

ANÁLISE NUMÉRICA DE SOLOS NÃO SATURADOS COLAPSÍVEIS: APLICAÇÃO EM UMA PEQUENA BARRAGEM DE TERRA EXPERIMENTAL

Numerical analysis of collapsible unsaturated soils: application to a small experimental dam

José Benevides Lôbo Neto*

Francisco Chagas da Silva Filho**

Caio Petrônios de Araújo Lopes ***

RESUMO – Este artigo apresenta uma análise numérica de solos não saturados colapsíveis, utilizados em uma pequena barragem de terra localizada no município de Quixadá, Estado do Ceará, Brasil. A estrutura colapsível foi resultado da aplicação de baixa energia de compactação e baixa umidade. São apresentados resultados dos ensaios de caracterização, compactação e adensamento duplo para o material oriundo da jazida empregada na construção da pequena barragem, com o objetivo de identificar as amostras analisadas e estudar o fenômeno do colapso. Através dos resultados dos ensaios, foi realizada uma análise numérica de fluxo e equilíbrio, com os programas Slide 6.0 e UNSTRUCT, de forma associada, para previsão do comportamento tensão x deformação (colapso) da barragem experimental. A seção transversal da barragem é constituída de núcleo com material compactado na umidade ótima e energia de Proctor Normal, e de espaldares no ramo seco. O objetivo é verificar a eficiência do maciço construído com redução de custos (por diminuição de terraplenagem) e redução do consumo de água, tornando-a uma importante solução construtiva para pequenas barragens em regiões semiáridas. Os estudos experimentais e numéricos da obra com estas características apontaram condições de estabilidade, tendo em vista que a barragem não apresentou ruptura durante o monitoramento.

SYNOPSIS – This article presents a numerical analysis of collapsible unsaturated soils, used in a small earth dam located in the city of Quixadá, State of Ceará, Brazil. The collapsible structure resulted from the application of low compaction energy and low moisture content. Results of characterization, compaction and double consolidation tests for the borrowed material employed in the construction of the small dam are presented, aiming to identify the analysed samples and study the collapse phenomenon. With the test results, a numerical analysis of flow and balance was performed, using the software Slide 6.0 and UNSTRUCT, in an associated way, to predict the stress versus strain behaviour (collapse) of the experimental dam. The dam cross section has a core with soil compacted at optimum moisture content with standard Proctor energy, and shells in the dry branch. The goal is to verify the efficiency of a dam built with reductions in costs (due to less earthworks) and in water consumption, making it an important constructive solution for small dams in semi-arid regions. The experimental and numerical studies of the work with these characteristics pointed to stability conditions, considering that the dam did not failure during the monitoring season.

Palavras Chave – Barragem, solos não saturados, colapso.

Keywords – Dam, unsaturated soil, collapse.

* Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE, Brasil.
E-mail: netobenevides@yahoo.com.br.

** Doutor em Geotecnia, Professor Adjunto, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE, Brasil.
E-mail: fchagas@ufc.br.

*** Mestre em Engenharia de Transporte, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza-CE, Brasil.
E-mail: caiopetronios@hotmail.com

1 – INTRODUÇÃO

O comportamento dos solos não-saturados não apresenta a mesma possibilidade de modelagem como ocorre com os solos saturados, na qual a geotecnia teve o seu desenvolvimento inicial. Em particular, os solos não saturados colapsíveis são um dos principais temas da geotecnia atual.

No Nordeste Brasileiro, em particular, esse assunto demanda mais estudos, devido aos solos com essas características serem predominantemente encontrados em regiões áridas e semiáridas, e quando empregados nas construções de aterros e pequenas barragens a compactação ocorre com baixa energia e baixa umidade.

As construções das pequenas barragens de terra são fundamentais e relevantes nas atividades de agricultura local, sendo, em muitas vezes, a principal fonte de água.

Nesse sentido, Miranda (1988) desenvolveu o programa UNSTRUCT (UNSatURated STRUCTure analysis) que é capaz de prever o comportamento tensão-deformação dos solos não saturados através do método dos elementos finitos, usando modelo elástico considerando o efeito da sucção e de sua variação. Silva Filho (1998) ampliou a capacidade do programa UNSTRUCT para modelar o comportamento não-linear.

Miranda (1988) propôs também uma metodologia para construção de pequenas barragens de terra, onde o núcleo central da barragem seria constituído por material compactado na umidade ótima e com energia Proctor Normal e os espaldares compactados no ramo seco da curva de compactação, reduzindo assim, custo de compactação e a quantidade de água utilizada na construção da barragem.

Este trabalho apresenta os resultados numéricos da metodologia de associação sugerida por Silva Filho e Cerqueira (2004) para verificar o comportamento de uma pequena barragem construída com os materiais segundo a proposta de Miranda (1988).

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – Solos não saturados

Entendem-se como solos não saturados aqueles cujo grau de saturação é menor do que 1, sendo constituídos por um sistema trifásico (solo, água e ar). A interface entre o ar e a água cria uma película contráctil capaz de mobilizar resistência à tração. Nesse caso o arcabouço teórico aplicado aos solos saturados não pode ser usado.

Por exemplo, o princípio das tensões efetivas desenvolvido por Terzaghi em 1923 introduz o conceito de tensão efetiva para solos saturados. Segundo este princípio, a deformabilidade e a resistência do solo estão intrinsecamente associados ao excesso das tensões totais sobre a pressão da água:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

onde σ' é a tensão efetiva, σ é tensão total e u_w é a pressão da água.

Devido à aplicabilidade com sucesso do princípio das tensões efetivas, alguns pesquisadores tentaram buscar expressões que definissem tensões efetivas para explicar o comportamento dos solos não saturados. Porém, na conferência “Pore Pressure and Suction in Soils” realizada em Londres em 1960, Bishop (1959) propôs uma expressão para mostrar a tensão efetiva dos solos não saturados:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

onde u_a é a pressão do ar nos poros, $(u_a - u_w)$ é a sucção matricial e χ é um parâmetro que depende do grau de saturação, variando de zero para o solo perfeitamente seco até 1 (um) para o solo saturado.

Jennings e Burland (1962) verificaram que a expressão proposta por Bishop (1959) ajustava-se para solos com grau de saturação da ordem de 20% para areias, 50% para siltes, 85% para areias finas e 85% para argilas. Os solos com grau de saturação inferior a estes valores são conhecidos como críticos.

A aplicabilidade da equação de Bishop (1959) é questionada, pois o parâmetro depende, além do grau de saturação, da sucção, da umidade, da composição, da estrutura do solo bem como de sua história de tensões e deformações (Menescal, 1992). Dessa forma, inclui-se praticamente todos os fatores que influenciam no comportamento de deformabilidade e resistência do solo.

2.1.1 – Sucção

A sucção (poropressão negativa) é a pressão negativa de água pura, referida à pressão intersticial do ar do solo, a que a água do solo teria de ser submetida através de uma membrana semipermeável, para que a pressão do ar entrasse em equilíbrio com a pressão da água no solo. A sucção é dividida em duas parcelas: sucção matricial e sucção osmótica.

Uma definição simples para sucção seria que é a força com que um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover. Esta avidéz por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo (Marinho, 1998).

A sucção total é a soma da sucção matricial e da sucção osmótica, sendo na maioria das vezes a sucção osmótica obtida através da diferença entre a sucção total e a matricial.

A sucção osmótica é a sucção equivalente obtida através da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com uma solução de composição idêntica à da água intersticial, em relação à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com água pura “livre”.

Neste trabalho, o termo sucção refere-se à sucção matricial que é a sucção equivalente obtida através da medição da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água intersticial, em relação à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com uma solução de composição idêntica à da água intersticial.

2.1.2 – Solos não saturados colapsíveis

No passado, a ideia preponderante era que os solos colapsíveis eram solos arenosos ou siltosos. Contudo, atualmente já se têm verificado casos em que solos colapsíveis apresentam forte porcentagem de argila, nos quais predominam os plásticos e os compactados. Quando o solo é compactado no ramo seco da curva de compactação pode produzir uma estrutura colapsível, seja devido ao baixo teor de umidade, seja pelos baixos pesos específicos aparentes.

Segundo Mendonça (1990) o colapso é o fenômeno observado em alguns solos não saturados que apresentam brusca redução de volume quando é aumentado sua umidade (Figura 1). No entanto, também, pode-se ter colapso quando se modifica o estado de tensões solicitantes. Deve-se entender por brusca ou súbita a redução de volume a velocidade muito maior do que a de adensamento de solo argiloso saturado.

2.1.3 – Quantificação do colapso

Os ensaios edométricos, também conhecidos como ensaios de adensamento, são considerados os mais significativos na determinação do colapso do solo, pois estes ensaios, além de determinar qualitativamente a colapsividade do solo, fornecem resultados que possibilitam avaliar a magnitude do colapso do solo.

Os ensaios edométricos se dividem em duas metodologias: ensaio edométrico duplo (adensamento duplo) e simples (adensamento simples).

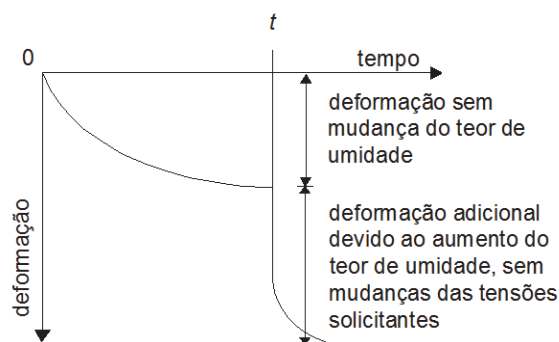


Fig. 1 – Conceito Básico de Colapso (Mendonça, 1990)

O ensaio de adensamento duplo, foco deste trabalho, foi proposto por Jennings e Knight (1957) e consiste basicamente em quantificar o colapso sofrido pelo solo, através da comparação de um corpo de prova na umidade natural e outro previamente inundado.

Jennings e Knight (1957) propõem o seguinte procedimento para o ensaio duplo edométrico:

- Os dois corpos de prova (na umidade natural) devem ser mantidos durante 24 horas sob a carga de 1,0 kPa;
- No final deste estágio, um corpo de prova é inundado, por inundação da célula do edómetro, enquanto o outro corpo de prova é mantido na umidade natural; os dois corpos de prova são mantidos neste segundo estágio durante 24 horas;
- A partir do final do segundo estágio, o ensaio se procede na forma convencional, ou seja, dobrando-se a carga aplicada a cada estágio de 24 horas até uma determinada carga, podendo, também, incluir um ou mais ciclos de descarregamento e recarregamento.

Terminado os ensaios podem-se construir gráficos (Figura 2) relacionando o índice de vazios (e) e a tensão efetiva (σ').

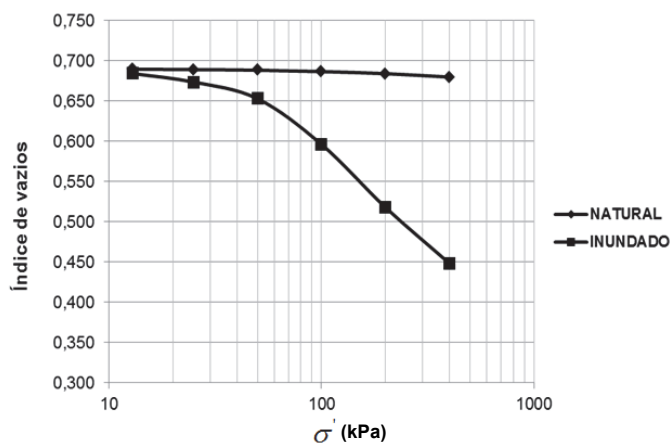


Fig. 2 – Resultado do adensamento duplo (Lôbo Neto, 2013)

2.2 – Programa UNSTRUCT

O programa UNSTRUCT (UNSatuated STRUCTure analysis) foi criado por Miranda (1988), e adaptado por Silva Filho (1998). A versão atual do programa desenvolvido em elementos finitos utiliza a variação de rigidez para calcular as deformações ocasionadas pela variação da sucção no solo. O programa é de simples utilização, sendo necessário para a modelagem dados obtidos a partir do ensaio de adensamento duplo.

Na versão original, o carregamento não era realizado em estágio, pois o comportamento era sempre linear. A utilização da curva não linear no programa proposto por Silva Filho (1998) e a aplicação incremental de carregamento passou a ser uma necessidade. O programa atual do UNSTRUCT foi obtido em quatro etapas de desenvolvimento:

- variação de rigidez no colapso;
- módulos de elasticidade variável – linear por trecho;
- modelagem completa (variação da rigidez);
- aplicação incremental de carregamentos.

Miranda (1988), ao elaborar este programa, tinha como objetivo verificar o comportamento de pequenas barragens de terra durante o primeiro enchimento, pois os pequenos barramentos construídos no Nordeste brasileiro eram potencialmente colapsíveis, devido à dificuldade de se obter água necessária a uma adequada compactação.

Quando da ocorrência do enchimento da barragem, o fluxo transiente provoca um aumento de umidade no barramento modificando o estado de tensões iniciais no maciço e provocando o fenômeno do colapso nos locais onde ocorre a diminuição de sucção, ver em Silva Filho (1998). Este fenômeno provoca fissuramentos no aterro devido aos recalques diferenciais, facilitando o entubamento (piping), que pode levar a ruptura da obra.

Estudos realizados por Miranda (1988), através da utilização do programa UNSTRUCT, fez com que o pesquisador propusesse um método para a construção de pequenas barragens, que consistia em compactar o núcleo da barragem na umidade ótima e o restante do aterro deveria ser compactado abaixo dessa umidade.

O mencionado método construtivo anularia a possibilidade de ruptura da barragem por entubamento (piping), pois evitaria a propagação do fissuramento e a geração do entubamento.

3 – ENSAIOS REALIZADOS

Nesse item serão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório realizados com o solo deformado coletado de uma jazida, localizada no município de Quixadá, que foi utilizado na construção do maciço da Barragem experimental (ver secção 4).

Os ensaios realizados com o material oriundo dessa jazida foram os seguintes: ensaio de compactação e edométrico duplo (adensamento duplo). Esse último com o objetivo de quantificar o colapso do solo.

3.1 – Ensaio de Compactação dos Solos

O ensaio de compactação foi realizado segundo a norma NBR 7182/86, utilizando o cilindro pequeno de 10 cm de diâmetro e uma energia normal de compactação de 26 golpes por camada, num total de 3 camadas. Este ensaio apontou uma umidade ótima de 14,7% para uma massa específica de 1,84 g/cm³, esses valores foram determinados a partir da associação de uma reta aos pontos ascendentes do ramo seco, outra aos pontos descendentes do ramo úmido, sendo unidas por uma curva parabólica.

3.2 – Ensaio edométrico Duplo (Adensamento Duplo)

O ensaio edométrico duplo foi realizado para um valor de massa específica seca de $1,55 \text{ g/cm}^3$ e umidade de 9,6%, esses valores foram escolhidos de forma que estivessem no ramo seco da curva de compactação, representando, novamente, o que ocorre em campo no momento da compactação de pequenas barragens, especialmente, nas obras localizadas na região Nordeste, que sofrem com a escassez de água. A Figura 2 apresenta os resultados deste ensaio.

4 – ANÁLISE DA BARRAGEM EXPERIMENTAL

Na propriedade da Universidade Federal do Ceará, no município de Quixadá, precisamente na Fazenda Lavoura Seca, foi construída em 2012 uma barragem de terra experimental (Figura 3) como parte do projeto: “Metodologia para a construção de barragem de baixo custo”, financiado com recursos do Banco do Nordeste do Brasil (BNB).

O material empregado na construção do maciço foi o mesmo utilizado na realização dos ensaios. Desse modo, realizou-se uma análise numérica de fluxo e equilíbrio com os programas Slide 6.0 e UNSTRUCT para previsão do comportamento tensão x deformação (colapso) da barragem experimental.

A seção transversal da barragem proposta por Miranda (1988) é constituída de um núcleo com material compactado na umidade ótima e com energia Proctor Normal e os espaldares compactados no ramo seco da curva de compactação.

O objetivo da análise foi verificar a eficiência do maciço construído com redução de custos (diminuição de terraplenagem) e redução do consumo de água, que se torna uma solução importante para construção de pequenas barragens no semiárido.

A metodologia apresentada é simples e limitada, no entanto muito prática. Já a utilização de modelos elastoplásticos acoplados tornaria mais complexa a análise e o objetivo da pesquisa era tornar prática a utilização de conceitos de solos não saturados.



Fig. 3 – Barragem experimental – Quixadá (Lôbo Neto, 2013)

4.1 – Dados da Barragem experimental

A barragem experimental possui um desenvolvimento longitudinal de 73,5 m. O volume total de solo compactado no maciço foi de aproximadamente 1.900 m³. Os taludes de montante e jusante possuem inclinações a partir do coroamento de 1,5(H):1V. A cota do coroamento é 208,24 m, a largura é de 2,70 m e a altura máxima é de 4,56 m. Na Figura 4 é apresentada a seção máxima do maciço.

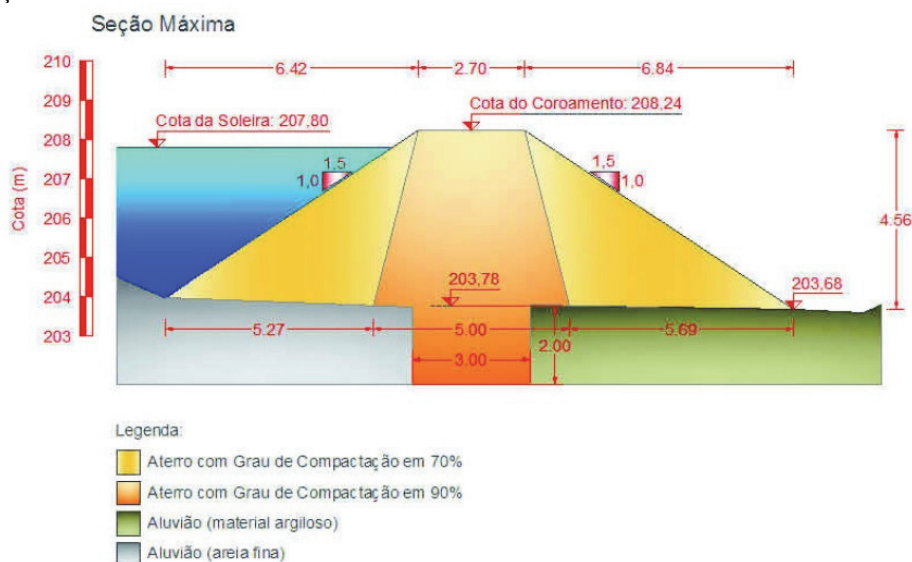


Fig. 4 – Seção máxima da Barragem experimental (Melo Neto, 2013)

4.2 – Análise de Fluxo

Foi realizada uma análise de fluxo transiente para o enchimento da Barragem através do programa Slide 6.0 da Rocscience. O objetivo do estudo era avaliar a transiência do fluxo de água no maciço com o enchimento, dessa forma simplificou-se a seção analisada com a retirada da fundação e do aluvião.

Apresenta-se na Figura 5 a seção utilizada no software:

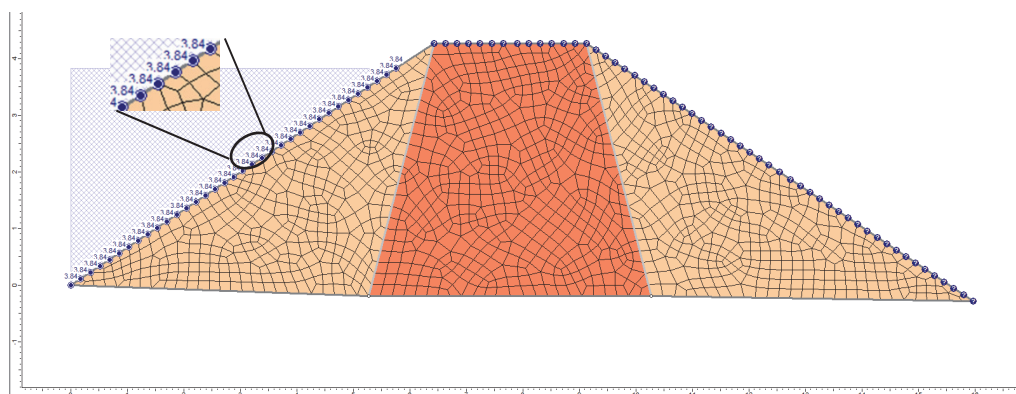


Fig. 5 – Seção utilizada na análise de fluxo transiente – Slide 6.0 (Lôbo Neto, 2013)

A permeabilidade utilizada na simulação foi de 10^{-7} m/s no núcleo do barramento e de 10^{-6} m/s em seus espaldares. O valor de permeabilidade adotada no núcleo foi determinado em laboratório por Pessoa (2013).

Adotou-se uma permeabilidade para os espaldares de 10 vezes maior do que a do núcleo, pois, segundo Lambe (1958), quando o solo é compactado no ramo seco da curva de compactação, a sua permeabilidade pode ter um acréscimo de até 100 vezes em seu valor, comparado com a permeabilidade encontrada na compactação do solo na energia normal.

A sucção inicial utilizada na barragem foi de 950 kPa, o valor foi utilizado com base na curva de sucção x umidade (Figura 6) desenvolvida por Melo Neto (2013) para o mesmo material utilizado na construção da barragem e também com base na recomendação de Silva Filho (1998), que sabendo que o módulo de elasticidade não acompanha a variação de sucção para valores muito elevados desta variável, orienta analisar se a faixa de variação da sucção que está sendo modelada é compatível com hipótese da variação linear.

O maciço compactado na umidade ótima não apresenta colapso por saturação, assim sendo considerou-se por simplificação constante a sucção inicial, já que as deformações importantes na análise seriam apenas para o solo potencialmente colapsível dos espaldares.

Vale ressaltar que a barragem construída não tem nenhum sistema de drenagem interna, pois o intuito da pesquisa era apenas estudar o problema de colapso do solo mal compactado.

Sabendo-se que a bacia hidráulica (52.197,00 m²) e capacidade de armazenamento de água (125.357,00 m³) do lago são pequenas, pode-se admitir em termos de modelagem que o enchimento do reservatório acontece instantaneamente.

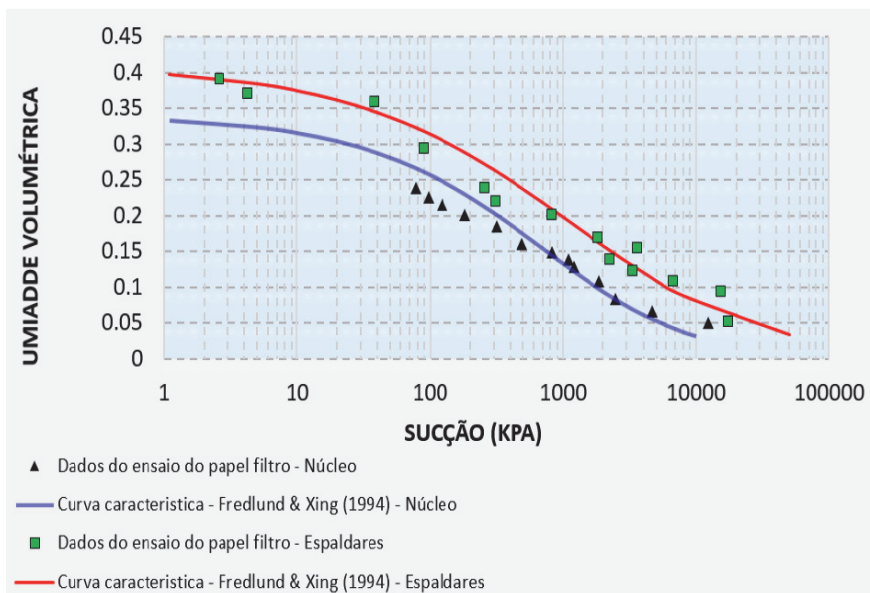


Fig. 6 – Gráfico da relação sucção x umidade (Melo Neto, 2013)

As Figuras 7, 8, 9 e 10 mostram a evolução do fluxo no maciço da barragem após o seu enchimento. As análises foram realizadas para os seguintes períodos: 15, 30, 60 e 240 dias após o enchimento da Barragem.

Na Figura 10, percebe-se que a barragem chega à condição estacionária após 240 dias (8 meses) do enchimento e, também, que o núcleo do maciço compactado na energia normal trabalha como um núcleo impermeável, permitindo que o fluxo no interior do maciço aconteça com razoável segurança.

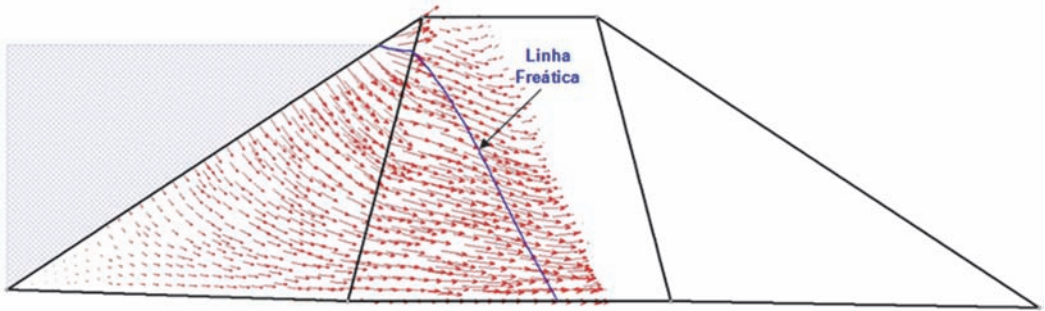


Fig. 7 – Linha freática – 15 dias após o enchimento (Lôbo Neto, 2013)

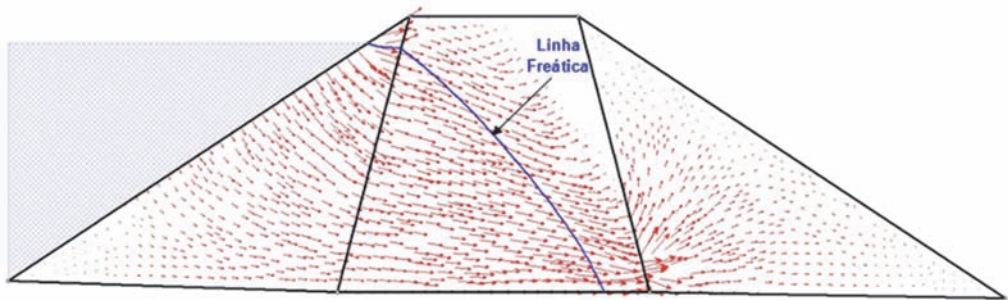


Fig. 8 – Linha freática – 30 dias após o enchimento (Lôbo Neto, 2013)

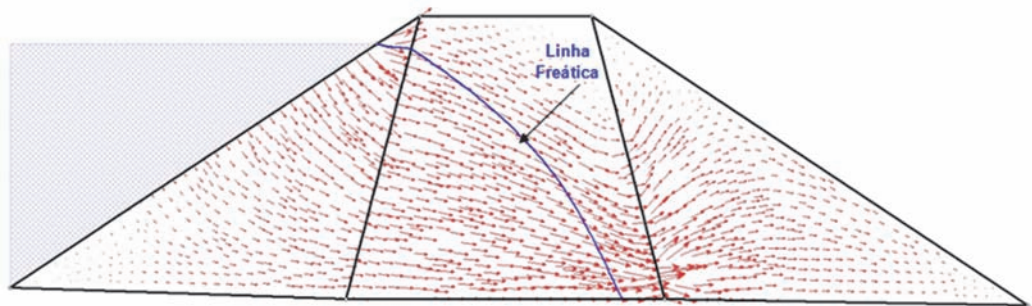


Fig. 9 – Linha freática – 60 dias após o enchimento (Lôbo Neto, 2013)

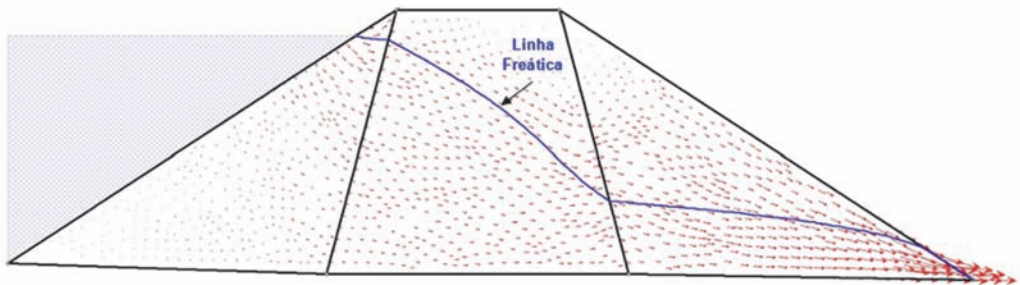


Fig. 10 – Linha freática – 240 dias após o enchimento (Lôbo Neto, 2013)

4.3 – Análise de Tensão x Deformação (UNSTRUCT)

Para estudar as tensões e deformações do solo, com a utilização do programa UNSTRUCT, foram utilizados para os espaldares os dados do ensaio edométrico duplo correspondente a uma massa específica seca de $1,55 \text{ g/cm}^3$ e umidade de 9,6% (ramo seco). Já para o núcleo do maciço foi utilizado os dados da energia normal de compactação e umidade ótima, sendo todas essas condições semelhantes às adotadas na construção do aterro experimental.

A análise realizada admitiu que o comportamento tensão-deformação do solo poderia ser considerado linear devido à pequena faixa de tensões, pois a barragem tem menos de 5 metros de altura máxima. Também, adotou-se impedimento de deslocamento em ambas as direções na base do maciço.

Os dados correspondentes às sucções matriciais do maciço foram calculados pelo programa SLIDE 6.0 e as variações de umidade foram obtidas a partir da curva de umidade x sucção elaborada por Melo Neto (2013). Por simplificação, a malha de elementos utilizada para a análise com o programa UNSTRUCT teve sua densidade suavizada, sendo constituída de 78 elementos e 96 nós. Apesar da diferença de densidades das malhas não há comprometimento com a qualidade dos resultados e essa diferença foi necessária devido à limitação da entrada de dados do programa UNSTRUCT, por se tratar de um código acadêmico. O peso específico foi afetado já que o aumento da umidade causa o seu aumento e em consequência a variação no estado de tensão do solo. A Figura 11 apresenta a seção estudada.

Os módulos de elasticidade foram calculados em função das deformações verticais e das tensões aplicadas, sendo assim determinados os módulos edométricos. Em seguida foram estimados os módulos de elasticidade, variáveis com o nível de tensões, e em função também dos valores adotados do coeficiente de Poisson.

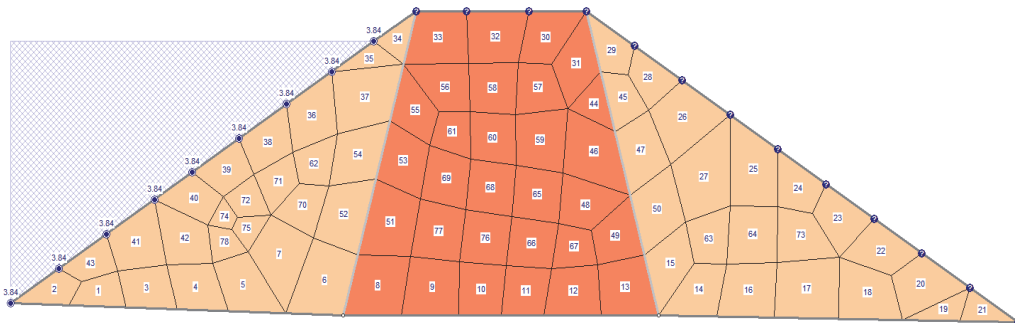


Fig. 11 – Malha da seção analisada no UNSTRUCT (Lôbo Neto, 2013)

Os resultados das simulações do programa UNSTRUCT, imediatamente após o enchimento da barragem e do fluxo transiente no maciço para 15, 30, 60 e 240 dias são apresentadas nas Figuras 12 a 15 e nos Quadros 1 a 4.

Percebe-se nas Figuras 12 e 13, respectivamente 15 e 30 dias, que após o enchimento o colapso ocorre no espaldar de montante do aterro, não se propagando ao núcleo impermeável já que esse foi bem compactado e ao espaldar de jusante tendo em vista a frente de saturação não ter atingido estes trechos.

Na Figura 14, que se refere aos 60 dias após o enchimento, observa-se que o colapso também acontece no espaldar de jusante, mas o núcleo da barragem não colapsou, pois foi compactado na energia Proctor Normal com a umidade ótima (14,7%). Portanto, embora o colapso tenha ocorrido nos espaldares, a barragem não se rompe, uma vez que não houve a propagação das deformações de colapso de montante para jusante do maciço.

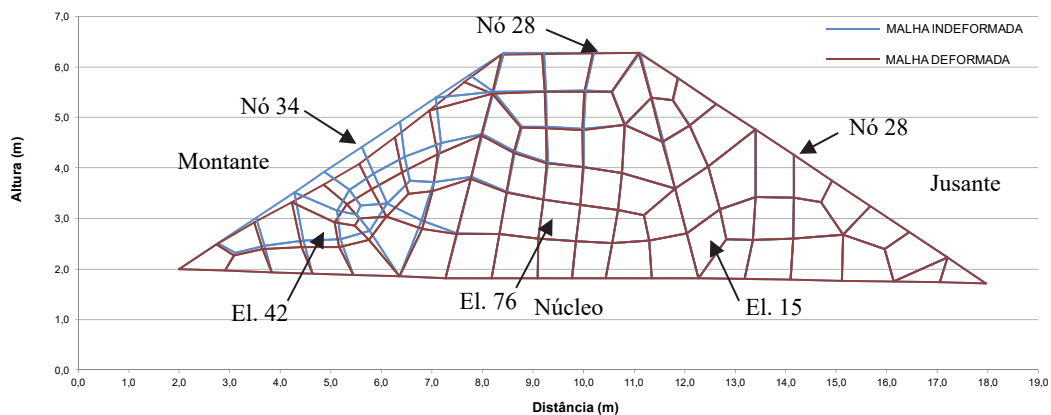


Fig. 12 – Deformação para 15 dias. Fator de aumento do deslocamento – 15 (Lôbo Neto, 2013)

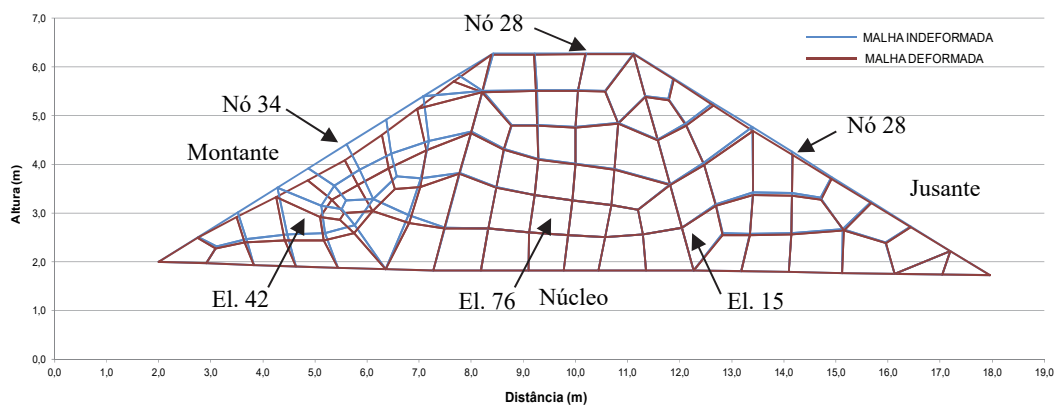


Fig. 13 – Deformação para 30 dias. Fator de aumento do deslocamento – 15 (Lôbo Neto, 2013)

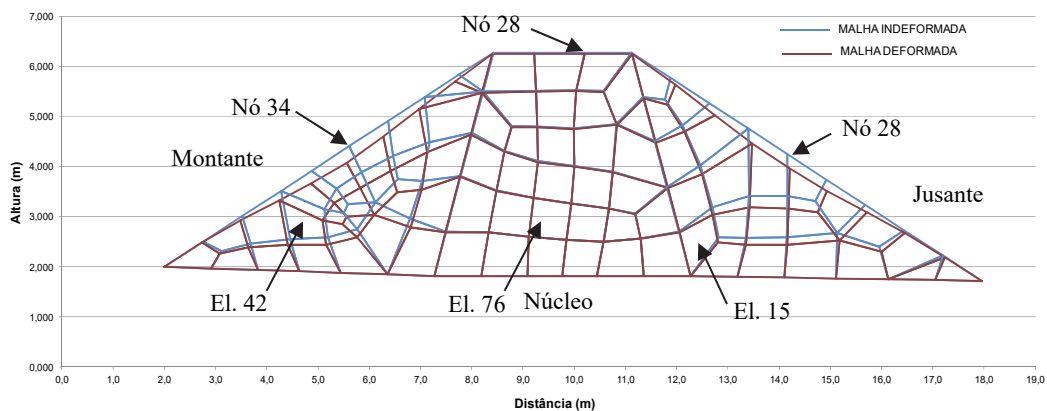


Fig. 14 – Deformação para 60 dias. Fator de aumento do deslocamento – 15 (Lôbo Neto, 2013)

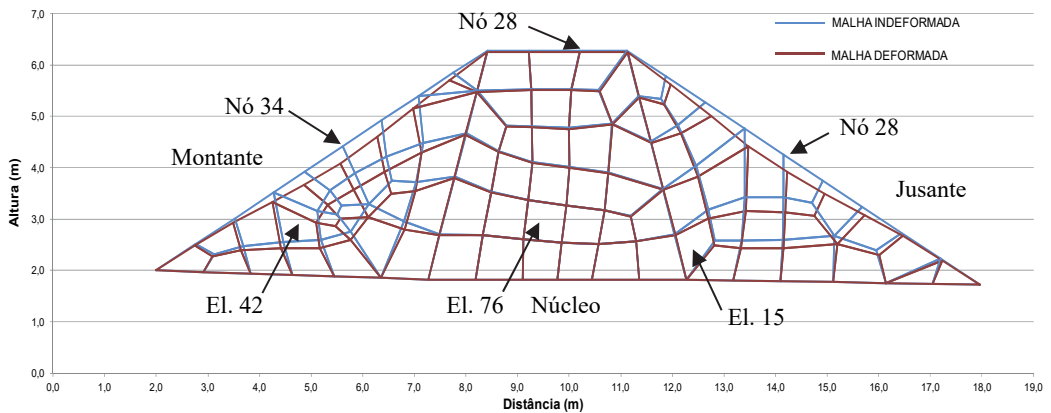


Fig. 15 – Deformação para 240 dias. Fator de aumento do deslocamento – 15 (Lôbo Neto, 2013)

Quadro 1 – Deslocamentos com o avanço do fluxo (Lôbo Neto, 2013).

Descrição	Nó analisado					
	34		28		23	
	u _x (m)	u _y (m)	u _x (m)	u _y (m)	u _x (m)	u _y (m)
Final de Construção	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15 dias	-0,003	-0,022	-0,002	-0,001	0,000	0,000
30 dias	-0,003	-0,022	-0,001	-0,001	0,001	-0,004
60 dias	-0,003	-0,022	0	-0,002	0,003	-0,019
240 dias	-0,003	-0,022	0	-0,002	0,004	-0,022
Localização dos nós	Superfície de montante		Superfície do coroamento		Superfície de jusante	

Quadro 2 – Desenvolvimento das tensões e poropressões – Elemento 42 (Lôbo Neto, 2013).

Descrição	Elemento 42			
	($\sigma_1 - u_a$) ou ($\sigma_1 - u_w$) (kPa)	($\sigma_3 - u_a$) ou ($\sigma_3 - u_w$) (kPa)	($\sigma_z - u_a$) ou ($\sigma_z - u_w$) (kPa)	($u_a - u_w$) ou u_w (kPa)
Final de Construção	23,77	6,31	9,04	-924,40
15 dias	17,57	5,51	8,09	28,00
30 dias	17,3	5,45	7,97	28,10
60 dias	17,16	5,43	7,91	28,10
240 dias	17,12	5,39	7,88	28,20
Localização do elemento	Montante			

Quadro 3 – Desenvolvimento das tensões e poropressões – Elemento 15 (Lôbo Neto, 2013).

Descrição	Elemento 15			
	$(\sigma_1 - u_a)$ ou $(\sigma_1 - u_w)$ (kPa)	$(\sigma_3 - u_a)$ ou $(\sigma_3 - u_w)$ (kPa)	$(\sigma_z - u_a)$ ou $(\sigma_z - u_w)$ (kPa)	$(u_a - u_w)$ ou u_w (kPa)
Final de Construção	38,51	15,59	16,28	-914,40
15 dias	35,24	15,76	15,32	-924,20
30 dias	23,17	9,87	10,22	-758,50
60 dias	21,58	4,93	9,06	-151,80
240 dias	21,61	4,84	9,25	4,30
Localização do elemento	Jusante			

Quadro 4 – Desenvolvimento das tensões e poropressões – Elemento 76 (Lôbo Neto, 2013).

Descrição	Elemento 76			
	$(\sigma_1 - u_a)$ ou $(\sigma_1 - u_w)$ (kPa)	$(\sigma_3 - u_a)$ ou $(\sigma_3 - u_w)$ (kPa)	$(\sigma_z - u_a)$ ou $(\sigma_z - u_w)$ (kPa)	$(u_a - u_w)$ ou u_w (kPa)
Final de Construção	52,01	18,33	21,17	-912,90
15 dias	63,02	25,58	31,02	1,60
30 dias	64,53	26,65	31,91	10,10
60 dias	65,35	27,10	32,34	10,60
240 dias	65,41	27,16	32,38	17,30
Localização do elemento	Núcleo			

Na Figura 15, que representa 240 dias após o enchimento da barragem (regime estacionário), pode-se também verificar que o colapso não ocorre no núcleo do aterro experimental, não comprometendo a segurança da barragem.

No Quadro 1, percebe-se que o colapso no talude de montante ocorre nos primeiros dias (15 dias) após o enchimento da barragem, não tendo suas deformações aumentadas com o avanço da linha de saturação. Diferentemente, o talude de jusante sofre um acréscimo nas deformações com o progresso do fluxo. Quanto ao núcleo da barragem, os deslocamentos sofridos tiveram resultados insignificantes devido ao colapso que ocorreu nos espaldares.

O Quadro 2 mostra que o elemento localizado no espaldar de montante sofre redução no valor da tensão efetiva durante os primeiros 15 dias após o enchimento da barragem, permanecendo praticamente constante com o avanço da linha de saturação. Já o elemento localizado do lado de jusante do aterro (Quadro 3) apresenta decréscimos nas tensões efetivas como o avanço do fluxo no maciço.

Por fim, no Quadro 4, nota-se que o avanço da linha de saturação no aterro não provoca mudanças significativas nas tensões efetivas do elemento 76 localizado no núcleo, trecho bem compactado da barragem.

Dessa forma, comprovou-se com a construção do aterro experimental que os procedimentos propostos por Miranda (1988) de compactar o núcleo da barragem com a energia normal e os espaldares no ramo seco da curva de compactação, não ocasiona a ruptura da barragem.

A fotografia da Figura 16 comprova que apesar do colapso ocorrido nos espaldares da barragem, o núcleo não colapsou. Entretanto, é de suma importância o monitoramento da barragem na fase de operação e de esvaziamento rápido.



Fig. 16 – Foto da parte central da Barragem - Núcleo. (Lôbo Neto, 2013)

A compactação dos espaldares no ramo seco da curva de compactação com valor de umidade de 9,6% proporciona uma economia de água de aproximadamente 12,00 m³ para cada 100 m³ de aterro executado, comparando com o maciço compactado na umidade ótima (14,7%). Fator relevante para o Nordeste Brasileiro, que sofre com a escassez desse recurso natural.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi realizado uma análise numérica de fluxo e equilíbrio com o auxílio dos programas Slide 6.0 e UNSTRUCT, para previsão do comportamento tensão x deformação da Barragem experimental, construída em Quixadá.

A seção transversal do aterro experimental analisada foi construída segundo a proposta de Miranda (1988), ou seja, a barragem é bem compactada em seu núcleo e os espaldares são compactados no ramo seco da curva de compactação.

Na análise realizada foram utilizados os dados referentes ao ensaio de adensamento duplo para massa específica de 1,55 g/cm³ e umidade de 9,6% para os espaldares do aterro. Já para o núcleo da barragem admitiu-se que o mesmo foi compactado na umidade ótima. Os resultados alcançados na pesquisa mostram que o colapso ocorre nos espaldares do maciço, mas que o núcleo da barragem não colapsa, garantindo, assim, que as deformações de colapso não se propagam de montante para jusante do maciço.

Desse modo, a construção de uma barragem nos moldes proposto por Miranda (1988) pode proporcionar uma economia de água de 12,00 m³ para cada 100 m³ de aterro executado (espaldares), sem comprometer a segurança do maciço, sendo fator fundamental para regiões semiáridas, já que estas passam por dificuldades quanto a falta de água.

Vale ressaltar, que Melo Neto (2013) apresenta em seu trabalho análise de resistência do maciço estudado, mostrando resultados que apontam a sua estabilidade.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará pelos equipamentos cedidos. A UFC por ceder a cópia do programa Slide 6.0 e ao Banco do Nordeste do Brasil (BNB)

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bishop, A. W. (1959). *The principle of effective stress*. Tecknik Ukebland 106 (39), 859 – 863.
- Fredlund, M. D.; Xing, A. (1994). *Equations for the Soil-Water Characteristic Curve*. Canadian Geotechnical Journal, 37, p. 521-532.
- Jennings, J.E.B.; Knight, K. (1957). *The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting*, Proceedings, IV Int. Conf. on Soil. Mech. and Found. Engineering, Londres, vol-1, p.316-319.
- Jennings, J.E.B. e Burland, J.B. (1962) *Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils*. Geotechnique, vol.XII, p.125-144
- Lambe, T. W. (1958). *The Engineering Behavior of Compacted Clay*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol.84, No SM2, p.1-35.
- Lôbo Neto, J. B. (2013). *Um Estudo Experimental e Numérico de Solos Compactados Colapsíveis: Aplicação em uma pequena Barragem de Terra*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Marinho, F.A.M. (1998). *Mecânica dos solos não-saturados*, EPUSP, São Paulo.
- Melo Neto, E. L. (2013). *Resistência ao cisalhamento de solos não saturados compactados de uma barragem experimental: ensaios e modelagem numérica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Mendonça, M. B. (1990). *Comportamento de solos colapsíveis da região de Bom Jesus da Lapa - Bahia*. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro.
- Menescal, R. A. (1992). *Modelagem numérica do comportamento tensão-deformação de solos não saturados*. Tese de Mestrado. UNB.
- Miranda, A. N. (1988). *Behavior of small dams during initial filling*, Dissertação de Ph.D, Colorado State University, Fort Collins – USA.
- Pessoa, J.R.D. (2013). *Comportamento hidráulico e mecânico de uma barragem de terra: construção, ensaios de campo e laboratório e análise numérica*. Trabalho de conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Silva Filho, F. C. (1998). *Análise numérica em solos não saturados: modelagem, implementação e aplicações práticas*, Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- Silva Filho, F. C.; Cerqueira, F. A. (2004). *Uma proposta de associação de análises de tensão – deformação e fluxo transiente usando elementos finitos*, Universidade de Fortaleza, Revista Tecnologia, v.25, n.2.