

TALUDES DE BARRAGEM: ANÁLISES DETERMINÍSTICAS E PROBABILÍSTICAS – ESTUDO DE CASO

Dam slopes: deterministic and probabilistic analyses - case study

Vanessa Corrêa de Andrade*

Rodrigo José de Almeida Torres Filho**

Rogério Francisco K. Puppi***

Amanda Dalla Rosa Johann****

Juliana Lundgren Rose*****

Ronaldo Luis dos Santos Izzo*****

RESUMO – Atualmente, as análises determinísticas são utilizadas com grande frequência para a obtenção de um fator de segurança de taludes, apresentando todavia limitações na consideração das incertezas associadas à variabilidade dos parâmetros de resistência dos materiais. As análises probabilísticas permitem resolver este problema, porém, são pouco difundidas no meio técnico. Assim, apresenta-se neste trabalho comparações entre análises determinísticas, pelos métodos de Bishop simplificado e Spencer, e probabilísticas, pelo Método de Monte Carlo, através do estudo de caso de uma barragem utilizando o software Slope/W da GeoStudio. Também são feitas comparações com os critérios estabelecidos pela Eletrobrás e pelo USACE. Verificou-se que a barragem possui seus fatores de segurança dentro dos limites estabelecidos por ambos os critérios. Verificou-se ainda a facilidade de utilização do método probabilístico, desde que existam dados suficientes disponíveis para as análises.

SYNOPSIS – Deterministic analyses are frequently used for obtaining the safety factor of slopes but they have limitations in considering uncertainties due to variability of the material strength parameters. Probabilistic analysis provides solution to this problem; however, it is less familiar to the technical community. Therefore, this paper presents comparison between deterministic analysis, by the simplified Bishop and Spencer methods, and probabilistic, via Monte Carlo simulation, through the case study of a dam, using GeoStudio Slope/W software. Comparisons were also made with criteria established by Eletrobrás and USACE. It was verified that the dam has its safety factor within the limits set by the regulations. The probabilistic method is of simple application, provided sufficient data availability.

PALAVRAS CHAVE – Estabilidade de taludes em barragens, análises determinísticas, simulação de Monte Carlo.

* Engenharia Civil, Mestranda em Engenharia Civil na Área de Estruturas e Geotecnia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: vanessacorreandrade@yahoo.com.br

** Engenheiro Civil, Mestrando em Engenharia Civil na Área de Estruturas e Geotecnia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: rodrigotorresfilho@yahoo.com

*** Professor, Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: rfkpuppi@utfpr.edu.br

**** Professora Doutora, Curso de Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: amandajohann@utfpr.edu.br

***** Pós-Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: julrose@gmail.com

***** Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail: izzo@utfpr.edu.br

1 – INTRODUÇÃO

Barragens podem ser construídas com diversas finalidades; dentre elas pode-se citar reservatórios de água para geração de energia, irrigação, regularização de vazão, lazer, transporte, desvio de rios, dentre outros.

Algumas barragens chegam a alcançar grandes dimensões, da ordem de centenas de metros. Rumei na China terá 340m de altura e 800m de comprimento (Cruz *et al.*, 2009). Obviamente barragens como essas acumulam uma quantidade muito grande de água e é de suma importância garantir a segurança da estrutura sob pena de se incorrer em grandes gastos com manutenção, perda de equipamentos e até mesmo o rompimento da barragem que pode acarretar a perda de vidas humanas. Por outro lado, grandes barragens exigem a mobilização intensa de recursos durante o projeto e execução, não sendo viável economicamente executar este tipo de empreendimento superdimensionando sua estrutura de modo inconsequente, isto é, com utilização excessiva de recursos, gerando desperdício.

Para aquelas construídas com enrocamento ou terra, dentre outras características, é necessário garantir a estabilidade dos taludes que formam a barragem. Conforme Costa e Lança (2001), as barragens de terra podem ser construídas em condições menos favoráveis para fundações e devido à evolução das técnicas de terraplenagem, seus materiais exigem menos rigor quanto às suas propriedades. Em outras palavras, sua concepção pode incluir uma grande diversidade, tanto de materiais quanto de fundações, o que faz desse tipo de barragem uma opção mais flexível.

Quanto aos fatores de construção e manutenção, FAO (2011) discorre sobre as principais vantagens e desvantagens das barragens de terra. Dentre as vantagens citadas estão a possibilidade de utilização de materiais naturais locais, a boa distribuição de cargas na fundação devido à sua base larga e a melhor capacidade de resistência em comparação a estruturas mais rígidas, como, por exemplo, uma barragem de concreto, quando assentadas em locais onde há incidências mais frequentes de movimentos do solo.

Quanto às desvantagens, o autor chama a atenção sobre os problemas provenientes durante a construção, como, por exemplo, a necessidade de um controle de compactação das camadas para evitar uma barragem estruturalmente frágil, com consequentes pontos preferenciais de infiltração e problemas de erosão. Outra questão levantada por FAO (2011) é a obrigação de uma contínua manutenção nos espaldares, a fim de se reparar estragos feitos por animais assim como evitar crescimentos de vegetais no corpo da barragem.

Para a averiguação da estabilidade deste tipo de barragem têm-se dois métodos disponíveis, os métodos determinísticos e os probabilísticos.

Os fatores de segurança apresentados pelas normas vigentes têm como base os métodos determinísticos. Estes valores tabelados de fator de segurança, quando bem empregados garantem a integridade da obra, desde que a variabilidade dos parâmetros utilizados no seu dimensionamento esteja dentro dos mesmos intervalos das variabilidades utilizadas para determinação dos fatores da norma, caso contrário, a norma pode não estar atendendo o critério de segurança necessário para o talude em questão (Duncan e Wright, 2005).

Alternativamente, pode-se lançar mão dos métodos probabilísticos, que utilizam um método determinístico definido pelo projetista como base de cálculo, com a diferença de que associam funções de distribuição de probabilidade às variáveis envolvidas no problema, tais como coesão, ângulo de atrito e peso específico dos materiais, resultando, deste modo, em uma infinidade de fatores de segurança como resposta da análise. Este fator de segurança também se distribui em uma função e dela se pode obter um fator de segurança médio e a probabilidade de ruptura da estrutura em análise.

Neste trabalho é feita a comparação entre análises de estabilidade de taludes pelos métodos determinísticos de equilíbrio limite, com hipótese de ruptura circular, utilizando os métodos de

Spencer e Bishop simplificado, e o método probabilístico de Monte Carlo em uma barragem de terra. Para cada uma dessas análises serão consideradas as condições de Operação, Final de Construção e Rebaixamento Rápido.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Seção transversal

Para o presente trabalho foi analisada uma seção representativa da barragem. Esta seção foi considerada crítica devido às condições de sua geometria e características de sua fundação, levando-se em conta, por exemplo, as diferenças dos materiais nela utilizados, altura da barragem e nível freático do local quando em trechos distintos.

A seção crítica escolhida, denominada seção BT, contará com uma crista na cota 306,00 m, altura máxima de aproximadamente 50 metros, uma trincheira de vedação (*cut-off*), filtros internos, além de material de preenchimento interno (*random*). É caracterizada por ser constituída de zonas de materiais distintos, apresentando nos seus espaldares um material argilo-arenoso, no seu núcleo um solo argiloso, transições de areia, um rip-rap a montante para proteção contra ondas e um pé drenante constituído de enrocamento. A barragem possui também uma enscadeira incorporada a montante, porém, não serão feitas análises para verificação de sua estabilidade, visto que o foco deste trabalho é o comportamento da barragem principal. Mais informações e detalhes da seção são mostrados na Figura 1.

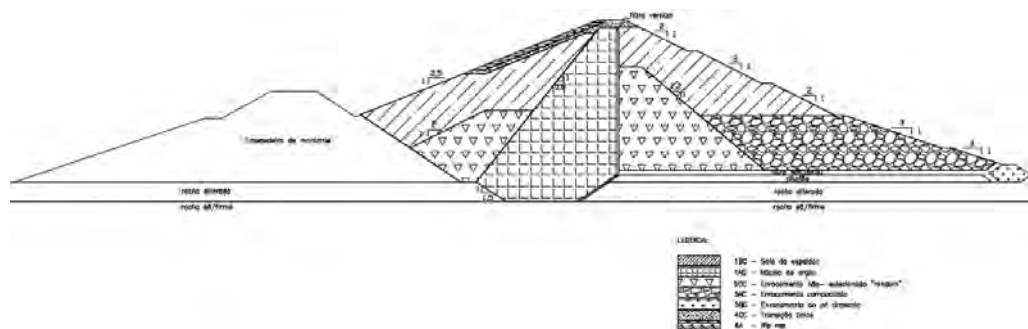


Fig. 1 – Seção representativa da barragem (adaptado de BSMTIT, 2014).

2.2 – Parâmetros geotécnicos

A barragem de terra em estudo é composta por diversos materiais, sendo que o solo componente dos seus espaldares apresenta parâmetros de resistência mais baixos. Por este motivo, espera-se que a superfície de ruptura crítica passe por este material. Devido a essa tendência de falha, o cuidado com o controle da argila usada nesta parte da barragem foi maior do que dos outros materiais, havendo, portanto, mais ensaios laboratoriais e, consequentemente, possibilitando uma análise mais aprofundada com métodos probabilísticos.

São apresentados nas Figuras 2 a 5 os resultados dos ensaios triaxiais realizados no solo do espaldar, sendo que estes ensaios foram do tipo Consolidado Isotropicamente e Não-Drenado (CIU) e Consolidado Isotropicamente e Drenado (CID), na umidade ótima ($W_{ót}$) e umidade 2% acima da umidade ótima ($W_{ót} + 2\%$).

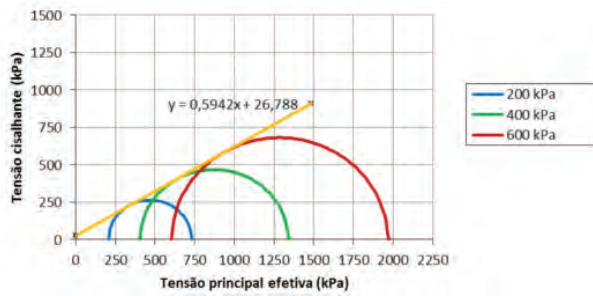


Fig. 2 – Ensaio triaxial CID – Grau de compactação GC= 98% e umidade $W_{ót}$.

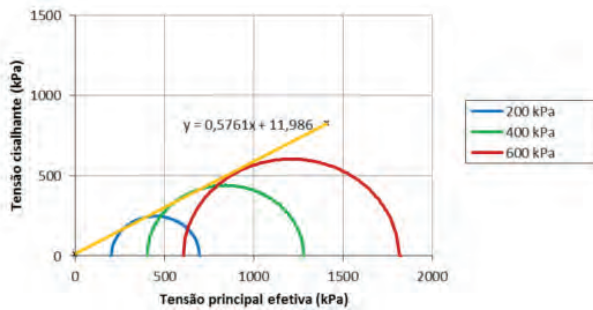


Fig. 3 – Ensaio triaxial CID – Grau de compactação GC= 95% e umidade $W_{ót}+2\%$.

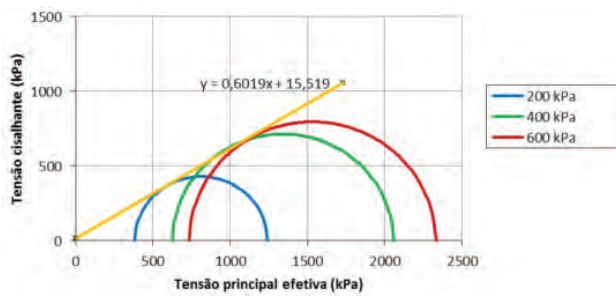


Fig. 4 – Ensaio triaxial CIU – Grau de compactação GC= 98% e umidade $W_{ót}$.

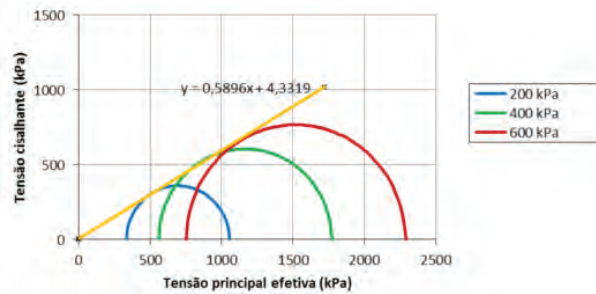


Fig. 5 – Ensaio triaxial CIU – Grau de compactação GC= 95% e umidade $W_{ót}+2\%$.

Para o solo do espaldar (material IBC) no método determinístico foi adotada a média dos resultados dos ensaios de cada parâmetro de resistência. Já para o método probabilístico foram utilizadas a média e o desvio padrão, com hipótese de distribuição normal. No Quadro 1 são apresentados os ensaios realizados, seus respectivos resultados após a eliminação dos dados espúrios, suas respectivas médias e desvios.

Quadro 1 – Parâmetros utilizados para o solo do espaldar (adaptado de BSMTIT, 2014).

Parâmetro geotécnico	Ensaio	Média	Desvio padrão
Coesão (kPa)	Compressão triaxial (CIU e CID)	10,60	5,73
Massa específica seca máxima (g/cm³)	Compactação	1,91	0,04
Ângulo de atrito interno (graus)	Compressão triaxial (CIU e CID)	30,73	0,25

Para fins de dimensionamento, na análise determinística e probabilística foram considerados parâmetros fixos para os demais materiais. A definição dos parâmetros adotados foi fundamentada a partir de ensaios realizados durante a fase de estudos preliminares da obra e também apoiada em parâmetros adotados em empreendimentos realizados anteriormente, levando em consideração a experiência dos projetistas envolvidos. Apresenta-se no Quadro 2 os parâmetros utilizados para os materiais não componentes do espaldar.

Quadro 2 – Parâmetros utilizados para materiais invariáveis (adaptado de BSMTIT, 2014).

Sigla	Descrição	γ (kN/m³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito interno (graus)
1AC	Solo argiloso compactado	18	10	28
4CC	Transição única compactada	20	0	35
5AC	Enrocamento compactado	22	0	Variável (*)
5BC	Enrocamento fino compactado	22	0	40
5CC	Enrocamento não selecionado das escavações obrigatórias (Random)	22	5	35
6A	Rip-rap	22	0	45

* Leps (1970)

Como citado anteriormente, para o método de Monte Carlo, é possível escolher para cada parâmetro uma curva de distribuição de probabilidade. Tem sido usada por diversos autores a distribuição normal para todos os parâmetros, inclusive Flores (2008) afirma que ao se adotar a distribuição normal para os parâmetros estima-se os resultados a favor da segurança. Independentemente disso, foi feita a verificação do conjunto de dados de cada parâmetro a fim de verificar se estes seguiam de fato uma distribuição normal.

2.3 – Dimensionamento

Como a barragem em questão se encontra no Brasil, foi utilizado como referência para o desenvolvimento das análises o documento brasileiro “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas” (Eletrobrás, 2003), que orienta o projeto de barragens para geração de energia elétrica. Para cada caso de carregamento há um fator de segurança mínimo.

O Quadro 3 apresenta os critérios de aceitação para as análises determinísticas de estabilidade de taludes de acordo com cada caso de carregamento, como recomendado pela Eletrobrás (2003).

Quadro 3 – Fatores de segurança mínimos (Eletrobrás, 2003).

Caso de carga	FS mínimo requerido
Final de construção	1,30
Operação normal	1,50
Operação normal com sismo	1,20
Rebaixamento rápido	1,10

Para as análises probabilísticas, como não há um critério específico recomendado pela Eletrobrás (2003), foi utilizado o critério de aceitação de acordo com o *U.S. Army Corps of Engineers - USACE* (1997), mostrado no Quadro 4.

Os resultados também serão comparados, como sugerido por Dell’Avanzi e Sayão (1998), com os valores indicados no Quadro 5.

Quadro 4 – Índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura (adaptado de USACE, 1997)

Nível de desempenho	Índice de confiabilidade (β)	Probabilidade de ruptura (Pr)
Alto	5,0	$3,0 \times 10^{-7}$
Bom	4,0	$3,0 \times 10^{-5}$
Acima da média	3,0	$1,3 \times 10^{-3}$
Abaixo da média	2,5	$6,0 \times 10^{-3}$
Pobre	2,0	$2,3 \times 10^{-2}$
Insatisfatório	1,5	$7,0 \times 10^{-2}$
Perigoso	1,0	$1,6 \times 10^{-1}$

Quadro 5 – Índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura (adaptado de Dell’Avanzi e Sayão, 1998)

Casos	Índice de confiabilidade (β)	Probabilidade de ruptura (Pr)
Fundações	2,3 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}
Taludes de mineração	1,0 a 2,3	10^{-1} a 10^{-2}
Barragens	3,5 a 5,0	10^{-3} a 10^{-5}
Estruturas de contenção	2,0 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}

Para o desenvolvimento das análises de cada uma das seções foi utilizado o programa computacional *Slope/W* da Geo-Slope (2012). O *Slope/W* é um programa do GeoStudio 2012, que tem como função resolver problemas de estabilidade de taludes. Para tal, o programa lança mão da teoria do equilíbrio limite.

Em cada uma dessas análises disponíveis é possível considerar diferentes materiais, geometrias, superfícies de ruptura complexas, a influência das pressões neutras, e até mesmo sismos. Outro tipo de análises disponível para o usuário é a análise probabilística, que funciona a partir de uma análise determinística considerada. Neste tipo de simulação, considera-se a variabilidade dos parâmetros em questão, e não apenas parâmetros fixos, como na análise determinística. Obtém-se como resultado dessa simulação uma distribuição de probabilidade do fator de segurança, e considera-se como probabilidade de ruína um fator de segurança menor que a unidade.

Para cada uma das simulações foram definidas as condições de nível de água, poropressão e taludes a serem avaliados em cada um dos casos. A percolação utilizada neste trabalho foi obtida a partir de simulações de fluxo, feitas através do método dos elementos finitos, no programa *Seep/W*, disponível no próprio pacote de programas GeoStudio 2012 que contém o *Slope/W*.

A curva de retenção foi obtida tendo como condição de contorno os níveis de água na condição de operação normal do reservatório - para os taludes de montante e jusante - e os coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal dos materiais apontados em projeto, oriundos de ensaios de permeabilidade obtidos da fase de estudo preliminar. No Quadro 6 são apresentados os coeficientes de permeabilidade horizontal (k_h) e vertical (k_v) adotados para os materiais.

Quadro 6 – Coeficientes de permeabilidade dos materiais (adaptado de BSMTIT, 2014).

Sigla	Descrição	k_h (m/s)	k_v (m/s)
1AC	Solo argiloso compactado	$5,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-8}$
1BC	Solo dos espaldares	$5,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-8}$
4CC	Transição única compactada	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
5AC	Enrocamento compactado	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$
5BC	Enrocamento fino compactado	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$
5CC	Enrocamento não selecionado das escavações obrigatórias (<i>Random</i>)	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$
6A	Rip-rap	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$

Para a situação de Final de Construção, a análise foi feita tanto no talude de montante quanto no de jusante, sem a presença de nível de água, estando o solo na condição não saturada, uma vez que este caso simula o aterro plenamente construído, porém, antes que se faça o enchimento do reservatório. Vale ressaltar que neste trabalho não se considerou os efeitos de sucção do solo.

Para o caso de Operação Normal foi feita a análise com presença de água até o nível máximo normal, sem a presença de poropressões e com apenas o talude de jusante analisado, uma vez que se trata do caso mais crítico para sua estabilidade, pois no espaldar de montante há o peso de água atuando, que contribui para o seu equilíbrio.

A Operação Normal com Sismo, por assemelhar-se muito à condição anterior, foi realizada a partir desta com a adição apenas dos coeficientes de sismo recomendados pela Eletrobrás (2003).

O Rebaixamento Rápido, por fim, foi analisado apenas no espaldar de montante, já que esta situação apresenta-se mais desfavorável em termos de estabilidade e com as pressões neutras atuando.

3 – RESULTADOS

Para as análises determinísticas foram obtidos os fatores de segurança e a superfície de ruptura para cada uma das situações de análise; para as análises probabilísticas foram obtidas ainda as distribuições de probabilidade do fator de segurança conforme apresentado a seguir.

3.1 – Análises determinísticas

Foram realizadas análises determinísticas pelos métodos de Bishop simplificado e Spencer. Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os resultados obtidos pelos métodos de Bishop e Spencer na condição de Operação Normal; os fatores de segurança obtidos nos demais casos são apresentados em um resumo no Quadro 7.

Quadro 7 – Resultados obtidos pelos métodos determinísticos.

Caso de carga	FS mínimo requerido	FS mínimo obtido (Bishop)	FS mínimo obtido (Spencer)
Final de construção - Montante	1,30	1,69	1,71
Final de construção - Jusante	1,30	1,61	1,62
Operação normal - Jusante	1,50	1,59	1,61
Operação normal com sismo $a_v= 0,03g$ e $a_h= 0,05g$ - Jusante	1,20	1,37	1,39
Operação normal com sismo $a_v= -0,03g$ e $a_h= 0,05g$ - Jusante	1,20	1,33	1,35
Rebaixamento rápido - Jusante	1,10	1,39	1,40

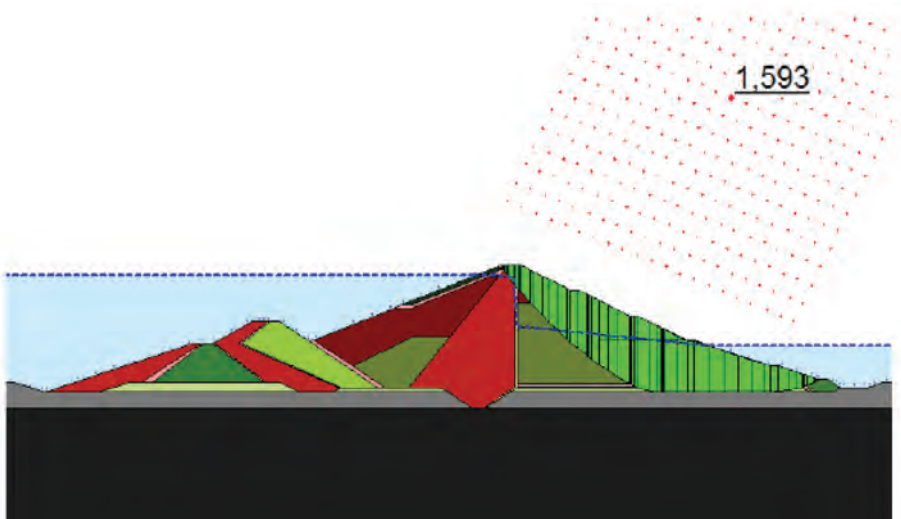


Fig. 6 – Método de Bishop – Operação Normal – Jusante.

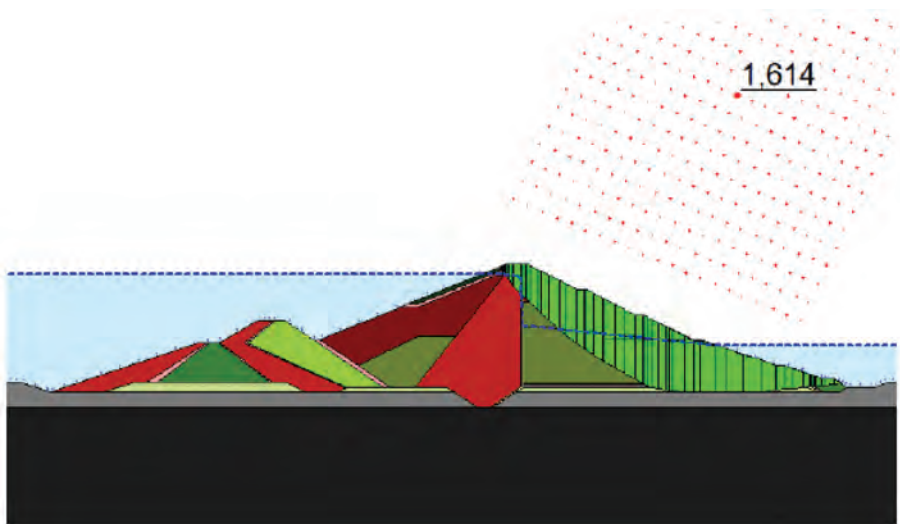


Fig. 7 – Método de Spencer – Operação Normal – Jusante.

3.2 – Análises probabilísticas

As análises probabilísticas foram desenvolvidas com base nos métodos de Bishop simplificado e Spencer. Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os resultados obtidos pelos métodos de Bishop e Spencer na condição de Operação Normal. No Quadro 8 apresenta-se um resumo dos principais resultados obtidos nas análises probabilísticas.

Destaca-se o fato de as probabilidades de ruptura apresentarem valor nulo em todas as situações. Este valor é considerado como zero com a precisão de oito casas decimais no *Slope/W*, que abrange a menor probabilidade de ruptura, com valor de $3,0 \times 10^{-7}$.

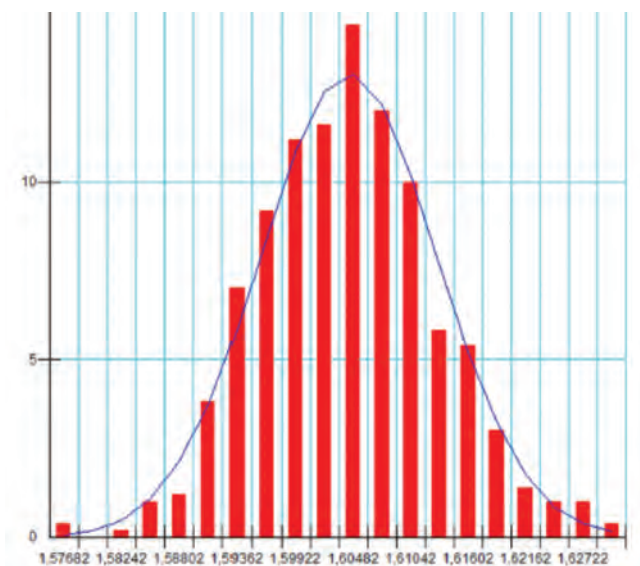


Fig. 8 – Distribuição de frequência pelo Método de Bishop – Operação Normal – Jusante.

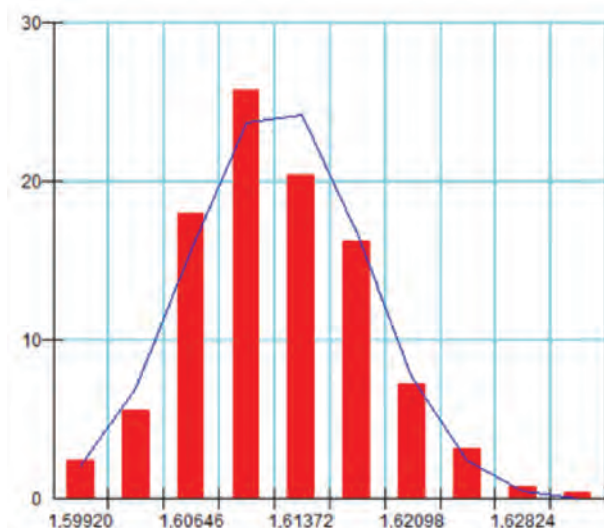


Fig. 9 – Distribuição de frequência pelo Método de Spencer – Operação Normal – Jusante.

Percebe-se que além do alto fator de segurança obtido, ou seja, ultrapassando com folga os valores mínimos estabelecidos pela Eletrobrás, as baixas variabilidades também contribuíram para o resultado.

Observa-se menores desvios nos casos em que a superfície de ruptura passa fora do espaldar; isso se deve ao fato de apenas o material do espaldar ter seus parâmetros geotécnicos variáveis.

Quadro 8 – Resultados obtidos pelos métodos probabilísticos.

Caso de carga	Bishop			Spencer		
	FS médio	Desvio padrão	Pr (%)	FS médio	Desvio padrão	Pr (%)
Final de construção - Montante	1,694	0,079	0	1,710	0,084	0
Final de construção - Jusante	1,624	0,113	0	1,623	0,122	0
Operação normal - Jusante	1,604	0,009	0	1,612	0,006	0
Operação normal com sismo $a_v = 0,03g$ e $a_h = 0,05g$ - Jusante	1,357	0,006	0	1,396	0,006	0
Operação normal com sismo $a_v = -0,03g$ e $a_h = 0,05g$ - Jusante	1,323	0,005	0	1,349	0,004	0
Rebaixamento rápido - Montante	1,394	0,081	0	1,407	0,097	0

De forma geral o fator de segurança médio teve resultado próximo ao fator de segurança determinístico de sua análise correspondente.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que a barragem de geometria e dados apresentados é segura, tanto do ponto de vista das análises determinísticas quanto probabilísticas. Todas as análises mostram condições que superam as recomendadas por norma. De fato, pode-se dizer que a configuração apresentada está superdimensionada e poderia ter seu custo reduzido modificando-se sua geometria. Não só os resultados determinísticos obtiveram fatores de segurança razoavelmente além do necessário como os probabilísticos apresentaram probabilidade de ruptura igual a zero.

Especificamente para o método probabilístico vê-se que as curvas de distribuição de frequência do fator de segurança ficaram bem distantes do fator de segurança 1; isso ocorre não só devido às altas médias obtidas mas principalmente aos baixos desvios. Isso se deve ao fato de que os materiais que não compõem o espaldar não tiveram seus parâmetros variados nas análises. O material do espaldar foi o mais investigado por sua baixa resistência.

De Souza e Vieira (2007), empregando um solo semelhante ao utilizado para o espaldar neste trabalho, obtiveram baixas probabilidades de ruptura, o que poderia indicar que se trata de um solo que gera baixa variação nos resultados da análise, podendo então o próprio solo ter contribuído para as baixas probabilidades de ruptura.

Para um melhor resultado é interessante que se obtenha a variação dos parâmetros de todos os materiais envolvidos na barragem, uma vez que isso aumentaria o desvio padrão do fator de segurança e poderia levar inclusive a uma mudança brusca na superfície de ruptura crítica caso um dos materiais apresentasse uma variação excessiva em seus parâmetros.

Observando-se os fatores de segurança dos métodos determinísticos nota-se que há uma grande proximidade dos valores para os métodos de Bishop simplificado e Spencer. Nota-se também que os fatores de segurança médios dos métodos probabilísticos assemelham-se entre si e também estão próximos aos valores encontrados nas análises determinísticas, indicando a proximidade da superfície crítica encontrada em ambos os casos.

Pereira (2013) apresenta em seu trabalho a proximidade entre os fatores de segurança dos métodos de Spencer e Bishop simplificado para barragens de terra em função de sua altura, indicando valores muito próximos entre os métodos para barragens com alturas superiores a 16m. De acordo com o autor, este fenômeno ocorre devido ao aumento do peso das fatias com a altura, que é a variável de maior relevância.

Outro fator possível para este resultado pode ser o grande número de fatias utilizadas, que reduz a influência das forças entre fatias.

Com relação à aplicabilidade do método probabilístico, na disponibilidade do *software* não há dificuldades adicionais quando comparado com a aplicação do método determinístico, exceto pelo tempo de processamento, que pode levar muitas horas dependendo da quantidade de superfícies e casos a serem analisados. O maior limitante, por ser mais trabalhoso e envolver questões econômicas de tempo e recursos, é a necessidade de um maior número de dados para a execução dos ensaios, o que normalmente inviabiliza o procedimento. Para o caso específico do dimensionamento de barragens há uma boa chance de que haja a disponibilidade suficiente desses ensaios, já que no projeto executivo procura-se um bom detalhamento dos materiais envolvidos na sua construção.

Por fim, conclui-se que a maior vantagem do método probabilístico sobre o determinístico é a maior quantidade de dados que aquele gera, além da possibilidade de expressar a análise em termos de uma probabilidade de falha da obra. Com isso é possível conhecer melhor o comportamento do talude em estudo e refinar o projeto final de forma a deixá-lo mais econômico, porém ainda seguro.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BSMTIT (2014). *Dados Técnicos da Barragem*. Comunicação pessoal, recebida em Curitiba.
- Costa, T.; Lança, R. (2001). *Barragens*. Universidade do Algarve. Núcleo de Hidráulica e Ambiente. Faro. 25p.
- Cruz, P.T.; Materón, B.; Freitas, M. (2009). *Barragens de enrocamento com face de concreto*. Oficina de Textos. São Paulo. 448p.
- De Souza, V.A.D.; Vieira, V.P.P.B. (2007). *Análise probabilística do talude de jusante de uma barragem de terra em regime de operação*. Comitê Brasileiro de Barragens. XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belém, Pará. 16p.
- Dell’Avanzi, E.; Sayão, A.S. (1998). *Avaliação da probabilidade de ruptura de taludes*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Brasília, pp. 1289-1295.
- Duncan, J.M.; Wright, S.G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey: John Wiley & Sons. 312p.
- Eletrobrás (2003). *Crítérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB). 278p.
- FAO (2011). *Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para a localização, projeto e construção*. United Nations Food and Agriculture Organization, Roma. 120p.
- Flores, E.A.F. (2008). *Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo*. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 177p.
- Geo-Slope (2012). *Slope/W for slope analysis – User’s guide*. GeoSlope International Ltd., Canadá.
- Leps, T.M. (1970). *Review of Shearing Strength of Rockfill*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. V. 96, July, pp. 1159-1170.
- Pereira, T.S. (2013). *Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria, RS. 77p.
- USACE (1997). *Engineering and Design Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering*. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers. ETL 1110-2-547. Washington, DC.