



ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM DE ORÓS – CE: UM COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS RIGOROSOS E NÃO RIGOROSOS

Alisson do Nascimento Lima ¹
Ingridy Minervina Silva ²

RESUMO

As barragens de terra são uma das mais antigas formas de barramento de cursos d'água, por se tratar de um maciço com taludes construídos, que passam por distintas condições saturação e fluxo, é necessária a seguridade da estabilidade destes taludes. Assim foi proposto avaliar a estabilidade dos taludes da Barragem de Orós – CE, utilizando de métodos de análise de estabilidade rigorosos e não rigorosos para obtenção da resultante Fator de Segurança (FS), da barragem em estudo nas condições consideradas críticas (talude jusante do reservatório cheio e o talude montante para um rebaixamento rápido do nível de água). E ainda apresentar um comparativo entre os métodos de análise de estabilidade através dos Fatores de Segurança obtidos nas modelagens. Como resultados, foi observado que nas condições críticas avaliadas validou-se a estabilidade do maciço, satisfazendo critérios normativos com relação a segurança de barragens. E com relação ao tipo de método de análise de estabilidade foi possível concluir, que apesar de ter distintas metodologias em termos de considerações e simplificações de cálculo alguns destes apresentam resultados estatisticamente iguais de Fator de Segurança.

Palavras-chave: Barragens de terra, Estabilidade de taludes, Fator de Segurança.

INTRODUÇÃO

Barragens de Terra podem ser definidas como um elemento estrutural, construída como um obstáculo ao fluxo de um curso d'água, transversalmente à direção de escoamento. É destinada à diversos usos como a criação de um reservatório artificial de acumulação de água para o aproveitamento hidrelétrico; a regularização das vazões desse curso d'água; a navegação; o abastecimento doméstico e industrial; irrigação; etc. (MARANGON, 2018).

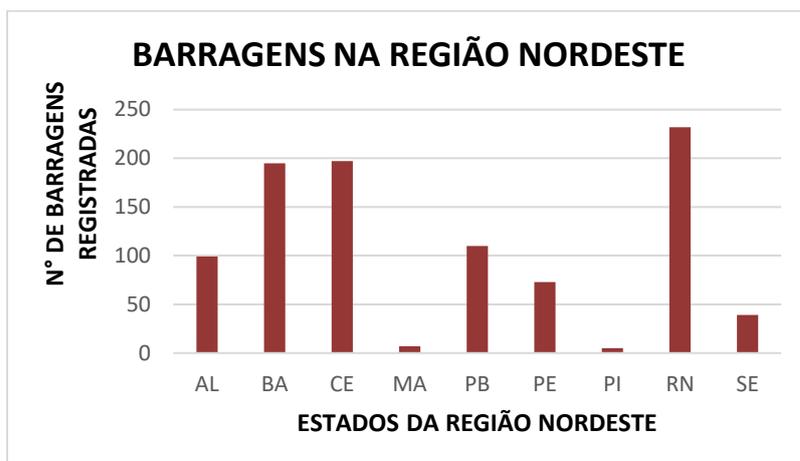
A Figura 1 apresenta a distribuição de barragens na região Nordeste por meio de uma seleção de dados obtidos na Agência Nacional das Águas (ANA) pelo Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

¹ Mestrando do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, alissonnascimento@ufla.br

² Mestranda do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, minervinaingridy@ufla.br



Figura 1 Barragens registradas pela ANA na região Nordeste do Brasil



Fonte: Adaptado da ANA (2018)

Os números elevados de obras deste tipo em junção com o seu grande potencial de risco colocam sobre as barragens uma importância à cerca de sua real estabilidade.

As barragens de terra são uma das mais antigas formas de barramento de cursos d'água e normalmente se adaptam a qualquer tipo de fundação, desde a rocha compacta, até solos com baixa capacidade de carga. Sendo assim, para a elaboração de um projeto de barragem de terra, diversos fatores devem ser considerados, como os parâmetros do material que compõe seu corpo e sua fundação; além de fatores externos que influenciam no regime da bacia onde a barragem está instalada (MARANGON, 2018).

Rojas e Fonini (2006) dissertam que entre as barragens de terra em funcionamento atualmente grande parte foi usualmente projetada sem acesso a dados laboratoriais ou de simulação computacional o que torna necessário a realização de novos testes para averiguar sua real situação. No caso das barragens de terra, com taludes construídos estuda-se a estabilidade da obra em suas condições mais críticas.

A avaliação, de forma numérica, dessa estabilidade dá-se por meio do fator de segurança (FS) que consiste na razão entre a resistência ao cisalhamento do solo e a tensão cisalhante mobilizada, esta última obtida por meio de equações de equilíbrio (MASSAD, 2010). Assim, valores de FS maiores que 1 implicam em estabilidade do maciço, ou seja, os esforços solicitantes são menores do que os esforços resistentes. Além disso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na NBR 13029:2017 e as Diretrizes Para Elaboração de Projetos de Barragens (ANA, 2016) define que o FS seja maior que 1,5 como critério de manutenção da estabilidade de taludes construídos na condição de regime permanente de fluxo (reservatório cheio).



Os métodos para análise da estabilidade de taludes, mais usuais na atualidade, se baseiam na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tomada como corpo rígido-plástico, na iminência de entrar em um processo de escorregamento, sendo este tipo análise denominado como método de equilíbrio-limite (MASSAD, 2010; ANA, 2016). Assim a acurácia e a disponibilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, irão inferir diretamente nessa análise de estabilidade. (MARANGON, 2009).

Dentre as formas de se mensurar as tensões cisalhantes mobilizadas pelo solo na iminência de ruptura, utilizando a teoria do equilíbrio limite, apresentam-se métodos considerados não rigorosos e métodos rigorosos. Sendo classificados como não rigorosos, métodos simplificados passíveis a cálculos manuais através do método das fatias introduzido por Fellenius (1936), com evoluções apresentadas por Janbu (1954) e Bishop (1955) e os rigorosos que utilizam de procedimentos iterativos com formulações matematicamente mais rigorosas, como as desenvolvidas Morgenstern e Price (1965) e Spencer (1967) e fazendo simplificações mais criteriosas (DE CAMPOS, 1985; GEO-SLOPE, 2020). O uso de simplificações associadas ao método de cálculo referente aos autores, irão diferir se são rigorosos ou não de acordo com o nível das hipóteses simplificadoras adotadas ao mensurar o esforço cisalhante mobilizado, visto que o número de equações de equilíbrio disponíveis é menor do que o número de incógnitas na análise de estabilidade de taludes, empregam-se suposições para tornar o problema determinado (DUNCAN, 1996).

Com a empregabilidade de softwares de análise de estabilidade de taludes, utilizando as formulações de equilíbrio limite com base no método das fatias, torna-se possível avaliar a complexidade dos problemas como a variação de poro-pressão, de carregamento e técnicas de estabilização, além de trazer a visualização gráfica de superfícies de ruptura, sendo possível explorar a variedade de parâmetros ao longo destas (GEO-SLOPE, 2020). Esse tipo de análise computacional se mostra aplicável a diversas obras geotécnicas, como as barragens de terra, na avaliação da estabilidade e validação da estabilidade da estrutura nas condições críticas possíveis.

O presente estudo buscou analisar a estabilidade dos taludes através do Fator de Segurança (FS) de uma barragem nas condições consideradas críticas. E ainda apresentar um comparativo entre os métodos de análise de estabilidade rigorosos e não rigorosos através dos fatores de segurança obtidos nas modelagens. Para isso utilizou-se como objeto de estudo a Barragem de terra zoneada de Orós, localizada cidade de mesmo nome no estado do Ceará.

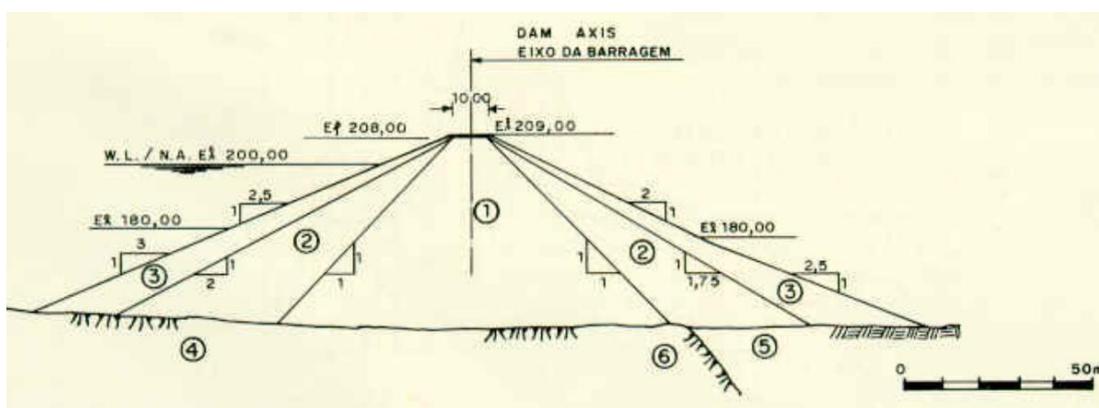


METODOLOGIA

Barragem

A Barragem Presidente Juscelino Kubistschek de Oliveira, conhecida como Barragem de Orós, está inserida em uma importante bacia do estado do Ceará, a do rio Jaguaribe. Com uma capacidade de acumulação de 2.100.000.000 m³, volume captado através da bacia hidrográfica do Jaguaribe em uma área de 25.000 km², e uma bacia hidráulica de 35.000 ha. A Figura 2 representa a seção transversal da barragem construída em terra zoneada (DNOCS, 2020).

Figura 2. Seção transversal da barragem Orós



Fonte: DNOCS (2020)

Levantamento dos dados geotécnicos

A barragem Orós consiste de um maciço zoneado com composição dividida em 6 zonas, representada na Figura 1. Percebe-se a presença de um núcleo impermeável composto por uma mistura de argila, silte e areia, que constitui a zona 1. Seguindo-se para montante e para jusante, o material da zona 2 é uma mistura de areia com alguns pedregulhos, obtido de escavação no leito do rio e de outras jazidas dos seus afluentes. Por fim, o material da zona 3 é um enrocamento com o uso de pedregulhos (DNOCS, 2020).

A fundação (zonas 4, 5 e 6) foi adotada como impermeável, por se tratar em sua maior parte rocha com tratamento em injeções de cimento, aspecto que não representa influência direta na estabilidade do maciço isoladamente.

Segundo as características e dados apresentados em DNOCS (2020), são obtidos apenas alguns parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos tornando inconsistente a análise da estabilidade. Assim faz-se uso da estimativa dos parâmetros de resistência utilizando a classificação do material referente a cada zona.



Com isso, utilizou-se a classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) para os materiais que compõem o maciço (SANTOS JUNIOR, 2019) e a estimação dos parâmetros de resistência segundo Vieira *et al.* (1996), sendo estes parâmetros estimados estando identificados na Tabela 1 com um asterisco (*).

Tabela 1. Parâmetros aplicados a análise

Zona	Tipo de solo	SUCS	γ (KN/m ³)	Φ (°)	C (KPa)	K (10 ⁻⁶ m/s)
1	Argila/Silte/Areia	CL	17,603	30,964	86,299*	0,0008*
2	Areia/Pedregulho	SW	18,600*	33,024	0	0,15*
3	Enrocamento	GW	18,600*	33,024	0	270*

Fonte: Adaptado de DNOCS (2020), Santos Junior (2019) e Vieira *et al.* (1996).

Modelagem

O Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (ANA, 2016) cita como as principais condições que se devem ser analisadas, para garantia de estabilidade ao escorregamento dos taludes da barragem, como sendo aquelas associadas as condições de carregamento em final de construção, rebaixamento rápido do nível do reservatório, situação de percolação estável e ocorrência de um sismo.

Por se tratar de uma obra já concluída e operante, e estar em uma região que não apresenta registros de sismos consideráveis, para o presente estudo, apenas as análises das condições e talude mais susceptíveis a ruptura que são: o talude jusante na percolação estável - reservatório cheio (Condição I) e o talude montante no caso de rebaixamento rápido do nível do reservatório (Condição II) (GAIOTO, 2003; MEIRELLES 2013).

A modelagem da barragem e seus resultados foram dados através no software GeoStudio *versão estudante 2012*, utilizando as ferramentas Seep/W, para obtenção da linha piezométrica de fluxo na barragem, e Slope/W para análise de estabilidade. Na análise da estabilidade dos taludes nas condições de interesse (Condição I e II) variou-se a metodologia de análise entre métodos rigorosos e não rigorosos.

Abordagem estatística

Para estimar o comportamento aproximado das distribuições de FS estudadas, por meio dos dados obtidos, foi realizado o cálculo da estatística descritiva, da Análise de Variância (ANOVA) para todos os métodos analisados e o teste-t quando avaliou-se apenas duas metodologias.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a inserção no Slope/W da geometria da barragem, das condições, dos parâmetros de resistência correspondentes aos materiais que compõem a barragem, bem como o delineamento da linha piezométrica obtida com utilização do Seep/W, foram obtidos os fatores de segurança (FS) e as superfícies de ruptura para os taludes avaliados.

Os resultados variaram de acordo com a metodologia de análise de estabilidade selecionada (rigorosos e não rigorosos) para as condições críticas de estudo (Condição I e II). Com isso, foram obtidos para cada metodologia o Fator de Segurança crítico, apresentados na Tabela 2, que indicam a superfície de ruptura com menor fator de segurança.

Tabela 2. FS crítico segundo distintas condições e metodologias

Metodologia	Condição I	Condição II
Morgenstern-Price	2,062	2,281
Spencer	2,058	2,278
Bishop	2,064	2,284
Janbu	1,757	1,895
Fellenius	1,775	1,994

Como pode ser visto na Tabela 2, para todas as metodologias e condições aplicadas não foram obtidos FS's críticos que indiquem possibilidade de ruptura do maciço, visto que os valores obtidos são superiores ao de eminência de ruptura, FS crítico igual a 1.

Utilizando o valor mínimo estabelecido nas Diretrizes Para Elaboração de Projetos de Barragens (ANA, 2016) como critério de manutenção da estabilidade de taludes em regime permanente de fluxo (Condição I), FS crítico maior que 1,5, percebe-se que ainda assim os valores obtidos são superiores em todas as simulações. Resultado este que também observado para os métodos não rigorosos, que embora adotem maiores simplificações e serem conservadores apresentando valores de FS menores quando comparados aos rigorosos, ainda apresentaram valores superiores ao mínimo adotado, em especial os métodos de Janbu e Fellenius.

Ainda os FS's críticos se mostram superiores dos referentes ao projeto, calculados através do método sueco (método das lamelas), onde para o reservatório cheio após o estabelecimento do escoamento normal através da barragem, talude de jusante FS igual 1,41; e o esvaziamento súbito entre o nível FS igual a 1,96. (DNOCS, 2020). Tal feito se deve provavelmente às



simplificações aplicadas, bem como o número de interações restritas, associados ao cálculo em termos de projetos, aspecto aqui superado através do uso do software.

Para cada metodologia, além do FS crítico, também foram obtidos fatores de segurança referentes às diversas superfícies de ruptura modeladas pelo Slope/W de acordo com as condições inseridas. Com isso, para o entendimento da influência da metodologia de análise de estabilidade nos Fatores de Segurança foram inicialmente calculados alguns parâmetros da estatística descritiva.

A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva dos dados obtidos. Dentre os aspectos observados na tabela, pode-se ressaltar a média dos FS obtidos em cada modelagem, a contagem do número de superfícies de ruptura, o Desvio Padrão que indica dispersão dos dados com relação à média obtida e o Erro padrão que indica a confiabilidade dos dados sendo uma ferramenta útil para se construir o intervalo de confiança para a amostra (DATA SCIENCE, 2020).

Tabela 3. Estatística descritiva para diferentes metodologias

Metodologia	Condição avaliada	Média	Erro padrão	Desvio padrão	Intervalo	Mínimo	Máximo	Contagem
Morgenstern-Price	I	3,086	0,011	0,624	4,468	2,062	6,53	2993
	II	3,786	0,022	1,366	12,388	2,281	14,669	3793
Spencer	I	3,109	0,013	0,666	4,470	2,058	6,528	2509
	II	3,853	0,023	1,392	12,392	2,278	14,67	3544
Bishop	I	3,093	0,011	0,622	4,470	2,064	6,534	3024
	II	3,819	0,022	1,353	12,383	2,284	14,667	3801
Janbu	I	2,682	0,010	0,546	4,067	1,757	5,824	3024
	II	3,284	0,020	1,239	10,570	1,895	12,465	3801
Fellenius	I	2,755	0,010	0,577	4,018	1,775	5,793	3024
	II	3,388	0,020	1,222	10,439	1,994	12,433	3801

As Figura 3 e 4 apresentam os histogramas obtidos para a distribuição dos Fatores de Segurança obtidos em cada metodologia de estudo. Com isso, pode-se observar como os dados se distribuem na curva de sino, ou seja, como se apresentam em uma distribuição normal de dados em torno da média.



Figura 3. Histograma de distribuição dos FS para a Condição I

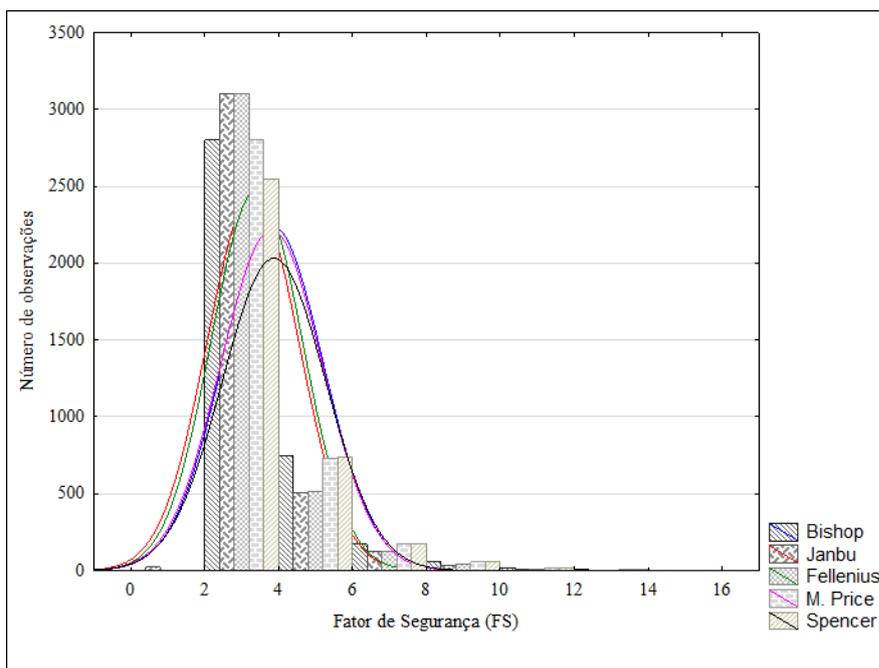
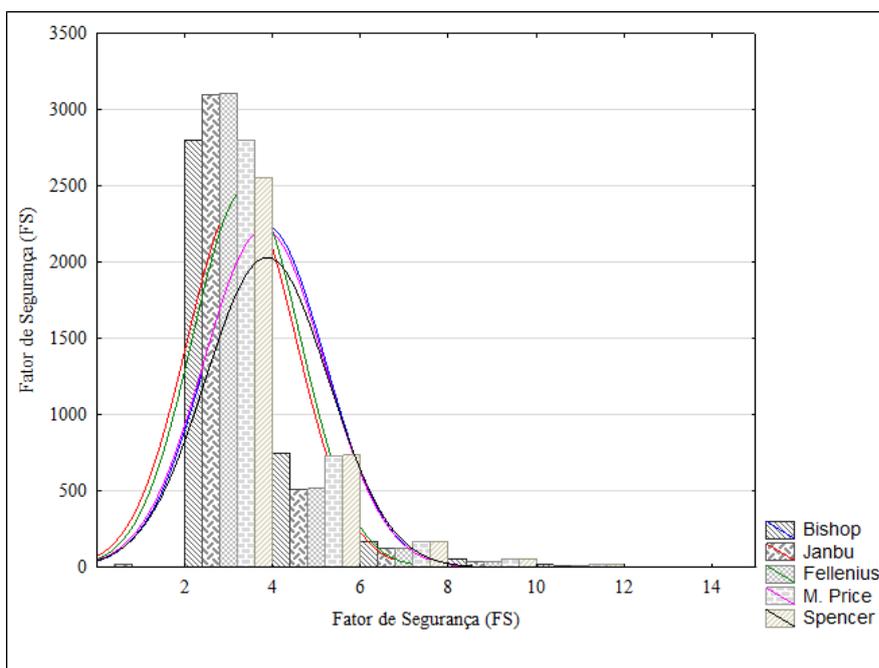


Figura 4. Histograma de distribuição dos FS para a Condição II



Com a distribuição dos dados apresentadas, é possível visualizar a presença de uma similaridade entre as curvas de sino (média e formato) para as metodologias de Morgenstern-



Price, Bishop e Spencer. Além disso, percebe-se a aproximação também para as metodologias de Fellenius e Janbu.

Esse comportamento pode ser observado com a aplicação do teste de Análise de Variância (ANOVA), Tabela 4, para o nível de confiança de 95%, para avaliar a existência de diferenças estatisticamente significantes entre as amostras.

Tabela 4. ANOVA para comparação entre metodologias de análise de estabilidade de taludes

Metodologia	Condição avaliada	F	P-valor	F crítico
Rigorosos e Não Rigorosos	I	347,345	0,0	2,373
	II	156,596	0,0	2,372
Não Rigorosos	I	429,519	0,0	2,997
	II	189,183	0,0	2,997
Rigorosos e Bishop	I	0,919	0,399	2,997
	II	2,172	0,114	2,997

Ao fazer o comparativo entre métodos rigorosos e não rigorosos têm-se um P-valor igual a zero, e F maior que Fcrítico. Com isso, rejeita-se a hipótese nula de que não existe diferenças estatisticamente significantes entre as amostras. Este comportamento pode ser explicado pela diferença nas considerações e simplificações adotadas para cada método.

O mesmo ocorre ao avaliar os não rigorosos (Fellenius, Janbu e Bishop), apresentando P-valor igual a zero, indicando que as metodologias também resultam em distintos FS's. Pode-se observar que as diferentes simplificações adotadas influenciam na superfície de ruptura obtida e, conseqüentemente nos FS's resultantes.

Nos histogramas apresentados nas Figuras 3 e 4 percebeu-se as similaridades na curva de sino para os métodos rigorosos e para dois dos métodos não rigorosos (Janbu e Fellenius), entre si. A aplicação de testes-t comprovou essa hipótese de igualdade estatística entre as distribuições. Dada a significância de 5%, foram obtidos p-valor de 0,187, 0,039, 0,00 e 0,00, respectivamente aos testes entre os métodos rigorosos (Morgenstern-Price e Spencer) para as condições I e II e entre de Janbu e Fellenius, também para as duas condições de análise. Este resultado comprova a semelhança entre as distribuições, exceto para os métodos rigorosos na condição I.

Assim para validar a igualdade estatística do FS entre determinadas metodologias de cálculo deve-se avaliar a condição aplicada e o talude estudado, onde o teste-t mostrou que mesmo para os métodos rigorosos, ao se variar a condição de análise pode-se obter resultados distintos para determinado nível de significância.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao avaliar a estabilidade da barragem de Orós nas condições críticas em estudo validou-se a estabilidade do maciço, satisfazendo critérios normativos com relação a segurança de barragens. Com relação ao tipo de método de análise de estabilidade foi possível concluir, que apesar de ter distintas metodologias em termos de considerações e simplificações de cálculo alguns destes apresentam resultados estatisticamente iguais, para a resultante Fator de Segurança. Tal aspecto foi observado através de análise da Análise de Variância (ANOVA) e identificado entre os métodos Rigorosos (Mongestern-Price e Spencer) e o método de Bishop. Assim é possível atentar-se que ao analisar a estabilidade de maciços de barragens de terra deve-se aplicar metodologias de estimação de fatores de segurança ao qual se tenha conhecimento das considerações de cálculo associadas, bem como a acurácia dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do material empregado no maciço, para o ententimento do Fator de Segurança resultante.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13029**: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens Volume V - Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens**. Brasília: ANA, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Segurança de Barragens 2017**. Brasília, 2018.

DATA SCIENCE. **Desvio padrão e erro padrão**. Disponível em: <<https://operdata.com.br/blog/desvio-padrao-e-erro-padrao/>>. Acesso em: 16de out. de 2020

DE CAMPOS, T. M. P. **Análise de Estabilidade: Métodos, Parâmetros e Pressão Neutra**. In: Anais da Mesa Redonda sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas, ABMS, Rio de Janeiro. 1985.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRAS A SECA - DNOCS. **Barragem Orós**. [online] Disponível em:



[https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem do Ceara/oros.htm](https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/oros.htm). Acesso em: 02 de out. de 2020.

DUNCAN, J. M. **State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes.** Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996. 577-596.

GAIOTO, Nélcio. **Introdução ao Projeto de Barragens de Terra e Enrocamento.** EESC – USP. São Carlos, 2003.

GEO-SLOPE International. **Stability Modeling with GeoStudio.** Calgary, Alberta, Canada, 2020.

MARANGON, M. **Notas de Aula: Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra, Capítulo 04 – Estabilidade de taludes.** Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

MARANGON, M. **Apostila de mecânica dos solos II: capítulo 5 - Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra.** Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

MASSAD, Faílton. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia.** 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MEIRELLES, Fernando Setembrino Cruz. **Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais: Barragens de Terra e Enrocamento. Curso Segurança de Barragens.** ANA, 2013.

ROJAS, J. W. J; FONINI, A. **Análise de percolação em Barragens de Terra utilizando o programa SEEP/W.** In: II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos (GeoJovem), Nova Friburgo, 2006.

SANTOS JUNIOR, A. E. **Análise probabilística da estabilidade de taludes em barragens de terra no estado do Ceará.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Ceará, Campus Cratéus, Curso de Engenharia Civil, Cratéus, 2019.

VIEIRA, V. de P. P. Barbosa; GOUVEIA NETO, A.; MIRANDA, A. N. e MALVEIRA, V. T. **Roteiro para projetos de pequenos açudes.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia, 1996.