

## Modelagem Tridimensional do Regime de Fluxo de um Talude na Cidade do Rio de Janeiro, Brasil

D. M. S. Gerscovich

*Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)*

E. A. Vargas Jr & T. M. P. de Campos

*Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)*

**RESUMO:** O regime de fluxo da encosta localizada na vertente sul do morro dos Cabritos, que margeia a Lagoa Rodrigo de Freitas, na cidade do Rio de Janeiro, foi simulado numericamente utilizando-se o programa de elementos finitos FLOW3D. Este programa incorpora a possibilidade de se modelar tridimensionalmente processos de fluxo transiente em meios saturados e não saturados. Esta encosta sofreu deslizamento em novembro de 1988, após um pequeno período de chuva intensa. Devido aos riscos de novos movimentos de massa, realizou-se neste local uma campanha de investigações geológico-geotécnicas, que incluiu instrumentação e ensaios de campo e laboratório, para determinação dos parâmetros hidráulicos e de resistência. Este trabalho apresenta resultados de simulações de regimes de fluxo na encosta do Morro dos Cabritos, associados aos registros pluviométricos relativos ao período outubro/novembro de 1988.

**ABSTRACT:** The flow process of the south slope of Cabrito's Mountain at Rodrigo de Freitas Lagoon, in Rio de Janeiro, has been simulated with the FLOW3D finite element program. This program executes 3D transient flow processes in saturated/unsaturated media. This slope failed in November 1988 after a small period of intense rainfall. Due to risks of new mass movements, a lot of geological-geotechnical work has been performed in the area, including field instrumentation and laboratory and field tests, to determine the hydraulic and shear strength parameters of the soils. This paper shows the numerical results of the simulation of flow regime within the slope, considering the rainfall data registered in October/November, 1988.

### 1 - HISTÓRICO DO LOCAL

A área em estudo localiza-se na vertente sul do morro dos Cabritos, na Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro. A topografia original da região está apresentada na Figura 1. A elevação máxima da encosta é de 384m e sua inclinação varia de 30° a 55°.

No passado, a área foi palco de ocupação desordenada (favela da Catacumba). No início da década de 70, a favela foi removida e, com o tempo, a encosta foi sendo naturalmente recoberta por uma vegetação típica de região

tropical. Ainda hoje, em alguns pontos da mesma observam-se sinais de ocupação, tais como: aterros, pequenas cisternas e pequenas estruturas.

Em 7 de novembro de 1988, às 15hs, após 5 dias de chuva, a encosta sofreu um deslizamento de grandes proporções, envolvendo um movimento de massa de aproximadamente 5000m<sup>3</sup>. Este escorregamento causou sérios danos materiais e estruturais no prédio adjacente e soterrou dezenas de veículos. Por sorte não houve vítimas.

considerada menos provável, uma vez que a forma da superfície de ruptura sugeria que o escorregamento havia se iniciado na massa de solo acima do muro acarretando, como consequência, seu tomamento por sobrecarga adicional.

#### Figura 1 - Topografia Original da Encosta

A Foto 1, tirada no dia seguinte, permite avaliar a extensão dos danos materiais causados no Bloco 1 do condomínio localizado na Av. Eptácio Pessoa n°. 2566, na Lagoa. Nesta foto observa-se também a geologia local, onde uma camada de solo, de espessura variável, recobre parte da encosta e, na região mais alta, ocorre o afloramento de rocha. Nos dias que se seguiram ao deslizamento verificou-se que a superfície de ruptura, tipicamente conchoidal, encontrava-se saturada, inclusive tendo sido observado água brotando na região mais alta. No pé do talude, na região do escorregamento, existia um muro de arrimo com drenos sub-horizontais adjacente a uma cortina atirantada, que se estende paralelamente ao Bloco 2 e nos fundos deste prédio.

- laudo técnico realizado pela Fundação Geo-Rio, órgão da Prefeitura do Rio de Janeiro, atribuiu como causa mais provável a infiltração das águas de chuva na crista do deslizamento, ao longo do contato solo-rocha. Na época foi encontrado, adjacente ao escorregamento, um trecho de canaleta totalmente obstruído, indicando possível falha de conservação do sistema de drenagem superficial. A hipótese de ruptura do muro foi

#### Foto 1 - Escorregamento da Encosta

Um aspecto interessante a ser mencionado é que o escorregamento ocorreu quando as chuvas já haviam cessado e em um período atípico (período seco). No mês de fevereiro do mesmo ano pelo menos 150 ocorrências de instabilidade em solo e/ou rocha foram registradas em toda cidade do Rio de Janeiro, em decorrência de chuvas de alta intensidade e longa duração.

## 2 - CONDIÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Os registros de precipitação diária na época do escorregamento, fornecidos pela SERLA (Superintendência Estadual de Rios e Lagoas) na estação Lagoa de Freitas, situada próxima ao Tívoli Park, a uma distância de aproximadamente 4km da encosta do morro dos Cabritos, estão apresentados na Figura 2.

As medidas indicam um total acumulado de 246,3mm de chuva, nos 21 dias que antecederam o escorregamento.

No mês de fevereiro do mesmo ano, o qual se caracterizou por um período de chuvas intensas e de longa duração, a mesma estação pluviométrica mediu em 21 dias um total acumulado de 515,6mm, tendo sido registrado um valor de 85,4mm de chuva em um único dia.

É evidente que as chuvas registradas em novembro são sensivelmente inferiores às de fevereiro, o que sugere, provavelmente, que o escorregamento do talude não ocorreu por ação exclusiva da precipitação das chuvas sobre a encosta do morro dos Cabritos. Algum fator adicional, não presente em fevereiro, foi determinante para detonar a ruptura.

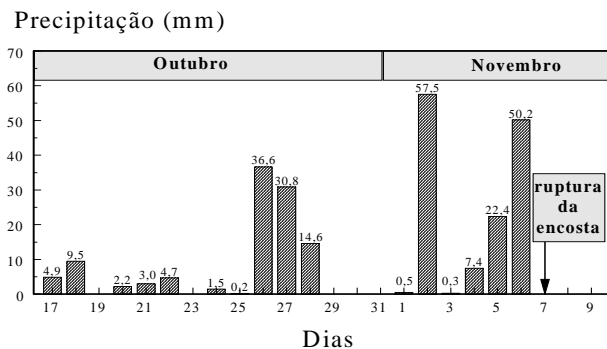


Figura 2 - Precipitações Diárias no Período Outubro/Novembro de 1988

### 3 - INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

Após o escorregamento foi executada uma campanha de investigação de campo e laboratório com o objetivo de caracterizar o perfil e determinar os parâmetros de resistência e hidráulicos representativos do material da encosta.

#### 3.1 - Investigações de Campo

No levantamento geológico realizado por Pires e Bertolino (1989), foi evidenciada a ocorrência de gnaiss kinzigítico. Como resultado de dobramentos, o gnaiss facoidal apresenta-se exposto na região alta da encosta e, na região em que ocorreu o escorregamento, seu mergulho é acentuado. O solo que cobre a encosta nesta região é

resultado do intemperismo do gnaiss kinzigítico; acima da cota 50m ocorre o afloramento do gnaiss facoidal.

Os estudos geofísicos (sísmica), para delimitação da profundidade do topo rochoso, e sondagens mecânicas indicaram uma espessura de solo variável, chegando a valores da ordem de 15m em alguns pontos. O perfil compõe-se basicamente por um solo residual maduro (ou coluvionar) areno-argiloso, com espessura média de 1m, sobrejacente ao solo residual jovem com xistosidade bem definida e matriz arenosa. Na base da camada de solo residual, no contato com o topo rochoso, verifica-se um horizonte de rocha muito alterada.

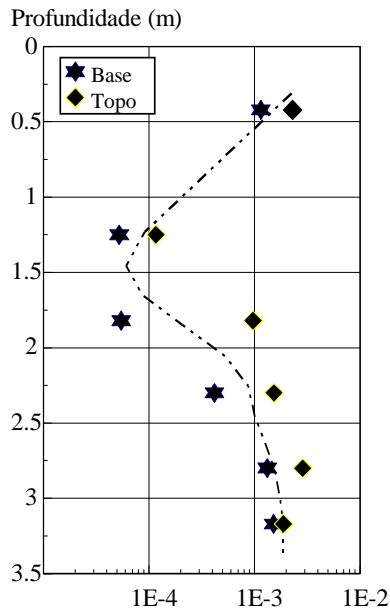
Dois sistemas de fraturamento atravessam os gnaisses, com atitudes aproximadamente paralelas à foliação principal e outra perpendicular, favorecendo a ação do intemperismo.

As sondagens a percussão não indicaram presença de água na encosta. Em algumas sondagens rotativas, o NA foi localizado a grandes profundidades, no horizonte de rocha fraturada. Piezômetros de Máxima (Brandt, 1985), que registram somente as máximas poro-pressões positivas, instalados em furos de sondagem em alguns pontos da encosta, praticamente não indicaram nenhuma leitura, mesmo em períodos de grande intensidade de chuva, com exceção de dois piezômetros instalados na encosta situada atrás do Bloco 2.

A determinação da condutividade hidráulica saturada e sua variação com relação a condições não saturadas foi feita executando-se ensaios com o permeâmetro de Guelph (Campos et al, 1992) em dois pontos do talude na região atrás do Bloco 2. Os resultados, apresentados na Figura 3, indicam a 1,5m de profundidade a presença de uma camada com condutividade hidráulica saturada mais baixa. No restante da faixa de solo ensaiada os valores de condutividade hidráulica saturada tendem a ser relativamente constantes, da ordem de  $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ .

As diferenças entre os perfis de condutividade hidráulica no topo e base do talude, tendendo a valores mais baixos na base, assim como a redução da condutividade com a profundidade já foi verificada por outros autores (Reid et al, 1988 e Vaughan, 1985).

Esta variabilidade espacial, muitas vezes bastante acentuada, tem levado à necessidade de se dar um tratamento estatístico a este parâmetro (Wagnet e Addescott, 1987) e pode ser causadora de desenvolvimentos de poropressão não uniformes no interior da massa de solo.



Condutividade Hidráulica Saturada (cm/s)  
 Figura 5 - Perfil de Condutividade Hidráulica Saturada (Campos, 1993)

### 3.2 - Investigações de Laboratório

As investigações de laboratório compreenderam a execução de ensaios para determinação de parâmetros de resistência (triaxial e cisalhamento direto convencional e com sucção controlada) e ensaios para determinação da condutividade hidráulica saturada e curvas características.

Os blocos indeformados, a partir dos quais foram moldados os corpos de prova, foram retirados da superfície de ruptura, aonde amostrou-se o solo residual maduro, de coloração vermelha e aparentemente homogêneo e isotrópico, e o solo residual jovem, de coloração cinza e xistosidade bem definida. Blocos de solo residual jovem também foram extraídos em trincheiras abertas a uma distância de cerca de 50m do escorregamento, atrás do Bloco 2.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos ensaios de caracterização desses materiais, onde LL e LP são, respectivamente, os limites de liquidez

e plasticidade, G a densidade dos grãos,  $e$  o índice de vazios e  $\gamma_t$  o peso específico natural.

Tabela 1 - Caracterização dos Materiais

| Local Solo                      | Superfície residual jovem | Ruptura residual maduro | Bloco 2 residual jovem |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| Areia (%)                       | 63.0                      | 56.0                    | 82.0                   |
| Silte (%)                       | 27.5                      | 34.0                    | 9.8                    |
| Argila (%)                      | 9.5                       | 10.0                    | 8.2                    |
| LL (%)                          | 38.2                      | 39.5                    | -                      |
| LP(%)                           | NP                        | 24.7                    | NP                     |
| G                               | 2.64                      | 2.63                    | 2.66                   |
| $e$                             | 1.19                      | 1.14                    | 0.62                   |
| $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14.0                      | 14.6                    | 17.1                   |

A curva característica, que define a capacidade de retenção de umidade dos solos para uma determinada variação de carga de pressão, do solo residual na superfície de ruptura foi determinada por Fonseca (1991), em ensaios de umedecimento e secagem no equipamento de cisalhamento direto com sucção controlada. Os resultados, apresentados na Figura 4, indicam que os efeitos da histerese são muito pequenos neste material, já que os tramos de umedecimento e secagem são muito próximos.

Ensaio de permeabilidade, executados em laboratório, em amostras do solo residual jovem atrás do Bloco 2, obtidas através de amostragens em bloco na região próximo ao pé do talude, forneceram valores da ordem de  $3 \times 10^{-4}$  cm/s, coerentes com os obtidos no campo.

### 4 - MODELAGEM DO REGIME DE FLUXO

O regime de fluxo na encosta do Morro dos Cabritos foi simulado analiticamente, utilizando-se o programa FLOW3D, procurando-se reproduzir o mais fielmente possível todas as variáveis associadas a este tipo de análise (Gerscovich, 1992).

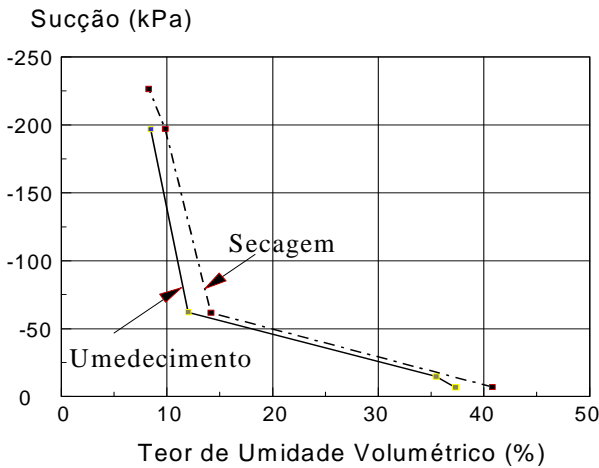


Figura 4 - Curva Característica -Solo Residual Jovem da Superfície de Ruptura

#### 4.1 - Geometria

O perfil da encosta é constituído por uma camada de solo residual maduro de aproximadamente 1m de espessura sobrejacente a um espesso manto de solo residual jovem. Com base nas fotografias aéreas datadas de 1966 e 1975 e a partir do levantamento topográfico, realizado após o escorregamento, recompôs-se a superfície original do terreno.

A profundidade do topo rochoso foi determinada a partir do resultado de algumas sondagens e de informações sobre as profundidades dos tirantes instalados recentemente, durante as obras de recuperação da encosta.

#### 4.2 - Condições de Contorno

##### 4.1.1- Temporal

A equação de fluxo, por ser transiente, requer o conhecimento da distribuição inicial de carga de pressão (ou umidade), anterior ao período ao qual deseja-se executar a simulação. Esta informação é em geral muito difícil de ser obtida já que exigiria um monitoramento prévio do talude ou, eventualmente, de se dispor de um banco de dados com registros de teor de umidade (ou valores de sucção) e curvas características, que possibilitasse uma estimativa destas condições antecedentes.

Registros de umidade no solo residual jovem, localizado atrás do Bloco 2, indicaram

valores de teor de umidade da ordem de 22% na superfície e uma redução gradual com a profundidade, sendo que abaixo dos 2m esta é aproximadamente constante, em torno de 7,5%.

Embora o solo residual jovem que constitui toda a encosta tenha sido provavelmente originado a partir da mesma rocha mãe, foram observadas pequenas diferenças no que diz respeito às propriedades físicas dos materiais extraídos da superfície de ruptura e da região atrás do Bloco 2 (vide Tabela 1). No caso do solo residual atrás do Bloco 2, teores de umidade da ordem de 25%, estariam associados a graus de saturação próximos de 100%, enquanto que no caso do solo residual na superfície de ruptura, os teores de umidade correspondentes estariam na faixa de 40%, indicando claramente uma possível defasagem entre as curvas características dos dois materiais.

Sendo assim, a adoção dos valores de umidade, determinados no campo para o solo residual jovem atrás do Bloco 2, para definição das condições antecedentes de sucção da encosta, significaria superestimar os valores de sucção inicial.

Apesar desta dificuldade admitiu-se que o solo próximo a superfície estaria saturado, havendo uma redução progressiva do grau de saturação com a profundidade, sendo que para a região abaixo dos 2m a carga de pressão inicial foi considerada constante e igual a -200kPa.

##### 4.1.2 - Espacial

No contorno, assumiu-se que a superfície do talude esteve sujeita a uma seqüência de eventos pluviométricos de igual intensidade aos valores registrados na estação da SERLA (vide Figura 2). Estes registros referiam-se a leituras realizadas na estação Tívoli Park, distante aproximadamente 4km da encosta do morro dos Cabritos. Em vista da variabilidade espacial dos eventos pluviométricos, tais registros poderiam tanto subestimar ou superestimar os reais valores de precipitação ocorridos em novembro de 1988. Em 1990, instalou-se um pluviógrafo no telhado do prédio (Bloco 1), adjacente à encosta do morro dos Cabritos. Comparando-se os registros de ambas estações (De Campos et al, 1992),

verificou-se que os histogramas eram semelhantes, com uma pequena tendência da estação Tívoli Park apresentar picos de chuva mais altos. Considerando que, antes do escorregamento, a encosta era coberta por densa vegetação, as intensidades de chuva que chegaram à superfície do terreno foram menores do que as registradas pelo pluviógrafo, já que parte da precipitação teria sido interceptada pela vegetação.

As extremidades laterais foram admitidas como superfícies impermeáveis; isto é, considerou-se a inexistência de fluxo transversal à região do escorregamento. Esta condição é hipotética, já que a topografia irregular da encosta poderia eventualmente propiciar direções de fluxo não necessariamente paralelas ao sentido longitudinal do escorregamento.

Quanto ao pé da encosta, admitiu-se que na época do escorregamento os drenos encontravam-se inoperantes, tendo sido portanto considerada como impermeável.

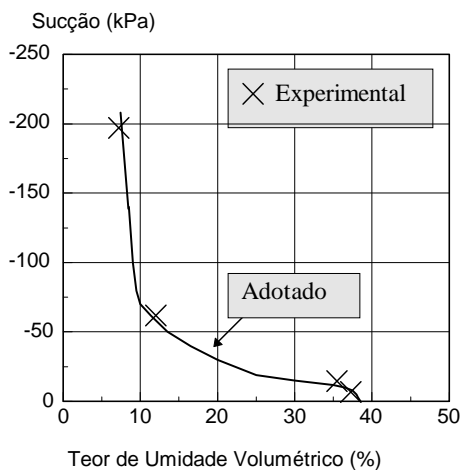
A superfície inferior do talude, no contato com o embasamento rochoso, também foi considerada como fronteira impermeável.

Na parte alta da encosta, acima da região escorregada, ocorre uma capa de solo coluvionar ou residual maduro, de pequena espessura (variando de zero a 4m), comprimento aproximado de 29m e se estende

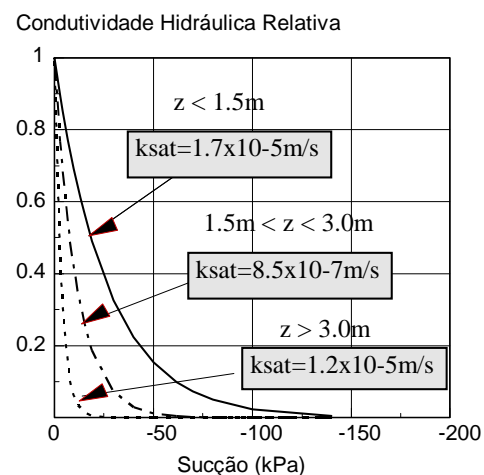
em toda área do topo da encosta até encontrar o afloramento do gnaiss facoidal. Tendo em vista sua pequena espessura, esta camada não foi incorporada diretamente nas análises, uma vez que acarretaria na necessidade de se aumentar sensivelmente a discretização da malha de elementos finitos, causando um aumento significativo nos tempos necessários para a execução do programa. Assumiu-se, então, como hipótese, que a partir de 02/11/87, quando a precipitação registrada foi de 57.5mm, toda região do topo já se encontrava saturada, impondo uma carga hidrostática de água em toda a face superior do topo da encosta. Esta hipótese foi verificada numericamente, em análises bidimensionais, simulando-se os eventos pluviométricos nos 17 dias anteriores ao dia 02/11/87. Neste estudo considerou-se a influência do paredão rochoso na captação das águas de chuva (Gerscovich et al, 1992a) e admitiu-se, como condição inicial, carga de pressão constante e igual a -10kPa. Os resultados indicaram que a saturação ocorre rapidamente, satisfazendo, portanto, a adoção desta premissa.

#### 4.2 - Parâmetros Adotados

Os parâmetros hidráulicos (curva característica e a relação entre condutividade hidráulica e carga de pressão) adotados nas



(a) Curva Característica



(b) Curvas de Condutividade Hidráulica

Figura 5 - Parâmetros Hidráulicos Adotados



análises estão apresentados na Figura 5. A curva característica foi ajustada com base nos resultados de ensaios de laboratório (Fonseca, 1991). As relações entre condutividade hidráulica relativa (definida como sendo a relação entre a condutividade hidráulica real e a condutividade hidráulica saturada) e carga de pressão foram estabelecidas com base nos ensaios de campo (Campos et al, 1992) e admitidas variáveis com a profundidade.

#### 4.3 - Simulação Numérica do Padrão de Fluxo

Com base nas informações acima, construiu-se a malha tridimensional de elementos finitos, englobando toda a região escorregada, utilizando-se o pré-processador EGMTT, desenvolvido no Depto de Engenharia Civil da PUC-Rio. A discretização da malha constituiu-se de 1820 elementos e 2436 pontos nodais.

Todas as análises foram realizadas inicialmente para condição bidimensional, considerando-se como seção típica a seção longitudinal central na região do escorregamento. A malha bidimensional

constituiu-se de 174 pontos nodais e 140 elementos e é idêntica à tridimensional, considerando-se os elementos no plano X-Y da seção central.

A Figura 6 apresenta os resultados de distribuição de carga de pressão, na análise bidimensional, quando o talude foi submetido a eventos pluviométricos correspondentes aos 5 dias que antecederam o escorregamento, além de uma carga hidrostática de água, em toda a face superior do topo do talude, decorrente da hipótese de saturação rápida da região alta da encosta. Nesta figura apresenta-se também a malha de elementos finitos.

Os resultados, no que diz respeito ao desenvolvimento de poro pressões positivas, indicam avanço da frente de saturação ocorrendo a partir do topo do talude, sem entretanto atingir os limites da superfície de ruptura observada no campo. Caso a carga hidráulica no topo do talude não fosse considerada, as carga de pressão seriam negativas em todo talude, mesmo considerando um período maior de precipitação de chuva sobre a encosta, conforme é verificado na Figura 7.

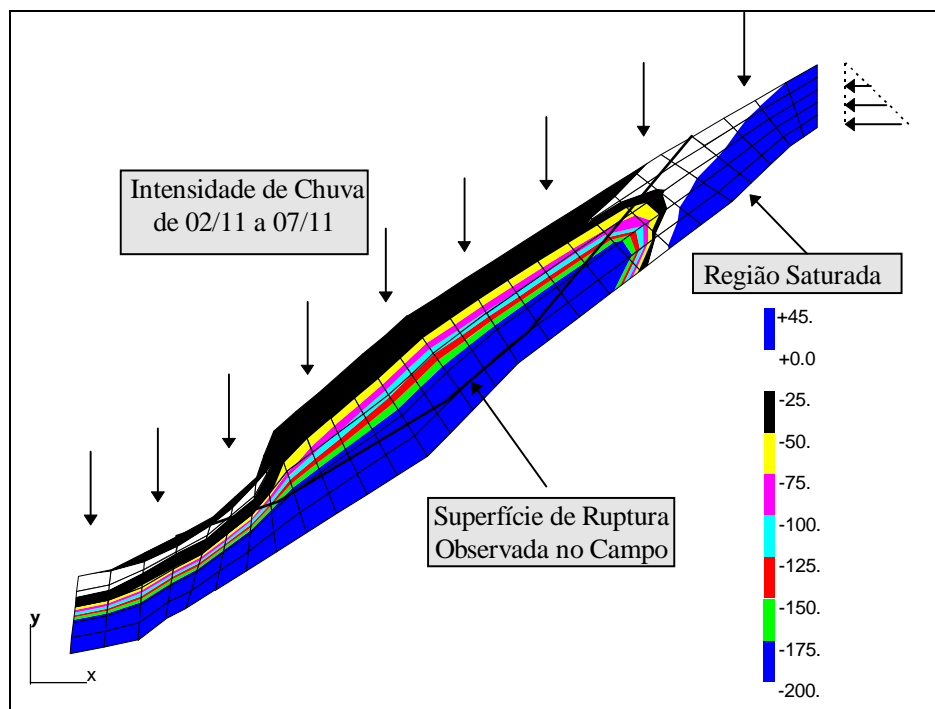


Figura 6 - Distribuição de Carga de Pressão - Carga Hidrostática no Topo - Análise Bidimensional

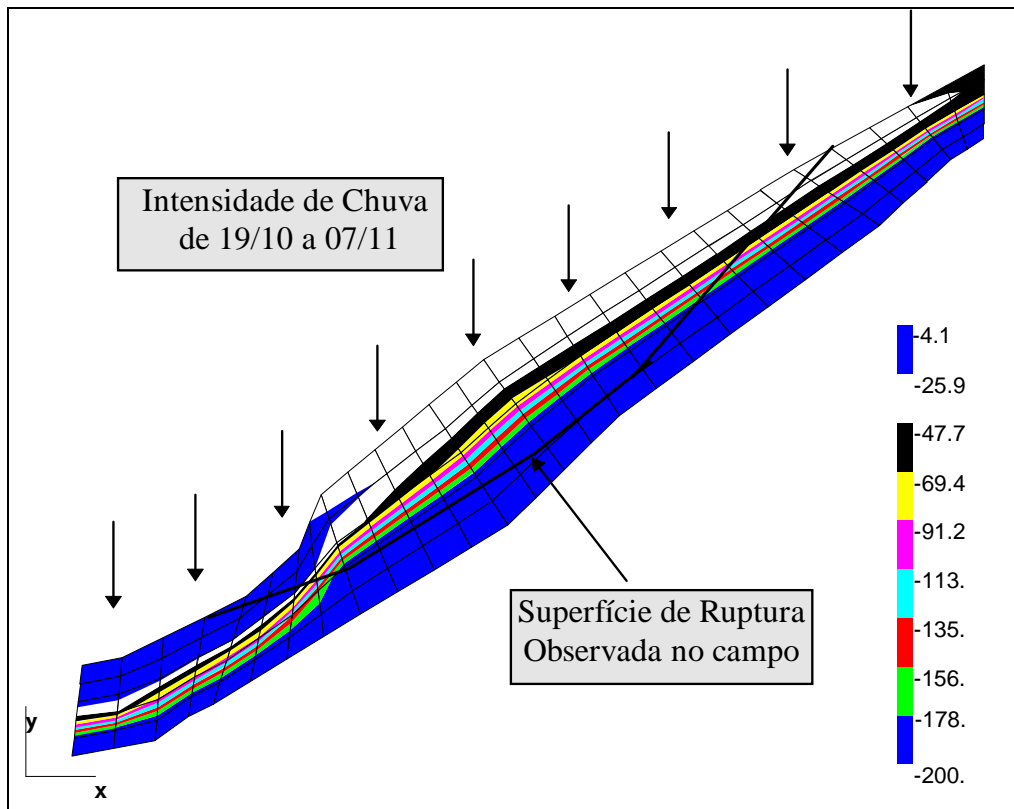


Figura 7 - Distribuição de Carga de Pressão - Análise Bidimensional

Os resultados obtidos em ambas simulações apresentaram um aspecto contraditório com relação às observações de campo. No dia seguinte e até mesmo uma semana após o escorregamento, havia evidências de saturação completa da superfície de ruptura, inclusive com indícios de água brotando na região mais alta. Algumas hipóteses foram, então, cogitadas: a carga hidráulica no topo poderia ter atuado em um período maior; a ruptura do talude poderia ter acarretado em mudanças no padrão de fluxo e, por fim, fraturas no embasamento rochoso poderiam ter sido saturadas, impondo cargas hidráulicas em determinados pontos na base do talude.

O papel do embasamento rochoso na geração de poro-pressões em taludes foi ressaltado por Wilson (1988), quando, a partir de medições de campo, foram registrados altos níveis de poro-pressão, que só seriam explicados caso houvesse contribuições advindas da rocha.

No que diz respeito a hipótese de carga hidráulica no topo atuando em um período superior ao considerado anteriormente, novas análises foram realizadas, englobando diferentes períodos. A Figura 8 apresenta os resultados daquela cujo avanço da frente de

saturação atingiu a parte alta da superfície de ruptura. Nesta simulação a carga hidráulica foi aplicada durante 19 dias, desde o dia 19/10 até o dia 07/11, e englobou períodos em que as baixas intensidades de chuva não justificariam a saturação permanente da região no alto da encosta.

Para avaliar a possibilidade de mudança no padrão de fluxo na encosta em decorrência da movimentação da massa de solo, outra simulação foi então executada. Para modelar a inexistência da região rompida, mantendo-se a malha de elementos finitos original, considerou-se para os elementos desta região um valor de condutividade hidráulica saturada "infinita" ( $k_{sat} = 1$ ); isto é, muito superior ao valor da condutividade hidráulica saturada do solo residual e nos nós impôs-se carga de pressão nula. Nesta simulação, a distribuição de sucção inicial adotada correspondeu à calculada no dia do escorregamento. Os resultados indicaram que rapidamente a frente de saturação avança e que a saturação da superfície ocorre naturalmente com o deslocamento da região rompida. Sendo assim, a saturação da superfície de ruptura pode ter sido resultado da mudança brusca das condições de contorno da encosta.



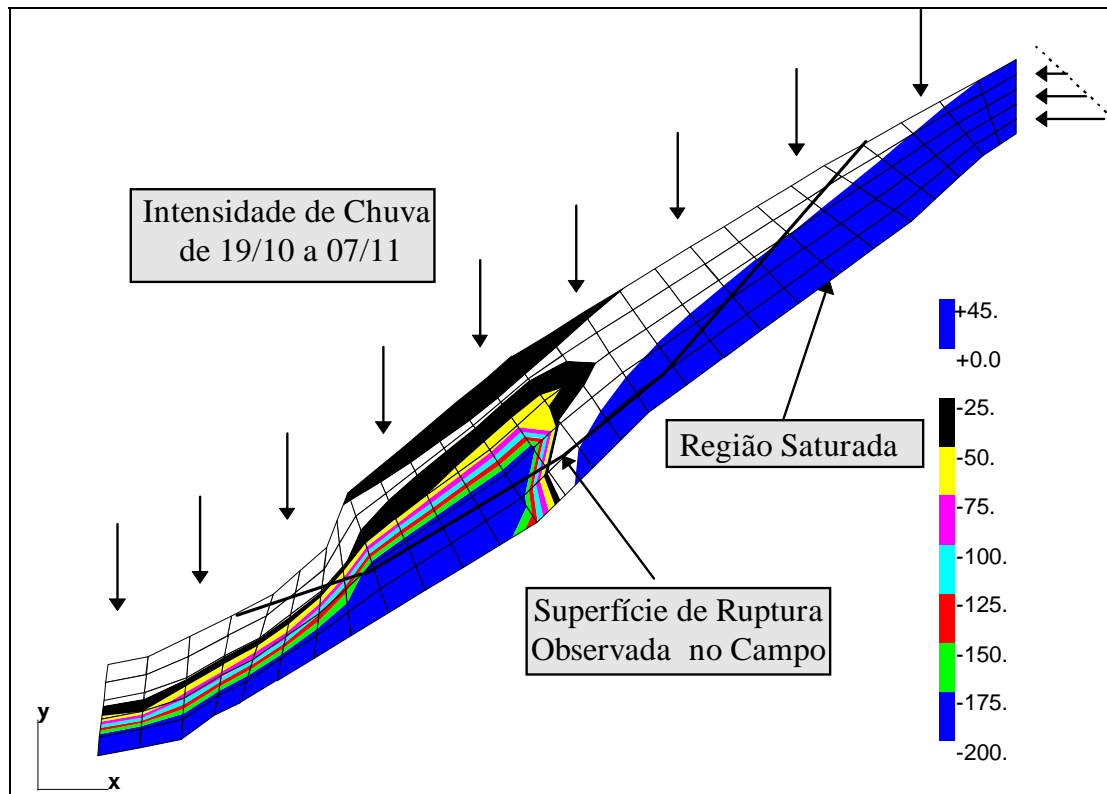


Figura 8 - Distribuição de Carga de Pressão - 19 dias de Carga Hidrostática no Topo - Análise Bidimensional

Quanto à possibilidade de fraturas no embasamento rochoso terem sido saturadas, impondo cargas hidráulicas em determinados pontos na base do talude, esta condição foi avaliada aplicando-se em um único nó uma carga hidráulica correspondente à diferença de cota entre a parte mais alta do talude e o ponto considerado. Esta hipótese pode ser visualizada na prática a partir da possibilidade de ter ocorrido de uma pequena movimentação do talude, causando a abertura de uma trinca na parte alta da encosta, facilitando assim a saturação de fraturas na rocha.

Brandt (1985) mostrou que a trajetória de tensões de campo, que causa a ruptura, se desenvolve por um aumento gradual de poro-pressão, enquanto que as tensões totais e cisalhantes permanecem constantes. Em fevereiro de 1988, a cidade do Rio de Janeiro foi submetida a condições de precipitação mais desfavoráveis do que as de outubro/novembro; as variações de poro-pressão ocorridas naquela época podem ter propiciado mecanismos de deformação do solo à medida que este se aproximou da condição de ruptura.

A Figura 9 apresenta a distribuição de carga de pressão considerando-se os efeitos de carga hidráulica atuando em um único nó situado na

base do talude. Nesta figura observa-se que poro-pressões positivas desenvolvem-se rapidamente em praticamente toda região da encosta. Esta análise foi reproduzida para a geometria tridimensional e os resultados, em termos de distribuição de carga de pressão, bem como a malha de elementos finitos estão apresentados, em diferentes perspectivas, nas Figuras 10a e 10b. Na seção central da região escorregada, a distribuição de carga de pressão determinada pela análise tridimensional está apresentada na Figura 11. Observa-se que os resultados são semelhantes aos encontrados na análise bidimensional (Figura 9), havendo uma pequena diferença no pé do talude, aonde verifica-se que o fluxo tridimensional acelera a saturação desta região.

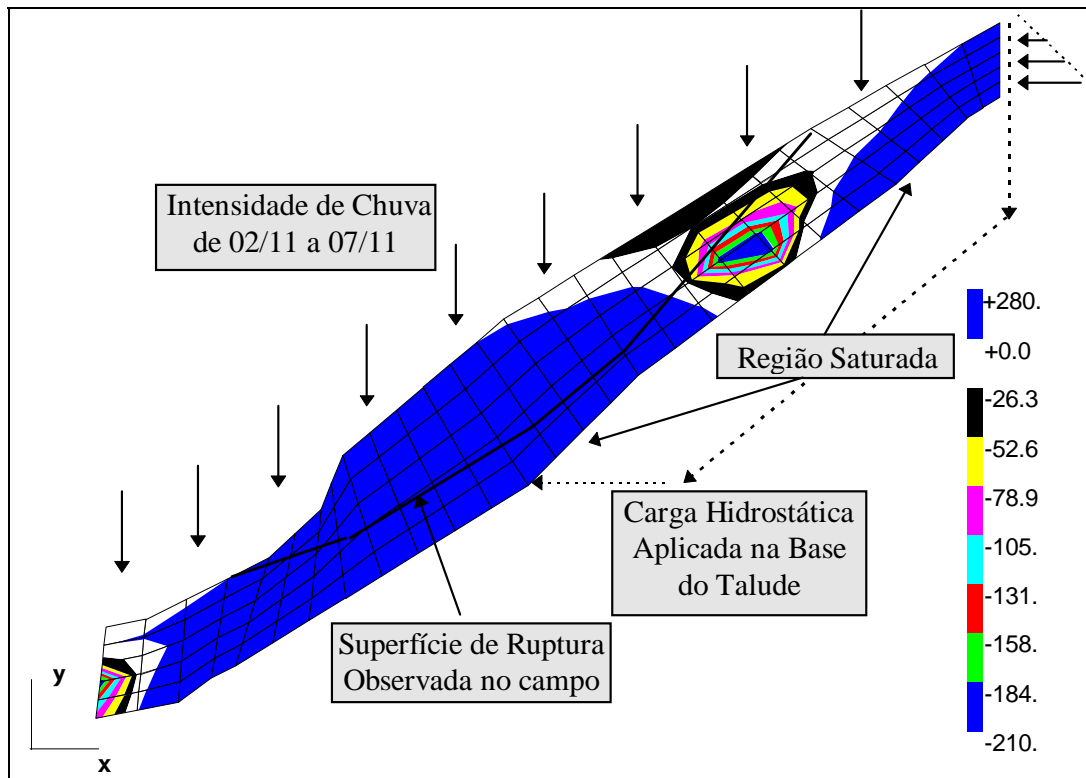
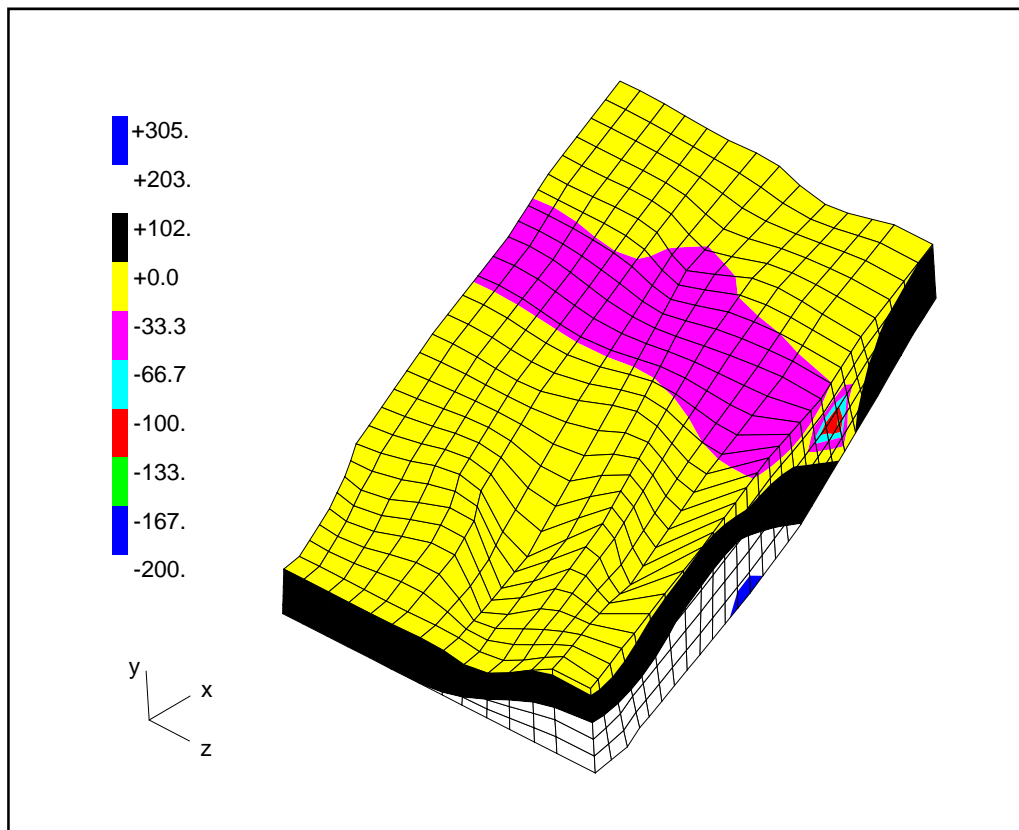
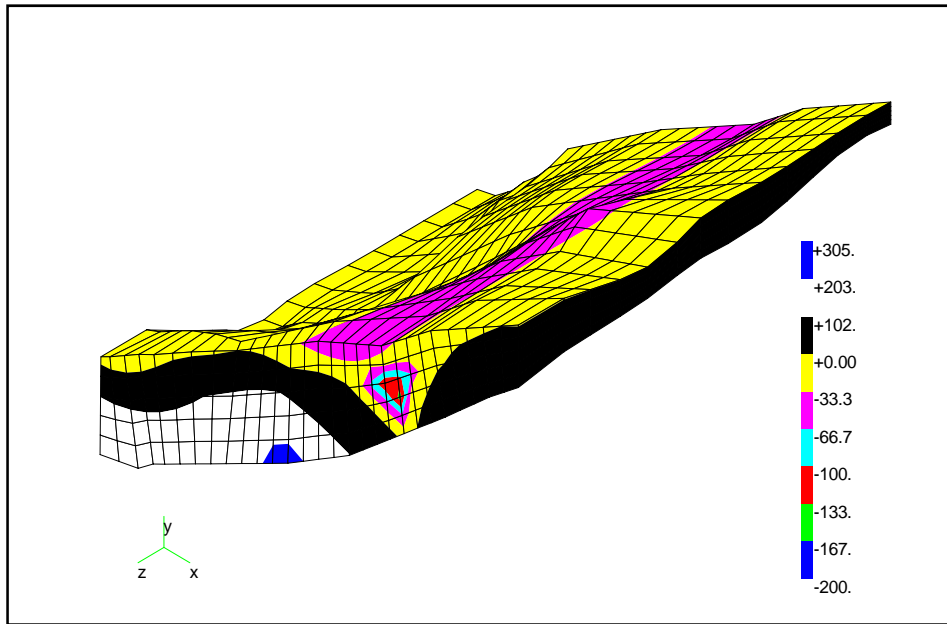


Figura 9 - Distribuição de Carga de Pressão - Carga Hidrostática no Topo e na Base - Análise Bidimensional



(a) Vista Superior



(b) Vista Lateral

Figura 10 - Distribuição de Carga de Pressão - Carga Hidrostática Aplicada no Topo e na Base (Fratramento)

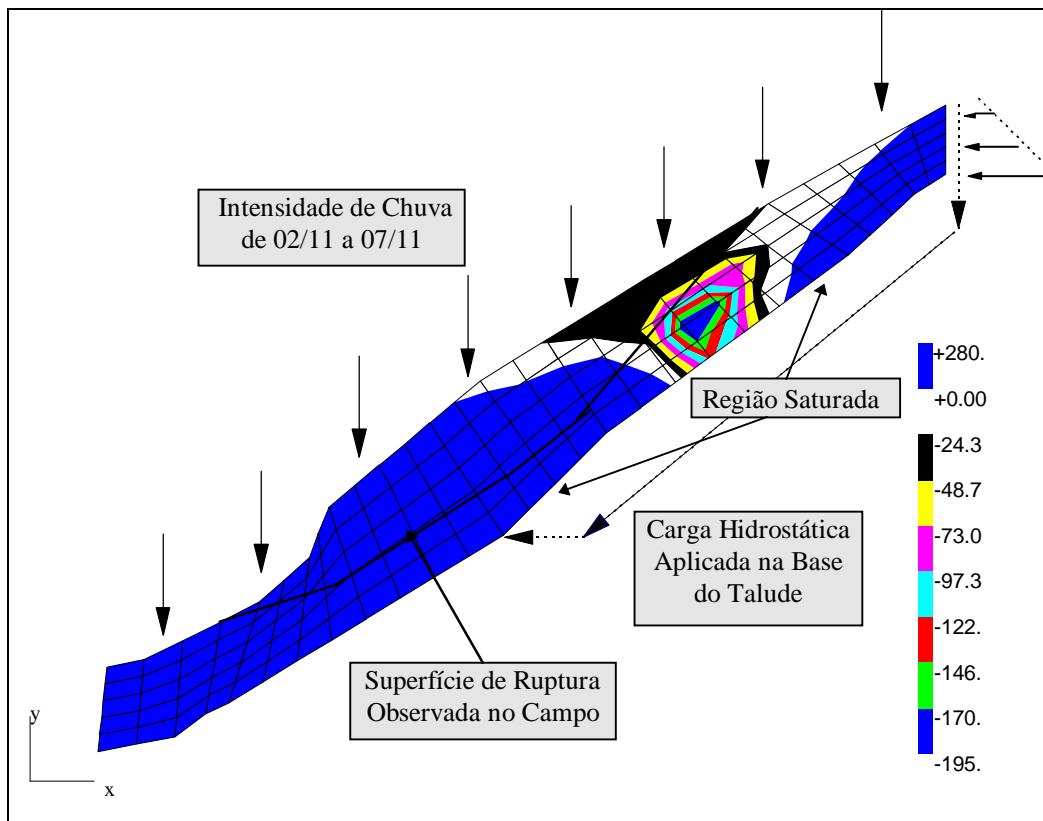


Figura 11 - Distribuição de Carga de Pressão na Seção Central- Análise Tridimensional

## 5 - CONCLUSÕES

A partir dos resultados destas simulações foi possível concluir que as taxas de precipitação ocorridas no período de outubro / novembro de 1988 não foram suficientemente altas para proporcionar o desenvolvimento de poro-pressões positivas, fato este observado no campo a partir de evidências de saturação da superfície de ruptura.

Medições de carga de pressão nula nos piezômetros de máxima, instalados após o escorregamento, confirmaram que o processo de infiltração em decorrência das taxas pluviométricas, que normalmente incidem naquela área, não seria suficiente para provocar o desenvolvimento de poro-pressões positivas.

Sendo assim, os possíveis mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de poro-pressões positivas podem estar associados à hipótese de carga hidráulica adicional, decorrente da saturação de fraturas no embasamento rochoso.

Quanto à modelagem do regime de fluxo, é de conhecimento a influência das condições antecedentes de umidade, da forma da curva característica e das condições de contorno impostas (Gerscovich et al, 1992a, 1992b). No caso do escorregamento da encosta do Morro dos Cabritos, apesar da ampla campanha de investigações geológico-geotécnicas não usual em obras de engenharia, acredita-se que diferenças entre a solução numérica e a solução real possam ocorrer. No que diz respeito, por exemplo, à relação entre umidade e sucção adotada na modelagem, esta foi obtida experimentalmente para o solo residual jovem, enquanto que o processo de infiltração é basicamente governado pelo solo residual maduro, localizado na região superficial do talude.

Quanto à integridade do embasamento rochoso, sondagens de reconhecimento registraram em alguns pontos nível d'água no contato entre o solo e a rocha, indicando um provável fraturamento da rocha. Tal fato poderia ser incluído nas análises através da existência de uma camada mais permeável na base do talude, o que certamente aceleraria o avanço da frente de saturação, proveniente do

topo da encosta. Acredita-se, entretanto, que, independentemente da veracidade desta hipótese, este mecanismo não contribuiria para saturar a superfície de ruptura, já que os limites da frente de saturação estariam provavelmente abaixo da região rompida.

Apesar dos questionamentos quanto aos aspectos envolvidos na simulação do regime de fluxo na encosta do Morro dos Cabritos, os autores consideram que o mecanismo responsável pela saturação da superfície de ruptura pode estar associado à saturação de sistemas de fraturas no embasamento rochoso, em decorrência da presença de trincas no talude, resultado de pequenos deslocamentos da encosta, anteriores ao escorregamento

## 6 - REFERÊNCIAS

- Brandt, E.W. (1985). Geotechnical Engineering in Tropical Residual Soils. *1<sup>st</sup> International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils*, Brasília, 3, 23-100.
- 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. *1<sup>a</sup> Conferencia sobre Estabilidade de Encostas*, Rio de Janeiro, 1, 371-382.
- Campos, J.L.E (1993). Um Estudo Numérico e Experimental da Permeabilidade Saturada e Não-Saturada de Solos de Encostas do Rio de Janeiro. *Dissertação de Mestrado*, DEC/PUC-Rio.
- De Campos, T.M.P.; Andrade, M.H.N. & Vargas Jr, E.A. (1992). Unsaturated Colluvium on Rock Slide in a Forested Site in Rio de Janeiro, Brazil. *IV International Symposium on Landslides*, Nova Zelândia, 10-14.
- Fonseca, E.C. (1991). Ensaio de Cisalhamento direto com Sucção Controlada em Solos Não Saturados. *Dissertação de Mestrado*, DEC/PUC-Rio.
- Gerscovich, D.M.S.; De Campos, T.M.P. & Vargas Jr, E.A. (1992a). Influência de Aspectos 3D no Regime de Fluxo em Encostas. *1<sup>a</sup> Conferencia sobre Estabilidade de Encostas*, Rio de Janeiro, 1, 559-576.
- Gerscovich, D.M.S.; Vargas Jr, E.A. & De Campos, T.M.P. (1992b). Avaliação dos Aspectos que Influenciam a Modelagem

- Numérica do Regime de Fluxo em uma Encosta do Rio de Janeiro. *1ª Conferencia sobre Estabilidade de Encostas*, Rio de Janeiro, 1, 657-674.
- 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.
- Pires, F.R.M. e Bertolino, L.C. (1989). Geologia e Risco da Vertente Sul do Morro do Cantagalo (Av. Epiácio pessoa - Lagoa Rodrigo de freitas, RJ). *Relatório do Projeto IDRC*. UFRJ / PUC-Rio.
- Reid, M.E.; Nielsen, H.P. & Dreiss, S.J. (1988). Hydrologic Factors Triggering a Shallow Hillslope Failure. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 25(3), 349-361.
- Vaughan, P.R. (1985). Mechanical and Hydraulic Properties os In-Situ Residual Soils. *1<sup>st</sup> International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils*, Brasília, 3, 231-263.
- Wagnet, R.J. & Addiscott, T.M. (1987). Estimating the Variability of Unsaturated Soil Hydraulic Conductivity Using Simple Equations. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 42-47.
- Wilson, C.J. (1988). Runoff and Pore Pressures in Hollows. *Tese de Doutorado*, Universidade da Califórnia, Berkeley.