

## **RETRO-ANÁLISE DA RUPTURA DE ENCOSTA NO RIO DE JANEIRO, BRASIL**

### **BACK ANALYSIS OF A SLOPE FAILURE IN RIO DE JANEIRO, BRAZIL**

Gerscovich, Denise M. S., *Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, deniseg@uerj.br*

de Campos, Tacio Mauro P., *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, tacio@civ.puc-rio.br*

Vargas Jr., Eurípedes A., *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, vargas@civ.puc-rio.br*

#### **RESUMO**

Movimento de massa induzido pela infiltração de águas de chuva é um fenómeno comum em regiões montanhosas tropicais. No entanto, é muito difícil prever quando e onde o deslizamento pode ocorrer. Em Novembro de 1988, houve um grande escorregamento em uma encosta na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. No entanto, chamava atenção o fato de que, 9 meses antes da ruptura, chuvas de intensidade muito superiores haviam ocorrido na cidade. Modelagens numéricas tridimensionais do processo de fluxo indicaram que a infiltração de chuva seria insuficiente para deflagrar a ruptura. Este trabalho apresenta retro-análises da estabilidade da encosta. Malhas de poropressão foram construídas a partir de resultados da modelagem numérica, considerando diferentes padrões de fluxo. Os factores de segurança confirmam que o principal mecanismo deflagrador da ruptura não está associado à infiltração da água de chuva.

#### **ABSTRACT**

Rainstorm-induced landslides are fairly common in mountainous tropical regions. Nevertheless, it is very difficult to predict where or when a slide may occur. In November 1988, a huge deep-seated slide occurred in a slope in Rio de Janeiro, Brazil. However, a fact called attention: nine months earlier the whole city suffered with a much more intense rainfall 3D flow numerical modeling indicated that the rain infiltration would be insufficient to trigger the landslide. This paper presents back-analyses of the slope stability. Pore pressure meshes were built according the numerical results, considering different flow patterns. Safety factors proved that the main failure trigger mechanism was not associated to the rainfall infiltration.

#### **1. INTRODUÇÃO**

Escorregamentos em solo e/ou rocha, algumas vezes com consequências catastróficas, ocorrem de tempos em tempos na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. O clima tropical, caracterizado por temperaturas anuais relativamente altas, acima de 22°C, e verões chuvosos, propicia o desenvolvimento de perfis de solo, relativamente espessos, como resultado da acção do intemperismo. Apesar dos avanços científicos no que diz respeito ao desenvolvimento de métodos de investigação de solos não saturados e de ferramentas de análise de estabilidade, na maioria dos casos, é muito difícil prever quando ou onde o deslizamento pode ocorrer.

Em Novembro de 1988, após 19 dias de chuva, totalizando 246mm, ocorreu um escorregamento de grandes proporções em uma encosta adjacente, a um prédio de classe media alta, localizada em uma área turística da cidade. O movimento da massa de solo invadiu o estacionamento do

prédio, soterrou carros, destruiu alguns apartamentos e causou o cisalhamento de um pilar. A Figura 1 mostra uma foto do local no dia seguinte ao escorregamento. Na ocasião, chamou atenção o fato de que, em Fevereiro do mesmo ano, chuvas de intensidade muito superiores (474mm em 21 dias) haviam ocorrido na cidade; causando centenas de rupturas de diferentes magnitudes. Em outras palavras, questionava-se porque uma chuva de maior intensidade não deflagrou o escorregamento. Por outro lado, havia uma dependência clara entre a precipitação e a ruptura, já que após o escorregamento e ao longo da semana seguinte ao evento, a superfície de ruptura encontrava-se completamente saturada, com surgência de água na sua parte superior, apesar de não haver indícios da presença de nível d'água na encosta.

Simulações numéricas 3D do processo de fluxo na encosta (Gerscovich et al, 2006) indicaram que a infiltração de chuva a partir da superfície da encosta seria insuficiente para caracterizar a condição de saturação da superfície de ruptura, observada após o escorregamento. Foram testados diferentes cenários, sendo considerada, inclusive, a possibilidade de uma eventual saturação do topo da encosta, em virtude de mal funcionamento do sistema superficial de drenagem, localizado no topo do talude. Nenhuma alternativa foi capaz de reproduzir a condição de saturação da encosta. Como resultado, concluiu-se que somente uma infiltração através da base da encosta, gerada por saturação das fracturas, poderia justificar o nível de saturação observado no campo.

Este trabalho complementa as pesquisas sobre a compreensão dos mecanismos deflagradores da ruptura da encosta. Apresentam-se os resultados das retro-análises do escorregamento, considerando-se as diferentes hipóteses de distribuição de pressão de água nos poros, previstas pelos estudos numéricos de fluxo 3D na encosta.



Figura 1 – Vista do escorregamento

## 2. DESCRIÇÃO DO LOCAL

A encosta era constituída por uma camada de solo residual de espessura variável, sobrejacente a um gnaisse, com elevado grau de fraturamento no contacto com o solo saprolítico. A inclinação variava de 30° a 55° e a superfície do talude estava coberta por uma vegetação não nativa. A rocha de origem aflorava à esquerda e no topo da encosta (Figura 1). No pé do talude havia um muro de peso, adjacente a uma cortina ancorada e, no topo, havia um sistema de drenagem superficial.

Informações colectadas em plantas topográficas, geradas antes e após o escorregamento e em imagens de fotografias aéreas tiradas entre 1966 e 1975, possibilitaram a reconstituição da topografia original do terreno. A forma da superfície de ruptura mostrou-se ser bem representada por uma elipse com relação largura (perpendicular ao movimento) e comprimento (na direcção do movimento) da ordem de 0,6. A Figura 2 mostra a condição 3D da encosta antes do escorregamento e a vista da secção central

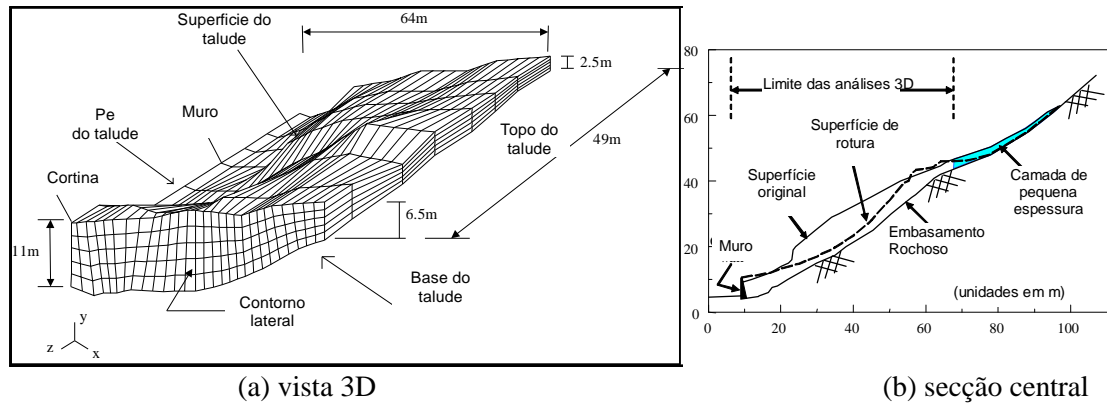


Figura 2. Reconstituição da encosta

### 3. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO GEOTÉCNICA

A determinação do perfil e das características geológicas foi feita a partir de sondagens mistas e ensaios geofísicos. Os resultados indicaram a presença de solo residual originado de rocha metamórfica de gnaise, de espessura variando 0m a 15m. O solo era composto por uma camada superficial de solo maduro de coloração avermelhada com 1m de espessura média, sobrejacente ao solo residual jovem de textura arenosa, de coloração cinza, com indicações claras de alinhamento das partículas, herdadas da rocha mãe. A transição entre a rocha intacta e o solo residual mostrava um alto grau de fracturamento e espessura variando entre 4 a 10m. Não foi observada a presença de água na encosta, a menos de algumas indicações na região da rocha fracturada.

Adjacente a área do escorregamento foram instalados pluviógrafo, piezômetros e tubos de inclinômetro (de Campos et al, 1994). Ensaios com permeâmetro de Guelph foram executados no topo e base do talude, com objectivo de estabelecer o perfil condutividade hidráulica não saturada (Campos et al, 1992).

A campanha de ensaios de laboratório envolveu o desenvolvimento e a execução de modificações nos equipamentos de cisalhamento directo e triaxial de deformação controlada com objectivo de realizar ensaios de resistência com sucção controlada (de Campos et al, 1992). Ensaios de condutividade saturada e de retenção também foram executados e os resultados foram apresentados por Gerscovich et al (2006).

As amostras indeformadas, extraídas da superfície de ruptura e de uma trincheira distante 50m do local da ruptura, indicaram a presença de materiais com características diferentes como mostra o Quadro 1. O solo residual da trincheira é mais granular, apresenta menor índice de vazios e peso específico mais elevado.

Ensaios triaxiais CID foram realizados em amostras saturadas de 100 mm do solo residual jovem extraído da trincheira, mantendo-se o plano de xistosidade inclinado de cerca de 30° com o plano horizontal. Já os ensaios de cisalhamento directo foram executados em amostras da

superfície de ruptura, submersas, com orientação paralela e perpendicular ao plano de xistosidade. Os resultados não mostraram qualquer influência da xistosidade e as envoltórias de Mohr-Coulomb estão mostradas na Figura 3. Apesar das diferenças na textura dos materiais, as envoltórias mostram uma razoável concordância. Observa-se também que, apesar do elevado teor de areia, o solo na região da trincheira apresenta uma coesão não nula, mesmo para baixos níveis de tensão confinante. Já o solo da superfície de ruptura seria mais bem definido por uma envoltória bi-linear

Quadro 1 – Caracterização dos solos

Solo	Superfície de ruptura		Trincheira
	Residual Jovem	Residual Maduro	Residual Jovem
Areia	63.0%	56.0%	82.0%
Silte	27.5%	34.0%	9.8%
Argila	9.5%	10.0%	8.2%
Limite de liquidez ( $\omega_{LL}$ )	38.2%	39.5%	-
Limite de plasticidade ( $\omega_{LP}$ )	NP	24.7%	NP
Teor de humidade ( $\omega$ )	19.02%	21.18%	6.38%
Peso específico dos grãos (G)	2.64	2.63	2.66
Índice de vazios (e)	1.19	1.14	0.62
Peso específico $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.0	14.60	17.10
Peso específico aparente seco $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	11.8	12.06	16.08

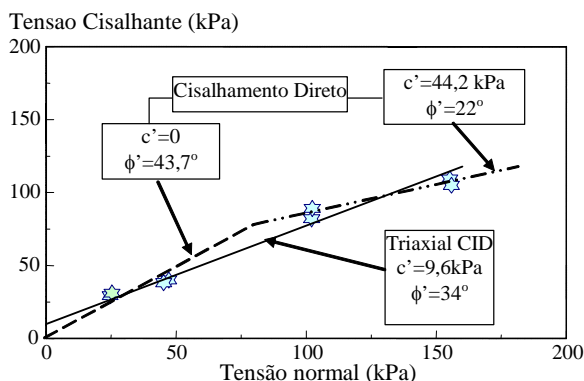


Figura 3 – Ensaios de resistência em amostras saturadas

Ensaios de cisalhamento directo com sucção controlada foram executados em estágios, em amostras da superfície de ruptura, seguindo a trajectória de humedecimento. Em todos os ensaios as amostras foram consolidadas para tensão normal de 50kPa e submetidas a sucções decrescentes de 200 a 15kPa (de Campos et al, 1992). De acordo com Fredlund et al (1978), a envoltória de solos não saturados pode ser expressa por:

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \rho g \phi^b + (\sigma - u_a) \rho g \phi' \tag{1}$$

onde  $u_a$  e  $u_w$  são, respectivamente, a pressão do ar e da água,  $\sigma$  a tensão total;  $c'$  e  $\phi'$  = parâmetros efectivos de resistência e  $\phi^b$  = parâmetro para condição não saturada. Os resultados, mostrados na Figura 4, indicam um comportamento isotrópico e a tendência de uma relação não linear em termos de sucção mátrica. Independente da faixa de sucção os valores de  $\phi^b$  mostraram-se relativamente altos, se comparado com a faixa entre 13° e 15° reportada por Ho e

Fredlund (1982). Com isso, a perda de sucção devido a processos de infiltração de chuva resulta em uma redução significativa da resistência ao cisalhamento do solo

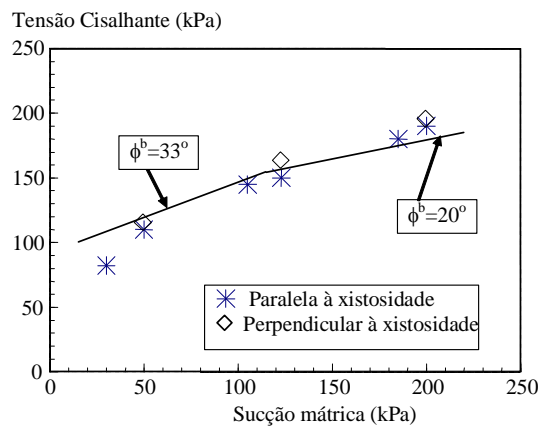


Figura 4. Tensão Cisalhante ( $\tau$ ) vs Sucção mátrica ( $u_a - u_w$ )

#### 4. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As retro-análises de estabilidade foram realizadas utilizando-se o programa SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd), que calcula o factor de segurança em secções 2D, segundo diversos métodos de equilíbrio limite.

As análises foram realizadas assumindo perfil homogêneo de solo residual jovem. A camada de solo residual maduro foi desprezada em função de sua pequena espessura. Os parâmetros geotécnicos adoptados estão mostrados no Quadro 2, sendo  $\phi^b$  considerado constante e igual a média dos resultados experimentais (Figura 3). Cabe ressaltar que esses parâmetros correspondem aos valores de resistência de pico; as curvas tensão x deformação não apresentaram qualquer indicação de perda de resistência para níveis de deformação elevados.

Quadro 2 – Caracterização dos solos

Parâmetro	Nível de Tensões (kPa)	
	$\leq 80.0$	$>80.0$
$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,5	17,5
$c'$ (kPa)	0	44,2
$\phi'$ (°)	43,7	22
$\phi^b$ (°)	25	25

As malhas de poropressões no interior da massa de solo foram estimadas através de simulações numéricas do período de chuvas que antecedeu o escorregamento (Gerscovich et al, 2006). Para tal, foi utilizado um programa de elementos finitos (FLOW3D) que soluciona problemas de fluxo 2D ou 3D, permanente ou transiente, em meios saturado e não saturado (Gerscovich, 1994). Foram estudados os seguintes cenários:

Caso 1: Padrão de fluxo gerado pela infiltração de água de chuva durante 21 dias (01 a 22 de Fevereiro, quando a chuva acumulada foi cerca de 2 vezes maior do que a registrada em Outubro/Novembro, quando houve o escorregamento. Os resultados desta simulação indicaram, no terço inferior do talude redução da sucção a valores de próximos de zero; não houve o desenvolvimento de poropressões positivas (Figura 5).

Caso 2: Padrão de fluxo gerado pela infiltração de água de chuva durante os 19 dias de precipitação que antecederam o escorregamento, admitindo saturação completa de pequena camada de espessura variável, localizada no topo da encosta (Figura 2b). Esta hipótese surgiu como resultado da observação no campo de obstrução das caleiras de drenagem superficial. Simulações numéricas de fluxo nesta pequena camada confirmaram a viabilidade desta hipótese (Gerscovich et al, 2006). Por outro lado, impondo-se cargas de pressão no topo da encosta (Figura 6) observa-se o desenvolvimento de poropressões positivas na metade superior da superfície de ruptura, como resultado do avanço de frente de saturação. Este padrão de fluxo, entretanto, não reproduz as evidências de campo em que toda a superfície de ruptura se apresentava saturada.

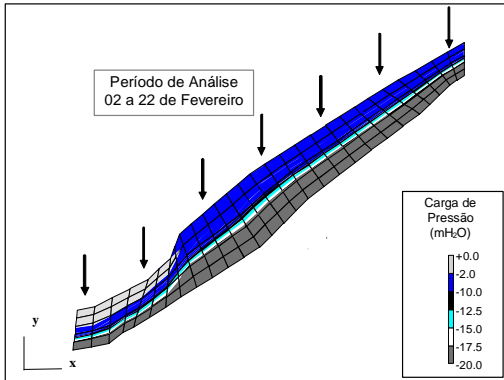


Figura 5 - Distribuição de carga de pressão em Fevereiro 1988 (Gerscovich et al, 2006)

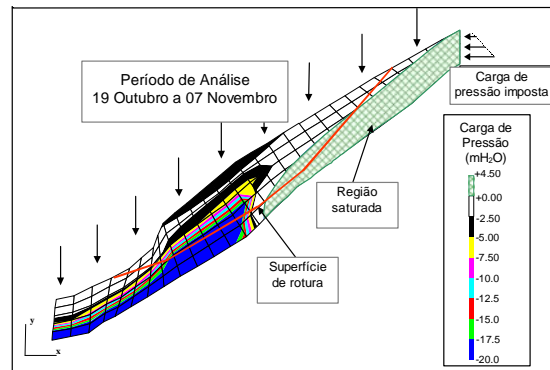


Figura 6 - Distribuição de carga de pressão com saturação no topo (Gerscovich et al, 2006)

Caso 3: Padrão de fluxo gerado pela infiltração de água de chuva durante os 5 dias de precipitação que antecederam o escorregamento (Figura 7), admitindo saturação completa de pequena camada localizada no topo da encosta, associada a existência de fluxo preferencial através da camada de transição de rocha fracturada incidindo directamente na base da encosta. O papel de fracturas no embasamento rochoso gerando poropressões positivas em taludes já foi registrado na literatura (Wilson, 1988). Assim sendo, a percolação das águas de chuva através das fracturas é uma hipótese possível mas de difícil simulação visto a impossibilidade de se identificar as reais condições de contorno a que o talude estaria submetido. Desta forma, utilizou-se um modelo simplificado como mostra a Figura 7.

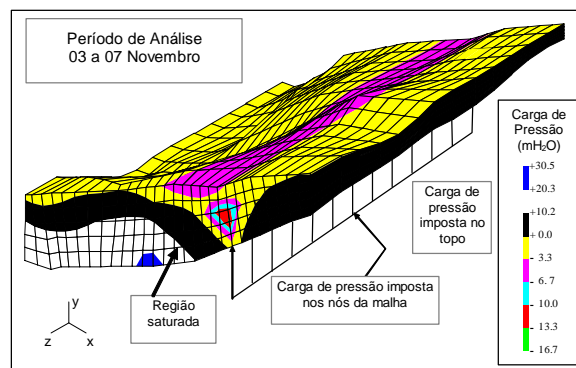


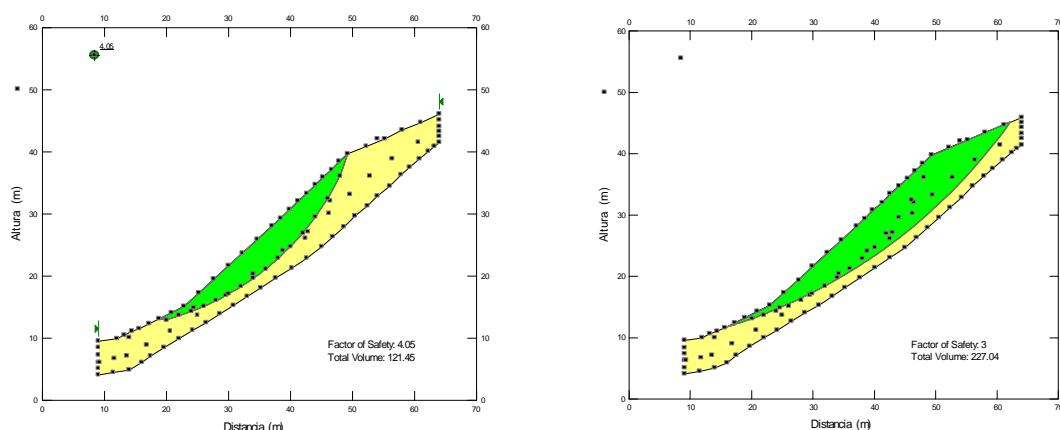
Figure 7. - Distribuição de carga de pressão com fluxo na base (Gerscovich et al, 2006)

#### 4.1. Resultados

As análises de estabilidade foram realizadas para a geometria do talude coincidente com a secção central da encosta, considerando as diferentes hipóteses de padrão de fluxo, mostradas nas Figuras 5 a 7. Os valores de sucção foram introduzidos no programa através de uma malha de pontos.

A Figura 8 mostra os resultados do programa SLOPE/W para o método de Morgenstern & Price, considerando a superfície de ruptura observada no campo (FS=4,1) e usando a alternativa de pesquisa do círculo crítico (FS=3,6). Observa-se, que a pesquisa do círculo resulta em factor de segurança mais baixo e numa superfície critica ligeiramente diferente.

Todos os resultados das análises de estabilidade estão resumidos no Quadro 2. Observa-se que, independente do método de análise, o volume de chuvas de Fevereiro de 1988 (Caso 1) e, conseqüentemente de Outubro de 1988, não seria suficiente para deflagrar a ruptura. Adicionalmente, atribuir ao mal funcionamento do sistema superficial de drenagem a responsabilidade pelo escorregamento também mostrou-se como uma alternativa inconclusiva, já que se obteve FS variando entre 1,5 a 2,3. Cabe ressaltar que os efeitos 3D observados na superfície de rotura de campo acarretariam em valores de FS cerca de 20% maiores do que os calculados no Quadro 2.



(a) Superfície observada no campo

(b) Superfície circular

Figura 8 – Análise de Estabilidade do Caso 1 - Método de Morgenstern & Price

Quadro 2- Factores de Segurança

Método	Caso 1: 21 dias de Chuva (Fevereiro 1988)	Caso 2 19 dias de Chuva (Outubro 1988) + Saturação topo	Caso 3 5 dias de Chuva (Outubro 1988)+ Saturação topo + Surgência na Base
Jambu	3,52	1,46	0,26
Bishop	3,47	1,60	0,31
Morgenstern & Price (pesquisa om superfície circular)	3,62	1,54	0,15
Morgenstern & Price (superfície campo)	4,05	2,26	-

A hipótese de percolação de água através das fracturas no embasamento rochoso resultou em factores de segurança extremamente baixos, tornando o problema indeterminado para a superfície de rotura de campo.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objectivo avaliar a estabilidade da encosta sob diferentes padrões de fluxo. Os resultados mostraram que, para o conjunto de parâmetros de geotécnicos, malhas de poropressão e condições de contorno, admitidos para este talude, seria necessário o desenvolvimento de poropressões positivas para que a ruptura pudesse ser justificada analiticamente.

É possível que o escorregamento tenha sido deflagrado por acções combinadas de infiltração de água em diferentes pontos do talude. Em resumo, as condições hidrológicas podem ter sido mais complexas do que as admitidas nas simulações numéricas do regime de fluxo na encosta.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de apoio a pesquisa FAPERJ e CNPq pelo suporte financeiro. REFERÊNCIAS

- Campos, J.L.E.; Vargas Jr, E.A. & De Campos, T.M.P. (1992). Avaliação de Campo da Permeabilidade Não-Saturada de Solos em Encostas. *1a Conferencia sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro*, 1, 371-382.
- de Campos, T.M., Andrade, M.H.N, Gerscovich, D.M.S. & Vargas JR., E.A. (1994) - Analysis of the Failure of an Unsaturated Gneissic Residual Soil Slope in Rio de Janeiro, Brazil - 1st. *Pan American Symposium of Landslides* - Guayaquil, Equador, vol.I, pp.201-213.
- de Campos, T.M.P.; Carrillo, C.D; Tibana, S.; Aguillar, S.A.S. and Fonseca, E.C. (1992). Determination of soil-water characteristic curve in the laboratory, *1st Brazilian Conference on Slope Stability*, Rio de Janeiro, Brazil. V.2, pp.835-851 (in Portuguese)
- Fredlund, D.G.; Morgenstern, N.R. e Widger, R.A. (1978) - The Shear Strength of Unsaturated Soils - *Canadian Geotechnical Jr.*, vol.15, pp 228-232.
- GEO-SLOPE International Ltd. SLOPE/W for slope stability analysis, version 5.0
- Gerscovich D.M.S.; Campos T.P.P.; Vargas Jr E.A. (2006) On the evaluation of unsaturated flow in a residual soil slope in Rio de Janeiro Brazil. *Engineering Geology*. ISSN /0013-7952, v.88, p.23 - 40, 2006.
- Gerscovich, D.M.S (1994). *Fluxo em Meios Porosos Saturados-Não Saturados: Modelagem Numérica com Aplicações ao Estudo da Estabilidade de Encostas do Rio de Janeiro*. Tese de Doutorado, DEC/PUC-Rio.
- Ho, D.Y.F e Fredlund, D.G. (1982) - The Increase in Shear Strength due to Soil Suction for two Hong Kong Soils - ASCE Geotechnical Conference on Engineering Construction in Tropical and Residual Soils, Honolulu, Hawaii, Janeiro, pp.263-295.
- Wilson, C.J. 1988. *Runoff and pore pressures in hollows*. PhD Thesis, California University, Berkeley.