

## **Contribuição da sucção matricial na avaliação dinâmica da estabilidade de vertentes naturais: o caso de estudo do talude da Estrada Regional no concelho da Povoação (ilha de S. Miguel, Açores)**

### ***Soil matric suction contribution for natural slope stability dynamic assessment: the case-study of the regional road slope in Povoação council (S. Miguel island, Azores)***

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

<sup>1</sup>Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Rua Mãe de Deus, s/n, 9500-801 Ponta Delgada, Portugal. E-mail: Paulo.AP.Amaral@azores.gov.pt.

<sup>2</sup>Centro de Estudos Geográficos, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.

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

#### **Abstract**

The geomorphologic instability processes that are triggered in Povoação council, S. Miguel island (Azores Archipelago), generally occur on steep hillslopes constituted superficially by unsaturated cohesionless pyroclastic deposits. For those conditions, the matric suction play a crucial role in the soil shear strength, thus in the slopes stability. In order to evaluate the contribution of the matric suction on volcanic deposits strength, an experimental monitoring network with tensiometers was installed, in the beginning of 2008, in a slope at the Povoação council. This work presents the hydrological regime results and a method to predict the cohesive component of the shear strength of unsaturated soil, obtained from consolidated drained direct shear tests performed with different soil moisture contents. The empirical equation obtained, the geometrical features of the test site and the matric suction were incorporated into an infinite slope model (1D), to compute the dynamic variation on slope stability at depths of 30, 60 and 100 cm with a 15 min. resolution. Since monitoring started, a slope failure occurred on the 8<sup>th</sup> January 2010, and it was possible to capture some relevant features during the transition from a stability condition to an instability state at different depths. The stability model applied, with the incorporation of the cohesive shear strength in function of water content and using specific hidrological monitoring devices, revealed to be an excellent tool to assess the dynamic stability conditions of volcanic deposits on natural slopes for rainfall-triggered landslides forecast, and can be integrated into a landslide early warning system for specific sites.

#### **Keywords**

Soil matric suction, shear strength, infinite slope model, slope stability, Povoação council.

#### **Resumo**

Os processos de instabilidade geomorfológica que ocorrem no concelho da Povoação, ilha de São Miguel (arquipélago dos Açores), incidem em vertentes bastante declivosas, constituídas superficialmente por depósitos piroclásticos não consolidados parcialmente saturados. Nestas condições, a estabilidade das vertentes é garantida devido ao efeito positivo da sucção matricial na resistência ao corte do solo. Para investigar a contribuição da sucção matricial na resistência ao corte de depósitos vulcânicos, foi instalada, no início de 2008, num talude do concelho da Povoação, uma rede de monitorização experimental de tensiómetros. Neste trabalho são apresentados os dados do regime hidrológico e um método para estimar a componente coesiva da resistência ao corte a partir de um conjunto de ensaios de corte directo do tipo consolidado, drenado, realizado com diferentes teores de água. A equação empírica obtida, as características geométricas do talude e a sucção matricial foram incorporadas num modelo da vertente infinita (1D) para avaliar dinamicamente a estabilidade da vertente numa cadência temporal de 15 minutos e às profundidades de 30, 60 e 100 cm. É ainda apresentado um caso de instabilidade geomorfológica que ocorreu no dia 8 de Janeiro de 2010 no talude alvo de monitorização, tendo sido possível verificar aspectos importantes duma passagem da situação estável para instável, a diferentes profundidades. O modelo de estabilidade aplicado, com a incorporação da componente coesiva da resistência ao corte do solo em função do teor de água e com a utilização de equipamentos de monitorização hidrológica específicos, revela ser uma excelente ferramenta de avaliação da estabilidade dinâmica de vertentes naturais em depósitos vulcânicos, podendo ser integrado na implementação de sistemas de alerta e alarme de movimentos de vertente em locais específicos.

#### **Palavras-Chave**

Sucção matricial, resistência ao corte, modelo da vertente infinita, estabilidade de vertentes, concelho da Povoação.

## 1. Introdução

Observações sistemáticas no terreno permitem verificar que a maior parte das manifestações de instabilidade geomorfológica que ocorrem no concelho da Povoação, na ilha de São Miguel (arquipélago dos Açores) corresponde a deslizamentos translacionais superficiais. Em condições hidrológicas e topográficas específicas, alguns deslizamentos são mobilizados completamente, dando origem a escoadas detriticas. Ambas as tipologias tendem a ocorrer em vertentes bastante declivosas, constituídas por depósitos vulcânicos parcialmente saturados. Nestes casos, a contribuição da coesão aparente, devido ao papel da sucção matricial no solo, é decisiva para garantir a estabilidade das vertentes em épocas de pouca precipitação.

Para conhecer e compreender melhor os mecanismos que controlam a instabilidade geomorfológica no concelho da Povoação, e para estabelecer análises de estabilidade apropriadas, foi investigado o comportamento hidrológico através da monitorização da sucção matricial *in situ*, pela utilização de tensiómetros instalados às profundidades de 30, 60 e 100 cm num depósito vulcânico de um talude “tipo” do concelho da Povoação. No início de Janeiro de 2010, em virtude das precipitações intensas registadas na ilha de São Miguel, ocorreram alguns deslizamentos superficiais no concelho da Povoação e em particular no talude alvo de monitorização. De modo a analisar a influência da água no solo e a sua importância na estabilidade do local, foi utilizado o modelo da vertente infinita, permitindo captar aspectos importantes durante o episódio de instabilidade geomorfológica.

Neste contexto, os objectivos deste trabalho são (1) perceber os factores e mecanismos que actuam na vertente e o modo como afectam a sua estabilidade; (2) aplicar um método de estabilidade que inclua o efeito do regime de água no solo através da incorporação do efeito da sucção matricial; e (3) estabelecer e incorporar a componente coesiva da resistência ao corte no solo em condições não saturadas, pela variação das condições de água no solo.

## 2. Características da área de estudo

O local em estudo corresponde ao designado “Talude da Estrada Regional” descrito por Amaral (2005), que se situa próximo do Largo do Município da Povoação, na ilha de São Miguel, sobranceiro à Estrada Regional 1-1ª, que liga a Povoação às Furnas (Fig.1). O talude tem uma área planimétrica de 8050 m<sup>2</sup>, uma altitude ortométrica máxima na ordem dos 65 m, um declive médio de 37° e caracteriza-se por apresentar uma estratigrafia complexa, típica das vertentes que compõem o concelho. A sua base é constituída por um depósito de ignimbrito soldado, coberto por uma espessa sequência de depósitos de pedra pomes de queda, com granulometrias variáveis entre os blocos e as cinzas, alternando com paleosolos. Estes depósitos são cobertos por materiais detríticos gravíticos (ver figura 1).

Periodicamente, a área em questão tem sido palco de várias manifestações de instabilidade geomorfológica, regra geral de cariz superficial. No entanto, medições da deformação do solo com o recurso a uma estação total permitiram individualizar uma massa significativa de solo instável com uma profundidade do plano de rotura superior a 1 metro (Amaral *et al.*, 2007).

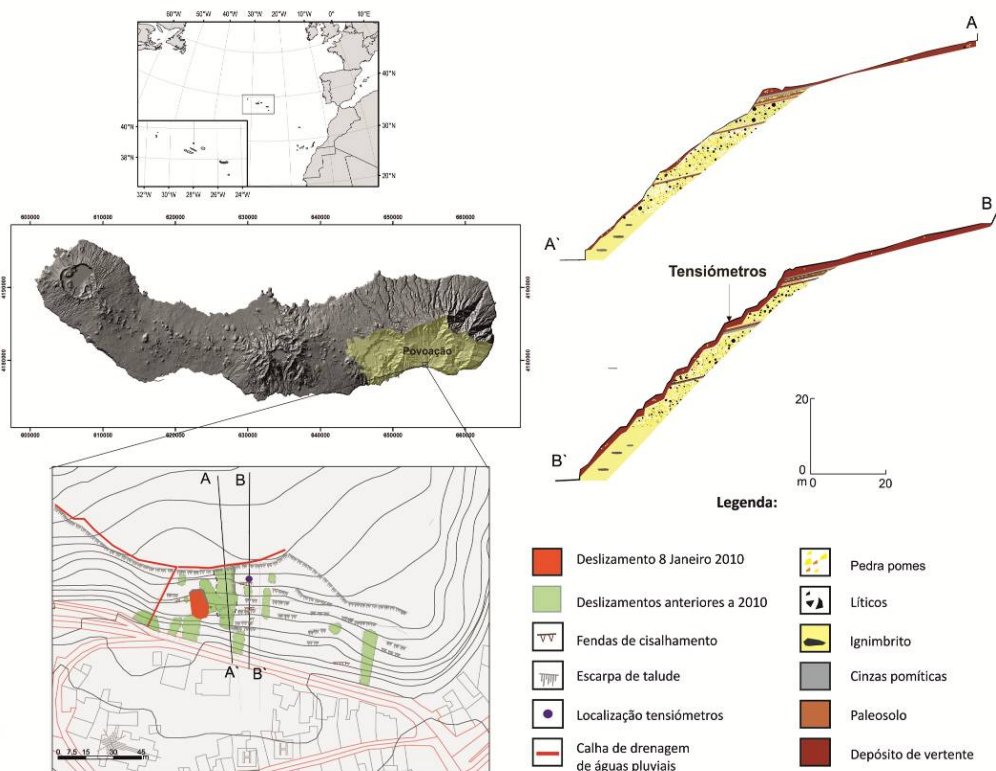


Figura 1. Localização geográfica do talude da estrada regional, inserido no concelho da Povoação (ilha de São Miguel-Açores), esboço geomorfológico multi-temporal e secções geológicas transversais.

### 3. Metodologia

#### 3.1. Medição da sucção matricial *in situ*

No local em estudo foi implementada uma rede de monitorização experimental para avaliar a influência da água no solo em períodos secos e de maior precipitação, sendo esta informação relevante para a avaliação das condições de estabilidade do talude.

A instrumentação da rede experimental foi instalada no início de 2008 e consiste em três tensiómetros TS1 da UMS, colocados a diferentes profundidades (30, 60 e 100 cm) para medição da sucção matricial no solo. Os equipamentos medem directamente a pressão de água desde +100 kPa a -100 kPa, com uma precisão de ±0,5 kPa. Quando o solo atinge a saturação estes equipamentos funcionam como piezómetros, medindo pressões neutras positivas desde os 0 aos 100 kPa, o que os torna numa importante ferramenta para trabalhar em condições até à capacidade de campo ou na presença de níveis freáticos temporários.

#### 3.2. Avaliação das condições de estabilidade

No dia 8 de Janeiro de 2010, pelas 14:00, hora local, ocorreu uma manifestação de instabilidade geomorfológica no talude da estrada regional, com uma volumetria estimada em cerca de 111 m<sup>3</sup>, afectando uma moradia que se encontra no sopé do talude e obstruindo parcialmente a estrada regional.

A avaliação das condições de estabilidade para os períodos antes, durante e após a instabilidade foi determinada através das premissas do modelo da vertente infinita, pelo conhecimento do Factor de Segurança (FS) ao longo de uma potencial superfície de rotura, que pode ser expresso pela seguinte equação (Matsushi *et al.*, 2006):

$$FS = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + \frac{C e^{-\mu \theta}}{(\gamma_d + \theta \gamma_w) Z \sin \beta \cos \beta} - \frac{\psi \gamma_w \tan \phi'}{(\gamma_d + \theta \gamma_w) Z \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Eq. 1}$$

onde Z é a profundidade,  $\beta$  o declive,  $\gamma_d$  é o peso específico seco,  $\gamma_w$  é o peso específico da água,  $\psi$  é a sucção matricial ou pressão negativa da água,  $\theta$  é o teor de água volumétrico,  $\phi'$  é o ângulo de atrito interno efectivo, C é o valor máximo hipotético da coesão (quando  $\theta = 0$ ) e  $\mu$  é o coeficiente relacionado

com a susceptibilidade de redução ( $\mu > 0$ ). A expressão apresentada permite determinar o FS mediante a flutuação da pressão efectiva negativa; no entanto, caso seja atingida a saturação ( $\psi \geq 0$ ), a equação é resolvida a partir da pressão neutra positiva.

### 3.3. Determinação do teor de água e da resistência ao corte

De forma a resolver a equação 1, o teor de água volumétrico ( $\theta$ ) e a componente coesiva da resistência ao corte têm de ser determinados. O teor em água volumétrico, ( $\theta$ ), foi estimado com recurso à expressão não linear de van Genuchten (1980), a qual pode ser descrita por:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad \text{Eq. 2}$$

onde  $\theta$  é o teor de água volumétrico estimado;  $\psi$  é a pressão efectiva;  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são os teores de água residuais e saturados, respectivamente e  $\alpha$ ,  $m$ , e  $n$  são os parâmetros de ajustamento empírico que definem a forma da curva de retenção. Deste modo, o registo da sucção matricial medida nos tensiómetros e os valores dos parâmetros hidrodinâmicos ( $\alpha$ ,  $n$  e  $m$ ) do solo, obtidos a partir da curva de retenção de água para o depósito superficial em que se insere a rede experimental de monitorização, permitiram determinar o teor de água volumétrico.

O comportamento dos parâmetros de resistência ao corte de um proveto de solo foi avaliado tendo em consideração a variação do teor de água volumétrico. A metodologia empregue seguiu, na sua essência, as propostas de Matsushi e Matsukura (2006) para a obtenção de uma função empírica que exprime a variação dos parâmetros de resistência ao corte de solos não saturados em função do teor de água volumétrico. Para calcular a redução da resistência ao corte admite-se que: (1) o ângulo de atrito toma um valor constante; e (2) uma função exponencial é válida para expressar a relação entre a coesão aparente e o teor de água volumétrico. Neste sentido, a função de regressão pode ser postulada da seguinte forma (Matsushi e Matsukura, 2006):

$$\tau = \sigma' \tan \phi' + C e^{-\mu\theta} \quad \text{Eq. 3}$$

onde  $\tau$  é a tensão de corte,  $\sigma'$  é a tensão normal ao plano,  $\theta$  é o teor de água volumétrico,  $\phi'$  é o ângulo interno efectivo,  $C$  é o valor máximo hipotético da coesão (quando  $\theta = 0$ ) e  $\mu$  é o coeficiente relacionado com a susceptibilidade de redução ( $\mu > 0$ ). O procedimento para a determinação da resistência ao corte em função da variação do teor de água volumétrico pode ser consultado em Amaral (2010).

### 4. Resultados obtidos

A função de regressão dos parâmetros de resistência ao corte em função do teor de água volumétrico para o material analisado pode ser descrita da seguinte forma:

$$\tau = \sigma' \tan 31,3^\circ + C e^{-\mu\theta} \quad \text{Eq. 4}$$

onde  $C = 255,4$  e  $\mu = -9,4$  ( $R^2 = 0,958$ ).

Através da análise do espectro temporal da sucção matricial a diferentes profundidades, e tendo em atenção a resposta à precipitação registada, foi possível verificar que: (1) as precipitações observadas durante o período em análise podem ser consideradas como “normais”, por comparação com a pluviosidade habitualmente registada na ilha de S. Miguel. A precipitação registada no dia 8 de Janeiro de 2010 não foi excepcional, com um quantitativo diário de 70 mm. No mês de Dezembro de 2009 verificou-se um importante *input* de água no solo, atestado pelo quantitativo mensal de 330 mm; (2) em todo o período de observação a sucção matricial apresentou uma variação sazonal, decrescendo em resposta à infiltração da água face aos diversos pulsos de precipitação ocorridos, principalmente no período de inverno. Em oposição, na época estival a sucção matricial aumentou em todas as profundidades, devido a fenómenos de evapo-transpiração e escoamento interno; (3) os valores da sucção matricial mantiveram-se sempre negativos, mesmo em períodos de precipitação intensa e/ou prolongada; e (4) no início de 2010 a sucção matricial diminuiu progressivamente para condições próximas da saturação, mantendo-se nas 3

profundidades com valores semelhantes entre si e abaixo dos 10 kPa. Apesar de não se terem registado valores positivos de pressão da água, o solo esteve muito próximo da saturação.

Durante os dois primeiros anos de monitorização não foram registados processos de instabilidade geomorfológica no local em estudo. Tomando como exemplo a ocorrência de instabilidade registada no dia 8 de Janeiro de 2010, a equação empírica obtida, as características geométricas do talude e as medições da sucção matricial foram incorporadas num modelo da vertente infinita (1D) de forma a avaliar dinamicamente a estabilidade em três profundidades distintas (30, 60 e 100 cm).

O quadro 1 ilustra os parâmetros utilizados no cálculo do Factor de Segurança (FS).

Quadro 1. Valores dos parâmetros geométricos, mecânicos e físicos utilizados na avaliação do FS, utilizando dados de campo.

Propriedade, símbolo (unidade)	Valor
Declive, $\beta$ (°)	37
Ângulo de atrito, $\phi'$ (°)	31,3
Valor máximo hipotético da coesão, $C$ (kPa)	254,4
Coeficiente de redução, $\mu$ (-)	-9,4
Peso específico seco, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	8,7
Peso específico da água, $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,81
Profundidade, $Z$ (m)	0,3; 0,6; 1
Teor de água volumétrico, $\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Variável (estimados)
Sucção matricial, $\psi$ (m)	Variável (dados tensiómetros)

O Factor de Segurança (FS) foi calculado a cada 15 minutos, em sintonia com as leituras provenientes dos equipamentos instalados no campo. A variação do FS antes, durante e após o episódio de instabilidade geomorfológica de 8 de Janeiro, ocorrido pelas 14:30h, é mostrado em detalhe na figura 2.

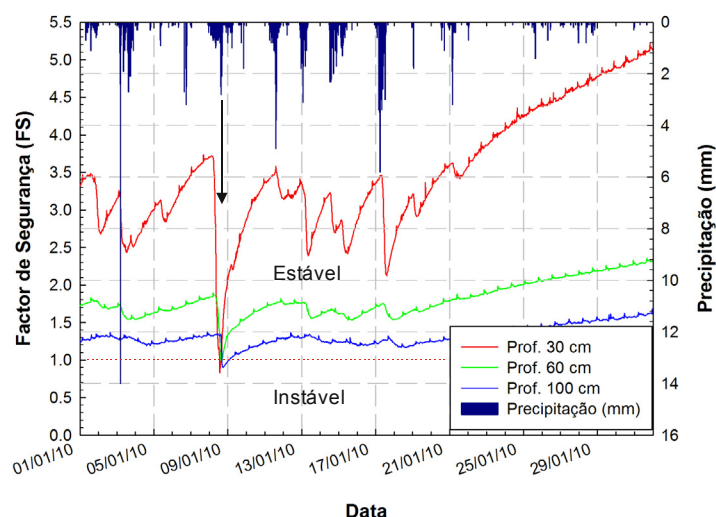


Figura 2. Variação do Factor de Segurança às profundidades de 30, 60 e 100 cm com a utilização de  $\psi$  medida *in situ* e  $\theta$  estimado pela equação 2. A seta indica o momento da instabilidade geomorfológica.

De acordo com os resultados obtidos, nos dias que antecederam o dia 8 de Janeiro de 2010, o FS apresentou valores acima da unidade em todas as profundidades, revelando oscilações tanto mais acentuadas quanto menor a profundidade. A precipitação registada (70 mm/24 horas) foi suficiente para originar instabilidade no talude; no entanto, em outras ocasiões a ocorrência de precipitações com intensidades idênticas e superiores (como por exemplo nos dias 2 e 17 de Janeiro) não causaram instabilidade.

A explicação para este facto reside no contributo da precipitação que se verificou nas horas antecedentes à instabilidade geomorfológica, causando progressivamente uma diminuição da sucção em todas as profundidades (Amaral, 2010).

De acordo com Amaral (2010), por intermédio de análises inversas, as condições de redução da sucção matricial entre os 2 kPa e a sucção nula apresentam-se como as mais favoráveis à instabilidade do local.

## 5. Discussão e conclusões

A obtenção de uma equação empírica baseada em ensaios de corte directo com diferentes condições de água imposta à amostra permitiu o cálculo da resistência ao corte no material não saturado até à saturação, em função do teor de água volumétrico. No entanto, a equação não tem uma completa validade teórica sob o ponto de vista físico, visto que o teor de água volumétrico é medido apenas no final de cada ensaio, não tendo em consideração a variação em todo o processo da fase de corte. Porém, do ponto de vista prático, a sua utilização tem grandes vantagens, especialmente na área da engenharia geotécnica.

As variações na estabilidade ao longo do tempo foram investigadas numa vertente no concelho da Povoação, ilha de São Miguel (Açores), através da utilização de resultados da monitorização da sucção matricial. As medições directas da sucção matricial providenciaram a aplicação da análise de estabilidade com o recurso ao modelo da vertente infinita e desta forma a obtenção do padrão do FS ao longo do tempo e da profundidade. A ocorrência de uma rotura de solo superficial, no dia 8 de Janeiro de 2010, permitiu a validação da análise de estabilidade.

Os resultados obtidos confirmam que a monitorização hidrológica é de extrema utilidade na identificação de indicadores de roturas do solo iminentes através de modelos de base física, podendo estes ser integrados em sistemas de alerta e alarme para movimentos de vertente em locais específicos.

## Agradecimentos

Este trabalho é parte integrante do projecto VOLCSOILRISK (*Volcanic Soils Geotechnical Characterization for Landslide Risk Mitigation*) e da medida M3.1.1/I/006A/2005, do Programa de Apoio à Formação Avançada (FORMAC), do Plano Integrado para a Ciência e Tecnologia (PICT), ambos suportados pela Direcção Regional da Ciência, Tecnologia e Comunicações do Governo Regional dos Açores.

## Referências

- Amaral, P., 2005. Monitorização de vertentes instáveis no concelho da Povoação, ilha de S. Miguel (Açores): Ensaio com base na utilização de uma estação total. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 151 p.
- Amaral, P., Zêzere, J.L., Marques, R., Trota, A., Rodrigues, R. & Gaspar, J.L., 2007. A aplicação de uma estação total automática na detecção e acompanhamento de fenómenos de instabilidade geomorfológica no Concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Vol. V, pp. 67-74.
- 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.
- Matsushi, Y. & Matsukura, Y., 2006. Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65: 449–455. DOI: 10.1007/s10064-005-0035-9.
- Matsushi, Y., Hattanji, T. & Matsukura, Y., 2006. Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso Peninsula, Japan. *Geomorphology*, 76 : 92– 108.
- van Genuchten, M. Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.