

# Estudo geotécnico sobre a estabilidade de blocos de granito na Serra de Sintra

C. Águas<sup>(1)</sup>, J. A. Almeida<sup>(2)</sup>, J. C. Kullberg<sup>(3)</sup>, C. Costa<sup>(b,4,5)</sup>

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

## RESUMO

**Palavras-chave:** caos de blocos; parâmetros de estabilidade de blocos; carta de risco; Serra de Sintra.

Na sequência da queda de um bloco de grandes dimensões (~35 m<sup>3</sup>), 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 uma carta de risco na envolvente aquele relevo.

O estudo envolve várias fases de trabalho: 1) selecção dos parâmetros condicionantes da estabilidade dos blocos mais relevantes para este caso em particular; 2) interpretação fotogeológica e levantamento da informação, *in situ*, de cerca de 200 blocos, com auxílio de GPS diferencial; 3) tendo por base os parâmetros medidos *in situ*, discriminação dos blocos, face ao potencial de mobilidade estático e dinâmico; 4) simulação das trajectórias possíveis para cada bloco, com base em algoritmos do tipo autómatos celulares, tendo por base o modelo digital de terreno; 5) elaboração de uma carta de risco, em função das trajectórias simuladas e áreas hipoteticamente afectadas.

## Introdução

Numa fase inicial dos trabalhos, procedeu-se à delimitação das áreas de concentração de blocos e à identificação de blocos isolados que, através de observação prévia pericial apresentavam prováveis situações de grande risco para pessoas e bens. Para tal, recorreu-se a um levantamento exaustivo *in situ* dos blocos (localização espacial e recolha sistemática de vários parâmetros), à interpretação de fotografias aéreas à escala aproximada de 1:5000 e à análise da carta de declives construída em ambiente SIG (suporte ArcView) a partir da altimetria em formato digital e ortofotomapa, depois de corrigido para a mesma escala.

Neste trabalho são descritos, em primeiro lugar, os parâmetros geotécnicos ou descritores seleccionados para a campanha de medições *in situ* com georeferenciação através de GPS diferencial. Seguidamente mostram-se os resultados preliminares de um algoritmo baseado em autómatos celulares destinado a efectuar simulações de trajectórias equiprováveis de blocos em queda. O conjunto das trajectórias simuladas e a carta de ocupação do solo permitem a elaboração de uma carta de risco geológico na envolvente da área em estudo.

Adicionando às variáveis de *input* no modelo (nomeadamente o ângulo de atrito) a incerteza subjacente ao desconhecimento parcial das características mecânicas dos blocos e do substrato de apoio e a sua interacção com as características do movimento, é possível gerar trajectórias com uma extensão diferenciada (que podemos pericialmente designar por “pessimistas” ou “optimistas”). Neste exemplo e a título meramente ilustrativo, foram gerados dois cenários de trajectórias: um “optimista” – que é baseado no ângulo de atrito resultante da calibração do modelo com a trajectória do bloco que caiu no dia 29 de Janeiro (22 °) e outro “pessimista”, determinado a partir de uma redução do ângulo para 20°.

## Parâmetros geotécnicos medidos *in situ* e respectiva codificação

Atendendo à especificidade do caso em análise, foram escolhidos e medidos ou observados, *in situ*, parâmetros geotécnicos que permitissem uma correcta caracterização da estabilidade mecânica dos blocos a inventariar. Os mesmos encontram-se sumariamente descritos na Tabela 1 e a localização dos blocos na figura 1.

Para facilidade de interpretação, os parâmetros foram agrupados nas três categorias: *geometria*, *resistência* e *envolvente*. A geometria descreve a forma, as dimensões segundo três eixos perpendiculares (X, Y e Z), a relação dos eixos, o arredondamento das arestas e a posição do centro de gravidade. A forma e a dimensão dos blocos são descritas através do volume, da dimensão estática e da dimensão dinâmica. O volume é determinado, de forma maximalista, pelo produto dos eixos ortogonais. A dimensão estática é calculada através da comparação da altura do bloco (Z) com as restantes dimensões ortogonais, constituindo um indicador do “balanço” potencial do bloco. A determinação da dimensão dinâmica é efectuada através da relação entre todas as dimensões do bloco, integrando-se os resultados em 3 classes de forma: (1) *cúbica*, quando  $X \approx Y \approx Z$ ; (2) *prismática*, quando  $(X \approx Y) < Z/2$ ; (3) *tabular*, quando  $(X \approx Y)/2 > Z$ . Este parâmetro é indicador do tipo de movimento que o bloco irá ter, depois de ultrapassada a situação estática. Os parâmetros relativos à resistência de cada bloco descrevem a sua resistência mecânica e o grau de alteração do granito. Finalmente, os parâmetros descritivos do meio envolvente (contextuais)

descrevem as características dos blocos na sua relação com o local onde estão efectivamente estacionados (enraizamento, efeito de carga e vegetação em situação de carga, a montante do bloco ou de sustentação, a jusante).

Os parâmetros disponíveis para análise são de ordem qualitativa nominal (rolamento, estabilidade, estado de alteração, enraizamento, efeito de carga e vegetação) e qualitativa (volume, resistência e relação de dimensões - estática e dinâmica). Uma vez que a amostragem reúne variáveis de tipo qualitativo (nominal embora posteriormente codificado em classes) e quantitativo (valores medidos directamente ou inferidos por medições), para se efectuar uma análise multivariada cruzando, simultaneamente toda esta informação, foi necessário codificar previamente em classes, todas as variáveis quantitativas. Cada parâmetro, qualitativo e quantitativo, apresenta-se estruturado em três modalidades ordinais (1, 2 e 3), sendo o nível mais baixo (1) significativo de maior estabilidade mecânica e o nível mais alto (3) significativo de menor estabilidade mecânica. O esquema de codificação utilizado permite incorporar todos os tipos de variáveis (categóricas e contínuas) no mesmo formato.

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros seleccionados condicionantes da estabilidade dos blocos

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros seleccionados condicionantes da estabilidade dos blocos				
BLOCO	PARÂMETROS	CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	
	BLOCO	DIMENSÃO	X - Y - Z	3 medidas ortogonais entre si, sendo Z = altura; Y = comprimento; X = largura
VOLUME			$V = X * Y * Z$	
PESO			$P = V * 2,65$ (densidade do granito)	
ARREDONDAMENTO		1	O bloco apresenta faces e arestas bem definidas	
		2	O bloco apresenta faces definidas mas as arestas encontram-se arredondadas	
		3	O bloco já não apresenta arestas, estando completamente arredondado	
CENTRO DE MASSA		1	Centro de massa posicionado dentro da base de suporte	
		2	Centro de massa posicionado perto do limite da base de suporte	
		3	Centro de massa posicionado fora da base de suporte	
BLOCO		ALTERAÇÃO	1	W 1-2, sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
			2	W 3, alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável
			3	W 4-5, alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente ou totalmente friável
		RESISTÊNCIA	1	S 1, Resistência à Compressão Uniaxial > 200 KN/m <sup>2</sup>
			2	S 2, Resistência à Compressão Uniaxial entre 200 - 60 KN/m <sup>2</sup>
			3	S 3, 4-5, Resistência à Compressão Uniaxial < 60 KN/m <sup>2</sup>
BLOCO	ENRAIZAMENTO	1	Bloco bastante enraizado (> 1/10 do seu comprimento)	
		2	Bloco apenas com a base enraizada (< 1/10 do seu comprimento)	
		3	Bloco completamente a descoberto	
	EFEITO DE CARGA	1	Bloco não serve de suporte	
		2	Bloco suporta < 20 ton, ou pelo menos 2 blocos suportam > 20 ton	
		3	Bloco suporta > 20 ton	
	VEGETAÇÃO	1	Não se observa vegetação na envoltória mas existem árvores imediatamente a jusante que podem constituir barreira	
		2	Não se observa vegetação na envoltória do bloco	
		3	Existência de vegetação nas descontinuidades envolventes ao bloco que podem favorecer a instabilização	
DIACLASE	ORIENTAÇÃO	1	Inclinação para "dentro" do talude	
		2	Inclinação nula	
		3	Inclinação para "fora" do talude	
	ESPAÇAMENTO	1	F 1-2, > 60 cm	
		2	F 3, 20 - 60 cm	
		3	F 4-5, < 20 cm	
	ABERTURA	1	Aperçada, < 0,5 mm	
		2	Moderada, 0,5 - 10 mm	
		3	Aberta, > 10 mm	
	PERSISTÊNCIA	1	< 3 m em maciço rochoso ou corta o bloco até 50%	
		2	3-10 m em maciço rochoso ou corta o bloco em mais de 50%	
		3	> 10 m em maciço rochoso ou corta o bloco na totalidade	
	ENCHIMENTO	1	Requer mais de 1 martelada para quebrar o material	
		2	O canivete não produz efeito no material, mas é fracturado por uma martelada forte	
		3	O material é descascado por uma lamina de canivete	
	RUGOSIDADE	1	Superfície ondulada rugosa	
		2	Superfície ondulada lisa ou plana rugosa	
		3	Superfície plana lisa ou com estrias	
	RESISTÊNCIA	1	S 1, Resistência à Compressão Uniaxial > 200 KN/m <sup>2</sup>	
		2	S 2, Resistência à Compressão Uniaxial entre 200 - 60 KN/m <sup>2</sup>	
		3	S 3, 4-5, Resistência à Compressão Uniaxial < 60 KN/m <sup>2</sup>	
PERCOLAÇÃO	1	O material encontra-se húmido, mas sem águas presente		
	2	O material de enchimento encontra-se molhado, com ocasionais gotas de água		
	3	O material de enchimento apresenta sinais de "lavagem" ("outwash") com percolação de água contínua		

A trajetória da queda do bloco ocorrida em 29 de Janeiro foi cartografada *in situ* e digitalizada sobre um SIG (figura 1). Este percurso, embora único, é extremamente importante na calibração do modelo e na validação da coerência do conjunto das trajetórias simuladas. O facto de existir apenas uma trajetória de queda de um bloco correctamente cartografada remete, em grande parte, a validação do modelo para critérios meramente periciais.

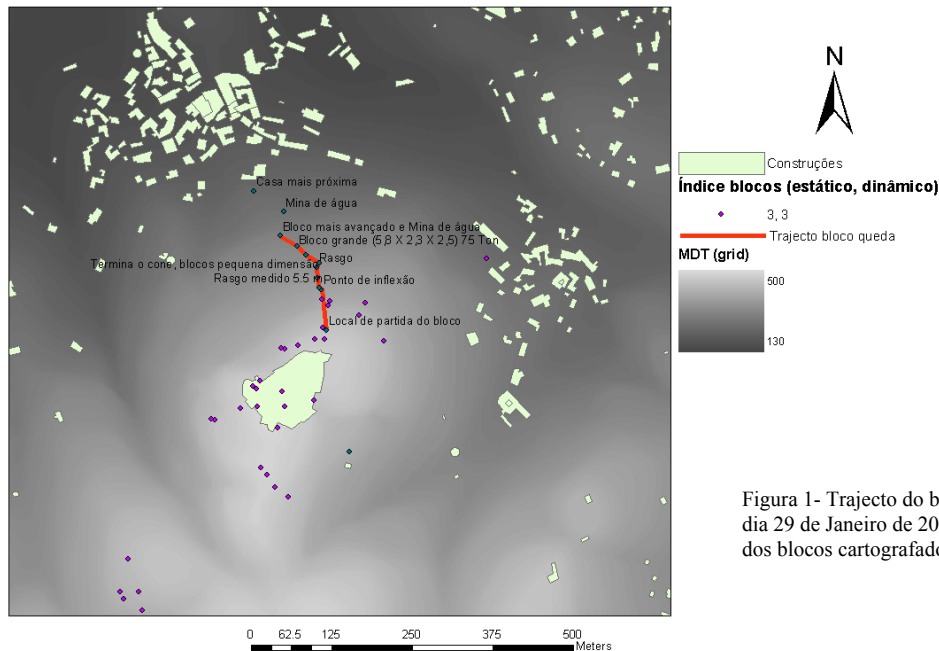


Figura 1- Trajecto do bloco em queda no dia 29 de Janeiro de 2002 e localização dos blocos cartografados.

### Síntese da metodologia aplicada na simulação das trajetórias

A partir da informação recolhida *in situ* e do modelo digital de terreno foi desenvolvida uma metodologia destinada à construção de uma carta de risco geológico na área envolvente à Serra de Sintra, que pode ser sintetizada nas seguintes etapas:

- Análise da independência ou dependência** (redundância) entre as variáveis recolhidas *in situ* por análise de correspondências (AC). Ao efectuar a pesquisa dos eixos factoriais que façam ressaltar determinadas características dos dados analisados, destaca-se o conjunto possível das relações existentes entre as várias variáveis analisadas, pela sua representação simultânea no mesmo espaço. Neste exemplo, a contribuição dos primeiros eixos é baixa – os 3 primeiros eixos explicam cerca de 26% – o que significa que o relacionamento entre as modalidades dos parâmetros estudadas é globalmente muito baixo. Este facto é explicado por uma formação geológica onde as características dos blocos são desestruturadas ou erráticas (caos de blocos).
- Discriminação dos blocos face à estabilidade mecânica** (estática e dinâmica). Verifica-se que nem todos o blocos cartografados apresentam o mesmo potencial ao rolamento que em termos estáticos (início do movimento) quer em termos dinâmicos (manutenção do movimento). Uma vez que é praticamente impossível integrar todas as características dos blocos (parâmetros geométricos, geotécnicos e contextuais) num modelo de simulação de queda, optou-se por discriminar os blocos *à priori*, face a estas características. Estes parâmetros foram subdivididos em dois conjuntos (estáticos e dinâmicos) consoante a intervenção que é esperada no movimento, segundo uma opinião pericial. Utilizou-se a classificação ascendente hierárquica para fazer a subdivisão dos blocos em 3 conjuntos diferenciados no que respeita ao potencial ao rolamento estático e mais 3 conjuntos no que respeita ao potencial dinâmico.
- Calibração do modelo** de simulação de trajetórias com a trajetória conhecida (Almeida *et al.*, 2003). O resultado da calibração é o ângulo de atrito que melhor reproduz no modelo a trajetória da queda do bloco ocorrida em 29 de Janeiro de 2002, nomeadamente a extensão total.
- Simulação de cenários de trajetórias** prováveis para os blocos com maior potencial estático e dinâmico de queda (34 dos 185 blocos analisados) e união das áreas atravessadas. Variando o parâmetro ângulo de atrito para valores inferiores são gerados cenários de risco mais “pessimistas”, no sentido em que as áreas afectadas são maiores.
- Elaboração da carta de risco geológico**. Cruzamento das trajetórias com a carta de ocupação do solo.

### Resultados do modelo

Nas figuras seguintes ilustram-se os resultados do modelo das trajetórias simuladas para os 34 blocos classificados como de maior potencial de rolamento (menor estabilidade mecânica, simultaneamente estática e dinâmica). Na

figura 2 ilustram-se as áreas afectadas considerando dois ângulos de talude: 22°, que é o resultado da calibração e 20°. A figura 3 ilustra o conjunto numa visualização 3D.

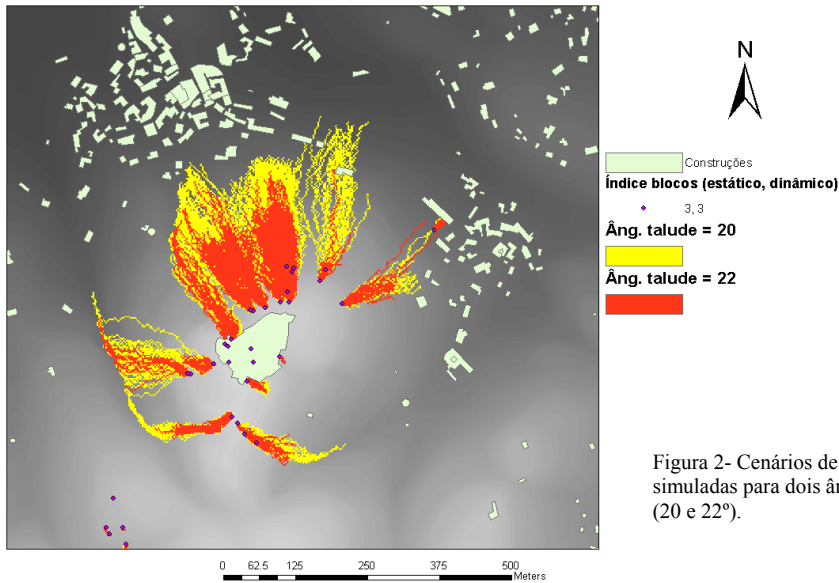


Figura 2- Cenários de trajetórias simuladas para dois ângulos de atrito (20 e 22°).

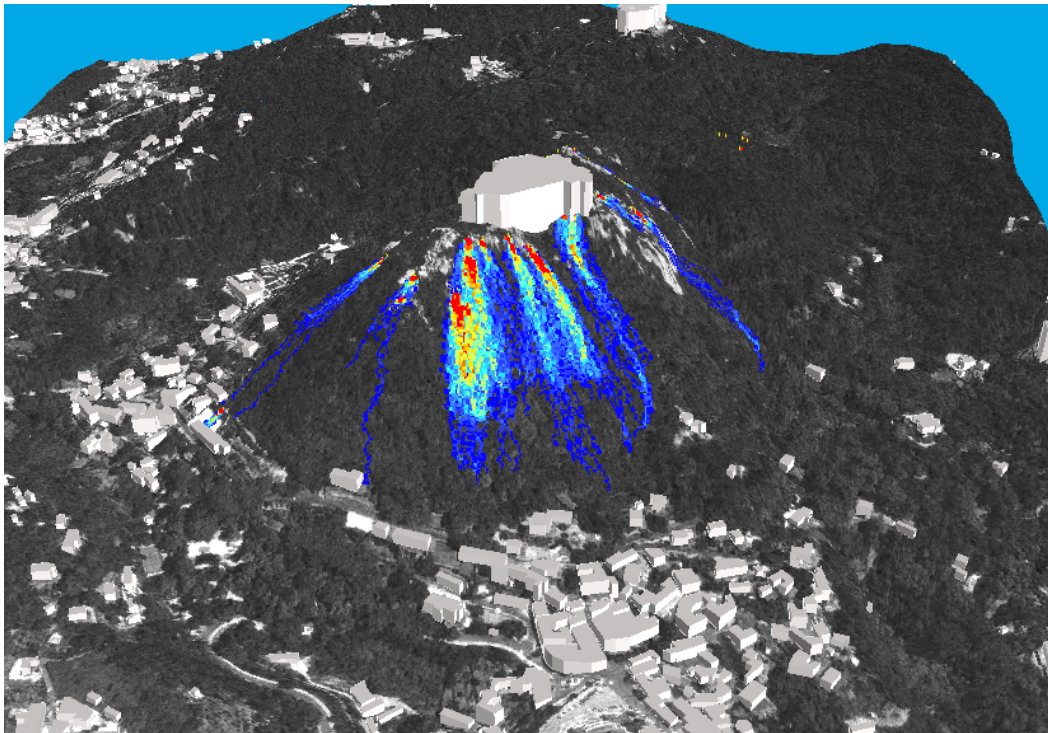


Figura 3 – Visualização 3D da serra de Sintra e representação da densidade de trajetórias simuladas: medida da probabilidade de passagem de um bloco por cada um dos locais.

## Conclusões

A metodologia apresentada permite a simulação de cenários equiprováveis para as trajetórias de blocos que evidenciem menor estabilidade mecânica (estática e dinâmica). Face às trajetórias potenciais obtidas, é possível planejar acções concretas de mitigação sobre os blocos que induzem um risco maior, isto é, que potenciam danos evidentes sobre pessoas ou bens.

## Bibliografia

- Almeida, J. A.; Águas, C.; Vargas, H. S.; Kullberg, J. C. & Costa, C. N. (2003) - Avaliação do potencial de mobilidade de blocos de granito na Serra de Sintra, através de técnicas de análise estatística multivariada, *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, nº esp. V, CD-ROM, pp. M1-M5.
- Costa, C. N. & Kullberg, J. C. (2002) – Relatório preliminar sobre a queda de blocos na Serra de Sintra (Castelo dos Mouros, 29 de Janeiro de 2002). *CIGA (UNL)*, 54 p. (inédito).
- Giani, G. P. (1992) – Rock Slope Stability Analysis. *A. A. Balkema*, 361 p.