



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DA SEGURANÇA: BARRAGEM DE BOA VISTA-PB

AUGUSTO MARINHO DE SOUSA

Orientadora: Prof. Dr^a. Carina Silvani

Campina Grande-PB
DEZEMBRO DE 2018

ANÁLISE DA SEGURANÇA: BARREGEM DE BOA VISTA-PB

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB

DEZEMBRO DE 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

AUGUSTO MARINHO DE SOUSA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Área de habilitação: Geotécnica.

Sub-área: Barragens de terra.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Carina Silvani

CAMPINA GRANDE – PB

DEZEMBRO DE 2018

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me proporcionar a força necessária para nunca desistir, dessa etapa que apesar de ser tão desgastante, foi um dos momentos mais marcantes da minha vida.

Aos meus pais e meu irmão, por todo apoio, confiança, conselhos e investimento que me foram dados, sempre acreditando na minha capacidade.

À Prof^a. Dra Carina Silvani, que me aceitou como orientando, sempre disposta a tirar dúvidas, com muita eficácia nos conselhos e sempre conduzindo as pesquisas para melhores direções.

Aos meus colegas de curso, que sempre foram bons companheiros e suportes para a minha caminhada acadêmica.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que é o meu tudo, me guia e orienta pelo melhor caminho, ao meu pai Francisco, minha mãe Nalba, meu irmão Artéfio, que são meu ponto de apoio, e aos meus amigos.

Com amor e respeito.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”

Filipenses 4:13

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração dos eixos norte e leste e respectivas adutoras associadas.....	11
Figura 2: Vista do corpo da barragem de Boa Vista	12
Figura 3: Exemplo de enrocamento.....	20
Figura 4: Força atuantes em uma fatia pelo método de Fellenius.....	21
Figura 5: Forças atuantes na base da fatia pelo método Spencer.....	24
Figura 6: Determinação gráfica do fator de segurança pelo método de Spencer.....	25
Figura 7: Forças atuando em uma fatia pelo método de Morgenstern-Price.....	26
Figura 8: Seção transversal da Barragem de Boa Vista.....	31
Figura 9: Os dados que se apresentam decorrem das indicações de Peck e outros.....	34
Figura 10: Seção Transversal com os respectivos materiais.....	35
Figura 11: Vista do talude de montante.....	43
Figura 12: Planta no talude de montante.	43
Figura 13: Análise no Seep/w - Fluxo ao longo da seção.....	44
Figura 14: Fator de segurança - Reservatório Cheio - MORGENSTERN-PRICE.....	45
Figura 15: Superfícies de ruptura e mapa de fatores de segurança para análise com $\phi = 41,8$; $\gamma_{AREIA} = 18$; $\gamma_{ARGILA} = 17$; $C = 163,38$	46
Figura 16: Probabilidade anual de ruptura x perda de vidas.....	48
Figura 17: probabilidade de ruptura da Barragem.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de Segurança para Verificação da Estabilidade.....	19
Tabela 2: Peso específico de solos arenosos.....	33
Tabela 3: índice de Plasticidade para Argilas.....	34
Tabela 4: Permeabilidade de acordo com o tipo de solo.....	34
Tabela 5: Dados da areia e argila	36
Tabela 6: Ângulo de atrito, coesão e Peso Específico - Variáveis aleatórias	37
Tabela 7: identificação da Barragem.....	38
Tabela 8: Índice de Periculosidade.....	39
Tabela 9: Índice de Vulnerabilidade.....	40
Tabela 10: Índice de Importância.....	41
Tabela 11: Potencial de Risco.....	41
Tabela 12: Frequência de reavaliação da segurança da Barragem.....	42
Tabela 13: Frequência de reavaliação da segurança da Barragem.....	45

RESUMO

A barragem de Boa Vista- PB situa-se no eixo norte da transposição do Rio São Francisco, em um distrito do município de São José de Piranhas. Por estar situada em uma região com baixo índices pluviométricos e devido a sua alta capacidade de armazenamento de água a barragem possui grande importância para região. Com 45 metros de altura, 220 metros de comprimento e extensão em torno de 888 metros sua capacidade de acumulação de água é em torno de 375 000 000 metros cúbicos. Porém devido a falta de manutenção do sistema algumas anomalias foram identificadas no corpo da barragem, como vegetação no talude de montante. Esse trabalho visou analisar a segurança da barragem. Tabelas com base na Lei Nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010 foram preenchidas através de inspeção visual do corpo da barragem e constataram que seu risco de ruptura é baixo. As linhas de fluxo do corpo da barragem foram analisadas através do programa SEEP/w e posteriormente os fatores de segurança da barragem foram analisados através do método determinístico e probabilístico. Através do método determinístico obteve-se um fator de segurança a qual constata que seus talude estão estáveis e por intermédio do método probabilístico obteve-se uma probabilidade de ruína de 1 a cada 10000 barragem, que segundo Baecher, 1982, está segura, entretanto, para Nielsen, 1994 a barragem é considerada não segura.

Palavras-chave: Barragem;segurança; Lei Nº 12.334,de 20 de Setembro de 2010 ; método determinístico; método probabilístico .

ABSTRACT

The Boa Vista-PB dam is located on the north axis of the São Francisco River, in a district of the municipality of São José de Piranhas. Because it is located in a region with low rainfall rates and due to its high water storage capacity, the dam has great importance for the region. With 45 meters of height, 220 meters of length and extension around 888 meters its capacity of accumulation of water is around 375 million cubic meters. However due to the lack of maintenance of the system some anomalies were identified in the body of the dam, like vegetation in the upstream slope. This work aimed at analyzing the safety of the dam. Tables based on Law No. 12,334 of September 20, 2010 were filled through visual inspection of the body of the dam and found that its risk of rupture is low. The flow lines of the dam body were analyzed through the SEEP / w program and later the dam safety factors were analyzed through the deterministic and probabilistic method. By means of the deterministic method, a safety factor was obtained, which confirms that its slope is stable and, by means of the probabilistic method, a probability of ruin of 1 per 10000 dam was obtained. According to Baecher, 1982, for Nielsen, 1994 the dam is considered unsafe.

Keywords: security; Law No. 12,334 of September 20; deterministic method ; probabilistic method .

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas enfrentado pela região nordeste do Brasil é a falta de água, causada pelos longos períodos de estiagem. Com a falta de água, torna-se difícil o desenvolvimento da agricultura e a pecuária. Dessa forma, a seca é causadora da falta de recursos para o desenvolvimento econômico de regiões e acarreta fome e miséria. “No Nordeste estão 28% da população brasileira e apenas 3% da disponibilidade de água do País. O Rio São Francisco detém 70% de toda a oferta de água da região, historicamente submetida a ciclos de seca rigorosa”.(MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO).

O Projeto de Integração do Rio São Francisco buscou sanar esse problema na região nordeste. Trata-se da maior obra de infraestrutura hídrica do País, dentro da Política Nacional de Recursos Hídricos. Composto por dois eixos, conforme se observa na Figura 1 (Leste e Norte), totalizando 477 quilômetros de extensão. Esta obra engloba a construção de 13 aquedutos, 9 estações de bombeamento, 27 reservatórios, 9 subestações de 230 quilowatts, 270 quilômetros de linhas de transmissão em alta tensão e 4 túneis. (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO)

O eixo Norte atende as cidades e regiões circunvizinhas de Cabrobó, Salgueiro, Terranova, Verdejante no Pernambuco, Penaforte, Jati, Brejo Santo, Mauriti e Barro no Ceará e São José de Piranhas, Monte Horebe e Cajazeiras na Paraíba. O Eixo Leste atende Floresta, Custódia, Betânia e Sertânia no Pernambuco e Monteiro na Paraíba. (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO).

Conforme Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), o Projeto São Francisco foi a mais consistente alternativa estrutural para o fornecimento adequado de água à região. Estudos e avaliações técnicas foram realizados (estudos de impacto ambiental, de inserção regional, de viabilidade técnica, econômica e hidrológica) conforme diretrizes do Plano Decenal da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, concluído pela Agência Nacional de Águas (ANA).” (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO).

Figura 1: Ilustração dos eixos norte e leste e respectivas adutoras associadas.



Fonte: Ministério da Integração.

Hoje, a maior parte da obra de transposição do Rio São Francisco está concluída, porém um dos grandes desafios enfrentados é a manutenção das obras da transposição, devido a seus elevados custos.

A obra a ser estudada é Barragem de Boa vista – Pb, como mostra figura 2, situada em São José de Piranhas, Paraíba, no distrito de Boa Vista. Localizada no eixo Norte, é a maior barragem da transposição.

Figura 2: Vista do corpo da barragem de Boa Vista



Fonte: O Autor (2018).

Com capacidade de acumulação de água em torno de 375 000 000 m³, a barragem tem grande importância para os moradores da região para o abastecimento de água, visto que antes de sua construção o município de São José de Piranhas passava por crises hídricas, devido a baixa precipitação, ao qual seu reservatório principal chegava a colapso. Com a construção da Barragem de Boa Vista, foi realizado uma adutora ligando a barragem ao açude principal da cidade, trazendo maior conforto hídrico a população.

1.1. Justificativa

Um assunto de grande discussão atualmente é cobrança pelos serviços de manutenção da transposição. A Barragem de Boa vista–Pb apresenta algumas falhas de manutenção que será abordada neste trabalho através de tabelas de segurança de Barragem baseado na Lei N°12.334, de 20 de setembro de 2010.

A segurança da barragem também será avaliada por métodos determinísticos, baseados no fator de segurança, e probabilísticos, que nos fornecem a probabilidade de ruína, de análise de estabilidade de taludes.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar a segurança da Barragem Boa Vista-PB

1.2.2. Objetivo Específico

- Vistorias e analisar a segurança da barragem Boa Vista-Pb, segundo a Lei Nº12.334, de 20 de setembro de 2010.
- Avaliar a estabilidade do talude de jusante da barragem Boa vista, na situação de barragem cheia, segundo seu projeto por métodos determinísticos.
- Investigar a estabilidade do talude de jusante da barragem Boa vista, na situação de barragem cheia, segundo seu projeto por métodos probabilístico.

1.3. Organização do Trabalho de Conclusão de Curso

O texto deste Trabalho de Conclusão de Curso encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma:

- Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos
- Fundamentação Teórica que trata de assuntos relacionados aos tipos de barragens, e aos métodos para estabilidade de talude.
- Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.
- Resultados e discussões – São apresentados os resultados de acordo com a metodologia citada.
- Conclusões – onde são apresentadas as conclusões obtidas com base nos estudos realizados.
- Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas no Projeto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao colocar um obstáculo em curso d'água para gerar acúmulo de água e elevação do nível de água a montante deste barramento, gera uma Barragem. Há diversas finalidades para construção de uma Barragem, como: abastecimento humano, irrigação, abastecimento industrial, controle de cheias, piscicultura, geração de eletricidade, recreação e navegação.

O conhecimento amplo e preciso das propriedades e dos diversos tipos de barragens é preciso para uma excelente escolha do material desse barramento de água, afim de gerar um orçamento menos oneroso e garantir a eficiência e eficácia na execução.

2.1. Tipos de Barragens

Entende-se por barragem de grande porte qualquer barragem com altura superior a 15 m, ou com alturas entre 10 e 15 m e que satisfaça uma das seguintes condições: (MASSAD, 2003).

- Comprimento de crista igual ou superior a 500 m;
- Reservatório com volume total superior a 1.000.000 m³;
- Vertedouro com capacidade superior a 2.000 m³/s;
- Barragem com condições difíceis de fundações;
- Barragem com projeto não convencional.

2.1.1. Barragem de Concreto Gravidade (concreto massa)

As barragens de gravidade são, basicamente, estruturas sólidas de concreto que asseguram a sua estabilidade contra as ações com base na forma geométrica adoptada em projeto e na massa do concreto. (FERNANDO, 2002).

2.1.2. Barragem de Concreto Estrutural com Contrafortes

Os gastos são mais onerosos na parte de armação e forma, e menor em concreto comparado ao exemplo anterior. São elaboradas com lajes ou abóbadas múltiplas inclinadas com a função de contraforte.

A estabilidade quanto ao deslizamento é favorecida pela inclinação da resultante do empuxo hidrostático, isto é, existe um efeito benéfico do peso da água, que se adiciona ao peso próprio da barragem, garantindo a estabilidade (MASSAD, 2003).

2.1.3. Barragem de Concreto em Arco de Dupla Curvatura

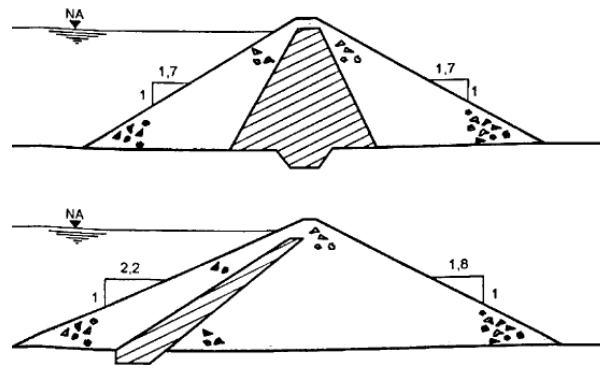
Segundo Massad (2003), neste tipo de barragem o concreto trabalha em compressão e é utilizada em locais com dificuldade para barramento d'água. Requer fundações mais resistentes e são optadas principais em locais de vales em que há curto espaço para o corpo da barragem.

2.1.4. Barragem de Terra-enrocamento

Neste tipo de Barragem são utilizados blocos de rochas de tamanho variável e uma membrana impermeável na face de montante, por isso o nome enrocamento.

A rocha que deve preencher a maior parte da barragem precisa ser inalterada pelo intemperismo, não sendo facilmente desintegrada ou quebrada. Rochas que, quando sujeitas à ação de explosivos, fragmentam-se facilmente em pedaços muito pequenos, com elevada porcentagem de lascas e pó, são igualmente inadequadas. As rochas para essas barragens, devendo ter resistência ao intemperismo físico e químico. Os blocos de rocha são colocados de modo a se obter o maior contato entre suas superfícies e os vazios entre elas, que são preenchidos por material de menor tamanho. (MARANGON, 2004). Conforme a figura 3, o enrocamento pode ser central ou inclinado a montante.

Figura 3: Exemplo de enrocamento.



Fonte: Massad, 2003.

2.1.5. Barragem de enrocamento com membrana de concreto

As barragens com membranas de concreto apresentam, como septo impermeável, placas de concreto sobre o talude de montante, de enrocamento. Essas placas são ligadas umas às outras por juntas especiais pois apoiam-se em meio deformável, o enrocamento, que pode sofrer recalques significativos por ocasião do primeiro enchimento. (MASSAD, 2003)

2.1.6. Barragem em Aterro Hidráulico

Na construção de barragens com a técnica de aterro hidráulico, o material granular misturado com água é transportado por meio de tubulações, por bombeamento ou por gravidade, sendo lançado no local com a utilização de hidrociclones ou canhões. (SETEMRINO, 2012)

2.1.7. Barragem de Terra

As barragens de terras têm sido usadas, desde os tempos mais remotos, para aprisionar e desviar água. São simplesmente estruturas compactadas que dependem

da sua massa para resistir ao deslizamento e tombamento e são o tipo de barragem mais comum encontrado em todo o mundo. (STEPHENS, 2011)

A barragem de terra é a mais comum no Brasil, também, por se ter vales muito largos e ombreiras suaves, necessitando de grandes extensões de crista, ao mesmo tempo em que se dispõe abundantemente de solo. Por não ser uma estrutura rígida estas barragens permitem ser assentes em fundações mais deformáveis, transmitindo esforços baixos para as fundações se comparadas com as barragens citadas anteriormente. Elas são indicadas para fundação de qualquer tipo de solo ou rocha (MENDONÇA, 2012).

A inclinação dos taludes de montante e de jusante é fixada de modo a garantir a estabilidade durante a vida útil da barragem, mais especificamente, em final de construção, em operação e em situações de rebaixamento rápido do reservatório. Um dos problemas que mais preocupam o projetista é o *piping* ou erosão regressiva tubular, no próprio corpo da barragem ou nas suas fundações. Esse fenômeno consiste no carregamento de partículas de solo pela água em fluxo, numa progressão de jusante para montante, daí o termo "regressivo" empregado para designá-lo; com o passar do tempo, forma-se um tubo de erosão, que pode evoluir para cavidades relativamente grandes no corpo das barragens, levando-as ao colapso. Para evitar sua ocorrência, é necessário um controle da percolação, tanto pelas fundações, quanto pelo corpo da barragem (aterro). No aterro, intercepta-se o fluxo de água, de modo a impedir sua saída nas faces dos taludes de jusante ou nas ombreiras de jusante, por meio de filtros verticais (tipo "chaminé") ou inclinados. Os filtros são constituídos de areia ou material granular, com granulometria adequada para evitar o carregamento de partículas de solo e o material seguir algum critério de filtro, como o, Filtro de Terzaghi. Esses filtros colaboram também na dissipação das pressões neutras construtivas e, inclusive, de rebaixamento rápido. (MASSAD, 2003)

2.1.7.1. Barragem de Terra Zoneada

As Barragens de Terra podem ser do tipo homogêneo, utilizando apenas um tipo de material, ou zoneada, composta por mais de um tipo de material. A Barragem de Boa Vista- Pb, em estudo, é do tipo zoneada.

Barragem zoneada é uma variação da barragem de terra homogênea constituída de diferentes tipos de solo ou o mesmo solo compactado em condições diferentes para otimização da seção ou em função da disponibilidade de materiais. (MIRANDA, 2013).

Esse tipo é representado por um núcleo central impermeável, envolvido por zonas de materiais consideravelmente mais permeáveis, zonas essas que suportam e protegem o núcleo. As zonas permeáveis consistem de areia, cascalho ou fragmentos de rocha, ou uma mistura desses materiais. (MARANGON, 2003)

Esta é uma melhor alternativa, particularmente para barragens maiores que facilmente permitem a utilização de maquinaria de construção. Com este tipo de barragem, possíveis perigos de infiltração são reduzidos ao mínimo. Comparadas com barragens de aterro homogêneo, os custos são susceptíveis de ser mais altos, principalmente porque o material de terraplanagem é dividido em três categorias: permeável para a face jusante, impermeável para o núcleo e semi-impermeável para a secção a montante, sendo todas elas escavadas de áreas de empréstimo diferentes (de preferência dentro da área do reservatório), logo aumentando os custos de escavação e transporte. Os taludes, no entanto, podem ser reduzidos para à volta de 1:2 a montante e 1:1,75 a jusante (ou 1:2,25 a montante e 1:2 a jusante para locais onde apenas estão disponíveis materiais de relativa má qualidade) e o material escavado na construção do núcleo pode ser utilizado no aterro, economizando assim em terraplanagens. (STEPHENS, 2011)

2.2. Análise da Estabilidade de Talude

O fator de segurança contra a ruptura do solo é o critério para a avaliação da estabilidade de uma barragem e é definido como a razão entre as forças estabilizadoras e as forças desestabilizadoras. A ruptura se dá, então, quando essas forças se igualam e o Fator de Segurança iguala a unidade. (SETEMBRINO, 2012). Situações que devem ser analisadas:

- Final da construção: durante a construção da barragem de terra, na medida em que as sucessivas camadas de aterro vão sendo lançadas e

compactadas, a pressão total em um determinado nível vai aumentando, gerando pressões intersticiais resultantes da compressibilidade do aterro e da sua baixa permeabilidade. (SETEMBRINO, 2012)

- Reservatório máximo em operação: durante o primeiro enchimento do reservatório, ocorre o estabelecimento de fluxos de percolação, que vão, progressivamente, estruturando uma rede de fluxo permanente. Após a percolação da água de montante para jusante, a pressão de percolação é favorável à estabilidade do talude de montante e desfavorável à do talude de jusante; (SETEMBRINO, 2012)
- Rebaixamento rápido (se for o caso): corresponde a uma situação crítica para o talude de montante da barragem. A análise do rebaixamento rápido considera a manutenção das condições de pressão intersticial (ou poropressão) na condição de reservatório em operação, diminuindo a carga estabilizadora sobre o talude de montante. (SETEMBRINO, 2012)

Os fatores de Segurança admissíveis para as três condições estão demonstrados na tabela 1. Neste trabalho somente será analisado a situação Reservatório máximo em operação, por trata-se da situação atual da obra.

Tabela 1: Fatores de Segurança para Verificação da Estabilidade.

Condições de solicitação	Talude	FS mínimo
Final de construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Regime permanente de operação	Montante	1,5
	Jusante	1,5
Rebaixamento do reservatório (Nível de água máximo - NA mínimo)	Montante	1,1

Fonte: CARVALHO E PASCHOALIN (2004)

2.2.1. Métodos de Análise da Estabilidade de taludes

2.2.1.1. Métodos de equilíbrio-limite

De acordo com Massad, 2006 os métodos para a análise da estabilidade de talude, atualmente em uso, baseiam-se na hipótese de que há um equilíbrio em uma massa de solo, tomada de como corpo rígido plástico, na iminência de entrar em um

processo de escorregamento. Portanto, a denominação geral de “Métodos de equilíbrio-limite”.

Na técnica de equilíbrio limite, a análise de estabilidade de talude tem como resultado o fator de segurança (FS). Este valor é determinado para a provável superfície de ruptura. Processos interativos podem ser utilizados envolvendo a seleção de uma massa potencial de cisalhamento. A subdivisão dessa massa em fatias é realizada em vários métodos de cálculo possíveis (e.g., Fellenius, Bishop, e Janbu), considerando-se o equilíbrio em cada fatia. (CHAGAS, 2006).

Segundo Massad, 2006, os métodos de equilíbrio-limite partem dos seguintes pressupostos:

- O solo se comporta como material rígido-plástico, isto é, rompe-se bruscamente, sem se deformar;
- As equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico.;
- O coeficiente de segurança é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Os diversos métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limitem possuem limitações, consideram diferentes hipóteses simplificadoras e condições de equilíbrio para obtenção dos referidos fatores de segurança. (CHAGAS, 2006)

2.2.2. Métodos Não Rigorosos

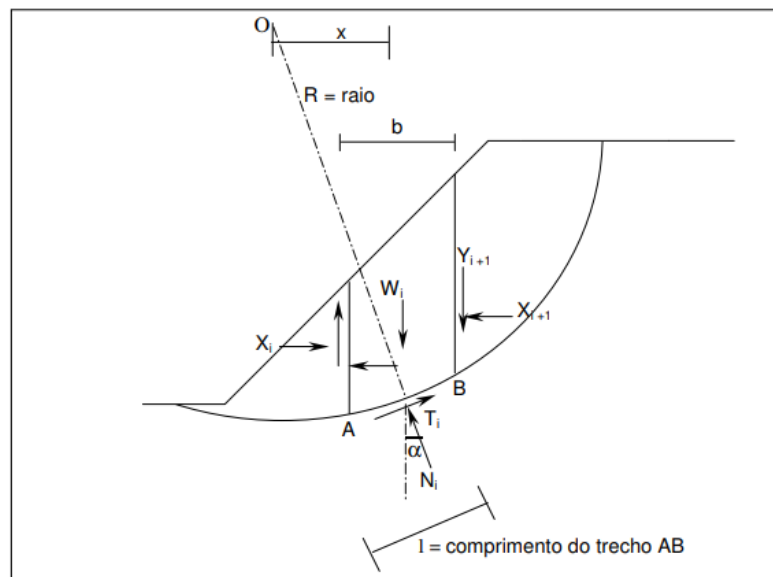
Importa salientar que através do número de equações da estática consideradas no cálculo, os métodos são classificados como rigorosos ou não rigorosos sendo esta classificação atribuída tendo em conta se satisfazem ou não as três equações da estática. (FERREIRA, 2012).

Métodos Rigorosos consideram todas as equações da estática para assim obter resultados mais satisfatórios. Já métodos não rigorosos simplificam os cálculos considerando menos equações que nos métodos rigorosos.

2.2.2.1. Método de Fellenius (1927)

Segundo Fabrício, 2006 esse método admite uma superfície de ruptura circular e o fator de segurança do talude é calculado unicamente através de equilíbrio de momentos, não levando em consideração as forças tangenciais e normais às paredes das fatias conforme figura 4. É um método muito simples, mas muito conservador e erros apreciáveis podem ocorrer, em particular, em casos de círculos profundos e poropressões.

Figura 4: Força atuantes em uma fatia pelo método de Fellenius.



Fonte: PUC (2006)

Desprezando as forças nas laterais das fatias, considerando que a componente sísmica é nula, aplicando o equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo de ruptura (ponto O) e o equilíbrio de forças na direção perpendicular à superfície de ruptura pode-se determinar o fator de segurança (FS) através da equação (1):

$$FS = \frac{\sum [c' * (b / \cos \alpha) + (W * \cos \alpha - u * (b / \cos \alpha)) * \tan \phi']}{\sum W * \sin \alpha} \quad (1)$$

Onde:

- u = poropressão média na base da fatia; c' = coesão efetiva do solo;
- ϕ' = ângulo de atrito efetivo do solo.

Esse procedimento é repetido para diversas posições da superfície de ruptura. O fator de segurança crítico corresponde ao de menor valor encontrado para FS.

2.2.2.2. Método de Bishop Simplificado

o método de Bishop Simplificado, da mesma forma que o de Fellenius, considera a superfície de ruptura com forma circular. Tem como hipótese que a resultante das forças entre as fatias é horizontal. Partindo da Equação 2, acrescenta-se a equação que impõem o equilíbrio das forças verticais. O fator de segurança é dado pela equação (3): (FABRÍCIO, 2006)

$$FS = \frac{1}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \sum [c' + (W - ub) \operatorname{tg} \phi'] / m_{\alpha} \quad (2)$$

Onde:

$$m_{\alpha} = \cos \alpha \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \phi'}{FS_i} \right] \quad (3)$$

A solução resulta de um processo iterativo, no qual é arbitrado o valor do fator de segurança FS_i da Equação 3 e calcula-se o fator FS. O processo repete-se até que o valor calculado (FS) se iguale ao valor arbitrado (FS_i).

O método de Bishop Simplificado fornece resultados mais próximos aos dos métodos mais rigorosos, quando comparado com o método de Fellenius. (FABRÍCIO, 2006)

2.2.2.3. Método Jambu Simplificado

Este método é uma versão reduzida de um método rigoroso generalizado de fatias, desenvolvido por Jambu (1955). O método original é baseado em equilíbrio de forças e de momentos. A versão simplificada, da mesma forma que o método de Bishop Simplificado, é baseado em equilíbrio de forças, desprezando as componentes verticais Y_i e Y_{i+1} tangenciais às laterais das fatias. Para satisfazer parcialmente o

equilíbrio de momentos, Jambu propôs um fator de correção empírico f_0 como tentativa de resolver o problema. Este fator é dependente do tipo de solo e da forma da superfície de deslizamento. (FABRÍCIO, 2006)

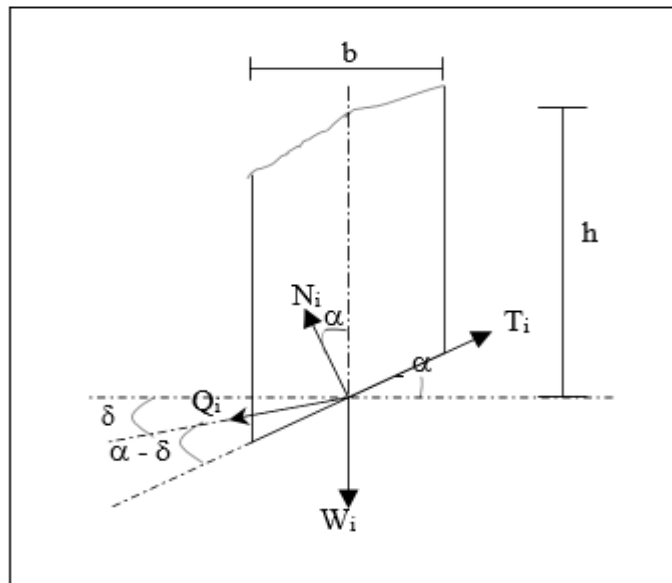
2.2.3. Métodos rigorosos

2.2.3.1. SPENCER

O método de Spencer foi desenvolvido inicialmente para superfícies de ruptura de formas circulares, e depois adaptado para superfícies de deslizamento com formas irregulares. Ele é um método rigoroso, pois atende a todas as equações de equilíbrio de forças e de momentos. (FABRÍCIO, 2006)

Spencer considerou que as forças X_i , Y_i e X_{i+1} , Y_{i+1} poderiam ser substituídas por uma resultante Q_i inclinada de um ângulo δ_i com a horizontal. Supondo a componente sísmica nula, e satisfazendo o equilíbrio de momentos, a força Q_i deve passar pelo ponto de intercessão das forças W_i , T_i , e N_i , ou seja, pelo ponto médio da base da fatia. A Figura 5 ilustra as hipóteses de Spencer.

Figura 5: Forças atuantes na base da fatia pelo método Spencer.



Fonte: PUC Rio (2006).

Impondo o equilíbrio de forças nas direções normal e paralela à base da fatia e considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, encontra-se a equação (4):

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot b \cdot \sec \alpha}{F} + \frac{\text{tg} \phi' \cdot (h \cdot \cos \alpha - u \cdot b \cdot \sec \alpha)}{F} - W \cdot \text{sen} \alpha}{\cos(\alpha - \delta) \cdot \left[1 + \frac{\text{tg} \phi' \cdot \text{tg}(\alpha - \delta)}{F} \right]} \quad (4)$$

Supondo que não existam forças externas atuando no talude, as componentes horizontal e vertical da força Q devem ser nulas. Portanto:

$$\sum Q \cdot \cos \delta = 0 \quad (5)$$

$$\sum Q \cdot \text{sen} \delta = 0 \quad (6)$$

Como a soma dos momentos das forças externas em relação ao centro de rotação é zero, a soma dos momentos das forças entre as fatias em relação ao centro também é nula. Assim:

$$\sum Q \cdot R \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (7)$$

Como a superfície é circular e R é constante, tem-se a equação (8):

$$R \sum Q \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (8)$$

Logo, conforme a equação (9):

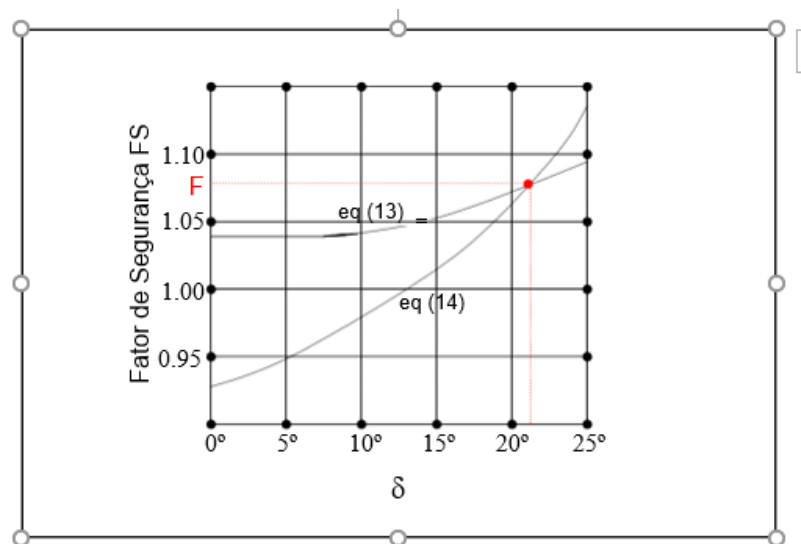
$$\sum Q \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (9)$$

Para tornar o sistema de equações determinável, foi considerada a hipótese de δ constante para todas as fatias. Desse modo, as Equações (5) e (6) se reduzem para:

$$\sum Q = 0 \quad (10)$$

Assim, aplicando-se as equações (9) e (10), nas quais Q é obtido através da equação (4), a solução do problema é alcançada de forma gráfica. Plotam-se em um gráfico os diversos fatores de segurança (FS) encontrados pelas Equações (8) e (9) ao variar-se o ângulo Φ . No ponto de interseção das duas funções encontra-se o valor de F que satisfaz às duas equações. Esse procedimento está ilustrado na figura 6.

Figura 6: Determinação gráfica do fator de segurança pelo método de Spencer.



Fonte: PUC Rio (2006).

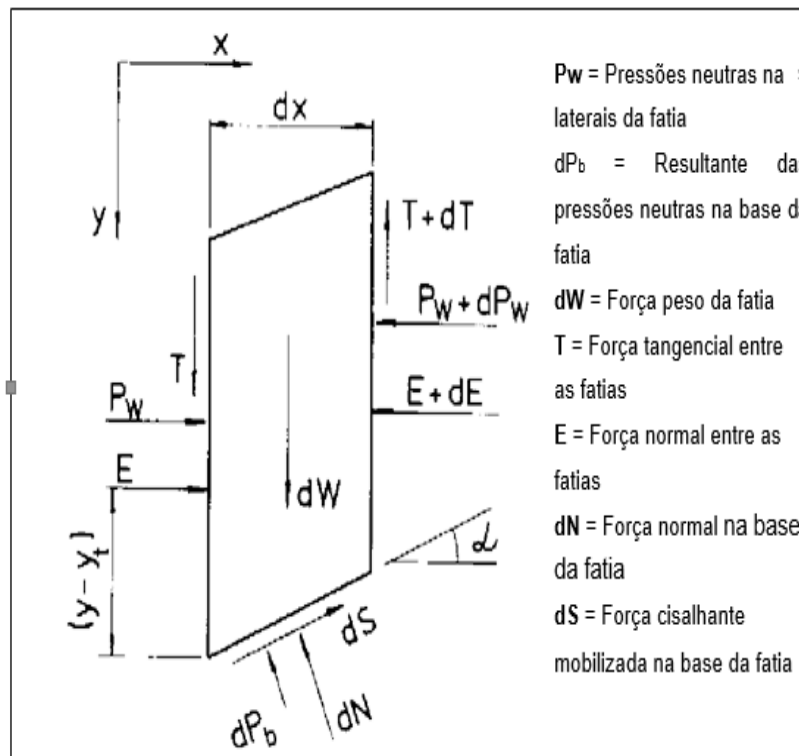
Nota-se no gráfico da figura 6 que o fator de segurança obtido por equilíbrio de momento é pouco sensível à variação de Φ . e que efeito contrário ocorre com o fator de segurança obtido por equilíbrio de forças. Assim, é de se esperar que métodos simplificados, cujos os fatores de segurança sejam obtidos por equilíbrio de forças,

apresentem maiores divergências dos resultados fornecidos por métodos rigorosos. (FABRÍCIO, 2006)

2.2.3.2. MORGENSTERN-PRICE

Consiste em um método rigoroso aplicado a superfícies de ruptura quaisquer. As condições de estabilidade satisfazem simultaneamente todas as condições de equilíbrio de forças e de momentos. A massa potencialmente instável é dividida em fatias infinitesimais e, para ser aplicado, o método necessita do auxílio de um computador para os cálculos. As forças atuantes nas fatias que são consideradas no desenvolvimento deste método estão mostradas na figura 7. (FABRÍCIO, 2006)

Figura 7: Forças atuando em uma fatia pelo método de Morgenstern-Price.



Fonte: PUC (2006).

Para resolver a indeterminação do problema, admite-se uma relação entre as forças E e T , de acordo com a equação (11):

$$T = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (11)$$

Onde:

- λ = constante a ser determinada por processo iterativo
- $f(x)$ = função que precisa ser especificada.

2.3. Probabilístico

Uma forma alternativa de se avaliar a segurança de uma obra geotécnica é a utilização de abordagens probabilísticas. Os métodos probabilísticos quantificam essas incertezas por meio de um índice de confiabilidade (β), que expressa o quanto o fator de segurança é confiável. Correlacionas a esse índice, encontra-se, também, a probabilidade de fracasso da obra, considerada um importante instrumento para elaboração de projetos (FABRÍCIO, 2006) .

Um enfoque probabilístico para estudar a estabilidade de obras geotécnicas, permite quantificar as incertezas oriundas da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, com a determinação de um índice de confiabilidade e de uma probabilidade de ruína (AURÉLIO, 2014).

A luz desse fato, a análise probabilística aplica-se objetivando mensurar a probabilidade de ruptura de um talude. Para viabilizar a análise foram aplicados métodos probabilísticos à análise de estabilidade de taludes, sendo os mais utilizados em geotécnica: método do segundo momento de primeira ordem, método das estimativas pontuais, e simulação de Monte Carlo (FABRÍCIO, 2006).

Existem três métodos probabilístico utilizados em geotecnia: simulação de Monte Carlo, estimativas pontuais e segundo Momento de Primeira Ordem.

2.3.1. Método das Estimativas Pontuais

O método das estimativas pontuais baseia-se na estimativa da média e variância através de uma função geradora. Essa última consiste em uma análise determinística da permutação das médias dos argumentos do fator de segurança acrescidos e subtraídos do respectivo desvio padrão. Com a média e variância é possível determinar o índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura. Observa-se que esse método, assim como o método do segundo momento de primeira ordem consistem em metodologias aproximadas (FABRÍCIO, 2006).

Através da equação (12) têm-se o Fator de Segurança:

$$FS = f(A_i \pm S_i ; \dots ; A_n \pm S_n) \quad (12)$$

Onde:

- A_i = argumentos do fator de segurança;
- S_i = desvio padrão do argumento

E os momentos probabilístico dos fatores de segurança, média e desvio padrão é representado pela equação (13) e equação (14):

$$E(FS) = \frac{\sum_{i=1}^N FS_i}{N} \quad (13)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N FS_i^2}{N} - |E(FS)|^2} \quad (14)$$

Sendo:

- $E(FS)$ é a média da amostra;
- S é o desvio padrão da amostra.

2.3.2. Índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura

Segundo FABRÍCIO, 2006 o fator de segurança procede como uma variável aleatória que segue a distribuição normal, e define o índice β conforme equação (15):

$$\beta = \frac{E(FS)-1}{SFS} \quad (15)$$

E probabilidade de ruptura dada pela equação (16):

$$Pr = \int_{-\infty}^1 \frac{1}{S_{FS}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(FS-FS)^2}{2S_{FS}^2}} dFS = 1 - \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

$$Pr = 1 - \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

$$Pr = \int_{-\infty}^1 \frac{1}{S_{FS}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(FS-\overline{FS})^2}{2S_{FS}^2}} dFS = 1 - \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

$$Pr = 1 - \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (16)$$

Onde:

- S_{FS} = desvio padrão dos fatores de segurança
- Pr = probabilidade de ruptura;
- FS = fator de segurança;
- \overline{FS} = média dos fatores de segurança.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Caracterização da Área

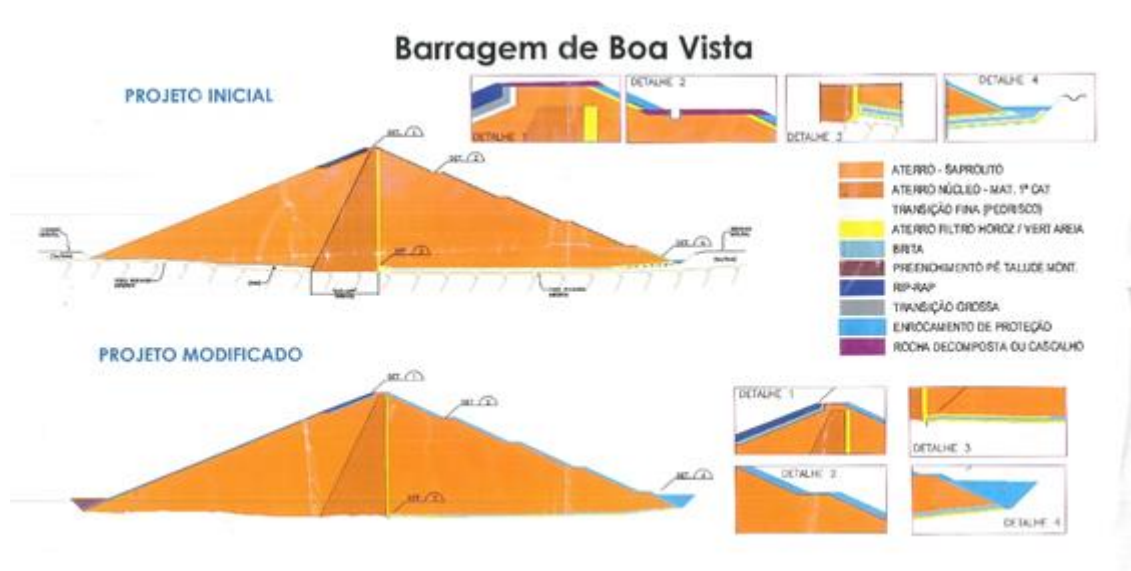
A barragem em estudo está localizada no extremo oeste da Paraíba, na microrregião de Cajazeiras, no município de São José de Piranhas, mais precisamente, no distrito de Boa Vista. Segundo dados do IBGE, 2010 a população do município é de cerca de 20.053 habitantes.

O município de São José de Piranhas encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Piranhas, parte na região do Alto Piranhas e parte na sub-bacia do Rio Piancó. Seus principais tributários são: o Rio Piranhas e os riachos: Bonfim, do Caboclo, Croatá, das Antas, Catingueira, Cachoeira do Pau, do Meio, da Picada, Verde, das Varas, Papagaio, Irapuã, do Tamanduá, da Violeta, dos Patos e da Várzea, além dos córregos: dos Pereiros, Boa Vista, Junco, Jaburu, da Égua e dos Cachorros. O principal corpo de acumulação é a Barragem de Boa Vista-Pb, componente do trecho norte da transposição.

De acordo com Serviço Geológico do Brasil, 2015 os solos da região em estudo, assim como do município como um todo são resultantes da desagregação e decomposição das rochas cristalinas do embasamento, sendo em sua maioria do tipo Podzólico Vermelho-Amarelo de composição arenoargilosa, tendo-se localmente latossolos e porções restritas de aluvião. O relevo acha-se incluso na denominada “Planície Sertaneja”, a qual constitui um extenso plano onde localmente se destacam elevações residuais alongadas e alinhadas com o “*trend*” da estrutura geológica regional. Sua vegetação característica é de pequeno porte, típica de caatinga xerofítica, onde se destaca a presença de cactáceas, arbustos e árvores de pequeno a médio porte.

Em termos climatológicos A Barragem acha-se inserido no denominado “Polígono das Secas”. As temperaturas são elevadas durante o dia, amenizando a noite, os picos mais elevados ocorrem durante a estação seca. O regime pluviométrico, além de baixo é irregular com médias anuais de 849,6 mm/ano e mínimas e máximas de 201,3 e 1561,3 mm/ano (CASTRO, 2005). No geral, caracteriza-se pela presença de apenas 02 estações: a seca que constitui o verão, cujo clímax é de setembro a dezembro e a chuvosa denominada pelo sertanejo de inverno, restrito a um período de 3 a 4 meses por ano.

Figura 8: Seção transversal da Barragem de Boa Vista.



Fonte: Queiroz Galvão.

A Barragem de Boa Vista possui 45 m de altura até sua crista e 220 m de largura e cerca de 880 m de extensão com uma capacidade de armazenamento de cerca de 375.000.000 m³. É uma barragem de terra zoneada como mostra a figura 8, constituída de diferentes tipos de solo ou o mesmo solo compactado em diferentes condições para otimização da seção e, também da disponibilidade de materiais. Pode-se observar um núcleo central impermeável envolvido por zonas de materiais consideravelmente mais permeáveis, zonas essas que suportam e protegem o núcleo.

Por ser uma barragem de grande porte, a escolha deste tipo de seção favorece a utilização de maquinaria de construção, além que reduz os perigos de piping.

3.1.2. Programa Geostudio

O Geostudio possui Software para lidar com diversos tipos de problemas geotécnicos e é utilizado por diversas engenheiros, pesquisadores, reguladores, professores e alunos. Os softwares utilizados são o SLOPE/w e SEEP/w.

SLOPE/w é o principal software de estabilidade de taludes para declives de solo e rochas. O mesmo pode efetivamente analisar problemas simples e complexos para uma variedade de formas de superfície de deslizamento, condições de pressão da água dos poros, propriedades do solo e condições de carga. O software fornece o fator de segurança dos taludes jusante e montante através de métodos não rigorosos

, como método de Fellenius, Bishop, Jambu, e dos métodos rigorosos como Spencer, Morgenstern-Price. (GEO- SLOPE INTERNATIOANL LTDA)

O SEEP/w é um software que resolve por elementos finitos o problema de fluxo de água em meios porosos. O SEEP/w pode modelar problemas de estado estacionário saturados simples ou sofisticadas análises transientes saturadas / insaturadas com acoplamento atmosférico na superfície do solo.(SEEP/W INTERNATIOANL LTDA)

3.2. Métodos

3.2.1. Análise da segurança dos taludes com base na lei N° 12.334, de 20 de setembro de 2010.

Foi realizado uma vistoria da barragem, onde foram preenchidos os formulários de inspeção da lei N°12334, bem como registro fotográfico da situação do barramento.

3.2.2. Obtenção dos Parâmetros de Projeto

A seção transversal utilizada foi fornecida pelo escritório da Queiroz Galvão. Porém devido a falta de dados da barragem foram utilizados alguns dados de literatura.

Como a barragem encontra-se na microrregião de Cajazeiras, os parâmetros do solo utilizados foram do relatório do DNOCS feito para a construção do açude Engenheiro Ávidos que abastece o município de Cajazeiras-Pb. A Barragem de Boa Vista- Pb encontra-se próximo a esta barragem, portanto considerou-se mesmo tipo de solo apoiado e algumas considerações foram feitas adiante.

A densidade máxima do solo fornecida pelo relatório é 113,7 libras por pé cúbico, a uma umidade ótima de 16%. Portanto,

$$\rho_s = 1821,3 \text{ kg/m}^3 ; \gamma_s = 17,86 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (17)$$

Relacionando Peso específico seco com peso específico aparente, de acordo com a equação (18):

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{1+w} \quad (18)$$

Portanto,

$$\gamma = 20,72 \frac{kN}{m^3}$$

Com o peso específico e de acordo com a tabela 2

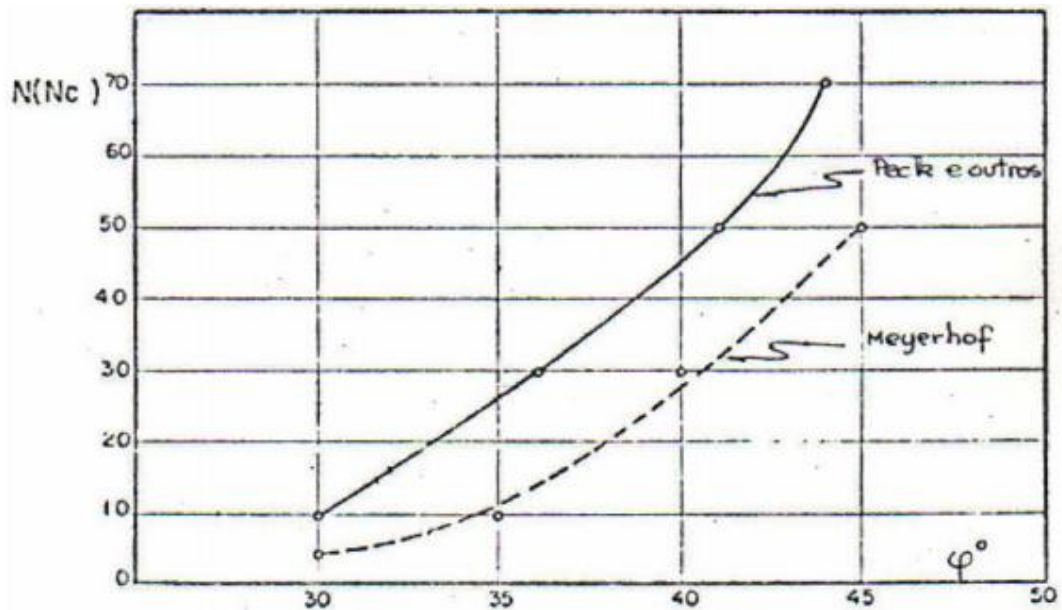
Tabela 2: Peso específico de solos arenosos.

N (golpes)	Consistência	Peso específico(kN/m ³)
≤ 2	Muito mole	13
3 -5	Mole	15
6-10	Média	17
11-19	Rija	19
≥20	Dura	21

Fonte: Godoy (1972).

Obtém-se $N_{SPT} \geq 20$, assim:

Figura 9: Os dados que se apresentam decorrem das indicações de Peck e outros.



Fonte: Peck (1953) e Meyerhof (1956).

Obtendo ângulo de atrito (ϕ) = 38°

Com a equação (19) e a tabela 3:

$$C(\text{tsf}) = \frac{N}{\alpha} \quad (19)$$

Tabela 3: índice de Plasticidade para Argilas.

Argila	Grupo 1
Fracamente plástica	$1 \leq IP \leq 7$
Medianamente plástica	$7 \leq IP \leq 15$
Altamente Plástica	$IP > 15$

Fonte: Peck (1953).

Obtém-se Coesão= 143,32 kPa e por fim, de acordo com a tabela 4, obtém-se a permeabilidade:

Tabela 4: Permeabilidade de acordo com o tipo de solo.

Permeabilidade		Tipo de solo	k (cm/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	10^3
	Alta	Areias	10^{-3} a 10^{-5}
	Baixa	Siltes e argilas	10^{-5} a 10^{-7}
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argila	10^{-7} a 10^{-9}
	Baixíssima	Argila	$< 10^{-9}$

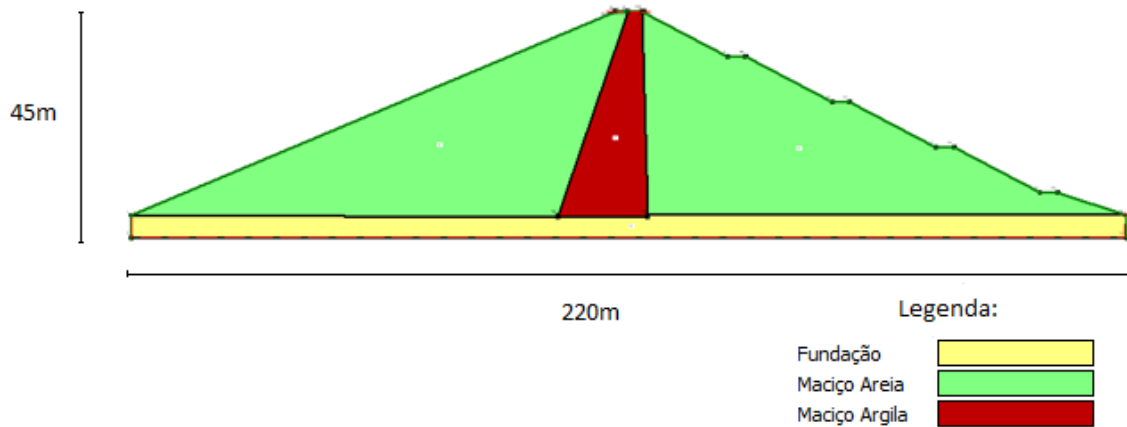
Fonte: Peck (1953).

$$\text{Portanto } k = 10^{-7} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Através das considerações anteriores foram obtidos os respectivos dados para fundação.

De acordo com a figura 8, onde se tem a seção transversal da barragem e a disposição dos materiais que a compõe, observa-se que o talude de montante e jusante é de aterro saprolito, e o seu enrocamento composto de material de 1ª categoria. Portanto, foi considerado sendo areia para talude de jusante e montante, conforme mostra figura 10, representado pela cor verde e enrocamento de argila, representado pela cor vermelha, conforme figura 10.

Figura 10: Seção Transversal com os respectivos materiais.



Fonte: O Autor (2018).

Portanto, foram usados os parâmetros apresentados na Tabela 5:

Tabela 5: Dados da areia e argila

Material	Peso Específico (KN/m ³)	Ângulo de Atrito	Coesão
Areia	18	38	0
Argila	17	0	143,32

Fonte: O Autor (2018).

3.2.3. Análise determinística da estabilidade dos taludes da seção de Projeto

No momento a Barragem de Boa Vista encontra-se em plena operação, logo somente será analisado a segurança da barragem na situação de reservatório cheio. Essa condição foi analisada através do software SEEP/W para caracterização do fluxo e do SLOP/W para verificação da estabilidade dos taludes, através do método de Mongenstern-Price.

Os parâmetros usados foram os apresentados na Tabela 5, sua obtenção foi explicada no item 3.2.2.

3.2.4. Análise probabilística da estabilidade dos taludes da seção de Projeto – Método das estimativas pontuais.

A análise Probabilística foi realizada através do método das estimativas pontuais, explicado no item 2.3.1. Para sua realização são necessárias as médias e os desvios padrões das variáveis do problema.

Foram adotadas como variáveis aleatórias o ângulo de atrito e o peso específico da areia, a coesão e o peso específico da argila. Segundo (RAMOS, 2014), (FABRÍCIO, 2006), (SANDOVAL, 2012), (RIBEIRO, 2008), o ângulo de atrito tem-se uma variância de 10%, a coesão de 14% e o Peso específicos de 2 % conforme pode ser observado na tabela 6:

Tabela 6: Ângulo de atrito, coesão e Peso Específico - Variáveis aleatórias

	Ângulo de atrito	Coesão	Peso específico	
			Areia	Argila
Menos desvio padrão	34,20º	123,25kPa	17,64kN/m ³	16,66kN/m ³
Média	38,00º	143,32kPa	18,00kN/m ³	17,00kN/m ³
Mais desvio padrão	41,80º	163,38kPa	18,36kN/m ³	17,34kN/m ³
Desvio padrão	3,80º	20,06kPa	0,36kN/m ³	0,34kN/m ³

Fonte: O Autor (2018).

São considerados 4 variáveis aleatórias que foram combinadas para gerar um conjunto de 81 fatores de segurança conforme exemplificado na equação 20. Os fatores de segurança são calculados conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.1** :

$$C = n^k = 3^4 = 81 \quad (20)$$

$$FS = f(\phi \mp \sigma; C \mp \sigma; \gamma_{areia} \mp \sigma; \gamma_{argila} \mp \sigma) \quad (21)$$

4. RESULTADOS

4.1. Segurança da Barragem

Todas as barragens devem ser submetidas periodicamente a uma reavaliação de suas condições de segurança, segundo sua classificação quanto às conseqüências de ruptura.(ROCHA, 2002).

A seguir segue tabela de segurança de Barragem preenchida através de inspeção visual em campo.

A tabela 7 retrata a identificação da Barragem.

Tabela 7: identificação da Barragem.

Matriz Potencial de Risco – Método COGERH/CE			
Barragem:	Boa Vista		
Rio:	São Francisco		
Bacia Hidrográfica:	Piranhas		
Coordenadas:			
Município:	São José de Piranhas- Pb	Estado:	PB
Data da Vistoria:	08/09/2018		
Cota Atual do Nível d'água:			
Proprietário / Administração:	Ministério da Integração		

Fonte: Fontenelle, 2015

A tabela 8 retrata o índice de periculosidade da Barragem. Este foi significativo, devido a esta possuir altura de 45 metros e um volume total de cerca de 375000000 m³,

Tabela 8: Índice de Periculosidade.

Índice de Periculosidade – P				
Dimensão da Barragem	Volume Total Reservatório	Tipo de Barragem	Tipo de Fundação	Vazão de Projeto
A	B	C	D	E
Altura ≤ 10m e Comprimento ≤ 200m 1	Pequeno < 20hm ³ 3	Concreto 4	Rocha 1	Decamilenar 1
10m < Altura < 20m e Comprimento ≤ 200m 3	Médio Até 200 hm ³ 5	Alvenaria de Pedra / Concreto Rolado 6	Rocha Alterada Saprolito 4	Milenar 2
20m ≤ Altura ≤ 50m ou Comprimento 200m a 3.000 m 6	Regular 200 a 800 hm ³ 7	Terra Enrocamento 8	Solo Residual / Aluvião até 4 m 5	500 Anos 4
Altura > 50m e Comprimento > 500m 10	Muito Grande > 800 hm ³ 10	Terra 10	Aluvião Arenoso Espesso / Solo Orgânico 10	Inferior a 500 Anos ou Desconhecido 10
A = 6	B = 7	C = 8	D = 1	E = 2

$$\mathbf{P = 24}$$

Significativo

Fonte: Fontenelle, 2015

De acordo com a tabela 9, pode-se observar que a vulnerabilidade da barragem está de baixa a moderado por ser uma construção nova, possuir projetos, estabilidade dos taludes está satisfatória, por a percolação ser controlada, não apresentar deformação nem deterioração dos taludes.

Tabela 9: Índice de Vulnerabilidade.

Índice de Vulnerabilidade – V							
Tempo de Operação F	Existência de Projeto G	Conf. Est. Vered. H	Toma da d'água I	Percolação J	Deform. Afund. K	Deterior. Taludes L	Mnt. Acum. Reserv. M
> 30 anos 0	Projeto "as built" e avaliação desemp. 1	Muito Satisfatória 2	Satisfatória Controle a montante 1	Totalmente controlada pelo sistema drenante 1	Inexistente 0	Inexistente 1	Inexistente 0
10 a 30 anos 1	Projeto "as built" 3	Satisfatória 3	Satisfatória Controle à Jusante 2	Umidade à jusante, taludes e ombreiras 4	Pequenos abatimentos da crista 2	Falha no rip-rap e proteção à jusante 3	Água 1
5 a 10 anos 2	Só Projeto básico 5	Suficiente 6	Aceitável 3	Umidades no talude à jusante e ombreira, área alagada devido ao fluxo 6	Ondulação, fissuras 6	Falhas nas proteções, drenagens insuficiente e sulco nos taludes 7	Água poluída 3
< 5 Anos 3	Não existe projeto 7	Não Satisfatório 10	Deficiente 5	Surgência de água em taludes, ombreiras e área à jusante 10	Depressão na crista, Afundam. nos taludes ou fundação 10	Depressão no rip-rap, escorregamentos, grandes erosões, vegetação 10	Resíduos Tóxicos ou Potencialmente Tóxicos 10
F = 2	G = 1	H = 3	I = 3	J = 1	K = 0	L = 1	M = 1
V =				12			

Baixa a Moderado

Fonte: Fontenelle, 2015

A tabela 10 aborda a importância da barragem. O índice obtido foi 1, este representa alta importância pois a mesma possui alto volume útil e alto custo.

Por fim, a tabela 11 aborda o potencial de risco que é a probabilidade e severidade de um efeito adverso para a saúde, para a propriedade ou para o meio ambiente. O risco é estimado por expectativas matemáticas das consequências de um evento adverso (ROCHA, 2002). Como o somatório das tabelas 8, 9, 10 está entre 15 e 25, o potencial de risco da barragem é baixo. Portanto, de acordo com a tabela 12, o período de reavaliação deve ser de 10 anos, visto sua baixo potencial de risco.

Tabela 10: Índice de Importância.

Índice de Importância – I		
Volume Útil hm³ N	População à Jusante O	Custo da Barragem P
Grande > 800 2	Grande 2,5	Elevado 1,5
Médio 200 a 800 1,5	Média 2	Médio 1,2
Baixo <200 1	Pequena 1	Pequeno 1
N = 1,5	O = 0	P = 1,5
I = 1		

Fonte: Fontenelle, 2015

Tabela 13: Potencial de Risco.

Potencial de Risco - PR		
Classe	Nível	Potencial de Risco
A	Alto	> 65
B	Médio	40 a 65
C	Normal	25 a 40
D	Baixo	15 a 25
E	Muito Baixo	< 15
PR = 18		
D - Baixo		

Fonte: Fontenelle, 2015

Tabela 11: Frequência de reavaliação da segurança da Barragem.

CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA	PERÍODO ENTRE AS REAVALIAÇÕES
MUITO ALTA	5 ANOS
ALTA	7 ANOS
BAIXA	10 ANOS
MUITO BAIXA	10 ANOS

Fonte: Rocha (2002)

4.1.1. Segurança da Barragem – Outras anomalias não abordado pelas tabela de segurança.

Através da inspeção visual do corpo da barragem foi possível analisar outras anomalias aos quais as tabelas anteriores não abordam. De acordo com Rocha, 2002, programas de manutenção periódico para estruturas em aterro devem incluir a manutenção regular da instrumentação, da crista e do enrocamento; o controle desde a vegetação até as tocas de animais; estabilização de taludes; manutenção dos sistemas de drenagem e a remoção de entulhos a montante, a fim de garantir a segurança da estrutura. Porém como observado nas figuras 11 e 12 estas medidas não estão sendo tomadas. Portanto ao apresentar vegetação no talude de montante da barragem, compromete a segurança da barragem, devendo ser retirada, afim de que o problema não se agrave.

Figura 11: Vista do talude de montante.



Fonte: O Autor (2018).

Figura 12: Planta no talude de montante.



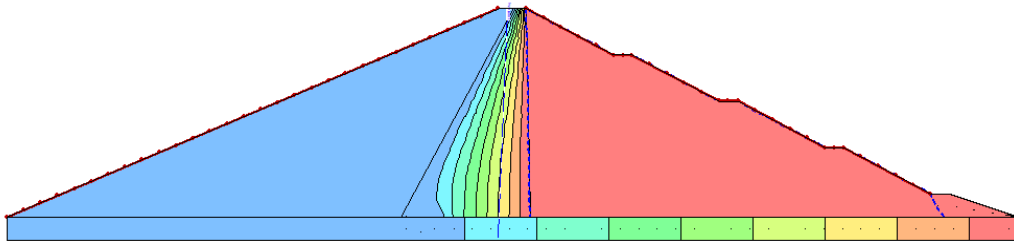
Fonte: O Autor (2018).

4.2. Vazão na seção da barragem

Foi analisado o fluxo através do SEEP/w e gerado a linha freática para posteriormente ser adicionados ao SLOPE/W, e assim obter os fatores de segurança.

Através da figura 13, pode-se observar, também, as linhas de fluxo ao longo do corpo da barragem que convergem para um filtro vertical. As vazões encontradas ao longo do barragem são para a região argilosa em torno de $0,00038574 \text{ m}^3/\text{s}$ e para a região de areia logo após o núcleo argiloso cerca de $0,00018105 \text{ m}^3/\text{s}$. Observa-se que a vazão diminui consideravelmente ao longo do corpo da barragem o que é de fundamental importância, pois diminui as perdas de água ao longo de sua seção.

Figura 13: Análise no Seep/w - Fluxo ao longo da seção.

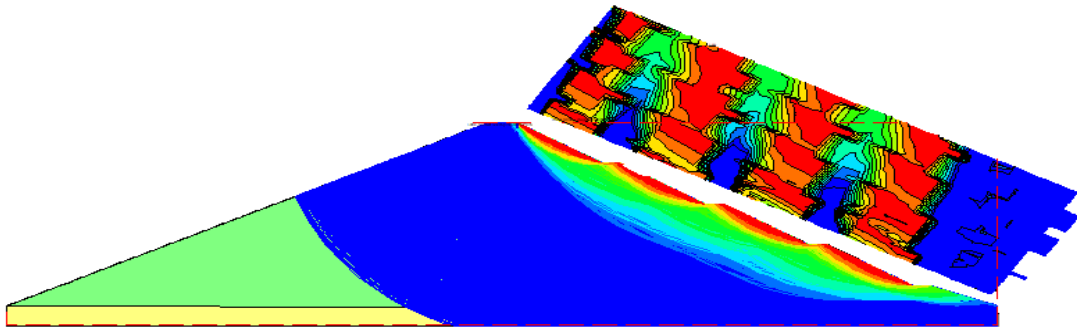


Fonte: O Autor (2018).

4.3. Análise pelo Método Determinístico.

A análise determinística foi executada Utilizando os parâmetros $\phi=38$; $C=143,32$; $\gamma_{areia} = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{argila} = 17 \text{ kN/m}^3$, os parametros médio; O fator de segurança obtido foi 1,484 conforme figura 14. Como fator de segurança obtido está em torno de 1,5 atendendo o fator mínimo de segurança de acordo com a tabela 13, as condições dos taludes são estáveis.

Figura 14: Fator de segurança - Reservatório Cheio - MORGENSTERN-PRICE



Fonte: O Autor (2018).

Tabela 13: Frequência de reavaliação da segurança da Barragem.

Condições de carregamento	Coefficiente Mínimo de segurança	Talude
Percolação permanente com reservatório na cota máxima normal	1,5	Jusante
Esvaziamento rápido	de 1,2 a 1,3	Montante
Término de construção	de 1,25 a 1,3	Jusante e montante

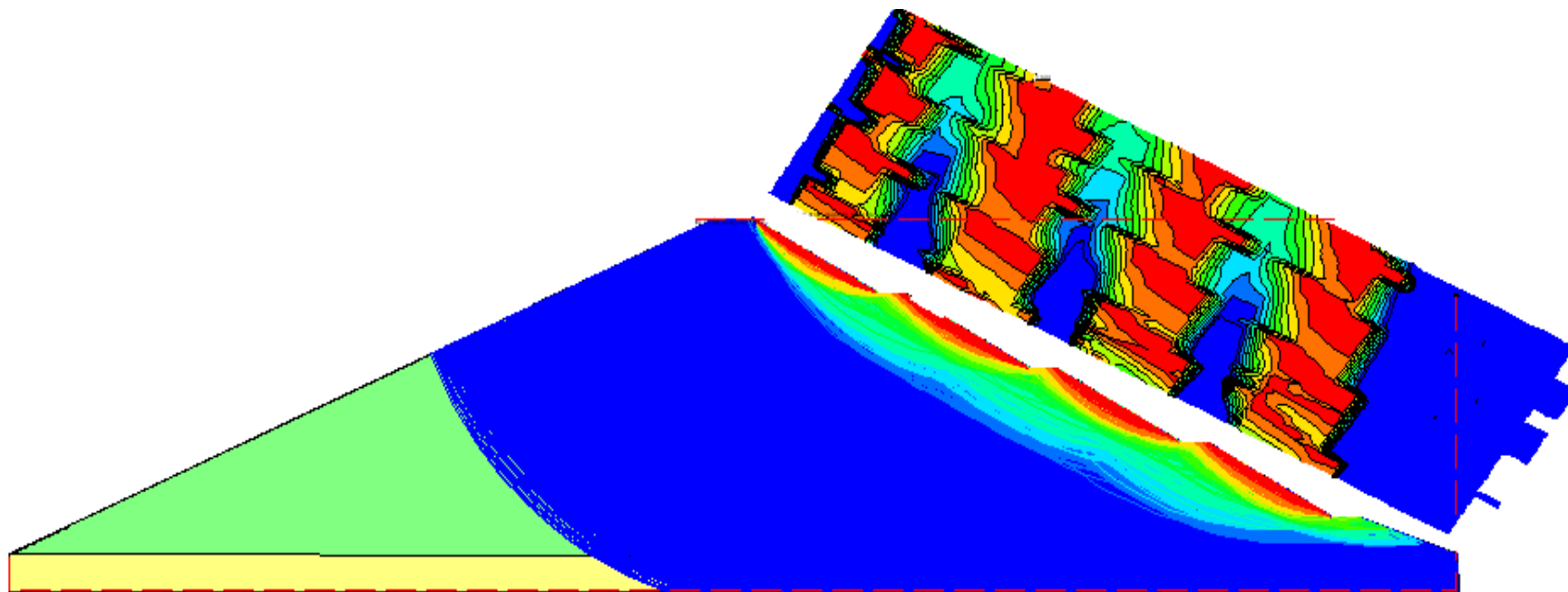
Fonte: CHAGAS (2002)

4.4. Análise Probabilística do Reservatório Cheio

Os parâmetros utilizados nas 81 interações, assim como os fatores de segurança gerado estão apresentados no anexo A.

A figura 15 demonstra um exemplo das 81 interações a qual foi utilizado $\phi = 41,8$, $\gamma_{areia} = 18 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_{argila} = 17 \text{ kN/m}^3$ $C = 163,38$ onde obteve fator de segurança de 1,699, sendo o este maior das interações analisadas.

Figura 15: Superfícies de ruptura e mapa de fatores de segurança para análise com $\emptyset = 41,8$; $\gamma_{AREIA} = 18$; $\gamma_{ARGILA} = 17$; $C = 163,38$



Fonte: O Autor (2018).

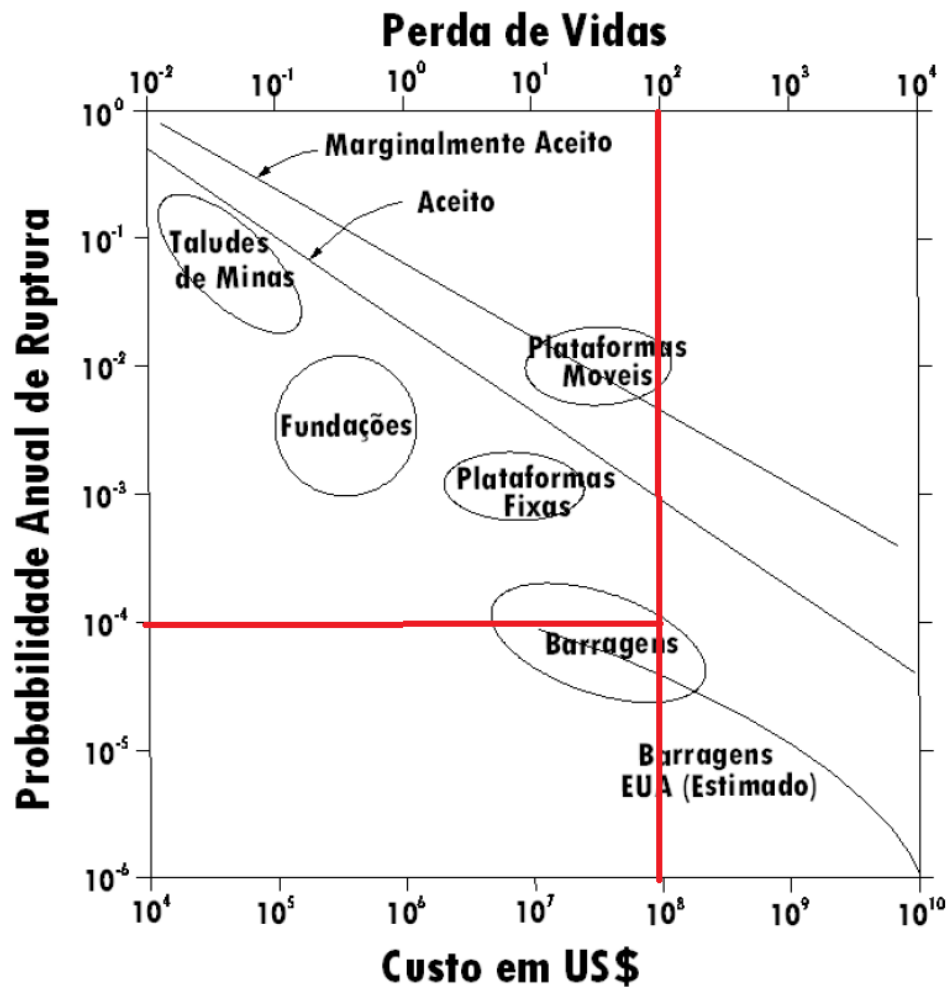
De acordo com a tabela do anexo A, foi calculado o fator médio de segurança, sendo este 1,49, e através da equação 15, obteve o índice $\beta=3,55$, portanto a probabilidade de ruína foi de 0,00019338, ou seja, 1 a cada 10000 barragem.

As normas brasileiras abordam apenas fatores de segurança e versam sobre probabilidade de ruína.

Para fins de análise da probabilidade de ruína foram utilizados dados da literatura. Assumindo uma perda de 100 vidas, por não existir população a jusante, e um custo estimado de 10^8 observa-se na figura 16, desenvolvido por Baecher, 1982 que a probabilidade de ruptura de 10^{-4} é aceitável.

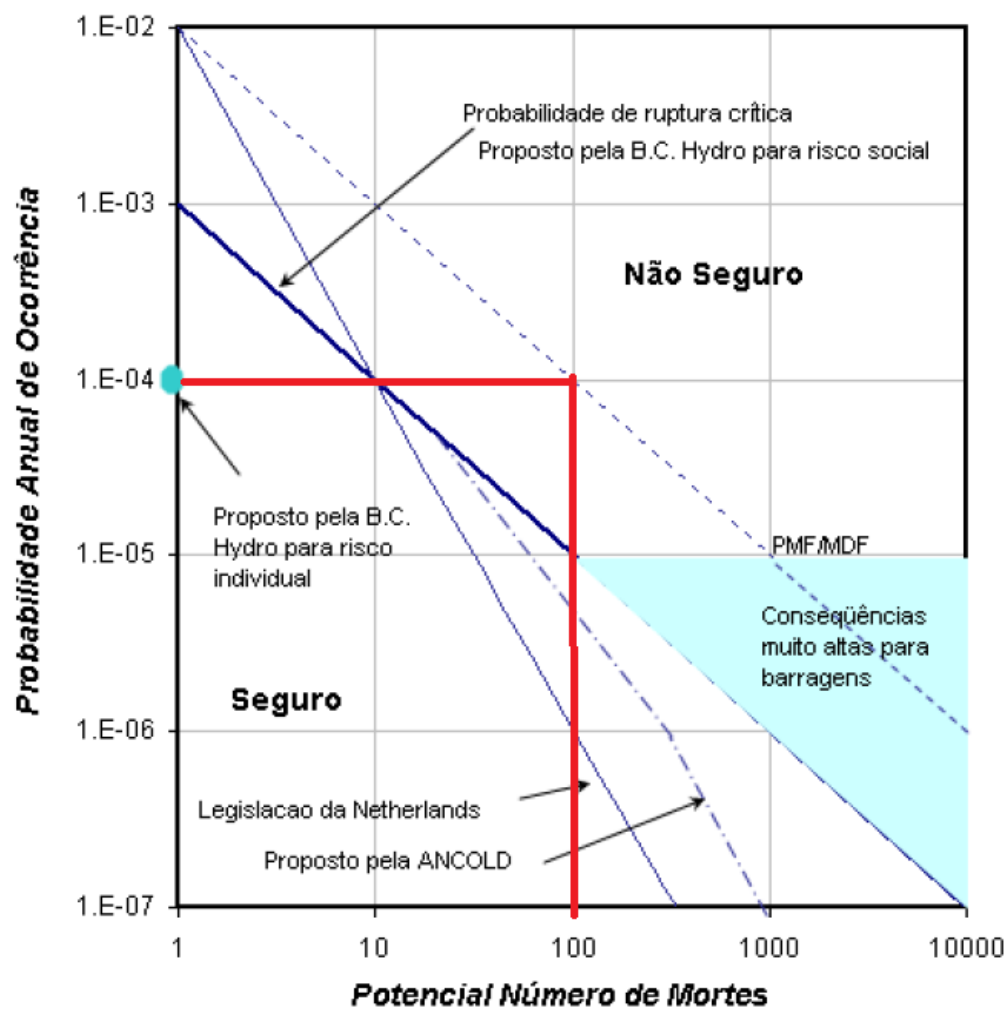
Entretanto segundo a metodologia Nielsen, 1994 apresentado na figura 17 a barragem é considerada não segura.

Figura 16: Probabilidade anual de ruptura x perda de vidas



Fonte:

Figura 17: probabilidade de ruptura da Barragem.



Fonte: O Autor (2018).

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou as seguintes conclusões:

- De acordo com a Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 a barragem foi classificada com baixo Risco, devendo ser vistoriada em um intervalo de 10 anos.
- Através do método determinístico obteve-se um fator de segurança de 1,484, que segundo Rocha, 2002 atende os requisitos mínimos.
- Por intermédio do método probabilístico obteve uma probabilidade de ruína de 1 para 10000 barragem que é considerada segura para Baecher, 1982 , entretando, para Nielsen, 1994 a barragem é considerada não segura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FABRÍCIO, João Vicente Fabella; SAYAO, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim; MAIA, Paulo Cesar de Almeida. **Análise Probabilística da Estabilidade de Taludes e Contenção**. 2006. 170 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Puc - Rio, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006. Cap. 2. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/8888/8888_3.PDF>. Acesso em: 01 ago. 2018.

N, Mario. Unidade 05 - BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO. In: MARANGON, Mario. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra - 2004**. Juiz de Fora: Autor, 2004. p. 27. Disponível em: <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid05.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2018.

SÃO JOSÉ DE PIRANHAS - PB. Breno Augusto Beltrão. Ministério de Minas e Energia (Org.). **DIAGNÓSTICO DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DE PIRANHAS**. São José de Piranhas, 2005. 23 p. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/16346/1/Rel_S%C3%A3o_Jos%C3%A9_Piranhas.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2018.

BIRCK, Mateus. **BARRAGENS DE TERRA HOMOGÊNEA: UMA ANÁLISE CRÍTICA ENTRE OS PROJETOS EMPÍRICO E CIENTÍFICO**. 2016. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MASSAD, Façal. **Obras de terra curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2003. 203 p.

SOBHAN, Braja M. das Khaled. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Trilha, 2015. 611 p

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

SETEMBRINO, Fernando. **MÓDULO I – BARRAGENS: ASPECTOS LEGAIS, TÉCNICOS E SÓCIOAMBIENTAIS: UNIDADE 9: BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO**. Rio Grande do Sul: Icba, 2012.

STEPHENS, Tim. **Manual sobre pequenas barragens de terra: Guia para a localização, projecto e construção**. Roma: Fao, 2011. 120 p.

QUINTAS, Fernando Eduardo Gerales. **Planeamento da Construção de Barragem de Terra**. 2002. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2002.

FERREIRA, João Luís Ferrás. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES PELOS MÉTODOS DE JANBU E SPENCER**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64689/1/000151854.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2018.

IBGE (Org.). **Dados Infográficos do Município de São José de Piranhas**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/sao-jose-de-piranhas/panorama>>. Acesso em: 17 out. 2018.

DNOCS. **Barragem Engenheiro Ávidos**. Disponível em: <<https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20da%20Paraiba/piranhas.htm>>. Acesso em: 17 out. 2018.

MARANGON, Prof. M.. 3 – Parâmetros dos Solos para Cálculo de Fundações. In: MARANGON, Prof. M.. **Geotecnia de Fundações**. Juiz de Fora: Ufjf, 2011. p. 1-16. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF03-Par%C3%A2metros-dos-Solos-para-C%C3%A1lculo-de-Funda%C3%A7%C3%B5es.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2018.

FABRICIO, João Vicente Falabela. **Análise probabilística da estabilidade de taludes e contenção**.

2006. Dissertação de mestrado. PUC – RIO

CHAGAS". **Utilização do MEF para análise da estabilidade de encostas**. 2006. 6 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2006.

APAZ, Marco Aurelio Flores. **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo**. São Paulo: Ipt, 2014.

FABRICIO, João Vicente Falabela. **Análise probabilística da estabilidade de taludes e contenção**.

2006. Dissertação de mestrado. PUC – RIO

TENÓRIO, Eduardo Antonio Guimarães. **COMPARATIVO DOS MÉTODOS PROBABILÍSTICOS DE MONTE CARLO E ESTIMATIVAS PONTUAIS APLICADOS A ESTABILIDADE DE TALUDES**. 2017. 71 f. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

ROCHA, Cristiano César Aires. **Manual de segurança e inspeção de barragem**. Brasília: Ministério da Integração, 2002. 150 p.

FONTENELLE, Alexandre de Sousa. **Relatório Anual de Inspeção de Barragem**. Ceará: COGERH, 2017. 211 p.

BAECHER G. B. (1982b). **Statistical Methods in Site Characterization**. Updating Subsurface Samplings of Soils and Rocks and their In-situ Testing, Santa Barbara, Engineering Foundation, pp. 463-492.

NIELSEN, N., HARTFORD, D., & MACDONALD, T. (1994). **Selection of Tolerable Risk Criteria in Dam Safety Decision Making**. Proc. Canadian Dam Safety Conf. Bitech Publishers, Vancouver, B. C.

ANEXOS

ANEXO A ...

	\emptyset (°)	C	γ_{AREIA}	γ_{ARGILA}	Fator de Segurança (Morgenter-price)
1	34,2	163,38	17,64	16,66	1,291
2	34,2	163,38	17,64	17	1,291
3	34,2	163,38	17,64	17,34	1,291
4	34,2	163,38	18	16,66	1,291
5	34,2	163,38	18	17	1,291
6	34,2	163,38	18	17,34	1,291
7	34,2	163,38	18,36	16,66	1,291
8	34,2	163,38	18,36	17	1,291
9	34,2	163,38	18,36	17,34	1,291
10	38	163,38	17,64	16,66	1,484
11	38	163,38	17,64	17	1,484
12	38	163,38	17,64	17,34	1,484
13	38	163,38	18	16,66	1,484
14	38	163,38	18	17	1,484
15	38	163,38	18	17,34	1,484
16	38	163,38	18,36	16,66	1,484
17	38	163,38	18,36	17	1,484
18	38	163,38	18,36	17,34	1,484
19	41,8	163,38	17,64	16,66	1,699
20	41,8	163,38	17,64	17	1,699
21	41,8	163,38	17,64	17,34	1,699
22	41,8	163,38	18	16,66	1,699
23	41,8	163,38	18	17	1,699
24	41,8	163,38	18	17,34	1,699
25	41,8	163,38	18,36	16,66	1,699
26	41,8	163,38	18,36	17	1,699
27	41,8	163,38	18,36	17,34	1,699
28	34,2	123,25	17,64	16,66	1,291
29	34,2	123,25	17,64	17	1,291
30	34,2	123,25	17,64	17,34	1,291
31	34,2	123,25	18	16,66	1,291
32	34,2	123,25	18	17	1,291
33	34,2	123,25	18	17,34	1,291
34	34,2	123,25	18,36	16,66	1,291

35	34,2	123,25	18,36	17	1,291
36	34,2	123,25	18,36	17,34	1,291
37	38	123,25	17,64	16,66	1,484
38	38	123,25	17,64	17	1,484
39	38	123,25	17,64	17,34	1,484
40	38	123,25	18	16,66	1,484
41	38	123,25	18	17	1,484
42	38	123,25	18	17,34	1,484
43	38	123,25	18,36	16,66	1,484
44	38	123,25	18,36	17	1,484
45	38	123,25	18,36	17,34	1,484
46	41,8	123,25	17,64	16,66	1,699
47	41,8	123,25	17,64	17	1,699
48	41,8	123,25	17,64	17,34	1,699
49	41,8	123,25	18	16,66	1,699
50	41,8	123,25	18	17	1,699
51	41,8	123,25	18	17,34	1,699
52	41,8	123,25	18,36	16,66	1,699
53	41,8	123,25	18,36	17	1,699
54	41,8	123,25	18,36	17,34	1,699
55	34,2	143,32	17,64	16,66	1,291
56	34,2	143,32	17,64	17	1,291
57	34,2	143,32	17,64	17,34	1,291
58	34,2	143,32	18	16,66	1,291
59	34,2	143,32	18	17	1,291
60	34,2	143,32	18	17,34	1,291
61	34,2	143,32	18,36	16,66	1,291
62	34,2	143,32	18,36	17	1,291
63	34,2	143,32	18,36	17,34	1,291
64	38	143,32	17,64	16,66	1,484
65	38	143,32	17,64	17	1,484
66	38	143,32	17,64	17,34	1,484
67	38	143,32	18	16,66	1,484
68	38	143,32	18	17	1,484
69	38	143,32	18	17,34	1,484
70	38	143,32	18,36	16,66	1,484
71	38	143,32	18,36	17	1,484
72	38	143,32	18,36	17,34	1,484
73	41,8	143,32	17,64	16,66	1,699
74	41,8	143,32	17,64	17	1,699
75	41,8	143,32	17,64	17,34	1,699
76	41,8	143,32	18	16,66	1,699
77	41,8	143,32	18	17	1,699
78	41,8	143,32	18	17,34	1,699
79	41,8	143,32	18,36	16,66	1,699

80	41,8	143,32	18,36	17	1,699
81	41,8	143,32	18,36	17,34	1,699