

# Avaliação do potencial de mobilidade de blocos de granito na Serra de Sintra, através de técnicas de análise estatística multivariada

J. A. Almeida<sup>(a,1)</sup>, C. Águas<sup>(a,2)</sup>, H. S. Vargas<sup>(a,3)</sup>, J. C. Kullberg<sup>(a,4)</sup> & C. N. Costa<sup>(a,b,5,6)</sup>

a - CIGA, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal

b - Instituto Geológico e Mineiro, Estrada da Portela, Zambujal - Alfragide, Apartado 7586, 2720-866 Amadora, Portugal

1 – ja@fct.unl.pt; 2 - cesaraguas@yahoo.com; 3 – hugo@ciga.fct.unl.pt; 4 – jck@fct.unl.pt; 5 - cnc@fct.unl.pt; 6 - carlos.costa@igm.pt

## RESUMO

**Palavras-chave:** caos e queda de blocos; análise factorial de correspondências; classificação hierárquica; autómatos celulares; Serra de Sintra.

Na sequência da queda de um bloco de grandes dimensões ( $\approx 35 \text{ m}^3$ ), ocorrida a 29 de Janeiro de 2002 na vertente norte do Monte da Lua (Serra de Sintra) o CIGA foi encarregue, pela Câmara Municipal de Sintra, de efectuar um estudo conducente ao estabelecimento de carta de risco na área envolvente aquele relevo.

Tendo por base a informação geotécnica recolhida *in situ* relativamente a cerca de 200 blocos no mesmo local, são apresentados os resultados da aplicação de metodologias estatísticas multivariadas (análise factorial de correspondências e classificação hierárquica) destinadas a discriminar os blocos, face ao potencial de mobilidade numa situação estática ou dinâmica. A análise factorial de correspondências (AFC) identificou as relações intrínsecas entre os parâmetros medidos *in situ*. A classificação automática hierárquica (CAH) permitiu a divisão dos blocos em três conjuntos, consoante o grau de similitude relativamente a 3 arquétipos de referência: “Bom”, “Intermédio” e “Mau” construídos com base na relação pericial entre os parâmetros medidos e o grau de perigosidade potencial.

Na segunda parte deste trabalho descreve-se sumariamente e apresentam-se os resultados preliminares de um modelo do tipo autómatos celulares destinado à simulação de trajetórias equiprováveis para cada bloco, condicionados ao modelo digital de terreno. A união do conjunto de trajetórias simuladas de todos os blocos e a ponderação pelo grau de perigosidade potencial de cada bloco permitem a elaboração de uma carta de risco, em função das áreas hipoteticamente afectadas.

A metodologia utilizada é reproduzível em situações similares, ou seja, em relevos com caos de blocos, susceptíveis de desprendimento que possam afectar pessoas e bens.

## Introdução

A queda de blocos constitui um processo geomorfológico comum em encostas onde ocorrem caos de blocos, e que pelas suas características aleatórias constitui um evento potencialmente perigoso. Na sequência da queda de um bloco de grandes dimensões, na vertente norte do Monte da Lua (Serra de Sintra) ocorrida a 29 de Janeiro de 2002, foi elaborado um estudo destinado a apresentar uma carta de risco na área envolvente. A elaboração de uma carta deste tipo pressupõe duas fases essenciais: a formulação de um modelo que descreva o grau de probabilidade de um determinado local ser atingido pela trajetória de um bloco em queda (modelação física e matemática do processo) e pela avaliação dos dados potenciais associados a um evento deste tipo (sobreposição de temas em ambiente SIG).

A formulação de um modelo matemático descritivo da trajetória de um bloco em queda constitui um problema extremamente complexo. Em termos genéricos, podemos referir que as variáveis determinantes da iniciação e do movimento propriamente dito dizem respeito aos blocos e à morfologia das áreas potencialmente atravessadas, nomeadamente:

- i) **Bloco:** forma; dimensão; posição do centro de gravidade; apoio.
- ii) **Áreas envolventes:** declive, ocupação do solo, presença de obstáculos.

O tipo de movimento de um bloco em queda (escorregamento simples, rolamento, queda livre e impacto) depende localmente da interacção destas variáveis. A grande dificuldade na modelação deste fenómeno deve-se à interacção e sucessão dependente, quase sempre imprevisível, entre estas variáveis, a quantificação numérica do movimento. Por exemplo, não é fácil quantificar numericamente a diferença de trajetórias de um bloco com a forma de um elipsóide em que o raio maior é o dobro dos raios menores, comparativamente a um bloco com a forma de uma esfera perfeita e os mesmos raios menores, mesmo que a comparação seja feita no mesmo tipo de superfície.

Neste estudo apresentam-se os resultados preliminares de um modelo estocástico aplicado à modelação de trajetórias potenciais de blocos na Serra de Sintra. O modelo apresentado foi calibrado com a trajetória do bloco que caiu no dia 29 de Janeiro.

Foi levantada informação geográfica e geotécnica considerada potencialmente relevante em termos estáticos e dinâmicos para cerca de 200 blocos (Águas *et al.*, 2003). Na primeira fase deste estudo, os dados recolhidos no campo referentes aos blocos foram sintetizados em 10 parâmetros (tabela 1). Todos estes 10 parâmetros foram categorizados em 3 modalidades (1, 2 e 3) consoante o potencial ao movimento, em que o código 1 representa o menor potencial, 2 representa um potencial intermédio e 3 representa o maior potencial. Destes 10 parâmetros, 5 foram considerados pericialmente determinantes no movimento do ponto de vista estático (iniciação do movimento)

e 4 foram considerados determinantes do movimento do ponto de vista dinâmico (trajectória). O grau de alteração não foi considerado determinante para o movimento.

Tal como foi referido, existe uma enorme dificuldade no estabelecimento de uma relação quantitativa válida entre os parâmetros medidos e as consequências nas trajetórias. Pelo contrário, o estabelecimento de uma relação meramente qualitativa é muito mais simples e aceitável. Por exemplo, podemos dizer que um bloco arredondado tem um maior potencial de deslocação que um bloco anguloso, mas não podemos nunca quantificar numericamente uma relação nos comprimentos das trajetórias. Assim, neste estudo os blocos foram discriminados, à priori, em grupos consoante o potencial estático ou dinâmico de movimentação utilizando um algoritmo de classificação ascendente hierárquica (CAH). O modelo estocástico foi executado apenas para o conjunto de blocos com, simultaneamente, maior potencial estático e dinâmico.

### Classificação hierárquica de agrupamentos em torno dos arquétipos “bom”, “intermédio” e “mau” em função do potencial estático e dinâmico

O objectivo deste algoritmo de classificação hierárquica é a discriminação dos blocos em termos do potencial de mobilidade estático e dinâmico, com base nos parâmetros geotécnicos medidos *in situ*. De acordo com a medições efectuadas, todos os blocos foram previamente codificados segundo 3 modalidades por variável, relativamente a 3 arquétipos de referência: “bom”, “mau” e “intermédio”. As propriedades<sup>1</sup> foram separadas em dois conjuntos: i) determinantes para a análise estática (estabilidade, dimensão estática, enraizamento, efeito de carga e vegetação) e análise dinâmica (dimensão dinâmica, arredondamento, volume e resistência) (ver tabela 1).

Tabela 1 - Codificação dos arquétipos “Bom”, “Mau” e “Intermédio” para a construção do índice de potencial de mobilidade estático e dinâmico.

Parâmetros geotécnicos	Arquétipos da análise estática			Arquétipos da análise dinâmica		
	BOM	INTERMÉDIO	MAU	BOM	INTERMÉDIO	MAU
Estabilidade	1	2	3			
Dimensão estática	1	2	3			
Dimensão dinâmica				1	2	3
Enraizamento	1	2	3			
Efeito de carga	1	2	3			
Vegetação	1	2	3			
Arredondamento				1	2	3
Volume				1	2	3
Resistência				1	2	3
Alteração	Não foi considerado !					

Um algoritmo de classificação ascendente hierárquica (CAH) tradicional consiste em agrupar amostras similares, utilizando um critério de similitude ou distância (Sneath, 1973). Inicialmente, cada amostra constitui um grupo ou *cluster* individual. Seguidamente, todas as amostras com características similares são sucessivamente agrupadas, ao longo de várias iterações. Em resumo, na aplicação de uma classificação hierárquica automática, tem de se ter em conta a: i) aplicação de uma medida de distância ou similitude; ii) modo de cálculo da distância entre os agrupamentos que se formam ao longo das iterações.

Uma vez que o objectivo desta classificação é o agrupamento dos blocos em 3 classes de acordo com a similitude a 3 arquétipos de referência, o algoritmo de CAH clássico foi modificado do seguinte modo:

- a) Adiciona-se ao conjunto de dados inicial 3 amostras hipotéticas referentes aos arquétipos de referência. Por exemplo, na análise estática foram adicionadas 3 amostras com as seguintes características:

		Estabilidade	Dimensão estática	Enraizamento	Efeito de carga	Vegetação
1	bom	1	1	1	1	1
2	Intermédio	2	2	2	2	2
3	mau	3	3	3	3	3

- b) Durante a classificação nunca são agrupados os conjuntos que contenham as amostras referentes aos arquétipos de referência. Todos os restantes são agrupados normalmente de acordo com o critério de menor distância.
- c) A classificação termina quando persistem apenas os 3 grupos, em que cada um contém as amostras correspondentes aos arquétipos de referência.

Para calcular a distância entre agrupamentos utilizou-se o modo *Complete link* (ou distância máxima): é obtido pelo cálculo da maior distância entre os elementos que constituem cada *cluster*. Uma vez que todas as variáveis intervenientes estão codificadas em modo categórico ordinal, utilizou-se a medida de similitude *Jaccard index*. A

<sup>1</sup> Uma descrição mais detalhada do significado destes parâmetros pode ser encontrada em Águas *et al.*, 2003.

distância ou similitude entre duas amostras,  $a$  e  $b$ , representadas cada uma por um vector de  $n$  variáveis de tipo categórico ordinal  $(x_{a_1}, x_{a_2}, \dots)$  e  $(x_{b_1}, x_{b_2}, \dots)$  é calculada por (1):

$$Jaccard\ Index_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{a_i} + \sum_{i=1}^n x_{b_i} - 2 \sum_{i=1}^n \min(x_{a_i}, x_{b_i})}{\sum_{i=1}^n x_{a_i} + \sum_{i=1}^n x_{b_i} - \sum_{i=1}^n \min(x_{a_i}, x_{b_i})} \quad (1)$$

Foram feitas duas classificações independentes, respectivamente para o sub-conjunto de parâmetros geotécnicos de influência estática e dinâmica. Os resultados, em termos do número de blocos de cada conjunto, encontram-se descritos na tabela 2 e a respectiva localização espacial na figura 1. Dos 189 blocos cartografados, verifica-se que 34 foram classificados como similares do arquétipo “mau” quer para os parâmetros de influência estática quer para os parâmetros de influência dinâmica. Estes são portanto os blocos mais problemáticos do ponto de vista da execução de uma carta de risco geológico.

Tabela 2 – N° de blocos classificados em cada conjunto (bom, intermédio e mau) segundo a influência estática ou dinâmica.

		Influência estática			Influência dinâmica		
		bom	intermédio	mau	bom	intermédio	mau
Influência Estática	bom	5			1	2	2
	intermédio		91		29	22	40
	mau			83	38	11	34
Influência dinâmica	bom	1	29	38	68		
	intermédio	2	22	11		35	
	mau	2	40	34			76

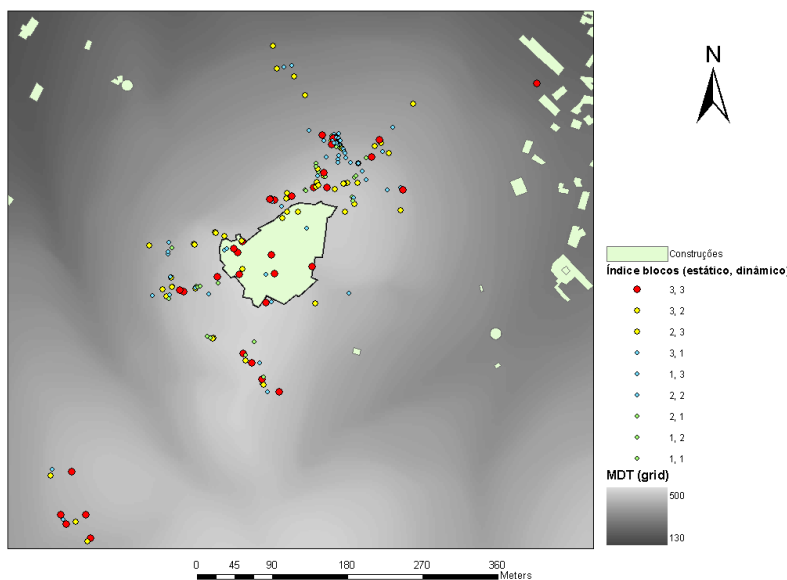


Figura 1 – Localização espacial dos blocos classificados em cada conjunto (bom, intermédio e mau) segundo a influência estática ou dinâmica.

### Modelo de simulação de trajetórias equiprováveis para cada bloco

O modelo proposto para a simulação de trajetórias é baseado num algoritmo do tipo autómatos celulares (AC). O formalismo desta classe de algoritmos propõe que seja utilizada uma malha regular de células idênticas, cada uma das quais pode evoluir iterativamente dentro de um n° finito de estados, correspondendo a cada iteração uma unidade de tempo. A dinâmica do sistema é determinada por um conjunto de regras de transição as quais condicionam a passagem do estado corrente da vizinhança de cada célula no tempo  $t$ , para um outro estado no tempo  $t+1$  (Banks, 1996).

Um modelo geográfico na forma matricial é o modelo natural de representação dos dados utilizados nesta classe de algoritmos (Burrough & McDonnell, 1998). Todo o espaço é discretizado em células dispostas de forma regular, onde cada posição é identificável através de um índice de linha e de coluna, assim como da coordenada da primeira célula e das suas dimensões. Cada célula é referenciada pela cota. Para cada estado de tempo  $t$ , a cada célula corresponde um dos seguintes estados: i) contém o bloco; não contém o bloco mas o bloco já atravessou a célula numa iteração anterior  $t_k$ ; não contactou a célula.

O movimento do bloco é controlado pelo declive e pela velocidade atingida em cada célula, sendo desprezáveis a resistência do ar. Segundo as leis da física, o incremento de velocidade ( $v_{t+1} - v_t$ ) de um objecto num plano inclinado de inclinação  $\alpha$  e comprimento  $l$ , com um coeficiente de atrito ( $\tan \phi$ ) é dado por (2) (Giani, 1992):

$$v_{t+1} = 2\sqrt{v_t^2 + g.l.(\sin \alpha - \tan \phi \cdot \cos \alpha)} \quad (g = 9.8\text{ms}^{-2}) \quad (2)$$

Neste exemplo, cada regra é considerada a partir de uma vizinhança de 8 células (matriz de 3x3 com exclusão da célula central). Tendo por base a matriz local de cotas, é calculada uma matriz de declives resultante da diferença entre a célula central e as células vizinhas. Tendo por base a matriz de declives é gerada uma matriz de probabilidades de transição do bloco correspondente a uma iteração. Relativamente à matriz de declives em torno de cada célula podemos distinguir duas situações tipo:

- a) uma, várias ou todas as células estão a uma cota inferior à da célula de partida. Neste caso consideram-se como células admissíveis para o movimento, as células com desnível ( $z_{\text{inicial}} - z_{\text{final}}$ ) positivo. Calcula-se o valor relativo da diferença de cotas, dividindo o valor de cada célula de valor positivo pelo somatório das células de valor positivo. As células de valor mais elevado (maior declive), terão uma maior probabilidade de serem “escolhidas” para a passagem do bloco. O esquema seguinte ilustra a construção da lei de probabilidade de transferência de um bloco posicionado na célula central para uma das células vizinhas:

Cotas (z)		
214	212	211
208	210	205
195	205	190

Desnível ( $z_{\text{inicial}} - z_{\text{final}}$ )		
-4	-2	-1
2	5	5
5	5	10

Probabilidade por direcção		
0	0	0
0.075	0.185	0.185
0.185	0.185	0.370

Para simular a trajectória do bloco, gera-se um número aleatório entre 0 e 1 segundo uma lei uniforme. Nesta “roleta”, as direcções com valores mais altos de probabilidade têm mais possibilidades de o valor aleatório gerado se situar dentro destes intervalos e assim o bloco seguir preferencialmente os percursos de maior declive.

Em função do declive e da distância percorrida na iteração é actualizada a velocidade do bloco. A velocidade aumenta se o ângulo de inclinação for superior ao ângulo de atrito  $\phi$  e diminui no caso contrário. Se numa iteração a velocidade atinge o valor 0, a simulação da trajectória termina.

- b) todas as células estão a uma cota superior à do bloco. Nesta situação é gerada uma lei de probabilidades similar à anterior, de sentido. Nesta situação o bloco abandona segundo a lei (2). Quando o bloco para, termina a simulação do percurso.

No modelo desenvolvido o parâmetro de controlo que sintetiza o maior ou menor avanço do bloco é o ângulo de atrito. Uma vez que era conhecido o resultado da queda de um bloco no local, o modelo foi calibrado para o comprimento do percurso real desse bloco. Testaram-se vários ângulos de atrito  $\phi$  para um conjunto de 1000 realizações, tendo-se chegado ao valor de  $\phi = 22^\circ$ . A figura seguinte ilustra as frequências dos percursos em cada célula de um conjunto de 1000 realizações de percursos. Verifica-se que o trajecto conhecido efectivo encontra-se dentro da área definida pelos percursos possíveis (figura 2).

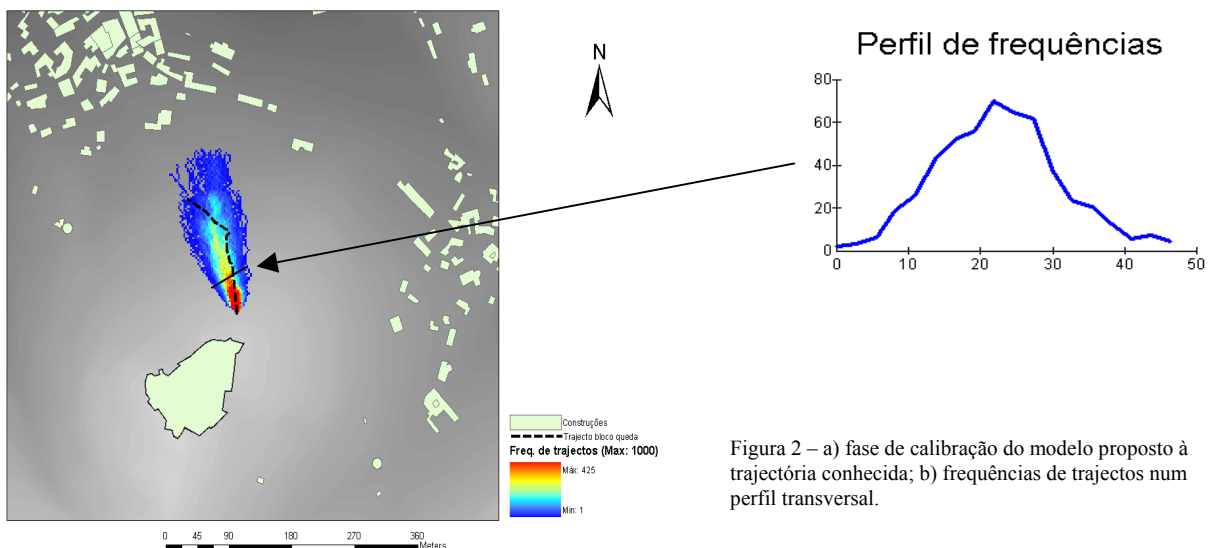


Figura 2 – a) fase de calibração do modelo proposto à trajectória conhecida; b) frequências de trajectos num perfil transversal.

Foram gerados cenários simulados de trajetórias para o conjunto de 34 blocos em que simultaneamente foram classificados o sub-conjunto de parâmetros estáticos e dinâmicos na classe “mau”. A análise das trajetórias possíveis em conjunto com a análise da ocupação do solo define uma carta de risco geológico deste evento (figura 3).

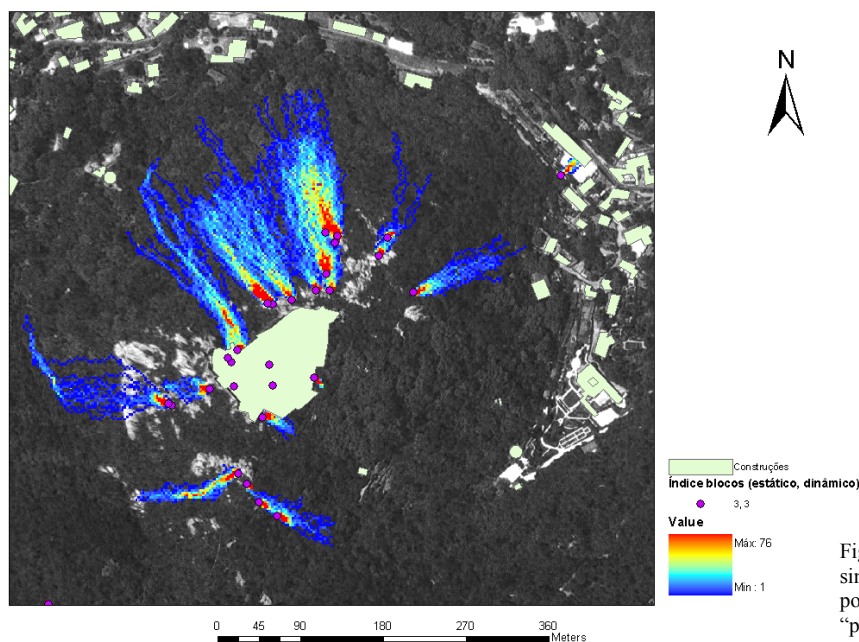


Figura 3 – Resultados das simulações de trajetórias potenciais para os 34 blocos mais “problemáticos”.

## Conclusões

Neste trabalho descreve-se a implementação de uma metodologia destinada a construir uma carta de risco referente à queda de blocos na Serra de Sintra. Uma vez que é praticamente impossível quantificar a relação entre os parâmetros geotécnicos e as trajetórias optou-se por classificar, à priori, quais os blocos que correspondem a uma situação de maior potencial de movimento estático e dinâmico. Os resultados da CAH em 3 agrupamentos (“bom”, “intermédio” e “mau”) são cruciais na construção de um mapa de risco para a área envolvente, uma vez que permitem ponderar, de modo diferenciado, os mapas das trajetórias individuais potenciais dos blocos obtidas por simulação face ao potencial de mobilidade efectivo que é descrito e medido pelos parâmetros geotécnicos.

A aplicação de um modelo estocástico que depende de um reduzido número de parâmetros (cotas e coeficiente de atrito) permite a execução expedita de trajetórias simuladas potenciais de movimento. Variando o coeficiente de atrito, poderemos obter uma carta de risco “mais optimista” ou “mais pessimista” de acordo com critérios periciais.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Câmara Municipal de Sintra a informação disponibilizada e o apoio logístico dispensados, absolutamente necessários ao desenvolvimento deste trabalho. Agradecem, também, aos alunos da Licenciatura em Engenharia Geológica da FCT/UNL António Subtil, Filipe Costa, Maria do Céu Gonçalves, Miguel Alcântara, Paulo Matos e Pedro Gregório a participação empenhada nos trabalhos de campo.

## Bibliografia

- Águas, C.; Kullberg, J. C.; Costa, C.N. & Almeida, J. A. (2003) - Estudo geotécnico sobre a estabilidade de blocos de granito na Serra de Sintra. *Ciências Terra*, Lisboa, nº esp. V, CD-ROM: G1-G4.
- Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L. & Nicol, D. M. (1996) – Discrete event system simulation. *Prentice Hall, Inc.*, 600 p.
- Burrough, P.A. & McDonnell, R. A. (1998) – Principles of Geographical Information Systems. *Oxford University press*, 333 p.
- Giani, G. P. (1992) – Rock Slope Stability Analysis. *A. A. Balkema*, 361 p.
- Sneath, P. H. A. (1973) - Numerical Taxonomy: The Principles and Practice of Numerical Classification. *W H Freeman & Co*, 573 p.