

Análise da influência de um período intenso de chuva na estabilidade de um talude de rodovia.

Gabriel Steluti Marques

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, gabrielstmarques@gmail.com

Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, jhcreis@uem.br

Christopher Fonseca da Silva

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, christopherfonsec@gmail.com

Juliana Azoia Lukiantchuki

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, jazoia@yahoo.com.br

RESUMO: Os movimentos de massa, em encostas naturais, podem ser caracterizados como uma das grandes ameaças naturais que apresentam grande grau de recorrência em todo o mundo. Este trabalho tem como objetivo apresentar a análise da estabilidade de um talude de rodovia, localizado na pista marginal sul da rodovia Presidente Dutra, próximo ao município de Guarulhos (SP). A análise geotécnica de estabilidade foi realizada para uma seção transversal considerada crítica e definida com base no projeto geométrico. A estratigrafia do terreno foi definida com base no projeto geométrico e seções transversais, além dos resultados das sondagens de simples reconhecimento dos solos (SPT). As análises de estabilidade foram realizadas utilizando o software Geostudio 2012. O fator de segurança inicial apresentou-se inferior ao valor mínimo recomendado pela Norma Brasileira, indicando que o talude é instável apesar de não estar na iminência de ruptura. Adicionalmente, foi realizada uma análise de infiltração da água da chuva utilizando-se dados de estação climatológica local. A análise demonstrou que após um período chuva de 150 dias, o posicionamento do nível d'água pode variar consideravelmente. Os valores de pressão neutra aumentaram comprometendo a estabilidade do talude. Os resultados indicaram que o fator de segurança pode diminuir cerca de 32%, atingindo um valor bastante inferior a iminência da ruptura. Os resultados indicaram que para este estudo de caso, faz-se necessário o emprego de uma técnica de reforço do maciço.

PALAVRAS-CHAVE: Movimentos de massa, estabilidade de taludes, modelagem numérica, infiltração de chuva.

1 INTRODUÇÃO

O problema de instabilidade de encostas afeta diretamente os ambientes urbanos causando danos materiais e perdas de vidas humanas. Montoya (2013) destaca que os sistemas viários apresentam interrupções frequentes devido à instabilidade nos taludes, que são mais evidenciadas em taludes de corte e durante temporadas de chuva. No entanto,

mesmo os níveis de risco nas estradas sendo elevados, durante a tomada de decisão na fase de projeto das rodovias não são consideradas as consequências dos problemas de instabilidade na sua construção e operação.

Outra questão bastante importante para se destacar é a compreensão do fenômeno de instabilização, que é bastante complexo, sobretudo devido ao grande número de incógnitas envolvidas (geológico-geotécnicas,

ação antrópica, clima, dentre outras) (JESUS, 2008).

Neste contexto, destaca-se os períodos que chuva, que possuem elevada influência nas movimentações das encostas através da sua intensidade e duração, sendo este considerado o principal agente causador dos escorregamentos.

Desta forma, este trabalho de pesquisa tem como objetivo estudar a estabilidade de um talude de rodovia em duas condições distintas. Será apresentado um estudo de estabilidade na sua condição inicial e após um período de chuva intensa. Os resultados apresentados demonstram a importância da inclusão dessa análise na verificação de estabilidade dos taludes de rodovia.

2 ESTUDO DE CASO

Neste trabalho foi utilizado como ferramenta de auxílio, o projeto geométrico traçado em planta e as seções transversais, referentes ao desenvolvimento do projeto executivo de implantação da Pista Marginal Sul da Rodovia Presidente Dutra no trecho compreendido entre o km 211+670 e km 216+060 situado no município de Guarulhos, estado de São Paulo, realizada no período de dezembro de 2011. A análise geotécnica de estabilidade foi realizada para uma seção transversal considerada crítica e definida com base no projeto geométrico.

Quanto à gênese do solo, as sondagens realizadas indicaram um perfil estratigráfico da seção analisada como sendo um solo constituído basicamente de argila siltosa e argila arenosa, com cores bastante variáveis e valores médios de N_{SPT} crescentes com a profundidade (Figura 1).

2.1 Seção analisada

De acordo com o perfil estratigráfico fornecido pelas sondagens (Figura 1), foi possível classificar o solo da seção estudada em quatro camadas de solo com comportamento mecânico

distinto, conforme apresentado na Tabela 1. Adicionalmente foi possível definir o posicionamento do lençol freático, de acordo com a altura dos níveis d'água expressos nas sondagens (Figura 2).

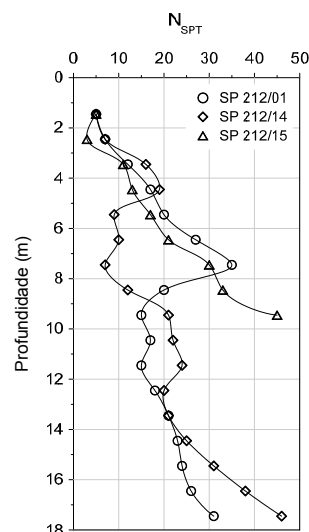


Figura 1. Ensaio de sondagem SPT utilizados e camadas do perfil estratigráfico.

2.2 Estimativa dos parâmetros do solo

No desenvolvimento de projetos geotécnicos o índice N_{SPT} é utilizado diretamente em correlações empíricas ou semi-empíricas como parâmetro chave para o cálculo da capacidade de suporte, recalque das fundações e estimativa de parâmetros de resistência do solo. Apesar de não ser a maneira mais adequada para o desenvolvimento de projetos, essa solução acaba sendo amplamente utilizada, sobretudo pela ausência de informações mais específicas obtidas através de ensaios de campo e laboratório. Devido à ausência de informações específicas nesse estudo, foi realizado um amplo estudo das possíveis correlações disponíveis na literatura, desenvolvidas com base no ensaio SPT, para a estimativa dos parâmetros de projeto. A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros geotécnicos adotados para o desenvolvimento das análises numéricas.

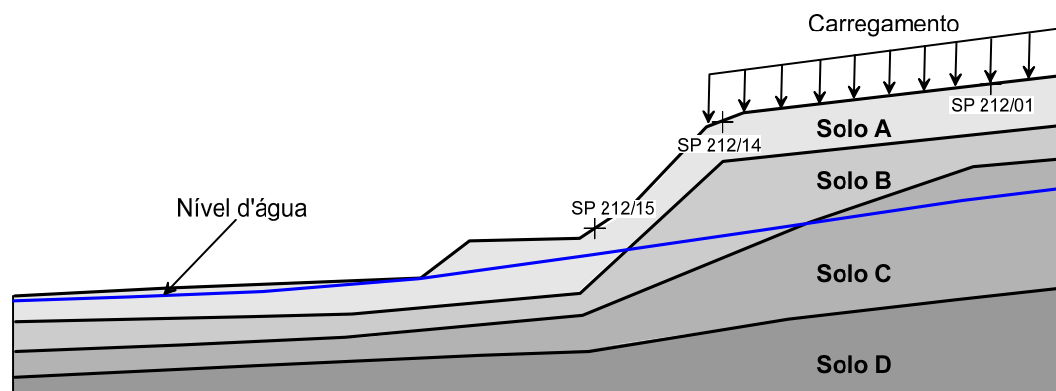


Figura 2. Perfil estratigráfico da seção analisada.

Tabela 1. Características geológicas das camadas de solo.

Solo	Descrição	N _{SPTméd}
A	Argila silto-arenosa, com pedregulho fino, marrom avermelhado	5
B	Argila arenosa (fina a média), com silte, vermelha e roxa	10
C	Argila areno-siltosa, com pedregulho fino, marrom avermelhado	17
D	Argila areno-siltosa, cinza e amarela	34

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos adotados com base em correlações empíricas.

Solo	Estado	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	Es (tf/m ²)	μ
A	Mole	15	20	5	1500	0,3
B	Média	17	24	10	2000	0,3
C	Rija	19	26	19	3500	0,4
D	Dura	21	29	31	5000	0,45

3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

3.1 Estabilidade do talude natural

As análises que serão apresentadas a seguir foram realizadas utilizando-se o software Geostudio 2012 com licença completa e temporária fornecida pela Geo-slope International Ltda. O software contribuiu para o

desenvolvimento de uma análise completa do problema, pois permitiu realizar diferentes simulações, incluindo a estabilidade global da seção (módulo Slope), análise de infiltração (módulo Seep) e análise tensão-deformação (módulo Sigma).

A análise de estabilidade foi realizada pelo método do equilíbrio limite, utilizando o Método Morgenstern-Price. O método foi desenvolvido com base no Método de Spencer, sendo que a diferença é que para esse método é possível variar a função que representa o equilíbrio de forças atuando entre as fatias. A utilização desse método se torna interessante uma vez que os métodos mais simples não incluem todas as forças que atuam entre as fatias e não satisfazem todas as equações de equilíbrio, podendo inclusive induzir a uma análise insegura.

Segundo a norma brasileira (ABNT, 2009) todas as estruturas de contenção deverão ser projetadas para suportar além dos esforços provenientes do solo, uma sobrecarga acidental mínima de 20 kPa, uniformemente distribuída sobre a superfície do terreno arrimado. Deste modo, na análise da seção crítica considerou-se uma sobrecarga de 20 kPa atuante sobre o terreno (Figura 2). Nas análises não foram consideradas a anisotropia das camadas de solo devido à dificuldade em se quantificar essa informação.

O posicionamento do nível d'água da seção foi estimado em relação ao posicionamento dos níveis d'água indicados nas sondagens SPT. No entanto, devido à ausência de informações complementares da parte inferior do talude, considerou-se que a favor da segurança a

continuação deste deveria ser posicionada ao longo do pé do talude.

A análise da estabilidade indicou um fator de segurança próximo da unidade e abaixo do limite de 1.5 (Figura 2). Observa-se que o

talude analisado apresenta-se muito próximo da iminência de ruptura ($FS < 1$), com segurança insatisfatória para a situação em questão (rodovia de acesso à cidade de grande porte).

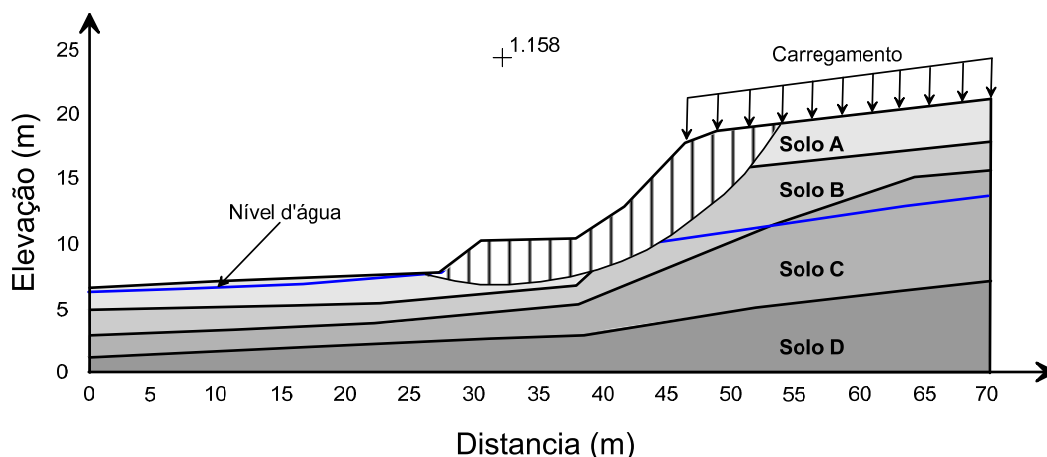


Figura 3. Superfície crítica de ruptura ($F_{s_{min}}$) para a seção transversal crítica.

A análise dos resultados apresentados permite observar que a superfície crítica de ruptura se desenvolve em um comprimento de 27.7 m, sendo que o seu intervalo de desenvolvimento inicia-se em 26.10 m e termina em 53.85 m. Observa-se ainda que o desenvolvimento da superfície crítica de ruptura ocorre entre as camadas de solo A e solo B, sendo que os parâmetros dessas camadas possuem influência diretamente na estabilidade do talude analisado.

3.2 Estabilidade do talude após um período de chuva

A chuva possui influência direta nas movimentações de encostas, seja através da sua intensidade ou através da sua duração. Considera-se ainda que a chuva é o principal agente causador dos escorregamentos. Soares (2006) destaca que os principais mecanismos para deflagração de um escorregamento são: redução da sucção, flutuações do lençol freático, queda de rochas, fluxo de detritos, dentre outros.

Neste contexto, considerando que as sondagens do talude foram realizadas em meses considerados chuvosos na região Sudeste do Brasil, torna-se interessante realizar um estudo sobre a análise de infiltração em conjunto com a análise de estabilidade durante um período de

chuva crítico nesta seção.

3.2.1 Condições iniciais de contorno

As sondagens utilizadas para definir a estratigrafia do talude foram realizadas em períodos chuvosos da região Sudeste Brasileira, entre os meses de Outubro e Novembro de 2011. Inicialmente foram avaliados os volumes de chuvas ocorridas neste período, através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de precipitações foram fornecidos pela Estação Meteorológica nº 83075, da cidade de Guarulhos (SP). A Figura 4 apresenta os dados de precipitação para os anos de 2011 e 2012.

Através da análise dos pluviogramas médios mensais (Figura 4), observou-se que no ano de 2011 ocorreu um extenso período de seca entre os meses de Maio a Setembro. Após isso, ocorreu um extenso período chuvoso, com início em Outubro de 2011. Este período de seca é capaz de rebaixar a linha do lençol freático naturalmente, causando algumas incertezas em relação ao nível piezométrico adotado pelas sondagens. Assim como, no período chuvoso podem ocorrer grandes flutuações do nível piezométrico.

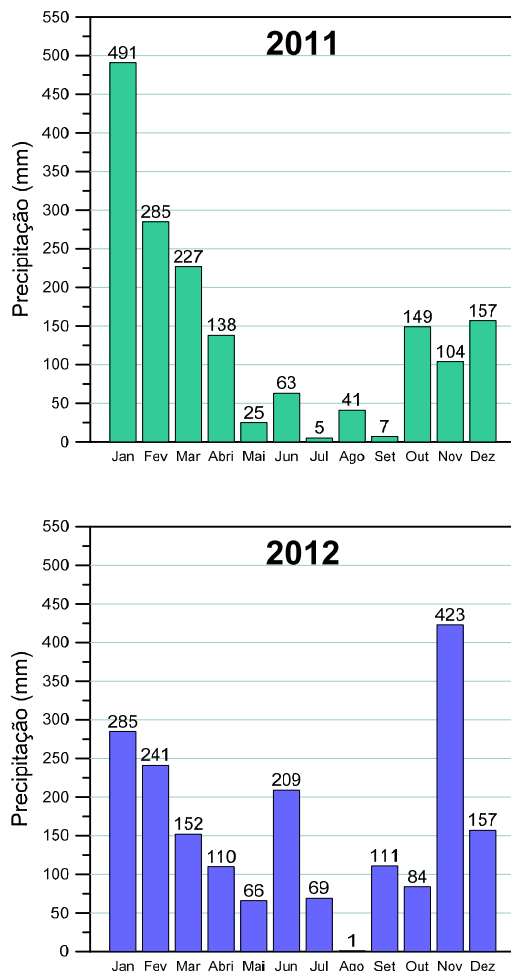


Figura 4. Pluviograma acumulado médio mensal da estação meteorológica do município de Guarulhos, referente aos anos de 2011 e 2012 (INMET).

A análise de percolação foi realizada utilizando os dados pluviométricos diários acumulados correspondentes a 150 dias, referentes aos meses de Outubro de 2011 a Fevereiro de 2012. Os dados de chuva foram aplicados como condição de contorno na superfície do talude. Como trata-se de uma análise de fluxo transiente, considerou-se o nível piezométrico inicial igual ao nível d'água identificado nas sondagens SPT.

3.2.2 Influência da infiltração de água no talude

As análises foram realizadas considerando algumas hipóteses simplificadoras, tais como:

- Material isotrópico;
- Razão K_y'/K_x' igual a 1

O software fornece uma série de modelos de curvas para estimar o teor de umidade

volumétrico de diferentes tipos de solos. A Figura 5 apresenta as curvas características para as camadas de solo. A estimativa da função condutividade hidráulica foi realizada utilizando-se o teor de umidade residual (Figura 5) e o coeficiente de permeabilidade do solo. A Figura 6 apresenta a função condutividade hidráulica para as camadas consideradas.

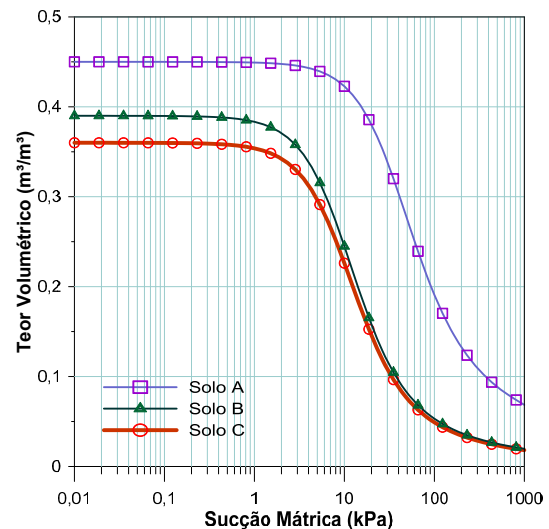


Figura 5. Curva característica para as camadas de solo A, B e C.

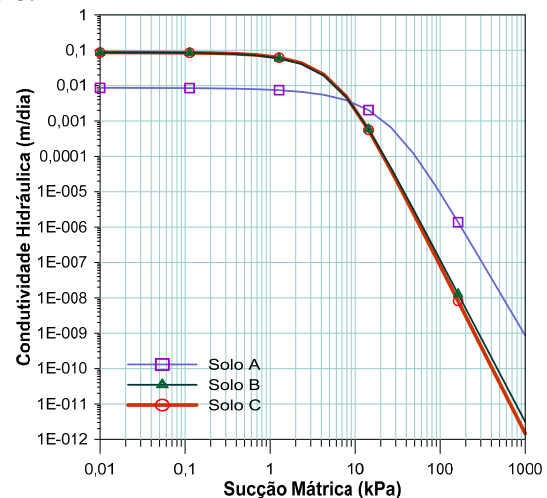


Figura 6. Função condutividade hidráulica para as camadas de solo A, B e C.

Após a estimativa do nível piezométrico inicial, das curvas características e das funções de condutividade hidráulica para as camadas de solo consideradas, aplicou-se uma simulação considerando um fluxo transiente e uma intensidade de chuva aplicada na superfície do talude em um período de 150 dias.

Os resultados para a condição inicial e após 150 dias de chuva variável são apresentados nas Figuras 7 e 8. Através das Figuras observa-se

uma estimativa da movimentação do lençol freático e os valores da distribuição das cargas

totais nas camadas de solo.

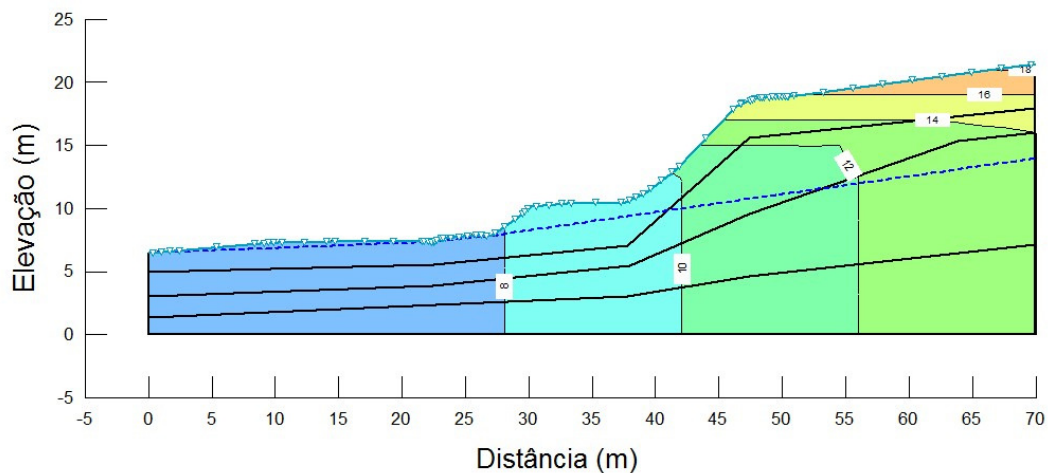


Figura 7. Isovalores de carga total e representação do nível piezométrico para o talude na condição inicial.

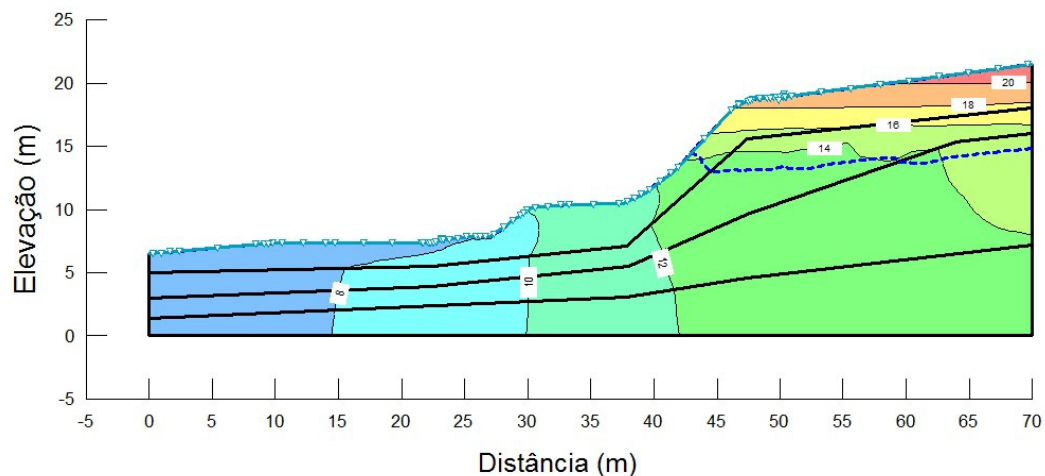


Figura 8. Isovalores de carga total e representação do nível piezométrico para a condição de 150 dias após o início do período de chuvas.

Adicionalmente observa-se que o lençol freático, que na sua condição inicial, situava-se sob o pé do talude foi alterado elevando-se até o início da região da crista, saturando praticamente toda a camada de solo C. Os efeitos dessa variação do nível d'água foram observados para precipitações mensais médias da ordem de 190 mm com período máximo de 285 mm. Destaca-se ainda que para essa região pode ocorrer precipitações mensais superiores a 400 mm (Figura 4). Desta forma, o nível d'água pode se elevar ainda mais do que o nível previsto nessas análises.

A variação da pressão neutra foi avaliada através de alguns pontos distribuídos no interior do maciço. Os pontos apresentados na Figura 9 representam piezômetros instalados no interior do talude.

Observou-se que os valores de poro-pressão se mantiveram crescentes ao longo do tempo em todos os pontos. A variação média foi de 20 kPa (Figura 10). Essa variação implica em um decréscimo da tensão efetiva do solo e consequentemente da resistência ao cisalhamento das camadas de solo.

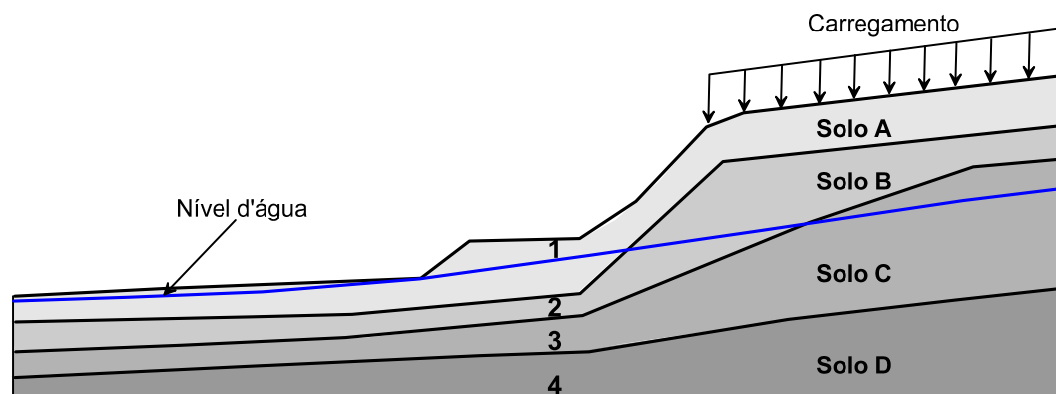


Figura 9. Pontos de referência para as análises de pressão neutra e cargas totais.

Ressalta-se que essas análises podem ser estendidas ao longo de todo o talude, ratificando os efeitos negativos proporcionados pela ação da água que infiltra no solo. Além disso, esses efeitos são diretamente prejudiciais para a resistência das camadas de solo e portanto essas análises são fundamentais para a adequada compreensão do fenômeno físico antes da verificação da estabilidade do talude.

3.2.3 Análise da estabilidade global após o período de chuva

Os resultados anteriores mostraram que a simulação numérica, baseada em parâmetros hidráulicos do material, pode ser capaz de simular a elevação do lençol freático no pé do talude e a variação da sucção em regiões mais próximas ao lençol freático.

Desta forma, foram utilizados os perfis de pressão neutra para avaliar a variação do fator de segurança ao longo do tempo. A Figura 11 apresenta os valores do fator de segurança mínimo em relação ao tempo, para o perfil estudado. Durante todo o intervalo de tempo, aplicou-se uma intensidade de chuva diária variável, utilizando os dados de chuva diários fornecidos pelo INMET.

Os resultados da simulação (Figura 11) indicaram que durante os primeiros treze dias, o fator de segurança apresentou um decréscimo mais acentuado linearmente, sendo que o talude atingiu um fator de segurança muito próximo da iminência de ruptura. Após esse período, o fator de segurança ultrapassou o limite de ruptura, apresentando pouca variação até o final de 90 dias, quando observou um decréscimo mais acentuado. Observa-se que após esse período o fator de segurança volta a cair rapidamente, sem

apresentar sinais de estabilização.

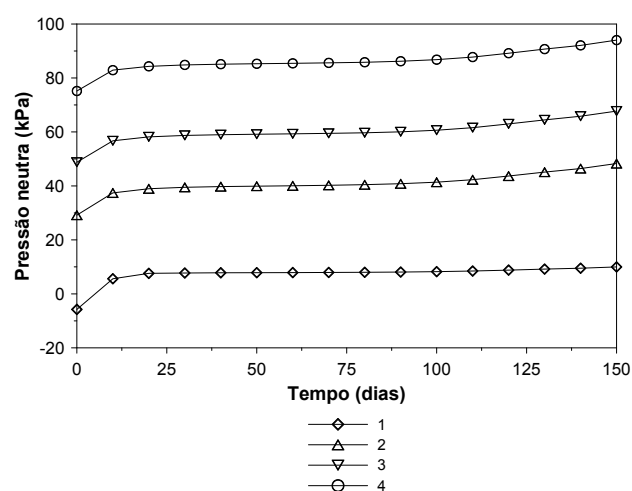


Figura 10. Influência da pressão neutra no solo após a infiltração de água.

A Figura 12 apresenta a superfície crítica de ruptura com o menor fator de segurança obtido em relação ao período de chuva. Observa-se que o fator de segurança apresentou um decréscimo de 32% em relação ao fator de segurança do talude antes do período de chuva.

De maneira geral os resultados destacam a importância dessas análises de infiltração de água no solo e a importância desta ferramenta para a tomada de decisão. Isto porque, mesmo um talude estável com um fator de segurança maior que 1.5 pode apresentar risco de ruptura após uma intensa temporada de chuva.

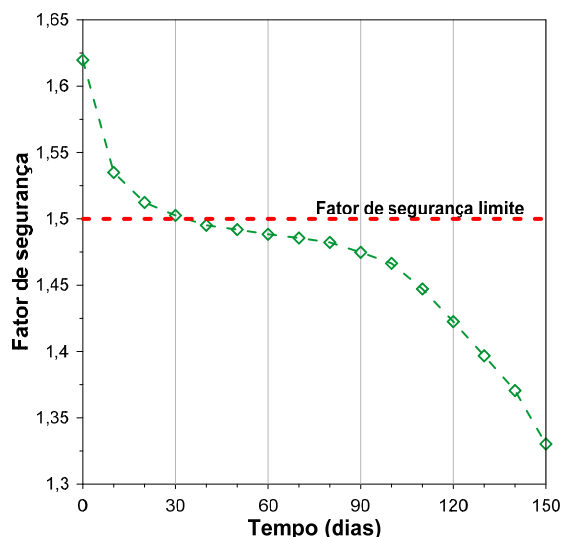


Figura 11. Variação do fator de segurança ao longo do tempo.

4 CONCLUSÃO

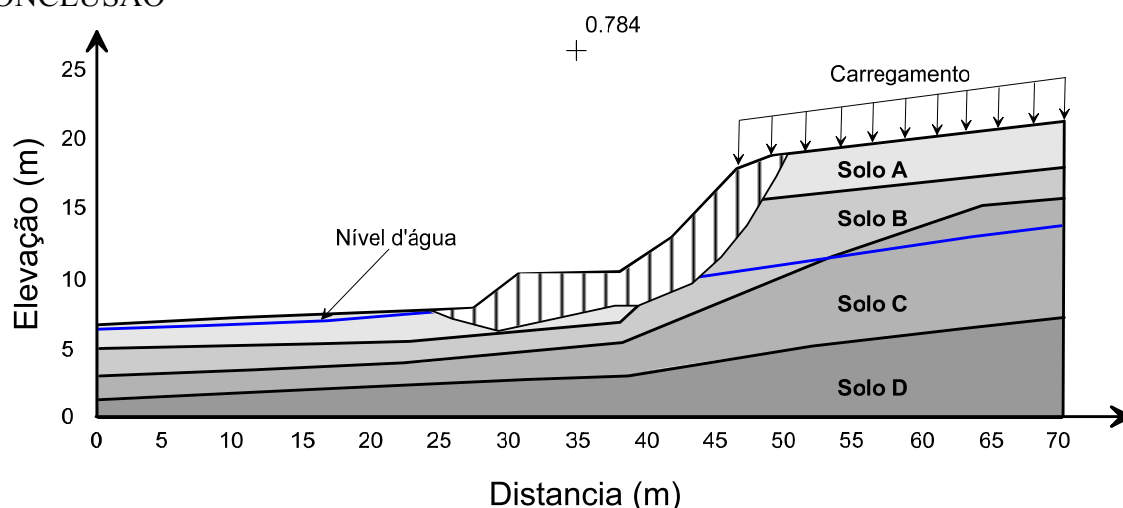


Figura 12. Superfície crítica de ruptura ($F_{s_{\min}}$) considerando a influência da água após 150 dias de chuva.

A análise da influência de um período intenso de chuvas provou ser de fundamental importância, uma vez que o fator de segurança após 150 dias de chuva diminuiu cerca de 32% do valor original e indicando o comprometimento da estabilidade. Desta forma, para esta seção se faz necessário a aplicação de uma técnica de reforço para o aumento da sua estabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Geo-Slope International Ltda. pelo fornecimento da licença temporária do programa e a GeoFast pelo suporte técnico que possibilitou o desenvolvimento deste estudo de caso.

Neste trabalho foi apresentado um estudo da estabilidade de uma seção considerada crítica, localizada na pista marginal sul da rodovia Presidente Dutra próximo ao município de Guarulhos. Além da estabilidade global para o talude na condição natural, foi considerada a influência das estações chuvosas na região.

A análise de infiltração da água da chuva indicou que o nível d'água variou consideravelmente. Os valores de pressão neutra apresentaram uma tendência de crescimento ao longo do tempo. O maior aumento percentual ocorreu para o início do período chuvoso.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2009). NBR 11682. Estabilidade de taludes, Rio de Janeiro, 34 p.
- Jesus, A. (2008) *Retroanálise de escorregamentos em solos residuais não saturados*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 283 p.
- Montoya, C. A. (2013) *Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília.
- Soares, A. B. (2006) *Fluxo de água em talude arenoso: modelagem física e numérica*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.