

# XVI ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

Universidade de Fortaleza  
17 a 20 de outubro de 2016

## Análise Numérica de Fluxo Transiente em uma Barragem de Terra no Estado do Ceará

Leila Maria Coelho de Carvalho <sup>\*1</sup> (IC), Fernando Feitosa Monteiro <sup>2</sup> (PG), Yago Machado Pereira de Matos <sup>3</sup> (PG), Marcos Fábio Porto de Aguiar <sup>4</sup> (PQ), Francisco Heber Lacerda de Oliveira <sup>5</sup> (PQ).

*1Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE;*

*2Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE;*

*3Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE;*

*4 Professor de Graduação em Engenharia Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza-CE*

*5Professor de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE*

yago\_mpm@hotmail.com

*Palavras-chave: Análise Numérica, Barragem de Terra, Fluxo Transiente, Fluxo Não Confinado.*

### Resumo

O desenvolvimento do computador digital e o uso de métodos numéricos para resolver problemas complexos de matemática tiveram um impacto significativo na resolução de problemas em engenharia. Esse fato influenciou quase todos os níveis da profissão. A geotecnia não foi uma exceção. Existem inúmeras aplicações de problemas de geotecnia que podem ser solucionados por meio de análise computacional. Entre elas, destaca-se a análise de percolação de água em meio poroso. O estudo da percolação da água nos solos é muito importante, porque ele intervém em um grande número de problemas práticos, como o enchimento ou o esvaziamento do reservatório de uma barragem de terra. No caso do estado do Ceará, o caráter intermitente dos rios no semiárido nordestino obriga à construção de reservatórios para a acumulação de água e regularização de vazão. O presente trabalho buscou analisar o fluxo, nas condições de enchimento e esvaziamento do reservatório, que ocorre em uma barragem de terra localizada no interior do estado do Ceará. As especificações de projeto foram fornecidas pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). Foram consideradas, nesse estudo, permeabilidades saturadas. Identificaram-se, para cada estágio, os valores de poropressões no interior do maciço e a variação da posição da linha freática durante o enchimento e o esvaziamento do reservatório. Verificou-se que as condições hidráulicas e o estado de tensões no maciço variam com o tempo e, somente, podem ser modelados, com realismo, admitindo-se os conceitos aplicados aos solos não saturados.

### Introdução

#### **Métodos Numéricos**

Segundo Buffoni (2002), os métodos numéricos correspondem a um conjunto de ferramentas ou métodos usados para se obter a solução de problemas matemáticos de forma aproximada. A análise numérica é o estudo de algoritmos que buscam resultados numéricos de problemas das mais diferentes áreas do conhecimento humano, modelados matematicamente.

Para Dunn; Anderson e Kiefer (1980), o desenvolvimento do computador digital e o uso de métodos numéricos para resolver problemas complexos de matemática tiveram um impacto significativo na resolução de problemas em engenharia. Esse fato influenciou quase todos os níveis da profissão. A geotecnia não foi uma exceção.

Existem inúmeras aplicações de problemas de geotecnia que podem ser solucionados por meio de análise computacional. Entre elas, destaca-se a análise de percolação de água em meio poroso.

#### **Fluxo em Barragens de Terra**

No caso do estado do Ceará, Dantas Neto et al. (2013) afirmam que o caráter intermitente dos rios no semiárido nordestino obriga à construção de reservatórios para a acumulação de água e regularização de

vazão com intuito de suprir as necessidades de abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação etc. Logo, o reservatório é construído a partir de um barramento transversal, obstruindo a passagem da água no rio e formando um lago artificial que acumula essa água durante a estação chuvosa para permitir seu uso, também, durante a estação seca.

Pinto (2006) explica que o estudo da percolação da água nos solos é muito importante, porque ele intervém em um grande número de problemas práticos, como o enchimento ou o esvaziamento do reservatório de uma barragem de terra.

Nesses dois casos específicos, considera-se que as partículas seguem caminhos curvos no corpo da barragem, porém contidos em planos paralelos, isto é, um fluxo bidimensional. Além disso, esse fluxo através da barragem é considerado não confinado, pois se processa por ação da gravidade, sendo evidenciado pelo surgimento de uma superfície freática que é uma linha de fluxo com carga puramente altimétrica ( $u=0$ ) e que delimita a região onde o solo se encontra saturado.

A superfície freática, em barragens de terra, depende da geometria do maciço, da existência de elementos drenantes e do tipo de material empregado. Diferentes superfícies freáticas são mostradas na Figura 1.

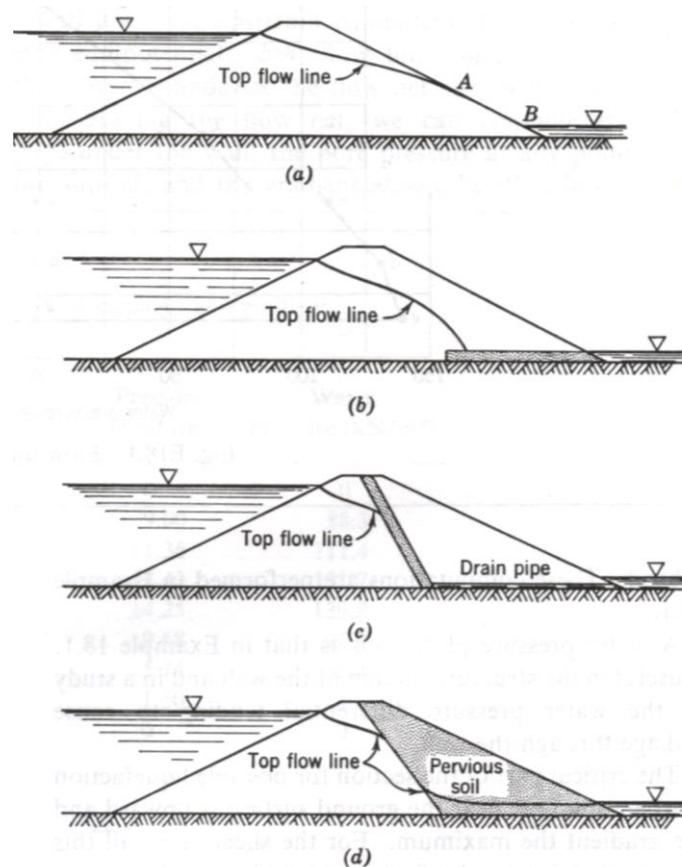


Figura 1. Fluxo em barragens de terra: (a) barragem homogênea sem drenagem interna; (b) barragem homogênea com dreno de pé; (c) barragem homogênea com filtro chaminé; (d) barragem zoneada (Lambe, 1969).

## Metodologia

O presente trabalho utilizou livros da área de geotecnia para a realização da revisão bibliográfica. Na sequência, foi feita a seleção da barragem seguida da pesquisa de sua seção típica e de outros dados de projeto. Por fim, foi realizada a análise de enchimento e esvaziamento da barragem de terra selecionada por meio de técnicas numéricas.

## Resultados e Discussão

O presente estudo buscou analisar o fluxo, nas condições de enchimento e esvaziamento do reservatório, que ocorre em uma barragem de terra localizada no interior do estado do Ceará. As especificações de projeto foram fornecidas pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS).

A barragem do açude Favelas, de acordo com DNOCS (2016), está localizada no município de Tauá, estado do Ceará, distando cerca de 320 km de Fortaleza e 23 km da sede do município. A área da bacia hidrográfica do riacho Favelas no local da barragem é de cerca de 680 km<sup>2</sup>.

Ainda segundo DNOCS (2016), a barragem foi construída com aterro compactado de solos areno-argilosos obtidos de áreas de empréstimo locais, formando um aterro homogêneo com taludes 1:2,5 a montante e 1:2 a jusante. A crista foi projetada com 6 m de largura e 440 m de comprimento. O sistema de drenagem interna é composto por um filtro vertical; um tapete drenante constituído de areia e pedra britada; e um dreno de pé com enrocamento protegido por camadas de filtros/transições. No trecho do leito do rio, foi projetada uma trincheira de vedação com 4 m de largura na base e taludes 1:1. A Figura 2 apresenta a seção típica da barragem Favelas com alguns dados de projeto.

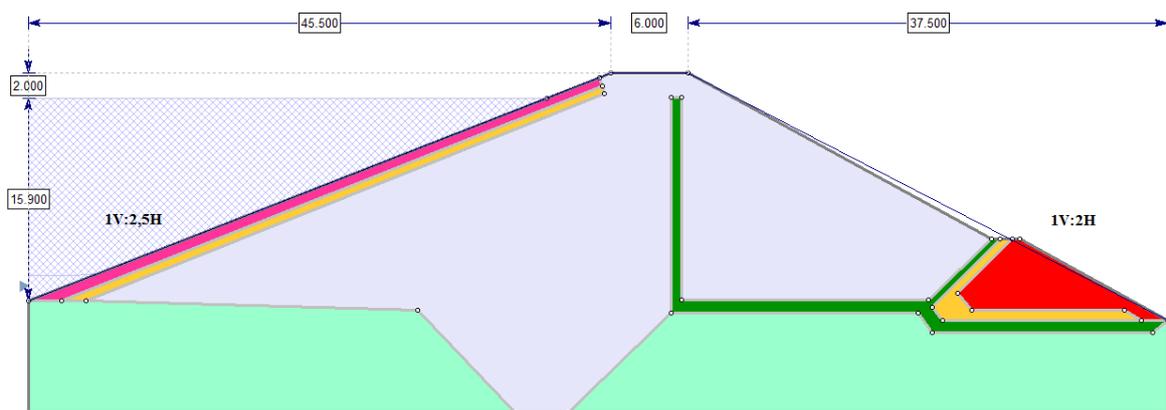


Figura 2. Seção típica da barragem Favelas.

A análise foi feita considerando que os tempos de enchimento e esvaziamento eram os mesmos e correspondentes a sete dias, podendo ser admitidos como instantâneos. Para isso, admitiu-se que o nível d'água coincidiria com a cota da soleira do sangradouro no enchimento e, no esvaziamento, a altura da água seria, apenas, 2 m.

O estudo considerou estágios de 10, 30, 50, 100, 200 e 400 dias para apresentação dos resultados da modelagem.

É importante salientar que os coeficientes de permeabilidade adotados para os materiais que compõem a barragem são referidos à condição saturada dos solos. Seus valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de coeficientes de permeabilidade na condição saturada.

Elemento	Cor	Coefficientes de permeabilidade
Maciço e Cut-Off	Cinza	1.10-6 m/s
Drenos	Verde	1.10-2 m/s
Enrocamento	Vermelha	1.10-2 m/s
Transição	Laranja	1.10-2 m/s
Rip-Rap	Rosa	1.10-2 m/s
Fundação	Azul	1.10-2 m/s

Os resultados da análise para condição de enchimento são apresentados nas Figuras 3 a 8.

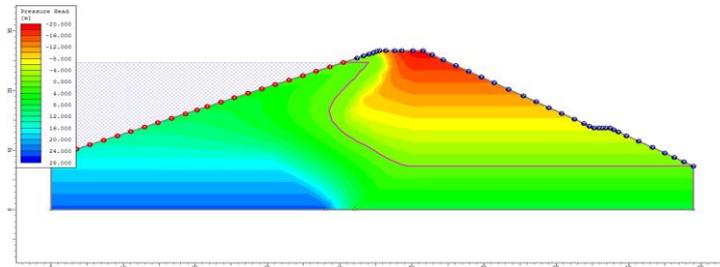


Figura 3. 10 dias após o início do enchimento.

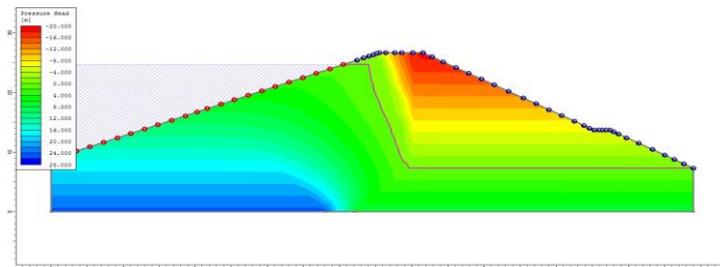


Figura 4. 30 dias após o início do enchimento.

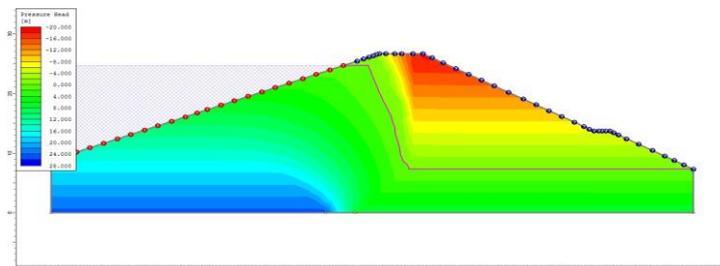


Figura 5. 50 dias após o início do enchimento.

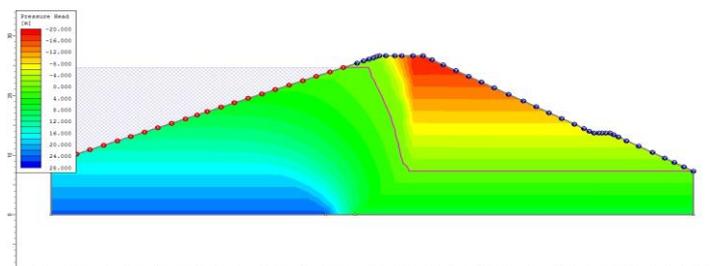


Figura 6. 100 dias após o início do enchimento.

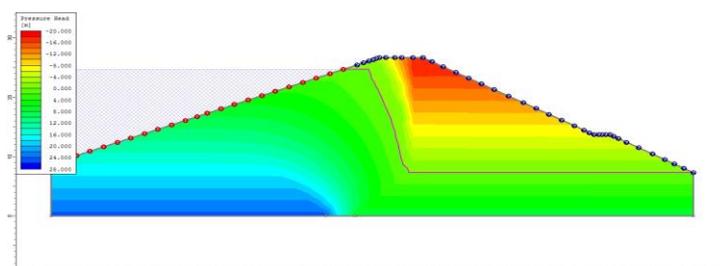


Figura 7. 200 dias após o início do enchimento.

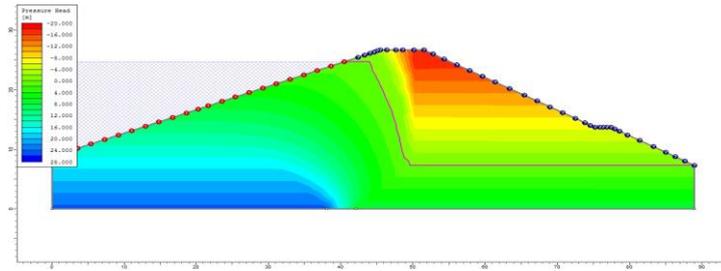


Figura 8. 400 dias após o início do enchimento.

No que diz respeito ao esvaziamento, as Figuras 9 a 14 exibem os resultados da modelagem.

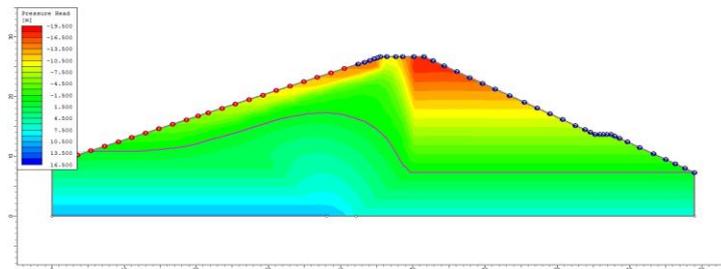


Figura 9. 10 dias após o início do esvaziamento.

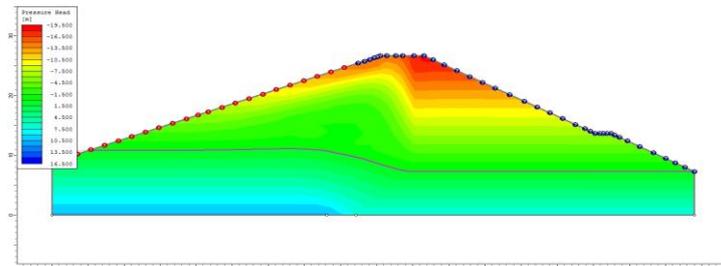


Figura 10. 30 dias após o início do esvaziamento.

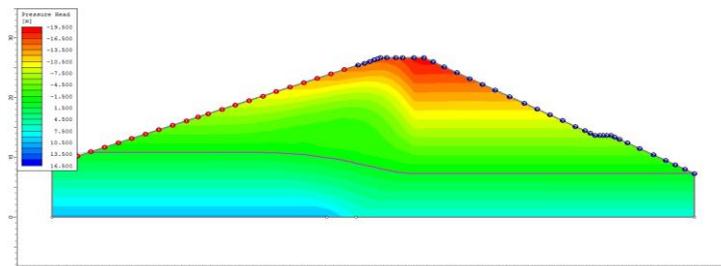


Figura 11. 50 dias após o início do esvaziamento.

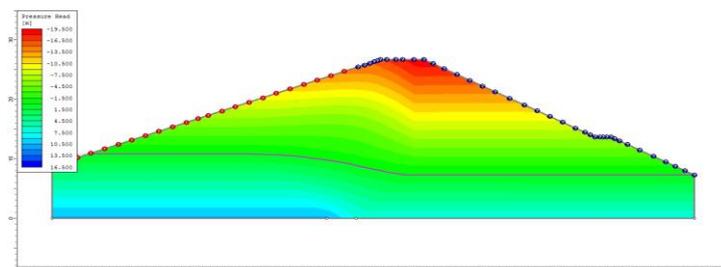


Figura 12. 100 dias após o início do esvaziamento.

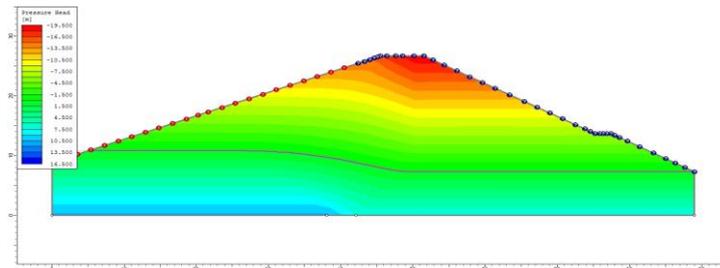


Figura 13. 200 dias após o início do esvaziamento.

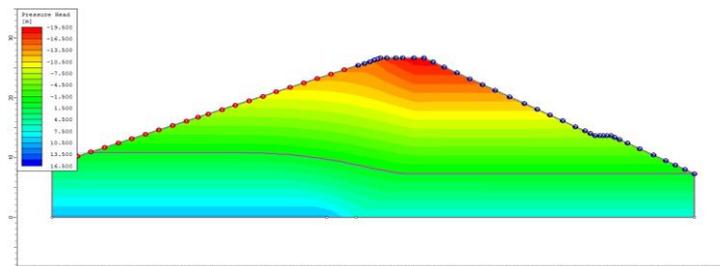


Figura 14. 400 dias após o início do esvaziamento.

## Conclusão

Por meio da análise realizada, foram identificados, para cada estágio, os valores de poropressões no interior do maciço e a variação da posição da linha freática durante o enchimento e o esvaziamento do reservatório. Percebe-se que as poropressões são positivas no trecho saturado, isto é, abaixo da superfície freática e negativa (succção) no trecho não saturado. Logo, as condições hidráulicas e o estado de tensões no maciço variam com o tempo e, somente, podem ser modelados, com realismo, admitindo-se os conceitos aplicados aos solos não saturados. Para estudos futuros, recomenda-se uma análise de fluxo transiente considerando, agora, a função condutividade hidráulica a qual pode ser estimada a partir da curva de retenção de água dos materiais constituintes do maciço.

## Referências

- BUFFONI, S. S. O. *Apostila de Introdução aos Métodos Numéricos*. 2002. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/salete/imn/calnum1.pdf>. Acesso em: 28/06/2015.
- DANTAS NETO, Silvrano Adonias et al. *Manual Técnico para Construção de Pequenas Obras de Abastecimento de Água no Semiárido Brasileiro*. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2013.
- DUNN, Irving S.; ANDERSON, Loren R.; KIEFER, Fred W.. *Fundamentals of Geotechnical Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- Site do DNOCS. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/favelas.htm>. Acessado em 15 de julho de 2016.
- LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V.. *Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3.ed São Paulo: Oficina de Textos, 2006

## Agradecimentos

Agradecemos à CAPES pela a bolsa de <sup>2</sup> e à FUNCAP pela bolsa de <sup>3</sup>.