

# UMA PROPOSTA DE ASSOCIAÇÃO DE ANÁLISES DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO E FLUXO TRANSIENTE USANDO ELEMENTOS FINITOS

**Francisco Chagas Silva Filho**

*Unifor, Fortaleza-Ceará, Brasil, fchagas@unifor.br*

**Fernando Antônio Cerqueira**

*Unifor, Fortaleza-Ceará, Brasil, cerqueira@unifor.br*

## Resumo

Este trabalho apresenta a análise do comportamento de uma barragem de terra durante o primeiro enchimento. A análise tem por objetivo verificar a importância da diminuição da sucção em maciços compactados com uma estrutura meta-estável. Esta estrutura colapsível tem origem na compactação com solo com baixa umidade e com baixa energia. Para a análise deste comportamento foi necessário desenvolver uma associação entre dois programas de elementos finitos, um para modelar o fluxo não-saturado transiente e o outro para simular o desenvolvimento das tensões no final da construção e tensões e deformações durante o fluxo transiente. Como conclusão pode-se verificar que a associação dos programas SEEP/W e UNSTRUCT mostraram resultados compatíveis com o esperado.

*Palavras-chave: fluxo transiente, elementos finitos, tensão.*

## Abstract

This paper presents an analysis of the behavior of an earth dam during the first filling. The analysis verifies the importance of the suction decrease in a compacted soil with a meta-stable structure. This collapsible structure has origin in the compacting with low energy and low water content. For the analysis of this behavior it was necessary to develop an association among two programs of finite elements, one to model the unsaturated flow and the other to simulate the development of the stresses in the end of the construction and stresses and deformations during the transient flow. As conclusion, it can be verified that the association of the programs SEEP/W and UNSTRUCT showed compatible results with the expected.

*Keywords: transient flow, finite elements, stress.*

## 1 Introdução

Barragens são utilizadas frequentemente 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 de qual 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 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 com 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 dá-se continuidade a proposta de Miranda (1988) modificada por Silva Filho (1998) e que utiliza um programa de Elementos Finitos no cálculo das deformações ocorridas devido à variação da sucção (pressão do ar menos a pressão da água). No presente trabalho são 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. A associação destes dois programas foi realizada por Cerqueira (2004).

## 2 Modelagem dos solos não-saturados

### 2.1 Programa UNSTRUCT

O programa UNSTRUCT realiza as análises com dois procedimentos para a consideração dos efeitos da variação da sucção nos solos não saturados: no primeiro, aplica-se uma analogia térmica para as deformações dos solos expansivos, submetidos à variação de umidade (contração com aumento de sucção e expansão caso contrário) e no segundo, a variação de rigidez do solo que sofre colapso com diminuição da sucção (Silva Filho, 1998).

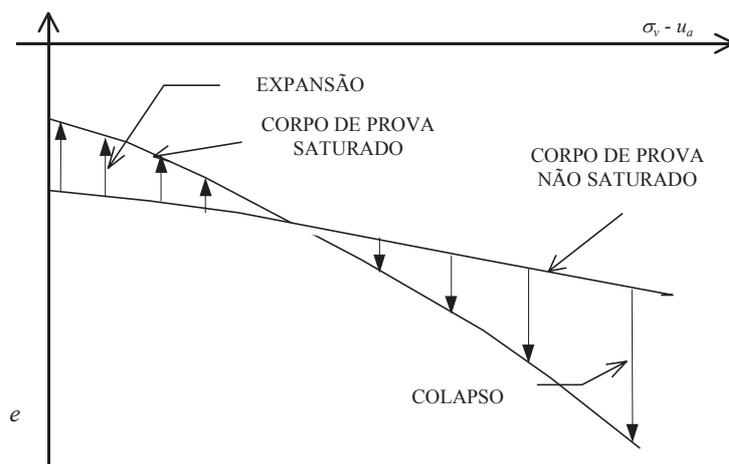


Figura 1 : Ensaio duplo de adensamento, descrito por Jennings e Knight (1957)

Os parâmetros do solo são obtidos a partir do ensaio duplo edométrico descrito por Jennings e Knight (1957). Na Figura 1 é mostrado um resultado típico deste ensaio, apresentado em termos de tensões verticais e índice de vazios. Supondo o comportamento linear, o programa UNSTRUCT utiliza o módulo de elasticidade nas condições iniciais ( $E_0$ ) e o módulo de elasticidade do solo saturado ( $E_s$ ) para determinação do módulo não-saturado e interpolado a partir dos valores extremos, como pode ser visto na Figura 2 e equação 1. Na Figura 2, os resultados do ensaio duplo de adensamento estão expressos em deformação específica ( $e\delta$ ) “versus” tensão vertical total ( $s\delta_v - u_a$ ) e limitados ao intervalo de tensões em que o solo pode ser considerado linearmente elástico.

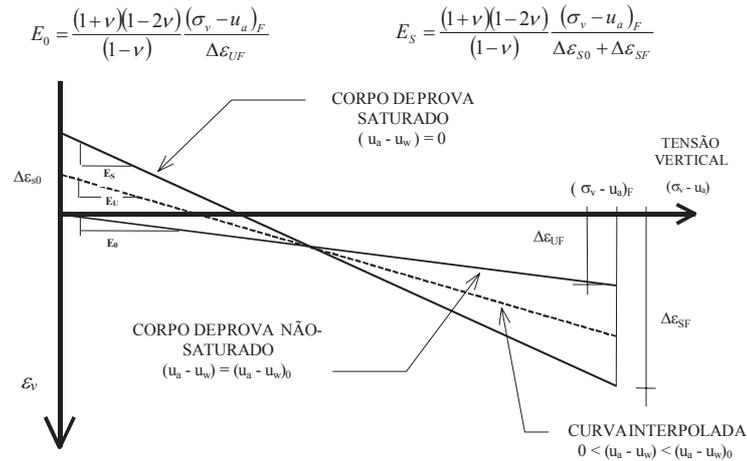


Figura 2: Cálculo de módulo de elasticidade  $E_0$ ,  $E_s$  e  $E_u$

$$E_u = \frac{E_0}{\left(1 - \frac{E_0}{E_s}\right) \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_0} - 1\right] + 1} \quad (1)$$

Onde:

- $(u_a - u_w)_0$  - sucção inicial do corpo de prova usado para definir  $E_0$  (admitida constante)
- $(u_a - u_w)$  - sucção do solo para o qual se deseja calcular  $E_u$ .

Para a determinação das tensões e deformações no solo provocados pela variação da sucção em solos expansivos utiliza-se uma analogia na qual o vetor de deformações iniciais entra na lei de Hooke de maneira análoga às deformações produzidas por variações de temperatura, por este motivo este procedimento foi denominado de analogia térmica.

$$\underline{\sigma} = D_e (\underline{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}_0) + \underline{\sigma}_0 \quad (2)$$

Onde:

- $\underline{\sigma}$  - vetor das tensões;
- $D_e$  - matriz tensão-deformação;
- $\underline{\varepsilon}$  - vetor das deformações;
- $\underline{\varepsilon}_0$  - vetor das auto-deformações resultantes de crescimentos de cristais, variações de temperatura, colapso (Zienkiewicz, 1985) ou expansão dos solos;
- $\underline{\sigma}_0$  - vetor das tensões iniciais.

Na utilização do segundo procedimento, o cálculo dos estados de tensões iniciais e as alterações devido a vários carregamentos tais como, as forças superficiais aplicadas ao solo, são usados na determinação das deformações de colapso. Ou seja, o solo acumula deformações compatíveis com as cargas e a rigidez para o nível de tensões atuante. O aumento da umidade poderá gerar uma diminuição da rigidez, com a conseqüente redução do módulo de elasticidade e o aumento do coeficiente de Poisson durante a saturação, caracterizando, em termos de modelagem proposta, o fenômeno conhecido como colapso. O aumento do coeficiente de Poisson, sob o ponto de vista fenomenológico, também foi aceito por vários pesquisadores, podendo-se citar Pereira e Fredlund (1997).

Em virtude da alteração da rigidez do solo com a diminuição da sucção, a estrutura inicial não se mantém estável, sofrendo deformações obrigatórias e configurando-se o colapso do solo. 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.

$$\int_{V_e} \mathbf{B}^T \sigma_0 d(\text{vol}) = \int_{V_e} \mathbf{B}^T D_e \varepsilon_0 d(\text{vol}) \quad (3)$$

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 de rigidez do solo, deformações adicionais devem ocorrer no elemento, para obter um novo o equilíbrio.

$$\int_{V_e} \mathbf{B}^T \sigma d(\text{vol}) = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \overline{D}_e \mathbf{B} d(\text{vol}) \times a^e - \int_{V_e} \mathbf{B}^T \overline{D}_e \varepsilon_0 d(\text{vol}) + \int_{V_e} \mathbf{B}^T \sigma_0 d(\text{vol}) \quad (4)$$

Onde:

$\sigma$  - novo estado de tensões após o colapso do solo;

$\overline{D}_e$  - rigidez final, após o colapso do solo;

$a^e$  - deslocamentos dos nós do elemento.

A nova rigidez, na qual estão associados o módulo de elasticidade ( $e_u$ ) e coeficiente de poisson ( $N\overline{D}_u$ ), são calculados através de uma interpolação entre os valores extremos não-saturado e saturado do ensaio duplo de adensamento:

$$V_u = V_s - (V_s - V_0) \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_0} \quad (5)$$

Onde:

$(u_a - u_w)_0$  - sucção do corpo de prova usado para definir  $E_0$

$(u_a - u_w)$  - sucção do solo para o qual se deseja calcular  $E_u$

$E_0$  - módulo de elasticidade para a condição inicial com  $(u_a - u_w)_0$

$E_s$  - módulo de elasticidade para a condição saturada

$V_0$  - coeficiente de Poisson para a condição inicial com  $(u_a - u_w)_0$

$V_s$  - coeficiente de Poisson para a condição saturada

Britto e Gunn (1987) utilizam a técnica de verificação de equilíbrio entre o vetor das tensões e o de cargas totais (e.g. vetor de forças de massa, cargas distribuídas, escavação etc.) no programa crisp. Neste programa a verificação do equilíbrio é feita para as tensões iniciais e a cada incremento de carga, tendo por objetivo acompanhar o desenvolvimento da análise durante toda a sua execução.

No procedimento numérico apresentado neste trabalho, o desequilíbrio causado pela variação de sucção é utilizado para determinação das tensões e deformações do colapso, sendo que o vetor de cargas totais não pode ser utilizado no cálculo do desequilíbrio conseqüente da diminuição da sucção, pois não possui informações da rigidez do material. A solução é obtida com a utilização do vetor de deformações acumulado, para o cálculo das cargas nodais. Estas cargas nodais geram as deformações de colapso da estrutura do solo.

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 Farias (1997) mostrou que 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.

A proposta de Nobari e Duncan (1972) foi utilizada com sucesso na saturação de enrocamentos com apenas uma etapa (Pereira, 1996). Porém neste trabalho os parâmetros elásticos do solo são funções da sucção e a cada incremento são calculados

novos valores. Desta forma, as deformações de colapso vão sendo sempre acumuladas e o desequilíbrio deve sempre existir enquanto não ocorrer toda a deformação.

A adoção de uma interpolação linear no cálculo dos parâmetros elásticos do solo não saturado pode levar a significativas diferenças entre os valores de colapso, medidos e previstos. Alguns resultados de ensaios, apresentados na literatura científica indicam, por exemplo, que o módulo de elasticidade não acompanha a variação de sucção para valores muito elevados desta variável. Assim, recomenda-se analisar se a faixa de variação da sucção que está sendo modelada é compatível com a hipótese da variação linear. Como forma de contornar o problema sugere-se que nos cálculos de interpolação seja adotado para o corpo de prova não-saturado com uma sucção não superior aos indicados a seguir (Silva Filho, 1998):

Quadro 1 – Valores máximos de sucção para a amostra seca

Solo	$(u_a - u_w)$ (kPa)
Areias e siltes de baixa plasticidade	500
Argilas de baixa plasticidade	4000
Argilas de alta plasticidade	8000

Tendo em vista o comportamento não-linear do solo, o programa UNSTRUCT utiliza os módulos de elasticidade variáveis (linear por trechos). Miranda (1988), realizando análises de primeiro enchimento de pequenas barragens, adotava o comportamento tensão-deformação restrito ao trecho que se pode considerar esta relação linear. Observando-se um ensaio de adensamento, apresentado em uma curva tensão vertical  $s\delta_v$  (em escala logarítmica) e índice de vazios, identifica-se claramente dois trechos: o primeiro anterior a tensão de pré-adensamento e o segundo após esta tensão.

Para os casos apresentados neste trabalho, embora sejam importantes a caracterização dos dois trechos, a apresentação dos resultados do ensaio duplo de adensamento (Jennings e Knigh, 1957) é feita com a tensão vertical  $s\delta_v$  em escala natural versus a deformação vertical específica. Observando-se os resultados do ensaio, verifica-se o comportamento tensão-deformação não-linear do corpo de prova. A rigidez do solo não-saturado é a mesma do solo saturado para tensões elevadas, o que é evidenciado no ensaio duplo de adensamento pela convergência das curvas seca e saturada.

A versão desenvolvida por Silva Filho (1998) e apresentada neste trabalho admite um comportamento geral não-linear, onde a curva tensão-deformação tem um comportamento linear por trechos. Os resultados do ensaio duplo são fornecidos ao programa através de um conjunto de pontos definidos pela tensão vertical, aplicada ao corpo de prova, e a correspondente deformação vertical específica. Entre estes pontos a relação tensão-deformação é representada por segmentos de retas, que mudam de inclinação a cada intervalo de tensões. O número de trechos lineares que depende do comportamento geral do solo, é definido pelo usuário. É importante que não ocorra grandes variações na inclinação de trechos retilíneos sucessivos, para que não se tenha problemas de convergência no processo iterativo.

O objetivo da utilização deste procedimento, é proporcionar uma simplificação da obtenção dos parâmetros do modelo (tais como módulos de elasticidade, parâmetros  $a\delta$  e  $b$ ), utilizados na determinação das deformações iniciais dos solos expansivos (analogia térmica) serão calculados pelo programa, o que não era feito na versão original. Como a curva é linear por trechos, o programa calcula estes parâmetros para cada trecho de tensões que são adotados conforme o nível de tensões atuante no elemento.

O processo de cálculo das tensões e deformações é feito iterativamente até atingir um erro máximo entre os valores de tensões, adotado pelo usuário, ou quando é atingido um número máximo de iterações, também pré-determinado. Na primeira iteração, os valores dos parâmetros do solo, para todos os elementos serão os correspondentes ao primeiro trecho de tensões.

O exame das curvas de um ensaio duplo de adensamento permite visualizar que as deformações potenciais de colapso de um solo são variáveis. A diferença entre os índices de vazios das duas curvas cresce com o aumento da tensão de compressão até atingir um valor máximo. A partir deste máximo, as deformações potenciais de colapso vão gradualmente decrescendo com o aumento da tensão de compressão.

Este comportamento é explicado pela quebra das ligações entre as partículas do solo não-saturado, com o seu conseqüente rearranjo, quando a tensão de compressão atinge valores mais elevados mesmo que a sucção matricial seja mantida constante, o que não é real. Enquanto o solo saturado que apresenta elevada compressibilidade para as tensões mais baixas tem sua porosidade reduzida logo no início do carregamento para depois, gradativamente, aumentar sua resistência à compressão confinada.

Teoricamente para carregamentos elevados, as duas curvas poderiam chegar a se encontrar, apresentando o mesmo índice de vazios, quando então as deformações de colapso tornam-se praticamente nulas. Isto é confirmado pelo exame de resultados de ensaios.

O procedimento de cálculo do colapso, introduzido no programa UNSTRUCT, também é capaz de modelar esta variação nas deformações de colapso. Isto é possível porque os parâmetros elásticos utilizados pelo programa são retirados diretamente das duas curvas de um ensaio duplo: uma do solo não-saturado e a outra do solo saturado.

## 2.1 Programa SEEP/W

Por se tratar de um programa comercial e largamente utilizado na comunidade geotécnica, a sua apresentação neste trabalho será limitada às informações necessárias para o entendimento do processo de associação. O programa SEEP/W modela o fluxo saturado e não-saturado, sendo, portanto, possível analisar o processo de percolação em função do tempo, tais como, infiltração superficial causadas por precipitações, enchimento de reservatórios, etc.

Os tipos de análises possíveis de se realizar neste trabalho, envolvem condições de fluxo na condição estacionária ou transiente. Pode ser confinado e não-confinado e as condições podem ser axissimétricas. As condições de contorno impostas poderão ser de carga hidráulica e fluxo constantes ou funções do tempo.

Como propriedades dos solos necessárias para a análise, deve-se fornecer uma função da condutividade hidráulica com relação a poro pressão negativa da água na zona não-saturada do maciço. Os dados podem ser fornecidos ao programa através de dados discretos usando os modelos propostos na literatura científica, sendo geradas curvas como resultado da interpolação dos dados fornecidos. A equação abaixo foi proposta por Fredlund e Xing (1994) e correlaciona os dados de sucção com a umidade volumétrica. Este modelo foi usado para implementar a associação entre os programas SEEP/W e UNSTRUCT.

$$\theta = \theta_s \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1000000}{\psi_r}\right)} \right] \left\{ \frac{1}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]} \right\}^m \quad (6)$$

Onde:

$\theta_s$  - umidade volumétrica de saturação

$\psi$  - sucção (kPa) do solo

$\psi_r$  - sucção total (kPa) correspondente a umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ )

$a$  - parâmetro do solo que se relaciona com o valor de entrada de ar (kPa)

$e$  - algarismo neperiano (2,718282...)

$n$  - parâmetro do solo que controla a inclinação do ponto de inflexão da curva característica;

$m$  - parâmetro que é relacionado com a umidade residual do solo.

Como resultado, o programa SEEP/W fornece dados de carga hidráulica nos pontos de integração dos elementos; e a umidade volumétrica que será útil para atualizar as forças de massa do maciço calculadas no programa UNSTRUCT.

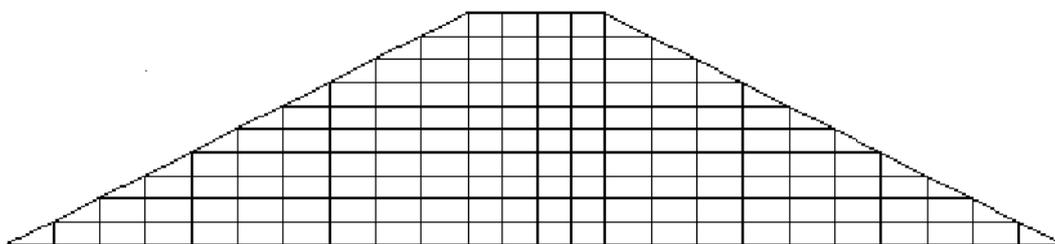
## 3 Análise do primeiro enchimento de uma barragem de terra

Neste item é apresentada uma aplicação da associação dos dois programas SEEP/W e UNSTRUCT. A aplicação é semelhante ao apresentado por Miranda (1988), que analisou o comportamento do enchimento de uma pequena barragem com 10m de altura e composta de terra homogênea. A barragem tinha inclinações 1 : 2,5 (V : H) e a largura de coroamento igual a 6m. A Figura 3 apresenta a malha de elementos finitos utilizada pelos dois programas.

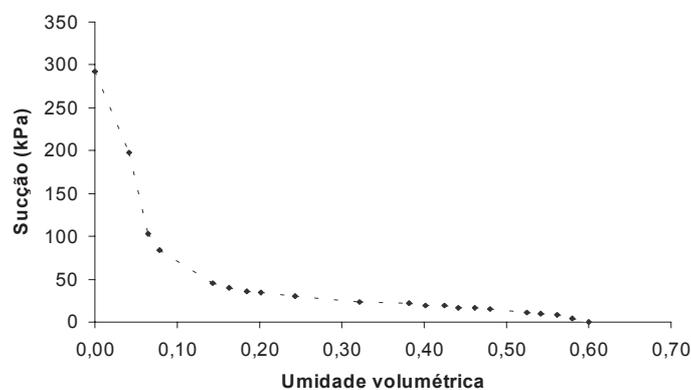
Para modelar o fluxo transiente é necessário fornecer ao programa SEEP/W os dados da curva de retenção do solo utilizado na construção da barragem. Na análise realizada utilizou-se a curva apresentada na Figura 4. Para modelar a condutividade hidráulica usou-se o modelo de Fredlund e Xing (1994).

Para o cálculo das tensões e deformações calculadas pelo programa UNSTRUCT usou-se os dados de um ensaio duplo de adensamento também apresentado por Miranda (1988). O cálculo de enchimento de barragem de terra com material compactado

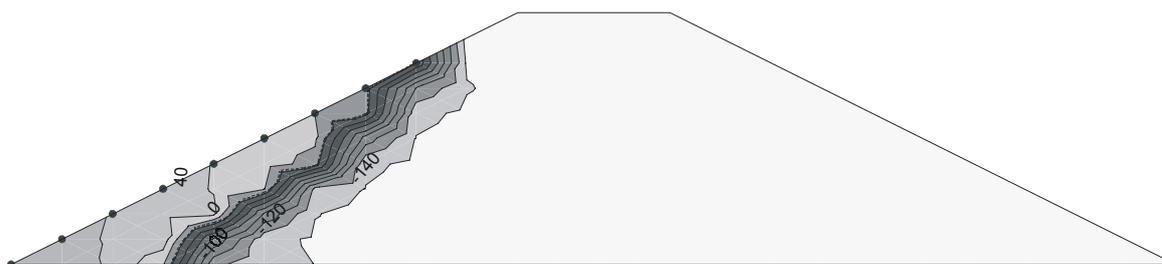
com baixa umidade e sem compactação, caracterizando-se em uma estrutura meta-estável. o colapso é seqüenciado com o tempo atingindo desde a zona de montante com poucos dias até generalização de todo o maciço ao final de 130 dias mantendo-se o nível da água com 8m. Neste trabalho são apresentados nas Figuras 5 a 8 dois momentos que correspondem respectivamente a 3 e 16 dias. A malha deformada está com os deslocamentos aumentados em 10 vezes.



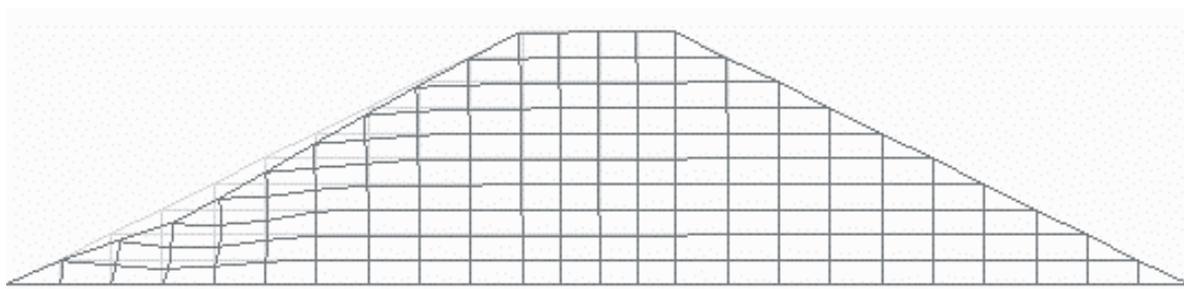
**Figura 3:** Malha de elementos finitos usada pelos programas



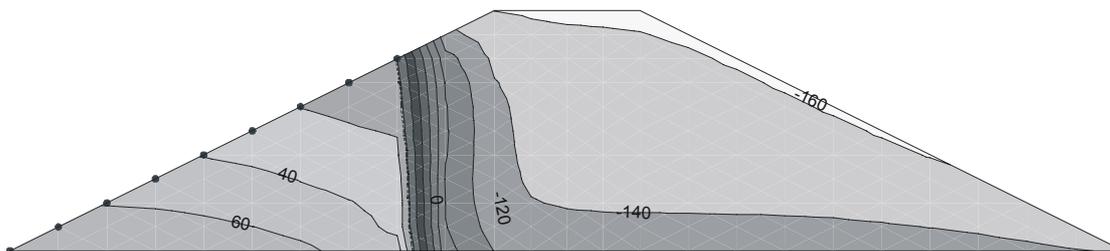
**Figura 4:** Curva característica do solo utilizado na construção da barragem



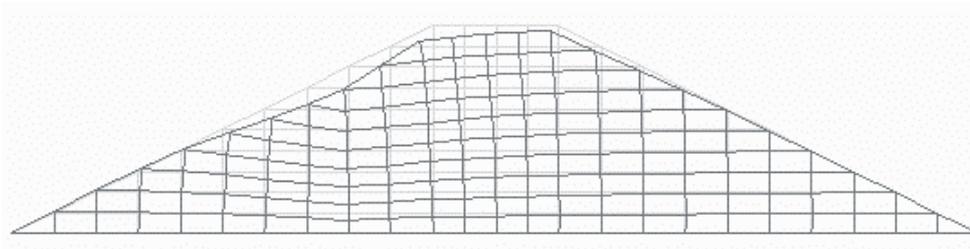
**Figura 5:** Avanço da frente de saturação, decorridos 3 dias



**Figura 6:** Malha deformada após 5 dias



**Figura 7:** Avanço da frente de saturação, decorridos 16 dias



**Figura 8:** Malha deformada após 16 dias

## 5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma aplicação da associação de dois programas de elementos finitos com o intuito de analisar o comportamento de uma pequena barragem submetida ao primeiro enchimento. Durante a fase de construção da barragem admitiu-se que os fatores que influenciam a compactação dos solos, ou seja, a umidade e a energia, foram aplicadas com valores bastante inferiores à condição ótima do ensaio de proctor. Nesta situação o maciço se encontra com uma estrutura meta-estável, promovida pelas tensões capilares oriundas da baixa umidade existente nos vazios do solo e por uma elevada porosidade. Durante a fase de enchimento o estado de tensões se altera bastante em todo o maciço e de forma transiente. Esta variação ocasiona colapsos localizados e por vezes promove a ruptura completa da barragem. Para a análise deste comportamento torna-se fundamental a utilização de associação ou acoplamento dos dois fenômenos: fluxo e equilíbrio. Este artigo apresentou a associação dos programas seep/w (geo-slope, 2001) e unstruct (silva filho, 1998). O programa seep/w modela o fluxo transiente e fornece dados de sucção e umidade volumétrica para o programa unstruct calcular as novas tensões e deformações. Existe a opção no programa unstruct para fornecer apenas os valores de sucção e internamente no programa calcular a umidade volumétrica utilizando os vários modelos propostos na literatura, tais como o de fredlund e xing (1994). Os resultados obtidos apresentaram bastante coerência com o esperado, restando para uma pesquisa posterior a construção de uma pequena barragem nestas condições com instrumentação necessária para medidas durante todo o processo de enchimento da barragem.

## 6 Referências

- BRITTO, A. M.; GUNN, M. J. *Critical state soil mechanics via finite elements*. USA: John Wiley & Sons, 1987.
- CERQUEIRA, F. A. Modelagem por elementos finitos da associação fluxo e equilíbrio em solos não-saturados. Brasil: *Dissertação de Mestrado em Informática Aplicada (MIA)*, Unifor (No prelo), 2004.
- FARIAS, M. M. Brasil: *Comunicação Pessoal*. Discussão realizada no 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 1997.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for soil-water characteristic curve. Canada: *Canadian Geotechnical Journal*, 1994. 31(4): 521-532
- Geo-slope (2001). *SEEP/W 2.1 User's Manual*. Geo-slope International, Calgary, Canada

MIRANDA A. N. Behavior of small dams during initial filling. Fort Collins – USA: *Dissertação de PhD*, Colorado State University, 1988. 229p.

NOBARI, E. S.; DUNCAN, J. M. *Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rock fill dams*. Berkeley – USA: University of California 1972. 186p.

PEREIRA, J. H. F. Numerical analysis of the mechanical behavior of collapsing earth dams during first reservoir filling. Canada: *PhD Thesis*, University of Saskatchewan, Saskatoon, 1996. 449 p.

PEREIRA J. H.; FREDLUND D. W. *Constitutive modeling of metastable-structured compacted soil. Recent Developments in Soil and Pavements Mechanics*. Holland: Edited by Marcio Almeida – A.A. BALKEMA, 1997.

SILVA FILHO, F. C. Silva Filho F. C. (1998) *Análise Numérica de Problemas em Solos Não Saturados: Modelagem, Implementação e Aplicações Práticas*. Brasil: COPPE/UFRJ-Tese de Doutorado, 1998. 253p.

ZIENKIEWICZ, O. C. *The finite element method*. USA: McGraw-Hill Book Company, 1985.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **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 Prémio 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.

### **Fernando Antônio de Cerqueira**

Engenheiro Civil pela Universidade de Fortaleza - UNIFOR em 1987. Mestre em Informática Aplicada, pela Universidade de Fortaleza - UNIFOR em 2004. Professor Assistente do curso de Informática da UNIFOR