

Análise de estabilidade de taludes: um Estudo de caso da Barragem Itaíba - PE.

Natália Milhomem Balieiro

Engenheira Civil, Techne Engenheiros Consultores, Recife, Brasil, nataliamilhomem@hotmail.com

Hosana Emilia Abrantes Sarmiento Leite

Engenheira Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, Brasil, hosanaemilia@hotmail.com

Karlla Albuquerque Souza Cavalcante

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, karlla.a.s.c@hotmail.com

Ana Paula de Lima Borges

Universidade Estácio de Sá, Recife, Brasil, anapl.borges@gmail.com

Vivian Baião Ferreira

Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil, vivianbaiaoeng@gmail.com

RESUMO: A construção de barragens existe desde a antiguidade e acompanham o desenvolvimento do homem praticamente em todas as culturas. A escolha da concepção estrutural de uma barragem depende de fatores como topografia, geologia da região, finalidade do barramento, aspectos técnicos, econômicos e ambientais, que determinam a viabilidade do projeto. Um fator importante na elaboração de projeto da barragem é a segurança, pois sua concepção deve garantir os fatores de segurança, no intuito de minimizar o risco de ruptura ou acidente, em termos de vidas humanas, impacto ao meio ambiente, prejuízos materiais e os reflexos econômico-financeiros. Neste aspecto, este trabalho apresenta as análises de estabilidade da Barragem Itaíba/PE, através do emprego de modelos matemáticos, com o auxílio programa SLOPE/W (Geostudio), utilizando o método de Spencer para a determinação do coeficiente de segurança (FS). As análises foram realizadas em duas seções do eixo do barramento, considerando as condições de carregamento ao final de construção, rebaixamento rápido do nível do reservatório e situação de regime permanente, como forma de identificar a condição mais desfavorável nos diferentes momentos da obra. Os resultados obtidos foram satisfatórios para as condições simuladas, remetendo a estabilidade adequada do maciço de terra da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, análises de estabilidade, estabilidade de taludes.

ABSTRACT: The construction of dams exists since antiquity and accompanies the society development in almost all the cultures. The choice of a dam structural design depends on factors such as topography, region geology, bus' purpose, technical, economic and environmental aspects that determine the project viability. An important factor in the dam design is safety, since its design must guarantee the safety factors, in order to minimize the risk of rupture or accident, in terms of human life, environmental impacts, material damages and the reflexes economic-financial. In this aspect, this work presents the stability analyzes of the Itaíba /PE Dam, through the use of mathematical models, with the aid of the SLOPE / W (Geostudio) program, and the Spencer method for the determination of the safety coefficient. Analyzes were carried out in two sections of the bus axis, considering the conditions of loading at the end of construction, rapid lowering of the reservoir level and permanent regime, as a way to identify the most unfavorable condition in the different moments of



the work. The results obtained were satisfactory for the simulated conditions, referring to the adequate stability of the dam earth mass.

.

KEYWORDS: Dam, slope stability, stability analysis.

1 Introdução

A construção de barragens existe desde a antiguidade e acompanharam o desenvolvimento do homem em praticamente em todas as culturas. A partir do século XX, vem crescendo significativamente, se tornando uma obra de terra com finalidade de fornecer água para o consumo humano e animal, desenvolver a agricultura através da irrigação e fomentar o avanço da industrialização através do fornecimento de energia elétrica.

A escolha da concepção estrutural de uma barragem depende de uma análise complexa de fatores, que determinam a viabilidade de um projeto, entre os quais se destacam a topografia e geologia da região, finalidade do barramento, aspectos técnicos e econômicos e impacto ambiental (USBR, 1987).

Alguns critérios para a escolha do tipo de barragem estão relacionados em função das características topográficas, geológico-geotécnicas do sítio da sua implantação, da disponibilidade de materiais naturais de construção e do processo construtivo a ser utilizado. Em função das condições topográficas, vales muito abertos e disponibilidade de material na região, as barragens de terra homogêneas e mistas são as mais utilizadas. Além disso, elas apresentam o benefício da versatilidade da fundação, uma vez que, barragens de terra permitem a construção sobre solos de boa resistência.

O estudo de concepção de uma barragem inicia-se com localização do eixo do barramento, através da topografia e com os estudos hidrológicos de aproveitamento hídrico. Em seguida, ocorre a verificação das condições geológicas-geotécnicas da região para a escolha da seção tipo da mesma, incluindo os estudos das fundações, que busca avaliar sua permeabilidade. Após a definição das características das fundações do sítio e a dimensão de implantação, parte-se para o estudo dos materiais do corpo da barragem que leva em considerações as características geotécnicas de jazidas de solo e areia, escavações obrigatórias e pedreiras

O emprego de modelos matemáticos e computacionais para simulação do fluxo e análises de estabilidade de uma barragem é uma ferramenta importante para essa avaliação, podendo alertar para o surgimento de condições indesejáveis de segurança da estrutura.

A segurança da estrutura de terra é um dos fatores de grande influência no dimensionamento do maciço argiloso, ou seja, do núcleo argiloso dos taludes, pois estão susceptíveis a problemas, que a água em contato com o mesmo possa causar, como tombamento, desmoronamento e ruptura. Isso constitui uma preocupação permanente para as entidades governamentais, tanto por sua importância econômica específica, como pelo risco potencial que representa a possibilidade de ruptura ou acidente grave, em termos de vidas humanas, impacto ao meio ambiente, prejuízos materiais e os reflexos econômico-financeiros (ELETROBRÁS, 2003).

Assim, a concepção de uma Barragem requer diversos cuidados e deve atender às orientações encontradas no Manual do empreendedor de segurança de Barragens publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA) e Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da ELETROBRÁS, que determinam que sejam realizados uma série de estudos geológicos-geotécnicos para caracterizar de forma precisa os materiais do maciço e de fundação e definir os parâmetros utilizados no projeto, como coesão, ângulo de atrito e permeabilidade, como também, evidencia a importância dos estudos de análises de estabilidades serem realizados de forma eficiente.

Neste contexto, este trabalho busca analisar a estabilidade global dos taludes das seções transversais considerando a altura máxima da barragem na fase de elaboração do Projeto Básico, pois essas análises em projetos de barragens é um dos quesitos fundamentais à segurança da estrutura. Os modelos e análises utilizadas neste estudo foram baseadas em sondagens, ensaios de campo, ensaios geotécnicos de laboratório, do projeto da barragem.

2 Área de estudo

A Barragem de estudo está inserida no Municipal de Itaíba (Figura 1), localizado nas coordenadas geográficas de latitude 08°56'51"S e longitude 37°25'22"W a uma altitude de aproximadamente 480 metros. O principal acesso ao município é feito pelas rodovias BR-101, PE-126 e PE-177. Sendo seus principais acessos terrestres estabelecidos pelas rodovias estaduais PE-300 e PE-270.

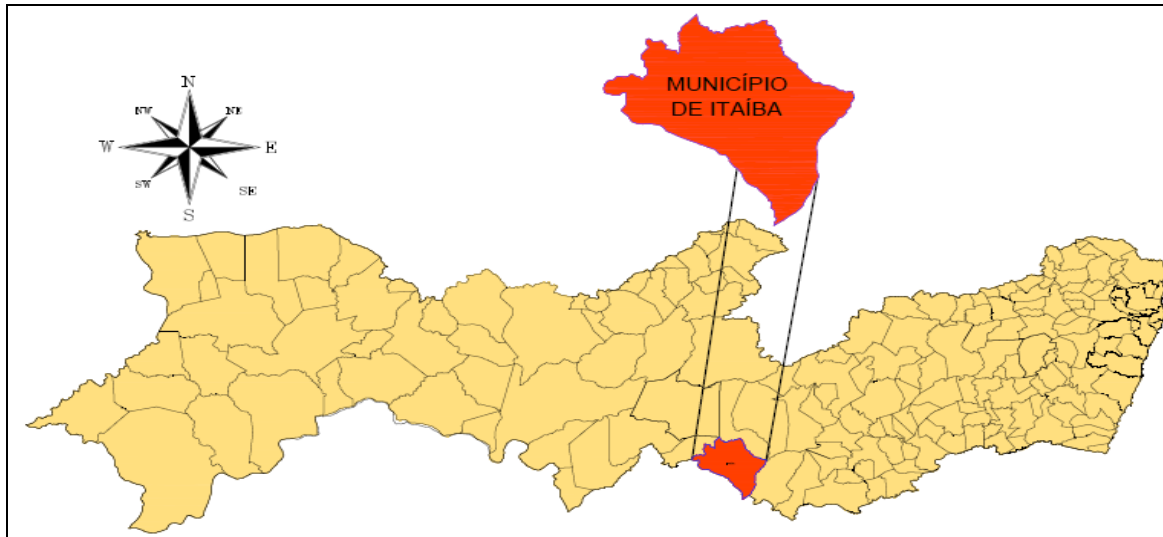


Figura 1. Mapa do Estado de Pernambuco. Em destaque o município de Itaíba.

Fonte: Techne, 2017.

A uma distância 332 km da capital do Estado de Pernambuco, Itaíba limita-se ao Norte com Tupanatinga, ao Sul com o Estado de Alagoas, a Leste com Águas Belas e Buíque, e a Oeste com o Estado de Alagoas e o município de Manari.

O município de Itaíba está inserido na mesorregião do Agreste, na Microrregião Vale do Ipanema, e na Região de Desenvolvimento Agreste Meridional. Divisão esta adotada pelo modelo de gestão democrático e regionalizado do governo atual.

Partindo da sede da cidade de Itaíba, o acesso ao sítio da barragem é compreendido por 15 km percorrido na PE-300, de onde acessa-se uma estrada carroçável a esquerda, percorrendo-se mais 1,20 km, alcançando as terras do sítio da barragem.

2 Aspectos gerais do Projeto

A barragem Itaíba será construída no município de Itaíba, uma obra do Governo do Estado de Pernambuco, que tem como objetivo incrementar a oferta hídrica da região, através do barramento do Rio Caraíbas.

O Eixo Barrável localiza-se entre as coordenadas UTM, sistema SIRGAS 2000, 9.002.706,126 N / 687.180,179 E e 9.003.902,983 N / 687.253,318 E, ombreira esquerda e ombreira direita, respectivamente (ver Figura 2)

A Barragem principal e auxiliar foi projetada para construção em Terra Homogênea (Tabela 1), composta por vertedouro do tipo Perfil Creager, tomada d'água, drenagem externa e interna, com revestimentos de Talude de montante com Rip rap e Jusante com Enrocamento.

Tabela 1 – Características da Barragem Itaíba.

	Comp (m)	Altura máxima acima do TN (m)	Talude de jusante	Talude de montante	Largura do coroamento (m)	Cota do coroamento (m)	Tipo de fundação
Principal	891,00	25,00	2,50H 1,00V	3,00H 1,00V	8,00	406,00	Maciço CCR Saprolito e Rocha Gnaiss Granítica
Auxiliar (Ombreiras)	188,00 OE 287,00 OD	2,70	2,00H 1,00V	2,00H 1,00V	4,00	406,00	Saprolito

Fonte: Techne, 2017.

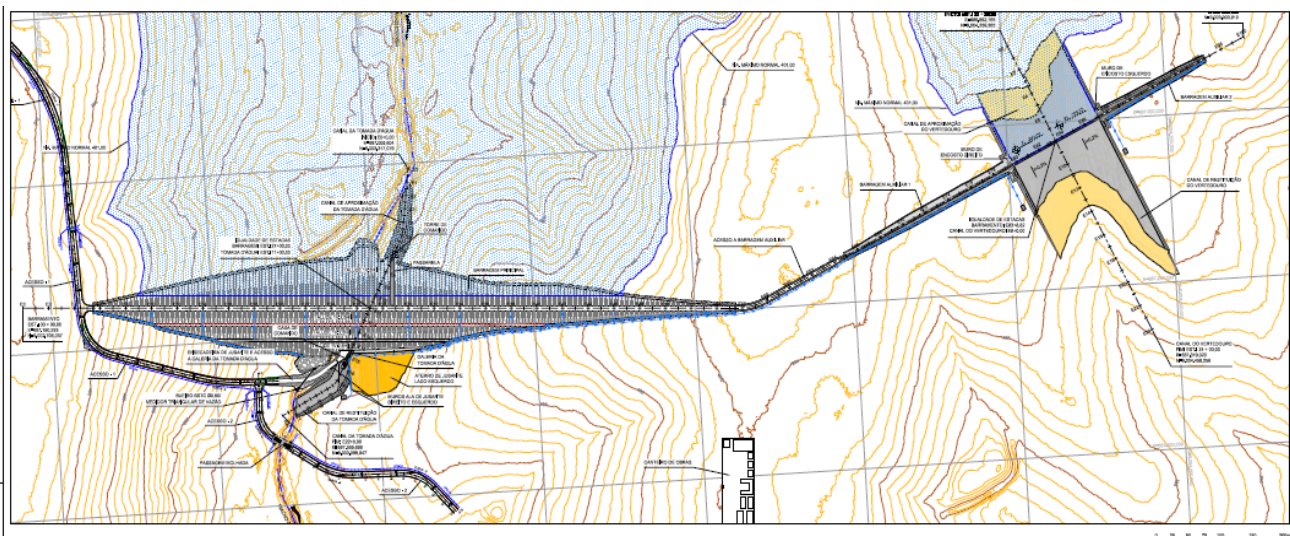


Figura 2 - Eixo da Barragem.

Fonte: Techne, 2017.

3 Modelo Geomecânico do maciço

A barragem tem um perfil de terra homogêneo e para o material que compõe o maciço de terra (aterro compactado) foram analisadas duas jazidas de solos, no qual os solos foram classificados essencialmente como areias argilosas (SC), areias siltsosas (SM) e argila de baixa plasticidade (CL) no Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS.

Com base nos resultados dos ensaios de permeabilidade dos materiais das jazidas, compondo os ensaios de laboratórios, através dos ensaios de permeabilidade à carga constante em amostras provenientes das Jazidas 01 e 02, adotou-se $ksat=5,53 \times 10^{-6}$ cm/s ($5,53 \times 10^{-8}$ m/s) para o material do aterro compactado, considerando o parâmetro de maior coeficiente de permeabilidade, pois é o caso mais desfavorável. A Tabela 2 resume os coeficientes de permeabilidade do material saturado ($ksat$) adotados para os materiais que compõe o corpo da barragem.

Tabela 2 - Valores de permeabilidade dos materiais utilizados no estudo.

Material	Coeficiente de permeabilidade	
	ksat (cm/s)	ksat (m/s)
Aterro Compactado	$5,53 \times 10^{-6}$	$5,53 \times 10^{-8}$
Filtro Vertical / Tapete Horizontal	$4,60 \times 10^{-2}$	$4,60 \times 10^{-4}$
Transição Brita	15	$1,50 \times 10^{-1}$
Enrocamento / Rip-rap	100	1
Concreto Dental	$1,00 \times 10^{-10}$	$1,00 \times 10^{-12}$

Fonte: Techne, 2018.

Os parâmetros de resistência para os materiais constituintes da fundação da barragem foram estimados em função dos resultados das campanhas de sondagens realizadas para a implantação do empreendimento e dados técnicos da literatura.

A definição dos parâmetros de resistência dos materiais utilizados na camada de Solo residual foi realizada por meio de dados da literatura e de ensaios do material de jazida próximo à área do eixo. A amostra com ensaio triaxial mais próxima do eixo, com a designação contida no solo residual (Areia média a grossa siltosa, compacta, coloração acinzentada) da sondagem SMI-01 (Estaca 12+10,00), pertence a Jazida 01, Furo 10. Para esta amostra foram obtidos através de ensaio triaxial, a coesão de 55,90 kPa e ângulo de atrito de 20°. Visto que, este ensaio foi realizado no material nas condições de umidade ótima e densidade máxima, para a estimativa mais próxima da situação em campo o valor da coesão foi reduzido a zero, tratando-se de um material arenoso e nas análises o mesmo estará sempre saturado.

A Tabela 3 mostra o resumo dos parâmetros adotados de resistência e peso específico para o solo residual e fundação.

Tabela 3 - Resumos dos parâmetros de resistência e peso específico.

Tipo do Material	Poço/ Jazida		Triaxial		Peso Específico máximo		
			Coesão (C)		ϕ	(γ)	
	Localização	Furo	(kPa)	(t/m ²)	(°)	(g/cm ³)	(kN/m ³)
Solo Residual	Jazida 01	10	0	0	20	1,92	18,8
Concreto Dental	-	-	80	8,15	40	2,45	24
Rocha Muito Alterada	-	-	0	0	30	1,73	17
Rocha Fraturada	-	-	0	0	35	1,84	18
Rocha Sã	Impenetrável						

Fonte: Adaptado de Techne, 2017.

Foram realizados ensaios de avaliação da dispersividade de solos argilosos e ensaios triaxiais, seguindo os procedimentos sugeridos por normas brasileiras. Os ensaios de dispersividade indicaram solos não dispersivos. Os ensaios triaxiais foram executados com amostras moldadas em laboratório, nas condições de peso específico aparente máximo seco e umidade ótima, extraídas da Jazida 01.

Os parâmetros atribuídos ao aterro compactado foram escolhidos os mais desfavoráveis, em termos de coesão, no caso o furo 08 da Jazida 01.

Os parâmetros de resistência para o filtro vertical e tapete foram adotados por meio da literatura. Por ser muito estreita a camada de transição de brita, foram adotados os mesmos parâmetros de resistência do filtro. Para o enrocamento / Rip-rap foram adotados valores baseados no estudo realizado por Leps (1970), onde foram determinados diversos parâmetros de resistência ao cisalhamento de enrocamentos, a partir de ensaios triaxiais de grandes dimensões.

A Tabela 4 apresenta o resumo dos parâmetros de resistência e peso específico utilizados no estudo para todos os materiais.

Tabela 4 - Dados para cálculo de Estabilidade da Barragem.

Tipo do Material	Cor	Poço/ Jazida		Triaxial			Peso Específico (γ)	
		Localização	Identificação	Coesão		ϕ (°)	(t/m ³)	kN/m ³
				(kPa)	(t/m ²)			
M A C I C O	Aterro Compactado	Jazida 01	Furo 8	39.23	4.00	29	1.89	18.50
			Furo 10	55.90	5.70	20	1.92	18.80
			Furo 20	50.99	5.20	17	1.94	19.00
			Furo 25	59.82	6.10	18	1.93	18.90
	Filtro Vertical / Tapete Horizontal	-	-	0.00	0.00	30	1.84	18.00
Transição de Brita	-	-	0.00	0.00	35	2.04	20.00	
Rip-Rap / Enrocamento	-	-	0.00	0.00	45	2.14	21.00	
F U N D A C Ã O	Solo Residual	Jazida 01	Furo 10	0.00	0.00	20	1.92	18.80
	Concreto Dental	-	-	80.00	8.15	40	2.45	24.00
	Rocha Muito Alterada	-	-	0.00	0.00	30	1.73	17.00
	Rocha Fraturada	-	-	0.00	0.00	35	1.84	18.00
Rocha sã	Impenetrável (BedRock)							

4 Análises de estabilidade do eixo barravel

Os estudos de estabilidade da Barragem Itaíba foram realizados com o auxílio do programa SLOPE/W, utilizando-se o método de equilíbrio limite aplicado a superfícies circulares e adotando o método de Spencer para a determinação do coeficiente de segurança (FS).

As análises de estabilidade tiveram como objetivo de verificar as condições de segurança do barramento, através do cálculo do Fator de Segurança, atendendo as condições de solicitação determinada pela ELETROBRÁS (2003), que são:

- Final de construção: talude de montante e talude de jusante;
- Regime permanente excepcional e normal: talude de jusante;
- Regime transiente: decorrente ao rebaixamento rápido do reservatório após a cheia máxima (talude de montante).

Baseado nessas condições foram consideradas as premissas, para efeitos de análises de estabilidade da barragem, onde todos os materiais foram considerados isotrópicos e homogêneos, considerando a estabilidade do talude geral de montante e jusante, e por fim, o potencial de ruptura sendo considerado do tipo circular.

Na análise de final de Construção, o valor adotado para R_u foi de 0,20, com base em valores empíricos, tendo em conta que o material constituinte do aterro compactado, trata-se de uma areia silto argilosa.

No Regime Permanente, esta situação foi analisada para o talude de jusante, com nível de água do reservatório na elevação normal de operação de 401,00 metros e na condição excepcional a verificação da estabilidade da barragem em relação ao NA MÁX Max (Nível d'água Máximo Maximorum) na elevação 404,58 metros.

4 Resultados

Os modelos geomecânicos para as análises de estabilidade da barragem foram baseados nos estudos geológico-geotécnicos e de acordo com os parâmetros apresentados, onde se obteve os fatores de segurança da fase da elaboração do Projeto Básico.

Para cada etapa foram realizados os estudos de estabilidade, visando obter o valor do Fator de Segurança (FS). A primeira análise foi realizada na etapa final de construção da barragem, ou seja, antes do seu enchimento no qual o reservatório encontrava-se vazio. O resultado encontrado do FS nessa etapa foram 2,64 e 2,26 para os taludes de Jusante e Montante, respectivamente (ver tabela 5).

Na condição de regime permanente o resultado encontrado para o FS foi 3,53, sendo considerado muito elevado, quando comparados ao valor recomendado pela ELETROBRÁS. Já para condição de rebaixamento rápido o FS foi 2,69.

As condições analisadas obtiveram resultados satisfatórios, atendendo as condições recomendadas nos Critérios de projetos da ELETROBRÁS.

Tabela 5 – Resultados das análises de estabilidade.

Seção Analisada	Talude	Condição	FS Mín. Admissível	Fator de Segurança
Est. 24+0,00	Jusante	Final de Construção	1,3	2,64
	Montante	Final de Construção	1,3	2,26
	Jusante	Regime permanente	1,5	2,86
	Montante	Rebaixamento rápido	1,1	3,53

5 Conclusão

De maneira geral, todas as análises apresentadas demonstraram que os materiais analisados estão aptos a serem utilizados na construção da barragem e os estudos de estabilidade confirmam que os mesmos atendem a todos os critérios analisados, inclusive os efeitos de rebaixamento rápido do reservatório que implica em riscos à segurança e a perdas de vida humanas, em caso de acidentes.

Vale ressaltar, que é de extrema importância que os parâmetros utilizados no estudo, sejam os mesmos utilizados na construção da barragem, exigindo um bom controle tecnológico dos materiais. Sugere-se ainda, a execução de novos ensaios no Projeto Executivo para confirmação dos parâmetros de resistência utilizados no solo do aterro compactado, considerando a grande extensão da área de jazida.

Os parâmetros utilizados nas análises de estabilidade foram obtidos por meio de ensaios geotécnicos de laboratório realizados em amostras deformadas provenientes das áreas de empréstimos ou adotados de literatura. É fundamental que amostras indeformadas sejam coletadas no corpo da barragem para nova campanha de ensaios, confirmando ou não as condições geotécnicas dos materiais utilizados no maciço da barragem, visando garantir na obra os resultados provenientes das análises de estabilidades, condicionado assim, a segurança da obra.

Por fim, pelos estudos apresentados e as análises realizadas para a barragem Itaíba, pode-se concluir que a estrutura, para as condições apresentadas, atende aos fatores de segurança, apresentando condições satisfatórias para sua construção.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a TECHNE Engenheiros Consultores e a Secretaria de Planejamento e Gestão de Pernambuco - SEPLAG/PE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional de Águas. *Manual do empreendedor de segurança de Barragens – Diretrizes para elaboração de projetos de Barragem*. Vol V, Brasília, 2016.

ASSIS, A. P.; PEREIRA, D. A. *Previsão de poropressão construtiva em Barragens via simulação numérica*. In: XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens (Comitê Brasileiro de Barragens), 2005.

CRUZ, P. T. *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto*, 2ª. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2004.

GERSCOVICH, D.M.S. *Estabilidade de taludes*, Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Departamento de estruturas e fundações, Rio de Janeiro, 2009.

U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. *Design of small dams*. 3. ed. Denver, Colorado:[s.d.], 1987