

## MODELAGEM DE SOLOS NÃO-SATURADOS POR ELEMENTOS FINITOS

Francisco Chagas da Silva  
Filho  
fchagas@unifor.br

### Resumo

Este artigo apresenta características importantes e relevantes da modelagem dos solos não-saturados com a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF). No MEF, a consideração do efeito da sucção é efetivada com a utilização da técnica de deformação inicial, conforme visto em ZIENCKIEWCZ, 1985. O uso desta técnica permite obter resultados bastante consistentes com os medidos em laboratório, como por exemplo, durante a realização da saturação de amostra de solo colapsível em ensaio duplo edométrico. Também com a técnica de deformação inicial, implementada em programa de elementos finitos, é possível obter resultados de ocorrência de colapso e moderada expansão ao mesmo tempo, como no caso de elevação de nível d'água em subsolo com fundação superficial. No trabalho, estão também apresentadas análises numéricas de enchimento de barragem de terra, com e sem acoplamento hidro-mecânico, taludes naturais, solos moles com camada ressecada superficial e canal de irrigação assente sobre solo natural colapsível.

*Palavras-chave:* solos não-saturados, elementos finitos, plasticidade, modelagem

### Abstract

This paper presents important and relevant characteristics of the modeling of the unsaturated soils using the Finite Elements Method (FEM). In FEM, the consideration of the effect of the suction is executed using initial deformation technique, as seen in ZIENCKIEWCZ, 1985. The use of this technique allows obtaining quite solid results in comparison with the results obtained in laboratory, as for instance, during the saturation of the sample soil in edometric double test. Also implementing the technique of initial deformation in finite elements program is possible to acquire results of collapse occurrence and moderate expansion at the same time, as in the case of elevation of water level in underground with superficial foundation. In this work it was also presented numeric analysis of earth dam filling, with and without hidro-mechanic coupled analysis, natural slopes, soft soils with dried superficial layer and irrigation channel agrees on collapsible natural soil.

*Keywords:* unsaturated soils, finite elements, plasticity, modelling

### 1 Introdução

O comportamento dos solos não-saturados, como qualquer outro problema de geotecnia, pode ser previsto de forma mais acurada com a utilização de métodos numéricos, notadamente o Método dos Elementos Finitos (MEF). Com a utilização do MEF, é possível analisar problemas com a consideração inclusive de acoplamento hidro-mecânico. Até pouco tempo, estes problemas eram tidos como impossíveis de serem resolvidos de forma acurada. Exemplos de estudos de acoplamento hidro-mecânico podem ser vistos em PEREIRA (1996).

Além desta complexidade, na mecânica dos solos não-saturados existem vários outros aspectos importantes que só puderam ser obtidos de forma bastante consistente com o medido em laboratório e esperado ocorrer em uma obra geotécnica,

com a formulação de modelos que utilizam conceitos de plasticidade e com a implementação destes modelos em programas de elementos finitos. Um exemplo interessante é a obtenção da configuração deformada do solo durante a inundação de uma amostra colapsível, como apresentado por LAWTON e FRAGASZY (1989 e 1991).

Uma análise geotécnica que envolve o comportamento dos solos não-saturados pode tratar, em uma mesma situação, de deformações de colapso e expansão. Para tanto, é necessário que as tensões no solo apresentem valores diferenciados, no instante anterior à diminuição da sucção. Uma situação como esta será apresentada neste trabalho, ou seja, uma fundação superficial assente em uma camada de solo colapsível não-saturada. Durante uma possível alteração do nível da água no subsolo, poderão ocorrer deformações de colapso no trecho próximo da carga da sapata e expansão moderada nos pontos mais afastados. Este comportamento é possível ser simulado com o uso de um modelo elasto-plástico implementado em um programa de elementos finitos.

Os aterros compactados com baixa energia de compactação e baixa umidade podem formar uma estrutura potencialmente colapsível. Uma pequena barragem de terra construída com material nestas condições, e durante a ocorrência do primeiro enchimento, pode apresentar colapso em vários pontos do maciço, podendo levar à ruptura da obra por completo. Para modelar o comportamento desta obra, é necessário associar ou acoplar o fenômeno mecânico com outro relacionado com o fluxo transiente no maciço. Na literatura científica, existem algumas análises utilizadas, como se pode verificar em MIRANDA (1988), PEREIRA (1996) e SILVA FILHO, CERQUEIRA e PINHEIRO (2004). Neste trabalho, são apresentados resultados de PEREIRA (1996) e SILVA FILHO, CERQUEIRA e PINHEIRO (2004).

Os taludes naturais são freqüentemente submetidos à variação de tensões por variação de poro pressão e sucção. Isto tem provocado, em muitas ocasiões, rupturas com deslizamentos de massa de solo causando, às vezes, perdas econômicas e até vidas humanas. A previsão do comportamento sazonal de um talude natural poderá ser obtida com a consideração das teorias aplicadas aos solos não-saturados. SILVA FILHO et al. (2001) apresentaram uma análise do fenômeno do escorregamento do morro dos cabritos no Rio de Janeiro.

Durante a implantação de projetos de irrigação no Nordeste do Brasil, foram registradas ocorrências pontuais de problemas de colapso por ocasião da construção de canais de irrigação. Como estes solos nunca haviam sido solicitados com um carregamento da magnitude proporcionada pelos canais. E, como os projetos envolvem a adição de grandes quantidades de água pluvial ou de aspersão, os colapsos ocorrem comumente em várias partes da obra. Neste trabalho, apresentou-se um estudo numérico realizado nos canais de irrigação de Bom Jesus da Lapa (ALMEIDA e SILVA FILHO, 2002).

Finalmente, mesmo os depósitos de solo mole podem ser analisados com o auxílio da Mecânica dos Solos Não-saturados. A camada ressecada, na parte superior do depósito, apresenta uma maior rigidez e os depósitos são, em geral, muito pré-adensados. SILVA FILHO et al (2001) apresentaram uma análise do comportamento de um aterro experimental sobre uma camada de solo mole do Sarapuí no Rio de Janeiro.

## 2 Modelagem dos Solos Não-saturados Usando o MEF

A modelagem dos solos não-saturados diferencia-se dos demais problemas de geotecnia pela influência que exerce a sucção, no comportamento mecânico do solo. A pressão da água com valores negativos aumenta a rigidez do solo e a sua resistência ao cisalhamento. Para os solos com estrutura aberta metaestável, a diminuição da sucção gera deformações bruscas e, muitas vezes, de grande magnitude. Estas deformações caracterizam o fenômeno do colapso. Já os solos não-saturados com teor de argilominerais expansivos, a diminuição da sucção gera aumento de volume do solo.

As deformações de colapso e de expansão são caracterizadas, na maioria das vezes, por um comportamento irreversível. Assim sendo, a princípio não seria possível a utilização de um modelo elástico, mesmo de comportamento não-linear. Para contornar este problema, SILVA FILHO (1998) utiliza uma variação de rigidez para modelar as deformações de colapso e uma analogia térmica para os solos expansivos.

Em virtude da alteração da rigidez do solo com a diminuição da sucção, a estrutura inicial do solo não se mantém estável, sofrendo deformações obrigatórias, configurando-se no colapso. A formulação utilizada em elementos finitos pode ser dividida em duas partes: equilíbrio inicial e colapso.

(a) Equilíbrio – as tensões iniciais no elemento podem ser admitidas como estando em equilíbrio com as deformações iniciais, que foram ocasionadas por carregamentos anteriores, conforme a equação 1.

$$\int_{V_e} B^T \sigma_0 d(vol) = \int_{V_e} B^T D_e \varepsilon_0 d(vol) \quad (1)$$

onde:

- $\sigma_0$  - estado de tensões compatível com o carregamento aplicado ao solo;
- $\varepsilon_0$  - deformação também compatível com o carregamento aplicado e com a rigidez do solo;
- $D_e$  - rigidez inicial do solo (antes do colapso).

(b) Colapso – com a diminuição da rigidez do solo, deformações adicionais devem ocorrer no elemento, para obter um novo equilíbrio. Isto pode ser resumido na equação 2.

$$\int_{V_e} B^T \sigma d(vol) = \int_{V_e} B^T \overline{D}_e B d(vol) \times \alpha^e - \int_{V_e} B^T \overline{D}_e \varepsilon_0 d(vol) + \int_{V_e} B^T \sigma_0 d(vol) \quad (2)$$

onde:

- $\sigma$  - novo estado de tensões, após o colapso do solo;
- $\overline{D}_e$  - rigidez final, após o colapso do solo;
- $\alpha^e$  - deslocamentos dos nós do elemento.

Vale ressaltar que, durante o processo de saturação, com o conseqüente colapso, o incremento é dado na sucção, que, por sua vez, modifica os parâmetros do solo e, em seguida, ocorre o desequilíbrio. Este procedimento não incorre em diminuição do valor final de colapso com o aumento do número de incrementos, pois o que se divide não é a tensão a ser relaxada e sim a sucção. Este esclarecimento é importante, porque a relaxação de tensões, da forma como foi proposta por NOBARI e DUNCAN (1972), determina uma diminuição de volume (colapso) decrescente com o número de incrementos.

Com relação aos modelos elasto-plásticos (ALONSO, GENS e JOSA, 1990; WHEELER e SIVAKUMAR, 1995) as deformações que caracterizam o colapso são calculadas como deformações de plastificação com expansão da superfície de escoamento utilizada no modelo (endurecimento isotrópico).

Para estes modelos, a relação tensão-deformação para os solos não saturados é dividida em dois termos: um elástico e outro plástico, que será calculado sempre que houver acionamento da superfície de estados limites.

$$d\sigma = D_{ep} (d\varepsilon - d\varepsilon_0) \quad (3)$$

onde:

- $D_{ep}$  - a matriz elasto-plástica
- $d\varepsilon$  - incremento de deformação específica total
- $d\varepsilon_0$  - incremento de deformação específica inicial, compatível com o incremento de variação de sucção.

A técnica de deformação inicial na equação de trabalho virtual, que associa as forças externas e deslocamentos prescritos com as tensões e deformações no contínuo, é identificada como forças nodais aplicadas no elemento finito.

Quando a trajetória se desenvolve no interior da superfície de escoamento, a variação da sucção tem apenas uma componente elástica de força nodal, aplicada no elemento. Estas forças aplicadas nos nós do elemento tendem a comprimi-lo, caso haja aumento de sucção, e tendem a expandi-lo, caso haja redução de sucção.

Quando a diminuição de sucção atinge a superfície de escoamento, forças nodais, calculadas pela consideração do termo plástico da variação da sucção, comprimem e distorcem o elemento.

Utilizando os termos da relação tensão-deformação elasto-plástica para os solos não-saturados que é função das formulações da superfície de escoamento LC e da elipse de plastificação do plano (p,q), a relação tensão deformação é dada pela equação 4:

$$d\sigma' = D_{ep} \left\{ d\varepsilon - \left[ m \frac{K_s}{3v(s + p_{at})} + \frac{\frac{\partial Q}{\partial F} \frac{\partial F}{\partial s}}{-\frac{\partial F}{\partial \varepsilon_v^e} \frac{\partial Q}{\partial p}} \right] ds \right\} \quad (4)$$

e

$$m = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

onde:

 $D_{ep}$  - matriz elasto-plástica; $D_e$  - a matriz elástica;

de - incremento de deformação específica total;

 $\kappa_s$  - coef. de compressibilidade ao longo das trajetórias de variação de  $s$  em descarregamento e recarregamento; $v$  - volume específico; $s$  - sucção; $p_{at}$  - pressão atmosférica; $Q$  - potencial plástico; $F$  - função de escoamento; $\sigma'$  - tensão normal; $p'$  - tensão média; $\varepsilon_v^p$  - deformação específica volumétrica plástica

$$D_{ep} = D_e - \frac{D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma'} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right\}^T D_e}{-\frac{\partial F}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial Q}{\partial p'} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right\}^T D_e \frac{\partial Q}{\partial \sigma'}} \quad (6)$$

Conforme já mencionado, a equação 4 mostra que o efeito da sucção é obtido através de técnica de deformação inicial (ZIENKIEWCZ, 1985). E, também pode-se conferir nesta equação que o efeito da variação da sucção tem um trecho elástico e outro plástico, que será calculado conforme haja redução de sucção além ou não da superfície de estados limites.

Para as trajetórias que envolvem variação de sucção em um programa de Elementos Finitos, faz-se necessária a implementação de um vetor de carregamento de variação de sucção, que entra na relação tensão deformação através da técnica de deformação inicial mencionada acima. Este vetor é da seguinte forma:

$$\int_{V^e} B^T D_{ep} \varepsilon_0 d(vol) \quad (7)$$

$$\varepsilon_0 = m \frac{\kappa_s}{3v(s + p_{at})} ds + \frac{\frac{\partial Q}{\partial \sigma'} \frac{\partial F}{\partial s}}{-\frac{\partial F}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial Q}{\partial p'}} ds \quad (8)$$

onde:

 $B$  - matriz deformação-deslocamento;

Embora em algumas formas de carregamentos a variação pode ser considerada desprezível, alguns programas adotam os parâmetros de compressibilidade e resistência característicos da sucção existente em cada elemento.

### 3 Comportamento da Tensão Lateral em Ensaio Duplo

LAWTON e FRAGASZY (1989) realizaram ensaios duplos edométricos com umidade constante em amostras obtidas a partir de diferentes energias de compactação e umidades. O objetivo era determinar a influência do método de compactação e da seqüência do carregamento-diminuição de sucção sobre o potencial de colapso. O solo utilizado era moderadamente expansivo, classificado como SC no sistema unificado.

O mesmo solo foi utilizado por LAWTON e FRAGASZY (1991) em ensaios duplos triaxiais, que visavam determinar a influência do colapso nas direções vertical e horizontal com relação à razão entre estas tensões aplicadas nestas condições ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_h$ ). Os ensaios utilizados nas previsões foram realizados com amostras moldadas a 80% de compactação relativa e umidade de 13%. As amostras foram saturadas a diferentes valores de tensões verticais.

A expansão ou colapso não correspondeu exatamente à diferença entre as curvas saturada e não-saturada do ensaio duplo de adensamento. LAWTON e FRAGASZY (1989) concluíram que os ensaios duplos de adensamento apresentaram bons resultados na avaliação do potencial de colapso. Entretanto, o mesmo não aconteceu com a estimativa de expansão.

Os ensaios duplos triaxiais permitiram a LAWTON e FRAGASZY (1991) concluir que a deformação volumétrica de colapso é dependente da tensão média  $p$  e independente da razão entre as tensões axial e radial ( $\sigma_a/\sigma_r$ ). Verificaram também que as componentes de deformação vertical e radial são fortemente dependentes de ( $\sigma_a/\sigma_r$ ).

ALONSO (1993) e ALONSO, JOSA e GENS (1995) apresentaram previsões dos ensaios de LAWTON e FRAGASZY (1989 e 1991) com a utilização do modelo de ALONSO, GENS e JOSA (1990). A redução das deformações de colapso com as tensões de compressão foram calculadas considerando uma superfície de estado para grau de saturação e sucção. SILVA FILHO (1998) reproduziu as mesmas trajetórias sem considerar a superfície de estado e usando um modelo simplificado proposto por este autor.

Neste trabalho, apresentam-se apenas as previsões realizadas por SILVA FILHO (1998) dos ensaios duplos triaxiais. Nas previsões, foram utilizados diferentes valores de tensão média ( $\sigma_m$ ) e  $\sigma'_a/\sigma'_r$  iguais a 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0. Os resultados das previsões são apresentados na Figura 1 e podem considerar-se como bastante satisfatórios. Nesta figura, as curvas com linhas contínuas correspondem aos resultados das previsões e os dados dos ensaios são indicados por linhas tracejadas.

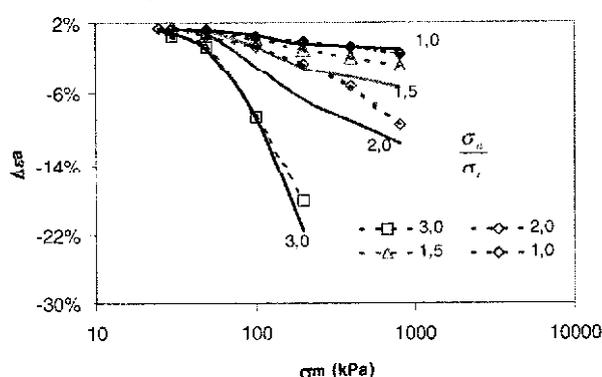


Figura 1: Comparação da previsão dos ensaios duplos triaxiais de LAWTON e FRAGASZY (1991) com o MEF

#### 4 Ocorrência de Colapso e Expansão Moderada em uma Mesma Análise

Um comportamento possível de ocorrer com os solos não-saturados, quando submetidos à variação de sucção e à ocorrência, em uma mesma análise, de colapso e expansão. NESNAS (1995) e SILVA FILHO (1998) apresentaram resultados hipotéticos de uma fundação superficial assentada em uma camada de solo não-saturada onde se verifica a elevação do nível da água. Neste processo, os pontos próximos ao carregamento da sapata entram em colapso enquanto as regiões mais afastadas experimentam pequena expansão, por diminuição de sucção. Isto é possível tendo em vista que, nas proximidades da fundação, ocorrem vários pontos onde as trajetórias de tensões ultrapassam a superfície de plastificação, enquanto, nos demais pontos, a diminuição da sucção se dá em regime elástico (expansão moderada). A Figura 2 apresenta este comportamento.

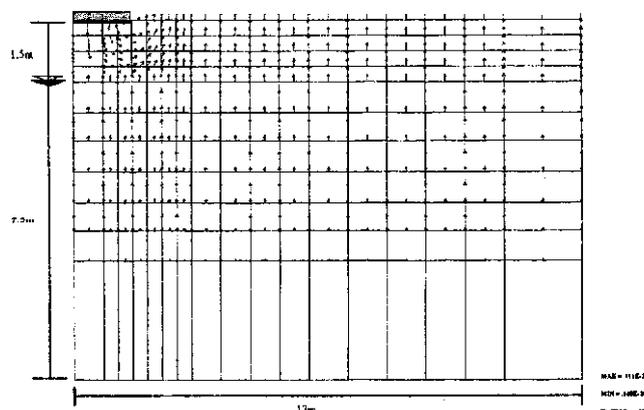


Figura 2: Deslocamentos ocorridos por ocasião da variação do nível da água (NESNAS, 1995)

## 5 Aterros com Baixa Energia e Baixa Umidade de Compactação

Barragens são utilizadas freqüentemente, no semi-árido do Brasil, com diversas finalidades, tais como: abastecimento humano, irrigação, controle de cheias etc. O dimensionamento do reservatório a ser formado pelo barramento é função das características topográficas e dos estudos hidrológicos da região, bem como do próprio balanço hídrico que é definido, entre outros fatores, pela finalidade a qual será utilizado o lago. Após o dimensionamento do reservatório, resta a definição do tipo de barragem a ser construída.

No Nordeste do Brasil, é muito comum a utilização de barramentos compostos de maciços terrosos, com material lançado no local das obras e compactados com umidade e energia de compactação adequadas. Entretanto, devido a não regularidade das chuvas nesta região, as pequenas barragens de terra são construídas muitas vezes com material contendo pouca umidade e sem compactação, gerando um maciço composto por uma estrutura meta-estável.

A estrutura meta-estável é formada pela existência de pouca água e ar nos vazios do solo o que permite a geração de pressões de água bastante inferiores à pressão atmosférica. Com isto, resulta da ocorrência de uma coesão entre as partículas que dificulta a compactação, absorvendo os impactos do equipamento e isto faz com que o solo permaneça com uma estrutura muito porosa e estável momentaneamente. Esta estrutura porosa é destruída no momento em que ocorre o aumento de umidade durante o primeiro enchimento da barragem.

O colapso dos solos não-saturados é desencadeado durante o fluxo de água ocorrido de forma transiente, modificando o estado de tensões do solo causando deformações em vários pontos do maciço que podem destruir por completo a barragem. MIRANDA (1988), PEREIRA (1996) e SILVA FILHO (1998) apresentaram modelagens com a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) para a previsão do comportamento de pequenas barragens, durante o primeiro enchimento.

Neste trabalho, apresentam-se resultados obtidos por SILVA FILHO, CERQUEIRA e PINHEIRO (2004) e que utilizam um programa de Elementos Finitos no cálculo das deformações ocorridas devido à variação da sucção (pressão do ar menos a pressão da água). Nesta análise, foram utilizados dois programas: o programa SEEP/W (Geo-slope, 2001) calcula de forma transiente a variação da sucção e da umidade durante o enchimento, o programa UNSTRUCT (SILVA FILHO, 1998) utiliza estes dados na previsão do comportamento tensão-deformação.

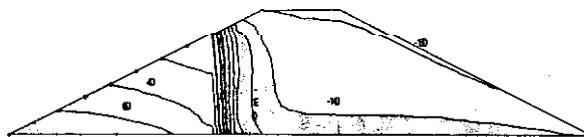


Figura 3: Avanço da frente de saturação, após decorridos 16 dias do enchimento (SILVA FILHO, CERQUEIRA e PINHEIRO 2004)

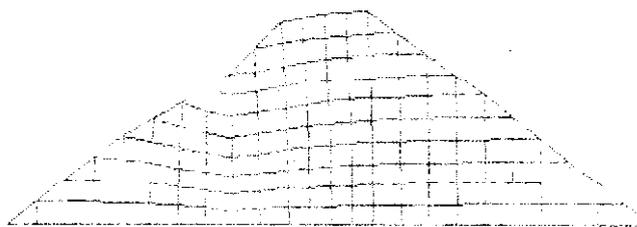


Figura 4: Malha de elementos finitos deformada com deslocamentos aumentados em 10 vezes (SILVA FILHO, CERQUEIRA e PINHEIRO 2004)

## 6 Acoplamento Fluxo-equilíbrio em Barragem de Terra (PEREIRA, 1996)

PEREIRA (1996) propôs uma modelagem elástica não-linear, para previsão com acoplamento hidro-mecânico do comportamento dos solos não-saturados colapsíveis. PEREIRA (1996) utilizou o modelo proposto na reprodução do comportamento de uma pequena barragem durante o primeiro enchimento. Verifica-se nas Figuras 5 e 6 a seguir que o processo acoplado, embora tenha uma solução extremamente complexa, é na verdade a reprodução do fenômeno real, ou seja, o fluxo de água e o comportamento mecânico do solo se influenciam mutuamente e tendem a apresentar um resultado diferenciado da reprodução simplificada e mostrada no item anterior.

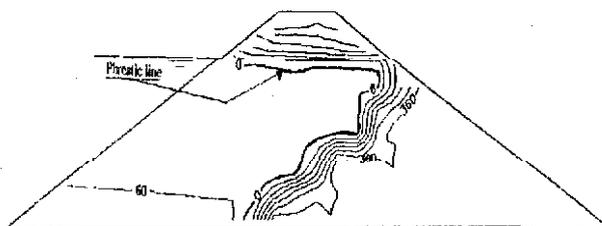


Figura 5: Distribuição de poro pressões após 100 dias do enchimento do reservatório (PEREIRA, 1996)

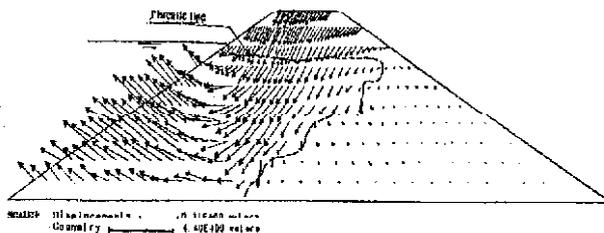


Figura 6: Distribuição dos deslocamentos após 100 dias do enchimento do reservatório (PEREIRA, 1996)

### 7 Tensões Iniciais em Taludes Naturais com Presença de Sucção

Problemas de escorregamentos causados por infiltração de águas pluviais, levantamento do lençol freático ou outras formas de diminuição da sucção são comuns nos solos de encostas. Um caso típico ocorreu em novembro de 1988 no deslizamento da encosta da Lagoa, localizada na vertente sul do Morro dos Cabritos-RJ. Segundo a Fundação Enge-Rio, órgão da Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro, as causas possíveis do escorregamento foram: (a) infiltração das águas pluviais dos quatro dias anteriores ao escorregamento; (b) ruptura do muro de arrimo localizado no pé da encosta e (c) falta de conservação do sistema de drenagem superficial da encosta. GERSCOVICH (1994) fez uma análise tridimensional do escorregamento com a utilização de modelos elaborados para fluxo, em meios porosos saturados e não-saturados, sem a consideração do acoplamento com o equilíbrio, e usando análise limite associada e após o fluxo. O estudo realizado por SILVA FILHO et al (2001) utilizou um modelo elasto-plástico para solos tropicais não saturados e implementado em elementos finitos. Devido à falta de dados, realizou-se um estudo teórico, utilizando a geometria da encosta do Morro dos Cabritos, sem a pretensão de retroanalisar o problema.

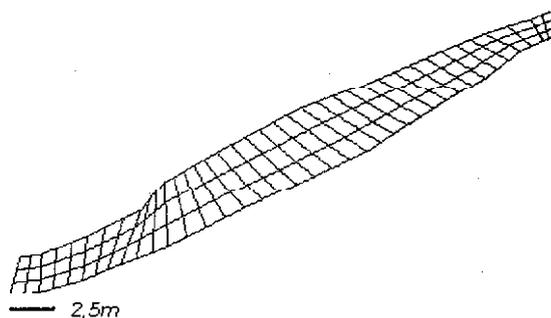


Figura 7: Malha de elementos finitos usada (SILVA FILHO et al, 2001)

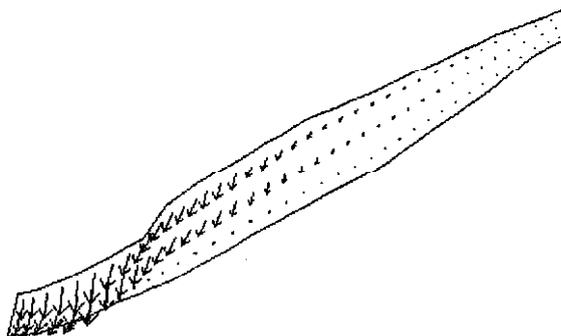


Figura 8: Vetores de deslocamentos ampliados em 100 vezes

### 8 Canal de Irrigação sobre Camada de Solo Colapsível

SILVA FILHO (1998) e ALMEIDA e SILVA FILHO (2002) apresentaram um estudo numérico do colapso de um canal de irrigação construído em Bom Jesus da Lapa, no estado da Bahia. O aterro do canal estava assente sobre uma camada de solo colapsível.

Neste estudo, foram simuladas as etapas de construção do canal, enchimento e colapso do solo de fundação. Foi utilizado um programa de elementos finitos com um modelo elasto-plástico simplificado a partir da proposta de WHEELER e SIVAKUMAR (1995). O estudo mostrou que o colapso, que é altamente dependente da relação entre as tensões vertical e horizontal, apresenta recalques mais acentuados quando o canal está vazio, quando comparado com o canal após o seu enchimento e entrada em operação. A Figura 9 abaixo mostra as deformações provocadas pelo colapso da fundação do canal antes do enchimento, sendo que os deslocamentos estão aumentados em 10 vezes para melhor visualização.

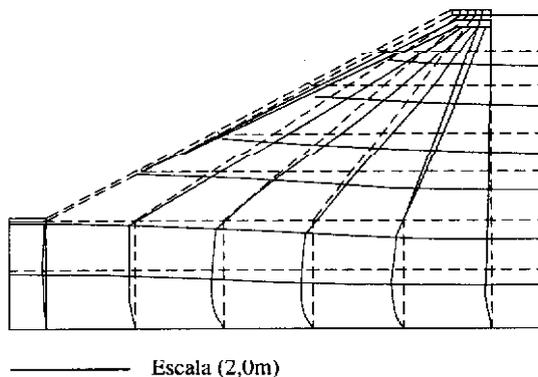


Figura 9: Malha deformada pelo colapso da camada de solo natural após o enchimento do canal (deslocamentos aumentados em 10 vezes).

### 9 Comportamento de Camada Ressecada em Depósito de Argila Mole

SILVA FILHO et al (2001) apresentaram um novo estudo numérico da construção do aterro experimental I do IPR/DNER, construído sobre argila mole do Sarapuá, no Rio de Janeiro (ver Figura 10). FONTENELLE (1987) realizou análises numéricas, com programa de Elementos Finitos e usando a teoria de estados críticos (modelo Cam-clay modificado) com o acoplamento de adensamento de Biot. As análises realizadas por FONTENELLE (1987) abordavam a construção do aterro em camadas com a consideração de não drenagem e com adensamento. Nesta nova análise da construção do Aterro experimental do IPR/DNER, SILVA FILHO et al (2001) consideraram o efeito da sucção na camada superior da argila mole. Estes autores simularam o rebaixamento do nível da água antes do carregamento, usando um modelo de estados críticos para solos não-saturados. O objetivo era mostrar que é possível analisar o comportamento de depósitos de argila com a utilização de modelos elasto-plásticos para solos não saturados, quando implementados em programa de elementos finitos. A Figura 11 apresenta a malha de elementos finitos usada nas simulações.

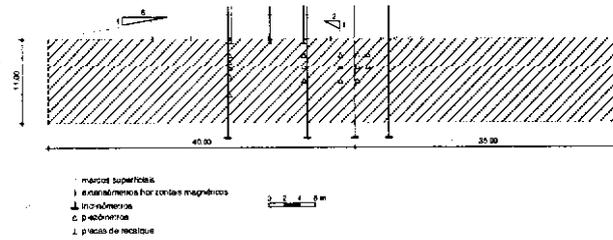


Figura 10: Seção do aterro experimental instrumentada (FONTENELLE, 1987)



Figura 11: Malha de elementos finitos adotada (SILVA FILHO et al, 2001)

## 10 Conclusões

Nas últimas três décadas, a utilização do Método dos Elementos Finitos aumentou muito em aplicações geotécnicas. Foram desenvolvidos programas exclusivamente para problemas de geotecnia. A Mecânica dos Solos Não-saturados apresenta uma maior complexidade e, em consequência disso, torna-se ainda mais importante a utilização do MEF nas análises dos problemas que envolvem o comportamento dos solos não-saturados. Este artigo apresentou vários exemplos de aspectos importantes do comportamento dos solos não saturados em que tem a utilização do MEF como ferramenta obrigatória. Pode-se concluir, que, com a utilização do MEF, as análises do comportamento dos solos não-saturados apresentam resultados mais acurados e, portanto, importantes para o entendimento do comportamento destes solos em obras geotécnicas.

## Referências

- ALMEIDA, M. S. S.; SILVA FILHO, F. C. Análise numérica de canal de irrigação em solo colapsível utilizando um modelo de estados críticos. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Lisboa, n. 96, p. 42-50, nov. 2002.
- ALONSO, E. E.; GENS, A.; JOSA, A. A. A constitutive model for partly saturated soils. *Geotechnique*, London, v. 40, n. 3, p. 405-430, Mar. 1990.
- ALONSO, E. E. *Constitutive modelling of unsaturated soils*. Barcelona: Civil Engineering European Courses Programme of Continuing Education, 1993.
- ALONSO, E. E.; JOSA, A.; GENS, A. Modelling the behaviour of compacted soils upon wetting. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: UFRGS, 1995. 1 CD-ROM.
- FONTENELLE, A. S. *Análise numérica de aterro sobre solo compressível utilizando as teorias de estados críticos e de adensamento de Biot*. 1987. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GERSCOVICH, D. M. S. *Fluxo em meios porosos saturados e não-saturados: modelagem numérica com aplicação ao estudo da estabilidade de encostas do Rio de Janeiro*. 1994. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- LAWTON, E.; FRAGASZY, J. R. Collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Reston, v. 115, n. 9, p. 73-78, Sept. 1989.
- LAWTON, E.; FRAGASZY, J. R. Stress ratio effects on collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Reston, v. 117, n. 5, p. 714-730, May 1991.
- MIRANDA, A. N. *Behavior of small dams during initial filling*. 1988. 229 f. Thesis (Ph.D. in Civil Engineering) – Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins.

- NESNAS, K. *A finite element implementation of a critical state model for unsaturated soils to simulate drained conditions*. 1995. 186 f. Thesis (Ph.D. in Civil Engineering) – Department of Civil Engineering, Sheffield University, Sheffield.
- NOBARI, E. S.; DUNCAN, J. M. *Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams*. Berkeley: University of California, 1972. 186 p.
- PEREIRA, J. H. F. *Numerical analysis of the mechanical behavior of collapsing earth dams during first reservoir filling*. 1996. 449 f. Thesis (Ph.D. in Civil Engineering) – Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- SILVA FILHO, F. C. *Análise numérica de problemas em solos não-saturados: modelagem, implementação e aplicações práticas*. 1998. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SILVA FILHO, F. C.; ALMEIDA, M. S. S.; FUTAI, M. M. Estudo numérico de escorregamentos causados por diminuição de sucção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 3., 2001, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABMS / UFRJ. 2001. 1 CD-ROM.
- SILVA FILHO, F. C.; CERQUEIRA, F.; PINHEIRO, P. R. Modelagem por elementos finitos do comportamento de pequena barragem durante primeiro enchimento. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA, 2., 2004, Aveiro. *Anais...* Aveiro: Sociedade Portuguesa de Geotecnia / ABMS, 2004. 1 CD-ROM.
- SILVA FILHO, F. C. et al. Análise numérica de aterro sobre solo compressível com camada superior não-saturada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE INFORMÁTICA EM GEOTECNIA, 2001, Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABMS / UFPR, 2001. 1 CD-ROM.
- WHEELER, S. J.; SIVAKUMAR, V. An elastoplastic critical state framework for unsaturated soil. *Geotechnique*, London, v. 45, n. 1, p. 35-53, Jan. 1995.
- ZIENKIEWICZ, O. C. *The finite element method*. New York: McGraw-Hill, 1985.

## SOBRE O AUTOR

### Francisco Chagas da Silva Filho

Engenheiro Civil pela Universidade de Fortaleza (1986), M.Sc. em Geotecnia pela COPPE/UFRJ (1991), D.Sc. em Geotecnia pela COPPE/UFRJ (1998). Recebeu o Prêmio AEERJ como melhor tese de Engenharia do estado de Rio de Janeiro. Pós-Doutorado em Geotecnia pela COPPE/UFRJ (2002). Atualmente é professor da Universidade de Fortaleza.