



**ANÁLISE DE ESTABILIDADE E DETERMINAÇÃO DE FAIXAS DE RISCO E DE PROTEÇÃO
EM ARRIBAS E TALUDES NO ARquipélago DOS AÇORES***

33

**SLOPE STABILITY ANALYSIS AND DETERMINATION OF RISK AND PROTECTION BANDS
IN CLIFFS AND SLOPES IN THE AZORES ARCHIPELAGO**

Paulo Amaral

Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores (Portugal)
ORCID 0000-0002-5305-303X Paulo.AP.Amaral@azores.gov.pt

Ana Malheiro

Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores (Portugal)
ana.mm.malheiro@azores.gov.pt

Luís Teixeira

Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores (Portugal)
luis.mf.teixeira@azores.gov.pt

Filipe Marques

Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores (Portugal)
filipe.mp.marques@azores.gov.pt

Letícia Moniz

Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores (Portugal)
leticia.cm.moniz@azores.gov.pt

RESUMO

No arquipélago dos Açores a instabilidade de taludes naturais e/ou arribas constitui a maior fonte de risco natural para pessoas e bens. No âmbito do Projeto MACASTAB, que envolveu um grupo de técnicos dos arquipélagos dos Açores, Madeira, Canárias e Cabo Verde, foram desenvolvidas fichas de avaliação de estabilidade de taludes terrosos de natureza vulcânica. Para suportar a análise de estabilidade foram criadas matrizes de estabilidade para estimação do fator de segurança, através do conhecimento das características geométricas, hidrológicas e mecânicas. Para a estimação da componente fricçãoal apresenta-se uma metodologia de estimação por via indireta. Uma vez que a rotura de taludes promove normalmente o recuo da crista e a mobilização de material para a sua base, foram definidas faixas de risco e de proteção, tanto para o topo como para a base das arribas/taludes. As faixas são suportadas por relações estatísticas das características morfométricas, recuos e propagações ocorridos em episódios passados.

Palavras-chave: Faixas de risco e de proteção, análise de estabilidade, taludes, arribas.

ABSTRACT

In the Azores archipelago, the instability of natural slopes and/or cliffs constitutes the greatest source of risk for people and property. As part of the MACASTAB Project, which involved a group of technicians from the archipelagos of the Azores, Madeira, Canary Islands, and Cape Verde, evaluation sheets were developed to analyse the slope stability of volcanic terrains. Stability matrices were developed to estimate the safety factor of slopes. The stability analysis was based on knowledge of the geometric, hydrological, and mechanical characteristics. An indirect estimation methodology for estimating the frictional component is presented. Since slope failure usually causes the crest to recede and material to be mobilised towards its base, risk and protection bands were defined for both the top and base of the cliffs/slopes. These bands are supported by statistical relationships between morphometric characteristics, recessions and propagations that have occurred in past episodes.

Keywords: Risk and protection bands, stability analysis, slopes, cliffs.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no VI Congresso Internacional de Riscos, tendo sido submetido em 07-11-2023, sujeito a revisão por pares a 17-11-2023 e aceite para publicação em 22-05-2024. Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 32 (N.º Especial), 2025, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

Os movimentos de vertente, face ao seu caráter destrutivo, constituem uma ameaça para os ecossistemas, com maior relevância para a segurança de pessoas. Em todo o planeta Terra as perdas humanas aumentam à medida que o incremento da população se faz sentir em áreas de relevo acidentado, tais como as zonas montanhosas e litorais, em particular quando materializadas em contexto de arribas alcantiladas. Uma das formas de reduzir tais perdas é através da compreensão destes processos complexos e da aplicação de técnicas e modelos mais confiáveis de análise e previsão.

Apesar de apresentarem contextos geológicos e morfológicos distintos, as nove ilhas de natureza vulcânica do arquipélago dos Açores denotam uma pré-disposição à ocorrência de movimentos de vertente, de diferentes tipologias (e.g., queda de blocos, deslizamentos, escoadas detriticas). Estes processos são maioritariamente desencadeados por sismos, precipitação intensa e/ou prolongada (Valadão *et al.*, 2002; Marques *et al.*, 2015). Por outro lado, a atividade antrópica tem um contributo relevante na ocorrência destes processos no arquipélago dos Açores, causada por vários motivos (e.g., estruturas de drenagem direcionados para taludes; escavações no pé de taludes; sobrecargas impostas por aterros e casas no topo de taludes; rotura de canalizações subterrâneas, etc.).

A suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente pode ser inferida por diferentes metodologias (e.g., técnicas geomorfológicas, heurísticas, estatísticas/probabilísticas ou determinísticas). Os métodos de cartografia indireta de base estatística bivariada (Yin e Yan, 1998; Zézere, 1997; Marques, 2013) ou multivariada (Carrara, 1983; Guzzetti, 2005; Marques, 2013) são os mais utilizados na avaliação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente. Os métodos determinísticos baseiam-se em leis de base física e são mais rigorosos em estudos de pormenor à escala do talude, quando se conhece em rigor as propriedades físicas e mecânicas dos terrenos, perdendo qualidade quando é efetuada uma extração espacial à escala regional (Goth *et al.*, 2008; Amaral *et al.*, 2009).

Um movimento de vertente quando ocorre promove a mobilização de materiais terrosos, rochosos e/ou detriticos, por gravidade, para a sua base. Dependendo do mecanismo envolvido, da posição dos planos de rotura e da atividade em retrogressão, constituem uma importante fonte de risco geomorfológico para zonas urbanas e para pessoas que vivem tanto no topo como na base de taludes (Amaral, 2010; Marques, 2013).

Apesar da diversidade de métodos existentes, desde simples a complexos, estes constituem importantes ferramentas para o ordenamento do território, pois

permitem determinar a suscetibilidade a movimentos de vertente relativamente às áreas fonte. Quando combinados com modelos de propagação de fluxos (e.g., Begueria *et al.*, 2009; Hürlimann *et al.*, 2008), permitem efetuar um zonamento da propagação do material detritico mobilizado na rotura.

A distância de propagação a partir da zona de rotura tem sido amplamente estudada com recurso a vários métodos: empíricos, analíticos e numéricos (Dai *et al.*, 2002; Corominas, 1996). Algumas formulações empíricas são baseadas no ângulo de propagação e na altura de queda dos materiais, ou na relação entre o volume de solo colapsado e na sua altura de queda (Scheidegger, 1973; Hsu, 1975).

No entanto, a avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertentes, em geral, não tem em consideração o facto da ocorrência destes eventos poder resultar num recuo da crista do talude para o interior, que pode ser ou não significativo em função das características geológicas, morfológicas, da volumetria solicitada e da posição do setor de iniciação da rotura.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto MACASTAB - “Bases para a elaboração de um guia metodológico para a gestão do risco natural de instabilidades de encostas e taludes de natureza vulcânica na Macaronésia”, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional-FEDER através do programa de Cooperação INTERREG V-A Espanha-Portugal (Madeira-Açores-Canárias) 2004-2020. Este projeto envolveu um grupo de técnicos dos arquipélagos dos Açores, Madeira, Canárias e Cabo Verde. O objetivo primordial foi o de dotar os profissionais da área com uma ferramenta de trabalho que permita a quantificação preliminar das condições de estabilidade de taludes e avaliar potenciais áreas de propagação e de recuo de uma forma simples e rápida, por forma a apoiar a tomada de decisão em crises geomorfológicas, e suportar medidas de proteção de taludes, para a minimização do risco geomorfológico.

No âmbito deste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para determinação da estabilidade de taludes (naturais e artificiais) e para a estimativa da faixa de risco e de proteção constituídos por materiais de natureza vulcânica ocorrentes no arquipélago dos Açores. Nos taludes estudados incluíram-se as situações de arriba, que têm a particularidade de as suas vertentes se caracterizarem, maioritariamente, por paredes quase verticais e em contacto direto ou indireto com o mar.

A avaliação da estabilidade dos taludes foi suportada por análises determinísticas através do cálculo do fator de segurança, FS , tendo por base as características geológicas e geotécnicas de terrenos terrosos ocorrentes no arquipélago dos Açores. As relações estatísticas determinadas correlacionando aspectos morfométricos de

taludes e/ou arribas (e.g., altura) com recuos máximos e propagações em processos de instabilidade observados, permitiram definir faixas de risco e de proteção, tanto para o topo como para a base das arribas/taludes.

O objetivo desta metodologia é servir de apoio à definição de zonas de potencial risco junto ao topo ou base de taludes, nos instrumentos de gestão territorial, constituindo, por isso, uma primeira abordagem a esta problemática. Por este motivo, carece de estudos de pormenor para cada caso em particular.

Ficha para avaliação da análise de estabilidade e faixas de risco e de proteção

Nota introdutória

No âmbito do projeto MACASTAB, foi desenvolvida uma ficha de campo para avaliação da estabilidade de taludes de materiais terrosos e incoerentes de natureza vulcânica, assim como para a estimativa de potenciais recuos e propagações, independentemente da natureza geológica.

A ficha de campo é de preenchimento simples e rápido, sendo organizada em 5 campos (fig.1):

- i) No primeiro campo constam elementos de identificação e de caracterização geomorfológica e geológica do local, bem como da tipologia de instabilidade em análise;
- ii) O segundo campo corresponde aos parâmetros de resistência ao corte para servir de apoio à análise de estabilidade. A origem dos parâmetros de resistência ao corte pode resultar de determinações anteriormente efetuadas a partir de ensaios de campo (e.g., SPT), ensaios laboratoriais (ensaios triaxiais e de corte direto, etc.) ou estimados empiricamente. Nesta secção é apresentado, ainda, a possibilidade de se estimar esses parâmetros a partir duma metodologia tendo por base a utilização de parâmetros básicos do solo. Esta informação tem vindo a ser atualizada (González de Vallejo *et al.*, 2019) ao longo do tempo, à medida que são incorporados mais ensaios laboratoriais.
- iii) O terceiro campo corresponde às condições de água no solo;
- iv) O setor 4 corresponde à análise de estabilidade. Para tal, é necessário ter as informações dos setores anteriores e verificar na matriz de estabilidade que se apresenta na fig. 2, o intervalo que o fator de segurança (FS) apresenta;
- v) O setor 5 corresponde às faixas de segurança. O suporte para a definição das mesmas é apresentado no ponto 5 do artigo.

Os campos de i a iv dizem respeito à análise de estabilidade de taludes terrosos, aplicável para materiais terrosos constituídos por depósitos piroclásticos pomíticos finos (cinzas vulcânicas e paleosolos) e grosseiros (pedra pomes, ignimbritos não soldados), depósitos piroclásticos basálticos (escórias vulcânicas) e depósitos de vertente. O campo v, independente dos anteriores, corresponde à estimação de faixas de segurança (risco e de proteção), quer do topo quer da base. As faixas foram obtidas por relações morfométricas entre a altura das arribas/taludes e recuos e propagações passadas, que ocorreram em contextos geológicos diversificados (depósitos piroclásticos pomíticos de queda e rocha de natureza basáltica em todo o corpo e/ou com intercalações de piroclastos basálticos ou pomíticos com bancadas rochosas).

As matrizes de estabilidade, válidas para materiais terrosos, granulares e incoerentes de natureza vulcânica que ocorrem no arquipélago dos Açores, foram obtidas através do cálculo do fator de segurança mínimo, que corresponde à superfície de rotura teórica crítica, tendo em conta a aplicação de diferentes cenários de inclinação de taludes e suas alturas, parâmetros de resistência ao corte e condições de água no terreno.

Com base em diferentes cenários morfológicos, parâmetros de resistência ao corte e condições de água no solo foram realizadas cerca de 2500 análises de estabilidade para a determinação da superfície de rotura crítica. A inclinação e altura dos taludes variou entre os 10 ° e 60 ° e entre os 5 e os 40 m, respetivamente, enquanto o ângulo de atrito interno oscilou entre os 20 ° e os 45 °. Como condições de água no subsolo considerou-se no estado natural (não saturado), e com o nível piezométrico (NP) situado a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ da altura do talude, assim como o estado de totalmente saturado. Para a execução das análises recorreu-se ao programa de cálculo Slide, da Rocscience e aplicou-se o método das fatias de Morgenstern-Price.

Para as análises de estabilidade, algumas premissas foram tidas em consideração, nomeadamente: (1) valores de coesão efetiva não foram considerados devido à natureza granular e incoerente da maioria dos depósitos vulcânicos de carácter mais superficial existentes no arquipélago dos Açores (ex: depósitos pomíticos de queda e de fluxo, piroclásticos basálticos, depósitos de vertente, etc.) (Amaral *et al.*, 2008; Amaral, 2010; Bolarinho, 2014; Amaral *et al.*, 2016; Moniz *et al.*, 2016);, fixando valores de coesão residuais (1 kPa), por forma a não induzir planos de rotura muito superficiais; (2) o peso volúmico húmido foi mantido constante, com um valor de 16 kN/m³, obtido pela média de valores de depósitos vulcânicos (Amaral, 2010); (3) as análises foram efetuadas em termos de tensões efetivas, por forma a avaliar-se o fator de segurança a longo termo e por se assumir que a rotura ocorre em condições drenadas.

FICHA DE AVALIAÇÃO EXPEDITA DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM SOLO
Responsável preenchimento: _____ **Data:** _____ - _____ - 20_____

Talude
Localização: _____

Coordenadas: N: _____ E: _____ Cota: _____ (m)

Altura (h): _____ (m) **Declive (α):** _____ (graus)

Geologia: _____

Tipologia da instabilidade:

- | | | | | | | | |
|---|-----------------|---|---------------|---|--------------------|---|---------------------|
|  | Deslizamento |  | Translacional |  | Rotacional |  | Com rotura composta |
|  | Fluxo Detritico |  | Desabamento |  | Movimento complexo |  | Indeterminado |

(Explicar o tipo de ocorrência, possíveis causas ou origem e desenhar esquço/perfil do talude no verso)

Geologia: Parâmetros de resistência corte
Existência de dados / ensaios laboratoriais?
 Sim (introduzir dados) **Coesão (C') =** _____ KPa **Ângulo de atrito interno (ϕ') =** _____ ° (graus)

 Não Estimar ϕ' pelo tipo de materiais ocorrentes / constituintes do talude

Análise granulométrica: _____ % cascalhos _____ % areias _____ % siltes + argilas

Estimar ϕ' pela formula. Para solos granulares $C' = 0$ KPa

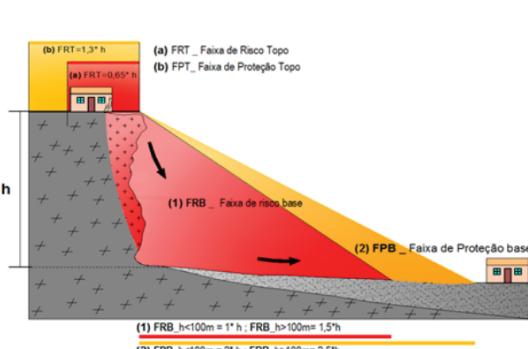
$$\phi' = 0,16 * (\% \text{ cascalho} + \% \text{ areia}) + 26,6$$
 Ângulo de atrito interno (ϕ') = _____ ° (graus)

Hidrologia - presença de água (NP - Nível Piezométrico)
 Húmido / NP=h **NP = 3/4*h** **NP = 1/2*h** **NP = 1/4*h** **Saturado**
Fator de Segurança (F.S.)
Consultar tabela em anexo de modo a obter um enquadramento para FS através de NP, h, a e ϕ' .

| | | | | | | | | | |
|----------|-----|----------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|---------------|-----------------|------------------------------|
| h | (m) | a | ° (graus) | ϕ' | ° (graus) | FS | < 1 | < 1,5 | $\geq 1,5$ |
|----------|-----|----------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|---------------|-----------------|------------------------------|

Se $FS \geq 1,5$ - Talude estável, não apresenta risco imediato de instabilidade.

Se $FS < 1,5$ - Talude **potencialmente instável!** Estimar faixas de segurança

Faixas de Segurança

TOPO:
FRT=0,65*h _____ (m)

FPT=1,3*h _____ (m)

BASE:
FAIXAS H<100 m
FRB_h<100 = 1*h _____ (m)

FPB_h<100 = 2*h _____ (m)

FAIXAS H>100 m
FRB_h>100 = 1,5*h _____ (m)

FPB_h>100 = 2,5*h _____ (m)

Fig. 1 - Ficha de campo de registo da estabilidade de taludes e respetivas faixas de segurança.
Fig. 1 - Field record of slope stability and respective safety range.

Análise de estabilidade

O fator de segurança para a análise de estabilidade de taludes é comumente definido como a razão entre a resistência ao corte e a tensão tangencial mobilizada na rotura. Deste ponto de vista, um talude é considerado instável se $FS \leq 1$, devido à redução da resistência ao corte ou pelo aumento da tensão tangencial (Abramson *et al.*, 2002). Se o fator de segurança estiver compreendido entre 1 e 1,5, o talude é considerado marginalmente estável, e se $FS \geq 1,5$, é considerado estável.

Para se efetuar a análise da estabilidade por métodos de equilíbrio limite é necessário conhecer a geometria do terreno, as características geológicas (estratigrafia) e os parâmetros físicos e mecânicos associados, bem como as condições de água existente no subsolo.

A abordagem global para se obter uma indicação sobre a estabilidade de um talude é feita através da verificação da possibilidade de ocorrer um plano de rotura no terreno, pela determinação do fator de segurança mínimo que corresponde à superfície de deslizamento crítica.

Quando se desconhecem os parâmetros acima referidos necessários para efetuar a análise de estabilidade, terá de se realizar levantamentos topográficos, sondagens geotécnicas ou recorrer a outro método de prospeção para aferir as condições geológicas e hidrológicas dos taludes (nalguns taludes ou arribas, os estratos geológicos e as condições hidrológicas encontram-se expostas nas suas faces), bem como ensaios laboratoriais ou de campo para determinação dos parâmetros geotécnicos.

Tal como foi referido anteriormente, foram realizadas mais de 2500 análises de estabilidade. Foi utilizado o método das fatias de Morgenstern-Price através da utilização do programa de cálculo Slide, da Rocscience.

As formulações matemáticas envolvidas no processo de cálculo da estabilidade saem fora do âmbito deste artigo, uma vez que as mesmas estão amplamente descritas na literatura técnico-científica da especialidade, podendo ser consultadas, por exemplo, em Abramson *et al.* (2002).

Os resultados obtidos para o FS mínimo permitiram desenvolver matrizes de estabilidade que são apresentadas na fig. 2. Com base nas matrizes, é possível determinar as condições iniciais da estabilidade de um talude de acordo com a geometria, condições de água e as características mecânicas.

Estimação de parâmetros de resistência ao corte

Os solos vulcânicos no arquipélago dos Açores têm um comportamento geotécnico peculiar. Amaral (2010) efetuou uma extensa caracterização física e mecânica de solos vulcânicos. Os materiais vulcânicos apresentam

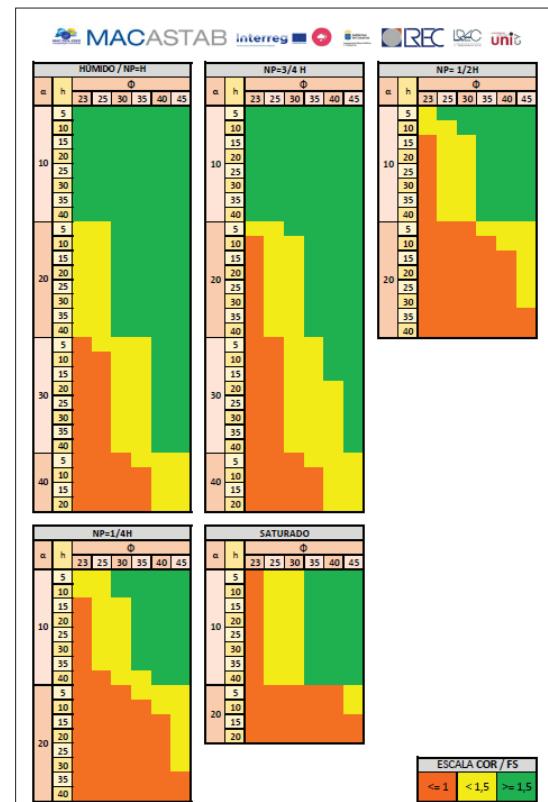


Fig. 2 - Matrizes de estabilidade para diferentes condições de água no terreno.

Fig. 2 - Stability matrices for different water conditions on the ground.

densidade das partículas secas e pesos volúmicos reduzidos e valores de porosidade e índice de vazios elevados. A densidade das partículas secas varia entre 2,26 e 2,90 e o peso volúmico seco entre os 5 e os 13 kN/m³. A porosidade varia entre os 50 e 80 % e o índice de vazios entre os 1,02 e os 3,87.

Os solos vulcânicos são geralmente não plásticos ou pouco plásticos e denotam, normalmente, baixos teores em argila (< 12 %). No entanto, pontualmente, podem exibir valores até 95 % (Moniz *et al.*, 2020). Amaral (2010) realizou vários ensaios de corte direto na condição de consolidado, drenado. Os resultados obtidos mostraram duas famílias distintas de envolventes de rotura, em função das características granulométricas dos materiais analisados. Para solos siltosos, o ângulo de atrito interno efetivo (ϕ') variou entre 30° e 35° (e.g., cinzas pomíticas) e para solos arenosos (e.g., pedra-pomes) entre 35° e 43°. No primeiro caso, o peso volúmico seco e o índice de vazios foram correlacionáveis individualmente com o ângulo de atrito interno. No segundo caso, o ângulo de atrito interno apenas foi correlacionável com o coeficiente de simetria e com o enviesamento gráfico. Este facto é explicado pelo aumento do diâmetro das partículas que potencia o efeito de imbricamento e,

deste modo, o incremento do ângulo de atrito (Amaral, 2010). A coesão efetiva (c') variou entre 0 kPa e 9 kPa.

No âmbito deste trabalho, e por forma a caracterizar melhor os depósitos de natureza vulcânica, foram considerados ensaios de compressão triaxial realizados sobre depósitos piroclásticos de matriz siltosa (cinzas pomíticas) e arenosa (pedra-pomes), ignimbritos não soldados e depósitos de vertente. Os valores dos ângulos de atrito variaram entre 33 ° e 42 ° e os de coesão efetiva variaram entre 0 kPa e 24 kPa.

A TABELA I apresenta a faixa de valores dos parâmetros de resistência ao corte para diferentes materiais encontrados no arquipélago dos Açores.

TABELA I - Intervalos de variação de parâmetros de resistência ao corte para diferentes litotípos.

TABLE I - Variation ranges of shear strength parameters for different lithotypes.

| Litologia | c' (kN/m ²) | ϕ' (°) |
|-------------|---------------------------|-------------|
| DPP-F | 0 - 6 | 30 - 37 |
| DPP-I/DPP-G | 0 - 2 | 36 - 43 |
| DV | 0 - 9 | 25 - 39 |
| INS | 16-24 | 35 - 37 |

Legenda:

DPP-F: Depósitos piroclásticos pomíticos finos; DPP-I: Depósitos piroclásticos pomíticos indiferenciados; DPP-G: Depósitos piroclásticos pomíticos grosseiros; DV: Depósitos de vertente; INS: Ignimbritos não soldados.

Os parâmetros que mais influenciam o ângulo de atrito interno são o índice de vazios, a compacidade, a forma e o estado da superfície das partículas, a granulometria (coeficientes e tamanho das partículas), as condições de drenagem e do conteúdo de água no solo (Holtz e Kovacs, 1981).

Considerando os parâmetros mecânicos obtidos por Amaral (2010) e os obtidos pelos ensaios de compressão triaxial, foram realizadas análises granulométricas de modo a obter elementos/índices granulométricos explicativos dos parâmetros de resistência ao corte. A fig. 3 mostra a correlação existente entre o ângulo de atrito interno e a soma da percentagem de areia e cascalho, na qual é expressa na equação 1, com um coeficiente de correlação de 77%.

$$\phi' (\text{°}) = 0,16 \cdot (\% \text{ Casc.} + \% \text{ Areia}) + 26,63 \quad [1]$$

onde ϕ' é o ângulo de atrito interno. A expressão 1 permite obter o ângulo de atrito interno a partir de uma simples análise granulométrica, que pode ser facilmente realizada em laboratório ou até mesmo no terreno.

As análises de estabilidade apresentadas na ficha de campo são apenas válidas para maciços terrosos constituídos por depósitos vulcânicos, nomeadamente: depósitos piroclásticos pomíticos finos (cinzas vulcânicas e paleosolos) e grosseiros (pedra pomes, ignimbritos não soldados), depósitos piroclásticos basálticos (escórias vulcânicas) e depósitos de vertente), caracterizados

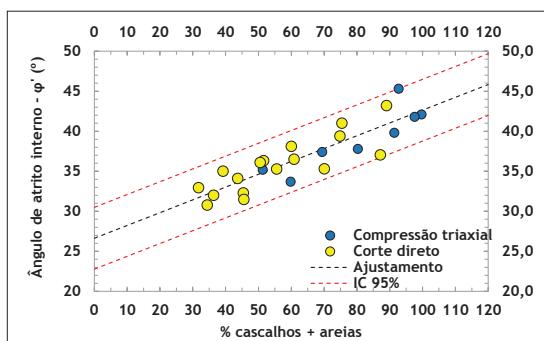


Fig. 3 - Relação existente entre o ângulo de atrito interno e a soma da percentagem de cascalho e areia.

Fig. 3 - Relationship between the internal friction angle and the sum of the percentage of gravel and sand.

por serem granulares e incoerentes, deixando de fora depósitos vulcânicos de textura argilosa como é o caso da existência em alguns locais da ilha de Santa Maria (ex: Praia Formosa, São Lourenço) e das Flores (ex: Fajãzinha, Lajedo).

Faixas de Risco e de proteção para o topo e para a base

Topo: Faixas de risco e de proteção

A evolução de arribas e/ou taludes é extremamente complexa, sendo dominada pela ocorrência de movimentos de vertente de diferentes tipologias, com distribuição espacial e temporal variável. É caracterizada pelo recuo pontual, de magnitude variável, seguido por um período de inatividade. Os movimentos de maior dimensão são menos frequentes, mas são os principais responsáveis para o recuo a longo prazo. Os movimentos de vertente de menor dimensão são os mais frequentes e causadores de elevada perigosidade.

Assim sendo, os recuos locais máximos constituem a variável mais importante para a delimitação de faixas com limitação de ocupação (Marques, 1997).

A Faixa de Risco do Topo (FRT) representa a zona potencial de rotura, ou seja, a potencial distância de recuo no topo do talude na eventualidade da ocorrência de um processo geomorfológico. A Faixa de Proteção do Topo (FPT) constitui um limite de segurança para poder absorver eventuais incertezas de recuo causado pelos processos de instabilidade de taludes.

O estabelecimento de zonamentos de perigosidade geomorfológica, por exemplo, na costa portuguesa baseia-se na análise sistemática de fotos aéreas multitemporais, por técnicas de estereoscopia e fotogrametria (Marques, 1997; 2009), de modo a ser possível determinar taxas de recuo e cenários quantitativos de evolução do comportamento em horizontes temporais de aproximadamente meio século (Marques, 2009).

Para suportar as faixas de risco e de proteção deste trabalho, foi efetuado um levantamento de várias ocorrências de instabilidades geomorfológicas ocorridas no arquipélago dos Açores (ilhas de São Miguel, Pico e Flores), através da interpretação em ortofotomaps e trabalho de campo. Os casos analisados apresentam alturas entre os 13 e os 450 m, cujos recuos máximos determinados variam entre os 2 e os 340 m. O caso mais gravoso situa-se na fajã do Conde, na ilha das Flores e está seguramente relacionado com processos de instabilidade resultantes de atividade vulcânica passada, cujas características morfológicas ainda se encontram relativamente bem preservadas.

As ocorrências de instabilidade aconteceram em geoformas constituídas por um contexto geológico diversificado, desde depósitos piroclásticos pomíticos de queda (cinzas e pedra pomes) e rocha de natureza basáltica em todo o corpo e com intercalações de piroclastos basálticos ou pomíticos com bancadas rochosas.

O recuo máximo sofrido no topo, as áreas de depleção e a distância horizontal percorrida pelos materiais após a rotura foram determinados e a informação obtida pelo cruzamento das características morfométricas dos taludes permitiu verificar a existência de relações entre, por exemplo, a altura e as distâncias de recuo e de propagação.

Da análise de toda a informação, concluiu-se que existe uma relação positiva entre a altura da geoforma (talude e/ou arriba) e o recuo observado.

Apresenta-se na fig. 4 a relação entre a altura (h) do talude ou arriba e o recuo máximo observado no topo. Desta relação foi determinada a linha de tendência definida pela expressão 2. Esta envolvente define a faixa de risco do topo (FRT).

$$FRT = 0,65 \cdot h \quad [2]$$

A fronteira máxima pela qual não há registos de situações de recuo em relação à altura permite obter a envolvente da faixa de proteção do topo (FPT), definida pela expressão 3:

$$FPT = 1,3 \cdot h \quad [3]$$

Analisando os dados numa outra perspetiva, através da projeção da informação em escala semilogarítmica (ver fig. 4, no canto superior direito), verifica-se um efeito de escala do recuo até cerca dos 100 m, ocorrendo uma mudança de comportamento a partir do ponto de inflexão. Este efeito de escala é igualmente verificado nas propagações, como adiante se apresenta. Neste sentido, detalhou-se a análise da faixa de recuo até alturas de 100 m e maiores do que 100 m.

Para alturas iguais ou inferiores a 100 m, a faixa de risco apresenta um comportamento de $0,5 \cdot h$ e a de

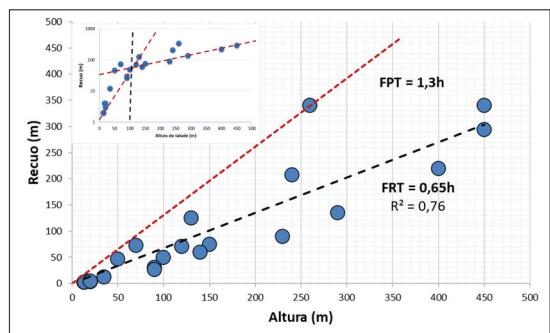


Fig. 4 - Relação entre a altura do talude e/ou arriba e a distância de recuo no topo para o conjunto dos dados. Na figura menor faz-se a representação da mesma informação em escala semilogarítmica.

Fig. 4 - Relationship between the height of the slope and/or cliff and the recession distance at the top for the all data set. The smaller figure represents the same information on a semi-logarithmic scale.

proteção de $1 \cdot h$ (fig. 5). Para alturas superiores a 100 m, a faixa de risco e de proteção assumem valores iguais ou muito próximos do conjunto dos dados, em função de serem a informação mais condicionante a suportar a faixa de proteção.

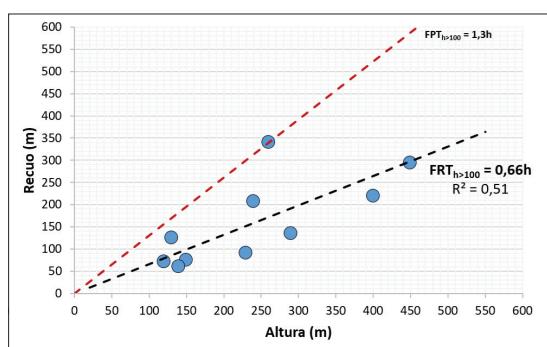
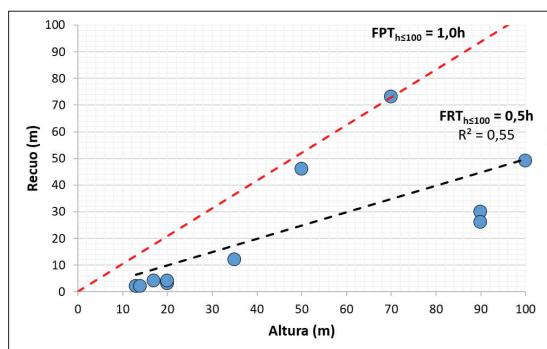


Fig. 5 - Relação entre a altura do talude e/ou arriba e a distância de recuo no topo para alturas iguais ou inferiores a 100 m (imagem superior) e superiores a 100 m (imagem inferior).

Fig. 5 - Relationship between the height of the slope and/or cliff and the retreat recession distance at the top for heights equal to or less than 100 m (top image) and greater than 100 m (bottom image).

Para o conjunto dos dados, foi possível verificar ainda a relação entre a altura da geoforma e o volume deslocado, assim como a área horizontal perdida e o volume deslocado (fig.6). A relação entre a área horizontal perdida e o volume apresenta um comportamento semelhante ao encontrado por Marques (2008) para o continente português.

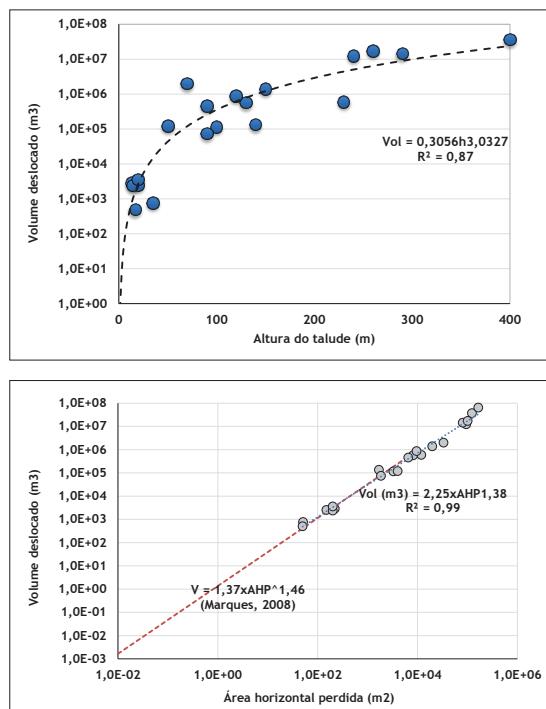


Fig. 6 - Relação entre a área horizontal perdida (AHP) e o volume deslocado e (b) relação entre a altura e o volume deslocado.

Fig. 6 - Relationship between the lost horizontal area (AHP) and the displaced volume (upper image); and (b) relationship between height and displaced volume (lower image).

Base: Faixas de risco e de proteção

A Faixa de Risco na Base (FRB) representa a zona potencial de propagação dos materiais após o seu desprendimento da zona de iniciação. Na mesma linha da Faixa de Proteção do Topo, referida anteriormente, a da base (FPB) constitui um limite de segurança para poder absorver eventuais incertezas de propagação.

O estudo das propagações foi uma tarefa mais complexa tendo em consideração que os depósitos de vertente muitas vezes desaparecem do local onde se depositaram, fruto de vários fatores (ação humana, dinâmica marinha e fluvial, etc.). Apesar desse aspeto, foi possível cartografar algumas situações de instabilidade com os seus depósitos bem preservados, tendo sido posteriormente validados por trabalho de campo. Para além disso, foram considerados alguns eventos de instabilidade recentes no arquipélago, entre 2018

e 2019, tendo sido possível determinar características dimensionais das propagações.

À imagem do tratamento de dados efetuado para as faixas de risco e de proteção do topo, a mesma metodologia foi efetuada para as faixas de risco e de proteção da base.

Tendo em consideração que os efeitos de propagação podem ser distintos em função da tipologia da instabilidade, e dos materiais solicitados optou-se por distinguir processos de instabilidade da tipologia deslizamento/desabamentos e escoada detritica. O contexto geológico em que ocorreram estes fenómenos é igualmente diversificado, sendo na maioria das situações, difícil atribuir o material predominante uma vez que fruto do enquadramento geológico em que ocorrem, normalmente mobilizam grandes quantidades de solos e rocha, quer ao nível dos deslizamentos/desabamentos, quer ao nível das escoadas detriticas.

Na fig. 7 projeta-se a informação das propagações em relação às alturas dos taludes. Apesar de ainda não existir uma grande representatividade da informação, pelos motivos mencionados anteriormente, nesta figura pode observar-se que até uma altura de 100 m a relação entre altura do talude e a distância horizontal percorrida é de, sensivelmente, 1:1, passando a ser de, aproximadamente, 1:1,5 após esta altura. Este aspeto revela um efeito de escala. A existência de um ressalto a partir dos 100 m de altura é coincidente com a transição da ocorrência de deslizamentos para escoadas detriticas.

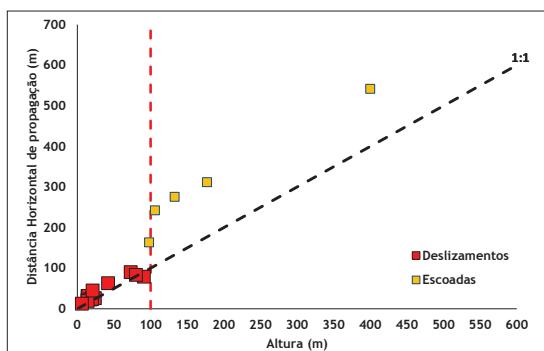


Fig. 7 - Relação entre a distância horizontal de propagação e a altura para deslizamentos e escoadas. A linha tracejada define uma relação de 1:1. A linha tracejada a vermelho representa a separação de deslizamentos para escoadas.

Fig. 7 - Relationship between the horizontal propagation distance and the height for landslides and flows. The dashed line defines a 1:1 ratio. The red dashed line represents the separation of landslides from flows.

As faixas de risco e proteção foram obtidas do mesmo modo que para o topo (fig. 8). As expressões (4) e (5) definem, respetivamente, as faixas de risco e de proteção da base num talude com altura menor ou igual a 100 m (fig. 8a). A fig. 8b representa a faixa de

risco e de proteção da base para geoformas com alturas superiores a 100 m.

$$FRB_{H \leq 100} = 1 \cdot h \quad [4]$$

$$FPB_{H \leq 100} = 2 \cdot h \quad [5]$$

As expressões (6) e (7) definem as faixas de risco e proteção da base num talude com altura acima de 100 m.

$$FRB_{H > 100} = 1,5 \cdot h \quad [6]$$

$$FPB_{H > 100} = 2,5 \cdot h \quad [7]$$

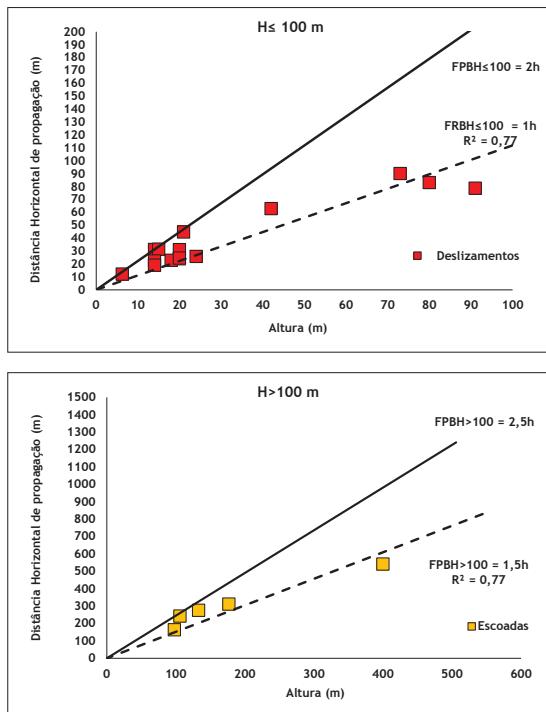


Fig. 8 - Faixas de risco e de proteção da base para geoformas com alturas menores ou iguais a 100 m (imagem superior) e alturas maiores do que 100 m (imagem inferior).

Fig. 8 - Risk and base protection ranges for geoforms with heights less than or equal to 100 m (upper image) and heights greater than 100 m (bottom image).

Conclusão

A instabilidade de taludes e/ou arribas é um problema que afeta diversos locais do arquipélago dos Açores, resultando em avultadas perdas económicas (estabilização de maciços, realojamento, etc.), comprometendo a segurança de pessoas e bens. Nos últimos 100 anos foi a principal causa de morte decorrente de processos geológicos.

Para minimizar o risco de deslizamentos, é essencial analisar a estabilidade das geoformas em condições de longo prazo, a fim de prevenir futuros acidentes e mitigar os efeitos negativos associados a este tipo de fenómenos.

O objetivo deste trabalho foi obter uma ferramenta de apoio à avaliação da estabilidade de taludes,

servindo como uma análise preliminar das condições de estabilidade, essencial em tempos de crise geomorfológica ocorrentes no arquipélago dos Açores. A avaliação expedita do estado de segurança permitirá, numa fase precoce, determinar o fator de segurança e, deste modo, a definição de medidas de segurança a adotar para evitar a perda de bens materiais e humanos.

Com os resultados obtidos, é possível determinar as condições de estabilidade de um determinado talude de solos de uma forma simples e rápida, com o conhecimento da geometria do talude (altura e inclinação), das condições de água e dos parâmetros de resistência ao corte estimados empiricamente. Não obstante a determinação expedita do Fator de Segurança, válida para taludes constituídos por materiais granulares e incoerentes de natureza vulcânica, como são os depósitos piroclásticos pomíticos e basálticos, os ignimbritos não soldados, os depósitos de vertente e os aterros, para uma avaliação mais fina e robusta, será sempre necessário recorrer a uma análise geológica e geotécnica mais detalhada, com recurso a ensaios laboratoriais e de campo, para o apoio à análise de estabilidade a realizar com modelos numéricos de análise de tensão/deformação ou de equilíbrio limite dos maciços em estudo. No entanto, este tipo de análise numérica requer um maior dispêndio de tempo para a realização de ensaios e para a execução das tarefas de modelação, elemento que não se coaduna com a necessidade de as entidades darem respostas rápidas sobre o estado da estabilidade de um dado local aquando de uma crise geomorfológica.

As faixas de risco e de proteção determinadas através do conhecimento das características morfológicas de taludes podem servir de base para a definição de faixas de segurança, que são de extrema importância na gestão e no ordenamento do território, em particular numa região como a dos Açores.

Como trabalhos a desenvolver neste domínio, pretende-se analisar um número mais significativo de casos, de modo a aumentar a robustez na estimativa de faixas de risco e de proteção. Complementarmente, pretende-se determinar funções que tenham em consideração as condições geológicas dos maciços, pois diferentes materiais têm comportamentos mecânicos distintos e de evolução temporal e espacial.

Dada a sua importância no contexto do ordenamento do território, estas faixas são relativamente simples de aplicar em sistemas de informação geográfica e são de extrema importância na aplicação em Instrumentos de Gestão Territorial, em particular nos Planos de Ordenamento da Orla Costeira (POOCs) e nos Planos Diretores Municipais (PDM), em particular nas áreas da Reserva Ecológica referente à tipologia de Arribas e Faixas de Proteção.

Referências bibliográficas

- Abramson, L. W. Lee, T.S. Sharma, S. e Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods* (2nd ed.), John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 712 p.
- Amaral, P., Marques, R., Zêzere, J. L., Marques, F., Queiroz, G., Ramos, T. e Gonçalves, M. C. (2008). Caracterização hidrológica e geotécnica de solos vulcânicos pomíticos com vista à integração em modelos determinísticos para avaliação da instabilidade de vertentes no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). *Resumos do congresso de Geomorfologia 2008, IV Congresso Nacional de Geomorfologia*. Eixo temático H - Riscos naturais, processos erosivos e dinâmica de vertentes, 44 p.
- Amaral, P. Marques, R. Zêzere, J. L. Queiroz, G. e Marques, F. (2009). Distributed transient modelling of rainfall triggered shallow landslides for susceptibility assessment in Ribeira Quente valley (S. Miguel, Azores), In: *Landslide Processes, from geomorphological mapping to dynamic modelling*, Strasburg, France 6-7 February 2009. Strasburg, CERG, France: 29-94.
- Amaral, P. (2010). Caracterização geotécnica e hidrológica de depósitos vulcânicos: Modelação da estabilidade de taludes no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel - Açores). Dissertação de Doutoramento em Geologia especialidade de Vulcanologia. Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, 277 p.
- Amaral, P., Malheiro, A., Marques, F., e Moniz, L. (2016). Determinação de parâmetros de resistência ao corte de depósitos piroclásticos pomíticos por análise inversa a roturas de taludes. Comparação de análise entre técnicas de equilíbrio limite e elementos finitos. *15º Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto.
- Begueria, S. van Asch, Th.W.J. Malet, J.-P e Grondahl, S. (2009). A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, p 1897-1909.
- Bolarinho, R. (2015). Análise de estabilidade do talude do Salto do fojo com recurso a Métodos determinísticos. Tese de Mestrado. Departamento de Geociências. Universidade dos Açores, 148.
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15(3):403-427.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal* 33 (2), 260-271.
- Dai, F.C. Lee, C.F. e Ngai, Y.Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology* 64 (1), 65-87.
- González de Vallejo, L. Miranda, A. Campos, S.L. Gutiérrez, L.H. Péres, J.J. Vieira de Sousa, J.F. Perneta, J. Amaral, P. Malheiro, A. Teixeira, L. Delgado, A. Victória, S. (2019). Bases para a elaboração de um Guia Metodológico para a gestão do risco natural produzido pela instabilidade de encostas e taludes de natureza vulcânica na Macaronésia. MACASTAB Homepage, <http://macastab.com/?lang=en>, last accessed 08/05/2024.
- Goth, J. W., Baum, R. L., Savage, W. Z., Salciarini, D., Schulz, W. H. e Harp, E. L. (2008). Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Eng. Geology*, 214 - 226.
- Guzzetti, F. (2005). Landslide hazard and risk assessment. Bona: Dissertação de Doutoramento apresentada na Universidade de Bona, 373 p.
- Holtz, R. D. e Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 733 p.
- Hsu, K. J. (1975). Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86: 129-140.
- Hurlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V. e Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assement. *Eng. Geology* 102., p 152-163.
- Marques, F. M. S. F. (1997). As Arribas do Litoral do Algarve - Dinâmica, Processos e Mecanismos. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 556 p.
- Marques, F. (2009). Sea cliff instability hazard prevention and planning: examples of practice in Portugal. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 56., p 856-860.
- Marques, R. (2013). Estudo de movimentos de vertente no concelho da Povoação (ilha de São Miguel, Açores): Inventariação, caracterização e análise da suscetibilidade. Tese de doutoramento em geologia, especialidade de Riscos Geológicos. Universidade dos Açores, 456 p.
- Marques, R., Amaral, P., Araújo, I., Gaspar, J. L. e Zêzere, J. L. (2015). Susceptibility analysis and validation of rupture zones using a bivariate GIS-based statistical approach, in *Landslides on São Miguel Island (Azores)*. *Geological Society, London, Memoirs*, 44., 167-184.
- Moniz, L., Marques, F., Amaral, P. e Malheiro, A. (2016) - Contribuição para a caracterização de parâmetros de resistência ao corte de produtos vulcânicos por ensaios de compressão triaxial. *15º Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto.

- Moniz, L., Marques, F., Amaral, P. e Malheiro, A. (2020). Efeito da Secagem na determinação dos limites de Atterberg en solos vulcânicos. 17 CNG. 12 p.
- Scheidegger, A. E. (1973). On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, 5: 231-236.
- Valadão, P., Gaspar, J. L., Queiroz, G. e Ferreira, T. (2002). *Landslides density map of S. Miguel Island (Azores archipelago)*. *Natural Hazards*, 2: 51-56.
- Yin, K. L. e Yan, T. Z. (1988). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: C. Bonnard (Ed.) *Proc. Fifth International Symposium in Landslides*, Lausanne, A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda, Vol.2., 1269-1272.
- Zêzere, J. L. (1997). *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa. (Dissertação de Doutoramento em Geografia Física)*. Apresentada à Universidade de Lisboa, Lisboa, 575 p.