

Estudo da variação da sucção ao longo do ano de um talude de solo residual.

Cardoso Jr., C. R.

Geotec Consultoria e Serviços Ltda., Aracaju, SE, Brasil, geotec.projetos@uol.com.br

Futai, M. M.

Escola Politécnica - USP, São-Paulo, SP, Brasil, futai@usp.br

Resumo: Deslizamentos em solos tropicais são frequentemente resultados do avanço de uma frente de umedecimento devido às águas das chuvas. O avanço desta frente de umedecimento provoca elevação da poro-pressão de água ou redução da sucção, provocando perda na resistência do solo. Este trabalho abrange uma fase experimental envolvendo ensaios de caracterização e obtenção das propriedades hidráulicas dos solos e um estudo numérico, com o objetivo de verificar o comportamento da poro-pressão no interior de um talude ao longo do ano, a partir de dados representativos da distribuição de precipitação e evapotranspiração da cidade de São Paulo. A partir dos resultados obtidos na fase experimental avaliaram-se, para os solos com características distintas utilizadas, os meses do ano mais prováveis para a ocorrência de deslizamentos de terra.

Abstract: Landslides in tropical soils are often the result of advance of the wetting due to rainfall. This advance results from an increase in pore water pressure, reduction in present soil matric suction, reduction in the shear strength of the soil. This work will present a experimental study, involving characterization and obtaining hydraulic characteristics of the soils. There is also a numeric study with the aim to analyze the pore water pressure in the slope to the long one year, in the city of São Paulo. The experimental data permitted the evaluation of the influence the distinct soils characteristics used, the months of the most probable year for the occurrence landslides.

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos da sucção são quase sempre ignorados nos projetos de engenharia geotécnica, particularmente nos estudos das análises de estabilidade. Um dos principais motivos que levam a esse fato é o desconhecimento da distribuição da sucção durante a precipitação e a dificuldade de se medir a sucção em campo. Sabe-se que durante uma precipitação a sucção reduz de valor, no entanto, é prematuro concluir que esta sucção vá se anular. Para que a sucção seja eliminada totalmente, a chuva precisa se prolongar durante um longo tempo e a intensidade da precipitação precisa aproximar-se do coeficiente de permeabilidade saturada do solo na superfície (Zhang et al, 2004). A análise da estabilidade de taludes não saturados requer uma

extensiva e detalhada análise de fluxo, pois as rupturas dos taludes não saturados acontecem em condições relacionadas com a infiltração das águas das chuvas. A modelagem da infiltração das águas das chuvas em solos não saturados requer o conhecimento das características climáticas, precipitação (intensidade e duração) e evaporação, permeabilidade do solo e as características iniciais de sucção ou poro-pressão de água no talude antes do início da infiltração (Tsaparas et al., 2002). Contudo, a relação entre as condições climáticas e as rupturas de taludes varia em diferentes áreas geográficas.

2 PERFIL DE SUÇÃO DURANTE A INFILTRAÇÃO

Kisch (1959) derivou a equação de fluxo para solos não saturados e mostrou que, a variação da poropressão ao longo de um perfil em uma secção transversal, durante um fluxo vertical estacionário, é dada por:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{q}{k(\theta)} - 1$$

(1)

onde:

p é a carga de pressão neutra;

q é a velocidade de percolação do fluido;

z é a carga altimétrica;

$k(\theta)$ denota o coeficiente de permeabilidade em função da umidade volumétrica.

Analisando a equação (1), pode-se concluir que, para a condição hidrostática, $q=0$; quando $q < k(\theta)$, o gradiente situa-se entre -1 e 0 ; e quando $q = k(\theta)$, o gradiente de pressão é zero.

O impacto da chuva sobre o regime hidráulico no perfil do solo pode ser considerado como um estado de transição entre o estado inicial (condição hidrostática) e o estado final (condição de fluxo estacionário). De acordo com McDougall e Pyrah (1998), partindo-se de um regime em condição hidrostática, um evento chuvoso inicia um processo de ajuste hidráulico para uma nova condição de contorno do fluxo. Permanecendo a chuva durante um longo período, ocorrerá um estado de infiltração estacionário próximo a superfície. Na condição estacionária, a quantidade de água que entra no maciço de terra está em equilíbrio com a água que sai.

São poucos os casos em que o fluxo se torna estacionário em um talude. O tempo que é preciso para que isto ocorra é função da intensidade e duração da precipitação, do coeficiente de permeabilidade e da curva de retenção do solo.

Quando o fluxo na superfície é menor que o coeficiente de permeabilidade saturado do solo, a sucção irá diminuir, mas não se anulará. A sucção se anulará apenas quando o fluxo na superfície for igual ou superior ao coeficiente de permeabilidade.

3 RELAÇÃO INTENSIDADE E ESCORREGAMENTO

Guidicini e Iwasa (1976) procuraram investigar a correlação entre pluviosidade e escorregamentos, introduzindo nas análises dados relativos ao histórico de chuvas. Esse histórico pode se referir

apenas aos dias anteriores ao episódio de chuva intensa, ou depender da chuva acumulada do ano em questão. Guidicini e Iwasa (1976) apresentaram os conceitos de coeficiente do ciclo (C_c) e coeficiente do episódio (C_e), que representam, respectivamente, o registro pluviométrico acumulado até a data do episódio de chuva e o registro pluviométrico do próprio episódio, com relação à média anual de pluviosidade da região. A soma desses dois coeficientes foi chamada de coeficiente final (C_f).

Aplicar o conceito do coeficiente final (C_f) equivale a levar em consideração o volume total de água precipitado até a data do episódio, contando a partir do início do ciclo (aproximadamente o mês de julho). Na Figura 1, os autores aplicaram o conceito de coeficiente final numa centena de episódios de chuva intensa (principalmente para os estados de SP, RJ, MG, PR, SC e CE), agrupando-se os casos verificados em quatro faixas com crescente probabilidade de ocorrência de escorregamentos (de D para A).

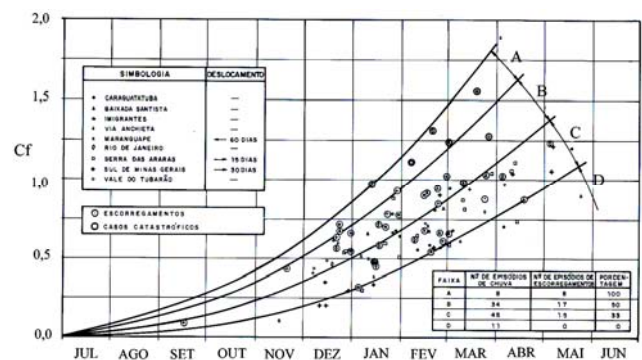


Figura 1: Proposta para correlacionar os episódios de escorregamento e o coeficiente final de precipitação, Guidicini e Iwasa (1976).

Outra tentativa de correlacionar a pluviometria e os escorregamentos em um talude não saturado foram realizados por Vargas Jr. et al. (1986). Adotando-se parâmetros geotécnicos típicos dos solos saprolíticos de gnaiss do Rio de Janeiro, os autores realizaram um estudo paramétrico da variação do fator de segurança em função do avanço de uma frente de umedecimento, em um talude com ângulo de inclinação de 60° e altura de 20 m.

Adotando-se hipóteses simplificadoras para se determinar o avanço da frente de umedecimento, os autores concluíram que, para solos menos permeáveis, as chuvas necessárias para deflagrar escorregamentos precisam ser longas (da ordem de 50 a 60 horas). Para solos mais permeáveis, as chuvas necessárias para deflagrar escorregamentos correspondem a chuvas de grande intensidade e pouca duração, caracterizando eventos com período de recorrência elevado.

4 PROPRIEDADES DOS SOLOS

Para este trabalho foram utilizados dois solos que serão denominados de solos “matrizes”. A partir das matrizes, obtiveram-se outros três solos com características diferentes, a partir da mistura entre eles. Os dois solos “matrizes” apresentam propriedades distintas: o primeiro será chamado de Gnaisse, solo de origem residual de Gnaisse, composto basicamente de areia siltosa e retirado do campo experimental da USP; este solo apresenta suas propriedades já conhecidas (Stuermer, 1998; Kuwajima, 2000; Oliveira, 2004); o segundo solo é a Areia de Osasco ou simplesmente Areia, solo de origem fluvial, usado principalmente na construção civil, que foi estudado por Teixeira (2006).

4.1 Distribuição granulométrica dos solos

A Tabela 1 apresenta a proposta de mistura em proporções conhecidas dos dois solos “matrizes”, que serão aqui designados como AG1, AG2 e AG3, sendo o AG1 o solo que apresenta 25% de Gnaisse e 75% de Areia, o solo AG2 o que apresenta 50% de cada solo e o AG3 o solo que apresenta 75% de Gnaisse e 25% de Areia.

Tabela 1- Proporções utilizadas de gnaisse e areia para os solos AG1, AG2 e AG3.

Solos	Gnaisse (%)	Areia (%)
AG1	25	75
AG2	50	50
AG3	75	25

Foram idealizados quatro taludes, cada um constituído por um solo (Gnaisse, AG3, AG2 e AG1). As curvas granulométricas para os cinco solos são apresentadas na Figura 3.

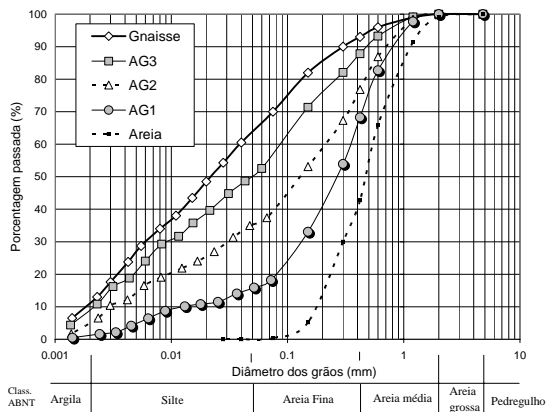


Figura 2: Curvas granulométricas para os cinco solos utilizados (Gnaisse, AG3, AG2, AG1 e Areia).

4.2 Coeficiente de permeabilidade na condição saturada

As determinações dos coeficientes de permeabilidade para os corpos de prova saturados foram obtidas a partir do permeâmetro de parede flexível para as amostras AG1, AG2, AG3 e Gnaisse e, para os corpos de prova de areia, a partir do permeâmetro de parede rígida.

A Figura 3 apresenta os resultados dos coeficientes de permeabilidade na condição saturada, obtidos nas diversas amostras, na direção vertical e horizontal.

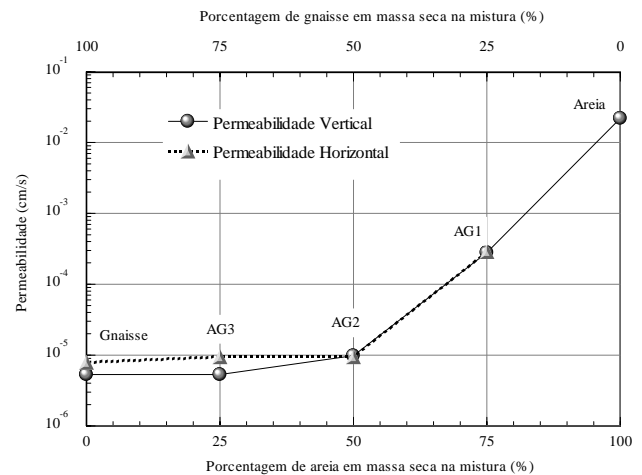


Figura 3: Valores dos coeficientes de permeabilidades saturadas para os solos utilizados, nas direções vertical e horizontal.

4.3 Curvas de retenção e função permeabilidade

As curvas de retenção foram ajustadas utilizando-se o modelo de Fredlund e Xing (1994), conforme exemplo apresentado para o solo AG3 na Figura 4. A função permeabilidade de cada solo foi determinada utilizando-se a proposta de Fredlund et al. (1994).

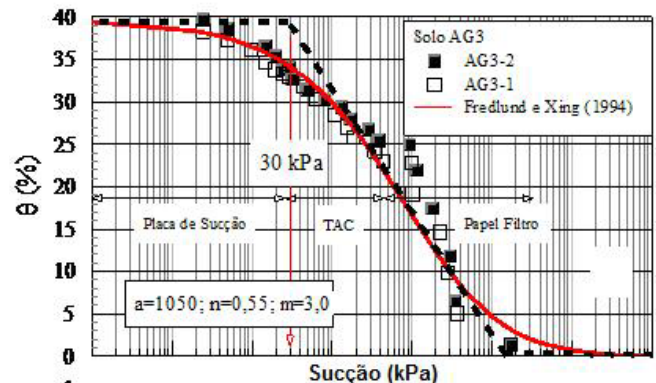


Figura 4: Ajuste por Fredlund e Xing (1994) para os pontos experimentais para o solo AG3.

Seguindo o mesmo exemplo aplicado para o AG3 apresentado acima, foram determinadas as curvas de retenção e funções permeabilidades para os cinco solos e estão apresentadas na Figura 5. Maiores detalhes estão apresentados em Cardoso (2006).

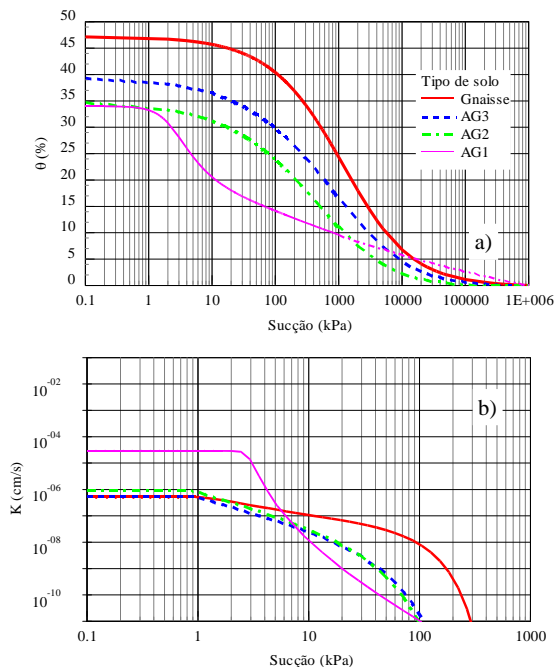


Figura 5: Resumo dos parâmetros hidráulicos dos solos: a) curvas de retenção e b) funções permeabilidade.

5 CARACTERÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

As características referentes às precipitações foram obtidas a partir de dados reais, coletados na Estação Meteorológica do Mirante de Santana, estado de São Paulo (INMET, 2005). Para esta pesquisa, foi adotada a chuva referente ao ano de 2004, como representativa da média histórica (1996-2005), por ter essa uma distribuição de precipitação e evapotranspiração semelhante à média histórica.

A evapotranspiração real, utilizada neste trabalho, representa o total de água transferida da superfície da Terra para a atmosfera em função de parâmetros atmosféricos, umidade do solo e tipo de cobertura existente no solo. É composta da soma das quantias da evaporação dos líquidos na superfície acrescida da transpiração das plantas. Dessa forma, além dos fatores meteorológicos que condicionam a evapotranspiração, tais como, radiação solar, vento, temperatura do ar, essa é afetada também pelas características de retenção do solo. Os dados referentes à evapotranspiração utilizados também foram coletados na Estação Meteorológica do Mirante de Santana, definindo-se um solo do tipo

argila arenosa como referência para se obter e utilizar os dados da evapotranspiração em todas as análises (Figura 6).

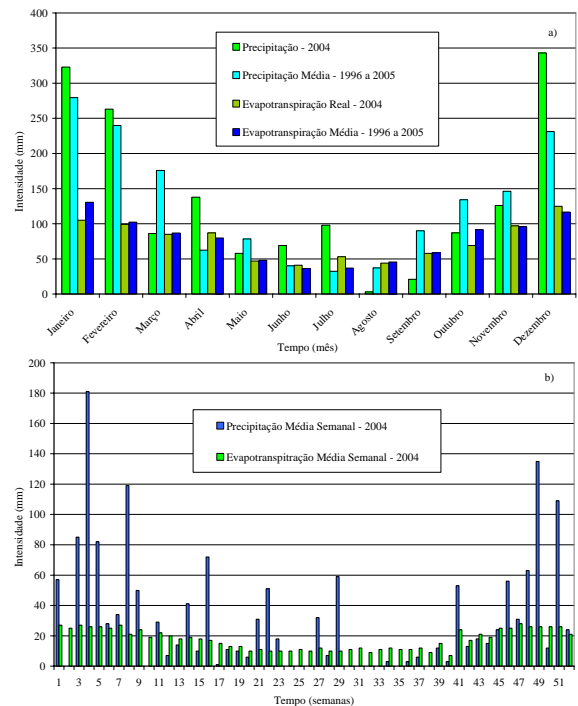


Figura 6: Pluviogramas referentes à cidade de São Paulo: a) intensidade média mensal histórica (1996-2005) e do ano de 2004; b) intensidade média semanal para o ano de 2004.

6 SIMULAÇÃO DO FLUXO TRANSIENTE

Para as análises do fluxo transiente no interior do maciço de solo utilizou-se o software de elementos finitos Seep/W (GEO-SLOPE, 1998-a). A seguir serão apresentados os parâmetros utilizados para as análises.

6.1 Geometria do problema e descrição da malha de elementos finitos

A geometria do talude de referência que será utilizado está apresentada na Figura 7. Este talude apresenta um ângulo de inclinação de 45° (1H : 1V) e altura de 15 m. Para a simplificação do problema, é assumido um talude homogêneo. O nível de água está situado na cota de elevação de cinco metros, ou seja, cinco metros abaixo da cota do pé do talude.

Em relação a malha adotada, na superfície do talude, até a profundidade de três metros, utilizaram-se elementos quadrados (0,50 x 0,50m) com oito nós. Para profundidades maiores do que três metros, e distantes da crista e do pé do talude, utilizou-se elementos quadrados (1,00 x 1,00m) com quatro nós. Entre a malha mais refinada e a menos refinada, fez-se uso de elementos triangulares de transição.

Abaixo do lençol freático admitido (cota 5 metros) foram empregados elementos retangulares (2,00 x 1,00m) com quatro nós. No total, a malha formada consistiu de 2402 nós e 1229 elementos. A metodologia utilizada nesse trabalho para projetar a malha de elementos foi similar à utilizada por Tsaparas et al. (2002).

Para a apresentação dos resultados, oito pontos (A, B, C, D, E, F, G e H) foram escolhidos, como representativos, para ilustrar a variação da sucção ou poro-pressão da água no interior do talude durante o fluxo, causado pelas infiltrações.

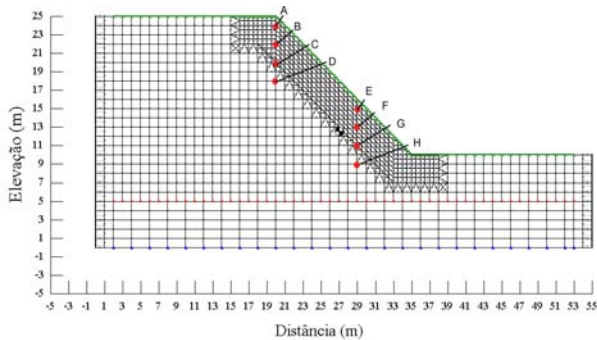


Figura 7: Geometria da malha de elementos finitos utilizada na análise do fluxo.

7 RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Perfis de sucção ao longo do ano

Foi analisada a variação dos perfis de sucção ao longo do ano e verificadas as situações mais críticas e as mais favoráveis para o equilíbrio de uma potencial superfície de ruptura do talude. Utilizou-se a distribuição de precipitação e evapotranspiração referente ao ano de 2004 (Figura 6b) como representativa da série histórica, como já comentado anteriormente.

Os valores de poro-pressão de água foram obtidos nos pontos A a H ao longo de dez anos, com o intuito de se obter o tempo necessário para que um regime “estacionário” anual representativo fosse atingido. Entretanto, para todos os solos analisados (Gnaisse, AG3, AG2 e AG1), a partir do quinto ciclo já foi suficiente para se atingir os perfis desejados.

Da Figura 8 a Figura 11 são apresentados os resultados obtidos para os solos considerados.

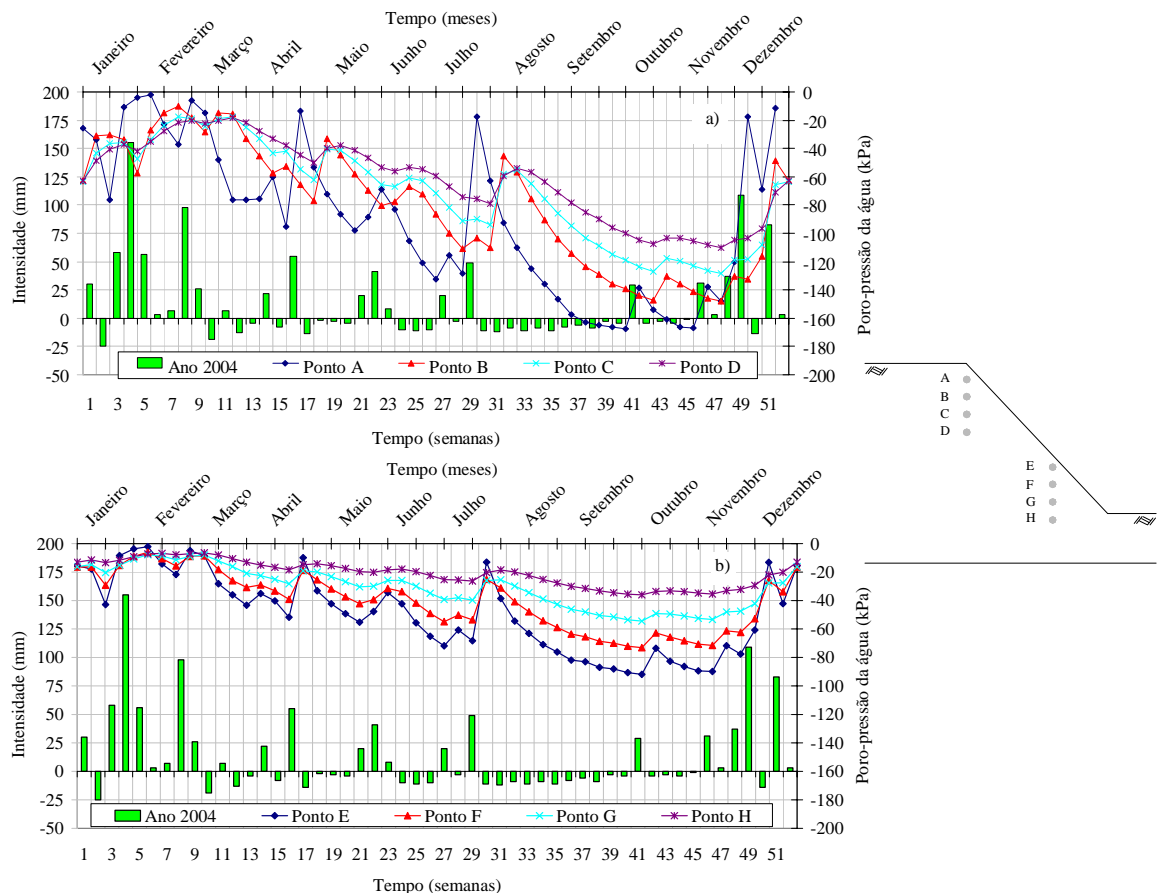


Figura 8: Variação da poro-pressão da água ao longo do ano para o solo Gnaisse: a) Pontos A, B, C e D; b) Pontos E, F, G e H.

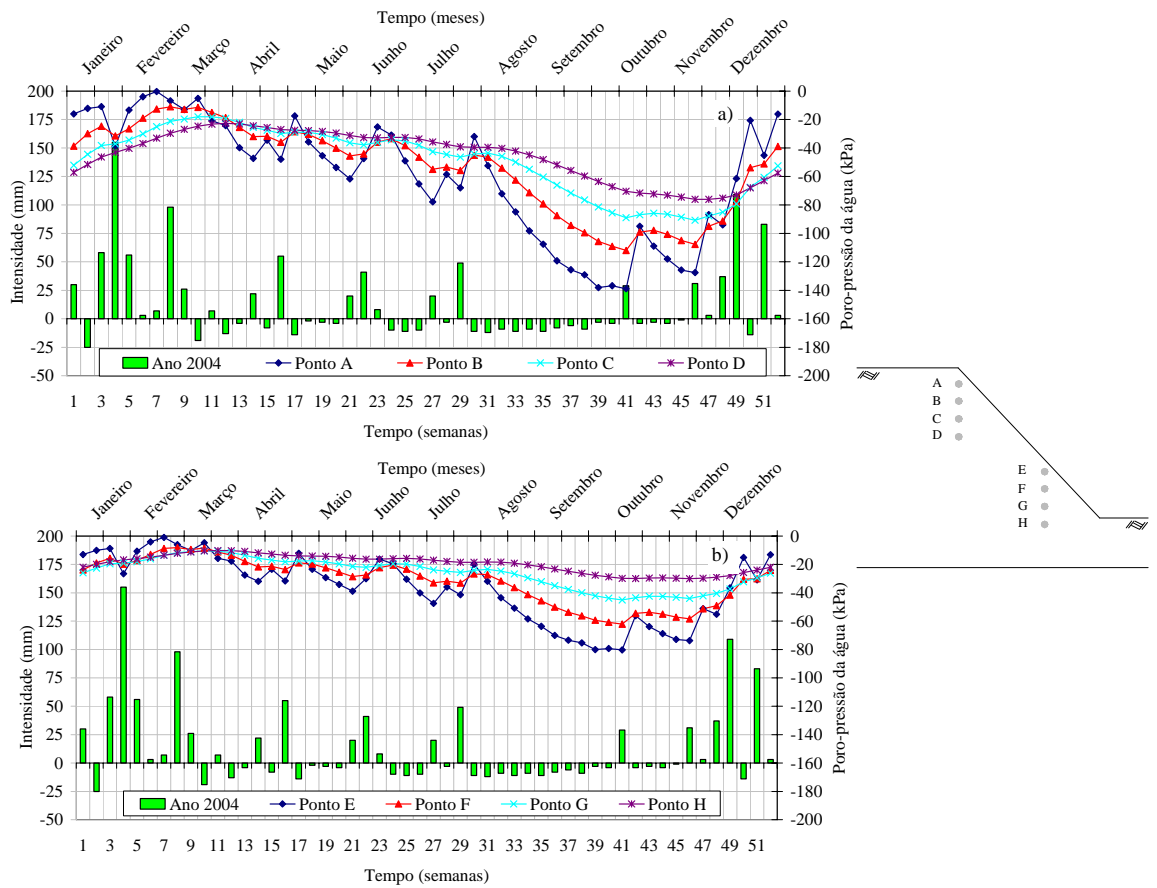


Figura 9: Variação da poro-pressão da água ao longo do ano para o solo AG3: a) Pontos A, B, C e D; b) Pontos E, F, G e H.

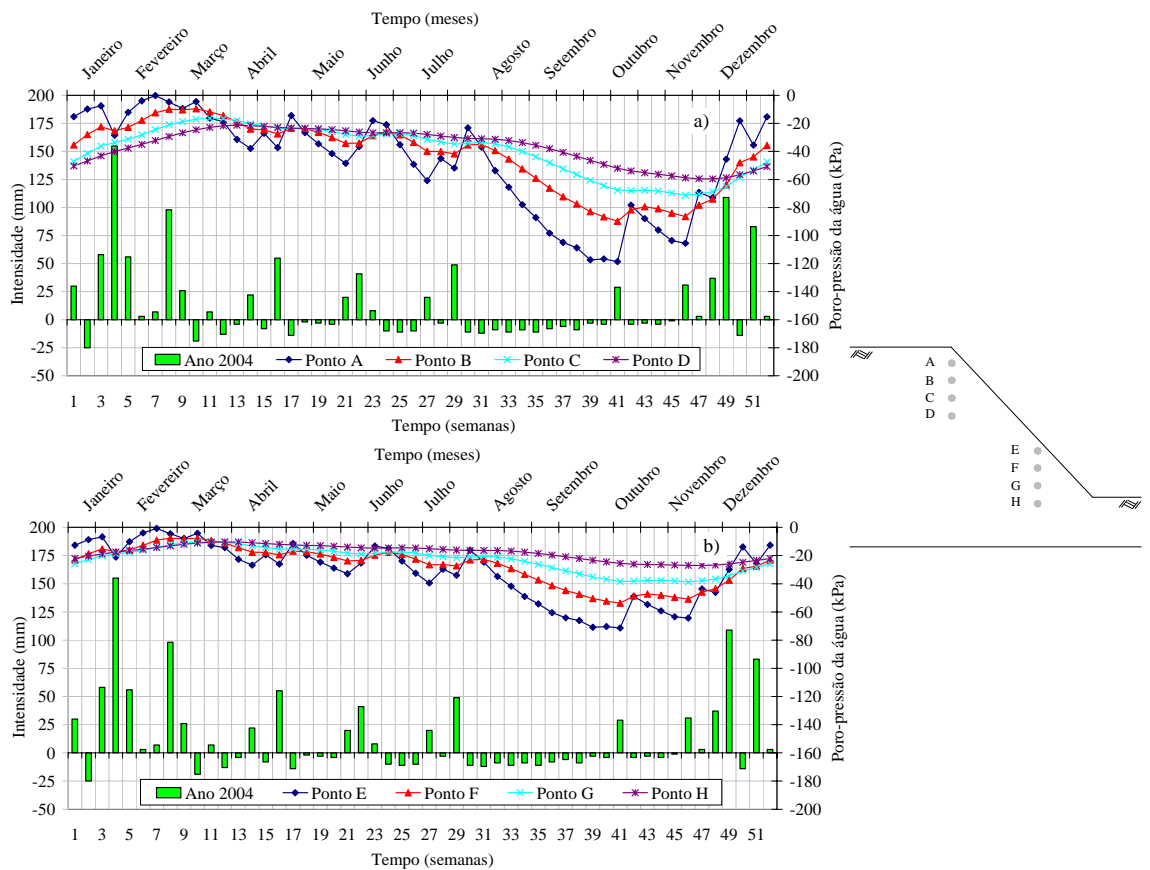


Figura 10: Variação da poro-pressão da água ao longo do ano para o solo AG2: a) Pontos A, B, C e D; b) Pontos E, F, G e H.

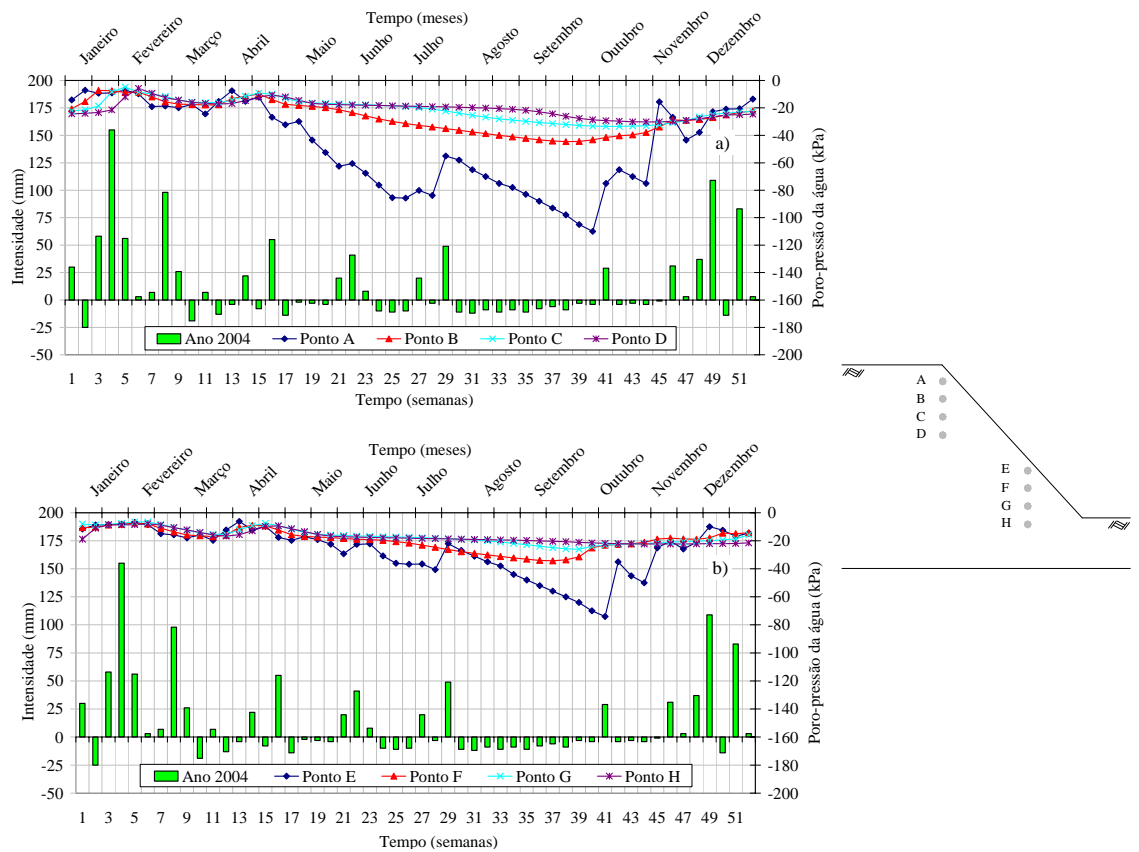


Figura 11: Variação da poro-pressão da água ao longo do ano para o solo AG1: a) Pontos A, B, C e D; b) Pontos E, F, G e H.

A partir dos valores obtidos nas figuras anteriores, percebe-se claramente, que em todos os solos analisados, a variação de sucção no interior do talude acompanha a variação das condições climáticas locais. No decorrer de uma precipitação, a poro-pressão da água na superfície do terreno aumenta. Para períodos em que a atuação da evapotranspiração é maior do que a precipitação ocorre o inverso, ou seja, a poro-pressão da água na superfície e no interior do talude diminui.

Para a série histórica adotada, foram selecionados dois perfis distintos dos valores de poro-pressão de água, possíveis de ocorrer para os solos analisados. Os perfis apresentados na Figura 12 e na Figura 13 estão localizados no topo do talude, passando pelos pontos A a D.

Na Figura 12 é apresentado o perfil de poro-pressão ocorrido na primeira semana do mês de março, representativo da situação crítica para os solos analisados. O talude foi submetido a vários eventos de chuvas, tanto eventos de longos períodos como eventos de grande intensidade e de curtos períodos. Essas precipitações, caracterizadas por iniciarem no mês de outubro ou novembro, têm seu fim no mês de março. Foi neste mês que se obtiveram os maiores valores de poro-pressão de água. Os solos AG3 e AG2 apresentaram perfis

semelhantes de poro-pressão. Nota-se que os valores médios de poro-pressão se mantiveram em torno de -15 kPa, o que corresponde a uma sucção de 15 kPa.

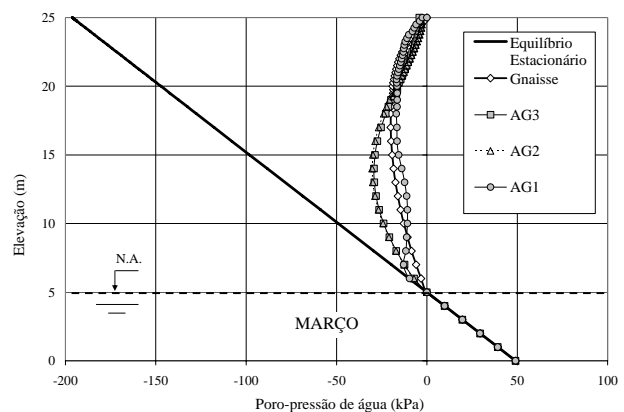


Figura 12: Perfis críticos para os solos Gnaisse, AG3, AG2 e AG1 ocorridos no mês de março (décima semana do ano).

Os resultados apresentados na Figura 12 mostram a importância de se levar em consideração o ciclo de chuvas ocorrido antes de cada escorregamento. Esse tipo de procedimento foi sugerido por Guidicini e Iwasa (1976) por meio do coeficiente do ciclo (C_c) e do coeficiente do

episódio (Ce). A situação ocorrida no mês de março foi a mais crítica de acordo com os resultados das análises numéricas, concordando, dessa maneira, com a Figura 1, que ilustra a situação mais crítica para a ocorrência de escorregamentos também para o mês de março.

Na Figura 13 é apresentada o perfil de poro-pressão de água ocorrido na primeira semana do mês de outubro. O início do mês de outubro é antecedido por um período caracterizado pelo predomínio dos valores de evapotranspiração sobre os valores de precipitação. Nesse período (julho, agosto e setembro), ocorre uma redução nos valores de poro-pressão de água, estando essa redução, está relacionada ao tipo de solo. Percebe-se na Figura 13 que o solo Gnaisse apresentou menor valor de poro-pressão na superfície (aproximadamente -180 kPa), enquanto o solo AG1 apresentou maior valor (aproximadamente -55 kPa).

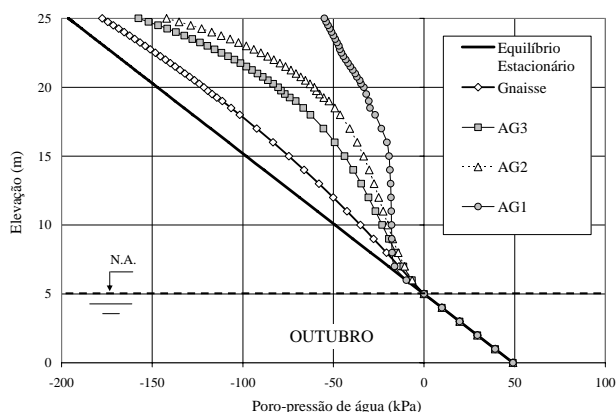


Figura 13: Perfis críticos para os solos Gnaisse, AG3, AG2 e AG1 ocorridos no mês de outubro.

8 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que, ao longo do ano, o talude sofre uma grande variação de poro-pressão de água, ou sucção, principalmente nos pontos próximos à superfície. Para os pontos localizados em profundidades maiores, a variação de poro-pressão de água é pequena, sendo praticamente nula para chuvas de pouca duração.

Foi possível detectar perfis de poro-pressão de água com características extremas utilizando dados climáticos da cidade de São Paulo.

Foram definidos dois padrões básicos de distribuições das poro pressões de água no talude, um para os menores valores e outro para valores mais elevados. O primeiro ocorre, em geral, na primeira quinzena dos meses de fevereiro e março. Este perfil é o mais crítico para que ocorram casos de escorregamento de terra. O segundo ocorre, em geral, na primeira quinzena do mês de outubro e na segunda quinzena no mês de novembro. Este perfil é

o menos crítico para os casos de escorregamento de terra.

O procedimento adotado para gerar a distribuição de poro pressão de água inicial de forma numérica é uma proposta que pode ser aplicada em casos práticos, desde que seja feita um estudo hidrológico. A partir dessa análise é possível identificar a condição mais desfavorável e ainda considerar essa condição na análise de estabilidade. Como no caso estudado, muitos casos, os taludes devem permanecer não saturados, mesmo nas condições mais desfavoráveis.

9 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cardoso, C. R. Jr. Estudo do comportamento de um solo residual de gnaisse não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes (2006). Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. e Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, n. 3, 313-321.
- Fredlund, D. G.; Xing, A. Equation for the soil-water characteristic curve (1994). *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 521-532.
- Geo-Slope International Ltd. (1998a). *Seep/W for finite element seepage analyses (v.4). Users manual*. Calgary, Alberta, Canada.
- Guidicini, G; Iwasa, O. Y. (1976). Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamento em meio tropical úmido, São Paulo, IPT, 48 p. (IPT pub. 1080).
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 12 dez. 2005.
- Kisch, M. (1959). The theory of seepage from clay-blanketed reservoirs. *Géotechnique*, Vol. 9, 9-21.
- Kuwajima, R. M. Determinação da sucção “in situ” em solo residual compactado utilizando-se o parâmetro B e a medição direta de sucção (2000). 198 f. Tese (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.
- McDougall, J. R. E Pyrah, I. C. (1998). Simulating transient infiltration in unsaturated soils. *Can. Geotech. J.*, Vol. 35, Notes, 1093-1100.

- Oliveira, O. M. Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado (2004). Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.
- Stuermer, M. M. Estudo da capacidade de retenção de água em um solo residual compactado (1998). 158 f. Tese (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.
- Teixeira, P. F. Estudo das propriedades geotécnicas para uma camada de atenuação de gás metano (2006). Exame de Qualificação (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.
- Tsaparas, I.; Rahardjo, H.; Toll, D. G; Leong, E. C. (2002). Controlling parameters for rainfall-induced landslides. *Computers and Geotechnics*, Vol. 29, pp. 1-27.
- Vargas Jr., E. A.; Costa Filho, L. M; Campos, L. E. P. (1986). A study of the relationship between the stability of slopes in residual soils and rain intensity. *International Symposium On Environmental Geotechnology*, Bethlehem, USA, Proceedings, pp.491-500.
- Zhang, L. L., Fredlund, D. G., Zhang, L. M. e Tang W. H. (2004). Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained. *Can. Geotech. J.*, Vol. 41, 569-582.