



ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UMA BARRAGEM DE TERRA PELO MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO

Alexandre de Souza Júnior ¹
Henrique Antônio Oliveira Araújo ²
Manoel Domiciano Dantas Filho ³
Yago Wiglife de Araújo Maia ⁴
João Paulo Batista Barros ⁵

RESUMO

As barragens são estruturas dispostas transversalmente em cursos permanentes ou temporários de água cuja finalidade destina-se, principalmente, para abastecimento, geração de energia e regularização de rios. Essas estruturas indispensáveis ao desenvolvimento socioeconômico das civilizações, podem ser classificadas em diversos tipos a depender, por exemplo, do material e da finalidade. Nesse aspecto, as barragens de terra são as mais comuns no Brasil. O objetivo desse estudo é avaliar a estabilidade dos taludes de uma barragem de terra. Para isso, foram utilizados os softwares AutoCAD e Microsoft Excel para definição e processamento da análise, que utilizou o método de Bishop Simplificado. Os resultados dos fatores de segurança para a fase de final de construção foram 3,91 (montante) e 2,86 (jusante) para $B=0,6$. Já para a fase de reservatório cheio, obteve-se 1,4 (jusante). Por fim, na fase de esvaziamento rápido, obteve-se 1,83 (montante). Os resultados encontrados foram satisfatórios, sendo os taludes avaliados considerados estáveis para a seção transversal da barragem considerada.

Palavras-chave: Barragens de terra, Estabilidade de taludes, Bishop simplificado.

INTRODUÇÃO

Consideradas como fundamentais ao desenvolvimento social desde o início da história da humanidade, a construção de barragens devia-se, sobretudo, à escassez hídrica no período de estiagem e a consequente necessidade de armazenar água. No Brasil, as primeiras barragens concentraram-se na região Nordeste por volta do início do século XX, sendo as principais finalidades o combate a seca e a regularização das rios utilizados para irrigação. Atualmente, as

¹ Mestrando do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, alexandrejr5@hotmail.com;

² Mestrando do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, henrique.zamoura@gmail.com;

³ Graduando pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, manoelfilho97@gmail.com;

⁴ Graduado pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, yagowiglife23@gmail.com;

⁵ Graduado pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, joaopaulo_cce@hotmail.com.



barragens brasileiras são construídas, em sua maioria, para geração de energia (SAYÃO, 2009; CBDB, 2011).

De acordo com a Lei Federal nº 12.334/2010, que versa sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens, define-se barragem como qualquer estrutura construída em curso de água permanente ou temporário com a finalidade de acumulação de substâncias líquidas ou misturas líquidas-sólidas, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (BRASIL, 2010).

Segundo Matos, Silva e Pruski (2012), as barragens são elementos estruturais construídas transversalmente à direção do fluxo de água assumindo a configuração de um reservatório artificial cuja finalidade é acumular água por meio da elevação do nível.

As barragens podem ser classificadas em diferentes tipos, conforme a finalidade, seu projeto hidráulico e os tipos de materiais empregados em sua execução. Com relação ao material, podem ser de terra, enrocamento, alvenaria, concreto ou mista, sendo a escolha do tipo de material determinada pelas condições geológicas-geotécnicas do local, bem como da disponibilidade de recursos. Devido a variedade de tipos barragens, o estudo se limitia as barragens de terra (CARVALHO, 2008; MATOS, SILVA, PRUSKI, 2012).

Conforme Mendonça (2012), as barragens de terra podem ser homogêneas, quando construídas com um tipo de material, ou zoneadas, quando, por falta de área de empréstimo de material argiloso, utiliza outros materiais. Estruturalmente, as barragens de terra são menos rígidas, logo permitem fundações mais deformáveis.

Além disso, utilizam material natural e dependem de tecnologia simples para sua construção, logo são amplamente utilizadas dos primórdios até os dias atuais e são consideradas uma boa solução para obras geotécnicas.

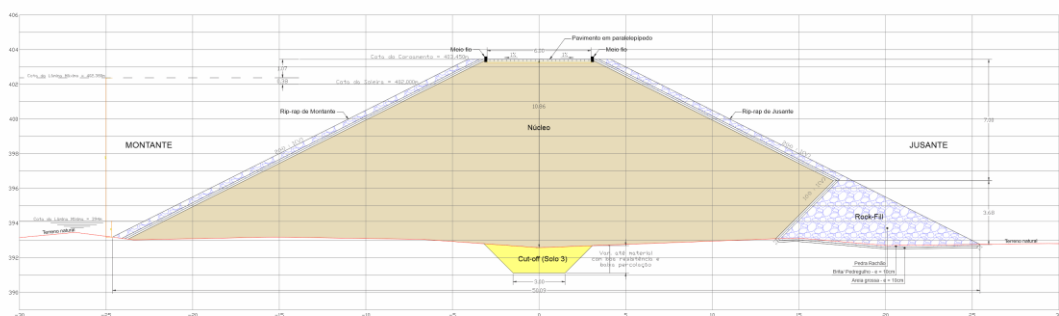
Portanto, atentos a importância da construção de barragens para o desenvolvimento socioeconômico e a complexidade do projeto e execução desse tipo de obra, que, geralmente, envolve diversas áreas da engenharia, o estudo tem por objetivo avaliar a estabilidade dos taludes de uma barragem de terra utilizando o método de Bishop Simplificado.

METODOLOGIA

Metodologicamente, o estudo avaliou a estabilidade do maciço de uma barragem de terra de núcleo argiloso, com rip-rap dispostos nos taludes de montante e jusante, e cut-off conforme a Figura 1.



Figura 1 - Seção transversal da barragem



Para realizar a análise, foram necessárias simulações computacionais por meio dos softwares AutoCAD versão 2021, para elaboração da seção transversal e determinação da rede de fluxo, e o Microsoft Excel para aplicação do Método de Bishop Simplificado.

A análise contou com determinação da rede de fluxo, dimensionamento de filtro drenante com os materiais disponíveis e cálculo do coeficiente de segurança mínimo, levando em consideração as três fases (final de construção, reservatório cheio e esvaziamento rápido), com base em superfícies de rupturas para cada fase e talude.

A determinação dos parâmetros do solo necessários a análise foram obtidos a partir de investigações geotécnicas. A Tabela 1 contém os valores dos parâmetros geotécnicos dos materiais que compõe a barragem.

Tabela 1 – Parâmetros geotécnicos dos materiais: compactação e permeabilidade

Material	Aplicação	Compactação		Permeabilidade	
		$\gamma_{sm\acute{a}x}$	$W_{\acute{o}tima}$	K_h	K_v
		kN/m ³	%	cm/s	cm/s
A	Maciço	19,6	13,5	$1,66 \times 10^{-5}$	$8,33 \times 10^{-6}$
B	Cut-off e núcleo	18,6	14,5	$1,925 \times 10^{-6}$	$6,417 \times 10^{-7}$
C	Filtros	-	-	$2,451 \times 10^{-3}$	-

Para a análise da estabilidade nas condições de final de construção, reservatório cheio e esvaziamento rápido são necessários os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito interno) obtidos nos ensaios triaxiais do tipo consolidado drenado (CD), consolidado não drenado (CU) e não consolidado e não drenado (UU). A Tabela 2 contém os valores dos parâmetros de resistência dos materiais.



Tabela 2 - Parâmetros de resistência dos materiais

Material	Ensaio triaxial UU		Ensaio triaxial CU		Ensaio triaxial CD	
	c	Φ	c'	Φ'	c'	Φ'
	kN/m ²	cm/s	kN/m ²	cm/s	kN/m ²	cm/s
A	71	25	10	26	18	29
B	88	19	37	17	30	23
C	-	-	-	-	-	-

Na determinação das seções hipotéticas a serem analisadas, para a fase final de construção, utilizou-se a análise em termos de tensões efetivas, utilizando o parâmetro B de Skempton para estimar o excesso de pressões neutras no caso de comportamento não drenado. No caso de barragens, esse parâmetro é obtido para solos na condição não saturada, condição que o solo encontra-se anterior ao enchimento. A estabilidade dos taludes foi avaliada variando o parâmetro de poropressão B em 0,2; 0,4; 0,6.

Na determinação das seções hipotéticas a serem analisadas, para a fase de regime permanente com o reservatório cheio, utilizou-se a análise em termos de tensões efetivas, ou seja, usando coesão efetiva (c') e ângulo de atrito efetivo (Φ'), e considerando somente as poropressões geradas segundo a rede de fluxo.

Na determinação das seções hipotéticas a serem analisadas, para a fase de esvaziamento rápido, utilizou-se a análise em termos de tensões efetivas (c' e Φ') considerando as poropressões após o rebaixamento.

Além disso, como a barragem não é simétrica, foi necessário avaliar os dois taludes: a montante e a jusante da barragem. Para 10 círculos de ruptura definidos, foram estabelecidos metade para cada lado, avaliando igualmente a estabilidade da obra de terra.

Considerou-se o volume morto como sendo 10% do volume total. Portanto, para uma altura inicial de lâmina máxima de 402,38m pela seção transversal, temos que a altura de lâmina mínima encontra-se em 394m. Levando em consideração o nível do terreno, tem-se que a altura máxima de lâmina de água é 9,17m e a mínima será de 0,92m.

Quanto ao dimensionamento, os materiais de transição e o filtro, usados a jusante do corpo da barragem, tem a função de evitar o carreamento de grãos do material vizinho a ser protegido e, portanto, é fundamental um correto dimensionamento do material de transição para garantir a integridade do corpo da barragem.



Os requisitos que os materiais usados na transição obedecem dizem respeito, unicamente, a critérios de granulometria. Como as transições fazem parte dos sistemas de drenagem, devem obedecer a requisitos de contenção (não segregação) e permeabilidade. Com isso, não foi necessário o dimensionamento de filtro drenante no corpo da barragem, pois os valores mínimos exigidos para o coeficiente de segurança foram atendidos.

REFERENCIAL TEÓRICO

PROJETO GEOTÉCNICO DE BARRAGEM DE TERRA

O Brasil desponta como um dos países pioneiros no desenvolvimentos de tencologias para projeto, execução e monitoramento de barragens de terra. Sabe-se ainda que 80% das barragens brasileiras são do tipo terra e enrocamento, sobretudo por questões históricas, uma vez que as primeiras barragens foram construídas em regiões com predominância de áreas ricas em material argiloso e pobres em granito para produção de concreto. Além disso, as barragens brasileiras situam-se em regiões de planícies, cuja topografia plana exigiria grandes volumes de concreto, acarretando altos custos. As principais vantagens das barragens de terra quando comparadas com outros tipos devem-se ao fato de poderem ser assentes sobre qualquer tipo de fundação, serem relativamente baratas e não exigirem mão de obra especializada (SAYÃO, 2009; SOUZA, 2013).

Segundo Souza (2013), um projeto de barragem de terra e enrocamento deve contemplar os seguintes estudos: controle de fluxo através do maciço da barragem, fundações e interfaces; estabilidade dos taludes de montante e jusante para as fases de final de construção, reservatório cheio e esvaziamento rápido; análise das deformações e erosão superficial a partir do dimensionamento do sistema de drenagem.

Nesse estudo, a abordagem se concentrará no controle de fluxo e na estabilidade dos taludes.

CONTROLE DE FLUXO

As barragens não destinam-se a impedir em sua totalidade o fluxo de d'água pelas fundações ou aterros, logo a percolação de uma quantidade mínima é inevitável e, até certo ponto, desejável. A percolação sob a barragem e estruturas auxiliares não inviabiliza o projeto,



pois, exceto em reservatórios pequenos, o volume perdido costuma ser insignificante quando comparado com os demais usos durante a fase de operação ou até mesmo perdidos por evaporação e infiltração. A discussão, nesse aspecto, destina-se a determinar se a percolação compromete a segurança da barragem. Isso é possível a partir de um estudo de controle de fluxo, a fim de evitar o piping, gradientes elevados e minimizar as vazões e poropressões (OLIVEIRA, 2012; SOUZA, 2013).

Sabendo que a percolação é responsável por mais de 60% dos acidentes de caráter geotécnico em barragens com reservatório cheio, a segurança do maciço e das fundações em virtude da ocorrência de carreamento de partículas sólidas (erosão) é objeto de atenção da engenharia de barragens. Assim, o estudo da percolação se concentra sob três aspectos: percolação em aterros, percolação em fundações e percolação em interfaces (OLIVEIRA, 2012; SANDRONI, 2012; SOUZA, 2013).

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2002), os taludes de montante e jusante e as ombreiras deverão apresentar estabilidade para qualquer nível do reservatório (nível de água máximo e nível de água normal de operação), como também sob condições de operação.

Souza (2013) cita que, durante a vida útil do reservatório, existem quatro condições para análise de estabilidade dos taludes de montante e jusante: fase final da construção; fase de regime permanente de operação com o nível d'água máximo ($NA_{m\acute{a}x}$) do reservatório; rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório; e sob ação de sismo.

O Ministério da Integração Nacional (2002) indica fatores mínimos de segurança aceitáveis, conforme Tabela 3, para avaliação da estabilidade dos taludes, podendo, inclusive, ser admissíveis valores inferiores desde que justificados, por exemplo, pelo bom desempenho da barragem, bem como baseados em recalques e análises mais avançadas.

A obtenção dos fatores de segurança, a partir da análise de estabilidade, devem considerar a confiabilidade dos parâmetros utilizados, adequabilidade e limitações dos métodos, além das deformações aceitáveis e consequências da ruptura.

Tabela 3 - Coeficientes mínimos de segurança

Condições de carregamento	Coeficiente mínimo de segurança	Talude
Percolação permanente com o reservatório na cota máxima normal	1,5	Jusante
Esvaziamento rápido (*)	1,2 a 1,3	Montante



Término da construção antes do enchimento do reservatório	1,25 a 1,3	Jusante e montante
---	------------	--------------------

(*) Coeficientes de segurança maiores podem ser necessários, caso ocorram rebaixamentos com uma relativa frequência durante a operação normal.

Fonte: Ministério da Integração Nacional (2002)

Cruz (2004) cita fatores de segurança mínimos para análises de estabilidade através do equilíbrio limite de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes de segurança mínimos para diferentes condições de solicitação

Condição de solicitação	Talude	FS mínimos	
		Seção homogênea	Seção terra-enrocamento
Final de construção	Montante	1,3	1,2
	Jusante	1,3	1,2
Regime permanente de operação	Montante	1,5	1,3
	Jusante	1,5	1,3
Rebaixamento de reservatório:	Montante	1,1	1,0
	Jusante	1,0	1,0
Qualquer condição para verificação da estabilidade para resistência residual	Montante	1,2	-
	Jusante	1,2	-

Fonte: Cruz (2004)

Com relação a inclinação, para um estudo preliminar, pode-se adotar a declividade dos taludes de barragens de terra sobre fundações resistentes conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de declividade de taludes

Material da barragem	Montante	Jusante
Solos compactados	2,5 (H):1,0 (V) 3,0 (H):1,0 (V)	2,0 (H):1,0 (V)
Solos compactados argilosos	2,0 (H):1,0 (V) 3,0 (H):1,0 (V)	2,0 (H):1,0 (V) 2,5 (H):1,0 (V)
Solos compactados siltosos	3,5 (H):1,0 (V)	3,0 (H):1,0 (V)
Enrocamentos	1,3 (H):1,0 (V)	1,3 (H):1,0 (V)
	1,6 (H):1,0 (V)	1,6 (H):1,0 (V)

Fonte: Cruz (2004)



Mesmo que análises de estabilidade indiquem inclinação mais íngreme que 1,5(H):1,0(V) para taludes em solo, esta redução não é recomendável devido a dificuldade de se executar a camada de proteção superficial (CRUZ, 2004).

Já nas barragens sobre fundações menos resistentes que seus materiais componentes, devem ser utilizados taludes mais abatidos que os anteriores devendo ser determinados por análises de estabilidade global (SOUZA, 2013).

Ainda SOUZA (2013), na análise de estabilidade taludes, existem basicamente dois grupos de métodos: determinísticos, quando a análise se dá pela determinação de um fator de segurança, e probabilísticos, baseados na probabilidade de ocorrência de ruptura. Nos métodos determinísticos, o fator de segurança indica o risco de ruptura, sendo a análise mais utilizada baseada no equilíbrio limite. Essa análise baseia-se nas seguintes hipóteses: o solo sofre ruptura sem deformação prévia; não ocorre rupturas progressivas; o critério Mohr-Coulomb é satisfeito ($\tau = c' + \sigma' \cdot tg\phi'$) ao longo da superfície de ruptura; o fator de segurança é o mesmo em toda a superfície de ruptura; a massa de solo encontra-se vulnerável à ruptura generalizada e as equações da estática são válidas.

Os métodos determinísticos dividem-se em três grupos: método das cunhas, método do círculo de atrito e método das fatias, sendo este último o mais utilizado. Diversos métodos baseiam-se nas fatias a saber: Fellenius (1936), Bishop (1955), Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Janbu (1973).

Utilizou-se, nesse estudo de caso, o método de Bishop Simplificado (1955), que é baseado em equilíbrio limite e o maciço deslocado é dividido em fatias. A Equação 1 descreve o cálculo do fator de segurança pelo método de Bishop Simplificado.

$$FS = \frac{\sum\{c' \cdot \Delta l_i + [(W_i - u_i \cdot \Delta l_i \cdot \cos\theta_i)] \cdot tg\phi'\} \cdot \frac{1}{m_\theta}}{\sum W_i \cdot \sin\theta_i} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$$m_\theta = \cos\theta_i + \frac{tg\phi' \cdot \sin\theta_i}{FS}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da seção transversal da barragem, foi possível determinar a rede de fluxo (linhas de fluxo e equipotenciais) para as fases de reservatório cheio e esvaziamento rápido conforme representado nas Figuras 2 e 3 respectivamente.



Figura 2 - Rede de fluxo para a fase de reservatório cheio

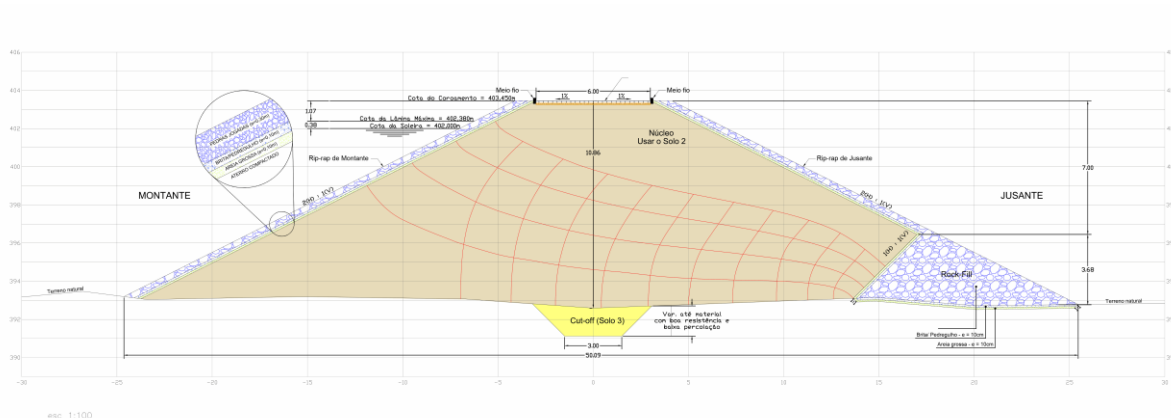
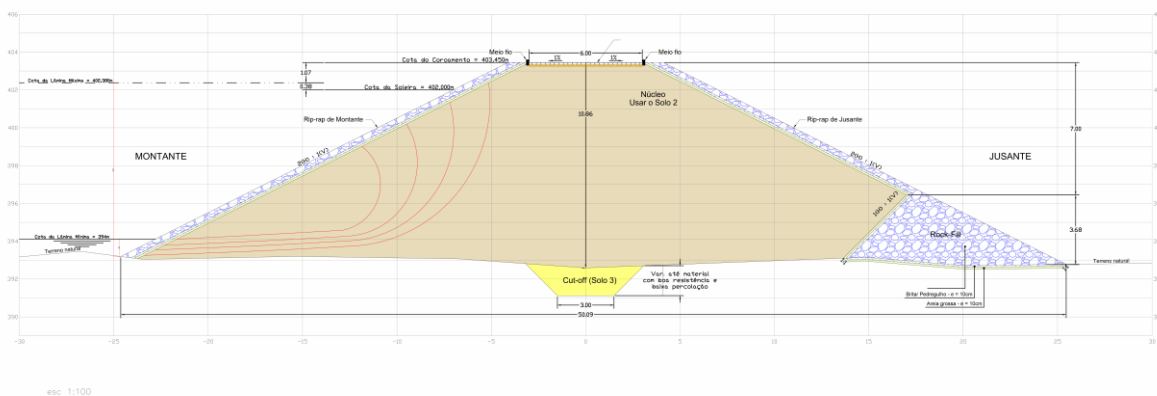


Figura 3 - Rede de fluxo para a fase de esvaziamento rápido



As superfícies críticas de ruptura para as fases final de construção, reservatório cheio e esvaziamento rápido, definidas para o cálculo da estabilidade pelo método determinístico de Bishop Simplificado, encontram-se dispostas nas Figuras 4, 5 e 6.

Figura 4 - Superfície de ruptura - fase final de construção (jusante)

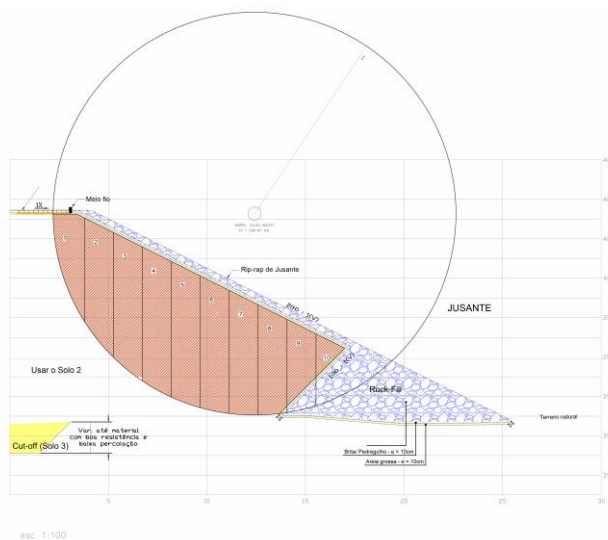




Figura 5 - Superfície de ruptura - fase reservatório cheio (jusante)

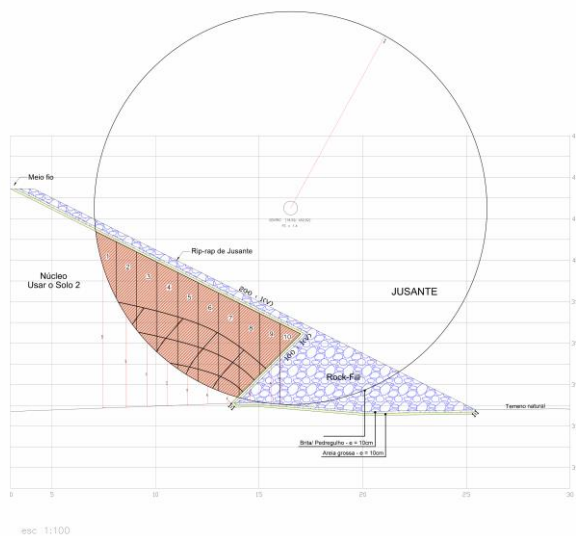
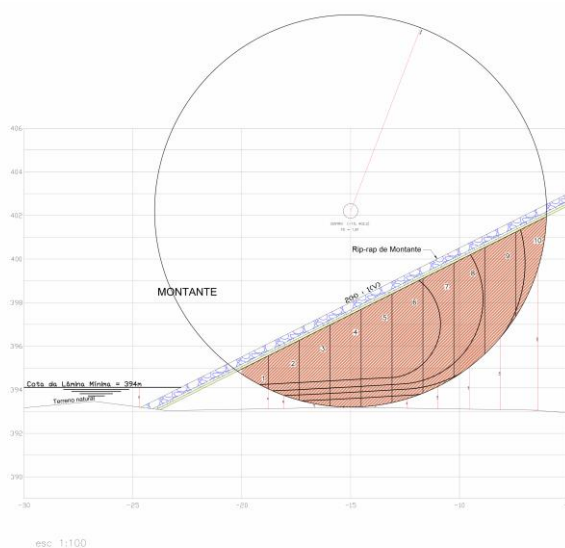


Figura 6 - Superfície de ruptura - fase esvaziamento rápido (montante)



As análises citadas foram executadas com auxílio de programas computacionais obtendo resultados satisfatórios. Para as situações críticas, foram obtidos os seguintes fatores de segurança na análise de estabilidade.

- Na fase final de construção de 3,91 (montante) e 2,86 (jusante) para $B=0,6$;
- Na fase de reservatório cheio de 1,4 (jusante);
- Na fase de esvaziamento rápido (montante) de 1,83.

CONSIDERAÇÕES FINAIS



Diante dos resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Durante o projeto de uma barragem de terra, deve ser considerada cada condição de solicitação (reservatório cheio, rebaixamento rápido e final de construção);
- As inclinações dos taludes de jusante e montante, inicialmente analisadas e recomendadas pela teoria em geral, demonstraram ser conservativas, com possibilidade de otimização. Portanto, pode-se alterar esta inclinação, inicialmente de 2(H):1(V), desde que haja uma análise criteriosa de estabilidade dos taludes a ser projetados;
- Como os fatores de segurança foram satisfatórios para as análises realizadas, retornando valores consideráveis de fator de segurança e garantindo a estabilidade da barragem, pode-se analisar a possibilidade de economia do material que irá compor o maciço, utilizando outro de menor qualidade. Lembrando que, após a mudança deste material, novas análises quanto a estabilidade da barragem devem ser executadas;
- Embora tenham sido feitas diversas análises, a barragem deve ser sempre monitorada através de instrumentação, desde a sua construção e também durante a sua vida útil;
- Portanto, propõe-se a instrumentação da obra através de piezômetros, medidores de vazão, placas de recalque, dentre outros instrumentos, a fim de se ter um acompanhamento do desempenho que possibilite a comparação dos valores medidos em campo com os calculados no projeto.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e cria o Sistema Nacional de Informações sobre segurança de barragens. Brasília, 2010.

CARVALHO, J. A. Dimensionamento de pequenas barragens de terra para a irrigação. Lavras, MG: Editora UFLA. 2008. 158 p.: il.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB. “A História das Barragens no Brasil nos Séculos XIX, XX e XXI. 50 Anos do Comitê Brasileiro de Barragens”. Sindicato nacional dos editores de livros, Rio de Janeiro, 2011.

CRUZ, P. T. “100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projetos”. Oficina de Textos, 2ª Edição. São Paulo, 2004.

MATOS, A. T.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Barragens de terra de pequeno porte. Viçosa, MG: Editora UFV. 2012, 136 p.: il.



MENDONÇA, M. B. “Notas de aula da disciplina Obras de Terra”. UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2012.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. “Manual de Segurança e Inspeção de Barragens”. Departamento de Projetos Hídricos – DPOH. Brasília, 2002.

OLIVEIRA, P. H. A. Problemas hidrogeológicos em barragens envolvendo o mecanismo de retroerosão tubular. Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. Rio de Janeiro, 2012.

SANDRONI, S. “Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento”. Curso de Mestrado da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

SAYÃO, A. “Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento”. Curso de Mestrado da PUC – RJ. Rio de Janeiro, 2009.

SOUZA, M. M. Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC/ Mariana Miranda de Souza. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.