

ANÁLISE DE PERIGOSIDADE E RISCO DA QUEDA DE BLOCOS NA SERRA DE SINTRA

ROCKFALL HAZARD AND RISK ANALYSIS IN SINTRA AREA

ALMEIDA, J.A., *CIGA, FCT/UNL, Monte de Caparica, Portugal, ja@fct.unl.pt*
COSTA, C. N., *CIGA, FCT/UNL, Monte de Caparica, Portugal, cnc@fct.unl.pt*
KULLBERG, J. C., *CIGA, FCT/UNL, Monte de Caparica, Portugal, jck@fct.unl.pt*
VARGAS, H., *CIGA, FCT/UNL, Monte de Caparica, Portugal, hugo@ciga.fct.unl.pt*
ÁGUAS, C., *CIGA, FCT/UNL, Monte de Caparica, Portugal, cesaraguas@yahoo.com*

RESUMO

Neste artigo apresentam-se os resultados do desenvolvimento e implementação de uma metodologia estocástica destinada a calcular as trajectórias potenciais mais prováveis de blocos de granito identificados na encosta do “Monte da Lua”, Sintra e a apresentar a carta de risco geológico do local. A metodologia utilizada compreende duas fases: I) inventariação de parâmetros geotécnicos para cada bloco em situação de risco e envolvente; II) simulação estocástica de cenários equiprováveis para as trajectórias de cada bloco. Cada trajectória simulada é condicionada à localização do bloco, à resistência oposta pela superfície e ao modelo digital do terreno.

ABSTRACT

This paper presents the results of the development and implementation of a stochastic methodology to calculate sets of the most probable rockfall pathways for granite boulders potentially dangerous identified in “Monte da Lua”, Sintra (a small town classified as world heritage by UNESCO). The proposed methodology encompasses two main steps: I) fieldwork to sample risk boulders (location and geotechnical parameters); II) stochastic simulation of equally probable scenarios for boulders pathways. Simulated pathways were conditioned to boulder locations, surface resistance and digital elevation model.

1. INTRODUÇÃO

Este estudo agora apresentado foi incentivado pela queda de um bloco de granito a 29 de Janeiro de 2002, no “Monte da Lua”, Serra de Sintra e tem os seguintes objectivos: i) desenvolvimento e implementação de um modelo matemático que descreva a probabilidade de cada ponto a jusante constituir área de passagem de um bloco e ii) avaliação, em ambiente SIG, dos potenciais danos associados à queda de um dado bloco, após mobilização potencial.

A queda de blocos é um processo geomorfológico natural que ocorre, fundamentalmente, em encostas muito declivosas com blocos de grandes dimensões, preferencialmente arredondados, e em situação de instabilidade conforme combinação de factores geológicos e meteorológicos (Dorren, 2003).

A formulação de um modelo físico ou matemático, que descreva correctamente a trajectória de um bloco em queda, constitui um problema complexo. Em termos gerais, as variáveis que descrevem o potencial para a iniciação do movimento, e depois para a sua continuação, são

função das características do bloco e das áreas vizinhas: i) bloco: tipo de rocha, forma, volume ou peso, posição do centro de gravidade; tipo de apoio e interação com outros blocos; ii) áreas vizinhas: declive, uso do solo e presença de obstáculos (árvores, barreiras, etc.).

Para descrever a queda de blocos por modelação existem várias abordagens e programas informáticos de simulação de trajectórias (por exemplo, o programa STONE) que consideram, que o movimento de faz segundo três tipos elementares: rolamento, escorregamento e queda livre (Guzzetti, 2002). A incerteza é incorporada na simulação das trajectórias variando os valores das variáveis, em cada iteração, dentro de intervalos pré-definidos. A queda livre, embora complique significativamente os modelos de trajectórias, deve ser considerada no caso do terreno em causa evidenciar diferenças abruptas de declive, o que não é o caso da área em estudo (“Monte da Lua”). Neste projecto, na simulação das trajectórias optou-se por um modelo mais simplificado, que considerasse apenas o movimento de cada bloco solidário com o solo, ou seja, dependente do coeficiente de atrito do bloco com o solo.

A primeira fase do estudo envolveu a selecção dos parâmetros geotécnicos mais relevantes que descrevem o potencial de um bloco para iniciar o movimento e para continuar mobilização potencial. Com estes parâmetros foram calculados dois índices de perigosidade, respectivamente para o ponto de vista estático e o dinâmico permitindo discriminar, *a priori*, os blocos com o maior potencial de mobilidade (iniciação e continuação do movimento). A discriminação dos blocos em termos do potencial para o movimento do ponto de vista estático e dinâmico constitui etapa fundamental na metodologia proposta pois permite ponderar de forma diferencial as trajectórias dos blocos e priorizar medidas de mitigação.

A etapa seguinte consiste na simulação de cenários equiprováveis das trajectórias de queda dos blocos. O algoritmo implementado é baseado numa abordagem por autómatos celulares que, neste caso, dependem da posição inicial do bloco, resistência média ao movimento e o declive extraído do modelo digital do terreno (MDT). A resistência superficial foi calibrada com base na trajectória do bloco que é conhecida. Alterando ligeiramente a resistência superficial, as trajectórias simuladas podem ser analisadas do ponto de vista optimista e pessimista.

Para cada bloco, os índices de perigosidade estático e dinâmico foram combinados com as trajectórias simuladas o que permitiu a classificação de todos os blocos em classes de risco, reflectindo nova priorização para intervenções futuras no local.

2. PARÂMETROS GEOTÉCNICOS EM ANÁLISE

2.1 Introdução

Na sequência da preparação dos trabalhos de campo seleccionaram-se os parâmetros geotécnicos mais relevantes para a avaliação da perigosidade de cada bloco (tal como são sugeridos pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas - SIMR) e construiu-se uma Base de Dados (Águas, 2003).

A SIMR estrutura cada parâmetro geotécnico em níveis diferenciados. Neste trabalho, optou-se por ajustar todos os parâmetros em três níveis distintos: (1) nível mais “baixo”, significativo de maior estabilidade mecânica; (2) nível “intermédio”; (3) nível mais “alto”, significativo de menor estabilidade mecânica. A classificação adoptada, pelo seu carácter expedito, permite retirar vantagens no levantamento dos parâmetros geológicos e geotécnicos nos trabalhos de campo, na apresentação de mapas em SIG e na avaliação estatística.

No total, foram identificados e inventariados em trabalho de campo 188 blocos em situação de risco potencial.

2.2 Parâmetros geotécnicos inventariados nos blocos de granito

Os parâmetros geotécnicos considerados na inventariação dos blocos de granito foram agrupados em três categorias: geometria (dimensão, arredondamento e centro de massa), resistência (resistência à compressão uniaxial e estado de alteração) e meio envolvente (enraizamento, efeito de carga e vegetação).

Os parâmetros geométricos descrevem as dimensões segundo três eixos perpendiculares (X, Y e Z), a forma aproximada, o arredondamento das arestas e a posição do centro de gravidade. Estes parâmetros intrínsecos aos blocos são indicadores do “potencial” para que o movimento se inicie e persista.

Os parâmetros relativos à resistência de cada bloco descrevem a sua resistência mecânica e o grau de alteração do granito. São parâmetros intrínsecos aos blocos e bons indicadores do “potencial” para, após o início do movimento, um bloco ser fragmentado em pedaços mais pequenos.

Finalmente, os parâmetros descritivos do meio envolvente ou contextuais descrevem as características dos blocos na sua relação com o local onde estão efectivamente estacionados: enraizamento, efeito de carga e vegetação. Por isso, também são parâmetros intrínsecos aos blocos, mas apenas susceptíveis de descreverem o “potencial” para o início do movimento.

Como a amostragem agrupa variáveis do tipo quantitativo e qualitativo, para se efectuar a análise estatística multivariada e discriminar os blocos *a priori*, foi necessário codificar todas as variáveis quantitativas em classes. Assim, todos os parâmetros, qualitativos ou quantitativos, foram estruturados em três modalidades, sendo o nível mais baixo (1) significativo de “alta” estabilidade mecânica, o nível (2) é indicativo de estabilidade “média” e o nível mais alto (3) é significativo de “baixa” estabilidade mecânica.

A dimensão foi considerada com duas variantes: a dimensão estática e a dimensão dinâmica. A primeira constitui indicador do “balanço” potencial do bloco e é calculada através da comparação da altura do bloco (*dimZ*) com as restantes dimensões ortogonais (*dimX* e *dimY*). A segunda é indicador do tipo de movimento que o bloco irá ter se for ultrapassada a situação estática, tendo sido consideradas 3 classes: (1) achatada, quando uma das dimensões é muito menor do que as restantes; (2) alongada, quando uma das dimensões é muito maior do que as restantes; (3) equidimensional, quando as 3 dimensões são aproximadas.

2.3 Discriminação dos blocos segundo situação estática e dinâmica

O objectivo desta etapa é proceder à discriminação dos blocos em termos do potencial de mobilidade estático e dinâmico, com base nos parâmetros geotécnicos medidos *in situ*.

Qualquer algoritmo de discriminação consiste em agrupar amostras similares, descritas por variáveis categóricas ou contínuas, utilizando critério de similitude ou distância. Inicialmente, cada amostra constitui um grupo ou *cluster* individual. Seguidamente, todas as amostras com características similares são sucessivamente agrupadas, ao longo de várias iterações, com base na medida de similitude, ou distância, considerada.

Se designarmos a similitude de dois objectos por s , é usual que os valores de s variem entre 0 (ausência de similitude – não existem coincidências) e 1 (similitude máxima – os objectos são descritos pelas mesmas características). A discriminação das amostras num *índice de influência* é baseada na listagem da proximidade ou medida de similitude entre cada amostra e os arquétipos considerados.

Dado que todas as variáveis intervenientes estão codificadas em modo categórico ordinal, utilizou-se a medida de similitude *Jaccard index* (Johnson, 1982). A distância ou similitude entre duas amostras, a e b , representadas por vectores 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:

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

O estudo da situação estática e dinâmica foi tratado em separado. Assim, os parâmetros geotécnicos já referidos foram separados em dois conjuntos disjuntos com base em critérios estritamente periciais, cujo resultado é apresentado no quadro 1. Dado que todos os parâmetros estão inventariados segundo três classes de perigosidade crescente, foram considerados três arquétipos de situações de referência, com as seguintes designações segundo o ponto de vista de estabilidade mecânica: “BOM” (todas as modalidades iguais a 1), “INTERMÉDIO” (todas as modalidades iguais a 2) e “MAU” (todas as modalidades iguais a 3).

Quadro 1 – Codificação dos arquétipos “BOM”, “INTERMÉDIO” e “MAU” para a construção do índice de influência na estática e na dinâmica

Parâmetros geotécnicos	Arquétipos na análise estática			Arquétipos na análise dinâmica		
	BOM	INTERMÉDIO	MAU	BOM	INTERMÉDIO	MAU
Dimensão estática	1	2	3			
Dimensão dinâmica				1	2	3
Volume				1	2	3
Arredondamento				1	2	3
Centro de massa	1	2	3			
Resistência				1	2	3
Estado de alteração				1	2	3
Enraizamento	1	2	3			
Efeito de carga	1	2	3			
Vegetação	1	2	3			

O resultado é a classificação de cada bloco a uma modalidade de síntese, quer em termos estáticos quer em termos dinâmicos. No quadro 2 apresenta-se o bi-histograma dos resultados obtidos para os 188 blocos, segundo influência na estática e na dinâmica.

Quadro 2 – Histograma cruzado de frequências absolutas segundo o índice de influência na estática ou na dinâmica segundo as modalidades BOM (1), INTERMÉDIO (2) e MAU (3)

		Índice de influência na dinâmica			
		BOM (1)	INTERMÉDIO (2)	MAU (3)	
Índice de influência na estática	BOM (1)	-	1	-	1
	INTERMÉDIO (2)	3	104	9	116
	MAU (3)	4	61	6	71
		7	166	15	188

Esta análise estatística, baseada na avaliação dos parâmetros geotécnicos inventariados nos trabalhos de campo, permitiu identificar quais os blocos mais problemáticos do ponto de vista da execução da carta de risco geológico, faltando agora analisar as trajetórias potenciais destes blocos, o que será apresentado seguidamente.

3. SIMULAÇÃO DAS TRAJECTÓRIAS DOS BLOCOS

3.1 Algoritmo proposto para simulação das trajetórias

Depois de determinado bloco iniciar o seu movimento descendente numa encosta, quer seja por deslizamento, rolamento ou queda livre, o factor mais importante que controla a trajetória de queda é indiscutivelmente a geometria do talude. Em particular, quando as encostas tem declive acentuado gera-se uma muito significativa componente horizontal do movimento. A situação mais perigosa do movimento de um bloco está associada a declives muito inclinados e ocorre quando a componente horizontal é elevada tal que o bloco perde o contacto com a superfície e movimenta-se em queda livre.

Um outro factor não menos importante é o tipo de cobertura da superfície. As faces a descoberto de rocha não alterada constituem os locais onde o movimento de um bloco é mais perigoso pois, nessas situações, a componente de resistência ao movimento é menor. Por outro lado, as superfícies cobertas com vegetação abundante ou solo absorvem considerável quantidade de energia e tendem a amortecer o movimento.

A capacidade de aceleração ou retardo de determinada superfície é determinada pelo coeficiente de restituição. O seu valor depende da natureza dos materiais que formam a superfície: superfícies limpas de rocha evidenciam coeficientes de restituição elevados, enquanto que superfícies alteradas, ou cobertas de vegetação ou solo apresentam coeficientes mais baixos. Na prática, o coeficiente de restituição pode ser apresentado como o ângulo de atrito, ou seja, como um ângulo que é “descontado” ao declive real do terreno.

Existem outros factores menos importantes mas que também têm interferência no movimento, tais como, a dimensão e a forma dos blocos, o coeficiente de fricção ou de atrito da superfície do bloco e a possibilidade de determinado bloco fragmentar-se em pedaços mais pequenos durante a queda. A maior dificuldade em utilizar estes factores é relacioná-los com o movimento. Por exemplo, é verdadeiro dizer que um bloco arredondado tem muito maior facilidade de movimentação do que um bloco facetado. Mas como calcular a diferença na extensão das trajetórias ?

O modelo utilizado neste trabalho para a simulação de trajetórias é baseado num algoritmo de simulação do tipo Monte Carlo implementado sobre discretização do espaço e do tempo em unidades e com regras de transição probabilísticas características de algoritmos do tipo autómatos celulares. O formalismo desta classe de algoritmos propõe que seja utilizada malha regular de células idênticas, cada qual podendo 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_k , para outro estado no tempo t_{k+1} (Banks, 1996).

3.2 Modelo de autómatos celulares

Um modelo geográfico com estrutura matricial é o modo 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 do índice de linha e de coluna, assim como da coordenada da primeira célula e das suas dimensões. Cada célula é referenciada pela cota do tema.

Para cada estado de tempo t_k , a cada célula (i, j) corresponde um dos seguintes estados:

- contém o bloco;
- o bloco já atravessou a célula numa iteração anterior t_l com $l < k$;
- o bloco ainda não contactou a célula.

O movimento do bloco entre as células é controlado pelo declive em cada local e pela velocidade do bloco atingida em cada célula, sendo desprezável a resistência do ar. Segundo leis da física, o incremento de velocidade ($v(t_{k+1}) - v(t_k)$) de qualquer objecto “ideal” num plano inclinado de inclinação α e comprimento l , com um coeficiente de atrito ($\tan \phi$) é expresso por (Giani, 1992) (2):

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

Se o coeficiente de atrito for superior ao ângulo de inclinação da superfície, verifica-se redução de velocidade; se forem iguais existe conservação do movimento; se o coeficiente de atrito for inferior ao ângulo de inclinação da superfície, verifica-se aumento de velocidade. A magnitude do incremento, positivo ou negativo, é expresso por (2).

Quando o bloco está numa determinada célula, no instante de tempo seguinte se a velocidade for maior do que zero passará para a célula vizinha. Teoricamente, todas as células vizinhas são candidatas a receber o bloco desde que a respectiva cota seja inferior, embora com probabilidades distintas, consoante o gradiente do declive. São estas leis de probabilidade diferenciadas que permitem alimentar sucessivamente o modelo de simulação de trajectórias num processo de Monte Carlo, até o bloco parar por completo.

Para calcular as leis de probabilidade do movimento ocorrer para qualquer célula vizinha, observe-se o seguinte exemplo (figura 1). A célula central com a cota igual a 21 metros representa a posição actual do bloco. Pretende-se determinar a probabilidade do bloco passar para qualquer célula vizinha (probabilidade de transição) condicionada aos declives.

Elevação (z)	$Z_{initial} - Z_{final}$	Probabilidade de movimento para uma célula vizinha	Codificação de direcções
21 21 21	0 0 0	0,0 0,0 0,0	1 2 3
21 21 20	0 1 1	0,0 0,125 0,125	8 4
17 20 19	4 1 2	0,5 0,125 0,25	7 6 5

Figura 1 – Determinação da lei de probabilidade de um modo deslocar-se para as células vizinhas.

A lei de distribuição de probabilidades é considerada a partir da vizinhança de oito células possíveis. A partir da matriz local de cotas, é calculada a matriz de desníveis, resultante da diferença entre a cota da célula central e as cotas das células vizinhas. Tendo por base a matriz

de desníveis é gerada a matriz de probabilidades de transição assumindo uma lei que relaciona, uniformemente, os desníveis com a probabilidade de transição. Por exemplo, a probabilidade do deslocamento do bloco para uma nova célula com desnível de 4 metros é o dobro da que se verifica para desnível de 2 metros. Esta assunção da existência de proporcionalidade linear, entre o desnível e a probabilidade de movimento é utilizada em muitos modelos de autómatos celulares aplicados à simulação de fenómenos de risco geológico e tem a grande vantagem de permitir a fácil calibração dos modelos para as crises conhecidas.

Depois de estabelecida a matriz de probabilidades locais de transição, gera-se um número aleatório entre 0 e 1 segundo lei uniforme e aplica-se o processo de simulação de Monte Carlo. 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 (figura 2).

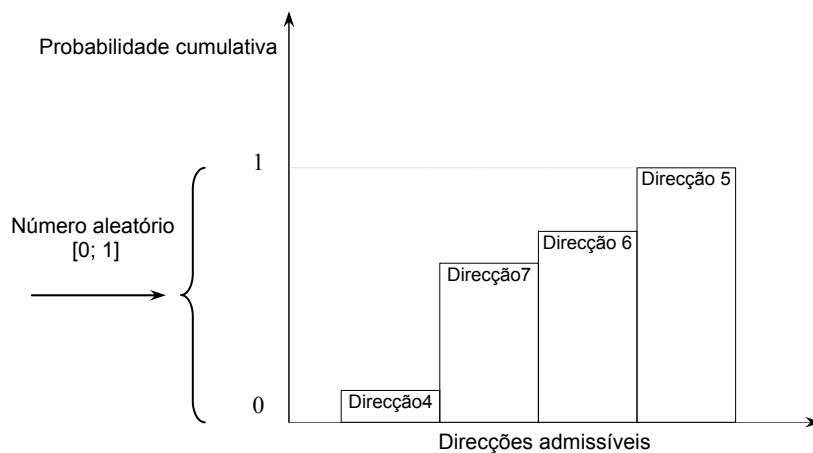


Figura 2 – Simulação de um acréscimo de trajectória segundo Monte Carlo.

Nos três casos enunciados anteriormente, em função do declive e da distância percorrida na iteração t_k a velocidade do bloco é actualizada segundo (2). A velocidade do bloco aumenta se o ângulo de inclinação for superior ao ângulo de atrito Φ e diminui no caso contrário. Se numa iteração a velocidade atinge o valor zero, a simulação da trajectória termina, o que significa que o bloco parou.

3.3 Calibração do modelo

Neste modelo proposto, as trajectórias de um bloco em termos de forma e extensão são dependentes de duas entidades: o MDT e o ângulo de atrito Φ . O ajustamento do ângulo de atrito foi conseguido a partir da geração de 1000 trajectórias equiprováveis para vários ângulos de atrito potencialmente realistas (onde cada valor sintetiza o ângulo de atrito efectivo não conhecido, a geometria do bloco, CR, etc.). O conjunto de realizações simuladas que melhor descrevem a trajectória conhecida foi obtida com o ângulo de atrito igual a $\Phi = 21,5^\circ$ (figura 3).

A partir da consulta a referências de trabalhos similares, o movimento de um bloco numa superfície que se aproxime dos 40° ocorre sempre em contacto com a superfície, isto é, não ocorrem movimentos compostos com rolamento do bloco e queda livre. Este facto, associado aos declives médios observados na encosta estudada validam a generalização deste mecanismo de deslocação por escorregamento ou rolamento solidário com a superfície a todos os restantes blocos cartografados.

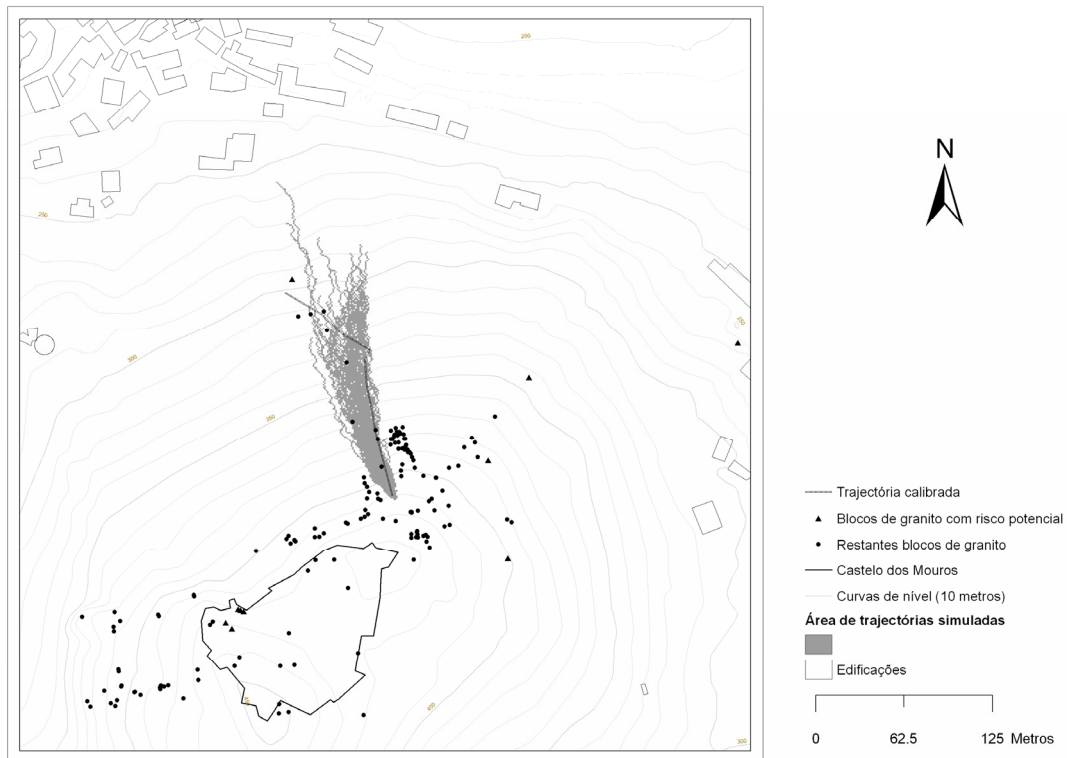


Figura 3 – Resultados da calibração do modelo com a trajetória conhecida.

4. ANÁLISE DE RISCO

4.1 Metodologia

Na sequência deste trabalho foram gerados cenários simulados de trajetórias para todos os 188 blocos de granito identificados nos trabalhos de campo, considerando o ângulo de atrito igual a $21,5^\circ$. Na análise do risco potencial foi utilizada uma metodologia em SIG que resulta da sobreposição dos cenários de trajetórias simuladas e a proximidade às edificações.

A metodologia utilizada resume-se às seguintes etapas:

1. Simulação de 1000 trajetórias equiprováveis de queda para cada bloco de granito inventariado. O resultado das simulações é apresentado sob a forma matricial, onde em cada célula é contabilizado o número de trajetórias que a atravessam. O número de trajetórias varia entre o máximo 1000 (célula de partida) e zero (células não atravessadas).
2. Identificação e exclusão dos percursos erróneos de cada bloco: percursos onde apenas foi observada uma passagem nas 1000 simulações;
3. Vectorização da área potencialmente afectada pela queda de cada bloco;
4. Contabilização de medidas de síntese para cada bacia de trajetórias potenciais: cota de partida do bloco, área (m^2), comprimento e largura máximas aproximadas (m);
5. Contabilização do número de outros blocos potencialmente afectados pelas trajetórias;
6. Análise do risco potencial das trajetórias de cada bloco: identificação dos blocos com trajetórias que se aproximam das habitações. Nesta análise foram considerados dois perímetros de protecção: 40 e 20 metros;

7. Apresentação da carta de risco final, que resulta da soma algébrica de todas as trajectórias de todos os blocos e cruzamento, *a posteriori*, com a carta de edificações.

Os resultados obtidos por esta metodologia a partir do ângulo de atrito igual a $21,5^\circ$ (calibração com a trajectória conhecida) foram designados neste estudo por cenários realistas e identificaram alguns blocos como sendo os mais problemáticos.

Com o objectivo de efectuar análise de sensibilidade aos resultados do modelo repetiram-se as simulações com o ângulo de atrito de 19° . Os resultados destas simulações foram designados neste estudo por cenários pessimistas. A redução do ângulo de atrito torna todos os percursos mais extensos, o que permite a identificação de mais blocos potencialmente problemáticos, embora com priorização inferior à obtida nos cenários realistas. Os resultados da simulação de cenários pessimistas permitem introduzir, indirectamente, factores de segurança mais elevados na avaliação dos resultados, deixando margem de manobra adicional para a incorporação de algumas incorrecções ou outros factores não considerados, que possam ter influência efectiva na segurança da população.

4.2 Análise de resultados

A análise dos resultados é apresentada segundo dois pontos de vista complementares: i) análise das consequências da potencial mobilização bloco a bloco e ii) análise da perigosidade de cada local. Na figura 4 mostra-se o conjunto de todas as trajectórias simuladas segundo cenário realista.

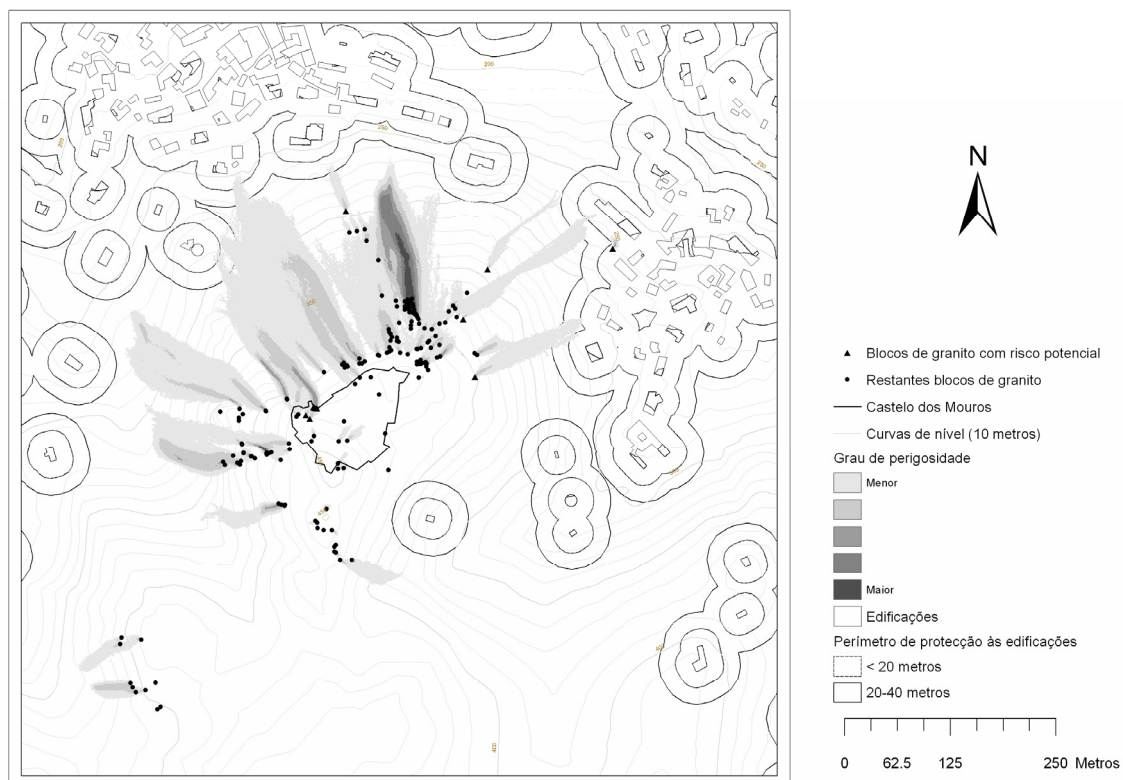


Figura 4 – Conjunto de todas as trajectórias simuladas segundo cenário realista.

A análise de potenciais mobilizações, bloco a bloco, permite fazer a discriminação dos blocos em função das trajectórias e do risco efectivo para as pessoas e bens. A combinação dos

resultados agora obtidos com os que foram anteriormente obtidos na discriminação em função dos parâmetros geotécnicos é essencial para a prioritização dos blocos no que respeita à prioridade de implementação de medidas de mitigação.

A carta de risco é obtida em SIG, após cruzamento das trajectórias simuladas com a ocupação do local. Os resultados são da maior importância no ordenamento deste local, por exemplo, no estabelecimento de perímetros de *non edificandi* e na adopção de planos de contingência caso ocorram novas crises.

4. CONCLUSÕES

O objectivo deste estudo e da metodologia proposta visaram a construção de uma carta de risco de um determinado local sob o ponto de vista de probabilidade de ser atingido pelo movimento de um determinado bloco de rocha após mobilização potencial.

O algoritmo adoptado para o estudo de mobilidade dos blocos depende de duas entidades (MDT e ângulo de atrito), o que o torna de fácil aplicação e calibração com trajectórias conhecidas, podendo ser aplicado a situações onde se verifique rolamento/escorregamento do bloco ao longo de uma encosta. A consideração de ângulos de atrito, diferentes do que melhor se ajusta a uma trajectória conhecida, permite considerar cenários optimistas ou pessimistas.

5. REFERÊNCIAS

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 da Terra*, Lisboa, nº esp. V, CD-ROM: G1-G3.

Banks, J., Carson, J. & Nelson, B. R. (1996), Discrete event system simulation. Prentice Hall, Inc..

Burrough, P.A. & McDonnell, R. A. (1998), Principles of Geographical Information Systems. Oxford University press, 333 p.

Dorren, L., (2003), A review of rockfall mechanics and modeling approaches, Progress in Physical Geography 27,1, Arnold, 69-87, Lisbon.

Giani, G. P., (1992), Rock Slope Stability Analysis, A. A. Balkema / Rotterdam / Brookfield.

Johnson, R.A. & Wichern, D.W. (1982), Applied Multivariate Statistical Analysis. Prentice Hall, 767 p.