



Study of the stability of small earthfill dams compacted in three different moisture contents

Abstract

Aiming to provide necessary parameter for earthfill dam's preliminary designing, this paper presents the determination of the safety factor for embankments compacted with diabase's residual soil, very common in great areas of Brazil's Southeast Region. For determining these factors, two dams' hypothetic sections (5 meters [m] in height and equipped with draining and filtering elements) were simulated. Aiming to simulate conditions of low compactness control, common in rural areas, the sections were studied in their best compactness content and with 4% above and under this value. The stability analysis were performed at Escola de Engenharia de São Carlos (USP), using the technical softwares SLOPE/W, for determining security factors, and SEEP/W, for determining the water table contained in each simulated embankment. The results showed a variation in the stability of the studied embankments, according to the compactness moisture, and that the slope's inclination recommended by the theory is too conservative.

Key words

Compactness moisture content. Earthfill dams. Stability analysis.

Introdução

O projeto de uma barragem geralmente está associado ao de um grande empreendimento, que poderá apresentar diferentes graus de complexidade em razão da finalidade da construção (GAIOTO, 1998). A avaliação adequada da segurança de uma barragem deve levar em consideração uma análise criteriosa de sua estabilidade, observando-se os parâmetros de resistência do solo como coesão e ângulo de atrito.

Para barragens de terra de seção homogênea, com altura de 10 a 15 metros (m), são utilizados taludes de jusante e montante com inclinações de 2:1 e 3:1. Muito raramente a inclinação dos taludes é baseada em parâmetros de projeto criteriosos obtidos tanto para o aterro quanto para sua fundação. Durante e após a sua construção e no ato do enchimento total de seu reservatório, uma barragem passa por diversas solicitações que variam com o tempo. Por isso, é importante verificar os fatores de segurança correspondentes a cada fase de sua vida útil. As situações críticas a considerar são:

- 1) Fim de construção: durante a construção de uma barragem de terra, à medida que as camadas vão sendo colocadas e compactadas, a pressão total em um determinado nível vai aumentando. Esse aumento provoca, simultaneamente, pressões intersticiais devido à compressibilidade do maciço e ao seu baixo coeficiente de permeabilidade. Assim, os esforços atuantes são função do peso de solo e das consequentes pressões neutras induzidas, decorrentes do tipo de solo, teor de umidade dos solos colocados e do ritmo construtivo.
- 2) Fluxo em regime permanente com o reservatório cheio: durante o primeiro enchimento do reservatório, estabelecem-se fluxos de percolação, constituindo progressivamente uma rede de fluxo permanente. Uma vez que a água percola de montante para jusante, a pressão de percolação é favorável à estabilidade do talude de montante e desfavorável à do talude de jusante.
- 3) Esvaziamento rápido do reservatório: corresponde a um rebaixamento rápido do nível de água do reservatório, sendo uma situação crítica para o maciço de montante da barragem (BORDEAUX, 1980).

Durante a fase de projeto, é de grande importância que, nas análises de estabilidade dos taludes preliminares da barragem a ser executada, leve-se em conta cada condição de solicitação citada com seu respectivo coeficiente de segurança. Porém, na maioria dos casos, a construção de pequenas barragens de terra é executada sem a presença de um projeto baseado em dados obtidos por meio de ensaios laboratoriais e de campo, ou mesmo na análise criteriosa da estabilidade do barramento, acarretando, dessa maneira, o aparecimento de um grande número de fissuras no maciço, vazamentos, solapamento de taludes, recalques acentuados etc. (PASCHOALIN FILHO, 2002).

Por outro lado, a maior parte das pesquisas geotécnicas na área de barragens são orientadas para o estudo de obras de grande porte, deixando em segundo plano obras menores. Dessa forma, os projetos destas últimas ficam limitados apenas a orientações provenientes de manuais técnicos, apostilas didáticas e recomendações empíricas (op. cit.).

1. Material e métodos

Para a execução desta pesquisa, foram desenvolvidas as seguintes atividades:

1.1. Determinação dos parâmetros necessários do solo a ser estudado

Anteriormente ao procedimento das análises de estabilidade, foi necessário obter os valores de umidade ótima (w_{opt}) e dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) a serem utilizados nos cálculos dos fatores de segurança. Com esse objetivo, elaboraram-se ensaios de compactação do tipo Proctor Normal, para a determinação desses valores e dos ensaios triaxiais do tipo rápido adensado, saturado e não-saturado (CU e CUsat), com verificação de pressões neutras, obtendo-se, assim, parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas e totais.

Os corpos de prova necessários à realização dos ensaios foram compactados em teores de umidade situados no ponto ótimo de compactação e em valores variando em + e - 4% a partir deste. Para a obtenção dos parâmetros de resistência do solo de fundação, talharam-se corpos de prova em blocos de solo monolíticos. O solo usado na determinação desses parâmetros foi obtido no Campo Experimental para Estudos em

Mecânica dos Solos, na Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade de Campinas (UNICAMP). Os ensaios triaxiais foram realizados no Laboratório Central de Engenharia Civil da Companhia Energética de São Paulo (CESP), na cidade de Ilha Solteira – SP.

Os valores de tensão de confinamento utilizados foram, respectivamente, 50, 100 e 200 kPa., e o diâmetro para a confecção dos corpos de prova, 5 centímetros (cm), para uma altura de 12,5 cm. No monitoramento dos valores de tensões neutras, utilizou-se um transdutor conectado à base do corpo de prova. Os corpos de prova foram montados nas câmaras triaxiais sobre pedras porosas localizadas na base e no cabeçote, com o objetivo de possibilitar a drenagem das pressões neutras resultante do carregamento, e, em seguida, envolvidos por membranas finas impermeáveis.

Nos ensaios saturados, os corpos de prova, compactados depois de montados dentro das câmaras, eram submetidos à saturação por contração. Durante os ensaios, consideravam-se rompidos os corpos de prova de acordo com o seguinte critério de ruptura: plano de ruptura bem definido ou deformação axial na ordem de 20%.

1.2. Determinação das seções hipotéticas a ser analisadas

Para a execução das análises computacionais, foram determinadas seções hipotéticas de aterros de barragens. Estudaram-se dois tipos distintos de barragens com altura de 5 m, apoiadas numa camada de fundação caracterizada como argila silto-arenosa homogênea até 6 m de profundidade. O valor da espessura da fundação foi determinado de acordo com as sondagens executadas no Campo Experimental da FEAGRI-UNICAMP, as quais indicavam a homogeneidade dessa camada até a profundidade analisada.

Inicialmente, os valores de inclinações para os taludes de montante e jusante foram 3:1 e 2:1, respectivamente, para seções em estudo, escolhidos por serem recomendados e comumente utilizados em projetos de pequenas barragens de terra no meio rural.

O dimensionamento da trincheira de vedação foi baseado em parâmetros mínimos de projeto (CRUZ, 1996; GAIOTO, 1998).

Para a escolha das dimensões do dreno de pé, considerou-se a configuração da linha freática a ser formada no interior do aterro, obtida pelo programa SEEP/W. A escolha da inclinação da trincheira e do dreno de pé, da granulometria dos enrocamentos e dos parâmetros de resistência foi baseada em dados já existentes (CRUZ, 1996).

As características do material utilizado nos filtros, como coeficiente de permeabilidade, granulometria e parâmetros de resistência, foram obtidas de acordo com recomendações e características de filtros pre-existent. Na Tabela 1, são apresentados os parâmetros adotados para o enrocamento e a areia do filtro.

Para o dimensionamento do filtro horizontal, foi utilizada a equação de Darcy, citada por Bueno e Vilar (1986), e consideradas as vazões provenientes da fundação e do aterro.

Tabela 1 - Parâmetros adotados para determinação das seções hipotéticas.

Material	ρ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	K_{20} (cm/s)	Granulometria
Enrocamentos	30	1	35	1	Grossa
Areia	26,7	0	30	10 ⁻²	Média

Obs.: peso específico natural (ρ_{nat}); parâmetro de coesão efetiva (c'); ângulo de atrito efetivo (φ'); coeficiente de permeabilidade (K_{20}) em centímetros por segundo (cm/s).

Fonte: CRUZ, 1996.

O comprimento da crista dos aterros foi determinado, utilizando-se a fórmula recomendada pelo U. S. Bureau of Reclamation citada por ARTHUR (1960).

$$C = \frac{H}{5} + 3$$

em que:

C = comprimento da crista (em m);

H = altura do aterro (em m).

Os valores referentes à borda livre (*freeboard*) foram arbitrados dentro do recomendado, estando situados entre 0,6 e 3 m. Adotou-se esse valor em razão da impossibilidade do cálculo do *fetch* e da altura de onda, pois, para determinar as seções, não se considerou o comprimento de reservatório nem tamanho de bacia onde estaria inserida a barragem.

Na Tabela 2, apresentam-se as características das seções hipotéticas inicialmente consideradas, que serviram de ponto de partida para as análises computacionais.

Tabela 2 – Características das seções hipotéticas analisadas.

Seção hipotética	Altura (m)	NA _{max} (m)	Crista (m)	Borda livre (m)	Prof. Trincheira (m)	EFV (m)	HFV (m)	EFH (m)	LFH (m)	Talude Trincheira	Talude Enrocamento
1	5	4,4	3	0,6	1	—	—	—	—	1:1	1,5: 1
2	5	4,4	3	0,6	1	—	—	0,7	—	1:1	—

Em que: espessura do filtro vertical (EFV); altura do filtro vertical (HFV); espessura do filtro horizontal (EFH); comprimento do filtro horizontal (LFH).
Fonte: Elaboração própria.

Cada seção hipotética de aterro analisada foi estudada na sua umidade ótima de compactação em um intervalo de 4% abaixo e acima da mesma, com o intuito de simular condições precárias de controle de compactação.

1.3. Análise de estabilidade de taludes

Após a determinação das linhas freáticas e, conseqüentemente, da porção saturada das seções hipotéticas estudadas, procedeu-se às análises de estabilidade dos taludes. Para essas análises, considerou-se o método simplificado proposto por Bishop, citado por Bueno e Vilar (1986), pois é o mais utilizado para barragens. Foram estudadas superfícies hipotéticas cilíndricas de ruptura correspondentes às condições de solicitação de final de construção, operação com o reservatório cheio e seu rebaixamento rápido. Os fatores de segurança foram utilizados de acordo com Cruz (1996) e são relatados na Tabela 3.

Tabela 3 – Fatores de segurança mínimos utilizados nas análises de estabilidade.

Condição de solicitação	Talude	FS _{mínimo}
Final de construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Rebaixamento do reservatório (NA máximo - NA mínimo)	Montante	1,1
Regime permanente de operação	Montante	1,5
	Jusante	1,5

Fonte: Elaboração própria.

Para a condição de solicitação referente ao regime permanente de operação na porção saturada do aterro, foram usados parâmetros de resistência obtidos por meio dos ensaios triaxiais saturados, enquanto na porção seca do aterro (acima da linha freática), utilizaram-se parâmetros de resistência obtidos por meio de ensaios triaxiais não-saturados.

Para o estudo da condição de solicitação referente ao rebaixamento rápido do reservatório, manteve-se a porção saturada considerada na condição acima relatada, porém, com o rebaixamento da cota do nível d'água para zero. Já para a condição de solicitação referente ao final de construção, utilizaram-se somente parâmetros de resistência não-saturados.

A fundação foi considerada saturada nas condições de solicitação referentes a regime permanente de operação e rebaixamento rápido do reservatório. Entretanto, para as análises de estabilidade durante a condição de final de construção, a fundação foi considerada não-saturada.

À medida que eram executadas as análises de estabilidade, verificava-se a viabilidade do aterro, com base nos fatores de segurança propostos (vide Tabela 3). Se as seções apresentavam condições de estabilidade aceitáveis, procedia-se à otimização das seções hipotéticas, aumentando-se a inclinação de seus taludes. As análises de estabilidade foram executadas individualmente para os taludes de montante e jusante.

Durante as análises de estabilidade realizadas, todos os parâmetros de resistência utilizados foram em termos de tensões efetivas.

Quanto aos parâmetros de resistência, observando-se as Tabelas 5 e 6, pode-se notar que, para a envoltória tipo CU (ensaio rápido adensado não-saturado), o solo compactado abaixo da umidade ótima apresentou maiores valores de ângulo de atrito em termos de tensões totais. Porém, no que se refere a tensões efetivas, o solo compactado com teor de umidade de + 4% ótima foi o que apresentou maiores valores de ângulo de atrito. Em se tratando do intercepto de coesão, a amostra compactada na umidade ótima foi a que obteve maiores valores, diferentemente do solo compactado no ramo úmido e da amostra indeformada, que apresentaram valores de coesão efetiva igual a zero.

Verificando-se os parâmetros obtidos pela envoltória dos ensaios do tipo CUsat, ao qual o ensaio rápido adensado saturado se refere, nota-se que, em tensões totais ou efetivas, o solo compactado na umidade ótima foi o que apresentou maiores parâmetros de resistência.

2.2. Análises de estabilidade de taludes

Os fatores de segurança obtidos durante as análises para a configuração hipotética 1 são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Fatores de segurança obtidos para a configuração hipotética 2.

Barragem de 5 m de altura e dreno de pé													
Talude	Inclinação	Reservatório cheio			FS _{MÍN}	Rebaixamento			FS _{MÍN}	Final de construção			FS _{MÍN}
		+4%	W _{ÓTI}	+4%		-4%	W _{ÓTI}	+4%		-4%	W _{ÓTI}	+4%	
Jusante	2,5:1	1,7	1,7	1,7	1,5	—	—	—	1,1	—	—	—	1,3
Jusante	2:1	1,5	1,5	1,5	1,5	—	—	—	1,1	1,8	1,8	1,7	1,3
Montante	3:1	3,9	4,2	2,9	1,5	1,8	2	1,4	1,1	—	—	—	1,3
Montante	2,5:1	3,3	3,8	2,5	1,5	1,7	1,8	1,2	1,1	—	—	1,8	1,3
Montante	2:1	3	3,7	2,3	1,5	1,5	1,6	1	1,1	—	—	—	1,3
Montante	1,5:1	2,7	3,5	2	1,5	1,2	1,4	—	1,1	—	—	—	1,3
Montante	1:1	2,6	3,5	1,9	1,5	1,1	1,6	—	1,1	1,6	3,2	—	1,3

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 1 apresenta a análise de estabilidade desta seção para a condição de solicitação de reservatório cheio e aterro compactado na umidade ótima.

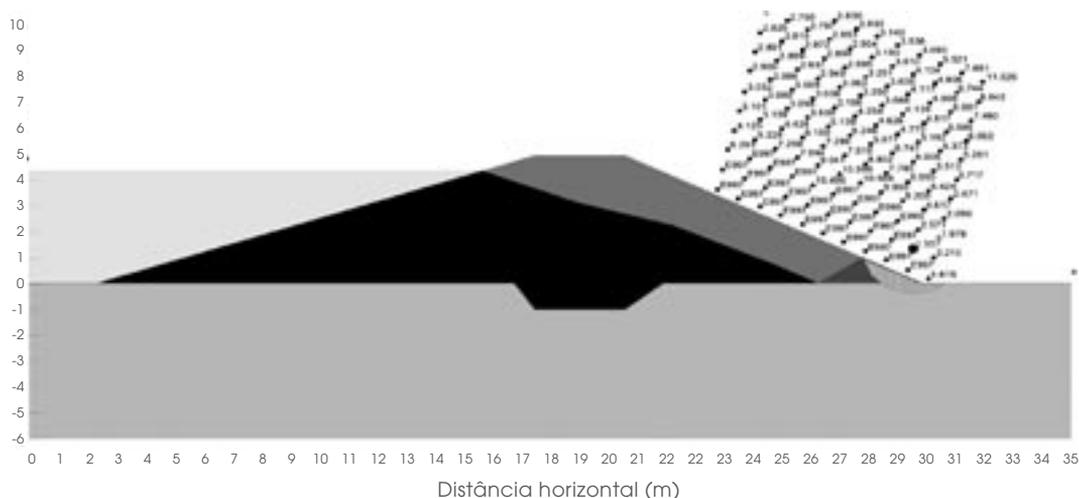


Figura 1 - Análise de estabilidade do talude de jusante da configuração hipotética 1 para a condição de reservatório cheio.

Fonte: Elaboração própria.

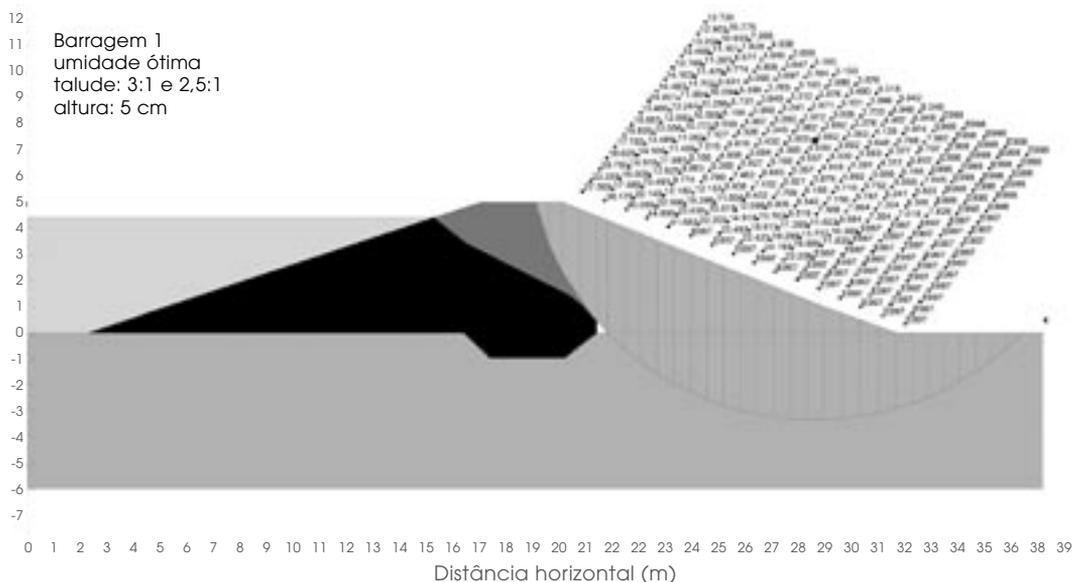
Assumindo-se a Tabela 7, percebe-se que, na condição de solicitação de reservatório cheio, a inclinação máxima referente ao fator de segurança mínimo para o espaldar de jusante foi o mesmo para os três teores de umidade estudados. Na Figura 1, nota-se que a superfície cilíndrica de ruptura atravessou o dreno de pé e uma porção da fundação, deixando intocado o espaldar de jusante. Isso indica que, caso haja uma ruptura do talude de jusante na condição de solicitação em estudo, esta acontecerá provavelmente no dreno de pé. Essa característica foi apresentada pelos três teores de umidade estudados. Dessa forma, o enrocamento escolhido para compor o dreno de pé dessa seção não foi satisfatório. Quanto ao talude de montante, este apresentou bons valores de fator de segurança para todos os teores de umidade estudados. Analisando-se as demais condições de solicitação, percebe-se que o solo compactado acima da umidade ótima foi o que apresentou os menores fatores de segurança aceitáveis e, conseqüentemente, inclinação mais suave.

A Figura 2 apresenta a análise de estabilidade de taludes executada para a seção hipotética 2, na condição de solicitação de reservatório cheio e umidade de compactação igual a ótima. Os fatores de segurança obtidos durante as análises para a configuração hipotética 2 são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Fatores de segurança obtidos para a configuração hipotética 2.

Barragem de 5 m de altura e filtro horizontal													
Talude	Inclinação	Reservatório cheio			FS _{MIN}	Rebaixamento			FS _{MIN}	Final de construção			FS _{MIN}
		+4%	W _{ÓTI}	+4%		-4%	W _{ÓTI}	+4%		-4%	W _{ÓTI}	+4%	
Jusante	2,5:1	2	2,9	1,8	1,5	—	—	—	1,1	—	—	—	1,3
Jusante	2:1	2	3,6	1,6	1,5	—	—	—	1,1	—	—	1,4	1,3
Jusante	1,5:1	1,8	2,3	1,4	1,5	—	—	—	1,1	—	—	—	1,3
Jusante	1:1	1,7	2,1	—	1,5	—	—	—	1,1	1,4	2,9	—	1,3
Montante	3:1	3,6	3,9	2,7	1,5	2,7	2,7	1,8	1,1	—	----	—	1,3
Montante	2,5:1	3,4	3,7	2,6	1,5	1,7	1,8	1,2	1,1	—	----	1,6	1,3
Montante	2:1	3	3,7	2,3	1,5	1,4	1,5	1	1,1	—	----	—	1,3
Montante	1,5:1	2,7	3,7	2,1	1,5	1,3	1,5	—	1,1	—	----	—	1,3
Montante	1:1	2,7	3,8	2	1,5	1,1	1,7	—	1,1	1,4	2,9	—	1,3

Fonte: Elaboração própria.


Figura 2 – Análise de estabilidade do talude de jusante da configuração hipotética 2 para a condição de reservatório cheio.

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 8, observa-se que o solo compactado acima da umidade ótima apresentou, para a condição de solicitação de reservatório cheio, uma inclinação crítica ao talude de jusante igual a 2:1. Já a inclinação crítica do talude de jusante, para a mesma condição de solicitação, considerando solo compactado na sua umidade ótima e abaixo desta, apresentou valores semelhantes, chegando ao valor máximo de 1:1. Dessa maneira, percebe-se a influência da umidade de compactação na estabilidade dos taludes observados. O talude de montante para a mesma condição de solicitação apresenta

- 2) As inclinações dos espaldares de jusante e montante foram influenciadas pela umidade de compactação do aterro. Dessa forma, reforça-se a necessidade de um controle de compactação efetivo durante a fase de construção da obra;
- 3) As inclinações dos espaldares de jusante e montante, inicialmente analisadas e recomendadas pela teoria em geral, demonstraram ser conservativas, com possibilidade de otimização, desde que haja uma análise criteriosa de estabilidade dos taludes a ser projetados;
- 4) Apesar de a barragem representada pela seção 2 apresentar inclinação de 1:1 para espaldar de montante, esta inclinação não deve ser utilizada, pois, de acordo com Cruz (1996), a inclinação máxima de um espaldar deverá chegar a valores iguais a 1,5:1, em razão das dificuldades na execução do aterro e colocação de materiais de proteção, como solo-cimento ou enrocamento;
- 5) Os parâmetros de resistência bem como as inclinações de taludes geradas nesta pesquisa podem ser utilizados em anteprojetos de pequenas barragens de terra de seção homogênea, desde que sejam semelhantes às condições aqui representadas.

Referências

- ARTHUR, H. G. *Selection of type of dam. Design of small dams*. Washington, DC: United State Government Printing Office, cap 3. 1960.
- BUENO, B. S; VILAR, O. M. *Mecânica dos solos*. 1. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos (USP), 1986. 217 p.
- BORDEAUX, G. H. M. *Barragens de terra e enrocamento, projeto e construção*. 1. ed. Salvador: Clube de Engenharia, 1980. 300 p.
- CRUZ, P. T. *100 Barragens brasileiras*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 645 p.
- GAIOTO, N. *Barragens de terra e enrocamento*. 1. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos (USP), 1998. 20 p.
- PASCHOALIN FILHO, João Alexandre. *Utilização de solo residual de diabásio como elemento de fundação e material de construção de aterros compactados para barragens de pequeno porte*. 2002. 171 f. Dissertação (Mestrado em Construções), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas (UNICAMP). Campinas: 2002.