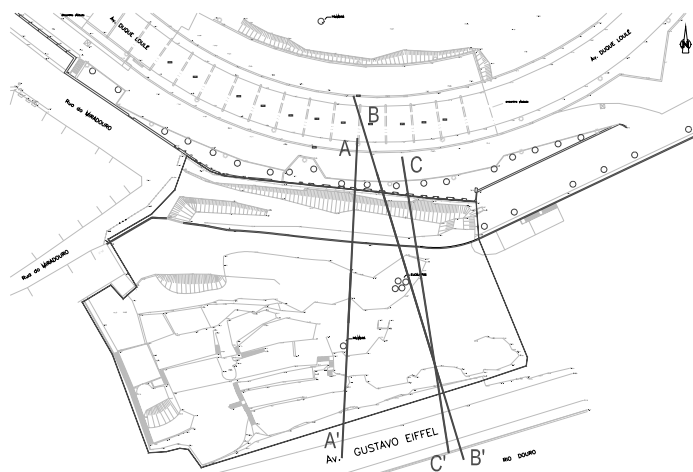


Figura 5 – Localização dos perfis em planta [6]

Para ter em conta a variabilidade do terreno activou-se a opção do programa que considera a variação dos próprios vértices do perfil definido através da definição de um desvio padrão aceitável. Esta opção permite ter em conta o possível erro inerente às próprias medições dos perfis. A figura 6 pretende ilustrar a diferença da análise de um perfil sem e com variação dos vértices. A activação desta opção do programa permite a realização de uma pseudo-análise 3D, ou seja, ao fazer variar as cotas dos vértices em pequenas distâncias estamos não só a analisar o perfil inicial mas também alguns possíveis perfis nas imediações do perfil de origem. Sendo assim, consegue-se cobrir uma maior gama de perfis analisados, ultrapassando em larga escala os três perfis traçados inicialmente.

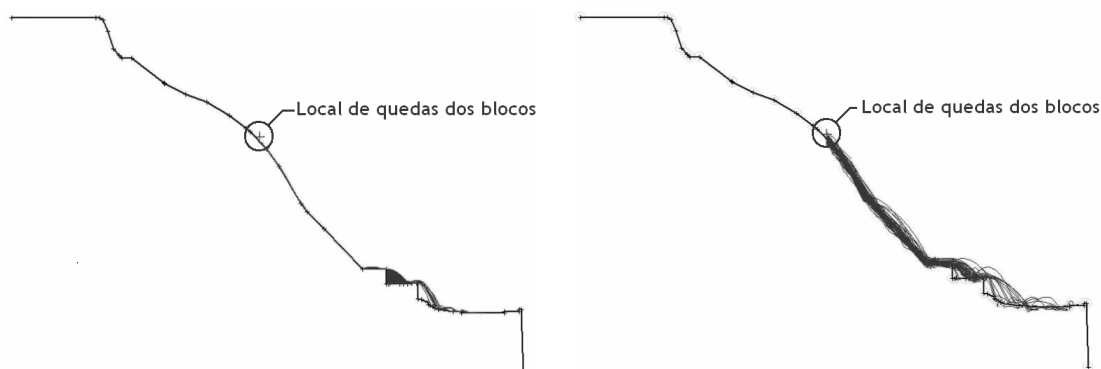


Figura 6 – Diferenças nas trajectórias considerando ou não variação dos vértices

A consideração da variação dos perfis permite obter resultados diferentes dos que são obtidos se não se considerar a variação. Esta variação permite abranger uma área mais vasta de casos. Note-se que a figura da direita (que tem em conta a variação dos vértices) provoca quedas mais gravosas. A não consideração da variação pode supor um perfil seguro que na realidade pode ser bastante inseguro se houver um ponto que tenha outro valor de cota. Estas pequenas alterações mexem com as inclinações e pontos gravosos do talude.

5.2 Definição dos materiais

Relativamente aos materiais do talude, o programa permite definir os parâmetros dos materiais no local em estudo. Os dados utilizados foram obtidos com base no sistema GSI (Geological Strength Index). O material existente no local dos desprendimentos dos blocos é caracterizado por um ângulo de atrito médio de 39° e coeficientes de restituição normal e tangencial de 0,35 e 0,85, respectivamente, sendo os valores destas constantes determinados de acordo com as tabelas disponibilizadas no próprio programa. É, no entanto, de lembrar que estes valores padrão não possuem um elevado grau de certeza.

5.3 Blocos analisados

Uma das limitações deste tipo de programas é o facto de não ser possível definir directamente a forma do bloco no programa. É considerado um ponto onde toda a massa se encontra concentrada. Contudo, a simulação da forma de um bloco pode ser conseguida através da alteração de outros parâmetros do programa. Uma hipótese sugerida pelos criadores do *software* passa pela alteração do ângulo de atrito. Considera-se que para blocos esféricos o ângulo de atrito deverá ser baixo simulando a falta de aderência característica deste tipo de bloco na queda. Blocos alongados e angulosos que escorreguem segundo a sua maior dimensão deverão estar associados a ângulos de atrito mais elevados para simular a maior aderência. Para confirmar a influência deste parâmetro, e de certa forma, a influência da forma do bloco apresenta-se de seguida alguns resultados obtidos usando um bloco com forma esferóide, isto é, com um ângulo de atrito de 5° e um bloco mais anguloso com um ângulo de atrito de 39° (valor do ângulo de atrito considerado para o maciço). As alturas atingidas pelos diferentes blocos são apresentadas na figura 7.

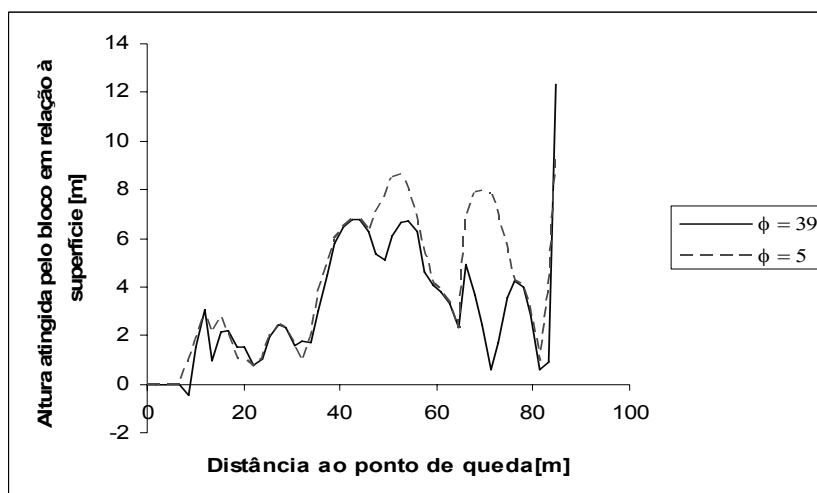


Figura 7 – Variação da forma do bloco

É possível observar na figura 7 que a forma do bloco influencia a trajetória. Os blocos mais esféricos atingem, regra geral, alturas maiores acima do perfil o que já seria de esperar pois, a consideração do ângulo de atrito baixo leva a que haja menor aderência e menor amortecimento ao longo da queda.

5.4 Estudo da influência da posição do desprendimento e do peso do bloco

Nesta secção pretende-se analisar a influência do local de desprendimento e do peso do bloco na trajetória tomada pelo mesmo. O objectivo é perceber se a trajetória que os desprendimentos tomam depende mais da posição inicial, do peso do bloco ou de ambas as condicionantes.

Independentemente da trajetória tomada pelo bloco, o seu peso tem influência no dimensionamento das soluções de estabilização e protecção por causa da determinação da energia que as barreiras têm que suportar. Os diferentes pesos dos blocos levam a um acumular de energia cinética diferente para cada um deles. As barreiras flexíveis temporárias adoptadas devem ser dimensionadas de acordo com esta energia acumulada.

Segue-se uma exemplificação para um dos perfis do método de cálculo. Refere-se no fim qual a solução ideal para os restantes perfis.

5.5 Exemplo – Perfil A

O corte do perfil A está representado na figura 8 junto com a definição dos locais de queda dos blocos que vão ser estudados. Os locais foram escolhidos aleatoriamente para perceber quais os locais mais problemáticos.

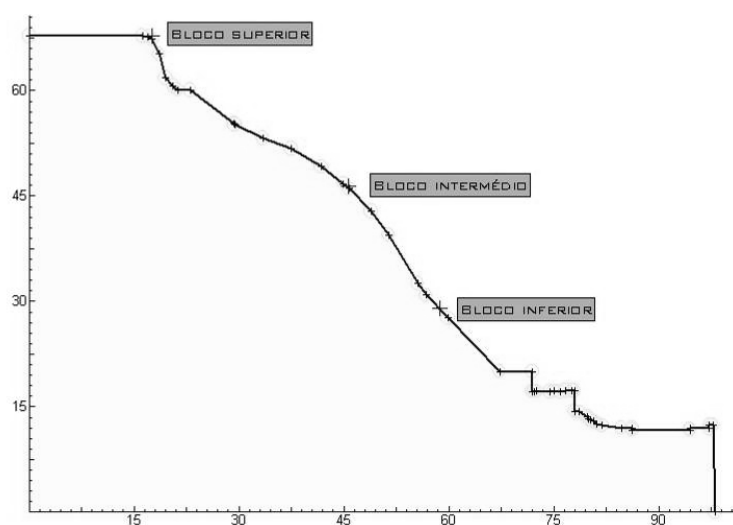


Figura 8 – Perfil A com os respectivos locais de queda dos blocos.

- Estudo do peso

Para estudar a variação do peso dos blocos foi simulado a queda do topo do talude para variados pesos. Os pesos adoptados nesta primeira análise foram 5, 500 e 3500kg. O peso máximo considerado representa já um bloco de grandes dimensões, pelo que se considera um limite máximo aceitável.

Para verificar a influência do peso na queda fez-se um estudo da altura que os blocos atingem acima do perfil que está representado no gráfico da figura 9.

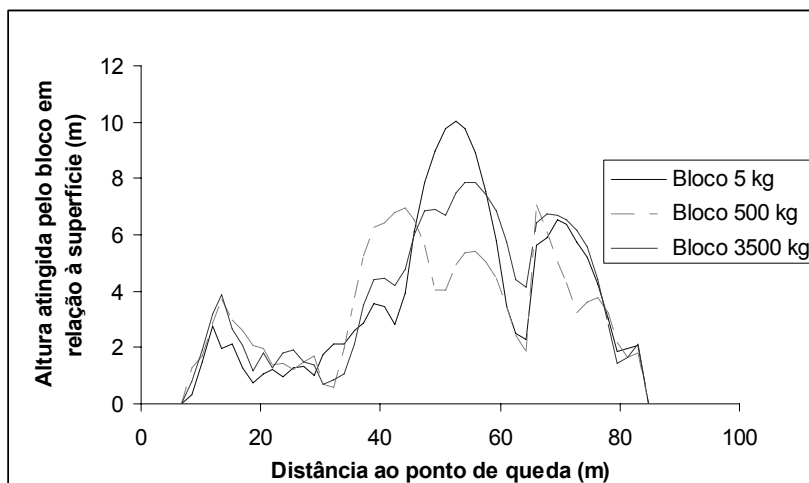


Figura 9 – Variação do peso do bloco lançado do topo do perfil A

O gráfico mostra que os blocos com peso inferior atingem alturas e distâncias maiores. No entanto essas diferenças não são muito significativas. Em alguns locais, o bloco de maior peso consegue atingir alturas mais elevadas. Isto deve-se ao facto de o estudo ser probabilístico, tendo em conta a influência da variação de outros parâmetros conjugados com este.

Após a consulta de vários manuais referentes ao programa *RocFall* decidiu-se verificar a influência do peso recorrendo ao estudo probabilístico com um *seed-number* fixo, ou seja, sempre que se repete o lançamento dos blocos, o número que origina as variações é fixo (pseudo-aleatório). Esta função permite avaliar a influência de um parâmetro específico. Analisou-se um perfil específico, com a opção *Pseudo-random* activa, variando-se o peso do bloco despreendido, considerando o bloco de 5 kg e 3500 kg. As alturas atingidas por estes blocos estão representadas no gráfico da figura 10.

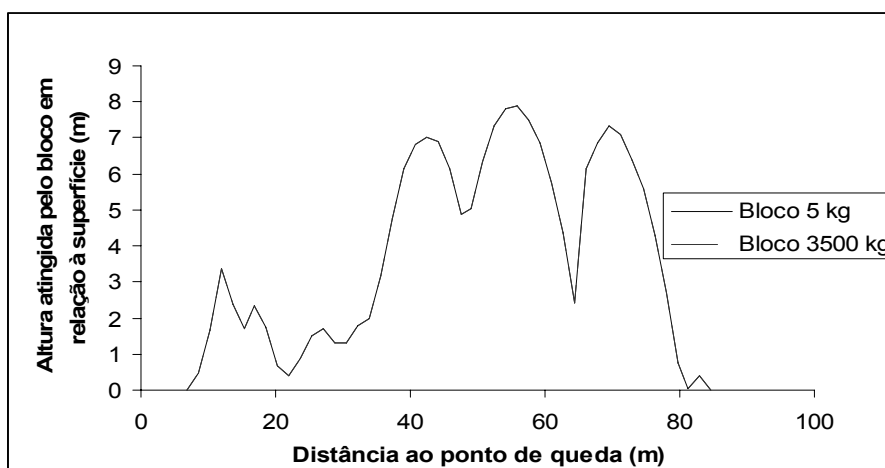


Figura 10 – Variação do peso do bloco considerando variação dos vértices do talude

Utilizando esta função chegou-se à conclusão que as trajectórias de um bloco de 5 kg são exactamente iguais às dos blocos de 3500 kg, o que leva a crer que o programa não considera o peso do bloco como uma variável influente na altura atingida pelo bloco.

- Estudo da variação do local

As restantes análises serão feitas só para o peso maior e menor pretendendo-se abranger os casos intermédios.

Lança-se cada um destes blocos nos três locais distintos como mostra a figura 8. Os gráficos representados nas figuras 11 e 12 mostram as alturas atingidas pelos blocos quando lançados dos diferentes locais.

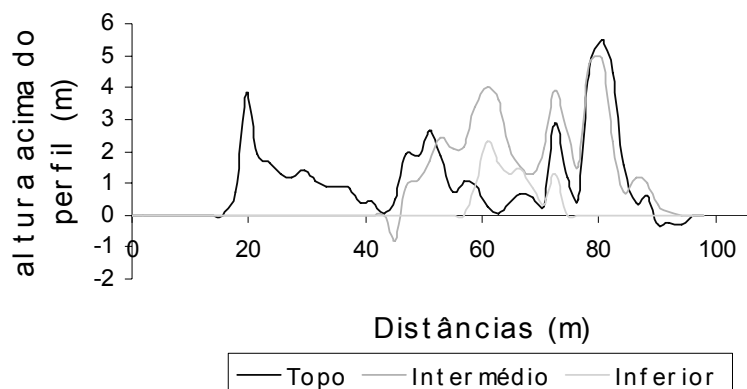


Figura 11 – Alturas atingidas pelo bloco de 5Kg lançado dos 3 locais

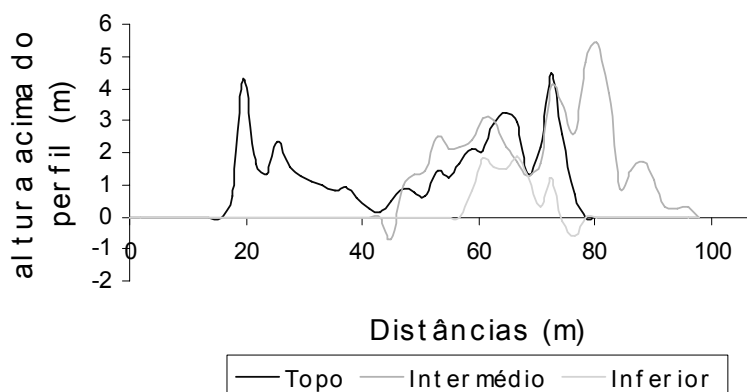


Figura 12 – Alturas atingidas pelo bloco de 3500Kg lançado dos 3 locais

As situações mais desfavoráveis referem-se à queda das posições de topo e intermédia. A localização inferior dá valores mais baixos de altura e até de distâncias percorridas pelo bloco.

5.6 Dimensionamento das barreiras

Realizou-se um estudo estatístico das quedas de blocos dos locais mencionados. Com um número elevado de ensaios viáveis optou-se por dimensionar as barreiras flexíveis para o percentil 90 (90% dos casos encontram-se estáveis com a solução dimensionada), tanto em termos de altura das barreiras bem como energia cinética. Apresentam-se no quadro 1 os resultados obtidos para os diferentes perfis.

Quadro 1 – Dimensionamento da altura e da capacidade energética das barreiras dinâmicas

Perfil	Altura (m)			Energia (kJ)		
	Máxima	90%	Considerada	Máxima	90%	Considerada
A	5.4	4.3	4,5	483.3	419.8	450
B	4.4	2.0	2,5	580.7	188.5	200
C	9.9	7.5	4.5	631.4	385.6	400

Para garantir uma uniformidade de soluções, foi adoptado como solução final, uma barreira com capacidade energética de 500kJ. Em relação às alturas de instalação da mesma considerou-se

um valor de 4.5m. Uma altura de 7,5 metros para o perfil C é exagerada. A solução ideal passa pelo complemento com outros métodos ou mesmo a interrupção total do trânsito na via de comunicação subjacente. É costume em situações semelhantes proceder ao recalçamento de blocos em perigo de queda das zonas mais cimeiras do talude, pregagens pontuais em blocos na mesma situação e a utilização de redes ao longo do talude. Todas estas medidas foram postas em prática na zona das Fontainhas logo após a ocorrência dos acidentes. A solução adoptada em obra tinha capacidade de 750 kJ o que garante a segurança em termos de energia absorvida. É necessário lembrar que na eventualidade de analisar blocos com pesos superiores a 3500 kg, as barreiras colocadas efectivamente em obra serão mesmo necessárias em termos de capacidade energética. No entanto, no que diz respeito às alturas de instalação usadas em obra (3 e 5 metros), tais poderão não ser suficientes em certas zonas da escarpa onde se obteve valores superiores a 3 metros.

5.7 Análise de um caso real de queda de um bloco

No decorrer das obras de estabilização do maciço, ocorreu um desprendimento de um bloco de dimensão considerável de um local representado na figura 13. O local do desprendimento encontra-se aproximadamente à cota 42.

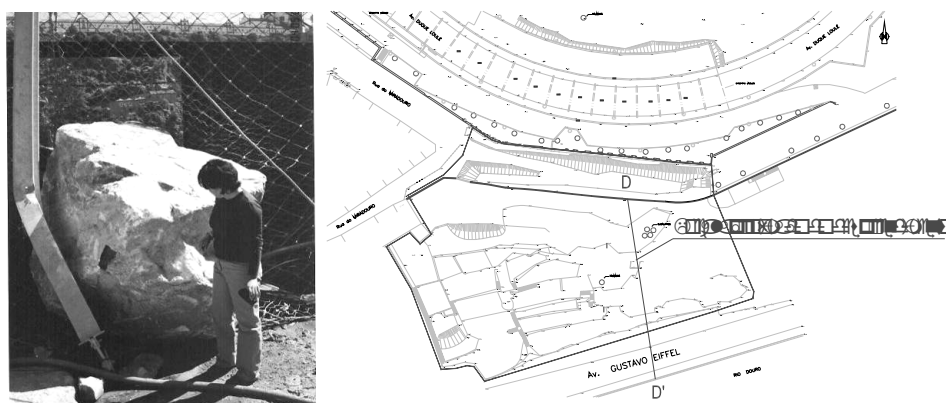


Figura 13 – Local de desprendimento e fotografia do respectivo bloco.

De acordo com o projecto disponível do local sabe-se que a barreira flexível é do tipo *Geobrugg* RX-075 (possui anéis de travagem). O embate ocorreu praticamente num dos perfis de aço HEB que funcionam como postes para suportar a rede, tendo a rede sido muito pouco solicitada. A desvantagem deste tipo de embate diz respeito ao facto de se perder a parcela de energia dissipada na rede, fazendo com que a deformação do poste e dos anéis de travagem dissipem toda a energia do bloco em queda.

5.7.1 Definição da queda

A queda foi modelada no programa *RockFall*. Esta simulação da ocorrência servirá para verificar se um embate dito normal (no centro da rede de anéis) será travado pelas barreiras dinâmicas. De acordo com as fotografias disponíveis deste bloco, foi estimado um peso de 3500 kg.

5.7.2 Resultados obtidos

A altura da barreira para o percentil 90 teria que ter aproximadamente 2,00 metros. Uma vez que as barreiras colocadas no local possuem uma altura de 3,00 metros, é possível afirmar que o embate, será feito em segurança. Os 3,00 metros da barreira são mesmo capazes de travar aproximadamente 98% dos casos de queda neste perfil específico.

Relativamente aos dados da energia cinética recolhidos, verifica-se que o valor máximo obtido foi 530,85 kJ, com um percentil 90 associado de 239,80 kJ. As barreiras no local são capazes de suportar quedas de blocos que acumulam uma energia cinética de 750 kJ. É, então, facilmente perceptível que as barreiras no local se encontram sobredimensionadas relativamente a este desprendimento.

Se o embate se desse no centro da rede, a energia dissipada permitiria que a deformação dos anéis de travagem e do próprio poste fossem muito mais reduzidas. A deformação da rede funciona como primeira fase dissipadora da energia. De qualquer das formas, se o conjunto poste + anéis de travagem foi perfeitamente capaz de reter a queda, o conjunto completo com a rede será também capaz de o fazer.

6. CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho demonstra a importância de um estudo aprofundado quando se trabalha com taludes bastante heterogéneos. Estas situações são impossíveis de caracterizar completamente, abrangendo todos os pormenores de uma caracterização geológica-geotécnica. A maior parte das soluções baseiam-se na experiência acumulada noutras obras e muitas vezes as soluções são adaptadas na própria obra devido à falta de conhecimento típica nestas situações.

Os programas de cálculo existentes para este tipo de instabilidades funcionam muito à base de probabilidades. Apesar de fornecerem resultados coerentes, carecem a nível de introdução de variáveis a que a queda de blocos rochosos está sujeita, necessitando de uma constante adaptação e alteração das variáveis introduzidas de forma a simular mais aproximadamente o fenómeno de queda dos blocos.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Borges, Luísa; Correia, Ana; “Escorregamentos de terra e queda de blocos – O exemplo do Passeio das Fontainhas (Porto)”; Seminário “Riscos Geológicos” – 29 a 30 de Setembro, 2003
- [2] Dias, F. P.; Herrmann, M. L. P.; “Análise da susceptibilidade a deslizamentos no Bairro Saco Grande, Florianópolis – SC”, Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra Vol. 21 (1): 91-104, 2002 (Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro)
- [3] Hoek, E. ; “Practical rock engineering”
- [4] Matos, António Campos e; “Estabilização da Escarpa das Fontainhas – Telas Finais. Memória Descritiva”, Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Março 2004
- [5] Matos, António Campos e, et al; “Escarpa das Fontainhas – Porto. Escorregamentos 2001. Registo Histórico e Estudos Geológicos.”
- [6] Matos, António Campos e; et al; “Encosta dos Guindais. Estudo Geológico-Geotécnico”, Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Outubro 2001.