

# MÉTODOS PROBABILÍSTICOS PARA A SEGURANÇA DE TALUDES EM PEDREIRAS

## PROBABILISTIC METHODS FOR QUARRY SLOPE SAFETY

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

Longo, Simone, *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, simone.longo@ist.utl.pt*

### RESUMO

Apresenta-se a síntese de uma metodologia expedita de análise de risco aplicada à estabilidade dos taludes em pedreiras. Desenvolve-se o cálculo de estabilidade visando estabelecer a probabilidade de colapso de um talude pelo método de Monte Carlo, a partir do conhecimento das variáveis aleatórias que nele intervêm. É aplicado o método à análise do risco envolvido num deslizamento planar ocorrido numa pedreira de calcário, após se conhecerem os resultados da instabilidade.

### ABSTRACT

A synthesis of methodology for risk analysis assessment is presented, as applied to quarry slope stability. Slope stability calculation is developed in order to determine failure probability by using the Monte Carlo method, based on the intervenient random variables. This risk analysis study is applied to a planar slide in a limestone quarry, upon knowing instability results.

### 1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento dos maciços rochosos, principalmente quando se refere a casos de deslizamentos de taludes, torna-se mais completo se se complementarem as análises de estabilidade convencionais (determinísticas) com dados da correspondente análise probabilística. O Método de Monte Carlo, por exemplo, já mostrou ser uma ótima ferramenta aplicável ao cálculo da estabilidade de taludes, enquanto permite estimar o factor de segurança também quando existem várias incógnitas, enquanto são geradas aleatoriamente numerosas situações análogas àquela em exame, que são utilizadas como base de dados para o cálculo probabilístico.

Tendo à disposição um modelo geomecânico do talude, um estudo das probabilidades de deslizamento e uma estimativa dos danos e dos custos, pode-se consequentemente calcular o risco inerente à actividade nas suas diversas facetas (geotécnica, operacional, económica e ambiental).

Neste artigo, aplica-se a análise de risco a dois taludes, que deslizaram conjuntamente, na pedreira de calcário do Calhariz (Sesimbra). Na Figura 1 apresenta-se um esquema dos dois taludes que deslizaram, por escorregamento planar, ao longo de duas superfícies constituídas por estreitas camadas argilosas. A inclinação da camada de argila é de 22° (inclinação igual à da estratificação), sendo a inclinação do plano frontal dos dois taludes igual a 70°.

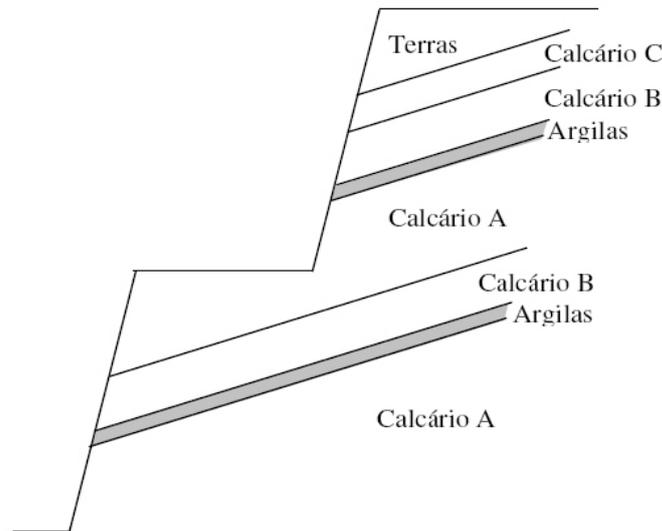


Figura 1 – Corte vertical dos taludes da pedreira de Calhariz antes do deslizamento [1] onde estão evidenciadas duas camadas de argila e diferentes tipos de calcário

Geralmente, os deslizamentos que ocorrem nas frentes de desmonte das pedreiras podem estar relacionados com dois factores principais: 1) a natureza geotécnica do maciço rochoso e 2) as condições operacionais de desmonte (exploração). Na Figura 2 apresentam-se os principais componentes dos dois factores.

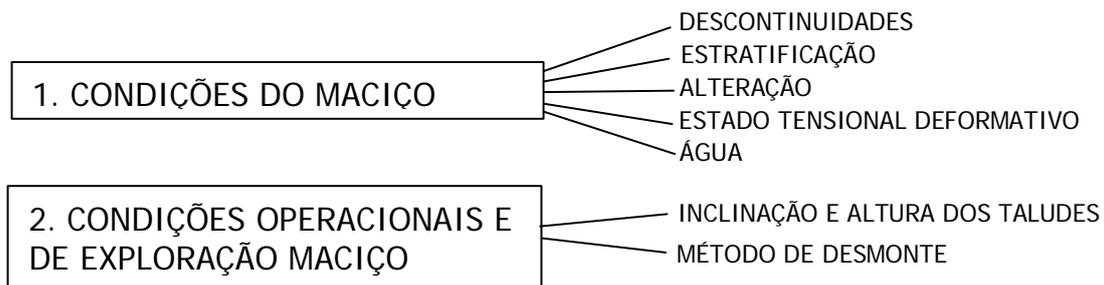


Figura 2 – Esquema das principais causas de deslizamento das frentes

As classes de danos possíveis e os níveis de probabilidades específicos para a pedreira em análise são estabelecidos para obter uma matriz quantitativa de risco, sendo documentados os valores obtidos, tal como a sua aplicação aos taludes da pedreira, com o propósito de desenvolver um mapa de risco geotécnico.

## 2. MODELO GEOMECÂNICO

Qualquer maciço rochoso constitui um meio descontínuo que essencialmente se compõe de blocos sólidos separados por discontinuidades. É sabido que estas últimas predominam no comportamento tenso-deformacional dos maciços. Tal comportamento depende das características das discontinuidades existentes (estratificação, diaclases, falhas, xistosidades, superfícies de fraqueza, etc.), assim como da rocha matriz e sua história evolutiva. Nas discontinuidades há a considerar o seu tipo, origem, distribuição espacial, tamanho, persistência, espaçamento, rugosidade, natureza do preenchimento, presença de água, etc. [1].

Na maioria das pedreiras, as condições e as características geomecânicas dos taludes não são homogêneas. Isso implica que, muito dificilmente, será possível desenvolver um único modelo

geomecânico, representativo de toda a pedreira; em vez disso, deverá ser realizado o zonamento da pedreira, no qual serão definidos sectores diferentes, cada um caracterizado por taludes que tenham orientações semelhantes, incluindo juntas típicas de determinadas famílias, caracterizadas pelos seus valores médios de direcção e de mergulho [2]. Falhas, contactos geológicos e zonas cisalhadas devem ser escolhidos como limites dos sectores.

Depois de se ter realizada a divisão em sectores, é possível formular um, ou mais, modelos geomecânicos dos taludes, em função das necessidades de projecto e da lavra. Através da conjugação de informações geológicas, hidrológicas e geomecânicas procurar-se-á construir um modelo que seja, simultaneamente, representativo da realidade e susceptível de tratamento matemático [3].

No sentido de conhecer, o mais detalhadamente possível, as características do maciço e das descontinuidades, tenta-se desenvolver, com a ajuda da tecnologia e da informática, modelos geomecânicos cada vez mais complexos e realistas: passa-se de modelos simples, bidimensionais, que consideram as informações principais do talude em análise, a modelos tridimensionais, realizados com os modernos programas de cálculo numérico (por exemplo, os programas aos elementos finitos que geram malhas tridimensionais), nos quais é possível introduzir detalhadamente a geometria e as características do talude, obtendo como resultado, gráficos das tensões, das deformações e o factor de segurança.

### **3. ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES**

O conceito de probabilidade de colapso de um talude não tem apenas uma definição: vários autores definem essa probabilidade de forma diferente. Para Coates, por exemplo (1965) [4] a probabilidade de colapso de um talude é a relação entre os volumes deslizantes de um determinado talude e o seu volume estável inicial; Shuk [5], em 1970, definiu a probabilidade de colapso como a percentagem de taludes que se tornam instáveis, entre um determinado número de taludes com geometria similar. No presente estudo considera-se mais adequada a seguinte definição [6]: A probabilidade de colapso de um talude é a frequência de ocorrência de condições onde, na superfície de escorregamento, as forças de corte resistentes são superadas pelas forças activas tangenciais, causando colapso.

No caso da pedreira de Calhariz o estudo probabilístico foi realizado nas seguintes fases:

Inicialmente, para obter informações sobre as características das descontinuidades, utilizou-se um estudo de retroanálise [1] sobre os dois taludes que realmente deslizaram. Foram obtidos os valores médios de  $c$  e de  $\phi$  (coesão e ângulo de atrito) dos preenchimentos argilosos das fracturas, através de um sistema de duas equações características do factor de segurança, para escorregamento planar (uma equação por cada talude), na condição de equilíbrio limite ( $F_s=1$ ).

Para obter um valor mais representativo de  $c$  e  $\phi$ , o sistema de equações foi resolvido numerosas vezes, utilizando várias secções representativas da geometria dos taludes que deslizaram, em que variaram os valores da altura  $H$  do talude (Figura 3a) e da distância  $b$  da fenda de tracção ao topo do talude, como indica o quadro da Figura 3b. Obteve-se, assim, uma vasta gama de valores das duas variáveis, que possibilitou o seu tratamento estatístico.

Compararam-se ainda as curvas de  $c$  e  $\phi$  com os ábacos da bibliografia [7] para melhor definir os intervalos de valores.

Na Figura 4 são representadas as curvas de probabilidade acumulada das duas variáveis.

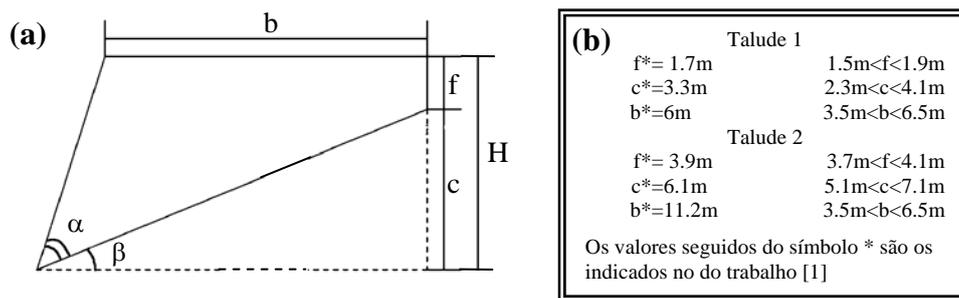


Figura 3 – (a) Esquema simplificado dos taludes que deslizaram (adaptado de [1]); (b) Intervalos de valores utilizados no sistema para a obtenção de  $c$  e  $\phi$  representativos de diferentes secções dos dois taludes envolvidos.

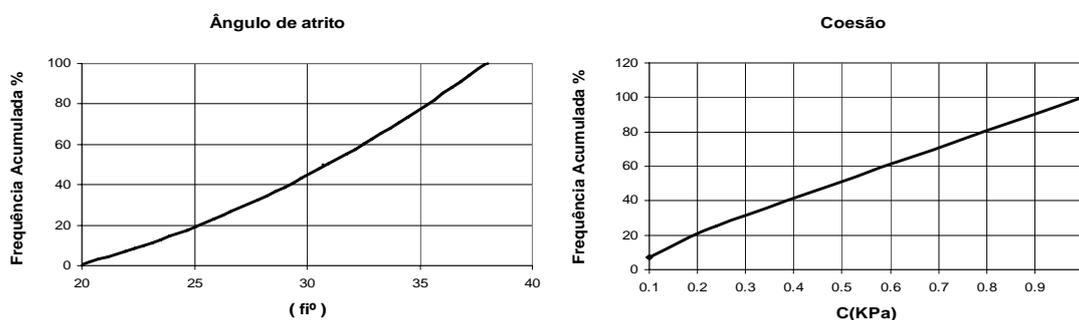


Figura 4 – Variação dos valores do ângulo de atrito  $\phi$  e da coesão  $c$  obtidos (para os dois taludes deslizados) por meio da retroanálise já desenvolvida e por comparação com os ábacos da bibliografia [7]

A segunda fase consistiu na aplicação do método de Monte Carlo para obter as probabilidades de deslizamento planar dos taludes da pedra. Este método, pela facilidade de utilização em computadores e pela capacidade de tratar variáveis aleatórias é um dos mais utilizados no cálculo de estabilidade dos taludes [3].

Nas análises foram considerados os taludes saturados de água, porque o deslizamento planar que aconteceu na pedra, levou à instabilização de grande volume de material, numa altura de chuvas intensas e prolongadas.

Para melhor interpretação dos valores, nos dois casos de talude com altura de 5 metros (Talude 1) e 10 metros (Talude 2) os factores de segurança são mostrados na forma gráfica da Figura 5, como probabilidades acumulada e simples.

As probabilidades de colapso dos taludes  $P_c$ , obtidas considerando as duas variáveis da simulação  $c$  e  $\phi$  independentes entre eles, foram respectivamente de 6,6% no Talude 1 e de 7,1% no Talude 2.

A terceira e última fase da análise probabilística consistiu na interpretação dos resultados. As curvas dos factores de segurança obtidas mostram valores entre 0,9 e 1,8. O valor mais provável do factor de segurança do primeiro talude é 1,8, de pouco superior ao respectivo valor do segundo talude (1,5). Os dois taludes analisados têm então factores de segurança adequados, considerando que se trata de taludes temporários de exploração.

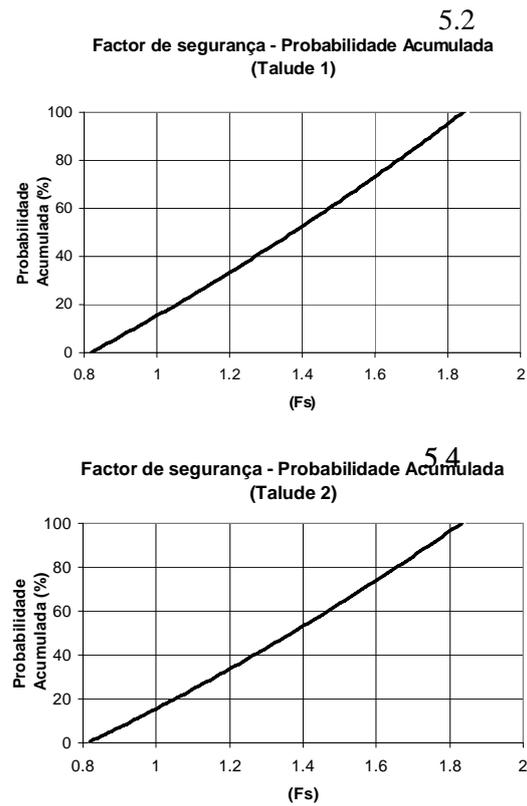
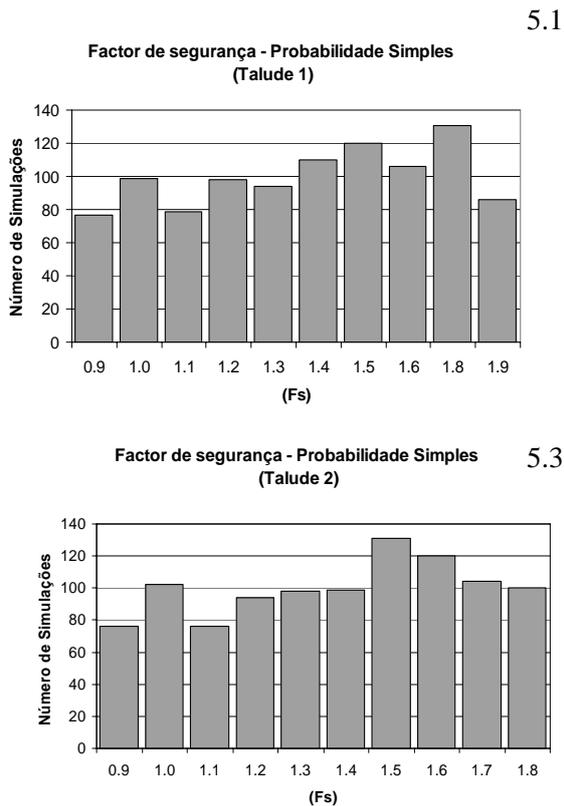


Figura 5 – Representação gráfica do factor de segurança obtido com o método de Monte Carlo para os dois taludes, com 5 e 10 metros de altura. Após 1000 simulações em cada caso, obtiveram-se os histogramas 5.1 e 5.3 que mostram a variação dos valores dos factores de segurança em função do número de simulações. Em 5.2 e 5.4 são representados os valores acumulados dessa distribuição.

Resulta então interessante verificar como varia a probabilidade de colapso  $P_c$  dos taludes com a respectiva altura, mantendo fixa a inclinação do talude, o tipo de deslizamento (planar, com fenda de tracção) e os valores de  $c$  e  $\phi$  nos intervalos representados na Figura 4. Simulações feitas com taludes de altura entre 5 e 15 metros mostraram probabilidades de colapso  $P_c$  que variam como mostra a Figura 6: nota-se que com o aumento da altura do talude não só crescem as probabilidades de colapso, passando de 6,6% a 7,1%, mas também o factor de segurança mais provável diminui.

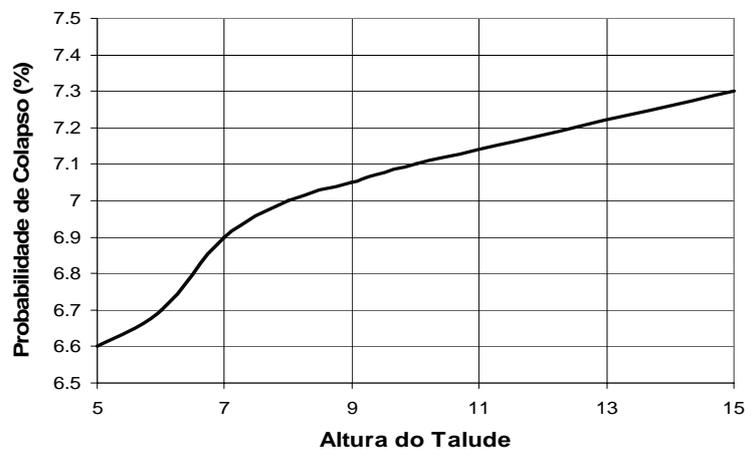


Figura 6 – Probabilidade de colapso do talude em função da sua altura

#### 4. ASPECTOS ECONOMICOS, DANOS E CUSTOS DE RECONSTRUÇÃO

Um aspecto interessante é o cálculo dos danos que podem ser originados pelo deslizamento de taludes numa pedreira e os custos relacionados. Também para o aspecto económico, tal como para a análise da estabilidade de um talude, é necessário considerar singularmente cada caso específico, recorrendo, como apoio, a modelos e ábacos de referência.

A forma que se considera mais adequada para calcular os custos no caso em exame parece o cálculo dos custos generalizados com a seguinte equação [3]:

$$C_g = C_0 + P_c \times (C_r + C_d), \quad (1)$$

onde  $C_g$  é o custo generalizado,  $C_0$  o custo inicial de escavação e realização do talude,  $P_c$  é a probabilidade de colapso do talude,  $C_r$  são os custos de reconstrução e  $C_d$  é o valor dos danos.

No caso dos taludes deslizados na Pedreira de Calhariz, não houve pessoas envolvidas, nem infra-estruturas danificadas, e não foram atingidas de forma nenhuma propriedades de terceiros. Por isso, os custos que podem ser tomados em consideração são:

- Custos de remoção do material rochoso deslizado e limpeza dos taludes (podem entrar em  $C_d$ );
- Custo de reconstrução do talude ( $C_r$ );
- Custos devidos a interrupção da actividade (podem entrar em  $C_d$ ).

Podem-se excluir:

- Custos de reconstrução de estruturas, obras ou infra-estruturas envolvidas no colapso dos taludes e no deslizamento.
- Custos de indemnização para lesões em trabalhadores envolvidos e pessoas terceiras.

Os custos de remoção variam em função de muitos factores e podem ser calculados só de forma aproximada. Será possível optimizá-los, a partir do momento em que se tenham, à disposição, mais dados sobre a economia e a produção da pedreira. Factores que influem nos custos são a autonomia da pedreira, as condições e a quantidade dos meios mecânicos que podem ser utilizados para realizar a remoção do material deslizado (em caso de necessidade a pedreira pode avaliar a hipótese de continuar a lavra nas áreas acessíveis, e recorrer a outras máquinas) e as condições de mercado na altura em que acontece o imprevisto.

O valor aproximado de  $C_d$  (custo de remoção do material deslizado e da limpeza do talude) no caso em exame é igual a 0,40€/m<sup>3</sup>(calcário empolado). Este valor foi calculado admitindo um custo médio das máquinas (uma pá, um dumper e uma escavadora para realizar a limpeza das frentes) que inclui também os operadores e o consumo de combustível. É necessário considerar que a maior parte do calcário deslizado foi aproveitado, tendo características adequadas: os custos devidos à interrupção da actividade no caso específico considerado, podem ser considerados nulos.

Para o cálculo de  $C_r$  tem que se considerar o custo de reconstrução do talude, a partir da geometria que resulta depois de ter realizado a remoção dos volumes deslizados e a limpeza das frentes (por limpeza intende-se a remoção por meio de escavadora dos blocos instáveis e perigosos). Tendo a superfície de deslizamento uma inclinação de 22° e o talude normalmente explorado uma inclinação de 70°, a reconstrução consiste em repor talude de 22° até 70° com

remoção dos volumes envolvidos. O valor médio do custo de reconstrução dum talude é de cerca 1€m<sup>3</sup>.

Calculando o custo generalizado com os dados indicados anteriormente, obtém-se um custo generalizado, em €por m<sup>3</sup> de material "in situ" dado por:

$$C_g = 1 + P_c \times (1 + 0.26) \quad (2)$$

onde  $P_c$  varia entre 6,6 e 7,3 %, conforme indica a Figura 5.

Um cálculo mais detalhado e mais interessante, pode ser feito para ver como varia o custo generalizado ao variar de algumas condições na geometria dos taludes: por exemplo pode-se variar a altura do talude e ver o andamento do custo generalizado em função dessa variação; outros exemplos da bibliografia [6] mostram que em situações parecidas a situação em estudo, o custo generalizado de um talude varia em função do ângulo  $\theta$  de inclinação do talude; o custo generalizado baixa com o incremento do ângulo  $\theta$  atingindo um valor mínimo para um particular valor  $\theta_{\min}$  e voltando a aumentar para valores de  $\theta > \theta_{\min}$  por causa da influência da probabilidade de colapso do talude.

Outros custos, não directamente relacionados com o deslizamento acontecido, mas que podem ser de qualquer forma relacionados com a segurança na pedreira são os custos de mitigação: são custos devidos a execução de estudos e intervenções nos taludes para reduzir o risco de colapso.

## 5. ANÁLISE DE RISCO

O projecto de métodos de lavra para extrair da melhor maneira possível um determinado minério dum jazigo é uma actividade complexa que requer uma elevada dose de conhecimentos e o recursos a “modelos de decisão apropriados” [6]. Os modelos de decisão variam em função do tipo de actividade para os quais são pensados; e, por vezes, são representados em forma de tabelas que reportam o provável comportamento do maciço rochoso em função das características do mesmo. Estas tabelas podem resumir o tipo de estabilização do talude em função da Classe de maciço rochoso, ou o tipo de exploração mais adequado sempre em função de parâmetros que caracterizam a rocha. As classificações do maciço e as actividades aconselhadas resumidas nestes modelos de decisão são muitas vezes obtidas recolhendo e analisando numerosos casos práticos de referência. Exemplos são a Classificação de Bieniawsky, a de Barton, e a classificação de Hoek e Bray.

Modelos de decisão mais complexos podem ser utilizados, para o apoio à decisão, nos casos em que se queira considerar o desenvolvimento da lavra, incluindo também eventuais acidentes ou imprevistos. Os hipotéticos danos devidos ao deslizamento de um talude devem ser avaliados, de forma a poder-se decidir se o modo em que se prevê programar as actividades de exploração será o mais adequado ou se será mais conveniente explorar outras alternativas. Modelos deste género são o resultado da aplicação da Análise de Risco à lavra dum jazigo e resumem-se, nas práticas (e de rápida utilização) matrizes de risco.

O conceito de risco pode ser resumido com a seguinte expressão [8]: "O risco é a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento com as suas consequências físicas, económicas e sociais".

Este enunciado pode ser interpretado na maioria dos casos, também em forma de equação, com a seguinte:

$$R = P \times D \quad (3)$$

em que R é o risco, P a probabilidade de acontecimento e D é o dano produzido ou esperado.

As matrizes de risco são o resultado do relacionamento de níveis (ou classes) de probabilidades e níveis de danos em forma matricial. Frequentemente atribuem-se valores numéricos a cada classe de probabilidade e de danos crescentes, com o respectivo aumento da probabilidade e dos danos. A tarefa mais delicada é escolher (com base não só nos casos práticos conhecidos mas também na experiência pessoal) as classes de probabilidades e de danos e os valores numéricos a associar a cada classe correspondente.

No caso do deslizamento do talude da Pedreira de Calhariz foi possível desenvolver uma matriz de risco a partir do método a seguir apresentado, e definir três níveis de danos provocados pelo colapso dos taludes, a saber:

- I: Deslizamento de volumes de material rochoso que não provoca nenhum dano a estruturas ou pessoas e que requer só a remoção dos volumes deslocados;
- II: Deslizamento de volumes de material rochoso com envolvimento de estruturas e/ou equipamentos;
- III: Deslizamento de volumes de material rochoso com envolvimento de estruturas e/ou máquinas e pessoas.

Para o cálculo qualitativo da probabilidade, podem-se distinguir nesta fase inicial, tal como foi proposto em relação aos danos provocados pelo deslizamento, também três classes de probabilidade (a mais baixa B<sub>1</sub>, a intermédia B<sub>2</sub> e a mais alta B<sub>3</sub>) com os valores:

$$B_1 = P_C \times K \times \frac{A_s}{A_p} \quad (4)$$

$$B_2 = P_C \times \frac{A_s}{A_p} \quad (5)$$

$$B_3 = P_C \quad (6)$$

onde: P<sub>C</sub> é a probabilidade de colapso do talude como calculado no capítulo 3;

A<sub>P</sub> é a área total da pedreira que pode ser atingida por colapso de taludes;

A<sub>S</sub> é a área da pedreira que contem estruturas o infra-estruturas que podem ser atingidas pelo colapso dum talude;

K é um coeficiente que determina a probabilidade de uma pessoa se encontrar nas áreas A<sub>S</sub> da Pedreira.

Considerando então os valores de probabilidades e de danos, a matriz de risco pode ser desenvolvida a partir do exemplo na Tabela 1.

Tabela 1. Exemplo simplificado da matriz de risco aplicável aos taludes na Pedreira de Calhariz

Probabilidade \ Dano	Baixa (B <sub>1</sub> )	Média (B <sub>2</sub> )	Alta (B <sub>3</sub> )
I	3	2	1
II	6	4	2
III	9	6	3

A tabela anterior constitui apenas um exemplo de como se pode desenvolver uma matriz de risco: classes de risco definidas por intervalos numéricos irão substituir os valores da Tabela 1; os intervalos podem ser obtidos, também, com base na experiência dos engenheiros e dos técnicos mais directamente relacionados com as fases da lavra e com a economia da Pedreira.

## 6. CONCLUSÕES

A aplicação do Método de Monte Carlo aos taludes é uma válida ferramenta para obter as probabilidades de colapso dum talude quando não são claramente conhecidas algumas das variáveis que interagem na estabilidade: o método, realizando numerosas simulações dessas incógnitas, permite obter uma distribuição da probabilidade nos casos em que a falta de informações constituiria um obstáculo. As simulações confirmaram que a um aumento da altura dos taludes correspondem um aumento da probabilidade de colapso e uma redução do factor de segurança. Foram obtidos gráficos do factor de segurança e da probabilidade de colapso ao fazer variar a altura do talude, podendo ser úteis e práticos nas fases de projecto de futuros desenvolvimentos da pedreira.

O aspecto económico foi abordado introduzindo o conceito de custo generalizado, de fundamental importância porque considera não só os custos de construção, mas também a probabilidade de colapso dos taludes e os custos dos danos e da reconstrução; neste sentido, obtiveram-se valores de custos de remoção dos volumes deslizados de cerca 1/4 dos custos de construção do talude, e custos de reconstrução iguais a custo de construção.

O estudo probabilístico realizado sobre os dois taludes deslizados forneceu probabilidades de colapso relativamente baixas; também o factor de segurança obtido para os dois taludes é perfeitamente adequado para taludes de lavra sujeitos a exploração. A discrepância entre os resultados obtidos e a real situação da pedreira que viu o colapso dos taludes acontecer, não pode ser completamente explicado através dum modelo bidimensional, como o utilizado, que não considere o aspecto dinâmico do problema. As vibrações produzidas pelo uso de explosivo deverão então ser consideradas em simulações futuras para obter resultados mais fiáveis, sendo a simulação aqui feita um exemplo que a omissão dessa componente (a componente dinâmica) leva a subestimação do problema. Ulteriores fendas de tracção, geradas durante as detonações, efeitos instabilizadores mais intensos devidos às chuvas intensas e prolongadas e outros factores desconhecidos podem ter concorrido para tornar instáveis os volumes de calcário pertencentes aos dois taludes que colapsaram.

Finalmente mostra-se um exemplo de matriz de risco: os níveis de probabilidade e de danos foram definidos, indicando desta forma o caminho para a definição dos intervalos de risco do caso prático estudado, tarefa que pode ser cumprida só tendo conhecimentos mais detalhados sobre as fases de lavra e da economia da pedreira em questão.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dinis da Gama, C. & Sousa, A. (2004), “Estudos de Retroanálise do Deslizamento de Taludes Ocorrido numa Pedreira de Calcário”, 9º Congresso Nacional de Geotecnia, pp. 183-192, Aveiro, Portugal.
- [2] Canmet, P., (1977), “Pit Slope manual”, Report 77-5, Energy, Mines and Resources of Canada, Ottawa.
- [3] Dinis da Gama, C. (1984), “Métodos Computacionais de Projectos de Taludes em Mineração”, Tese para a defesa de Livre Docência junto ao Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, pp.171, São Paulo, Brasil.

- [4] Coates, D.F., Gyenge, M. & Stubbins, J.B. (1965), "Slop Stability Studies at Knob Lake2, Proceedings of Rock Mechanics Symposium, Toronto.
- [5] Shuk, T. (1970), "Optimization of slopes designed in Rock", 2<sup>nd</sup> International Congress of Rock Mechanics, Vol. 2, paper 7-2, Belgrado.
- [6] Dinis da Gama, C. (1994), "Variability and Uncertainty Evaluations for Rock Slope Design", Rock Mechanics – Models and Measurements – Challenges from Industry. Proceedings of the First North American Rock Mechanics Symposium, University of Texas at Austin, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- [7] Hoek, E. & Bray, J. (1977), "Rock Slope Engineering", Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [8] Clayton, C.R.I., (2001), "Managing Geotechnical Risk – Improving Productivity in UK Building and Construction", Thomas Telford Publishing, London, United Kingdom.