

Capítulo 26

BARRAGENS DE TERRA E SOLOS NÃO SATURADOS

Francisco Chagas da Silva Filho

Antonio Nunes de Miranda

Vanda Tereza Costa Malveira

Raimundo Leidimar Bezerra

1. INTRODUÇÃO

As barragens de terra e enrocamento têm sido construídas desde remota antiguidade. Cerca de 4.000 anos a.C., tem-se conhecimento da sua construção, como a barragem Saad el Kafara, construída 3.000 anos a.C., próxima à cidade do Cairo, no Egito. Mesmo assim, apenas no final do século XIX, as barragens de terra passaram a ter a configuração semelhante às construídas atualmente (Sandroni, 1989).

Barragens de terra são construídas com material compactado e seu maciço permanece sempre não saturado em vários trechos, principalmente, nos casos de existência de sistema de drenagem interna, que proporciona uma condução das águas infiltradas no aterro e/ou na fundação para o exterior, mantendo o espaldar de jusante não saturado.

Na compactação dos solos, durante a construção da barragem, não ocorre a expulsão completa do ar presente dos vazios. Em seguida, após o enchimento do reservatório, as zonas do maciço com baixas a moderadas pressões de água e dependendo do tipo de solo, permanecerão com grau de saturação abaixo de 100%..

Este capítulo apresenta, inicialmente, os fatores importantes que definem a escolha do tipo de barragem. Apresentam-se, em seguida, casos de acidentes de barragens, bem como se discutem as possíveis suas causas, relacionando-os com o tema de solos não saturados.

A percolação pelo maciço e pela fundação se configura em um dos tópicos mais importantes na engenharia de barragens, tendo em vista, principalmente, que mais da metade dos problemas registrados nas barragens de terra estão associados à percolação. A possibilidade de instabilidade dos taludes de montante e de jusante deve ser verificada durante a construção e após a entrada em operação do reservatório.

2. FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA DO TIPO DE BARRAGEM

A fase preliminar do projeto de uma barragem compreende a avaliação de alternativas quando se busca a melhor relação benefício-custo, que resulta da melhor combinação entre tipo e altura da barragem, tipo e localização do vertedouro para o volume de reservatório que corresponde à melhor eficiência hídrica.

O diagnóstico dos fatores físicos relevantes nessa fase deve ser feito por profissional com larga experiência em obras similares, uma vez que o detalhamento dos fatores físicos só será concluído posteriormente, isto é, após a escolha definitiva da melhor alternativa para as obras.

A definição do tipo de barragem a ser adotado depende das características topográficas, hidrológicas, geológico-geotécnicas do local das obras, forma do boqueirão, materiais disponíveis para construção, regime pluviométrico da região, características geomecânicas da fundação e magnitude das cheias da bacia hidrográfica.

2.1 Tipos de barragens

A classificação do tipo de barragem, nesse contexto, é função do material que predomina na estrutura de barramento. Assim sendo, barragem de terra pode ser definida como uma estrutura de barramento construída, principalmente, com solo compactado não saturado, com materiais arenosos e pétreos nos elementos de drenagem e proteção, podendo ser predominantemente homogênea ou composta com tipos diferentes de zonas.

Sherard (1987), descrevendo a experiência brasileira adquirida em fissuramento de barragens, menciona que, no sudeste do Brasil, pela escassez de depósitos de areia e pedregulho suficientes para a construção de barragens com maiores zonas permeáveis, os maciços são construídos, muitas vezes, com seções homogêneas, com filtros tipo chaminé, verticais com espessuras em torno de um metro.

Uma barragem de enrocamento é uma estrutura de barramento na qual predominam blocos de rocha na constituição do maciço, complementado com zonas impermeáveis e elementos de transição. Essas barragens também são denominadas de mistas solo-enrocamento e tiveram o desenvolvimento associado, além dos aspectos relacionados com os materiais disponíveis, à confiança obtida com os critérios de filtragem utilizados até então.

Esse tipo de barragem foi introduzido em 1942 com a construção da barragem de Nantahala, nos Estados Unidos (Sherard *et al.*, 1963). Essa barragem possui altura de 80 m, com núcleo delgado inclinado com proteções e transições filtrantes a montante e jusante. No Ceará, o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS construiu a barragem Edson Queiroz, com núcleo inclinado para montante e espaldares de enrocamento.

Uma barragem de concreto constitui-se de uma estrutura de concreto, convencional ou compactado a rolo, com elementos de drenagem. Um exemplo desse tipo de barragem é o Castanhão, também no estado do Ceará, construída com concreto compactado a rolo.

A Figura 1 mostra, de forma esquemática, alguns tipos de barragens, ressaltando-se os trechos permeáveis, impermeáveis e sistema de drenagem interna, sem o objetivo de especificar quais os tipos de materiais utilizados. A definição do tipo de barragem a ser adotado depende das características topográficas, hidrológicas, geológico-geotécnicas do

local das obras, forma do boqueirão, materiais disponíveis para construção, regime pluviométrico da região, características geomecânicas da fundação e magnitude das cheias da bacia hidrográfica.

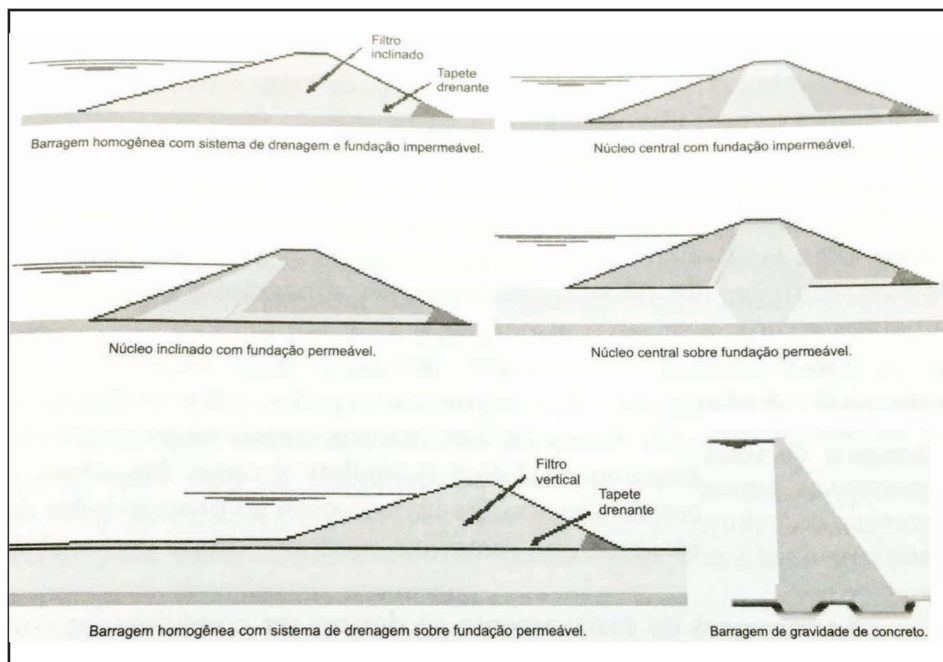


Figura 1 – Tipos usuais de barragens de terra, enrocamento e de concreto (Wilson e Marsal, 1979)

2.2 Fatores topográficos

A forma do boqueirão, fator físico que o projetista pode diagnosticar preliminarmente em uma visita ao local das obras, pode antecipar eventuais restrições quanto à trabalhabilidade na fase de implantação das obras para determinado tipo de barragem.

A implantação de zonas de terra compactada em um boqueirão de ombreiras muito íngremes requer uma logística especial para a execução da fundação e o lançamento das primeiras camadas nas ombreiras, quer por dificuldades de acesso, quer pela necessidade de inclusão de elementos especiais para aumentar o caminho de percolação e a junção do conjunto maciço-fundação. As ombreiras íngremes podem apresentar rocha aflorante ou reduzida cobertura de solo.

Por outro lado, a implantação de uma barragem em concreto nesse tipo de boqueirão não apresentaria restrições sob os aspectos de trabalhabilidade, destacando-se que esse tipo de barragem pode ter sua execução iniciada a partir da calha do rio, enquanto que, em uma barragem de terra, a última etapa construtiva deve ser no trecho central, por questões

de segurança contra galgamentos eventuais durante a execução, como no caso da barragem Orós, no Ceará.

Os boqueirões de ombreiras suaves, de um modo geral, não apresentam restrições a qualquer tipo de barragem sob os aspectos construtivos ou de trabalhabilidade.

2.3 Fatores Geológicos-Geotécnicos

2.3.1 Materiais de construção

A disponibilidade e localização dos materiais naturais de construção são determinantes para a construção das barragens de terra. A distância de transporte entre o local das obras e os locais de empréstimo de materiais é fator de custo importante, compreendendo-se as despesas com equipamentos e a manutenção de acessos. Esses afastamentos devem ser considerados não só horizontalmente, pois jazidas em locais elevados requerem acessos longos devido às restrições das rampas que devem ser condizentes com os equipamentos e carga a serem transportados.

Não existem restrições quanto ao tipo de material, exceto os de composição orgânica ou excessivamente gráudos, para execução de barragens de terra. Os atuais conhecimentos geotécnicos e técnicas construtivas permitem que se defina o melhor arranjo das zonas de materiais constituintes do maciço de acordo com as propriedades dos materiais, dando prioridade aos materiais mais próximos do local das obras.

As barragens de enrocamento só devem ser consideradas como alternativa se os blocos de rocha que constituirão o maciço forem provenientes de escavação obrigatórias, tais como escavações do canal do vertedouro. As escavações para a implantação da tomada d'água são significativas em barragens cuja finalidade é a geração de energia.

Atualmente, as soluções em barragem de enrocamento têm sido preteridas diante do custo e da facilidade de execução das barragens de concreto compactado com rolo.

2.3.2 Características Geomecânicas da Fundação

O material da fundação da barragem, assim como o material do maciço, deve ser caracterizado detalhadamente do ponto de vista da permeabilidade de resistência e compressibilidade, sendo, em geral, a compressibilidade aqui destacada para verificar a relação com o tipo de barragem. Geralmente, na fundação, não ocorre a presença de solos não saturados que venham a apresentar influência significativa durante a construção e a operação da barragem. No entanto, Miranda e Menescal (1994) apresentam análise numérica de uma barragem de gravidade construída sobre a fundação constituída de solo colapsível.

Com relação ao tipo de fundação, a de terra apresenta os menores índices de restrições. Considerando-se uma mesma altura para os três tipos de barragem apresentados e as densidades médias dos materiais constituintes, conclui-se, facilmente, que as solicitações para essas barragens são menores do que as de uma zona de enrocamento, que, por sua vez, são menores que as solicitações geradas pela carga de uma barragem de concreto.

Nas barragens de enrocamento, há que se considerar o recalque diferencial resultante da diferença de densidades entre a zona impermeável e o enrocamento. O recalque dife-

rencial gerado por esse tipo de estrutura exige uma fundação que apresente uma capacidade de carga que seja indiferente a essa condição.

Assim, para casos de obras de pequeno porte, as barragens de enrocamento podem exigir mais capacidade de carga de uma fundação do que uma barragem de concreto, contrariando a tendência geral, qual seja, as barragens de concreto são as mais exigentes em termos de fundação, uma vez que as cargas são mais concentradas tanto pela esbeltez da estrutura quanto pela densidade do concreto superior às dos demais materiais.

2.4 Fatores hidrológicos

2.4.1 Pluviometria

Há dois aspectos a serem considerados com relação às características pluviométricas nos projetos de barragens: a distribuição e média pluviométrica anual. A primeira, quando do planejamento do cronograma físico das obras e, a segunda, no balanço das disponibilidades de água para as demandas no período de construção, principalmente no semiárido nordestino (Silva Filho e Malveira, 2004).

No semiárido, as chuvas são, de modo geral, escassas, com concentrações média em três meses, que variam de acordo com a latitude; os serviços de terraplenagem não podem ser planejados para esse período, devendo, o cronograma físico, adaptar-se a essas condições.

No caso de barragens de enrocamento, dada a impossibilidade de execução da zona impermeável nos períodos com maiores intensidades pluviométricas, a melhor alternativa é a de zona impermeável no parâmetro de montante, que permite a execução da zona de enrocamento, antecipadamente, independente da zona impermeável, que poderá ser executada quando as condições meteorológicas assim o permitirem.

O arranjo da zona impermeável no paramento de montante apresenta vantagem na execução do maciço, além da flexibilidade do cronograma físico. É importante verificar as fontes de reservas hídricas para a execução dos maciços de terra compactada, principalmente, para barragens cujo cronograma físico seja plurianual.

2.4.2 Cheia

Na fase preliminar de definição do arranjo geral das obras – barragem, vertedouro, tomada d'água –, o local e o tipo de vertedouro influenciam fortemente nos outros tipos de estruturas, exceto quando a cheia é de pequena magnitude.

Nas barragens não submersíveis, a posição ideal do vertedouro seria do tipo isolado das demais estruturas, sem afetá-las sob os aspectos técnicos e construtivos. A topografia nem sempre oferece condições propícias para um vertedouro isolado, com condições de fundação compatíveis para a estrutura descarregadora das cheias.

A cheia pode ser de grande magnitude de modo a influenciar fortemente o tipo de barragem concebido em projeto. Pode ocorrer, por exemplo, um local que, embora apresente condicionantes físicos favoráveis à implantação de uma barragem de terra, tais como ombreiras suaves; sela topográfica numa das ombreiras; uma fundação compressível

ou de baixa resistência, porém compatível com a estrutura de um maciço de terra; abundante disponibilidade de solos nas proximidades do local das obras e, ainda assim, este tipo de estrutura não possa ser viabilizado devido à magnitude da cheia que exigiria uma largura de vertedouro excedente à oferecida pela sela topográfica.

Nesse caso, como o vertedouro teria que avançar além das ombreiras no sentido do trecho central do boqueirão, uma avaliação das condições de execução do contato vertedouro-maciço de terra e as implicações técnicas relativas ao controle de percolação no trecho, comparadas a uma solução alternativa em barragem de concreto vertedouro, mesmo com as restrições na fundação, podem resultar a segunda alternativa como mais econômica.

Atualmente, com os processos de execução de concreto compactado a rolo consolidados, a alternativa em concreto com vertedouro na altura da calha do rio apresenta-se como a melhor solução, quer do ponto de vista hidráulico, quer do ponto de vista econômico, quer do ponto de vista ambiental. Do ponto de vista hidráulico, tem-se um dissipador de energia na face de jusante, constituído pelos degraus gerados pelas camadas de lançamento do processo construtivo, que reduz o porte e, conseqüentemente, os custos das estruturas de dissipação. Do ponto de vista ambiental, tem-se como vantagem a permanência do rio em seu caudal natural, eliminando, também, as devastações nas ombreiras para implantação de vertedouros.

3. ACIDENTES E INCIDENTES EM BARRAGENS

A compactação em barragens tem por objetivo reduzir a deformabilidade dos materiais, melhorar a estabilidade, diminuir a permeabilidade e a susceptibilidade dos solos a processos de erosão interna (Marsal e Resendiz, 1975). O maciço, durante a construção, no final e após a entrada em operação do reservatório, está sujeito a variações no estado de tensões, ocasionando deformações, sendo, em geral, comum a formação de fissuras no corpo da barragem. Esses fissuramentos são potencializados pela redução da sucção durante o enchimento da barragem.

Embora os solos compactados apresentem, em geral, alta resistência à erosão interna, é necessária a previsão de dispositivos de drenagem no interior do maciço para conduzir as águas de percolação para o seu exterior sem carreamento de partículas. Também, a erosão superficial não pode ser garantida apenas pela compactação, sendo importante a existência de drenagem superficial ou utilização de materiais de livre drenagem. Esses procedimentos podem garantir a manutenção de zonas permanentemente não saturadas, melhorando as condições de estabilidade do maciço.

O fluxo de água contínuo sobre um maciço compactado pode levar, em poucas horas, à ruptura completa de um maciço, pois, além da redução de sucção com amolecimento do material compactado, intensifica-se o processo erosivo superficial.

Entretanto, tem-se registros de existência de galgamento na barragem Trairi, construída pelo DNOCS, onde não se verificou o rompimento completo do maciço, ou seja, o trecho de montante da barragem manteve-se no local, evitando o esvaziamento completo do reservatório. A Figura 2 mostra três exemplos de barragens brasileiras, onde o transbordamento causou a destruição total ou parcial do maciço. As barragens Santa Cruz e

Trairi transbordaram devido à ruptura de pequenos reservatórios a montante. A barragem do Orós apresentou galgamento durante a fase de construção, tendo em vista a ocorrência de chuvas intensas, ainda com a cota do vertedouro abaixo do previsto em projeto.

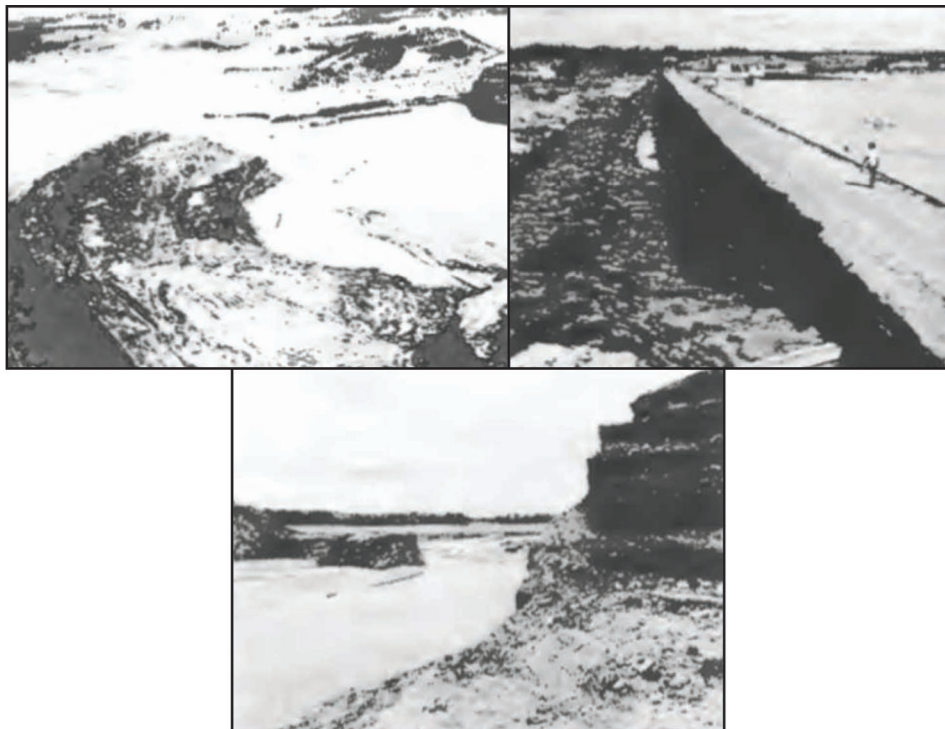


Figura 2 – Transbordamento em barragens de terra: Orós, Trairi e Santa Cruz
(Silva Filho e Malveira, 2005)

Como mencionado, os dispositivos de drenagem interna conduzem as águas de percolação para o exterior sem a formação de tubos erosivos e aumentando a estabilidade da zona de jusante por diminuição de poropressão e geração de sucção. Entretanto, o sistema de drenagem é dimensionado para trabalhar com gradientes controlados. Um exemplo em que isso não ocorreu foi na barragem Joana, no estado do Piauí. Por uma falha na tubulação da tomada d'água, o sistema de drenagem recebeu volume de água excedente à sua capacidade de drenagem, favorecendo a geração de gradientes elevados e tendo resultado o carreamento e a formação de erosão regressiva, configurando-se em um tubo erosivo de dimensões alarmantes, conforme se vê na Figura 3.

Após a conclusão do maciço, durante e após o enchimento do reservatório, é comum a ocorrência de deformações com a geração de recalques diferenciais que, em geral, proporcionam a formação de fissuras no corpo da barragem. As fissuras têm origem em vários aspectos que dependem do tipo de fundação, do maciço zoneado e da redução da sucção do solo não saturado do maciço.

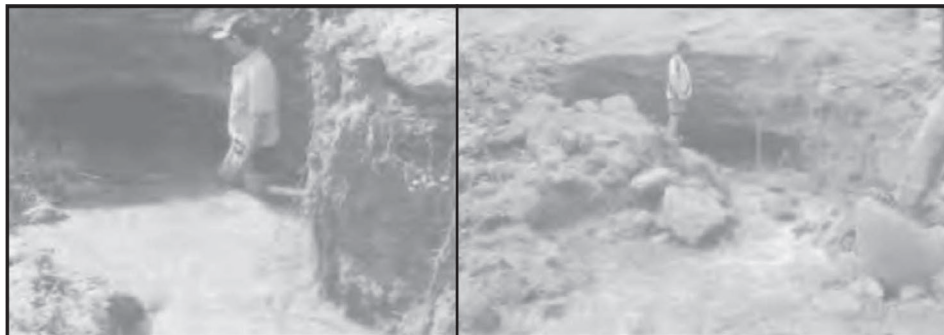


Figura 3 – Entubamento causado por falha na tomada d’água da Barragem Joana (Silva Filho e Malveira, 2005)

As fissuras podem apresentar-se transversalmente ou longitudinalmente ao maciço. As fissuras que se configuram em maior preocupação são as transversais, pois podem gerar caminhos preferenciais de percolação, concentrados através do núcleo e com a possibilidade de ocorrência de formação de entubamento em sequência. Essas fissuras são causadas por recalques diferenciais entre trechos adjacentes do aterro e são usualmente localizadas entre as ombreiras e a parte central do vale.

A fissura transversal mais preocupante ocorre quando a fundação sob as partes mais elevadas do maciço é compressível (solo colapsível, por exemplo) enquanto que as ombreiras são constituídas de rochas relativamente incompressíveis e com inclinações elevadas, conforme se vê esquematicamente na Figura 4. Nesses casos, as fissuras podem ser relativamente verticais ou inclinadas.

As fissuras longitudinais e transversais não podem ser observadas se a superfície dos taludes estão cobertas por materiais não coesivos, tais como areia, pedregulho e o enrocamento do *riprap*.

No passado, era possível verificar a utilização dos taludes de montante e jusante com placas de concreto em toda a superfície. Um exemplo desse tipo de solução é a barragem General Sampaio, no estado do Ceará. Nesses casos, os recalques diferenciais e fissuramentos são impedidos de se visualizar. Nessa barragem, muitos anos após a entrada em operação, foram constatados rompimentos das placas em vários pontos, sugerindo que, abaixo da proteção, ocorreram as deformações, embora não tenham sido detectadas. A Figura 5 mostra a seção transversal e uma foto com a indicação do rompimento localizado das placas de proteção.

Embora o fissuramento longitudinal não apresente, normalmente, o mesmo perigo do fissuramento rtransvesal, ocorrem frequentemente e são produzidas através de vários tipos de movimentos diferenciais. Por exemplo, em barragem com núcleo e *cutoff* compactados, possuindo menor compressibilidade do que a fundação natural sob os espaldares de montante e de jusante, apresentam fissuras longitudinais formadas pela tendência dos taludes em recalcarem mais do que a crista. Além disso, a inundação do maciço durante o primeiro enchimento causa uma redução significativa da sucção, facilitando a ocorrência do incidente.

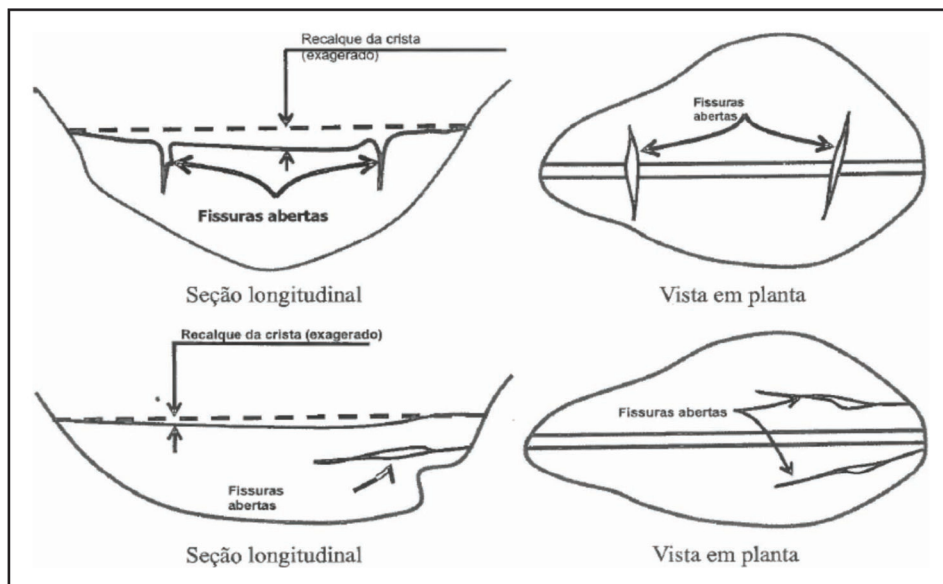


Figura 4 – Tipos de fissuras transversais devido a recalques diferenciais (Sherard *et al.*, 1963)

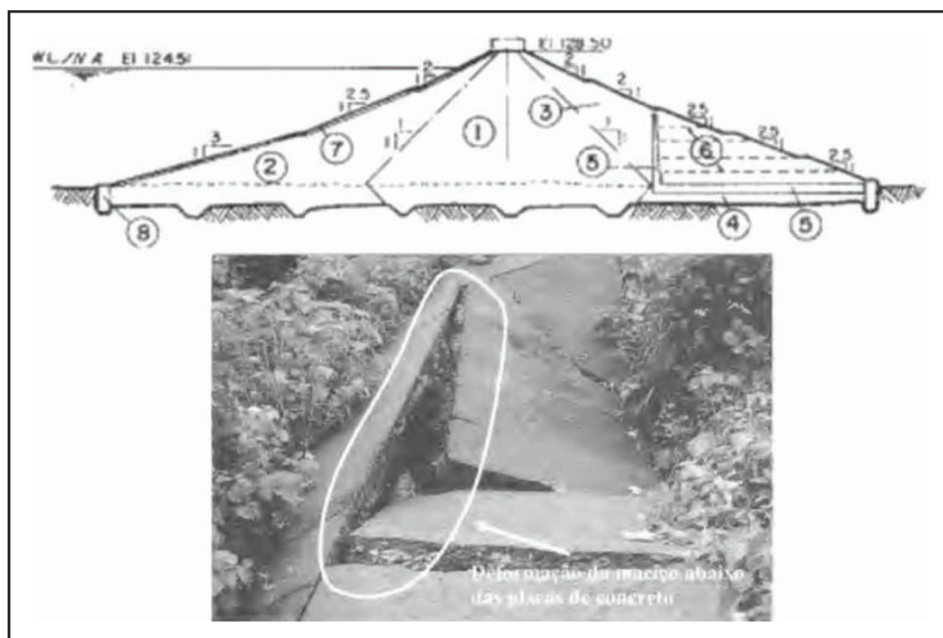


Figura 5 – Barragem General Sampaio: seção transversal e rompimento de placas (Silva Filho e Malveira, 2005)

Nas barragens com núcleo central impermeável e zonas de enrocamento a montante e jusante, isso ocorre porque os espaldares de montante e de jusante continuam a se comprimir após construção, o mesmo não ocorrendo com o núcleo (Sherard *et al.*, 1963).

É importante mencionar que o principal perigo se verifica quando as fissuras longitudinais estão associadas com as transversais, que não se apresentam visivelmente e ocorrem através do núcleo do maciço. Além desses tipos de fissuras, existe outra forma que não pode ser observada da superfície, são as fissuras internas.

Maranha das Neves (1990) menciona a importância do filtro a jusante de núcleo impermeável, onde se tem a limitação da velocidade de fluxo em uma fissura através de filtro a jusante do núcleo, cuja face de montante seja progressivamente colmatada pelos materiais erodidos do núcleo (Figura 6). Nessa figura, também se pode verificar a ocorrência de uma fissura longitudinal na barragem do Trussu no Ceará, visualizada no coroamento da barragem.

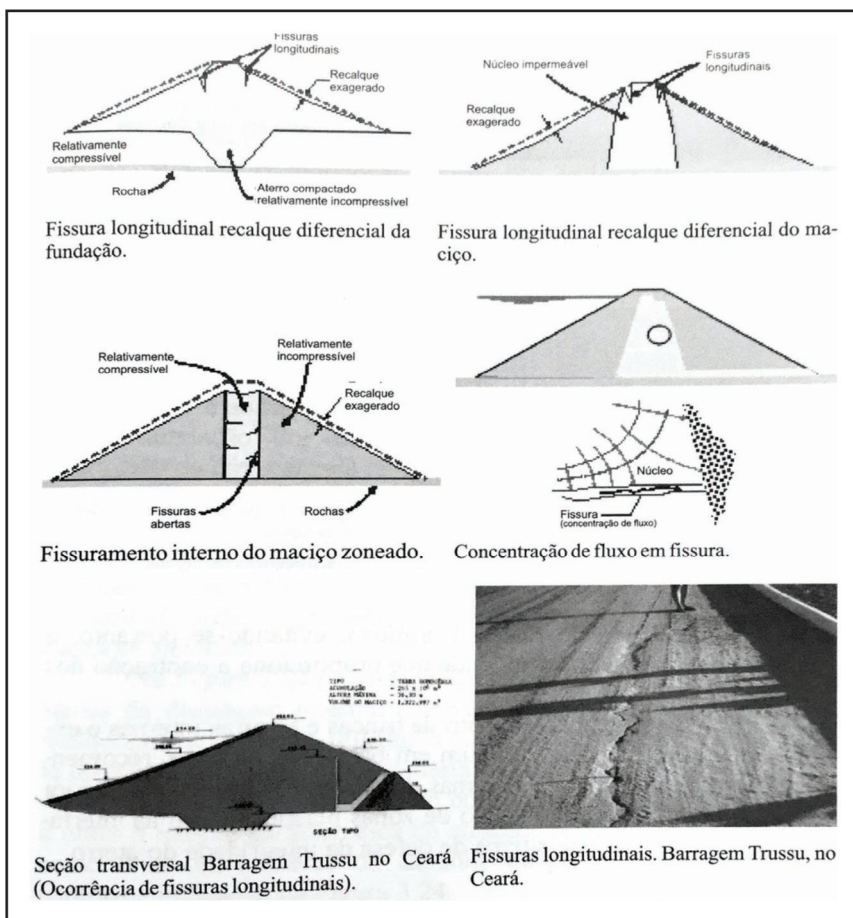


Figura 6 – Fissuramento longitudinal em barragens de terra
(Silva Filho e Malveira, 2005)

Em pequenas barragens construídas no Nordeste do Brasil, é comum, também, a ocorrência de rupturas durante o primeiro enchimento do reservatório. Essas obras são, muitas vezes, executadas com material sem a umidade e compactação adequados. Com isso, essas estruturas apresentam um comportamento potencialmente colapsivo (Miranda, 1988; Pereira, 1996; Silva Filho, 1998), ou seja, durante o primeiro enchimento em várias partes do maciço, ocorre a diminuição da sucção, causando uma geração de tensões de tração nesses pontos. Devido à existência das pressões de água no maciço, tem surgimento, em seguida, as rupturas hidráulicas, promovendo, posteriormente, a própria ruptura da barragem.

A Figura 7 mostra os resultados de uma análise numérica de uma pequena barragem hipotética durante enchimento (Silva Filho e Malveira, 2005). A análise mostra uma malha de elementos finitos deformada com os deslocamentos exagerados em 10 vezes para melhorar a visualização. Nessa mesma figura, é mostrada a configuração de uma pequena barragem após rompimento por colapso.

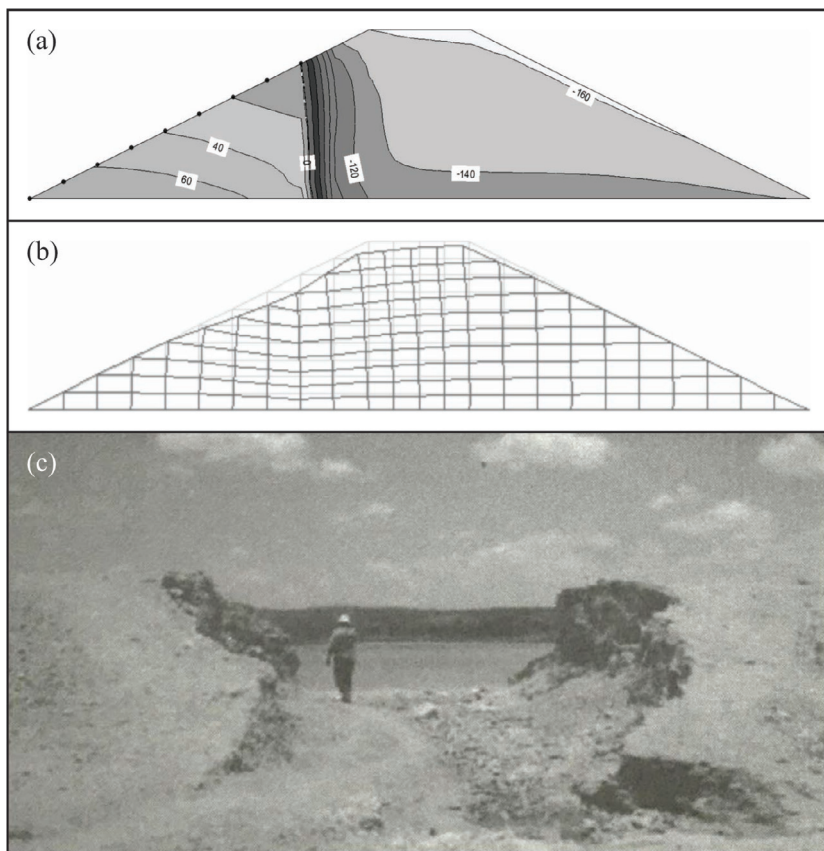


Figura 7 – Ruptura de maciço por colapso durante enchimento de pequena barragem de terra (Silva Filho e Malveira 2005)

Miranda (1988) sugeriu que essas pequenas barragens poderiam ser construídas com material metaestável (baixas energia e umidade) desde que a parte central do maciço fosse construída nas condições ótimas, e, dessa forma, não haveria propagação do colapso por inundação de montante para jusante sem a destruição completa da barragem.

Também, para evitar o colapso dessas pequenas barragens, construídas com material muito fofo (sem compactação adequada) e com baixa umidade, Pereira (1996), realizando estudos numéricos, propôs a construção de um maciço zonado por energia de compactação e umidade, ou seja, com pequenos trechos de montante e jusante compactados nas condições normais de energia de compactação. Além disso, sugere a utilização de um pequeno dreno para evitar o fluxo de água para o trecho de jusante que poderia romper a barragem por colapso (Figura 8).

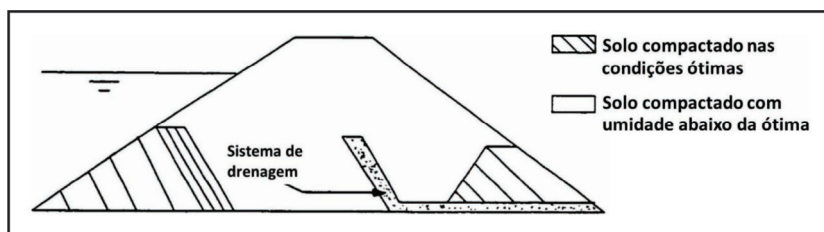


Figura 8 – Seção transversal proposta por Pereira (1996) para evitar colapso das pequenas barragens compactadas com material no ramo seco

Em pesquisa realizada por Lôbo Neto (2013) com a orientação do primeiro autor deste capítulo, foi construída uma pequena barragem usando-se a proposta de Miranda (1988) para verificar a eficiência da estrutura ao colapso por inundação e diminuição de sucção. Os resultados mostraram que havia deformações durante o enchimento nos trechos de montante e de jusante, mas sem generalização e sem o rompimento completo da barragem. A Figura 9 mostra o desenho da seção transversal da pequena barragem experimental.

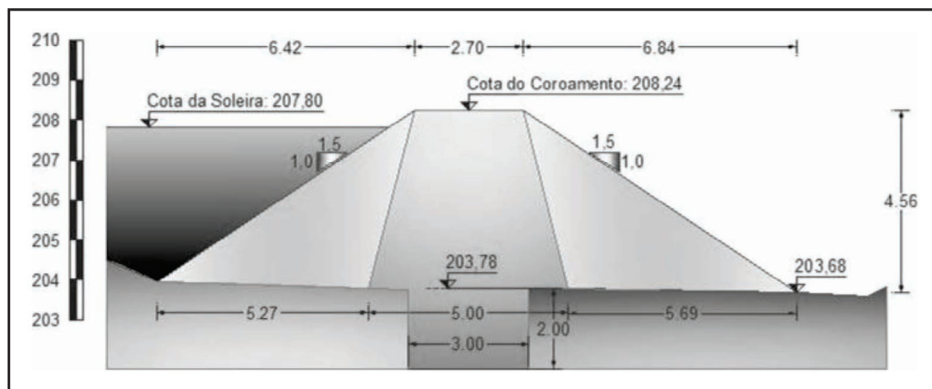


Figura 9 – Seção transversal da barragem experimental com a indicação do material do núcleo compactado nas condições ótimas e os espaldares no ramo seco

A Figura 10 mostra que, numericamente, Lôbo Neto (2013) fazia previsões de colapso nos espaldares, mantendo a parte central sem deformações por redução de sucção. Foram monitoradas as variações de poropressão e sucção e identificaram-se, visualmente, os trechos de colapso da barragem, conforme a Figura 11.

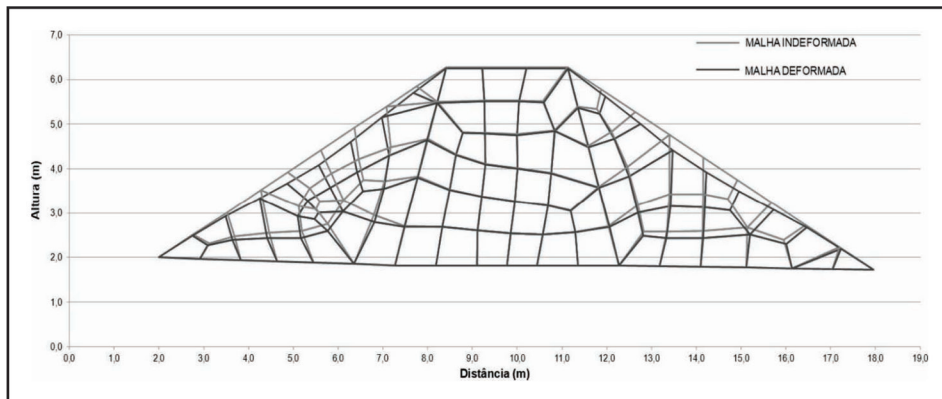


Figura 10 – Malha indeformada e deformada do maciço da barragem experimental, onde se pode verificar a distinção de comportamento em função da variação de sucção proveniente do enchimento da barragem



Figura 11 – Visão do colapso da barragem experimental: (a) fissuramento no talude jusante e (b) rachaduras no talude de montante ocasionadas pela diminuição de sucção

4. PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA

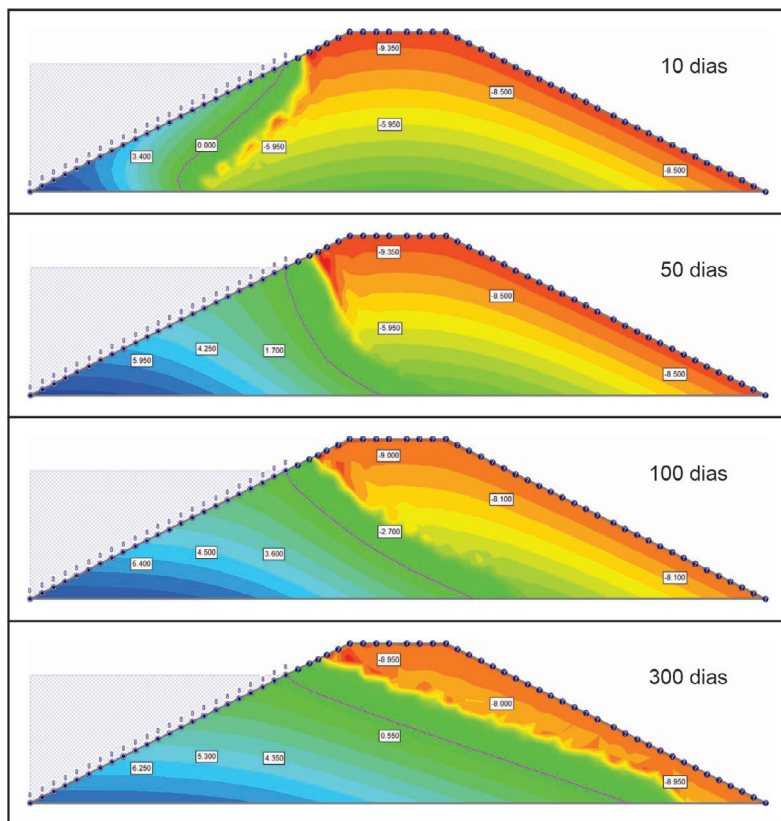
Mais da metade dos acidentes em barragens de terra registrados são causados por problemas associados ao controle de percolação. Pelo aterro, é possível se controlar, de forma mais efetiva, a condução das vazões de percolação para fora do maciço sem causar danos que comprometam a segurança da barragem. Na fundação, entretanto, não se tem a mesma garantia, tendo em vista a dependência mais acentuada dos aspectos geológicos e geotécnicos do local da obra.

Neste capítulo, serão apresentados detalhes de percolação pelo aterro, com vistas a entendimento das exigências de modelagem, levando-se em consideração os aspectos relacionados com os solos não saturados. Serão apresentados os resultados de enchimento e esvaziamento de uma barragem de terra homogênea.

4.1 Enchimento e esvaziamento de uma barragem de terra

Essa fase ocorre com percolação em condições transientes com variação do grau de saturação com o tempo. Para a realização da previsão do enchimento, é necessária a determinação da função condutividade hidráulica, que é estimada a partir da curva de retenção de água dos materiais constituintes do maciço.

O exemplo mostrado na Figura 12 é de uma barragem homogênea com 10 m de altura e taludes com inclinações iguais e correspondentes a 1(V): 2(H), sendo a largura do coroamento igual a 8 m e uma folga de 2 m. Foi utilizada uma permeabilidade saturada igual a 10^{-8} m/s e a condutividade hidráulica modelada pela formulação de Fredlund e Xing (1994).



A Figura 12 mostra os resultados da uma simulação numérica do avanço da linha de saturação após o enchimento admitido instantâneo da barragem homogênea. Percebe-se, nessa figura, que as poropressões são positivas no trecho saturado e negativas (sucção) no trecho não saturado. Assim, as condições hidráulicas e o estado de tensões no maciço varia com o tempo e somente podem ser modelados com realismo admitindo-se os conceitos aplicados aos solos não saturados.

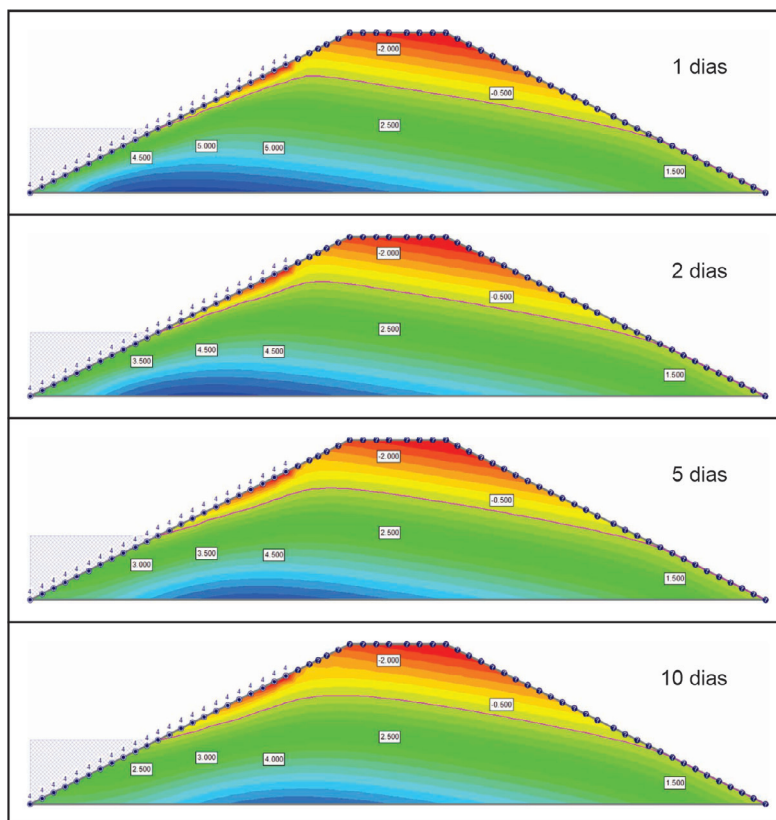


Figura 13 – Rebaixamento instantâneo do nível da água em 4 m e verificação da dessaturação do maciço com o tempo

A Figura 13 mostra a distribuição das poropressões e sucções ao longo do tempo após o rebaixamento do nível da água de 4m. Percebe-se, claramente, que a linha de saturação é rebaixada em função do tempo e dependente das propriedades hidráulicas (função condutividade).

Como se pode observar na Figura 14, o fator de segurança do talude de jusante 10 dias após o enchimento apresenta valor elevado. Isso ocorre com a contribuição da sucção, pois todo o trecho de jusante ainda permanece não saturado.

Já na Figura 15, percebe-se uma redução do fator de segurança, tendo em vista o avanço da linha de saturação e a diminuição de sucção. O fator de segurança, entretanto, permanece adequadamente, sendo que a superfície potencial de ruptura se aprofunda, uma vez que, na superfície, o solo se encontra com sucção.

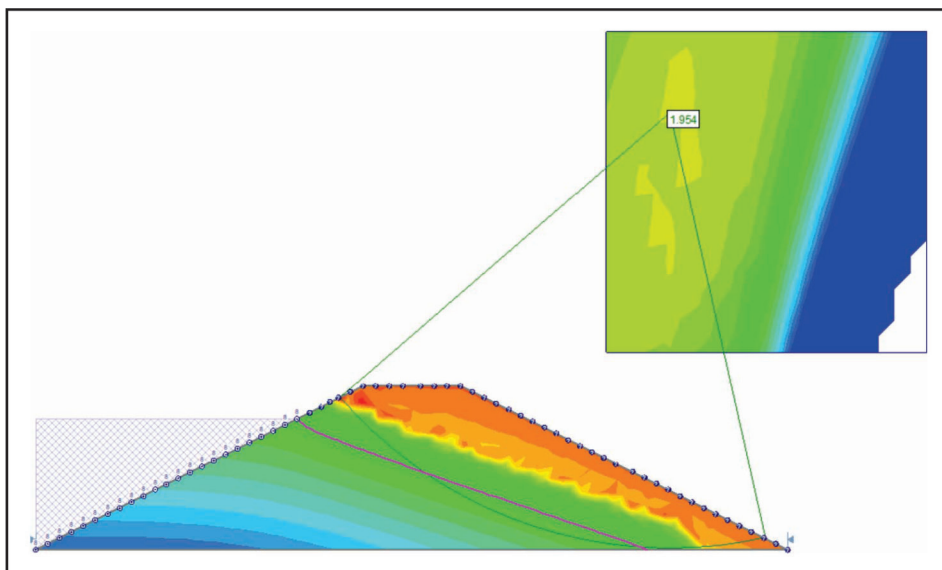


Figura 15 – Fator de segurança ($FS = 1,95$) do talude de jusante 300 dias após o enchimento do reservatório

A Figura 16 e a Figura 17 mostram os resultados de cálculo do fator de segurança do talude de montante, respectivamente, antes e após o rebaixamento do nível da água no reservatório. Como se pode ver nas figuras, o talude de montante sai de uma condição de estabilidade, antes do rebaixamento para a instabilidade, após a redução de 4 m do nível da água no reservatório.

A instabilidade ocasionada pelo rebaixamento é ocasionada considerando-se as propriedades hidráulicas do material do maciço. Isso significa que a função condutividade hidráulica (solo não saturado) é importante para uma avaliação realista de estabilidade do talude de montante em condições semelhantes a apresentada neste capítulo.

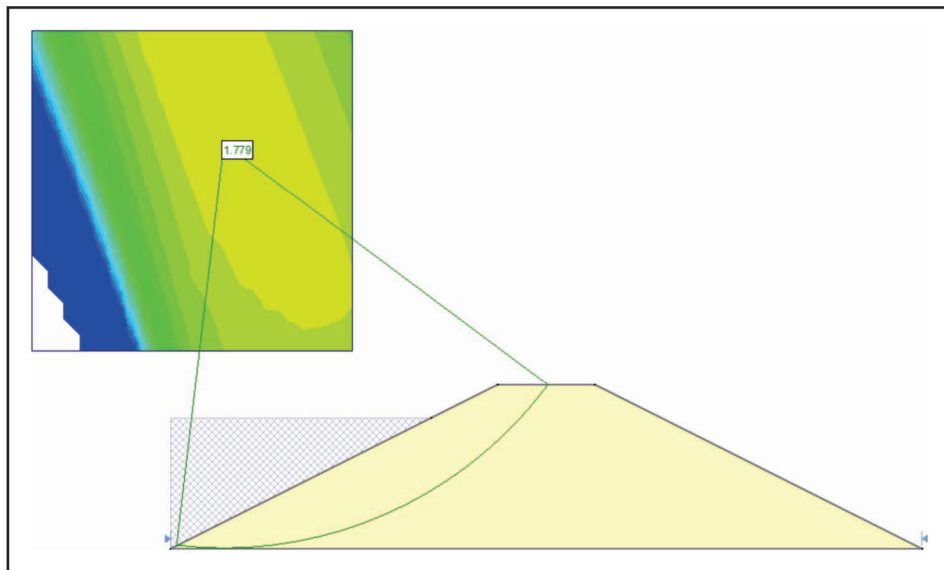


Figura 16 – Fator de segurança ($FS = 1,77$) do talude de montante antes do rebaixamento do nível da água no reservatório

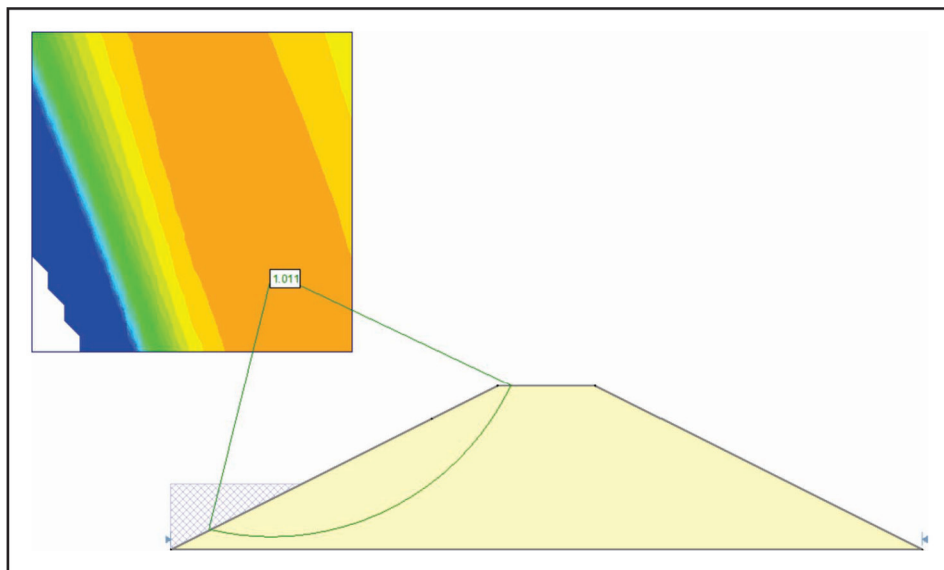


Figura 17 – Fator de segurança ($FS = 1,01$) do talude de montante após o rebaixamento do nível da água no reservatório em 4 m, indicando instabilidade

6. CONCLUSÕES

Este capítulo tratou do tema barragens de terra e solos não saturados, iniciando com uma breve apresentação de estudos importantes para o projeto de barragens e uma descrição de alguns tipos e casos de incidentes em barragens de terra que possam ter relação com variação da sucção nos aterros das barragens.

Apresentou, também, aspectos importantes em que a consideração da influência da sucção traz resultados mais realistas. Por exemplo, durante o enchimento e um possível esvaziamento rápido do reservatório, as condições hidráulicas e mecânicas dependem, fortemente, da distribuição da sucção no maciço.

O enchimento e o esvaziamento são modelados sob condições transientes com variação do grau de saturação com o tempo. Pode-se verificar que a velocidade de avanço da linha de saturação no enchimento e da dissipação das poropressões no esvaziamento dependem muito da função condutividade hidráulica dos materiais constituintes do aterro. Tal função está associada à curva de retenção de água desses materiais.

Além disso, os parâmetros de resistência dos materiais são influenciados pela sucção, e a definição das condições de estabilidade são também mais realistas quando se considera esse aspecto. Isso mostra a grande importância da utilização da Mecânica dos Solos Não Saturados no estudo do comportamento de barragens de terra.

REFERÊNCIAS

FREDLUND, D.G. & XING, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 521-532.

LÔBO NETO, J.B. (2013). Um estudo experimental e numérico de solos compactados colapsíveis: aplicação em uma pequena barragem de terra. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 168 p.

MARANHA DAS NEVES (1990). Analyses of Crack Erosion in Dam Cores: The Crack Erosion Test. De Mello Voume. A tribute to Prof. Dr. Victor F. B. de Mello. Edgard Blucher Ltda, 284-298.

MARSAL, J.R. & RESENDIZ D. (1975). Presas de Tierra y Enrocamiento. Limusa, México,, 546p.

MIRANDA, A.N. (1988). Behavior of Small Dams During initial Filling. Dissertação de Ph.D. Colorado State University, Fort Collins, 229p.

MIRANDA, A.N. & MENESCAL, R.A. (1994). O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Estudo de Fundações de Barragens Rígidas sobre Solos Colapsíveis. II Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Recife, 271-277.

PEREIRA, J.H.F. (1996). Numerical analysis of the mechanical behavior of collapsing earth dams during first reservoir filling. PhD Thesis. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, 449 p.

SANDRONI, S.S. (1989). Barragens de Terra e Enrocamento. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 190p.

SHERARD, J.L.; WOODWARD, R.J.; GIZIENSKI, S.F. & CLEVINGER, W.A. (1963). Earth and Earth-Rock Dams. John Wiley & Sons, 725p.

SHERARD, J.L. (1987). Embankment Dam Cracking. Embankment Dam Engineering. Casagrande Volume. Editors Ronld C. Hirsch- feld and Steve J. Poulos, 271-353.

SILVA FILHO, F.C. (1998). Análise numérica de problemas em solos não-saturados: modelagem, implementação e aplicações práticas. Tese de doutorado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 253p.

SILVA FILHO, F.C. & MALVEIRA, V.T. (2005). Barragens. Livro Geotecnia do Nordeste. Editora Universitária da UFPE, 154-179.

VIEIRA, P. P.B.V.; GOUVEIA NETO, A., MIRANDA, A.N. & MALVEIRA, V.T.C. (1996). Roteiro para Projeto de Pequenos Açudes. UFC, Centro de Tecnologia. 157p.

WILSON, S.D. & MARSAL, R.J. (1979). Current Trends in Design and Construction of Enbankment Dams., ASCE, 125p.