

# Aplicação de um modelo hidrológico e geotécnico à instabilidade de vertentes desencadeada por precipitação intensa no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores)

P. Amaral<sup>1,4</sup>, R. Marques<sup>1</sup>, J.L. Zêzere<sup>2</sup>, G. Queiroz<sup>1</sup>, F. Marques<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores

<sup>2</sup>Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa

<sup>3</sup>Centro e Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

<sup>4</sup>Email: Paulo.AP.Amaral@azores.gov.pt / Fax: +351296650142

**Resumo:** Na última década, a ocorrência de episódios de precipitação intensa desencadeou inúmeros deslizamentos superficiais, escoadas detriticas e movimentos complexos no concelho da Povoação, tendo originado avultados danos materiais em bens e habitações, cortes nas vias de comunicação e 3 vítimas mortais (registadas num evento ocorrido a 6 de Março de 2005). Com o intuito de estudar os factores que desencadearam fenómenos de instabilidade nas vertentes em datas conhecidas, aplicou-se um modelo hidrológico transiente acoplado à análise de estabilidade de vertentes, para avaliar as condições vigentes aquando da ruptura. O modelo hidrológico transiente permite gerar cargas hidráulicas e, associado a um modelo geotécnico (e.g. modelo de talude infinito), possibilita avaliar a variação do factor de segurança dos taludes de uma forma dinâmica, em função do tempo (no caso vertente com resolução de 30 e 60 min.) e da profundidade, antes, durante e após a ocorrência de um período de precipitação particular. A abordagem determinista utilizada permitiu: (i) deduzir uma explicação física dos processos de instabilidade, relacionada com a precipitação na área de estudo; (ii) reconstituir os mecanismos condicionantes e desencadeantes do processo de instabilidade; e (iii) simular a provável hora dos movimentos, que correspondeu sensivelmente ao momento exacto das rupturas ocorridas no terreno. O modelo apresentado, pelo seu dinamismo e exactidão, revelou ser uma excelente ferramenta de previsão de movimentos de vertente desencadeados por precipitação, podendo ser utilizado como base para a implementação de sistemas de alarme em locais específicos. Neste contexto, poderá futuramente ser integrado numa plataforma comum com a Protecção Civil, articulado com modelos empíricos que se encontram em desenvolvimento.

**Abstract:** In the last decade, rainfall events triggered shallow translation slides, debris flows and complex slope movements in the Povoação County, causing damage in buildings, roads and 3 human fatalities (on the 6th March 2005 event). In this study we aim to analyse those factors that promoted slope instability in some known dates. The slope failure conditions were assessed by coupling a transient hydrological model with a geotechnical slope stability model. The transient hydrological model allows to calculate the pressure head variation with time, and when it is coupled with a stability model (e.g. the infinite slope model), it allows to compute the dynamic variation of the safety factor in time (in this work with a 30 and 60 min. resolution) and depth; before, during and after the occurrence of a particular rainfall event. The application of this deterministic approach allows us: (i) to build a physical explanation for the instability process related to rainfall in the study area; (ii) to reconstruct the instability predisposing and triggering mechanisms; and (iii) to simulate the probable hour of slope rupture occurrence, which is very similar to the precise moment evidenced in the field. The presented model, due to its dynamism and accuracy, have shown to be an excellent tool for rainfall-triggered landslides forecast that can be integrated in landslide warning system for specific sites. In this context, it can be integrated on a common platform linked to the Civil Protection, and articulated with empirical models that are currently on development.

**Palavras-chave:** Modelos Hidrológicos e Geotécnicos, Estabilidade de Vertentes, Previsão, Concelho da Povoação.

**Keywords:** Hydrological and Geotechnical models, Slope Stability, Forecast, Povoação County.

## 1. Introdução

O concelho da Povoação, localizado na ilha de S. Miguel (Arquipélago dos Açores), possui um contexto geomorfológico propício para a ocorrência de movimentos de vertente, desencadeados por episódios de precipitação intensa e/ou prolongada, sendo responsáveis por avultados danos materiais e humanos, tal como se verificou a 31 de Outubro de 1997.

Neste concelho, os processos de instabilidade geomorfológica tendem a ocorrer em vertentes que apresentam declives acentuados e são constituídas, regra geral, por materiais piroclásticos pomíticos de queda e de fluxo, com dimensões variadas, que se encontram muitas vezes em equilíbrio metaestático na vertente. Para esta região, a predição temporal de movimentos de vertente é de extrema importância na mitigação do risco geomorfológico, nomeadamente através do desenvolvimento de sistemas de alarme integrados com plataformas comuns à Protecção Civil.

Van Ash & Buma (1996) referem que a avaliação da fre-

quência temporal dos movimentos de vertente pode ser efectuada com duas abordagens distintas: (i) utilização de modelos empíricos, nos quais os processos de instabilidade são tidos em consideração através do estudo estatístico dos pares de intensidade/duração críticos responsáveis pelo desencadeamento de instabilidade numa determinada área; e (ii) utilização de modelos determinísticos para perceber e prever os padrões de frequência dos processos de instabilidade, com base na assunção de que a frequência temporal de movimentos relacionados com a precipitação se deve à geração de nível críticos de pressões neutras.

A abordagem utilizada no presente trabalho vai de encontro à segunda aproximação atrás referida e teve o principal objectivo a aplicação de um modelo hidrológico e geotécnico, incorporando o efeito da precipitação de um modo dinâmico, de forma a: (i) construir uma explicação física para os processos de instabilidade, relacionada com a precipitação ocorrida na área em estudo; (ii) reconstituir os mecanismos desencadeantes da instabilidade em datas críticas conhecidas; e (iii) simular a hora provável da ocorrência das rupturas de eventos passados.

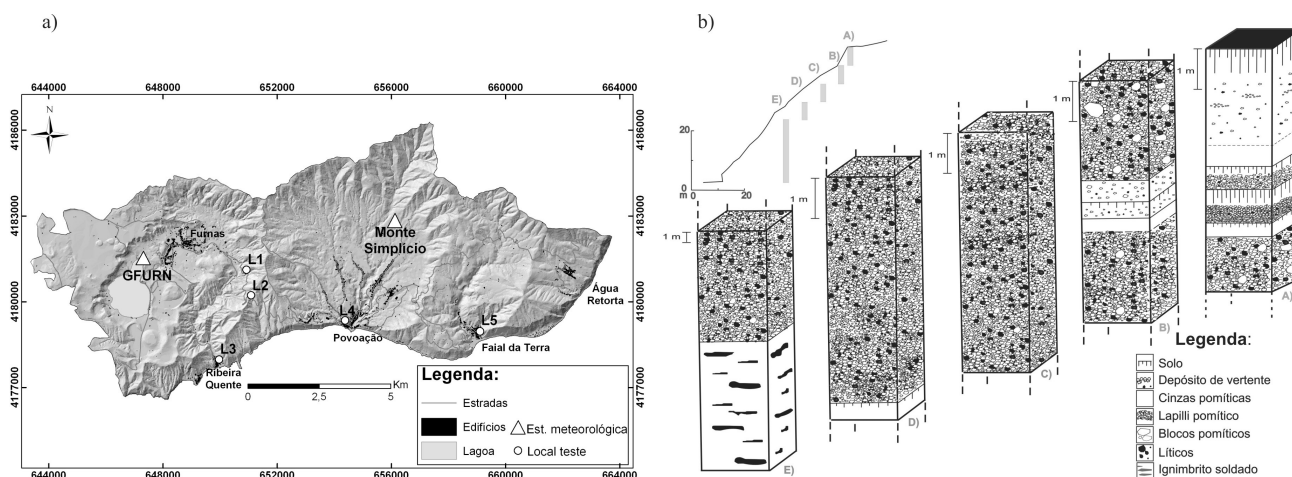


Figura 1 – a) Localização dos taludes estudados e das estações meteorológicas utilizadas no concelho da Povoação (S. Miguel – Açores); b) exemplo de um perfil longitudinal de um talude típico (L 4) onde se observa a presença de vários níveis litoestratigráficos.

## 2. Enquadramento geológico e geomorfológico

A área de trabalho do presente estudo insere-se no concelho da Povoação, ilha de S. Miguel (Açores). Em termos genéricos, este apresenta uma área de cerca de 116 Km<sup>2</sup> e uma hipsometria variada, desde da cota do nível do mar até aos 1104 m. Os cursos de água estão geralmente bastante encaixados e as vertentes apresentam declives acentuados, chegando a atingir 86°.

De modo a avaliar as condições de estabilidade de vertentes, foram seleccionados 5 taludes que no passado foram palco de instabilidade geomorfológica, onde se procedeu a uma caracterização geotécnica e hidrológica para servir de base às simulações da ocorrência de movimentos de vertente. A Figura 1 ilustra a localização dos 5 locais teste (Fig. 1a) e um exemplo de um perfil longitudinal de um talude (local teste 4) típico no concelho da Povoação (Fig. 1b), onde é possível verificar a alternância de depósitos piroclásticos de natureza pomítica de fluxo e/ou de queda, por vezes intercalados por paleosolos e depósitos de vertente.

O desenvolvimento de horizontes do solo com propriedades contrastadas, quer em termos verticais quer em termos horizontais, em vertentes declivosas, juntamente com as características geomorfológicas locais de ambientes vulcânicos, são factores importantes de pré-disposição para a ocorrência de movimentos de vertente (Crosta & Fratini, 2003). As condições locais favoráveis, aliadas a eventos meteorológicos adversos, favorecem a instabilidade geomorfológica, fazendo deste concelho um dos locais do arquipélago dos Açores mais susceptíveis à ocorrência de movimentos de vertente.

## 3. Modelação hidrológica e geotécnica

Com o objectivo de avaliar a componente temporal de fenómenos de instabilidade geomorfológica que ocorreram no passado recente em algumas vertentes do concelho da Povoação, utilizou-se um modelo hidrológico articulado com um modelo geotécnico, nos pressupostos do modelo difusivo transiente desenvolvido por Iverson (2000).

O modelo permite avaliar o efeito da precipitação num processo de infiltração transiente capaz de gerar cargas

hidráulicas, responsáveis pelo desencadeamento de movimentos de vertente, em função do tempo e da profundidade da ruptura. O fluxo vertical da água na zona não saturada é determinado analiticamente através da equação mono dimensional de Richards, que pode ser representada pela equação 1:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \psi} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \beta \right) \right]$$

Equação 1

onde  $z$  é a direcção normal ao declive,  $\psi$  é a pressão de água,  $\theta$  é o teor de água volumétrico,  $K_z$  é a condutividade hidráulica na direcção normal. Após a resolução da equação 1 em ordem a  $\psi$ , Iverson (2000) estabeleceu as condições iniciais e de fronteira apropriadas através de uma função de resposta,  $R$ , em função do tempo,  $t$ , do declive,  $\beta$ , da profundidade,  $Z$ , e da difusividade,  $D_0$ . Assim sendo, a relação final entre a pressão de água, em função da profundidade, e o pulso da precipitação pode descrever-se pelas equações 2 e 3:

$$\frac{\psi}{Z} (Z, t \leq T) = \zeta \left( 1 - \frac{d_z}{Z} \right) + \frac{i_z}{K_{sat}} [R(t^*)]$$

Equação 2

$$\frac{\psi}{Z} (Z, t > T) = \zeta \left( 1 - \frac{d_z}{Z} \right) + \frac{i_z}{K_{sat}} [R(t^*) - R(t^* - T^*)]$$

Equação 3

com:

$$R(t^*) = \sqrt{\frac{t^*}{\pi}} \exp\left(-\frac{1}{t^*}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{t^*}}\right)$$

Equação 4

$$t^* = \frac{t}{Z^2} (4D_0 \cos^2 \beta)$$

Equação 5

$$T^* = \frac{T}{Z^2} (4D_0 \cos^2 \beta)$$

Equação 6

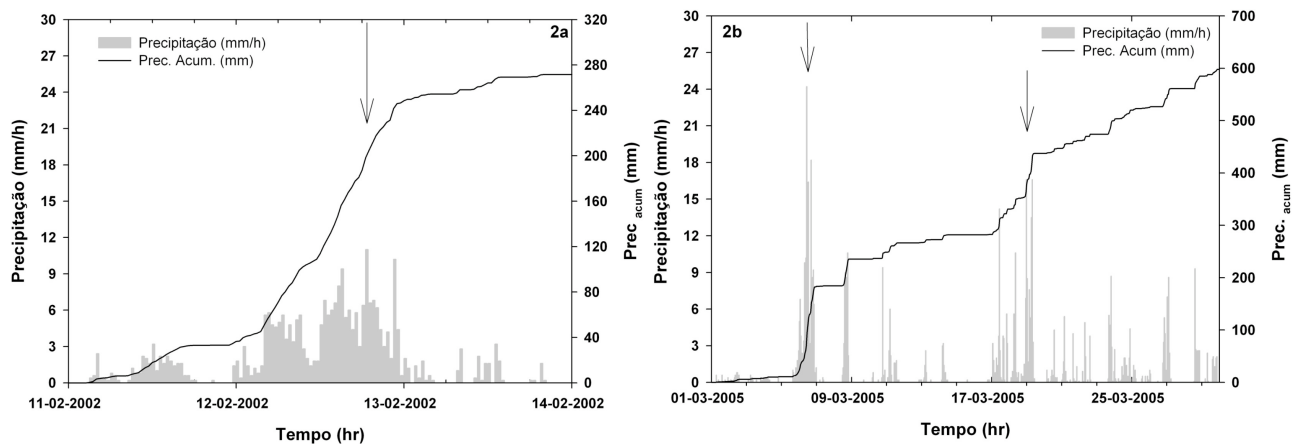


Figura 2 –Precipitação horária e acumulada referente ao episódio de 12 de Fevereiro de 2002 (2a) e aos episódios de 6 e 18/19 Março de 2005 (2b). As setas indicam os eventos de instabilidade geomorfológica.

onde  $t$  é o tempo decorrido,  $T$  é a duração da precipitação,  $\zeta$  é uma constante que expressa o estado inicial da distribuição da pressão da água no solo, sendo  $\zeta = \cos^2(\beta) - (i_z / K_{sat})_{constante}$  e  $dz$  é a profundidade do lençol freático (na direcção vertical,  $Z$ ).  $R(t^*)$  é a função de resposta,  $i_z / k_{sat}$  é a razão entre a precipitação normalizada e a condutividade hidráulica saturada,  $erfc$  é o erro da função complementar,  $t^*$  e  $T^*$  são tempos e durações de precipitação normalizados, respectivamente. O primeiro membro das eq. 2 e 3 diz respeito à carga hidráulica gerada ao nível do lençol freático,  $\zeta(1-d_z/Z)$ , que é estático e ocorre antes do início da precipitação, enquanto que o segundo membro diz respeito ao processo de infiltração transiente e processa-se por dois factores fundamentais e complementares entre si,  $(R(t^*))$  e  $i_z / K_{sat}$ . No caso vigente, é assumido que o mecanismo de ruptura é devido à subida do lençol freático no processo de infiltração. No entanto, evidências na área de estudo (e.g. lençóis freáticos a maiores profundidades, ausência de barreiras hidráulicas de materiais), permitem considerar que o mecanismo desencadeante se deve ao processo de infiltração, o qual gera uma frente de saturação, sendo esta responsável pela redução dos parâmetros de resistência ao corte. Neste caso, o primeiro membro das eq. 2 e 3,  $[\zeta(1-d_z/Z)]$ , toma valores de 0 e o segundo membro é resolvido. Devido à natureza aditiva da solução, a carga hidráulica gerada em função da profundidade e ao longo do tempo é expressa como sendo a soma das contribuições dos vários pulsos da precipitação.

De forma a incorporar as assunções mencionadas anteriormente com a análise de estabilidade, utilizou-se o modelo de talude infinito para calcular a estabilidade das vertentes de forma dinâmica. A estabilidade é determinada pelo factor de segurança que pode ser descrito pela seguinte expressão (Iverson, 2000):

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + \frac{-\psi(Z,t)\gamma_w \tan \phi + c}{\gamma_s Z \sin \beta \cos \beta}$$

Equação 7

onde  $FS$  é o factor de segurança (razão entre as forças resistentes e as forças cisalhantes),  $\beta$  é o declive,  $\phi$  é o ângulo de atrito interno,  $c'$  é a coesão efectiva,  $\gamma_s$  é o peso específico do material,  $\gamma_w$  é o peso específico da água e  $\psi$  é a carga

hidráulica calculada pelas eq. 2 e 3. Durante um período de precipitação, o  $FS$  varia em função da profundidade e do tempo, reflectindo a resposta da carga hidráulica. Seguindo o critério de Mohr-Coulomb, uma ruptura a uma certa profundidade  $Z$  ocorre quando as forças mobilizadoras igualam as forças resistentes. Por outras palavras, as rupturas ocorrem quando  $FS = 1$ .

#### 4. Episódios de instabilidade

No dia 12 de Fevereiro de 2002, o concelho da Povoação foi afectado por movimentos de vertente que destruíram casas, estradas e terrenos de cultivo. No caso dos taludes em estudo, observaram-se movimentos nos locais teste 4 e 5. Três anos volvidos, nos dias 6 e 18/19 Março de 2005, a ocorrência de novos episódios de precipitação intensa desencadeou novamente numerosos deslizamentos superficiais e escoadas detriticas no concelho, tendo originado avultadas perdas económicas e 3 vítimas mortais (no dia 6 de Março). No dia 6 de Março ocorreram movimentos de vertente nos locais teste 1 e 2, enquanto no evento de 18/19 de Março ocorreram movimentos de vertente nos locais teste 3 e 4. Na Figura 2 apresentam-se os quantitativos de precipitação, incluindo os valores acumulados, para os evento de 12 de Fevereiro de 2002 (2a) e de 6 e 18/19 de Março de 2005 (2b).

Nos três casos estudados, as manifestações de instabilidade iniciaram-se como deslizamentos translacionais superficiais, sendo que alguns evoluíram para escoadas detriticas. Tipicamente, as rupturas têm uma geometria planar, com inclinação paralela à superfície topográfica, tendo ocorrido em zonas pouco profundas do solo (muitas vezes inferiores a 1.2 metros), o que traduz o estado de tensão efectiva muito reduzido a que estes materiais foram sujeitos.

#### 5. Aplicação e resultados

A calibração do modelo foi efectuada através dos resultados obtidos pelos ensaios de campo e de laboratório, realizados para a obtenção de parâmetros geotécnicos e hidrológicos dos materiais dos taludes estudo. A Tabela 1 ilustra os parâmetros médios utilizados nas simulações do modelo

Propriedades, símbolos e unidades	Valor
Declive, $\beta$ ( $^\circ$ )	35
Prof. superfície de ruptura, Z (m)	0.5 – 1.2
Ângulo de Atrito, ( $\phi$ ) ( $^\circ$ )	35
Coesão efectiva, $c'$ (kPa)	3
Peso específico da água ( $\gamma_w$ ), ( $\text{kNm}^{-3}$ )	9.8
Peso Específico do solo ( $\gamma_s$ ), ( $\text{kNm}^{-3}$ )	16
Condutividade hidráulica saturada, $K_{sat}$ ( $\text{ms}^{-1}$ )	$1 \times 10^{-5}$
Difusividade hidráulica, $D_0$ ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )	$1 \times 10^{-4}$
Precipitação normalizada ( $i$ ), (m/s)	Variável
Duração da Precipitação (T), (s)	1800/3600
Duração da Precipitação normalizada ( $T^*$ )	0.34/0.67
Carga hidráulica ( $\Psi$ ) (m)	Variável

Tabela 1 – Propriedades e valores utilizados no modelo apresentado.

aplicado.

Nos resultados das simulações são tidas em consideração as variações do FS relativamente aos pulsos de precipitação, tendo em consideração declives de  $35^\circ$  e hipotéticas profundidades de rupturas de 0.5 a 1.2 m.

Analisando o resultado da simulação efectuada para o evento de 12 de Fevereiro de 2002 (Fig. 3) verifica-se uma contínua diminuição do FS, para as duas profundidades consideradas.

O FS atinge o valor de 1, para profundidades de 0.5 m, sensivelmente à mesma hora a que se registou a ocorrência dos movimentos de vertente, prolongando-se a instabilidade até ao dia 13 de Fevereiro. Relativamente à profundidade de 1.2 m, o valor de 1 para FS é alcançado de forma menos expressiva do que para a profundidade de 0.5 m e com um relativo atraso.

Este comportamento distinto demonstra, claramente, o efeito da resposta da carga hidráulica na variação do FS das camadas superficiais, diminuindo de importância nas zonas mais profundas do maciço terroso. Salienta-se ainda o facto de que quando a precipitação tem um declínio na

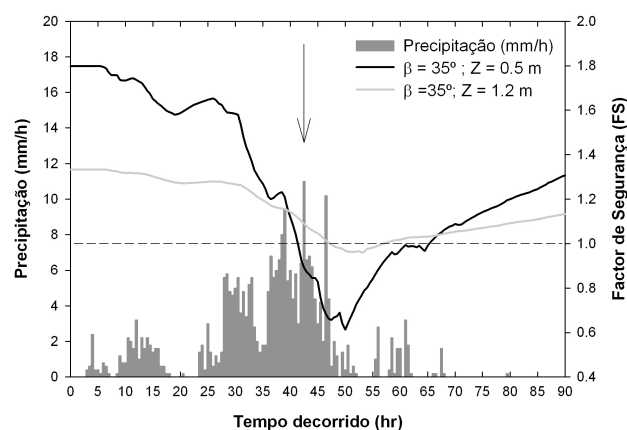


Figura 3 – Variação da precipitação horária e do Factor de Segurança no episódio de instabilidade de 12 de Fevereiro de 2002 (Início e Fim das Simulações: 11-02-2002 0:00 a 14-02-2002 23:00).

intensidade, o FS inicia um processo de recuperação, tendendo para uma situação de estabilidade inicial (Fig. 3).

Para os eventos de 6 e 18/19 de Março registou-se um comportamento similar ao caso de estudo anterior. Verifica-se uma redução gradativa do FS em resposta ao aumento da precipitação (Fig. 4), alcançado valor de 1 muito próximo das ocorrências de instabilidade verificadas.

É de salientar que para as profundidades de 1.2 m o valor de FS = 1 não é atingido, o que realmente é corroborado pelas evidências morfológicas das rupturas identificadas nestas datas que não excederam 1 metro de profundidade (Marques *et al.*, 2005), ao contrário do verificado no evento de Fevereiro de 2002 (Valadão, 2002).

## 6. Considerações finais

O modelo difusivo transiente apresentado permite a determinação de valores de carga hidráulica antes, durante e após a ocorrência de episódios de precipitação. Estes resultados, articulados com um modelo geotécnico, permitem avaliar o FS de uma forma dinâmica em resposta à evolução da precipitação, em função do tempo e da profundidade do

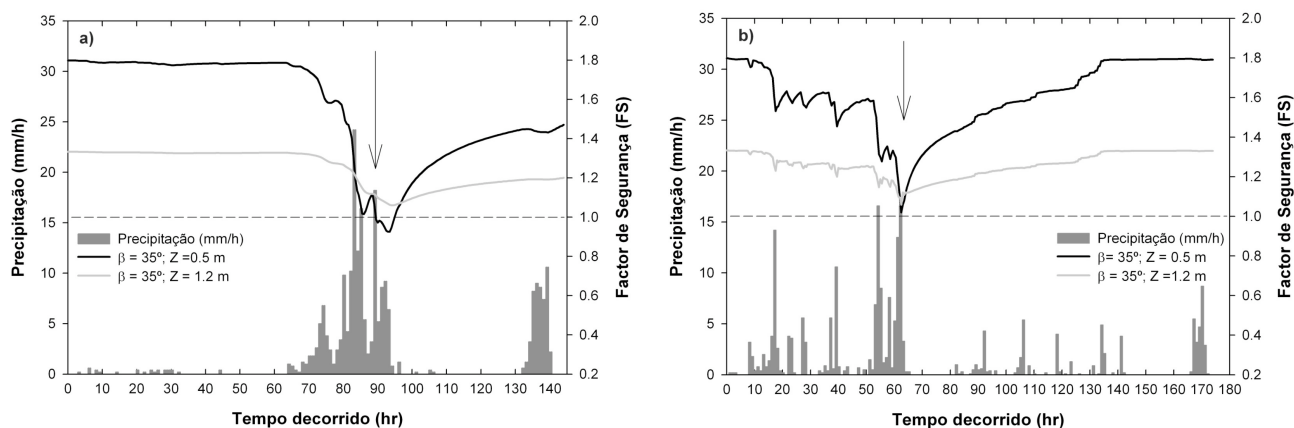


Figura 4 – Variação do Factor de Segurança e da precipitação horária versus o tempo decorrido para o episódio de instabilidade de 6 de Março de 2005 (4a) (Início e Fim das Simulações: 03-03-2005 0:00 a 08-03-2005 0:00) e 18/19 Março de 2005 (4b) (Início e Fim das Simulações: 16-03-2005 18:00 a 24-03-2005 0:00).

plano de ruptura.

Apesar das simplificações e suposições, os resultados obtidos suportam a hipótese de que os fluxos verticais que ocorrem durante os períodos de precipitação anómalos são em grande parte responsáveis pelo desencadeamento de processos de instabilidade de vertentes, devido à perda de resistência dos materiais durante a propagação da frente de saturação.

Com este trabalho demonstrou-se que foi possível “prever”, em retro-análise, a ocorrência de 3 casos de instabilidade ocorridos na última década no Concelho da Povoação. Marques *et al.* (2008) desenvolveram um modelo empírico para a mesma área, através da definição de limiares críticos de precipitação, utilizando pares críticos Intensidade/Duração. Verificou-se que os episódios de instabilidade discutidos no presente trabalho, também foram preditos pelo modelo empírico referido, o que demonstra que a predição deste tipo de fenómenos, nesta região, pode ser feita com sucesso, quer de forma empírica quer de forma determinista, consoante os recursos disponíveis para o efeito.

O modelo apresentado revelou ser uma excelente ferramenta de previsão de movimentos de vertente desencadeados pela precipitação, podendo ser utilizado como base

para a implementação de sistemas de alarme em locais específicos. Neste contexto, poderá futuramente ser integrado numa plataforma comum com a Protecção Civil, e articulado com modelos empíricos que se encontram em desenvolvimento.

#### Referências bibliográficas

- Crosta, G.B., Frattini, P., 2003. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Environmental Systems Science* 3, pp. 81–93.
- Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research* 36, 1897–1910.
- Marques, R., Amaral, P., 2005. Considerações sobre os movimentos de vertente ocorridos a 6 de Março de 2005 no concelho da Povoação (Ilha de São Miguel). Documento Técnico-Científico 10/CVARG/05.
- Marques, R., Zêzere, J.L., Trigo, R., Gaspar, J.L., Trigo, I., 2008. Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation. *Hydrol. Process.* 22, pp. 478-494..
- Valadão, P., 2002 – Contribuição para o estudo de movimentos de vertente nos Açores. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 119 p.
- Van Asch, Th.W.J., Buma, J.T., 1996 - Modelling groundwater fluctuations and the frequency of movement of a landslide in the Terres Noires region of Barcelonnette France. *Earth Surf. Processes Landforms* 22, pp. 131–141.

