



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DANIEL AFONSO NUNES DE ASSIS**

**INFLUÊNCIA DAS AÇÕES SÍSMICAS NA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE  
TERRA - ESTUDO DE CASO NO ESTADO DO CEARÁ**

**FORTALEZA**

**2018**

DANIEL AFONSO NUNES DE ASSIS

INFLUÊNCIA DAS AÇÕES SÍSMICAS NA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE  
TERRA - ESTUDO DE CASO NO ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Silvrano Adonias Dantas Neto.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A865i Assis, Daniel Afonso Nunes de.  
Influência das ações sísmicas na estabilidade de barragem de terra : estudo de caso no estado do ceará /  
Daniel Afonso Nunes de Assis. – 2018.  
86 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto..

1. Barragem. 2. Estabilidade. 3. Método Pseudo-estático. I. Título.

CDD 620

---

DANIEL AFONSO NUNES DE ASSIS

INFLUÊNCIA DAS AÇÕES SÍSMICAS NA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE TERRA -  
ESTUDO DE CASO NO ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Mariana Vela Silveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosceli e Cláudio, sem os quais nunca teria aprendido o valor da educação, da sabedoria e da humildade. Aos meus irmãos, Nataniel, Talita e Gabriel, que aos poucos me mostraram o valor da família e companheirismo. À minha tia Roscelita, que abre meus olhos diariamente para quão grande o mundo pode ser. À minha avó Socorro, cujos ensinamentos me valem diariamente. À minha namorada Mariana, que sempre me mostrou o caminho do otimismo e perseverança. Tenho uma parte de vocês em mim, que me força a ser melhor a cada dia.

Ao Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto, pela orientação concedida, o aprendizado oferecido, a paciência depreendida e a dedicação demonstrada diversas vezes em qualidade do exercício da docência.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho e Profa. Dra. Mariana Vela Silveira, pela disponibilidade oferecida.

Aos meus colegas de trabalho, Itamara, Mikaelle, Luisa e Johnny, pela preocupação demonstrada e ajuda oferecida.

À COGERH, pela disponibilização de dados técnicos e projetos.

A todos os meus amigos que, em maior ou menor grau, compartilharam comigo euforias e frustrações acadêmicas vividas dentro do Centro de Tecnologia. Em especial, ao Luciano, Ricardo, Matheus Uchoa, Fernando Yuri, Roberto, Nuno, Ícaro, Geraldo e todos os outros sem os quais a vivência e experiência não teria sido tão lembrada. Meu muito obrigado.

“Conhece-te a ti mesmo”  
(Sócrates)

## RESUMO

O Brasil, por se localizar no centro de uma placa tectônica, tem o histórico de possuir relativamente poucos casos de eventos sísmicos registrados na literatura especializada e em acervos técnicos sobre a ocorrência desses eventos. Devido a esse fator geográfico no país, em obras de engenharia, mais especificamente, em obras geotécnicas, não é usual ou frequente a consideração da ocorrência desses eventos na análise de estabilidade dessas estruturas. Essa consideração deve ser feita, uma vez que há registros identificados de eventos de magnitude 5 na escala Richter nas regiões Nordeste e Sudeste do país. Nesse sentido, este trabalho busca determinar o grau de influência ou comprometimento que a ocorrência de um evento sísmico causa à estabilidade global de uma barragem de terra. Para realizar isso, foram realizados estudos de fluxo e estabilidade estática de uma barragem do Ceará. A adoção de coeficientes sísmicos permitiu a realização de análise de estabilidade pseudo-estática, que foi comparada com os resultados das análises de estabilidades estáticas iniciais. O modelo empregado nessa análise passou por um processo de retroanálise das condições de fluxo, baseados nos dados de instrumentação medidos em campo. Os resultados desse estudo de caso apontam na variação considerável dos fatores de segurança de um modelo de análise para outra. Próximo a uma redução de um terço do fator de segurança em comparação com a análise em que não se considera os efeitos da ação sísmica. Por fim barragem atendeu aos critérios de segurança para ruptura especificada na literatura, limitadas ao método de cálculo e hipóteses de modelagem adotados nesse trabalho.

**Palavras-chave:** Barragem; Estabilidade; Método Pseudo-estático.

## ABSTRACT

Once the Brazil is located in the middle of a tectonic plate, few cases os seismic events has been reported to the specialized literature or technical collections about the existence of this kind of events. Due to this geographic issue on the country, on engineering works, and more specifically, on geotechnical works, it's not usual or common the application of seismic effects on stability reviews on this kind of structures. That consideration must be done, once there is records of earthquake events on Northeast e Southeast regions of the country. Therefore this work aims to determinate the influence, or the loss, of global stability on an embankment dam, due to the occurrence of a seismic event. In order to accomplish that, there was been made a seepage and static stability analysis on an embankment dam located in the Brazilian state of Ceará. The adoption of seismic coefficients allowed to accomplish the pseudo-static stability analysis, who was compared to other results from the initial static analysis of stability. The model used in this study has been tested by a retro analysis process of seepage conditions, based on instrumentation data collected on field., The results made by this work is, among other things, the considerable variation of security factor in comparison of the two kinds of stability analysis, close to one third of reduction in comparison to the security factor that do not consider the seismic forces. Beyond that, the embankment dam has filled the conditions of safety about slope stability. This result is limited to de methods and model hypotheses adopted on this work.

**Keywords: Embankments Dams; Stability, Pseud-static method;**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Epicentros do Catálogo Sísmico Brasileiro até 2012 (fonte: CSB, 2012).....	16
Figura 2 - Sismicidade na Província Borborema (fonte: Oliveira, 2015).....	17
Figura 3 - Representação esquemática das linhas de fluxo e equipotenciais em uma barragem (fonte: Massad, 2010).....	24
Figura 4 - Representação das superfícies de ruptura e tensões nela atuantes (fonte: SILVA 2011).....	26
Figura 5 - Representação das grandezas atuantes no método das fatias (fonte: Araújo, 2013)	28
Figura 6 - Combinação de esforços solicitantes no método pseudo-estático (fonte: MELO et al., 2004).....	30
Figura 7 - Fluxograma de etapas de estudo .....	35
Figura 8 - Localização da barragem no estado do Ceará (fonte: Google Earth) .....	37
Figura 9 - Registro de afundamento no coroamento em Aracoiaba, 2015 (Fonte: COGERH, 2015).....	38
Figura 10- Representação de piezômetro tipo Casagrande (fonte: SALES, et al. 2006) .....	45
Figura 11 - Legenda de nomenclatura dos instrumentos .....	48
Figura 12 - Variação das cargas piezométricas no histórico da Barragem Aracoiaba (Seção 44) .....	49
Figura 13 - Variação das cargas piezométricas no histórico da Barragem Aracoiaba (Seção 48) .....	50
Figura 14 - Representação da Seção 44 e posição dos piezômetros.....	55
Figura 15 - Seção de análise com nível de água máximo no reservatório.....	58
Figura 16 - Malha de elementos finitos e nível de água máximo do reservatório.....	58
Figura 17 - Análise de fluxo e análise de estabilidade estática em nível máximo com cargas piezométricas (m) .....	61
Figura 18 - Análise de fluxo e análise de estabilidade pseudo-estática em nível máximo com cargas piezométricas (m).....	62
Figura 19 -Análise de fluxo e de estabilidade estática em nível médio de observação do Período 1 com cargas piezométricas (m).....	63
Figura 20-Análise de fluxo e de estabilidade pseudo estática em nível médio de observação do Período 1 com cargas piezométricas (m).....	64
Figura 21 - Análise de fluxo e estabilidade estática em nível médio de observação do Período	

2 com cargas piezométricas (m) .....	65
Figura 22 - Análise de fluxo e estabilidade pseudo-estática em nível médio de observação do Período 2 com cargas piezométricas (m).....	65
Figura 23 - Comparativo entre leituras médias medidas e as leituras calculadas na retroanálise para o Período 1 .....	66
Figura 24 - Comparativo entre leituras médias medidas e as leituras calculadas na retroanálise para o Período 2.....	67
Figura 25 - Análise de fluxo e estabilidade em nível máximo com cargas piezométricas (m)	
68	
Figura 26 - Análise de fluxo e estabilidade pseudo estática em nível máximo com cargas piezométricas.....	69
Figura 27- Distribuição dos fatores de segurança pseudo-estáticos e estáticos pela altura da coluna d'água do reservatório .....	70
Figura 28 - Cálculo das cargas piezométricas em cada piezômetro para cada nível de altura de coluna d'água no reservatório por análise de fluxo efetuada.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Magnitude da Escala Mercalli Modificada (1956) - continuação na página seguinte .....	17
Tabela 2 - Fatores de Segurança para verificação da estabilidade (U.S. Army Corps of Engineers, 2003).....	27
Tabela 3 - Coeficientes sísmicos (kh) recomendados por autor, valorem em g (9,8 m/s <sup>2</sup> ).....	31
Tabela 4 -Dados Técnicos de Projeto da Barragem de Aracoíaba.....	37
Tabela 5 - Resultados médios de ensaios de caracterização .....	39
Tabela 6 - Porcentagens de recuperação de rochas sãs e alteradas em seções de leito e ombreiras .....	42
Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos e hidráulicos de projeto.....	44
Tabela 8 - Levantamento dados de instalação dos instrumentos em seções de altura máxima	51
Tabela 9 - Parâmetros hidráulicos e geotécnicos considerados na etapa de análise.....	57
Tabela 10 – Médias, máximos e mínimos de cargas piezométricas para cada período.....	60
Tabela 11 - Resultados de cargas piezométricas para análise de estabilidade.....	62
Tabela 12 – Comparativo entre cargas piezométricas média medida e carga obtida no Período 1 .....	64
Tabela 13 - Comparativo entre cargas piezométricas média medida e carga calculada no Período 2.....	66
Tabela 14 - Parâmetros hidráulicos recalculados após retroanálise .....	68
Tabela 15 - Comparativo entre resultados das cargas piezométricas para análise de estabilidade com os novos parâmetros hidráulicos e com os parâmetros de projeto .....	69
Tabela 16 - Comparativo de fatores de segurança com e sem ocorrências de ações sísmicas .	71
Tabela 17 - Comprometimento do fator de segurança estático com a ocorrência de eventos sísmicos .....	73
Tabela 18 – Comparativo entre parâmetros hidráulicos de projeto e .....	73

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	12
1.1.	Objetivos .....	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1.	Histórico de eventos sismológicos no Brasil .....	15
2.2.	Barragem de Terra .....	20
2.3.	Análise de Fluxo.....	21
2.4.	Análise de Estabilidade .....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1.	Introdução.....	32
3.2.	Metodologia Geral.....	32
3.3.	Apresentação do Software Slide™ .....	35
3.4.	Barragem selecionada para estudo .....	36
3.5.	Ensaios de caracterização dos materiais constituintes de Barragem Aracoiaba.....	38
3.6.	Instrumentação .....	44
3.7.	Definição das análises .....	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	60
4.1.	Introdução.....	60
4.2.	Análise de fluxo e estabilidades de projeto .....	61
4.3.	Retroanálise das condições de fluxo e análises de estabilidades .....	63
4.4.	Validação da retroanálise das condições de fluxo .....	66
4.5.	Modelagem para cheia máxima de projeto .....	68
4.6.	Análise de tendência.....	70
4.7.	Discussão sobre os resultados .....	71
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	76
5.1.	Conclusões de estudo .....	76
5.2.	Sugestões de futuras pesquisas.....	77
	REFERÊNCIAS .....	79
	ANEXOS.....	82

## 1. INTRODUÇÃO

À medida que o homem e sua civilização evoluíram em sua história, alcançaram patamares cada vez maiores de desenvolvimento tecnológicos de construção, viabilizando a construção de obras cada vez mais audaciosas, como túneis submarinos, pontes quilométricas, grandes barragens, etc. Novos desafios surgem ao longo do tempo e são mitigados pelo conhecimento cada vez maior da natureza e seus elementos que cercam a civilização humana. Em obras de movimentação e elevação de estruturas geotécnicas, o embasamento científico em um estudo de estabilidade de taludes é imprescindível, para assegurar a qualidade e segurança da estrutura. Nesse campo, a engenharia geotécnica atua como um canal primordial de estudos relacionados aos métodos e iniciativas mais eficazes de execução e posteriormente, análise e monitoramento de obras de terra.

Particularmente, um importante estudo na área da engenharia geotécnica são os estudos de fluxo e estabilidade de taludes. Esses estudos buscam a análise dos diversos esforços internos atuantes nas obras de terra. A conclusão deles ocorre pelo cálculo do fator de segurança do talude e é aplicável a qualquer estrutura geotécnica feita para suportar, pelo próprio material de que é constituída, os esforços externos, havendo ou não a existência de níveis freáticos.

Barragens de terra são frequentemente analisadas estruturalmente visando a segurança do maciço e taludes, uma vez que esse tipo de obra pode estar sujeito a ações variáveis de níveis de água do reservatório e níveis freáticos internos ao maciço, fatores que podem prejudicar o nível de segurança da estrutura. Outro fator que diminui a condição de estabilidade de uma barragem é a ocorrência de atividades sísmicas. As acelerações geradas pelos tremores induzem forças solicitantes que podem reduzir sensivelmente o fator de segurança de uma estrutura se seu projeto e construção não tiver previsto tal situação.

A avaliação da segurança sísmica de barragens é uma preocupação crescente em vários países onde muitas barragens foram construídas em áreas de atividade sísmica. O Brasil, apesar de ser considerado em princípio um país com reduzidos tremores de terra, tem cada vez mais registros sísmicos significativos que são repertoriados pelo Observatório Sismológico da UnB, fato que evidencia o interesse e as preocupações sobre este problema. Esse fato é um alerta à gestão de segurança dessas estruturas no Brasil, cujas análises dinâmica, pseudo-estática ou pseudo-dinâmica, as quais levam em consideração a ações dinâmicas na estrutura, frequentemente são negligenciadas em estudos de estabilidade que envolvam definições de parâmetros para elaboração de projetos.

No tocante à gestão de segurança nas barragens do Ceará, a COGERH – Companhia de

Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, criada em novembro de 1993, é atualmente a organização que gerencia mais de 90% das águas acumuladas do Estado. Sua atividade envolve o monitoramento e administração de importantes barragens estaduais e federais, além de reservatórios e adutoras das 12 bacias hidrográficas do estado. A companhia atualmente realiza o monitoramento da instrumentação geotécnica de 16 barragens do estado, monitorando e registrando dados de níveis piezométricos e vazões por percolação.

A Companhia de Gestão de Recursos Hídricos, atualmente, gerencia 77 barragens estaduais, das quais aproximadamente 90% são barragens de terra, com materiais homogêneos, ou de classe zoneada (LIMA, et al 2016), evidenciando a importância do estudo de estabilidade considerando a ação sísmica na contribuição para o conhecimento da segurança dessas estruturas.

Historicamente no Ceará, e similar ao que ocorre nos outros estados do país, a análise de estabilidade de taludes de terra em barramentos é realizada quando a barragem está em fase de projeto executivo, quando o maciço é executado em geometrias estabelecidas e seus materiais constituintes são ensaiados em laboratório. Contudo grandes obras de terra, como barragens, possuem vida útil consideravelmente longas e, nesse período, faz-se necessário estudos periódicos de estabilidade, pois o risco de alteração das condições iniciais de projeto é considerável, visto que a obra está submetida a regimes variados de cheias, transporte erosivos de material e reposição de material, entre outros.

Além disso, o estado do Ceará possui poucos estudos consideram o fator sísmico na análise de estabilidade em barragem. A análise pseudo-estática é pertinente à análise de estabilidade da barragem, uma vez que o estado do Ceará e a região nordeste localizam-se em uma região do Brasil com registros históricos de terremotos de média intensidade (V-VI MM), tendo sido detectado em 1824, um abalo sísmico avaliado VIII-IX na mesma escala (BERROCAL, et al. 1984).

É indispensável, portanto, para boa prática de gestão de segurança, o conhecimento do quão comprometedor é esse fator na segurança da obra, considerando o histórico da atividade no estado. Isso é importante, pois o conhecimento do comportamento das estruturas geotécnicas nesses eventos sísmicos permite a tomada de decisão mais eficiente e a realização de ações emergenciais para proteção das populações próximas a barragens após ocorrência desses tipos de eventos geológicos.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

A realização desse trabalho busca contribuir para os conhecimentos técnicos em gestão de segurança das barragens do Ceará, por meio da avaliação da influência de ações sísmicas na estabilidade de uma barragem de terra e do conhecimento do comprometimento na segurança que essa estrutura sofre na ocorrência desses eventos.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

No intuito de alcançar o propósito de gerar conhecimento sobre a estabilidade sísmica em grandes estruturas geotécnicas, como barragens, alguns requisitos são fundamentais. É preciso, por exemplo, que as condições de modelagem da estrutura geotécnica sejam representativas à situação observada em campo. Além disso, para efeitos comparativos do impacto da ação sismológica na situação estática da estrutura, é necessário, inicialmente, determinar as condições de estabilidade para essa situação estática. Nesse sentido este estudo é composto dos seguintes objetivos específicos.

- a) Análise de estabilidade dos taludes da barragem, por meio do cálculo do fator de segurança;
- b) Retroanálise das condições de fluxo, a partir de dados piezométricos coletados em campo;
- c) Avaliação do fator de segurança, considerando efeitos de atividade sísmica na condição de estabilidade da barragem;
- d) Comparação dos resultados de estabilidade entre aqueles obtidos considerando o efeito sismológico e os resultados provenientes da análise estática;
- e) Definir as condições de segurança da barragem em função do nível do reservatório.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo trata da revisão bibliográfica a respeito dos temas abordados pertinentes ao tema tratado nesse estudo, de modo a fornecer uma base teórica que possa auxiliar tanto a discussão dos resultados gerados, como as conclusões finais do trabalho.

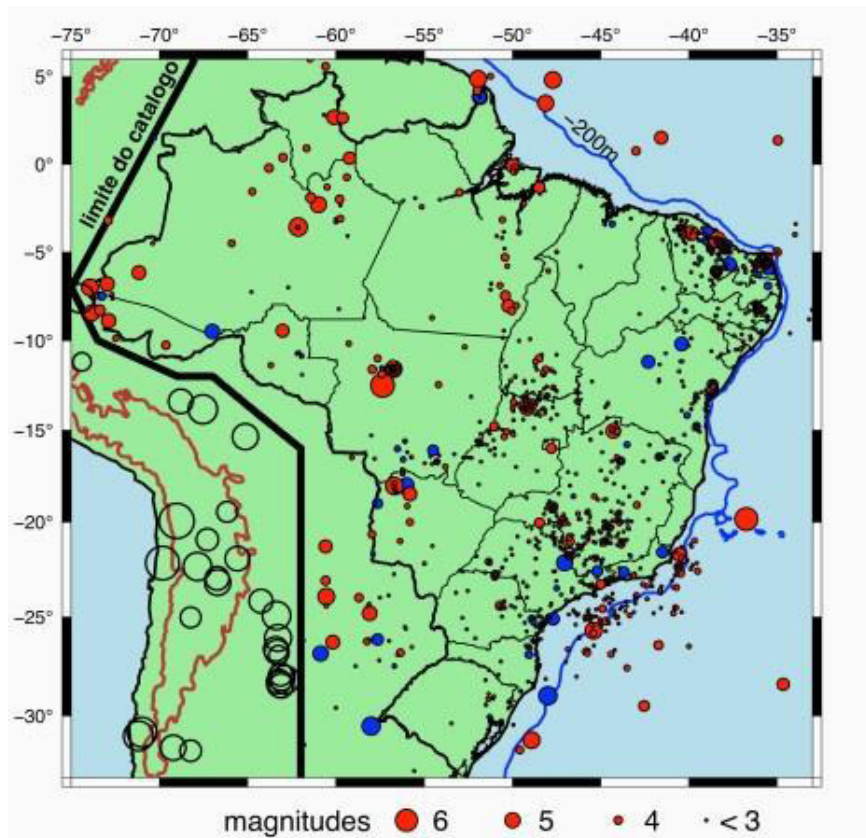
### **2.1. Histórico de eventos sismológicos no Brasil**

Conforme afirma Oliveira (2015), a maior parte do Brasil é considerada como uma região sismicamente inativa, pois o país encontra-se no centro da placa tectônica Sul-Americana. Algumas regiões, porém, registram um considerável número de eventos sísmicos, como a região Nordeste, devido ao seu sistema de falhamento recente e a região Sudeste, onde os epicentros de focos profundos estão associados à evolução da cadeia Andina. Assim, a concentração de eventos sísmicos nessas regiões intraplacas está associada tanto a zonas de fraqueza da crosta, como esforços crustais atuantes.

A Rede Sismográfica Brasileira, RSBR, realizou um mapa de registros sísmicos no Brasil e região, a partir de várias fontes. Para os dados até 1981, usa-se as informações apresentadas por Berrocal et al., (1984), cujos dados históricos foram baseados na bibliografia da época e em pesquisas da USP, UFRN e UNB. De 1982 até 1995, o Catálogo Sísmico Brasileiro (2012) afirma que foram utilizados os Boletins Sísmicos que eram publicados na Revista Brasileira de Geofísica. O Catálogo Sísmico Brasileiro (2012), CSB, mostra o mapa de ocorrências sísmicas, o qual foi obtido através de colaboração entre todas as instituições que estudam a sismicidade brasileira: USP, UnB, UFRN, IPT, UNESP.

O mapa de ocorrências sismológicas é mostrado na Figura 1. Pela observação da figura, observa-se que dentre as regiões brasileiras com maiores registros de atividade sísmica estão as regiões Sudeste e Nordeste.

Figura 1 - Epicentros do Catálogo Sísmico Brasileiro até 2012 (fonte: CSB, 2012)



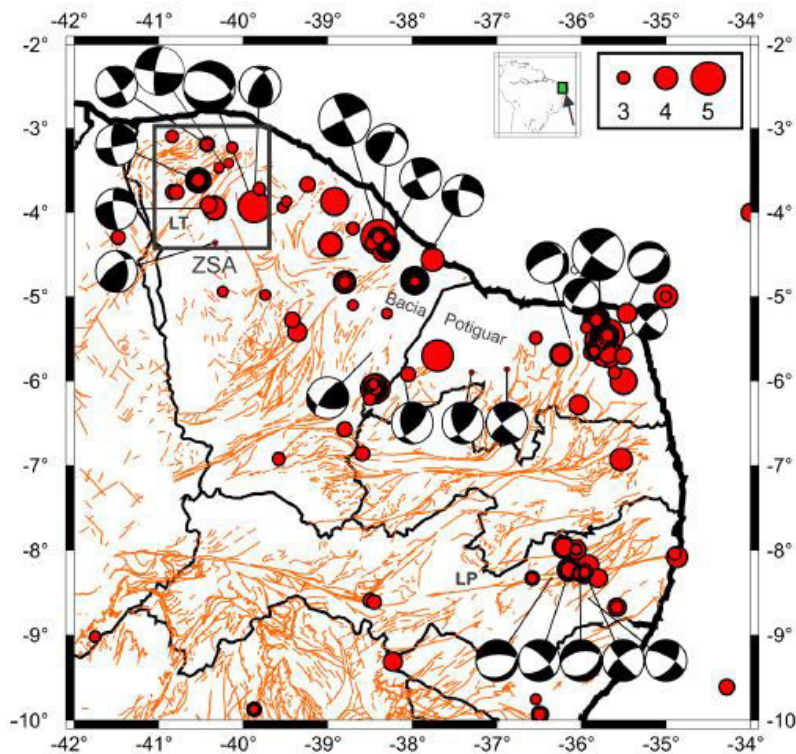
**Legenda:**

**Círculos vermelhos:** eventos com magnitude Richter instrumental, medidas por acelerômetros sísmicos;  
**Círculos azuis:** eventos mais antigos com magnitudes estimadas com dados macrosísmicos (área afetada ou intensidade máxima);  
**Círculos vazios** nos Andes são os sismos mais fortes sentidos no Brasil (geralmente nos andares superiores de prédios altos). A linha preta grossa é o limite de compilação de eventos para o Catálogo Sísmico.

Boletim Sísmico Brasileiro (2013), *apud* Oliveira (2015) mostra a distribuição de eventos sísmológicos e das falhas mapeadas na província de Borborema, região do estado do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco, entre os anos de 1720 a 2013, com magnitudes acima de 2,5. O mapa é mostrado na Figura 2. No estado do Ceará, observando a Figura 2, a atividade sísmica tem maiores registros na região metropolitana de Fortaleza e na região noroeste do estado.. Nessas duas regiões, já foram registrados eventos sísmicos com magnitude de até 5 na Escala Richter, considerados de pequena a média magnitude.

As intensidades sísmicas baseadas em dados macrosísmicos (área afetada ou intensidade máxima) foram amplamente baseadas na Escala de Mercalli Modificada (1956) *apud* Monteiro (2007), denominada de escala MM, que determinava qualitativamente, baseado nos efeitos sobre a população afetada, estruturas construídas e naturais comprometidas, a intensidade do sismo. A Tabela 1 a seguir mostra a descrição de intensidade para os níveis da Escala de Mercalli Modificada (1956). Monteiro (2007) compila e compara as escalas de intensidade sísmica de Mercalli Modificada (1956) com a escala de magnitudes Richter. A comparação é mostrada na Tabela 1.

Figura 2 - Sismicidade na Província Borborema (fonte: Oliveira, 2015)

**Legenda:**

ZSA: Zona Sísmica do Acaraú;  
 LP: lineamento Pernambuco;  
 LT: lineamento Transbrasileiro.  
 Obs: As “bolas de praia”  
 representam mecanismos focais e os  
 traços laranjas mostram as falhas  
 mapeadas na região.

Tabela 1 - Magnitude da Escala Mercalli Modificada (1956) - continuação na página seguinte

Intensidade	Descrição	Escala Richter
<b>I - Imperceptível</b>	Não sentido. Efeitos marginais e de longo período no caso de grandes sismos	1 a 2
<b>II - Muito fraco</b>	Sentido pelas pessoas em repouso nos andares elevados de edifícios ou favoravelmente colocadas	2 a 3
<b>III - Fraco</b>	Sentido dentro de casa. Os objetos pendentes baloçam. A vibração é semelhante à provocada pela passagem de veículos pesados. É possível estimar a duração, mas não pode ser reconhecido com um sismo.	3 a 4
<b>IV - Moderado</b>	Os objetos suspensos baloçam. Carros estacionados balançam. Janelas, portas	4

Intensidade	Descrição	Escala Richter
<b>V - Forte</b>	e loiças tremem. Os vidros e loiças chocam ou tilintam. Na parte superior deste grau as paredes e as estruturas de madeira rangem. Sentido fora de casa; pode ser avaliada a direção do movimento; as pessoas são acordadas; os líquidos oscilam e alguns extravasam; pequenos objetos em equilíbrio instável deslocam-se ou são derrubados.	4 a 5
<b>VI - Bastante forte</b>	Sentido por todos. Muitos assustam-se e correm para a rua. As pessoas sentem a falta de segurança. Os pratos, as louças, os vidros das janelas, os copos, partem-se. As mobílias movem-se ou tombam. Os estuques fracos e alvenarias do tipo D fendem. Pequenos sinos tocam (igrejas e escolas). As árvores e arbustos são visivelmente agitados ou ouve-se o respetivo ruído.	5 a 6
<b>VII - Muito forte</b>	É difícil permanecer de pé. É notado pelos condutores de automóveis. Os objetos pendurados tremem. Verificam-se danos nas alvenarias tipo D, incluindo fraturas. As chaminés fracas partem ao nível das coberturas. Queda de reboco, tijolos soltos, pedras, telhas, cornijas, parapeitos soltos e ornamentos arquitetônicos. Algumas fraturas nas alvenarias C. Ondas nos tanques. Os grandes sinos tocam.	6
<b>VIII - Ruinoso</b>	Afeta a condução dos automóveis. Danos nas alvenarias C com colapso	6 a 7

Intensidade	Descrição	Escala Richter
	parcial. Alguns danos na alvenaria B e nenhuns na A. Quedas de estuque e de algumas paredes de alvenaria. Torção e queda de chaminés, monumentos, torres e reservatórios elevados. As estruturas movem-se sobre as fundações, se não estão ligadas inferiormente. Os painéis soltos no enchimento das paredes são projetados.	
<b>IX - Desastroso</b>	Pânico geral. Alvenaria D destruída; alvenaria C grandemente danificada, às vezes com completo colapso; as alvenarias B seriamente danificadas. Fraturas importantes no solo.	7
<b>X - Destruidor</b>	A maioria das alvenarias e das estruturas são destruídas com as suas fundações. Algumas estruturas de madeira bem construídas e pontes são destruídas. Danos sérios em barragens, diques e aterros. Grandes desmoronamentos de terrenos. As águas são arremessadas contra as muralhas que marginam os canais, rios, lagos, etc.; Vias-férreas levemente deformadas.	7 a 8
<b>XI - Catastrófico</b>	Vias-férreas grandemente deformadas. Canalizações subterrâneas completamente avariadas.	8
<b>XII - Danos quase totais</b>	Grandes massas rochosas deslocadas. Conformação topográfica distorcida. Objetos atirados ao ar.	Maior que 8

Fonte: Monteiro (2007)

## 2.2. Barragem de Terra

Marangon (2004) define barragem como um elemento estrutural, construído transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água, destinado à criação de um reservatório artificial de acumulação de água.

Conforme descreve Marangon (2004), as barragens de terra homogênea são aquelas cuja construção foi feita através da utilização de apenas um único tipo de material de empréstimo. Por conta disso, há a necessidade de que os taludes possuam inclinações suaves, permitindo um maior controle sobre a estabilidade da barragem, assim como da busca por materiais mais impermeáveis, a fim de dificultar a percolação da água. Ainda de acordo com Marangon (2004), somente a partir de 1907, surgiram os primeiros procedimentos racionais para projeto de barragens de terra

De acordo com Massad (2010), as barragens de terra homogênea, dada a disponibilidade de material e as condições de relevo e tipos de solo no Brasil, são as mais utilizadas. Além disso, o autor também afirma que a construção de barragens de terra é favorecida pelo fato de que podem ser construídas sobre solos mais moles, uma vez que permitem fundações mais deformáveis quando comparadas a barragens de concreto, por exemplo.

Existe uma certa variabilidade no tipo de barragem de terra, que poderá ser homogêneo ou zonado.

a) Homogêneo: composto de uma única espécie de material, excluindo-se a proteção dos taludes. Nesse caso, o material necessita ser suficientemente impermeável, para formar uma barreira adequada contra a água, e os taludes precisam ser relativamente suaves, para uma estabilidade adequada:

b) Zonado: 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.

## 2.3. Análise de Fluxo

### 2.3.1. Equações Fundamentais

Em se tratando de barragens de terra, o estudo das condições de fluxo de água, tanto pela barragem em si, quanto pela fundação é primordial para o estudo adequado da mecânica dos solos nessas obras de terra.

Bernoulli (1738) *apud* DAS (2007), tratando do estudo da mecânica dos fluidos, definiu como a carga total em um ponto submerso a composição de três parcelas fundamentais: carga piezométrica, carga cinética e carga altimétrica, conforme descrito na Equação 1.

$$H = H_{\text{alt}} + H_{\text{piez}} + H_{\text{cin}} \quad (1)$$

Onde:

$H$  = Carga total em determinado ponto do fluido;

$H_{\text{alt}}$  = carga altimétrica;

$H_{\text{piez}}$  = carga piezométrica;

$H_{\text{cin}}$  = carga cinética.

Consoante afirma Das (2007), se a equação de Bernoulli for aplicada ao fluxo de água em solo poroso, o termo de carga cinética é desprezível, devido às baixas velocidades de percolação nesse meio.

Darcy (1856), em seus estudos de percolação de água em solos saturados, desenvolveu uma equação que descreve a relação entre a velocidade de percolação e o gradiente hidráulico. Nas suas observações desse comportamento, estabelece o conceito de condutividade hidráulica em solos. A Equação 2 descreve a velocidade de escoamento como proporcional ao gradiente hidráulico.

$$v = k i \quad (2)$$

Onde:

$v$  = velocidade de percolação;

$k$  = constante de condutividade hidráulica;

$i$  = gradiente hidráulico.

O gradiente hidráulico é definido por Darcy (1856) como a perda de carga total de um ponto a outro em relação à distância entre esses pontos de análise, conforme mostra a Equação 3.

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_f - H_i}{L} \quad (3)$$

Onde:

$i$  = Gradiente hidráulico;

$\Delta H$  = Diferença de cargas totais entre dois pontos;

$L$  = Distância entre pontos de análise.

A condutividade hidráulica, por sua vez, é usualmente expressa em m/s no Sistema Internacional de Unidades, SI, e sua magnitude depende de parâmetros tanto hidráulicos, como viscosidade do fluido, quanto geotécnicos, como distribuição granulométrica, índices de vazios, rugosidade das partículas minerais e grau de saturação do solo (DAS, 2007).

Das (2007) afirma, ainda, que, em estruturas geotécnicas, contudo, os materiais não têm suas propriedades se comportando igualmente em todas as direções, são considerados anisotrópicos, em que os parâmetros geotécnicos, em especial, a condutividade hidráulica, podem variar sensivelmente de acordo com a direção do fluxo de percolação.

Al-Tabbaa e Wood (1987) realizaram ensaios para obter resultados conclusivos a respeito de variações de anisotropia em solos adensados, observando o comportamento da razão de anisotropia, quociente entre condutividade vertical e horizontal. Três conclusões importantes são depreendidas desse estudo, a saber:

- a) Para condições de compactação estática, o valor de  $k_v/k_h$  diminui com o aumento do índice de vazios;
- b) Para areias puras, a razão de anisotropia é 1, onde o índice de vazios ( $e$ ) é igual ao índice de vazios máximo ( $e_{\max}$ );
- c) Para areia, quando  $e < e_{\max}$ , o valor de  $k_v/k_h$  é maior que 1, quando as amostras são compactadas de modo unidirecional e estático.

### 2.3.2. Rede de Fluxo

Das (2007) considera que o fluxo em solos saturados, contudo, na maioria dos casos de obras de terra, não se dá em uma única direção, nem ocorre de maneira uniforme ao longo da seção transversal em que ocorre o fluxo. Nessas situações de modelagem são utilizados os conceitos de rede de fluxo.

As redes de fluxo são obtidas a partir da combinação da lei de Darcy com a conservação da vazão total no maciço, descrita na Equação 4 abaixo.

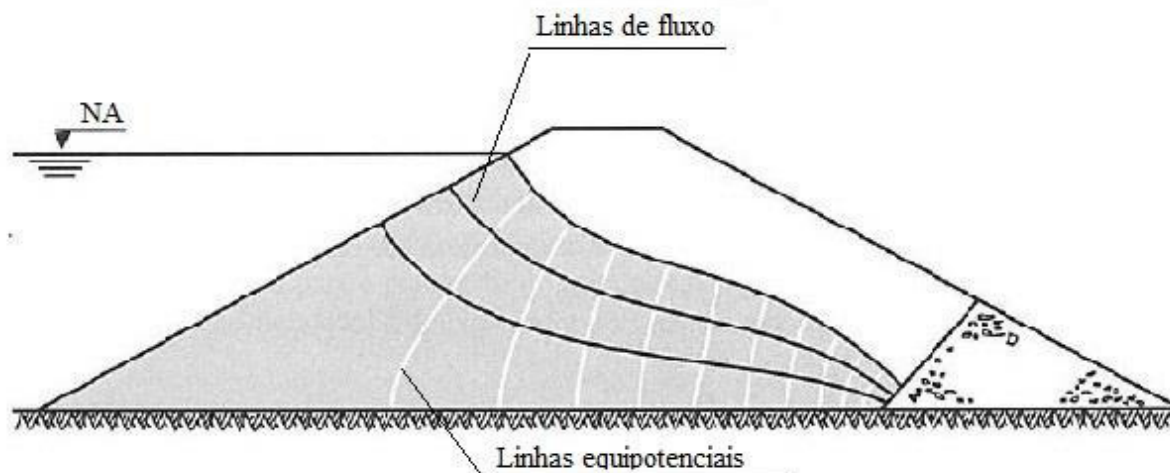
$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

Das (2007) define as redes de fluxo, para materiais isotrópicos, como uma representação gráfica de duas famílias de curvas ortogonais entre si, que representam as soluções gráficas para Equação de Laplace. Essa representação por Laplace é baseada na hipótese de que o solo não sofre variações de volume durante o processo de percolação e que, tanto a água, quanto os solos são considerados fluidos e elementos incompressíveis, respectivamente. A equação de Laplace para percolação em duas dimensões (x,y) em um meio homogêneo e isotrópico é mostrada na Equação 5.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

As redes de fluxo são formadas pelas linhas de fluxo e linhas equipotenciais. As linhas de fluxo são descrições geométricas do caminho percorrido pela água através da obra de terra. As linhas equipotenciais, por sua vez, são lugares geométricos, descritos graficamente, onde as cargas totais medidas são iguais. As redes de fluxo são utilizadas para o cálculo das vazões de percolação, a fim de se definir os gradientes hidráulicos e de se estimar as poropressões utilizadas na análise de estabilidade de taludes. A rede de fluxo, portanto, deve ser determinada de maneira conveniente e monitorada após a conclusão da obra geotécnica. Esse monitoramento das poropressões é fundamental, pois é um indicativo do quão realístico pode ser a análise de estabilidade de taludes, uma vez que essa é bastante influenciada pelas condições de fluxo vigentes na barragem. A Figura 3 mostra uma representação da rede de fluxo dentro do maciço de uma barragem com suas linhas de fluxo e linhas equipotenciais.

Figura 3 - Representação esquemática das linhas de fluxo e equipotenciais em uma barragem (fonte: Massad, 2010)



Uma vez que as redes de fluxo podem ser utilizadas para encontrar valores de gradientes hidráulicos na região analisada, Terzaghi (1922) *apud* Das (2007) desenvolveu estudos e ensaios de percolação envolvendo a força de levantamento de uma massa de solo a jusante de uma região com diferenças de cargas hidrostáticas. Essa força é provocada pela percolação proveniente da região de montante para jusante e gera um levantamento de solo na região a jusante, ocasionando uma ruptura da estrutura de contenção de água, podendo ser cortinas impermeabilizantes, o maciço de terra de barragens, ou mesmo o solo de fundação dessas estruturas. Posteriormente, esse comportamento de levantamento de massa de solo pela força de percolação, observado por Terzaghi (1922), foi denominado de erosão interna.

Harza (1935) posteriormente desenvolveu estudos também no sentido de segurança de estruturas hidráulicas contra o levantamento observado por Terzaghi (1922) e apresentou o conceito de fator de segurança para rompimento hidráulico, expresso na Equação 6.

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{saída}} \quad (6)$$

Onde:

$i_{cr}$  = Gradiente hidráulico crítico, determinado a partir de uma rede de fluxo;

$i_{saída}$  = Gradiente hidráulico de saída;

Conforme Dantas Neto (2013), uma análise do comportamento de estabilidade de uma barragem passa pela avaliação da situação de ruptura hidráulica, pois a informação dos gradientes hidráulicos, obtidas pela determinação das redes de fluxo, pode prever e, por conseguinte, prevenir possíveis comportamentos de erosão regressiva dentro do maciço da barragem, conhecidos como *piping*. Além disso, uma eventual ruptura hidráulica no solo de fundação pode reduzir sensivelmente a capacidade de sustentação dessa estrutura, evidenciando

a importância dessa avaliação em estudos de estabilidades.

## **2.4. Análise de Estabilidade**

A análise de estabilidade é um assunto de grande complexidade e amplitude. Lacasse e Nadim (1996, apud COSTA, 2005) afirmam que diversas variáveis, como estratificação do solo, representatividade das amostras, determinação de parâmetros geotécnicos, percolação no talude, entre outros, contribuem para dificuldade na assertividade dos cálculos e precisão dos resultados.

Gerscovich (2012) *apud* Araújo (2013) afirma que a análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de que ocorra um escorregamento de massa de solo em um talude natural ou artificial. Essa avaliação consiste no cálculo de um fator de segurança para a estrutura geotécnica analisada, comparando a tensão de cisalhamento mobilizada com a resistência ao cisalhamento oferecida pela superfície de solo.

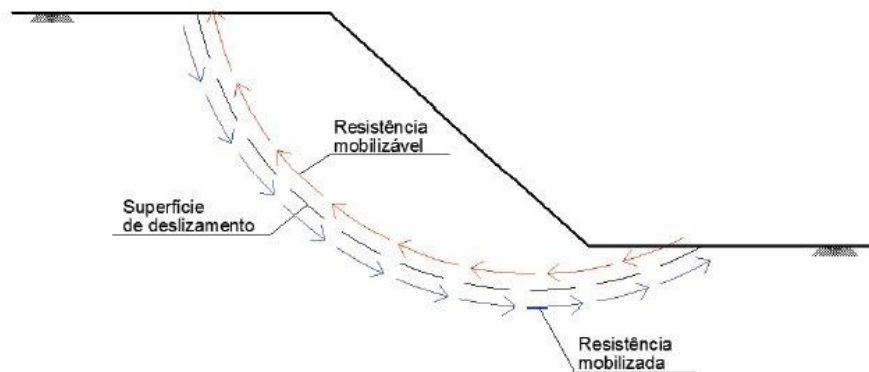
### **2.4.1. Métodos de Análise**

Segundo SILVA (2011), a Teoria de Equilíbrio Limite é a filosofia de cálculo base dos métodos de equilíbrio limite conhecidos na bibliografia. É utilizada para determinar o equilíbrio de uma massa de solo, cuja ruptura ocorre ao longo de uma superfície plana, circular, poligonal ou mista, que pode passar acima ou abaixo do pé de talude, conforme mostra a Figura 4.

Massad (2010) afirma que os Métodos do Equilíbrio-Limite partem dos seguintes pressupostos:

- a) Os solos se comportam como material rígido-plástico;
- b) A análise estática ocorre até a iminência de ruptura;
- c) O fator de segurança (FS) é constante na superfície de ruptura, não se considerando a existência de ruptura progressiva.

Figura 4 - Representação das superfícies de ruptura e tensões nela atuantes (fonte: SILVA 2011)



O método para determinação da situação de estabilidade de uma obra de terra é por meio do cálculo do fator de segurança, descrito na Equação 7.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c + \sigma \operatorname{tg} \phi}{\tau_d} \quad (7)$$

Onde:

$\tau_f$  = resistência ao cisalhamento máxima suportada pelo solo (critério de resistência Mohr-Coulomb) (kPa);

$\tau_d$  = tensão de cisalhamento solicitada ao solo pela massa da de solo (kPa);

$c$  = coesão do solo (Pa)

$\sigma$  = tensão normal (Pa)

$\phi$  = ângulo de atrito interno

Pinto (2006) considera que o ângulo de atrito pode ser explicado como análogo ao coeficiente de atrito em situações de deslizamento de um corpo sobre uma superfície. Ele pode ser entendido como o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem que ocorra deslizamento. Atingido esse ângulo a componente tangencial é maior que a resistência ao deslizamento, que depende da componente normal.

A equação que trata de tensão efetiva no solo é análoga a da envoltória de tensões totais, porém com aplicação dos parâmetros geotécnicos baseados em tensão efetivas. Com isso, Das (2007) afirma que, para que haja segurança quanto à resistência geotécnica do material empregado, a solicitação máxima na estrutura ( $\tau_d$ ) não deve igualar ou superar os limites determinados pelo Critério de Ruptura Mohr-Coulomb ( $\tau_f$ ). Caso contrário, a estrutura é considerada instável e ações emergenciais serão necessárias para contornar a situação.

Uma estrutura é considerada estável para fins de projeto quando seu fator de segurança é igual ou superior ao fator de segurança mínimo referencial. O Corpo de Engenheiros do Exército Americano (U.S. Army Corps of Engineers, 2003) recomenda os valores constantes na Tabela 2 para referência de fatores mínimos de segurança.

Tabela 2 - Fatores de Segurança para verificação da estabilidade

Condição de solicitação	Talude	FS <sub>mínimo</sub>
Final da construção	Montante/Jusante	1,3
Regime Permanente	Montante/Jusante	1,5
Rebaixamento do reservatório	Montante	1,1

Fonte: U.S. Army Corps of Engineers, 2003

Segundo Gomes (2011) a Teoria de Equilíbrio Limite é aplicada a vários tipos de análise de estabilidade que são comumente realizados pela aplicação de um dos três seguintes métodos

- a) Método geral – as condições de equilíbrio são aplicadas a toda a massa de solo potencialmente instável, cujo comportamento se admite ser o de um corpo rígido;
- b) Método das fatias – a massa de solo potencialmente instável é dividida em fatias, geralmente verticais, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada uma das fatias isoladamente;
- c) Método das cunhas – a massa de solo potencialmente instável, dada a sua configuração e características resistentes, é dividida em cunhas, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada zona isoladamente.

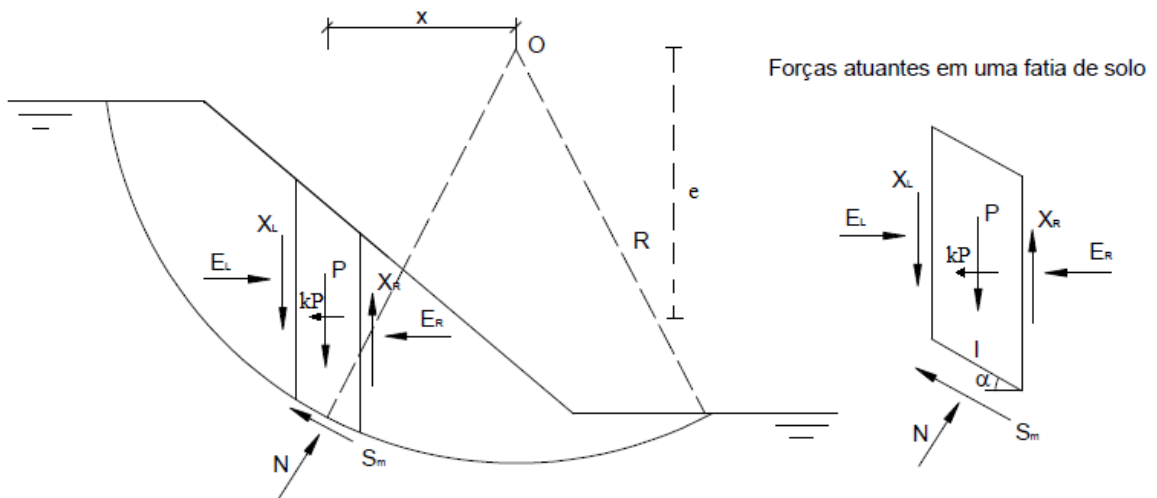
Dos métodos embasados na teoria do equilíbrio limite, que aplicam a metodologia das fatias, estão Método de Fellenius, Janbu (simplificado), Spencer, Morgenstern-Pricee e, dentre outros, está o Método de Bishop Modificado (1955). Uma vez que esse estudo utilizará esse último, faz-se necessário maior aprofundamento no referido método.

#### 2.4.1.1. Método de Bishop Modificado

Bishop (1955) propôs um método de cálculo de fator de segurança, embasado no método das fatias e iterativo, com adaptações nas considerações das forças entre fatias.

O método de Bishop Simplificado assume que são iguais as forças de cisalhamento entre as fatias e satisfaz apenas o equilíbrio de momentos (de onde deriva o fator de segurança). A Equação 8 mostra a formulação do fator de segurança para Bishop simplificado. A Figura 5 mostra a atuação de forças solicitantes e resistentes ao deslizamento.

Figura 5 - Representação das grandezas atuantes no método das fatias (fonte: Araújo, 2013)



$$FS = \frac{\sum \left\{ c'LR + \left[ \left( \frac{P - \frac{c' \cdot L \cdot \text{sen} \alpha - u \cdot L \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{tg} \phi'}{FS}}{\cos \alpha + \frac{\text{sen} \alpha \cdot \text{tg} \phi'}{FS}} \right) - uL \right] R \text{tg} \phi' \right\}}{\sum Px - \sum \left( \frac{P - \frac{c' \cdot L \cdot \text{sen} \alpha - u \cdot L \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{tg} \phi'}{FS}}{\cos \alpha + \frac{\text{sen} \alpha \cdot \text{tg} \phi'}{FS}} \right) f + \sum kPe} \quad (8)$$

Onde:

$c'$  = coesão efetiva (kPa);

$\phi'$  = ângulo de atrito interno;

$P$  = Peso da fatia (kN);

$\alpha$  = ângulo entre eixo horizontal e eixo tangente à superfície de ruptura;

$R$  = raio da superfície circular (m);

$L$  = comprimento da superfície de deslizamento (m);

$k$  = coeficiente de componente horizontal de força;

$u$  = poropressão atuante no solo (kPa)

$x, e, f$  = distâncias perpendiculares à linha de ação das forças geradoras de momentos.

A poropressão, por sua vez, é calculada pela Equação 9.

$$u = H_{\text{piez}} \gamma_w \quad (9)$$

Onde:

$u$  = poro-pressão atuante no solo (N/m<sup>2</sup>)

$H_{\text{piez}}$  = carga piezométrica, medida em piezômetro (m)

$\gamma_w$  = peso específico da água (N/m<sup>3</sup>)

Observando nas parcelas de momentos solicitantes, é importante notar que a componente  $kPa$  é o momento gerado em decorrência da ocorrência de forças horizontais, como forças provenientes de acelerações sísmicas.

## 2.4.2. Ação Sísmica

### 2.4.2.1. Análise de estabilidade pseudo-estática

Fell et al. (2005) consideram que as solicitações devidas às ações sísmicas em barragens de aterro são em geral consideradas de pequena duração envolvendo movimentos verticais e horizontais dos materiais constituintes das barragens. Estes movimentos provocam deformações consideráveis levando assim a uma grande diminuição das propriedades dos materiais em termos de resistência ao corte. Estas ações aliadas às ações existentes na barragem, podem originar assentamentos e fissurações especialmente na zona de coroamento, instabilidade nos paramentos de montante e jusante, redução da cota de coroamento, recalques diferenciais nas falhas existentes na fundação caso ocorram as mesmas e liquefação sísmica.

Para análise de estabilidade considerando forças horizontais provenientes de acelerações sísmicas, Koppula (1984) desenvolveu estudos com argila saturada para cálculo da parcela de forças horizontais decorrentes da ação de sismos. A Equação 10 define o coeficiente sísmico.

$$k_h = a_h/g \quad (10)$$

Onde:

$k_h$  = coeficiente de aceleração horizontal;

$a_h$  = componente horizontal da aceleração sísmica ( $m/s^2$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).

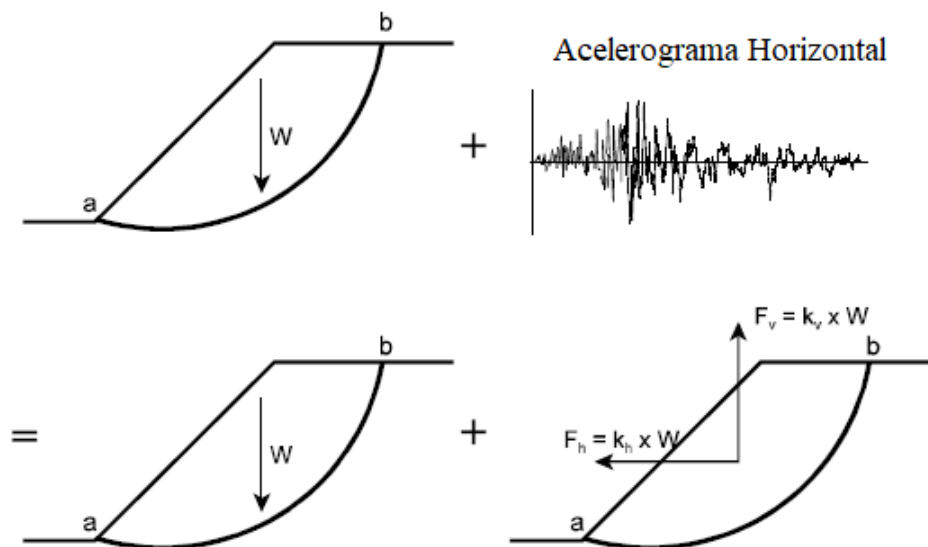
Essa abordagem de Koppula (1984) é uma adaptação do método do equilíbrio limite para a situação de cargas dinâmicas e acelerações em curtos períodos de tempo. Esses estudos viabilizaram o surgimento das chamadas análises de estabilidade pseudo-estáticas.

A análise pseudo-estática é conservativa no que diz respeito às seguintes suposições:

- A continuidade do carregamento sísmico (acelerações constantes),
- A desconsideração do amortecimento e da energia absorvida pela barragem e fundação,
- A aplicação simultânea das acelerações horizontais e verticais máximas;
- A amplificação das vibrações na barragem (que pode ser importante mesmo numa pequena barragem).

Segundo Koppula (1984) o momento solicitante por sismos é resultado do produto do coeficiente de aceleração horizontal e força peso da fatia multiplicado pela distância perpendicular ao centro geométrico da superfície semicircular de deslizamento. Assim, ao momento solicitante de cisalhamento, é adicionada a parcela de momento decorrente de ação sísmica, conforme é mostrado na Equação 8. A Figura 6 trata da representação de combinação de efeitos solicitantes ao deslizamento

Figura 6 - Combinação de esforços solicitantes no método pseudo-estático (fonte: MELO et al., 2004)



Duarte (2016) afirma que o método pseudo-estático se embasa numa análise de dimensionamento sísmico, através de um problema de estabilidade de taludes recorrendo a soluções de equilíbrio limite. Desta forma, recorre-se ao equilíbrio limite estático das forças atuantes na cunha de solo em ruptura, considerando a força sísmica equivalente constante ao

longo do corpo da barragem de aterro e admitindo que a resistência ao cisalhamento é totalmente mobilizada ao longo da superfície de deslizamento.

Melo et al. (2004) considera que a correta escolha do coeficiente de aceleração sísmica é o mais importante e difícil aspecto da análise de estabilidade pseudo-estática. Em teoria, o coeficiente sísmico deve representar as forças inerciais induzidas nas massas de terra pelas acelerações dinâmicas provocadas pela ação de um sismo.

O coeficiente de aceleração sísmica escolhido deve, portanto, representar a parcela de forças solicitantes da massa de solo favorável ao deslocamento, a fim de que se obtenha valores de forças coerentes com as acelerações sísmicas registradas na região.

Terzaghi (1950) *apud* Nadi et al. (2014), Corps of Engineers (1982) *apud* Nadi et al. (2014), Seed (1979) *apud* Nadi et al. (2014), Marcuson (1983) *apud* Nadi et al. (2014) e Hynes-Griffin (1984) *apud* Nadi et al. (2014) recomendam valores de referência para adoção dos coeficientes sísmicos horizontais, os valores sugeridos por cada autor são exposto na Tabela 3, em conjunto com os respectivos fatores de segurança recomendados.

Tabela 3 - Coeficientes sísmicos (kh) recomendados por autor, valorem em g (9,8 m/s<sup>2</sup>)

Coef. sísmico horizontal (g)	Descrição	Autor	FS <sub>mínimo</sub>
0,1	“Severos” abalos sísmicos (MM=IX)	Terzaghi (1950)	>1
0,2	“Violentos” abalos sísmicos (MM = X)	Terzaghi (1950)	>1
0,5	“Catastróficos” abalos sísmicos (MM = XI)	Terzaghi (1950)	>1
0,1	“Maiores” abalos sísmicos	Corps of Engineers (1982)	>1
0,15	“Grandes” abalos sísmicos	Corps of Engineers (1982)	>1
0,1 – 0,15	Sismos genéricos	Seed (1979)	> 1,15
0,33 a 0,5 da aceleração horizontal	Sismos genéricos	Marcuson (1983)	>1
0,5 da aceleração horizontal	Sismos genéricos	Hynes-Griffin (1984)	>1

Fonte: Adaptado de Nadi et al. (2014).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Introdução**

O estudo de estabilidade, considerando os efeitos comprometedores de ações sísmicas à estabilidade global de uma barragem, proposto neste trabalho, consistiu em um estudo de caso por modelagem das condições hidráulicas e geotécnicas na Barragem de Aracoiaba, localizada no município de mesmo nome, na região metropolitana de Fortaleza, Ceará.

Conforme apresentado no capítulo anterior, as maiores incidências de eventos sísmicos registrados no estado do Ceará apontaram aqueles ocorridos nas regiões noroeste do estado (próximos à região de Sobral) e metropolitana. A barragem selecionada para modelagem deste trabalho deveria estar localizada em uma dessas regiões, bem como dispor de acervo técnico consistente para levantamento de dados. Além disso, era necessário que houvesse, nessa estrutura, atividade regular de monitoramento por instrumentação, uma vez que seus dados seriam fundamentais à retroanálise das condições de fluxo. Considerando todos esses critérios de escolha, a Barragem de Aracoiaba foi considerada a melhor alternativa para elaboração de uma análise de estabilidade que considera os efeitos de ação sísmica em seu comportamento.

#### **3.2. Metodologia Geral**

A metodologia empregada na elaboração desse estudo consiste na modelagem das condições estruturais da Barragem Aracoiaba, localizada no estado do Ceará, fazendo-se uso do software Slide, desenvolvido pela Rocscience™.

A partir dos parâmetros hidráulicos e geotécnicos obtidos por ensaios de caracterização, realizados à época da concepção do projeto executivo dessa estrutura, buscou-se realizar uma análise de estabilidade da seção principal da estrutura a fim de se recriar as condições e critérios considerados na elaboração do projeto da barragem.

Após essa primeira modelagem com dados de projeto, foram levantadas informações de instrumentação, colhidas em campo para realização da retroanálise de fluxo e estabilidade. Essa etapa visa a calibração do modelo, que antes fora condicionado pelos parâmetros de projeto, com os aspectos constitutivos da barragem em condições reais observadas em campo.

Além disso, em cada etapa de análise descrita acima, tanto na de análise com condicionantes de projeto, quanto na de retroanálise do fluxo, foram obtidos resultados de estabilidade, considerando uma aceleração sísmica para fins de representação do comprometimento da estabilidade global da estrutura na ocorrência de algum evento sísmico.

Após a realização da modelagem e o cálculo dos valores de fator de segurança para cada caso, é realizado um estudo comparativo entre os resultados gerados a fim de se observar comportamentos e identificar tendências por meio dos dados obtidos. Por fim, um apanhado geral conclusivo a respeito dos impactos de atividade sísmica na estabilidade da estrutura, bem como valores limites de nível freático são apresentados posteriormente em discussão dos resultados do estudo.

A seguir são explicitadas o detalhamento das fases de estudo consideradas na elaboração desse trabalho

a) Levantamento de Projetos

A etapa inicial do estudo consiste no levantamento de quais projetos constam na documentação e que nível de profundidade eles abrangem. É fundamental para boa qualidade do estudo de estabilidade a presença de projetos não só no nível básico, mas de nível executivo e “As Built”. Isso é necessário para que se tenha conhecimento da forma como a obra sucedeu ou quais modificações na fase de execução ela sofreu.

A Barragem de Aracoiaba dispõe de estudos preliminares hidrológicos e geotécnicos, projetos executivos, além de projetos e relatórios As Built, fatores esses decisivos para a escolha dessa estrutura. Além de dados de projetos, foi observada a quantidade dados de instrumentação colhidas ao longo da história de monitoramento da estrutura, só uma amostragem robusta é possível avaliar a qualidade das leituras.

b) Análise dos dados de instrumentação

Fase de aferição de critérios análise sobre a integridade, confiabilidade e consistência dos dados de instrumentação coletados na etapa anterior. É corriqueiro encontrar medidas de piezômetros atípicas dentro de uma série, provenientes de erros de leitura, descaso de anotação ou qualquer outra falha operacional. É função dessa etapa a identificação de tais leituras anômalas e instrumentos comprometidos, para que se tenha a correção das medidas e, por conseguinte, da modelagem.

c) Escolha da seção instrumentada

Etapa de análise e escolha de a partir de quais seções da barragem será feito o estudo de estabilidade pseudo-estática. Deve ser levado em consideração na escolha da seção fatores

como altura máxima da barragem, altura da seção escolhida, representatividade da seção e se essa é instrumentada. Sobre a instrumentação, a seção escolhida deve possuir integridade dos equipamentos de instrumentação, tempo de coleta de leituras e consistência dos dados medidos.

#### d) Análise de Fluxo e Estabilidade

Etapa de elaboração de estudo de fluxo com dados de projeto. Para esta etapa, faz-se o uso dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos levantados em projeto para realização da modelagem. Essa análise se dará através de simulações numéricas pelo software Slide 6.0, desenvolvido pela Rocscience™.

Massad (2010) afirma que em uma barragem em operação, funcionando em nível de armazenamento máximo durante cinco anos, houve tempo suficiente não só para que a rede de fluxo em regime permanente se instale no maciço, como também para que o processo de adensamento se consolide. Além disso, o talude crítico sempre é o de jusante, uma vez que o talude de montante se encontra submerso e as forças de percolação agem em sentidos favoráveis à estabilidade. Nessa etapa da modelagem, portanto, é calculado o fator de segurança para a estabilidade pseudo-estática para os taludes de jusante, sendo considerada a estrutura em regime permanente de operação, uma vez que a Barragem de Aracoiaba já funciona há 16 anos. Além disso, o carregamento adotado na estrutura foi considerado como a cheia máxima de projeto prevista para bacia hidráulica da barragem.

Nessa etapa é calculado o fator de segurança considerando uma situação estática (sem ocorrência de sismos) e em seguida considerando uma situação pseudo-estática, com ocorrências de acelerações sísmica no comprometimento da estabilidade global da estrutura. Para essa segunda situação, são adotados os coeficientes de aceleração sísmica horizontal e vertical, baseado em recomendações da literatura e com base no histórico de ocorrências desses eventos na região.

#### e) Retroanálise de fluxo e estabilidade

Nessa etapa, ocorre a calibração do modelo inicial de análise de fluxo e estabilidade por meio da reconfiguração de parâmetros hidráulicos uma vez levantados, a fim de que as medidas de poropressões coletadas em campo sejam representadas no modelo, pois, dessa forma, é possível admitir que o modelo representa as condições da rede de fluxo reais de campo. A retroanálise é feita por alterações no coeficiente de permeabilidade  $K$  e na anisotropia do solo constituinte do maciço.

#### f) Comparação dos resultados

De posse dos resultados de modelagem, com condicionantes de projeto e com

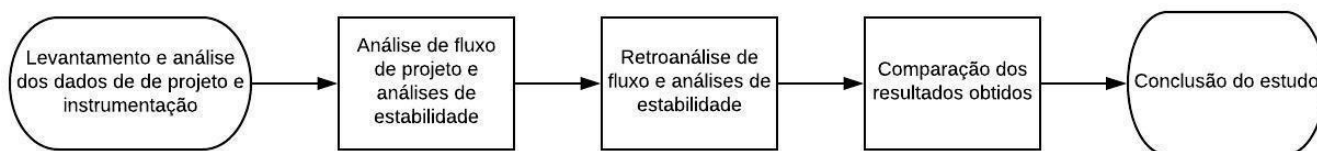
condicionantes de campo, na análise e retroanálise, regime sísmico e regime estático, busca-se nessa etapa do estudo, o estabelecimento de um paralelo entre as cada uma dessas situações, viabilizando a discussão dos fatores que levaram às defasagens de valores ou possíveis incongruências de resultados.

#### g) Discussão de Resultados

Nessa etapa final, há a busca por correlações entre os resultados de estabilidades obtidos com os dados colhidos em campo, a fim de que se possa gerar informações que contribuam para gestão de segurança da Barragem de Aracoiaba.

Na figura 7 é mostrado um fluxograma sobre as etapas que se constituirão o estudo de estabilidade deste trabalho

Figura 7 - Fluxograma de etapas de estudo



Fonte: Autor, 2018

### 3.3. Apresentação do Software Slide™

O software é um programa computacional para uso comercial, com licença reservada à Universidade Federal do Ceará, UFC. É utilizado no cálculo de estabilidade de taludes por Equilíbrio Limite em 2D. Conforme descreve Nogueira (2016), o programa opera em ambiente Windows, com habilitação para construção de modelos geomecânicos, com possibilidade de importação de desenhos de programas como o AutoCad. A análise determinística, seja drenada ou não drenada, é feita por pesquisas em superfície circular ou não circular. A pesquisa do círculo crítico é feita plotando-se diversos círculos, em quantidade definidas por uma malha formada por diversos pontos que representam os centros dos círculos, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos.

Ainda de acordo com Nogueira (2016), de cada ponto podem ser construídos círculos, os quais não podem encostar o contorno externo direito, esquerdo ou de fundo do modelo. Esses contornos limitam o raio máximo dos círculos. A variação do raio em cada ponto é limitada pelo raio máximo e pelo raio mínimo. O usuário pode estabelecer a quantidade de incrementos no raio dentro da faixa de máximo e mínimo, o que vai definir a quantidade de

círculos pesquisados.

### **3.4. Barragem selecionada para estudo**

Analisando a disponibilidade da COGERH de documentos necessários a este trabalho, bem como considerando a proximidade da barragem a zonas de históricas atividades sísmicas, tomou-se como objeto do estudo de estabilidade pseudo-estática a Barragem de Aracoiaba, localizada no município de mesmo nome no estado do Ceará. O rio afluente principal é o rio Aracoiaba, cujo represamento tem por finalidade o abastecimento da cidade homônima, situada a 70 km de Fortaleza.

Conforme define SRH (1998), a obra da barragem teve início em setembro de 2000 e foi concluída em junho de 2002, por um consórcio das empresas GEAODINÂMICA e COBA para desenvolver o projeto executivo da Barragem de Aracoiaba, o Plano de Aproveitamento do Reservatório e o Projeto Executivo das Adutoras de Baturité e Aracoiaba, sob regime de contratação pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará – SRH. Com uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 170 milhões de metros cúbicos de água, a barragem de terra se insere politicamente no Plano Estadual de Recursos Hídricos, criado em 1989, com o intuito de mitigar os efeitos desfavoráveis da região semiárida do estado do Ceará.

A barragem se situa logo a jusante da confluência do rio Aracoiaba com o riacho do Susto, o boqueirão se situa a montante da cidade de Varzantes. A Figura 8 mostra a localização da barragem no estado do Ceará.

Segundo SRH (1998), a escolha por uma barragem homogênea se deveu a três características principais, de acordo com o projeto executivo.

- a) Características geológico-geotécnicas da fundação;
- b) Necessidade de minimizar o volume de materiais pétreos, uma vez que os volumes de rochas para escavação não são muito expressivos;
- c) Abundância de materiais apropriados para execução de maciços impermeáveis

O projeto do vertedouro dimensiona a estrutura hidráulica de concreto para um período de retorno de 1.000 anos e verifica a sua eficiência para uma cheia de 10000 anos. A estrutura está locada na ombreira direita do barramento. A Tabela 4 mostra o das características técnicas da barragem.

Figura 8 - Localização da barragem no estado do Ceará (fonte: Google Earth)



Tabela 4 -Dados Técnicos de Projeto da Barragem de Aracoiaba

Tipo:	Terra com seção homogênea
Altura máxima:	35,00 m
Cota do coroamento:	100,00 m
Extensão pelo coroamento:	2.000,00 m
Largura do coroamento	7,00 m
Volume total do maciço:	1.680.000,00 m <sup>3</sup>
Talude de Montante:	1 (V) : 2 (H) da cota 100,00 até a cota 95,00 1 (V) : 2,5 (H) da 95,00 até terreno natural
Talude de Jusante:	1 (V) : 2 (H) bermas nas cotas 91,00 e 82,00 com 3,0m de largura e na cota 73,00m com 5,0m de largura.
Cota Soleira do Vertedouro	95,00 m

Fonte: SRH, 2003

Conforme apresentado nos relatórios de segurança de barragens, elaborados pela COGERH (2015), não foi encontrada nenhuma grande intervenção de reparo, ou histórico, de anomalias pertinentes a destaque neste trabalho. Desde sua concepção até a presente data, a maior anomalia encontrada foi um recalque diferencial no coroamento, formando um pequeno afundamento na crista da barragem em 2015. Em inspeções realizadas no local no atual ano de 2018, não foram registradas anomalias significativas sobre essa barragem. A Figura 9 mostra o registro da anomalia de 2015.

Figura 9 - Registro de afundamento no coroamento em Aracoiaba, 2015 (Fonte: COGERH, 2015)



### **3.5. Ensaios de caracterização dos materiais constituintes de Barragem Aracoiaba**

Necessários ao conhecimento e à caracterização dos solos utilizados, bem como, prerrogativas para elaboração do projeto, os ensaios descritos a seguir fornecem os parâmetros hidráulicos e geotécnicos necessários para modelagem do presente estudo. Os referidos ensaios foram realizados na fase de prospecção e de estudos básicos do projeto executivo da Barragem de Aracoiaba, conforme SRH (1997), relatório geral descritivo em projeto executivo SRH (1998) e Relatório As Built, SRH (2003), e aqui são apresentados para compor os parâmetros

iniciais geotécnicos e hidráulicos para elaboração das análises de estabilidade.

### 3.5.1. Localização e composição das jazidas de empréstimo

Para realização dos ensaios geotécnicos necessários à caracterização dos materiais de empréstimos e determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e de compressibilidade, consoante SRH (1997) foram coletadas amostras deformadas durante a execução das investigações de campo de três jazidas principais: EMP 01, EMP 02, EMP 04, localizados próximos às ombreiras, dentro da área do reservatório.

A Jazida EMP 01 e EMP 04 foram utilizadas, segundo relatório As Built, SRH (2003), como provedoras de material para o núcleo da barragem. A jazida EMP 01 localiza-se a 1,5 km do eixo barrável e contém um volume aproximado de 1.160.000 m<sup>3</sup>, com solos tipo SC (areia argilosa), conforme classificação do SUCS ( Sistema Unificado de Classificação dos Solos), até uma média de 4 metros de profundidade e solo GC (pedregulho argiloso) na base da reserva de exploração. A jazida EMP 04, por sua vez dista 2,5 km do eixo barrável (boqueirão) com um volume estimado 1 700 000 m<sup>3</sup> de solo.

Os resultados dos ensaios de caracterização granulométrica e de Limites de Atterberg destas duas jazidas são disponibilizados pelo projeto executivo, conforme SRH (1998) e mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados médios de ensaios de caracterização

<b>Parâmetros</b>	<b>EMP-01</b>	<b>EMP-04</b>
Umidade natural (%)	8	12,3
Limite de liquidez (%)	25	26,5
Índice de plasticidade (%)	8	8
Umidade ótima (%)	13	12,8
$\rho_s$ max (g/cm <sup>3</sup> )	1,88	1,88
% menor que 0,074 mm	45	45

Fonte: SRH (1998)

Como se observa, os valores de LL e IP tiveram pouca variação entre os empréstimos, com valores médios entre 25% e 26,5% para o LL e 8% para o IP. Na curva de plasticidade, os pontos formam uma região densa acima da linha “A” e à esquerda da linha “B”.

Para aproveitamento de rochas, pedregulhos e matacões na composição do enrocamentos e drenos, foram prospectados locais para pedreira, denominado Pedreira 01 e 02. A primeira jazida dista 900 m a montante do eixo da barragem e possuía horizontes de 8 metros

de rocha alterada. A segunda, por sua vez, ficava a 1 km a montante de distância do eixo da barragem com um volume estimado de 100.000 m<sup>3</sup> de rocha. Tais rochas são compostas principalmente de quartzo e quartzito

O material granular utilizado em filtros, transições e agregados para confecção do concreto foi retirado do banco de areia grossa do leito do rio Aracoiaba e do rio Choró, este último distante 3 km pela estrada que liga as localidades de Varzeantes e Ideal

### **3.5.2. Sondagem a Percussão e Trado (SPT)**

Consiste em uma sondagem amplamente utilizada na prática de engenharia geotécnica, cuja escavação feita a trado é interrompida a cada metro para cravação de um amostrador padrão com golpes sucessivos de um peso de 65 kG, a uma altura de 75 cm do amostrador cilíndrico metálico. Registra-se o número de golpes necessários para penetrar o amostrador em 45 cm no solo, dividido em 3 parcelas de 15 cm de penetração cada. A resistência a penetração,  $N_{spt}$ , da camada é determinada pelo número de golpes para penetração dos últimos 30 cm no solo.

Eventualmente, durante a execução da sondagem no solo, é necessário ultrapassar horizontes de rocha que surgem ao longo do furo e, nesses casos, faz-se necessário o uso de sondagens mistas, em que parte do trecho do furo é realizada por sondagens a percussão e trado e outra parte, por sondagens rotativas. (ABNT NBR 6484:2001)

Foram executadas, no total, 16 sondagens SPT ao longo do eixo barrável, totalizando 71,45 m de profundidades perfuradas e mais oito sondagens mistas na ombreira esquerda, pois seria a região do vertedouro. Na ombreira direita, foram realizadas duas sondagens mistas, enquanto que às margens do rio Aracoiaba, realizou-se mais duas sondagens mistas.

No processo de sondagem da fundação, foi identificado solo coluvionar em camadas superficiais até dois metros de profundidade, caracterizado como areia argilosa. De dois a 3 metros de profundidade, foi encontrado solo residual, constituído por uma areia argilosa. Além dos horizontes de colúvio e de solo residual, há gradações de rocha saprolítica alterada até se atingir rocha sã. Esse comportamento de espessuras de camadas de solo identificadas ocorre ao longo de todo o eixo barrável da barragem principal, com pequenas variações de espessuras das camadas de solos coluvionar e residual.

Na ombreira esquerda da barragem principal, a espessura da camada de solo residual e saprolito decresce à medida que se avança ao leito do rio, atingindo espessura máxima de 2 e 8 metros para os solos residuais e saprolíticos, respectivamente. Não foi identificada

presença de nível d'água na ombreira esquerda.

Nas regiões de leito do rio, há uma camada de um a três metros de areia argilosa, cuja resistência à penetração é de 5/30cm. Após essa camada, foi identificado solo aluvionar, com resistência de 6/30 a 15/30, com profundidades de 1 a 2 metros. Seguida a camada aluvionar, há pequena camada de saprolito, da ordem de 3 metros de profundidade, com resistência de penetração acima de 45/30. Após essa camada, já se nota a presença de rocha alterada, seguida por rocha sã do tipo migmatito-gnáissico.

Nota-se, portanto, o caráter de solo pouco profundo na fundação com grande influência dos afloramentos de rochas sã, características dos solos cristalinos da região.

### **3.5.3. Sondagens Rotativas**

Sondagem rotativa é o método de investigação geológico geotécnico que consiste no uso de um conjunto motomecanizado projetado para a obtenção de amostras de materiais rochosos, contínuas e com formato cilíndrico, através de ação perfurante dada basicamente por forças de penetração e rotação que, conjugadas, atuam com poder cortante. A amostra de rocha obtida é chamada de testemunho (WILSON, 1999).

A qualidade da rocha é indicada pelo RQD (Rock Quality Designation) e corresponde a percentagem de fragmentos maiores que dez centímetros obtidos durante a perfuração. Os parâmetros de resistência da rocha podem ser obtidos a partir do RQD, através da Classificação Geomecânica RMR proposta por Bieniawski, 1973. A Tabela 6 apresenta os valores de percentagem de recuperação para rochas classificadas como sã ou alterada nas seções de leito de rio e ombreira. É possível notar os altos valores de qualidade da rocha em localidades de leito de rio (estaca 43+16 e 46+4) e na ombreira direita (estaca 33 +11,4, e 33). A ombreira esquerda apresentou características de rocha mais fraturada, sendo necessário nessas regiões tratamento da rocha com injeção de caldas de cimento, a fim de melhorar a constituição da fundação.

Tabela 6 - Porcentagens de recuperação de rochas sãs e alteradas em seções de leito e ombreiras

Sondagem	Estaca	Prof. Solo (m)	Rocha Alterada (% recuperado)	Rocha Sã (% recuperado)
SR Sang 01	33 + 11,4	2,2 m	2,2 a 3,1 m – 89%	3,1 a 4 m – 100%
SRSang 02	33	-	0,0 a 3,5 m – 40%	3,5 a 4,2 m – 100%
PR 04	43 + 16,00	7,0	7 a 7,83 m – 93%	7,8 a 11,2 m > 90%
PR 08	46 + 4	6,00	6 a 7 m - 72%	7,0 a 15,0 m > 90%
PR 36	63 + 0,00	3,00	3 a 4,5 m -15%	6,0 a 13,0 m - 37%
PR 40	65 + 8,00	8,00	8 a 12,5 m - 24%	12,0 a 18,0 m 60-80%

Fonte: SRH, 2003.

#### 3.5.4. Ensaio de infiltração (Lefranc)

Wilson (1999) afirma que o ensaio de infiltração Lefranc consiste na medida da vazão, representada pelo volume d'água absorvido ou retirado, durante um intervalo de tempo, em função da aplicação de diferenciais de pressão induzida por colunas d'água, resultante da injeção ou da retirada (bombeamento) de água do furo. O ensaio pode ser realizado com cargas constantes ou variáveis.

Foram realizados um total de 38 ensaios de infiltração ao longo das ombreiras e eixo barrável para fins de definição dos parâmetros hidráulicos da fundação e do material onde será escavado o vertedouro. Foram realizados ensaios de infiltração com carga variável no material que comporá o núcleo da estrutura (EMP 01 e EMP 04), com ensaio de permeabilidade com carga variável e também nas amostras de solo que comporão os filtros e drenos da barragem.

Nas camadas de saprolito da ombreira, regiões de várzeas e leito de rio a permeabilidade encontrada apresentou diversas variações de  $10^{-7}$  a  $10^{-5}$  m/s. A camada de rocha alterada e o migmatito-gnássico apresentaram permeabilidades da ordem de  $10^{-5}$  m/s e  $10^{-8}$  m/s, respectivamente. Essa ocorrência de rocha alterada com maiores permeabilidades, em certas regiões da ombreira esquerda e de regiões de leito, apresentou permeabilidades maiores que  $10^{-5}$  m/s, valores considerados inadequados para a condição estanque da fundação da estrutura.

Visando a redução e homogeneização da permeabilidade deste maciço rochoso, especialmente onde a barragem tem altura de maciço superior a 15 metros, foi executado, conforme registros em projeto As Built, SRH (2003), tratamento da fundação, por meio de cortinas de injeção de calda de cimento. Esse tratamento tem o objetivo de diminuir os coeficientes de permeabilidade. Esta região deve ser monitorada por instrumentação, a fim de

que se analise o comportamento de tais intervenções. A modelagem de retroanálise das condições de fluxo permite conferir a eficácia do tratamento da fundação realizado, a fim de se medir a sua eficácia na solução do problema.

### **3.5.5. Ensaio de Cisalhamento Direto**

O ensaio de cisalhamento direto é um dos ensaios mais tradicionais e corriqueiros da engenharia geotécnica. O equipamento consiste em uma caixa de cisalhamento de metal em que o corpo de prova pode ser de solo compactado ou de amostra indeformado. Um aparelho aplica tensões cisalhantes na amostra que geram, por sua vez deformações no corpo de prova, medida por extensômetros. A partir das deformações horizontais medidas, calcula-se as tensões cisalhantes. As deformações verticais também são monitoradas para avaliação da variação volumétrica.

Conforme SRH (1997), para a determinação dos parâmetros de resistência dos solos residuais e saprolíticos da fundação, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas, retiradas durante a realização de investigações de campo. Das jazidas EMP 01 e EMP 04 foram coletadas amostras deformadas, compactadas em Proctor Normal em profundidades de furo de aproximadamente três metros.

### **3.5.6. Resumo dos ensaios de projeto**

Uma vez classificado o tipo de solo tanto de fundação, quanto constituinte da estrutura, considera-se adequadas as características dos materiais levantados para concepção e construção da estrutura. Na Tabela 7. é apresentado o resumo dos resultados de ensaios de resistência e infiltração realizados no solo estudado no presente trabalho, mostrando o resultado dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos.

Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos e hidráulicos de projeto

Material constituinte		Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	Coesão efetiva (Kpa)	$\phi$	kv/kh	kv(m/s)	kh(m/s)
Núcleo	SC/CL	20	5	31	0,1	1E-08	1E-07
Espaldares	GC	19	0	38	0	-	-
Filtro	Areia	18	0	35	1	1E-04	1E-04
Dreno	Brita	20	0	18	1	1E-02	1E-02
Dreno pé	Brita	19	0	40	1	1E-02	1E-02
Camada de aluvião		17	0	18	1	1E-06	1E-06
Camada de seixo		20	0	33	1	1E-05	1E-05
Camada de saprolito		21	0	37	1	1E-06	1E-06
Gnaisse/magmatito		24	0	38	1	1E-05	1E-05
Cortina impermeabilizante		-	-	-	-	1E-07	1E-07

Fonte: SRH (1998)

### 3.6. Instrumentação

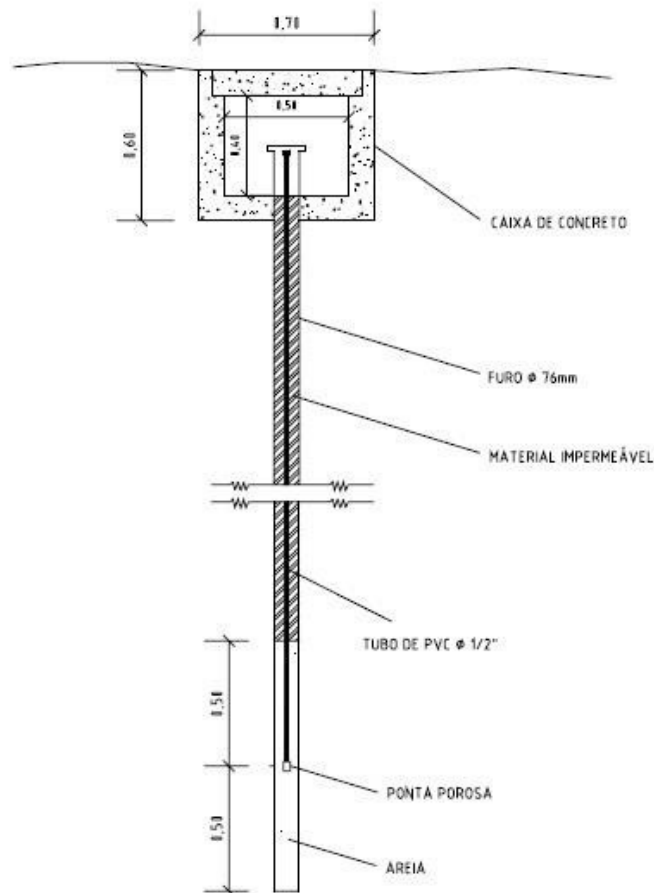
Conforme define Thá (2007), a instrumentação é o conjunto de métodos de observação do comportamento de uma determinada obra de engenharia, com o objetivo de controlar suas condições de segurança, comprovar a validade das hipóteses e dos métodos de cálculo utilizados no projeto e verificar a necessidade de intervenção de correções em possíveis anomalias identificadas, bem como fornecer subsídios para elaboração de novos critérios de projeto. A prática da instrumentação é de fundamental importância para o conhecimento da rede de fluxo existente na estrutura geotécnica.

Os instrumentos responsáveis pela captação das cargas piezométricas, tanto no fluxo de água do corpo da barragem, quanto na fundação, são denominados piezômetros. Esses instrumentos, particularmente, são fundamentais no monitoramento da rede de fluxo da estrutura geotécnica. Por meio deles, mede-se pressão a fim de se controlar e acompanhar o desenvolvimento e evolução do comportamento das cargas piezométricas, que, associadas as cargas altimétricas do ponto analisado, obtém-se as cargas totais do ponto instrumentado. As cargas piezométricas são medidas em valores de medida linear (coluna d'água vertical formada no equipamento).

Os piezômetros mais usualmente empregados são os do tipo Casagrande ou Standpipe. Thá (2007) afirma que sua larga utilização se dá por serem equipamentos de fácil confecção e instalação, alta durabilidade e confiabilidade. Esse aparelho é constituído de um bulbo no local onde se pretende medir a carga de pressão e um tubo que interliga o bulbo de

medição até o local onde será feita a leitura. Ao redor do bulbo, coloca-se uma camada de areia e, sobre ela, uma camada betonítica ou uma camada de solo-cimento para isolar o bulbo. A leitura do instrumento é realizada por um equipamento de detecção de nível d'água denominado pio elétrico. Consiste em uma trena com um sensor elétrico na ponta que emite um som assim que entra em contato com a água. Além desse tipo de piezômetro, existem outros, mais sofisticados, como piezômetros elétricos, pneumático e hidráulico. A Figura 10 exemplifica um modelo de piezômetro do tipo Casagrande.

Figura 10- Representação de piezômetro tipo Casagrande (fonte: SALES, et al. 2006)



Além disso, as medições piezométricas permitem o cálculo das poropressões atuantes no ponto em questão. Ela é um parâmetro fundamental para análise de estabilidade dos taludes a fim de cálculo do fator de segurança.

### **3.6.1. Levantamento e análise das leituras piezométricas**

A instrumentação da Barragem de Aracoiaba, foi prevista ainda em projeto executivo para quatro seções particulares. Conforme aferido em projeto As Built, SRH (2003), e, em conformidade com o planejamento do projeto executivo, as seções instrumentadas foram: seções 44 e 48 (seções localizadas no leito do rio) e seções 60 e 82 (localizadas nas ombreiras esquerda).

A instrumentação dessas seções consiste na instalação de piezômetros, para medição das cargas piezométricas atuantes e marcos topográficos, para medição de recalques eventuais. Os piezômetros são hidráulicos do tipo Casagrande, devido ao seu baixo custo de manutenção. Os piezômetros hidráulicos estão instalados tanto na fundação da estrutura, quanto no interior do maciço.

Essa etapa do estudo busca o levantamento das cargas piezométricas medidas, o histórico de observação da barragem, bem como análise da consistência das informações fornecidas pela equipe de instrumentação.

### **3.6.2. O histórico de monitoramento da barragem**

A princípio é importante explicitar a estrutura da equipe de gestão e monitoramento das barragens do estado do Ceará, uma vez que suas características e limitações impactam diretamente na qualidade, integridade e totalidade das amostras de medidas ao longo do histórico de observação da estrutura, desde o período de primeiro enchimento até os presentes dias.

A COGERH, na categoria de empreendedora dos principais açudes do estado do Ceará, conforme preconiza a Lei Federal de Segurança de Barragens nº 13.334/2010, possui dentro do seu escopo organizacional as Gerências Regionais que, atualmente são: Crato, Crateús, Iguatu, Limoeiro do Norte, Metropolitana, Pentecostes, Quixeramobim e Sobral. Essas gerências, dentre outros propósitos, tem a responsabilidade de realizar o acompanhamento e monitoramento dos açudes a elas delegados. Esse acompanhamento, no tocante aos critérios de segurança de barragens, cinge-se à aplicação das visitas de Inspeções de Segurança Regulares (ISR), bianualmente, e colhimento das leituras de instrumentação quinzenalmente, ou semanalmente a depender da barragem instrumentada. É de competência, ainda, das Gerências Regionais o envio periódico das medições colhidas em campo à Gerência de Segurança e Infraestrutura. Essa última, por sua vez, é encarregada de analisar as informações de campo de

todas as barragens do estado e deliberar tecnicamente a necessidade de intervenções, medidas de alerta ou atenção às anomalias encontradas, bem como priorização das barragens quanto à prioridade de intervenção.

A Barragem de Aracoiaba é acompanhada pela Gerência Metropolitana, e essa tem registrado o início da realização das medições de instrumentação em 2003, porém poucas informações nos primeiros anos de operação da estrutura foram mantidas por se tratar ainda de manutenção dos dados em papel.

Sales, et al. (2006) afirmam que a barragem conta com 26 piezômetros, dos quais 12 localizam-se no maciço e 16, na fundação para observação da camada de magmatito alterado.

Sales, et al. (2006) constata algumas peculiaridades com relação ao início operacional da barragem, nos anos de 2003 a 2005, a saber:

- a) Sendo concluída em 2002, iniciou seu processo de enchimento neste mesmo ano, registrando períodos de sangria com mais de 50cm de lâmina em 2004 e 2005, o que permitiu o desenvolvimento completo da rede de percolação tanto no maciço como na fundação;
- b) Na Seção 44, o sistema de drenagem interna não funciona a contento, ali foi detectado, com base nas leituras, que a linha de saturação nesta seção está perfilada 4 a 5 m acima do tapete drenante, ainda na zona central do maciço, caracterizando assim uma anomalia localizada no referido sistema;

Os fatos constatados por Sales, et al. (2006) evidenciam a necessidade de realização de retroanálise das condições de fluxo, a fim de que se possa avaliar qual a situação, uma vez que a própria barragem apresentou comportamentos inesperados no seu funcionamento, embora sem registro de anomalias severas.

### **3.6.3. Levantamento de dados piezométricos**

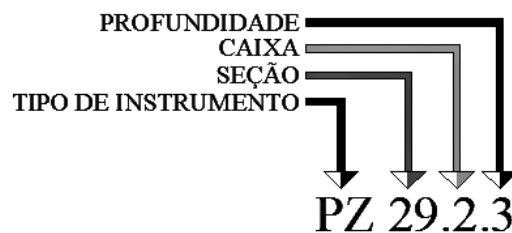
A partir das leituras de campo realizadas no programa de monitoramento da barragem, converteu-se os dados de leitura em cargas piezométricas e foi obtida uma variação dessas cargas desde o início do registro de leituras das seções 44 e 48, uma vez que as outras seções (60 e 82) não possuem alturas significativas para serem consideradas representativas das condições mais críticas à segurança. As Figuras 12 e 13 retratam a variação das cargas piezométricas no histórico de monitoramento das seções instrumentadas de altura máxima, 44 e 48, respectivamente.

Ainda de acordo com as informações apresentadas nas Figuras 12 e 13, foi obtida a

variação da altura de água no reservatório para os mesmos períodos nos quais foram feitas as leituras das cargas piezométricas. A Secretaria de Recursos Hídricos fornece a medição diária dos níveis dos reservatórios, a partir dos quais encontrou-se as alturas de coluna d'água pertinentes aos dias de medição. Essas informações, observadas em conjunto, são importantes para fins de avaliação do funcionamento e sensibilidade dos instrumentos.

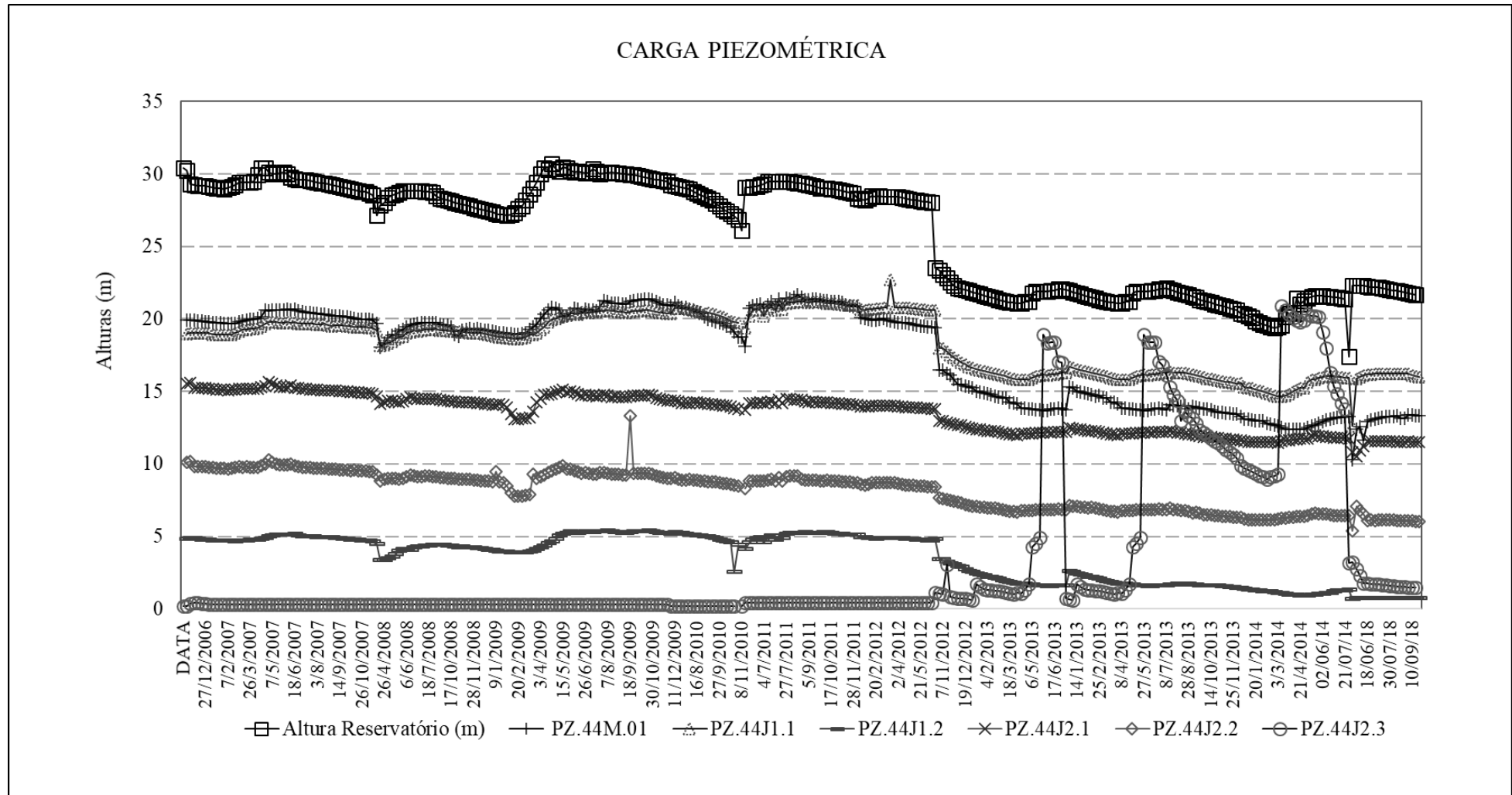
Por padronização de procedimentos, os piezômetros tem a nomenclatura composta por três informações principais que permitem a sua identificação: a seção em que se encontra, a caixa de localização dos instrumentos, que pode ser a montante, a jusante ou na crista, e, por fim, a profundidade em que está assentado o bulbo do aparelho. Para melhor entendimento e interpretação das curvas de variação das cargas piezométricas das Figuras 12 e 13, a Figura 11 exemplifica como deve ser lida a identificação dos piezômetros.

Figura 11 - Legenda de nomenclatura dos instrumentos



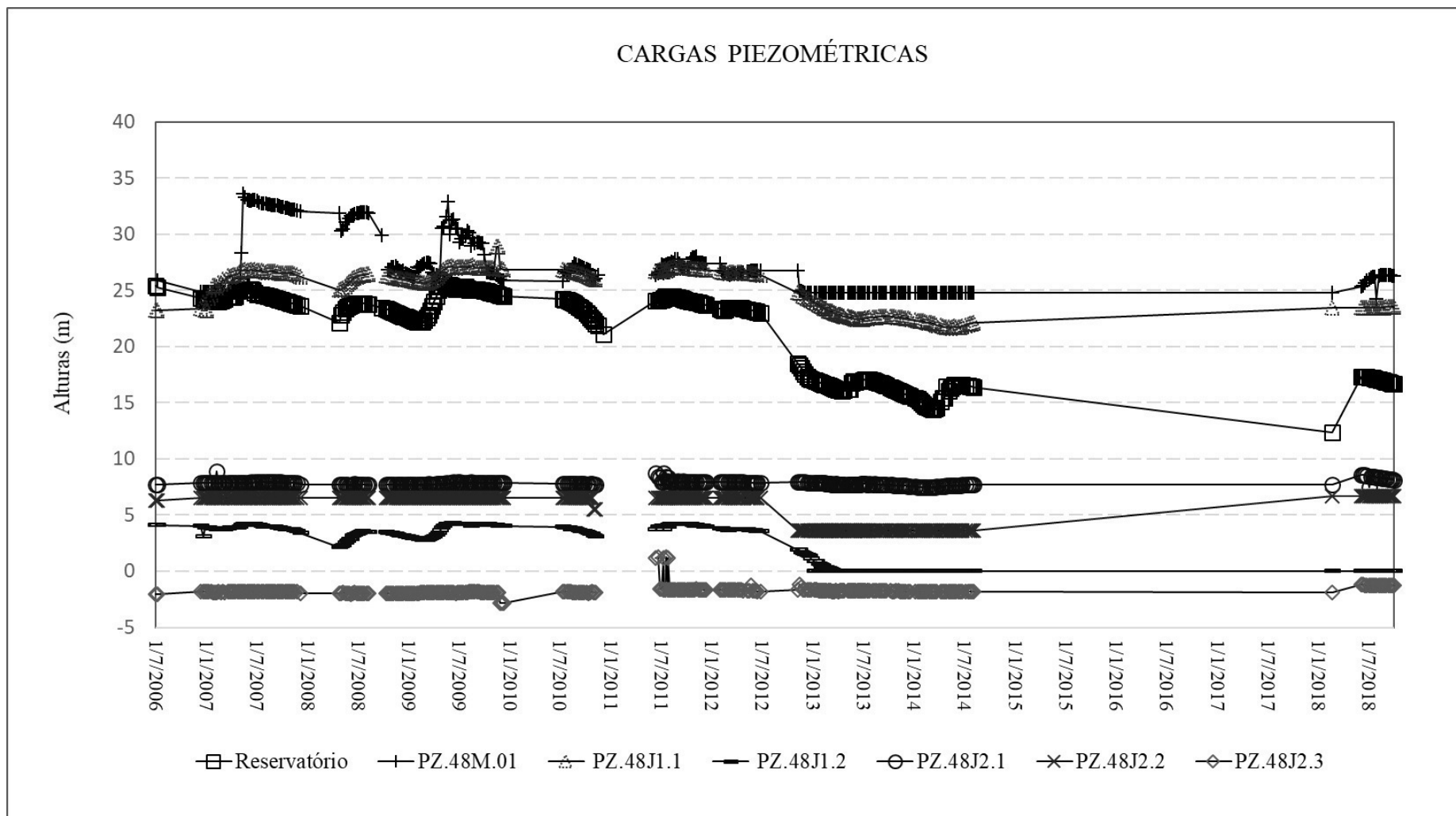
Para os piezômetros da Barragem de Aracoiaba, os piezômetros instalados em cotas mais elevadas têm maior numeração indicativa (Figura 13). Piezômetros menos elevados, por sua vez, tem numerações indicativas menores.

Figura 12 - Variação das cargas piezométricas no histórico da Barragem Aracoiaba (Seção 44)



Fonte: Autor, 2018

Figura 13 - Variação das cargas piezométricas no histórico da Barragem Aracoiaba (Seção 48)



Fonte: Autor, 2018

Segundo dados do relatório As Built, SRH (2003), é mostrada na Tabela 8 as cotas de instalação (topo) e de bulbo (fundo) dos piezômetros, de onde se é possível inferir os comprimentos dos instrumentos. A consideração dessas informações é muito pertinente na análise dos dados leituras de campo.

Tabela 8 - Levantamento dados de instalação dos instrumentos em seções de altura máxima

PZ	Furo	Cota Fundo (m)	Cota Topo (m)	Comprimento piezômetro (m)
SEÇÃO 44				
PZ-44M1	44 M	70,15	96,75	26,6
PZ 44 M2	44 M2	91,03	96,75	5,72
PZ-44J1-1	44J1	65	100	35
PZ-44J1-2	44J1	78,81	100	21,19
PZ44J2-1	44J2	58	91	33
PZ44J2-2	44J2	62,5	91	28,5
PZ44J2-3	44J2	68	91	23
SEÇÃO 48				
PZ48M-1	48M	58	96,75	38,75
PZ48M-2	48M	90	96,75	6,75
PZ48J1-1	48J1	58	100	42
PZ48J1-2	48J1	81	100	19
PZ48J2-1	48J2	58	91	33
PZ48J2-2	48J2	62,5	91	28,5
PZ48J2-3	48J2	68	91	23

Fonte: COGERH, 2011

#### 3.6.4. Escolha da seção de análise

Embora a Barragem de Aracoiaba disponha ao monitoramento quatro seções instrumentadas, apenas duas se situam em regiões de máximas alturas da estrutura. Essa condição de seção máxima é fundamental para uma análise de estabilidade pseudo-estática, pois, uma vez que se busca reproduzir, na modelagem, as condições menos favoráveis à segurança da estrutura, quanto maior a altura da seção, maiores as influências da aceleração sísmica sobre a massa de solo mobilizada ao deslizamento. Considerando que as seções 60 e 82, possuem, respectivamente, 20 e 8 metros, aproximadamente, enquanto que as seções 44 e 48 possuem 35 metros (altura máxima da estrutura), aquelas duas primeiras seções estão inicialmente descartadas da escolha de seção tipo para modelagem.

Na Figura 13, observando os dados das cargas piezométricas medidas nos instrumentos, é possível notar que houve leituras inconsistentes na seção 48. Seja por defeitos nos aparelhos de piezômetros, valores desatualizados de cotas de fundo, ou mesmo pouca perícia do técnico que procedeu com a coleta de leituras, parte considerável dos valores demonstra estar fora de qualquer padrão, ou conformidade, esperados com o nível de água do reservatório. Como é possível constatar ainda na Figura 13, algumas cargas piezométricas na Seção 48 resultaram em valores negativos, pois as leituras aferidas estavam maiores que o próprio comprimento dos instrumentos.

Na Seção 48, apesar de se observar piezômetros com relativa sensibilidade às variações hídricas do reservatório, o conjunto de leituras, não permite fazer análises mais profundas sobre a situação da barragem, posto que vários piezômetros demonstram leituras anômalas com picos de elevação de pressão sem aparente razão, o que se conclui que estão defeituosos e inoperantes. O instrumento PZ48J2.3, por exemplo, apresentou valores negativos de carga piezométrica, conforme se pode observar na Figura 13.

As variações das cargas piezométricas, nas seções 44, por sua vez, em comparação com a variação da altura d'água do reservatório, apresentam piezômetros com boa sensibilidade, tanto nos piezômetros cravados no maciço, quanto naqueles cravados na fundação, como é possível observar na Figura 12. É possível notar a variação da carga piezométrica dos instrumentos em consonância com as variações da altura d'água do reservatório. Por essa razão, definiu-se a Seção 44 como a seção de modelagem de ruptura para análise de estabilidade estática e pseudo-estática deste trabalho.

São esperadas elevações de coluna d'água maiores em piezômetros localizados na fundação a montante, por questões de maiores cargas piezométricas atuantes no solo. Piezômetros localizados em regiões de maiores cotas altimétricas e em regiões a jusante, naturalmente, apresentarão menores variações de cargas piezométricas, uma vez que as variações de fluxo nessas regiões são em menores proporções. Piezômetros demonstrando boa sensibilidade é sinal de que a rede de percolação na barragem está desenvolvida e que os instrumentos estão detectando esse comportamento.

Nesse sentido, é possível observar, pela Figura 12, que os instrumentos em localização mais profundas, na Seção 44, como PZ44M-01 e PZ44J1-1, apresentam cargas piezométricas com variações de coluna d'água maiores que dos outros piezômetros. Esse comportamento era esperado, pois sua posição a montante e na base da estrutura lhes conferem cargas piezométricas muito próximas à própria altura de água do reservatório. Tal fato evidencia o bom funcionamento dos instrumentos nessa seção.

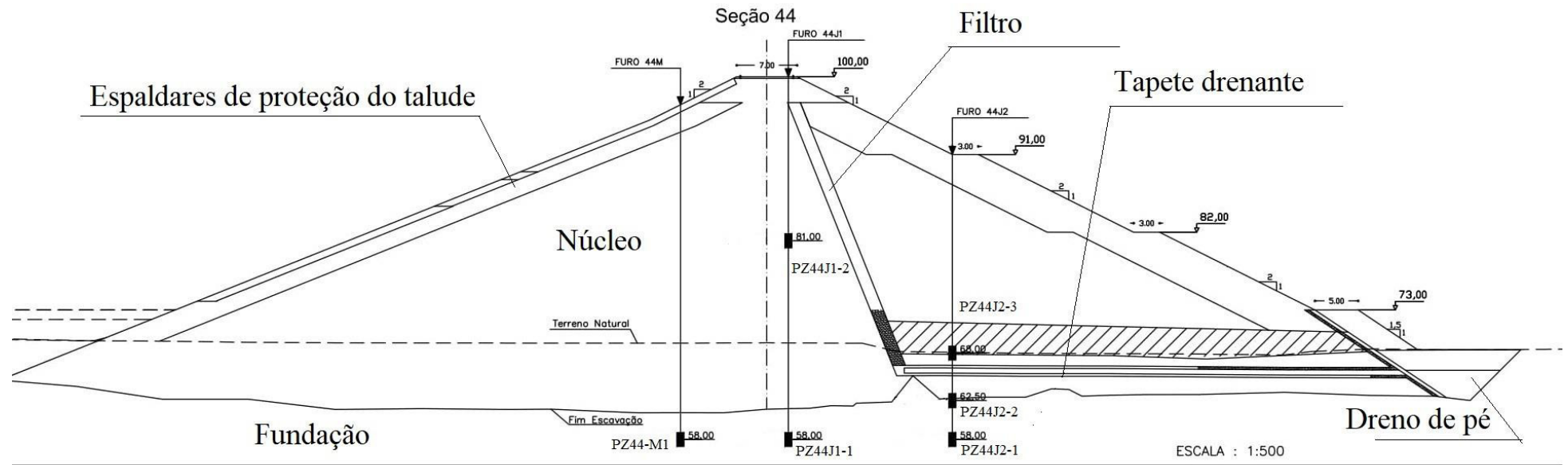
Contudo, um dos instrumentos da Seção 44, em particular, o PZ44J2.3 apresenta elevações de pico de pressão sem acompanhamento dos outros piezômetros. Tendo em vista a magnitude dessas variações de pico e a frequência, considera-se esse instrumento com algum empecilho ao seu funcionamento normal, gerando leituras anômalas. Para objeto desse estudo, a modelagem considerará os valores medidos nessa Seção 44, excluindo o piezômetro PZ44J2.3 da análise de estabilidade pseudo-estática. Esse instrumento localiza-se exatamente na posição do sistema de drenagem defeituoso, alertado por Sales, et al. (2006).

A Seção 44, além disso, é considerada, conforme descrito por SRH (1998), uma seção tipo da Barragem de Aracoiaba e apresenta as seguintes características:

- a) A crista possui 7,0 m de largura, cota de coroamento em 100 m, declividade para montante e tratamento superficial com camada de cascalho compactado. A crista, embora não tenha sido dimensionada como pista de estrada, apresenta condições para tráfego moderado de veículos;
- b) O talude de montante apresenta inclinação 1V:2H acima da cota 95 e 1V:2,5H abaixo dela. Entre as cotas 75 e 85, o talude é protegido por uma camada de 80 cm de enrocamento. Acima da cota 85 a proteção é feita por uma camada interna de transição de material, com 30 centímetros de espessura, e uma camada externa de blocos selecionados com 75 centímetros de espessura;
- c) O talude de jusante possui inclinação de 1V:2H e bermas de 3 m de largura nas cotas 91 e 82. Possui também berma de 5 metros de largura na cota 73. A proteção do talude é feita por camada de 30 cm de enrocamento fino.
- d) O filtro inclinado possui inclinação de 1V:0,4H, com topo na cota 97 m, constituído por areia natural compactada e com largura medida na horizontal de 1 a 1,5 metros;
- e) O tapete drenante é constituído por camada de brita e areia intercaladas. Na saída do dreno há um enchimento com enrocamento, constituindo um dreno de pé, com uma berma de 5 metros na cota 73;
- f) Nas seções de leito do rio, foi retirado todo o material aluvionar com  $N_{spt}$  menor que 10 golpes/ 30 cm e o assentamento da barragem ocorrerá na rocha de migmatito-gnáissico;
- g) A barragem e, por conseguinte, a Seção 44, é considerada homogênea, com solo SC/CL, com algumas regiões específicas denominadas em materiais constituintes diferentes, como é o caso das zonas de transição dos espaldares, filtros, tapetes drenantes e dreno de pé.

A Figura 14 mostra uma representação fora de escala da seção selecionada para análise. O projeto As Built da Seção 44, bem como a locação dos equipamentos de instrumentação em maiores detalhes, são mostrados no Anexo II deste trabalho.

Figura 14 - Representação da Seção 44 e posição dos piezômetros



Fonte: Autor, 2018

### **3.7. Definição das análises**

Levantadas as informações pertinentes à modelagem, foram consideradas duas situações de análise de estabilidade pseudo-estática. A primeira consiste em modelagem preconizando as condições de projeto, e a segunda consiste em uma modelagem pseudo estática, com base em uma retroanálise das condições de fluxo, baseados nas leituras de campo realizadas pela Gerencia Metropolitana da COGERH. Em ambos os casos foi calculado também o fator de segurança sem considerar a ocorrência de sismos, ou seja, uma análise de estabilidade estática, para fins de comparação da influência de acelerações sísmicas na estabilidade global da estrutura.

As análises foram elaboradas pelo software Slide, desenvolvido pela Rocscience®, cujos dados de entrada são os parâmetros geotécnicos e hidráulicos, levantados na Seção 3.4 deste trabalho. A Seção 44 da barragem foi a selecionada para elaboração do modelo no software.

#### **3.7.1. Análise de fluxo e análises de estabilidades de projeto**

Nessa primeira fase de modelagem, procedeu-se realização da análise de fluxo bidimensional, pelo método de elementos finitos. Além disso, procedeu-se análise de estabilidade estática e pseudo-estática na Seção 44, utilizando o método de Bishop Simplificado (1955) e levando em consideração os parâmetros hidráulicos e geotécnicos levantados em ensaios de caracterização, observados nos projetos executivos e As Built, constantes na Seção 3.5 deste capítulo.

A obtenção das cargas piezométricas de projeto no maciço permite o cálculo dos fatores de segurança, tanto na análise de estabilidade estática, quanto a análise de estabilidade pseudo-estática. Esses foram os objetivos buscados nessa fase de modelagem. Conforme descrito no item 3.2 deste capítulo, essas análises dizem respeito aos taludes de jusante da estrutura, uma vez que esses são considerados os críticos ao deslizamento. A Tabela 9 mostra os valores dos parâmetros hidráulicos e geotécnicos considerados em projeto executivo para elaboração da modelagem

Tabela 9 - Parâmetros hidráulicos e geotécnicos considerados na etapa de análise

Material constituinte		Peso específico (KN/m <sup>3</sup> )	Coesão efetiva (Kpa)	$\phi$	kv/kh	kv(m/s)	kh(m/s)
Núcleo	SC/CL	20	5	31	0,1	1E-08	1E-07
Espaldares	GC	19	0	38	0	-	-
Filtro	Areia	18	0	35	1	1E-04	1E-04
Dreno	Brita	20	0	18	1	1E-02	1E-02
Dreno pé	Brita	19	0	40	1	1E-02	1E-02
Camada de aluvião		17	0	18	1	1E-06	1E-06
Camada de seixo		20	0	33	1	1E-05	1E-05
Camada de saprolito		21	0	37	1	1E-06	1E-06
Gnaisse/magmatito		24	0	38	1	1E-05	1E-05
Cortina impermeabilizante		-	-	-	-	1E-07	1E-07

Fonte: Adaptado de SRH (1998)

É importante observar que a condição de anisotropia adotada para o solo constituinte do maciço da estrutura foi de  $kv/kh = 0,1$ . Almeida (2013) *apud* Araújo (2013) considera essa relação como o comportamento esperado de um solo compactado. Os solos de dreno e filtro, por sua vez, foram considerados isotrópicos.

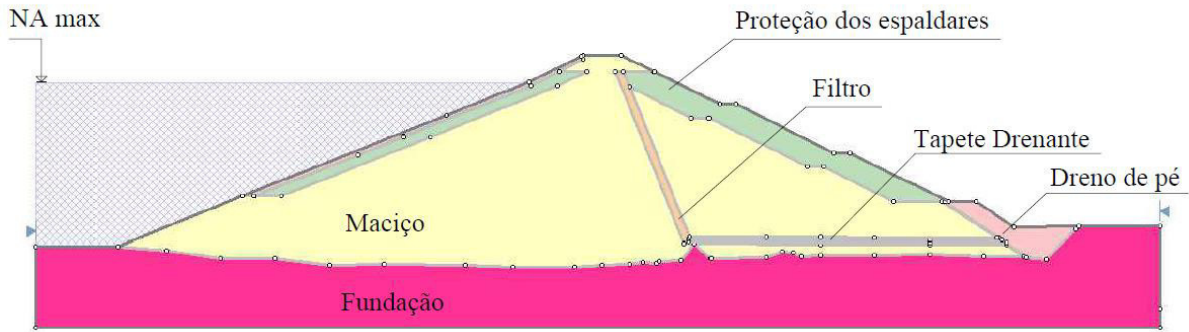
No tocante ao carregamento considerado na modelagem, o valor máximo da altura da coluna d'água do reservatório observado foi menor do que a máxima cheia de projeto prevista. Considerando que a cota da soleira do vertedouro fica na cota 95, e que a cota do fundo do reservatório na Seção 44 fica na cota 65, aproximadamente, a coluna máxima de água na cheia de projeto prevista é de 30 m de altura. O carregamento máximo considerado para esta etapa de análise, portanto, consiste de uma coluna de 30 metros de altura em regime estacionário de modelagem.

A análise sísmica da Barragem de Aracoiaba foi efetuada através de uma abordagem pseudo-estática por meio do método de Bishop Simplificado (1955). No que diz respeito à caracterização dos esforços de ação sísmica, foi adotado para a situação de regime permanente, um coeficiente horizontal sísmico de 0,1 e coeficiente vertical sísmico de 0,05, conforme recomenda Terzaghi (1950) *apud* Nadi et al. (2014), Corps of Engineers (1982) *apud* Nadi et al., (2014), e Seed (1979) *apud* Nadi et al., (2014).

Esses valores são conservadores com as condições de estabilidade do caso da Barragem de Aracoiaba, uma vez que são preconizados para eventos sísmicos de grande escala. Considerando o histórico de ocorrências desse evento no estado do Ceará, por meio da Figura 2, nenhuma ação sísmica superou magnitude 5 na Escala Richter, para onde esse valor de coeficiente é recomendado.

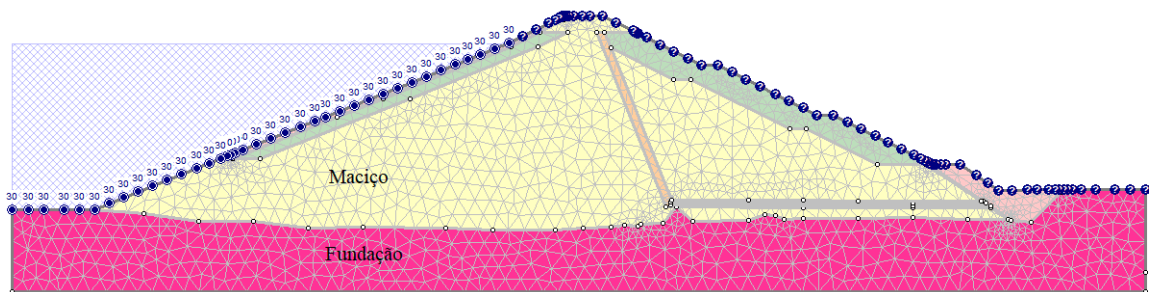
A Figura 15 apresenta a seção utilizada com o carregamento adotado para regime permanente. Na Figura 16, é apresentada a malha de elementos finitos distribuída no corpo do maciço.

Figura 15 - Seção de análise com nível de água máximo no reservatório



Fonte: Autor, 2018

Figura 16 - Malha de elementos finitos e nível de água máximo do reservatório



Fonte: Autor, 2018

### 3.7.2. Retroanálise das condições de fluxo, análise de estabilidade estática e pseudo-estática

Essa etapa da modelagem consistiu na realização de várias análises de fluxo a fim de se obter valores de cargas piezométricas que convergissem para os valores de cargas piezométricas observados em campo pelo monitoramento de instrumentação da equipe da COGERH. Essa retroanálise das condições de fluxo se fez necessária para verificar e conhecer as condições reais de poropressão e percolação existentes na estrutura e, portanto, representar mais fielmente no modelo as condições de campo. Após essa etapa de modelagem, foram

obtidos novos parâmetros hidráulicos.

Após essa fase de modelagem foram realizadas as análises de estabilidades estáticas e pseudo-estática com base nos valores de poropressão calculados pelas cargas piezométricas encontradas no maciço. Novamente a análises de estabilidade consistiram nos taludes de jusante da estrutura, por se considerar a situação menos favorável à segurança da estrutura.

Para realizar a retroanálise das condições de fluxo, foi necessário selecionar um período de observação que fornecesse valores de referência de altura de coluna d'água do reservatório, que foram as condições de contorno na modelagem, e cargas piezométricas que foram os valores a serem alcançado nas análises de fluxo.

Observando a variação geral das cargas piezométricas da Seção 44, constante na Figura 12, é perceptível a variação cíclica da coluna d'água do reservatório. Essa situação é esperada, uma vez que os regimes de chuvas são periódicos e recorrentes a épocas específicas do ano. Nesse sentido, buscou-se um período que represente esses intervalos de cheia, a fim de se modelar a retroanálise com carregamentos e condições de contorno ocorridas em campo, em situações desfavoráveis à segurança da estrutura.

A elaboração da retroanálise se baseou em dados pertinentes a dois períodos diferentes de leitura. Pela variação da Figura 12, são notáveis os valores máximos do reservatório em toda história da estrutura. Buscando estabelecer análises nas condições mais desfavoráveis à segurança geotécnica da obra, o período de 04/07/2011 a 11/06/2012 é o intervalo de tempo mais longo onde as cargas de coluna d'água do reservatório permaneceram mais elevadas, próximo dos 30 metros. Esse período, será tomado, portanto, como a referência de valores para realização da retroanálise das condições de fluxo.

No intuito de validar os parâmetros hidráulicos calculados pela retroanálise, foi selecionado um segundo período de análise. Tal período será tomado como o imediatamente seguinte ao primeiro período, uma vez que se espera que as características hidráulicas e geotécnicas permaneçam constantes entre dois períodos de tempo consecutivos. O Período 2 foi definido entre 11/06/2012 a 17/06/2013. O Anexo I traz a variação das cargas piezométricas para cada período de observação.

Definidos os períodos de observação do estudo de retroanálise, é calculada uma média para a altura de água no reservatório e para as cargas piezométricas de cada instrumento nos respectivos períodos. As médias serão os valores de cargas de referência para elaboração da retroanálise. Os valores médios, máximos e mínimos são descritos na Tabela 10 a seguir.

A etapa de retroanálise terá como objetivo a reconfiguração das características hidráulicas, kv e kh, dos materiais constituintes do maciço e da fundação da barragem, a fim de

se conseguir a representação em modelagem das condições de contorno medidas em campo. Só assim, o modelo levantado da rede de percolação e da geotecnia estarão validados para representação da barragem e futuras análises.

Feita a validação do modelo construído, é feita uma segunda amostragem de resultados considerando a aceleração sísmica na estrutura a fim de se gerar discussão sobre a segurança da barragem.

Da Tabela 10, depreende-se que os valores médios são representativos de seus respectivos períodos uma vez que a diferença entre os valores mínimos e máximos observados são considerados pequenos. Assim essas médias são consideradas as condições de carregamento, ou de contorno na modelagem, utilizadas nas análises de fluxo dessa etapa.

Tabela 10 – Médias, máximos e mínimos de cargas piezométricas para cada período

Período 1	Média (m)	Máximo(m)	Mínimo(m)
Reservatório	22,0	28,09	21,07
PZ44M0-1	14,8	19,45	13,68
PZ44J1-1	16,6	20,64	15,81
PZ44J1-2	2,2	4,79	1,56
PZ44J2-1	3,7	18,91	0,45
PZ44J2-2	12,4	13,82	11,97
PZ44J2-3	7,0	8,43	6,68
Período 2	Média (m)	Máximo(m)	Mínimo(m)
Reservatório	28,8	29,5	28,09
PZ44M0-1	20,6	21,65	19,45
PZ44J1-1	20,9	22,74	20,21
PZ44J1-2	5,0	5,25	4,59
PZ44J2-1	0,5	0,45	0,45
PZ44J2-2	14,1	14,5	13,82
PZ44J2-3	8,8	9,18	8,43

Fonte: Autor, 2018

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Introdução

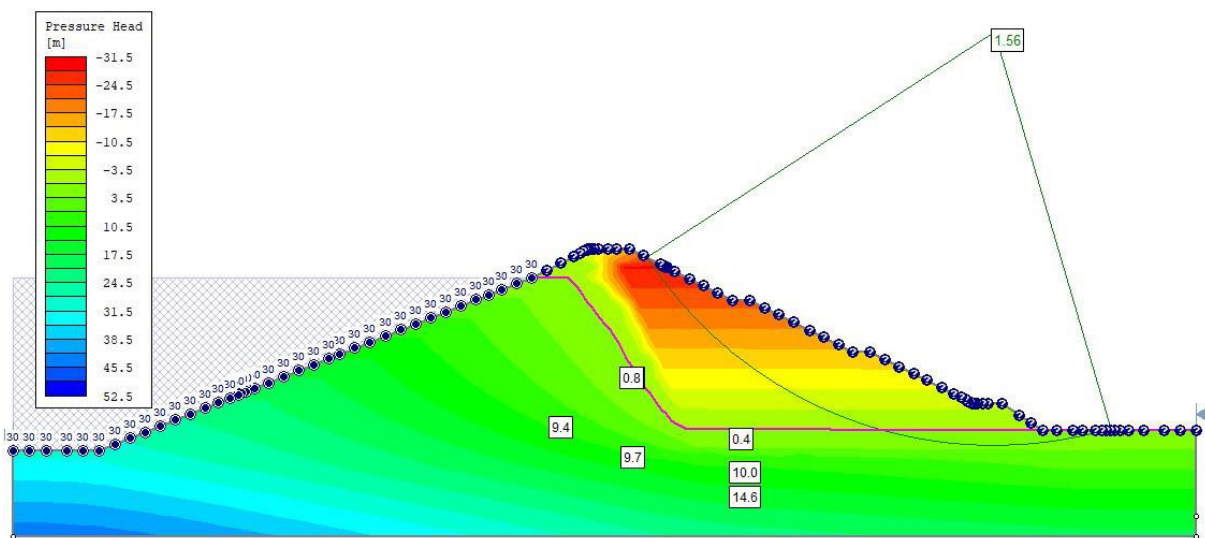
Este capítulo trata da apresentação dos valores finais de fator de segurança para análise de estabilidade estática e pseudo-estática de projeto. Além disso, exhibe os valores do fator de segurança na análise estática e pseudo-estática, seguindo a retroanálise das condições de fluxo. Este capítulo, ainda, compara os dois casos de modelagem. Ao fim, há um retrato de tendências de comportamento dos fatores de segurança encontrados e os parâmetros de entrada,

como nível do reservatório e cargas piezométricas, no intuito de se identificar valores ou intervalos limites de cargas piezométricas para garantia de segurança da barragem.

#### 4.2. Análise de fluxo e estabilidades de projeto

A Figura 17 mostra o valor de fator de segurança para situação de cheia máxima de projeto, que aplica uma carga hidráulica máxima de 30 metros de altura à montante do maciço, considerando regime permanente de fluxo. A figura traz, ainda, os valores de cargas piezométricas nas posições do maciço nas quais os instrumentos estão instalados. As propriedades hidráulicas e geotécnicas dos materiais constituintes do maciço e fundação estão apresentadas na Tabela 9 no capítulo anterior. Visando o atendimento à situação menos favorável à segurança da estrutura, os talude analisados foram os de jusante.

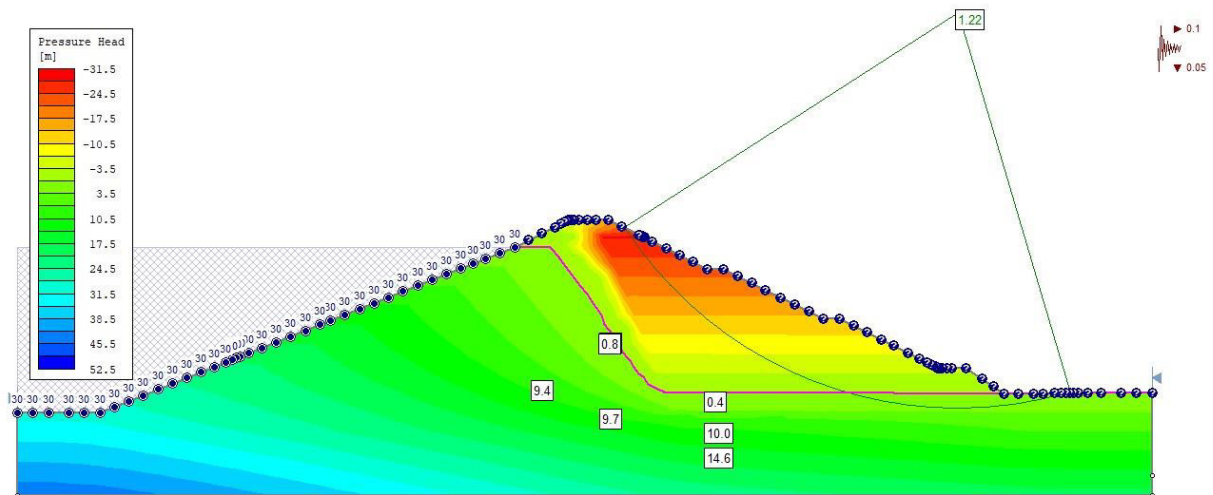
Figura 17 - Análise de fluxo e análise de estabilidade estática em nível máximo com cargas piezométricas (m)



Fonte: Autor, 2018

Em seguida, a Figura 18 apresenta os resultados de fator de segurança e cargas piezométricas para análise de fluxo e análise de estabilidade pseudo-estática.

Figura 18 - Análise de fluxo e análise de estabilidade pseudo-estática em nível máximo com cargas piezométricas (m)



Fonte: Autor, 2018

Nota-se, como esperado, a redução considerável do fator de segurança entre os dois casos de modelo. Na situação que não considera a ocorrência de ação sísmica, é calculado um fator de segurança de 1,56, já o modelo da análise pseudo-estática tem o fator de segurança em 1,22, registrando-se uma redução de aproximadamente 34% no fator de segurança da análise estática.

Na Tabela 11, são apresentados os valores de cargas piezométricas observando as condições de projeto. Tais valores são os mesmo para a análise com sismos e para análise sem sismos, uma vez que a ação sísmica interfere nas forças de contato aplicadas no solo e não na rede de percolação da barragem.

Tabela 11 - Resultados de cargas piezométricas para análise de estabilidade

Instrumento	Carga calculada (m)
PZ44M0-1	9,4
PZ44J1-1	9,7
PZ44J1-2	0,8
PZ44J2-3	14,6
PZ44J2-1	10,0
PZ44J2-2	0,4

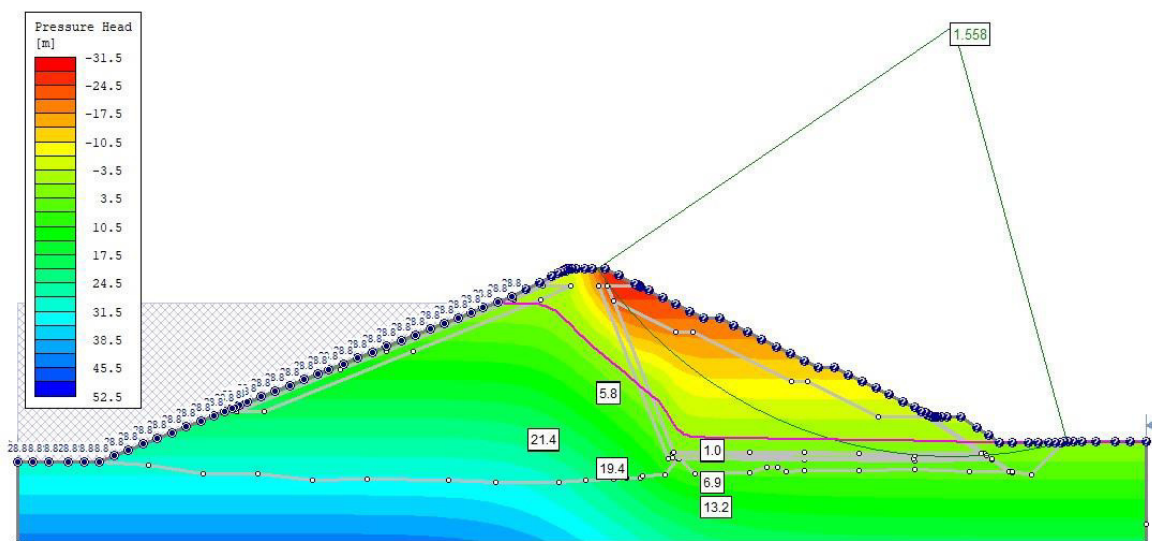
Fonte: Autor, 2018

### 4.3. Retroanálise das condições de fluxo e análises de estabilidades

Conforme explanado, a retroanálise de fluxo busca calibrar o modelo, conforme as medidas de leituras de cargas encontradas em campo, a fim de que se torne representativo e realístico.

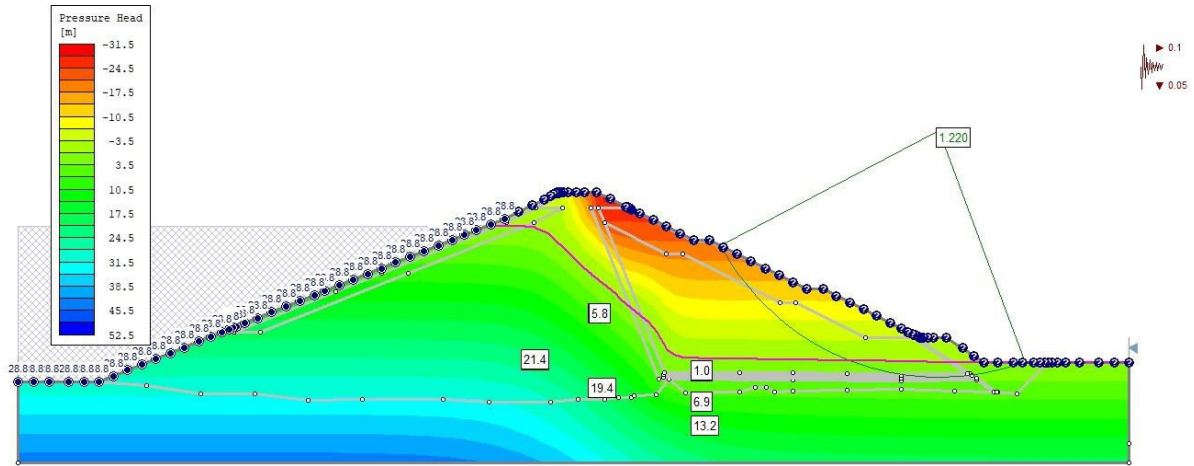
A Figura 19 mostra o valor de fator de segurança para carga hidráulica média de 28.8 metros de altura do reservatório para o Período 1 de observação, considerando regime permanente de fluxo. Em seguida, a Figura 20 apresenta os resultados de fator de segurança e cargas piezométricas para análise de estabilidade pseudo-estática. Em ambas as figuras, são retratados os valores de cargas piezométricas nas posições do maciço nas quais estão instalados os instrumentos. A Tabela 12 apresenta um comparativo dos parâmetros obtidos da retroanálise e os medidos em campo

Figura 19 -Análise de fluxo e de estabilidade estática em nível médio de observação do Período 1 com cargas piezométricas (m)



Fonte: Autor, 2018

Figura 20-Análise de fluxo e de estabilidade pseudo estática em nível médio de observação do Período 1 com cargas piezométricas (m)



Fonte: Autor, 2018

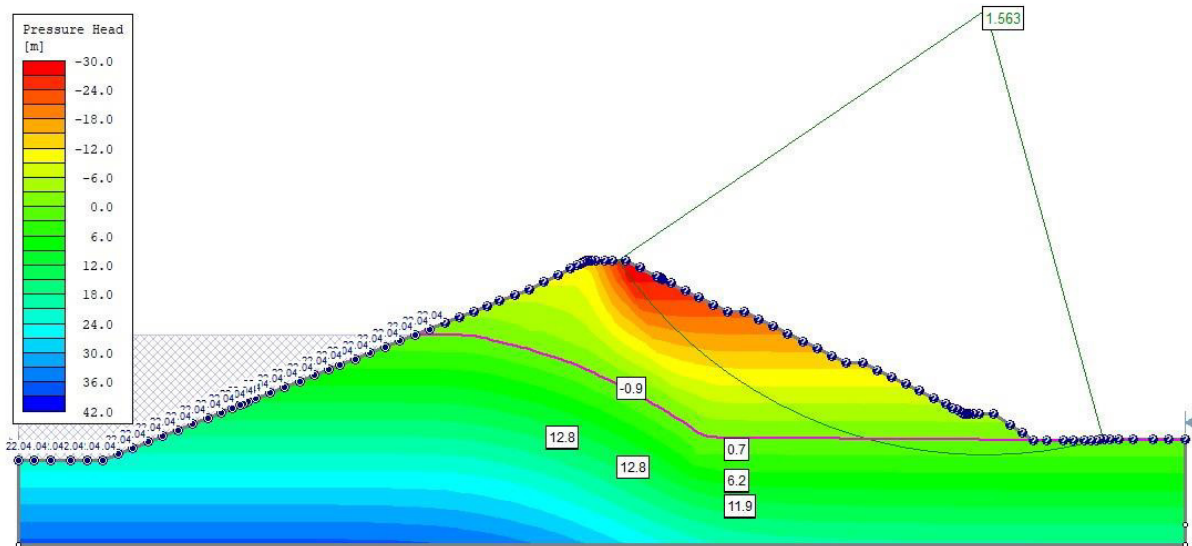
Tabela 12 – Comparativo entre cargas piezométricas média medida e carga obtida no Período 1

Instrumento	Carga média medida (m)	Carga obtida (m)
PZ44M1	20,6	21,4
PZ44J1-1	20,9	19,4
PZ44J1-2	5	5,8
PZ44J2-1	14,1	13,2
PZ44J2-2	8,8	7
PZ44J2-3	0,5	1

Fonte: Autor, 2018

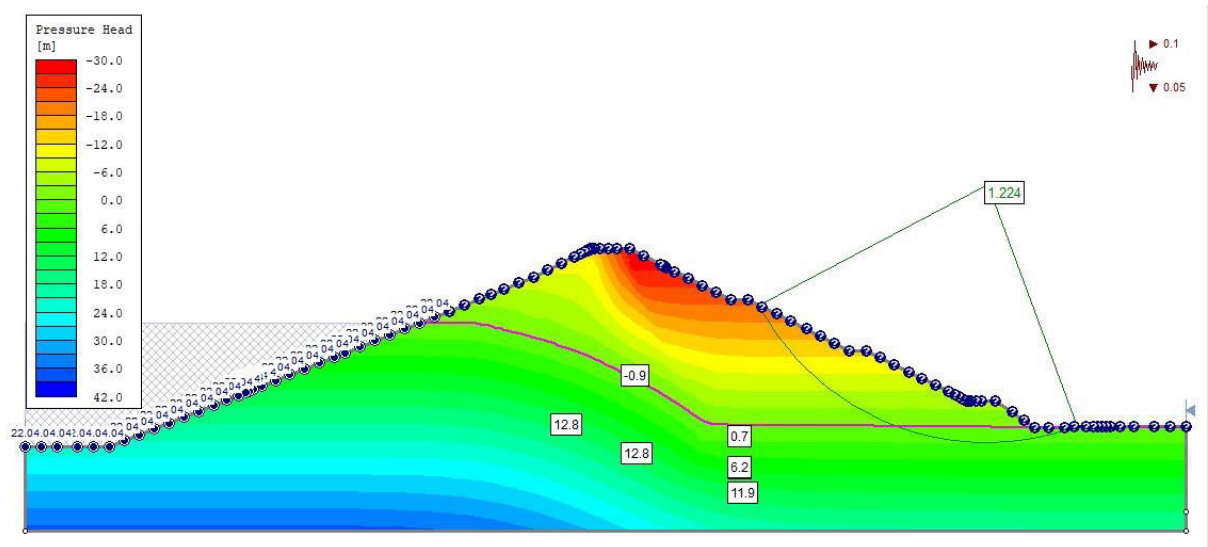
A Figura 21, por sua vez, mostra o valor final de fator de segurança para carga hidráulica do reservatório média de 22,04 metros de altura, correspondente ao Período 2 de observação, seguida dos resultados de fator de segurança e cargas piezométricas para análise de fluxo e estabilidade, considerando a ocorrência de ação sísmica. A Tabela 13 apresenta o comparativo dos resultados de cargas piezométricas obtidas da retroanálise com os valores médios medidos em campo.

Figura 21 - Análise de fluxo e estabilidade estática em nível médio de observação do Período 2 com cargas piezométricas (m)



Fonte: Autor, 2018

Figura 22 - Análise de fluxo e estabilidade pseudo-estática em nível médio de observação do Período 2 com cargas piezométricas (m)



Fonte: Autor, 2018

Tabela 13 - Comparativo entre cargas piezométricas média medida e carga calculada no Período 2

Instrumento	Carga medida (m)	Carga calculada (m)
PZ44M1	14,8	12,8
PZ44J1-1	16,6	12,8
PZ44J1-2	2,2	-0,9
PZ44J2-1	12,4	11,9
PZ44J2-2	7	6,2
PZ44J2-3	3,7	0,7

Fonte: Autor, 2018

#### 4.4. Validação da retroanálise das condições de fluxo

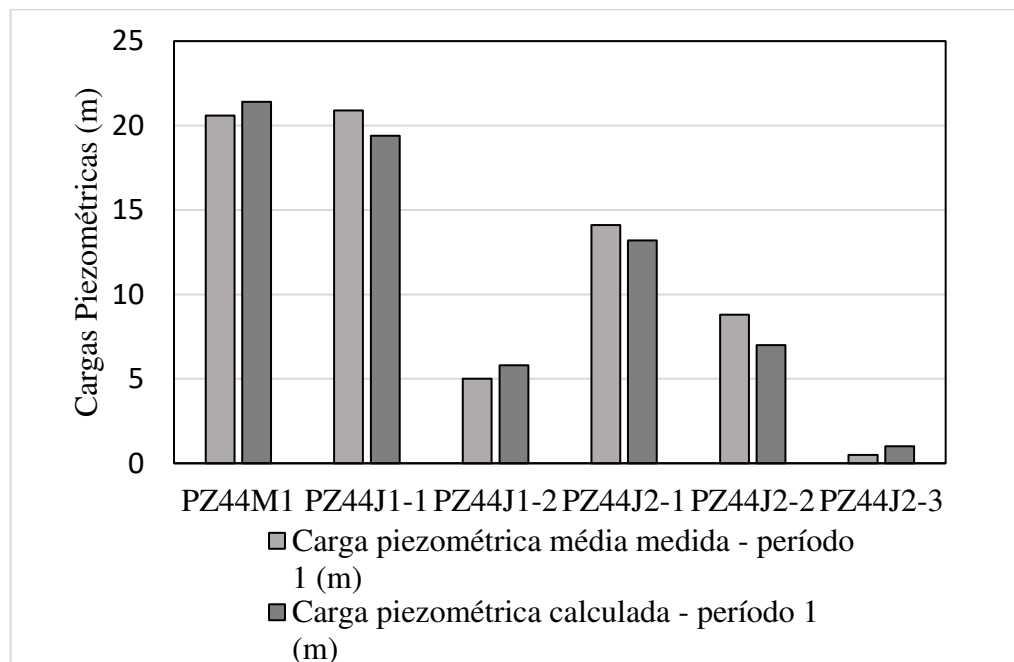
É apresentada, nas Figuras 23 e 24, a comparação das cargas piezométricas médias colhidas em campo com as cargas piezométricas calculadas na retroanálise, constantes nas Tabelas 10, 12 e 13, anteriormente apresentadas. A partir da leitura da tabela, é possível notar que os valores de cargas piezométricas calculadas ficaram suficientemente próximos dos valores medidos em campo, com diferença média de 1 metro para os valores do Período 1. De posse dessa informação, pode-se considerar que os parâmetros hidráulicos empregados na modelagem de retroanálise foram satisfatórios para representar a rede de percolação existente no maciço.

O Período 2, considerado um período de validação, por sua vez, apresentou variações ligeiramente maiores; contudo deve-se levar em consideração a variação de nível do reservatório de um período ao outro, que pode alterar a rede de percolação presente. Apesar disso, o Período 2 corrobora os parâmetros hidráulicos adotados na condição de percolação do maciço, uma vez que variaram mais, mas se mantiveram próximos do valor esperado. Os valores dos parâmetros são mostrados na Tabela 14.

É importante ratificar que, conforme apresentado na Seção 6.5 deste trabalho, o piezômetro PZ44J2.3, devido à análise do seu histórico geral de leituras, é considerado um piezômetro defeituoso e, por isso, não foi considerado na retroanálise, apresentando, assim, maiores diferenças na comparação.

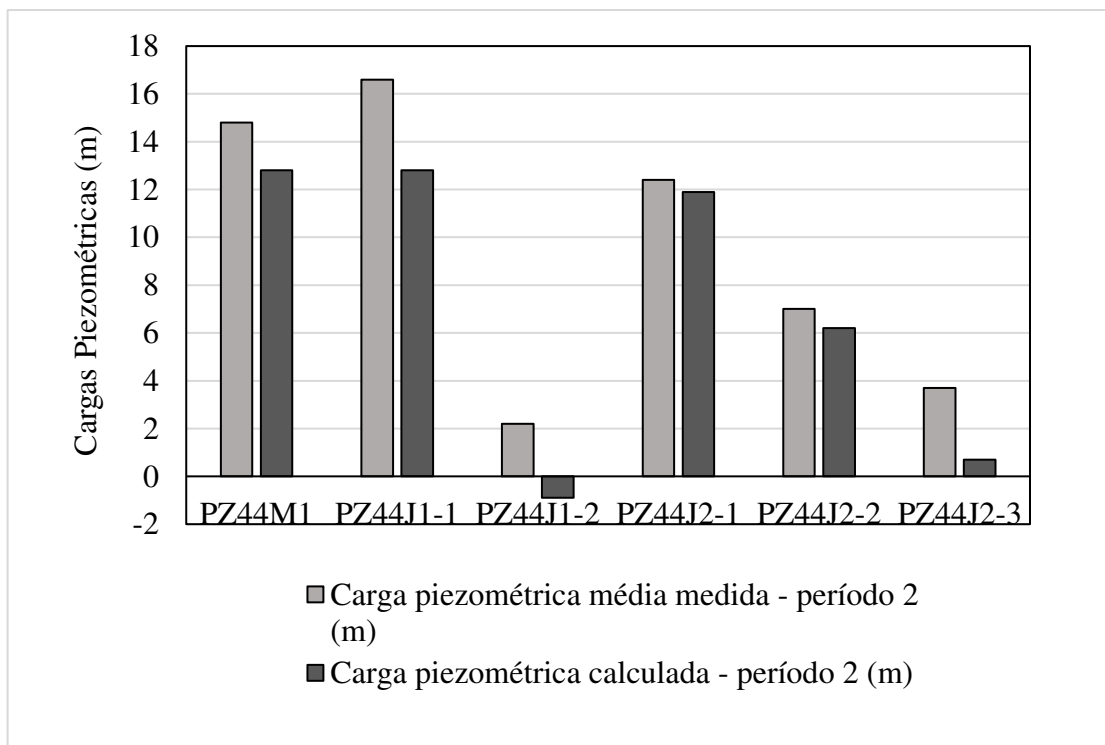
Figura 23 - Comparativo entre leituras médias medidas e as leituras calculadas na retroanálise

para o Período 1



Fonte: Autor, 2018

Figura 24 - Comparativo entre leituras médias medidas e as leituras calculadas na retroanálise para o Período 2



Fonte: Autor, 2018

Uma vez obtidos os parâmetros hidráulicos pela etapa de retroanálise, é mostrado a seguir o valor de cada parâmetro por material constituinte e a relação entre as permeabilidades que representa anisotropia deles.

Tabela 14 - Parâmetros hidráulicos recalculados após retroanálise

Material - Maciço		k2 (m/s)	k1(m/s)	k2/k1
Núcleo	SC/CL	6,00E-06	6,00E-07	10
Espaldares	GC	1,00E-02	1,00E-02	1
Filtro	Areia	6,00E-06	6,00E-06	1
Dreno	Brita	1,00E-02	1,00E-02	1
Dreno pé		1,00E-02	1,00E-02	1
Gnaisse/magmatito		1,00E-08	1,00E-08	1

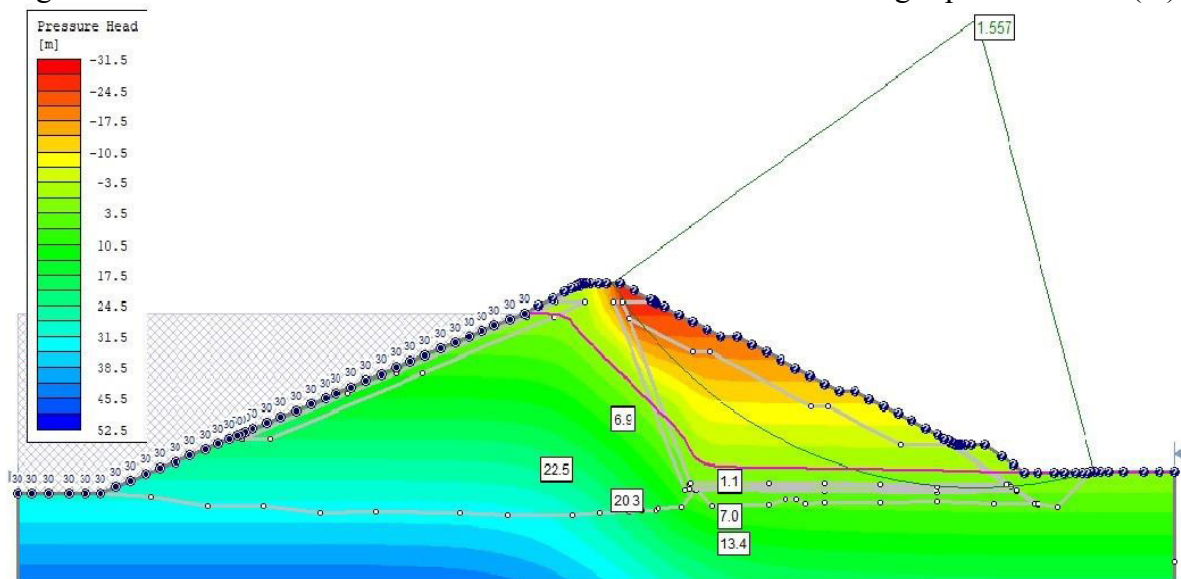
Fonte: Autor, 2018

#### 4.5. Modelagem para cheia máxima de projeto

Validado o modelo de análise da Seção 44 e o considerando representativo das condições de fluxo existentes na barragem, é possível calcular as cargas piezométricas esperadas para a cheia máxima de projeto, considerando os parâmetros hidráulicos obtidos da etapa anterior de retroanálise. Nesse estado, análogo à situação de modelagem inicial de análise de estabilidade, a cheia máxima de projeto provoca um carregamento hidráulico máximo de 30 m sobre o maciço da barragem.

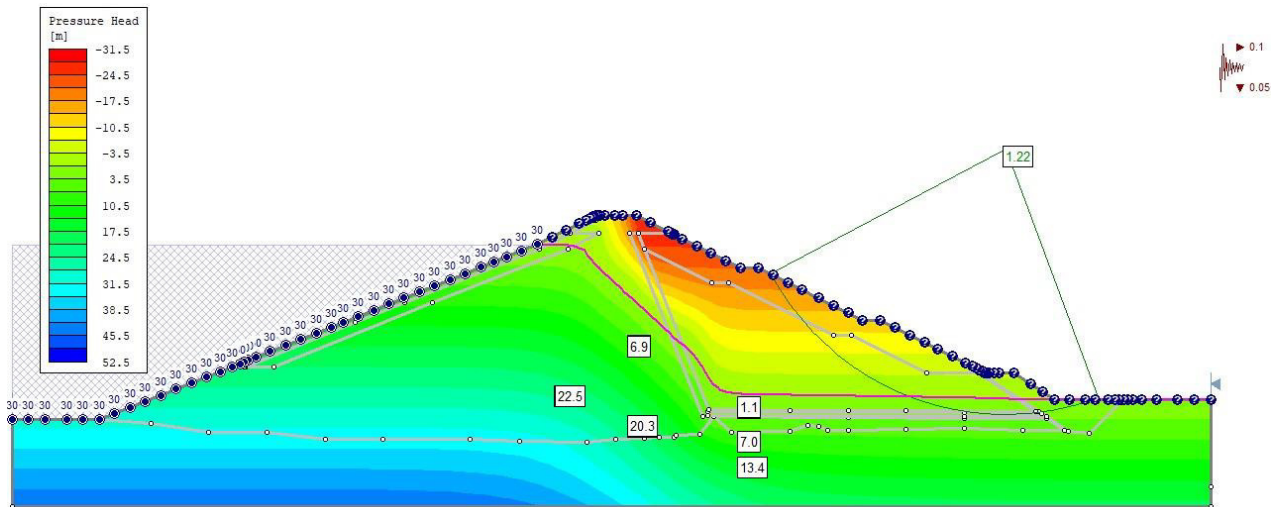
Os resultados da modelagem de análise de estabilidade estática e pseudo-estática, em nível máximo do reservatório são mostrados nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 - Análise de fluxo e estabilidade em nível máximo com cargas piezométricas (m)



Fonte: Autor, 2018

Figura 26 - Análise de fluxo e estabilidade pseudo estática em nível máximo com cargas piezométricas



Fonte: Autor, 2018

Pelos resultados observados das condições de carga piezométrica para carregamento do nível máximo do reservatório, pouca diferença ocorre entre os resultados de fatores de segurança entre os modelos de análise de estabilidade de projeto e o de análise de estabilidade da retroanálise. Considerando a comparação entre fatores de segurança da análise pseudo-estática a diferença é quase nula, evidenciando que o comprometimento da ação sísmica na estrutura ocorre de maneira muito próxima tanto nos casos de valores de projeto, quando nos do modelo validado pela retroanálise. Os valores de carga piezométrica, contudo, apresentaram variação consideravelmente altas de um modelo para outro, conforme se pode observar na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparativo entre resultados das cargas piezométricas para análise de estabilidade com os novos parâmetros hidráulicos e com os parâmetros de projeto

Instrumento	Cargas com parâmetros da retroanálise	Cargas com parâmetros de projeto
	(m)	(m)
PZ.44M.01	22,5	9,4
PZ.44J1.1	20,3	9,7
PZ.44J1.2	6,9	0,8
PZ.44J2.3	13,4	14,6
PZ.44J2.1	7,5	10,0
PZ.44J2.2	1,1	0,4

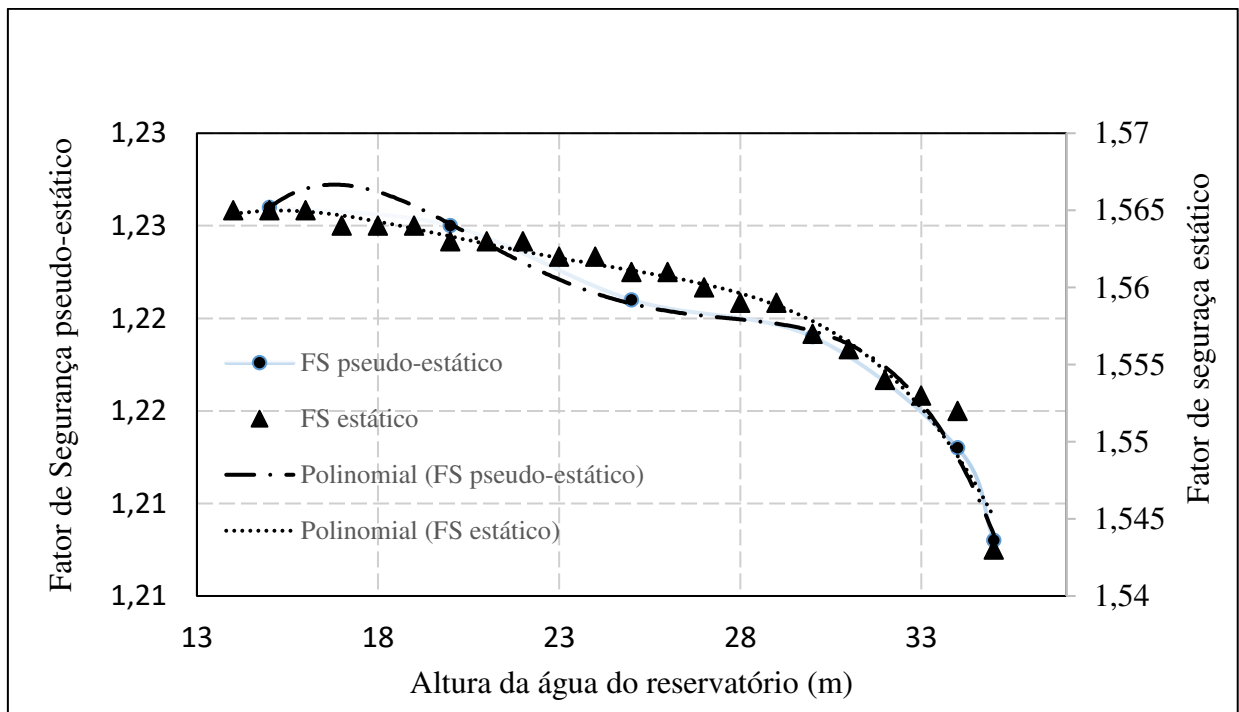
Fonte: Autor, 2018

#### 4.6. Análise de tendência

Essa seção busca retratar tendências de comportamento dos fatores de segurança encontrados e alguns parâmetros de entrada, como nível do reservatório e cargas piezométricas, no intuito de se identificar valores ou intervalos limites de cargas piezométricas para garantia de segurança da barragem.

A Figura 27 mostra a distribuição dos fatores de segurança pelas alturas de água no reservatório, considerando os resultados da análise estática e pseudo-estática

Figura 27- Distribuição dos fatores de segurança pseudo-estáticos e estáticos pela altura da coluna d'água do reservatório

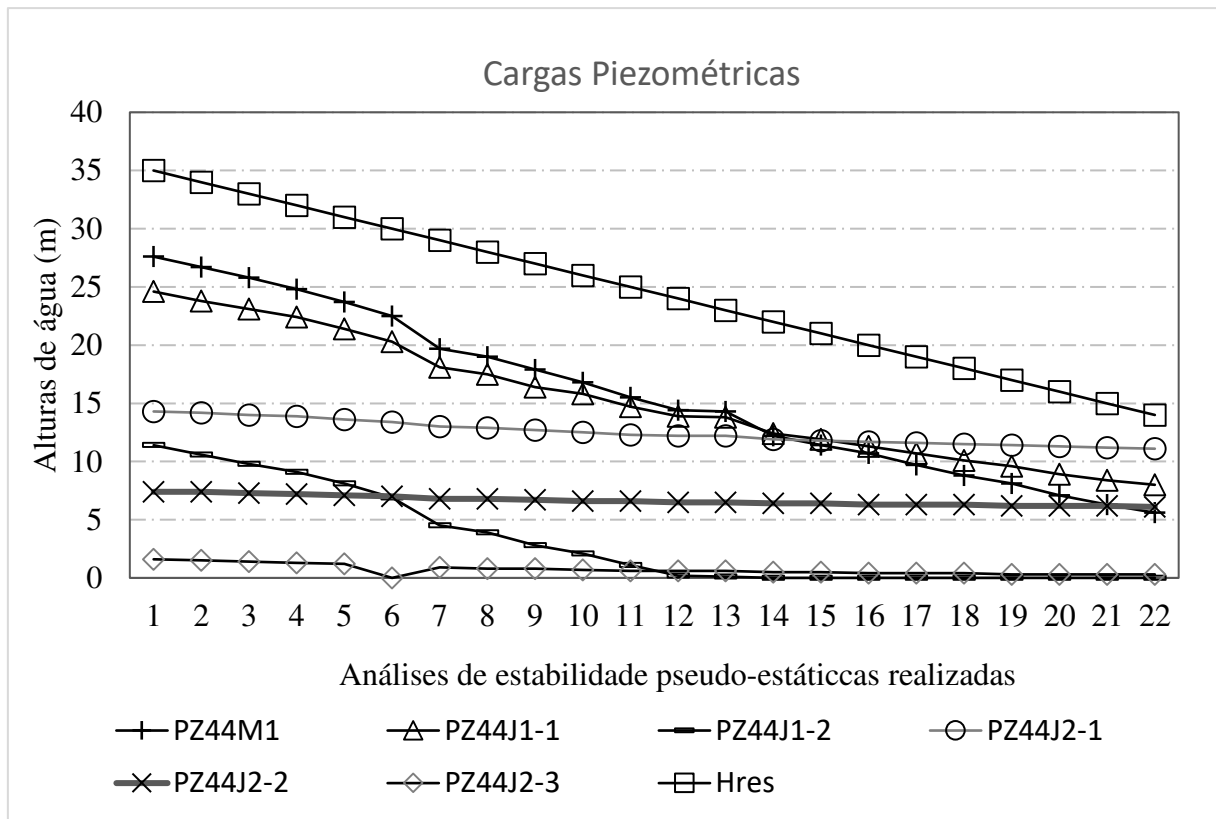


Fonte: Autor, 2018

Pode-se notar a pouca variação dos fatores de segurança pseudo-estáticos para as condições de altura de água no reservatório. Essa variação, ainda, é menor que as variações dos fatores dos modelos sem ocorrência de sismos.

A Figura 28 apresenta o valor das cargas piezométricas para cada altura de água no reservatório. Com o modelo gerado pelos parâmetros da retroanálise de fluxo, foi feita uma análise de fluxo para cada altura de água no reservatório e registrado seus valores de cargas piezométricas calculados. O resultado é uma curva de variação das cargas piezométricas para cada altura, mostrando os instrumentos que são sensíveis à variação conforme a coluna d'água existente.

Figura 28 - Cálculo das cargas piezométricas em cada piezômetro para cada nível de altura de coluna d'água no reservatório por análise de fluxo efetuada



Fonte: Autor, 2018

#### 4.7. Discussão sobre os resultados

Observando a situação do modelo de análise e comparando com o estado de estabilidade da retroanálise, é possível verificar a pouca variação dos coeficientes de segurança. Enquanto que o fator de segurança da análise de fluxo e estabilidade é 1,56, o da retroanálise é 1,55. Soma-se a isso o resultado da análise de estabilidade considerando a ocorrência de ações sísmicas, cujos fatores de segurança se mantiveram 1,22 tanto para modelo de análise, quanto para de retroanálise, conforme mostra a Tabela 16.

Tabela 16 - Comparativo de fatores de segurança com e sem ocorrências de ações sísmicas

Fator de Segurança	Análise de projeto	Análise com novos parâmetros
Sem ação sísmica	1,56	1,55
Com ação sísmica	1,22	1,22

Fonte: Autor, 2018

Os dados de fator de segurança gerados a partir da análise pseudo-estática permitem afirmar as relativas boas condições de estabilidade da Barragem de Aracoiaba para ocorrência de eventos sísmicos. Soma-se a isso, a adoção de coeficientes sísmicos conservadores (0,1g para acelerações horizontais e 0,015g para acelerações verticais) para os padrões de eventos sísmológicos do Nordeste e no Brasil. A título de comparação, Souza et al., (2005) afirmam que uma aceleração horizontal de 0,15g superam em 50% os valores do terremoto potencial máximo adotado para centrais nucleares de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, caracterizado pela intensidade VI MM. Vale ressaltar o risco de dano potencial associado a esses tipos de estruturas nucleares e a necessidade de adoção de parâmetros conservadores de dimensionamento das estruturas de suporte a eventos sísmico.

É importante considerar também as limitações da modelagem pseudo-estática. O próprio método pseudo-estático apresenta algumas limitações em sua aplicação pois considera o carregamento sísmico sendo contínuo no período de ocorrência, desconsidera a absorção de energia do sismo por outras estruturas, como fundação, aplica simultaneamente as acelerações horizontais e verticais e, por fim, simplifica a aplicação das vibrações na barragem (SOUZA et al., 2005). Tais simplificações podem gerar erros ou imprecisões por não levar em conta aspectos que podem ter alguma influência nos resultados de estabilidade global

É possível admitir, pelo exposto na Tabela 16, que, uma vez que a presença de sismos confere a mesma estabilidade para os modelos de análise e retroanálise e que os fatores que diferem entre os dois modelos são os parâmetros hidráulicos, a resistência à ação sísmica por parte da estrutura está ligeiramente mais ligada às características geotécnicas de resistência dos materiais do que às condições de fluxo vigentes no momento de um evento sísmico. É possível notar isso pois as acelerações sísmicas horizontais e verticais atuam na massa de solo mobilizada e reduzem as forças de contatos intergranulares, comprometendo a resistência oferecida pelo solo ao deslizamento.

Uma informação pertinente a respeito da influência da ação sísmica na estabilidade global da estrutura é que, em todas as situações de análises levantadas nesse trabalho, se for comparado os fatores de segurança da análise estática, que não considera a ação de sismos, e a pseudo-estática, que considera, a redução do primeiro fator de segurança ocorreu em aproximadamente 34%, conforme mostra a Tabela 17. Isso mostra um comprometimento considerável à segurança global da estrutura.

Tabela 17 - Comprometimento do fator de segurança estático com a ocorrência de eventos sísmicos

Situação de Análise	Análise de projeto	Análise da modelagem Período 1	Análise da modelagem Período 2	Análise da modelagem com cheia máxima
FS estático	1,56	1,56	1,56	1,56
FS pseudo-estático	1,22	1,22	1,22	1,22
Variação (%)	33,9%	33,8%	33,9%	33,7%

Fonte: Autor, 2018

Essa pouca variação dos fatores de segurança, contudo, vai de encontro às variações de parâmetros hidráulicos que podem ser observadas em alguns materiais. O comparativo entre os valores de parâmetros hidráulicos de projeto e os valores encontrados são apresentados na Tabela 18. Os parâmetros hidráulicos  $k_2$  e  $k_1$  são os coeficientes de condutividade hidráulica principais na rede de fluxo da estrutura.

Tabela 18 – Comparativo entre parâmetros hidráulicos de projeto e

Material		Parâmetros de projeto			Parâmetros obtidos		
		$k_2$ (m/s)	$k_1$ (m/s)	$k_2/k_1$	$k_2$ (m/s)	$k_2$ (m/s)	$k_2/k_1$
Núcleo	SC/CL	1,00E-08	1,00E-07	0,1	6,00E-06	6,00E-07	10
Espaldares	GC	1,00E-04	1,00E-04	1	1,00E-02	1,00E-02	1
Filtro	AREIA	1,00E-04	1,00E-04	1	6,00E-06	6,00E-06	1
Dreno	BRITA	1,00E-02	1,00E-02	1	1,00E-02	1,00E-02	1
Dreno pé		1,00E-02	1,00E-02	1	1,00E-02	1,00E-02	1
Gnaiss/magmatito		1,00E-08	1,00E-08	1	1,00E-08	1,00E-08	1

Fonte: Adaptado de SRH (1998)

O filtro, por exemplo, teve a permeabilidade em torno de 600 vezes menor que a inicialmente determinada em projeto. Observando que o filtro foi calculado na retroanálise com a mesma permeabilidade do material do maciço (SC/CL), pode-se afirmar, com relativa certeza, que este elemento se encontra bastante colmatado, com bem menos volume de vazios que o esperado para a sua função de conduzir o fluxo de água até o tapete drenante. Essa obstrução pode ter sido gerada pelo carreamento de solos com granulometria mais fina para o interior do filtro. Uma evidencia dessa hipótese é o fato de o material constituinte do maciço SC/CL ter se apresentado em 100 vezes mais permeável que o inicialmente projetado.

O tapete drenante, por sua vez, apresentou boa capacidade drenante, uma vez que manteve a permeabilidade de projeto. É importante destacar a variação da rocha migmatito-gnáissico na fundação, cuja a permeabilidade se mostrou em torno de  $10^3$  vezes menor que a medida pelos ensaios geotécnicos. Possivelmente, essa condição mais estanque da fundação foi ocasionada por efeitos do tratamento da fundação com injeção de cortinas de cimento. Conseqüentemente, a barragem, sendo mais impermeável na sua base, tem um acréscimo de pressão de percolação nessa região.

Esse acréscimo de pressão na base da estrutura pode ser constatado pela leitura de carga piezométrica dos instrumentos de base (PZ44M1, PZ44J1-1) estarem de 120% a 150% maiores que as cargas previstas em projeto, com base na Tabela 15.

A partir do exposto nos resultados, é possível afirmar que o modelo levantado da Seção 44 na retroanálise representa suficientemente bem o estado de fluxo dentro do maciço, dentre outras razões, pois os resultados de parâmetros hidráulicos obtidos na retroanálise levam a valores de cargas piezométricas próximos daqueles encontrados em leituras de campo.

Tratando das amostras de fatores de segurança, da Figura 27, pode-se constatar que é possível esperar valores de cargas piezométricas com certa previsibilidade a partir da carga hidráulica atuante, observando as funções que os representam.

Apesar da pouca variação do fator de segurança na estrutura, é possível, a partir da curva polinomial que o representa, inferir que há um possível comportamento potencial incremento ou de caimento do fator de segurança da estrutura ocorre de maneira exponencial, como aumento da coluna de água do reservatório. No caso da Barragem de Aracoíaba, esse critério não é tão impactante pois o fator de segurança no limite máximo de carga hidráulica testado, que foi a própria altura do maciço (35 m), ou seja, em condições já de galgamento da estrutura, não teve quedas muito abruptas do fator de segurança, mas a tendência do comportamento das variações dos fatores é ocorrer essa queda.

Esse pequeno decréscimo do fator de segurança pode ser atribuído ao fato de a folga entre a cota da soleira e a cota de crista não ter sido de grandes espaçamentos, apenas 5 metros. Pensando em barragens onde essa folga seja maior e em vertedouros não funcionando suficientemente, o maciço se sobrecarrega além do esperado e o fator de segurança cai de maneira exponencial.

Essa informação obtida é um alerta para manutenção dos vertedouros das barragens, garantindo a sua total desobstrução, para que, em situações de cheia, a água excedente seja adequadamente vertida e não sobrecarregue o maciço da estrutura.

Admitindo a representatividade do modelo de análise e observando a Figura 27 que

mostram a distribuição dos fatores de segurança para cada altura hidráulica do reservatório, em análise estática e pseudo-estática, é possível concluir que a Barragem de Aracoíaba atingiu os valores mínimos de segurança para as hipóteses de modelagem tratadas neste estudo e calculadas pelo método de Bishop Simplificado (1955). Os resultados calculados no referido método ficaram consistentemente acima dos fatores mínimos de segurança descritos nas Tabelas 1 e 2. Não foram identificadas cargas piezométricas críticas à estabilidade da obra, uma vez que extrapolando as modelagens de carregamento hídrico além do máximo carregamento de projeto, os fatores continuaram pontuando em aproximadamente 1,5, para condição estática e 1,2 para condição pseudo-estática, o que garante a condição de segurança exigida em órgãos especializados.

Por fim, a curva de variação de cargas piezométricas apresentado na Figura 28, traz o comportamento das cargas piezométricas para cada altura de coluna d'água no reservatório. Além de ser uma evidencia da consistência da retroanálise realizada, uma vez que seus valores de cargas piezométricas convergem para aqueles medidos em campo, mostra quais piezômetros são sensíveis para o trecho de variação da coluna d'água. O instrumento PZ44J1.2, por exemplo, apresenta sensibilidade de medição entre as alturas hidráulicas do reservatório entre 35m e 24m aproximadamente. Já o PZ44M.1 e PZ44J1.1 apresentam sensibilidade em qualquer variação da carga hidráulica do reservatório. Essa consideração é relevante, pois pode permitir ao observador de campo saber de quais instrumentos esperar variação das leituras e quais leituras podem ser consideradas anômalas..

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Este capítulo final busca discorrer sobre conclusões finais e considerações relevantes realizadas ao longo desse estudo tanto no tocante ao estudo da estabilidade de uma barragem quando há ocorrência de ações sísmicas, quanto a definição de limites piezométricos críticos. Esses limites se atêm aos estudos de percolação no maciço e fundações.

### 5.1. Conclusões de estudo

O presente estudo pôde concluir que a ocorrência de eventos sísmicos de proporções destrutivas, com magnitudes acima de 6,5 pontos em escala Richter, ou VIII MM, aproximadamente, acarreta na estabilidade global da barragem de terra homogênea em Aracoiaba.

A barragem analisada apresentou consistentes valores de fatores de segurança, próximos a 1,22, para os casos de ocorrência de ação sísmica. Esse resultado, considerando as recomendações de pesquisadores e autores especializados, como as que se apresentam na Tabela 2, demonstra que a barragem atende aos critérios de segurança, conforme as hipóteses e simplificações dos métodos abordados nesse estudo. Para esse resultado considerou uma aceleração sísmica bastante conservadora para os padrões de ocorrência brasileiro: 0,1g em acelerações horizontais e 9,015g para acelerações verticais.

Além disso, conclui-se que estabilidade global da estrutura, quando submetida a ação de eventos sísmicos, sofre influência ligeiramente maior das características de resistência geotécnicas do que dos parâmetros hidráulicos do material constituinte. Além disso, houve um comprometimento de aproximadamente 34% na segurança da obra geotécnica, com base na metodologia adotada.

Obtidas as leituras de campo e realizadas as análises e retroanálises de fluxo e estabilidade, estima-se que os materiais de maciço e filtro não detém, conforme previa em projeto, as características de permeabilidade iniciais. No maciço de areia argilosa foi contatado uma indicação de estar 100 vezes mais permeável que o material inicialmente ensaiado e projetado para barragem e o filtro, indicando estar colmatado, comprometendo sua capacidade de conduzir o fluxo até o dreno. A fundação, por sua vez, apresentou-se como 1000 vezes mais impermeável que o previsto em projeto.

Essas alterações nas condições de percolação dos materiais, contudo, para o período observado, não acarretaram em comprometimento da estabilidade global da estrutura. Os fatores de segurança para análises estáticas se mantiveram em pouco mais de 1,5, o que garante

o atendimento ao critério de fator mínimo constante na Tabela 1 desse estudo.

Dos estudos de medidas de tendência empregados para obter comportamentos de distribuição dos fatores de segurança, observa-se que a relação polinomial encontrada atende ordem 4 e pelo comportamento da curva de variação, é possível concluir que a redução do fator de segurança ocorre exponencialmente com o aumento do nível d'água além da cota de cheia máxima. Isso reitera a importância da checagem da desobstrução dos vertedouros e seus canais de aproximação e restituição no monitoramento de segurança de barragem.

Ainda nesses comportamentos de tendência dos dados, é possível considerar a existência de piezômetros que refletem variações nas condições internas de percolação e, por conseguinte, refletem variações das cargas piezométricas conforme varia a coluna d'água do reservatório. Outros instrumentos só se tornam sensíveis à medição em certas faixas de altura do reservatório.

Considera-se alcançados os objetivos iniciais estabelecidos para esse estudo, pois as cargas piezométricas de projeto foram determinadas a partir da retroanálise realizada. Em seguida, esses valores foram comparados e analisados com critério de segurança divulgados na literatura especializada. Além disso, foi possível observar o impacto de uma aceleração sísmica na estabilidade global da estrutura, a partir de metodologias consagradas no meio acadêmico.

## **5.2. Sugestões de futuras pesquisas**

Conforme citado anteriormente, o método pseudo-estático, apesar de conservador na maioria dos casos, é uma metodologia simplificada de consideração de forças sísmicas dinâmicas em um modelo de análise estático, que é o método do equilíbrio limite. A sugestão de estudos a seguir para comparação de seus efeitos com o método aqui retratado é válida a fim de se obter o real ganho em utilizar determinado método em detrimento de outro.

- a) Aplicação da metodologia de Sarma (1973): esse método busca o cálculo do fator de segurança pelo cálculo da aceleração sísmica horizontal limite para trazer a massa de solo delimitada a uma superfície potencial de ruptura ao deslizamento. Esse método é importante pois não arbitra um fator inicial de aceleração sísmica horizontal;
- b) Análise pós sismos: Estudo das condições de estabilidade em períodos posteriores à ocorrência de um evento sísmico, uma vez que acelerações sísmicas reduzem a resistência do solo ao cisalhamento;
- c) Análise dinâmica: Análise considerando carregamentos dinâmicos com amplitudes de aplicação e repercussão das vibrações na estrutura de

barramento.

- d) Replicação da metodologia a outras barragens, com outras condições de contorno, materiais constituintes e regiões de atividade sísmica, a fim de que se possa compara as relações de influência da ação sísmica de uma estrutura para outra.

## REFERÊNCIAS

AL-TABBAA, A; WOOD, D. M. **Some Measurements of the Permeability of Kaolin.** *Geotechnique*, v37, p. 499-503, 1987.

ARAÚJO, F. R. **Risco geotécnico: uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de Taludes da Barragem Olho D'Água no Estado do Ceará.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Ceará. 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio - **ABNT. NBR 6484, 2001.**

BERROCAL, et al., **Sismicidade do Brasil**, 1984.

BIENIAWSKI, Z.T., 1973, **Engineering classification of jointed rock masses:** Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, v. 15, p. 335-344.

BISHOP, A. W. **The use of the slip circle in the stability analysis of slopes.** *Geotechnique*, vol 5, no. 1955.

CATÁLOGO SÍSMICO BRASILEIRO. Rio de Janeiro: Rede Sismográfica Brasileira, 2012. Disponível em: [http://www.rsbr.gov.br/catalogo\\_sb.html](http://www.rsbr.gov.br/catalogo_sb.html). Acesso em 26/11/2018.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Diagnóstico das Barragens Instrumentadas do Estado do Ceará Monitoradas pela COGERH.** 2011.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Relatório de Anual de Segurança de Barragens do estado do Ceará 2015.** Fortaleza. 2015.

DANTAS NETO, S. A.; CARNEIRO, A. de A. Universidade Federal do Ceará. **Relatório das Condições de Segurança da Barragem de Olho d'Água.** Convênio UFC / COGERH. Fortaleza, 2013.

DARCY, H. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon.** Paris:*Dalmont*, 1856.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** 6ª ed. / Tradução All Task ; revisão técnica Persio Leister de Almeida Barros. – São Paulo : *Thomson Learning* , 2007.

DUARTE, S. C. H. **Estudo comparativo de diferentes abordagens na análise sísmica de barragens de aterro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Especialização Geotecnia

*Universidade Nova de Lisboa*. Lisboa, 2016.

FELL, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D. e Bell, G. **Geotechnical Engineering of Dams**. *Taylor & Francis Group*, London, 2005.

HARZA, L. F. **Uplift and Seepage Under Dams in Sand**. *Transactions, ASCE*, v. 100, 1935.

KOPPULA, S. D. **On Stability of Slopes on Clays with Linearly Increasing Strength**. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 21, n. 3, p 557-581, 1984.

LIMA, B. P. [et al.] **Relatório Anual de Segurança de Barragens - Risco e Inspeções**/ Fortaleza, Ce: *Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos*, 2016. Semiárido.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo. Oficina de textos, 2010.

MARANGON, M. **Barragens de terra e enrocamento**. Juiz de Fora: UFJF, 2004. Apostila da disciplina Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot\\_unid05.pdf](http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid05.pdf)>. Acesso em 09 dez. 2018.

MELO, C.; SAHRMA, S. Seismic Coefficients For Pseudostatic Slope Analysis. 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004.

MONTEIRO, G. S; **Análise Sísmica e Avaliação da Segurança Estrutural de Barragens Gravidade de Betão Compactado com Cilindro**. Mestrado em Engenharia Civil Especialização Estruturas. *Universidade do Porto*, Porto, 2007.

NADI, B; ASKARI, F; FARZANEH, O. **Seismic Performance Of Slopes In Pseudo-Static Designs With Different Safety Factors**. *IJST, Transactions of Civil Engineering, Shiraz University*, Vol. 38, No. C2, pp 465-483, 2014.

NOGUEIRA, R. N. **Simulação Numérica e Equilíbrio Limite aplicado a Retroanálise de Taludes em Mineração de Carvão**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

OLIVEIRA, P. H. S. **Sismicidade e esforços tectônicos na Zona sísmica Acaraú, Nordeste do Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SALES, C. A. T.; FONTENELLE, A. S; CAVALCANTE, S. P. P; SOUZA, V. A. D. **Monitoramento de Segurança de Barragens por Instrumentação No Estado Do Ceará. III Simpósio sobre Instrumentação de Barragens - Comitê Brasileiro de Barragens** . São Paulo. 2006.

SILVA, J. P. M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Especialização Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2011.

SOUZA, L.C. J; PEDROSO, L.J. **Um tratamento simplificado para avaliação da segurança sísmica em barragens gravidade de concreto - método pseudo-estático**. Brasília. Universidade Federal de Brasília, 2005.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Projeto executivo da Barragem Aracoiaba e adutoras de Aracoiaba e Baturité – relatório dos estudos básicos geológicos e geotécnicos**, 1997

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Projeto executivo da Barragem Aracoiaba e adutoras de Aracoiaba e Baturité – relatório geral**. Vol I, 1998.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Projeto executivo da Barragem Aracoiaba e adutoras de Aracoiaba e Baturité – memorial de cálculo**. Vol II, 1998.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Relatório As Built – Barragem Aracoiaba**. COBA. 2003

THÁ, P. C. **Estudo das condições de fluxo pela barragem de terra da margem esquerda de Itaipu**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

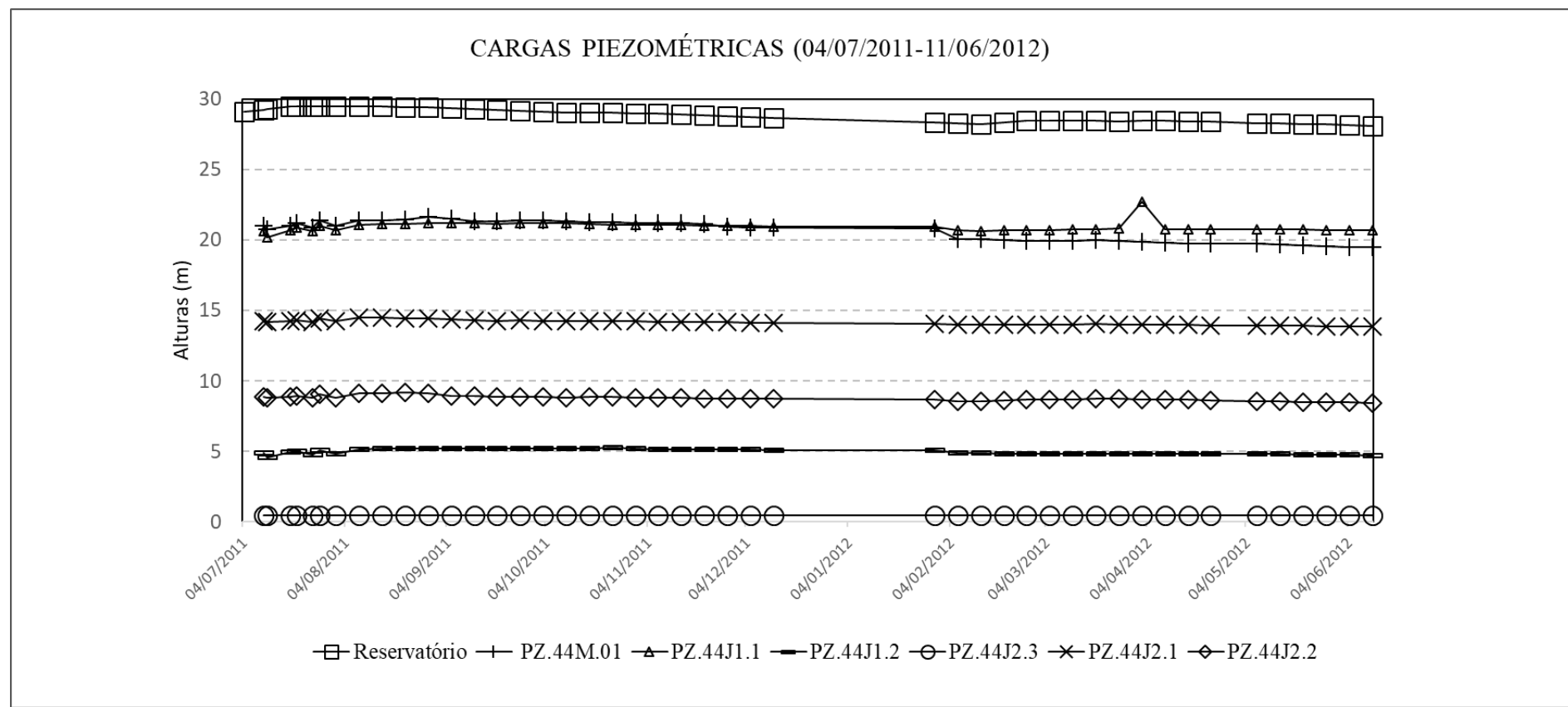
U.S ARMY CORPS OF ENGINEER. **Slope Stability Manual.Engineering and design**. 31 Oct.2003. Disponível no sítio: <<http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals>>. Acesso em setembro de 2018.

WILSON, S. I. **Manual de sondagens**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1999, 4 ed.

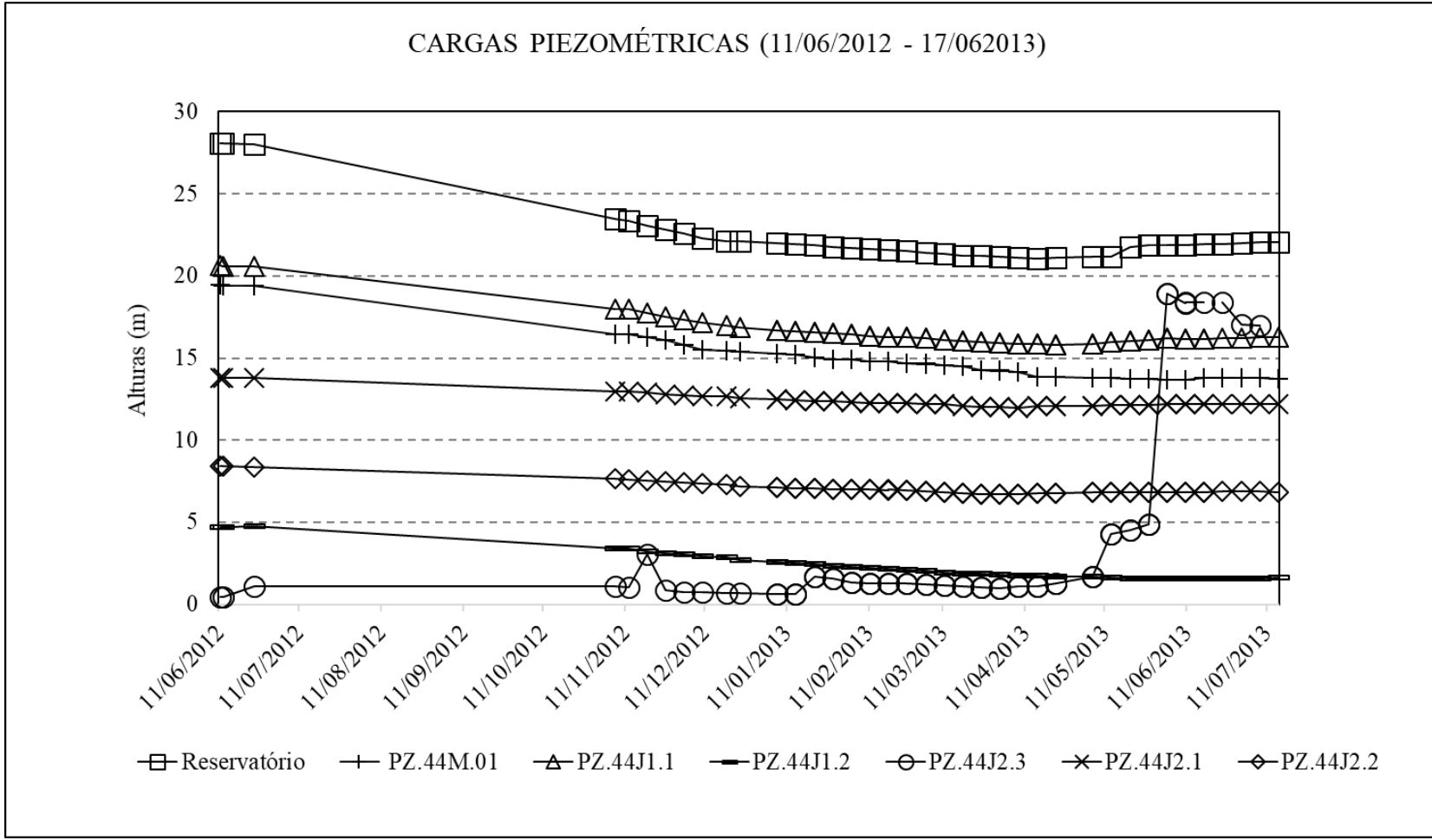
**ANEXOS**

**Anexo I: Variação das cargas piezométricas por período considerado**

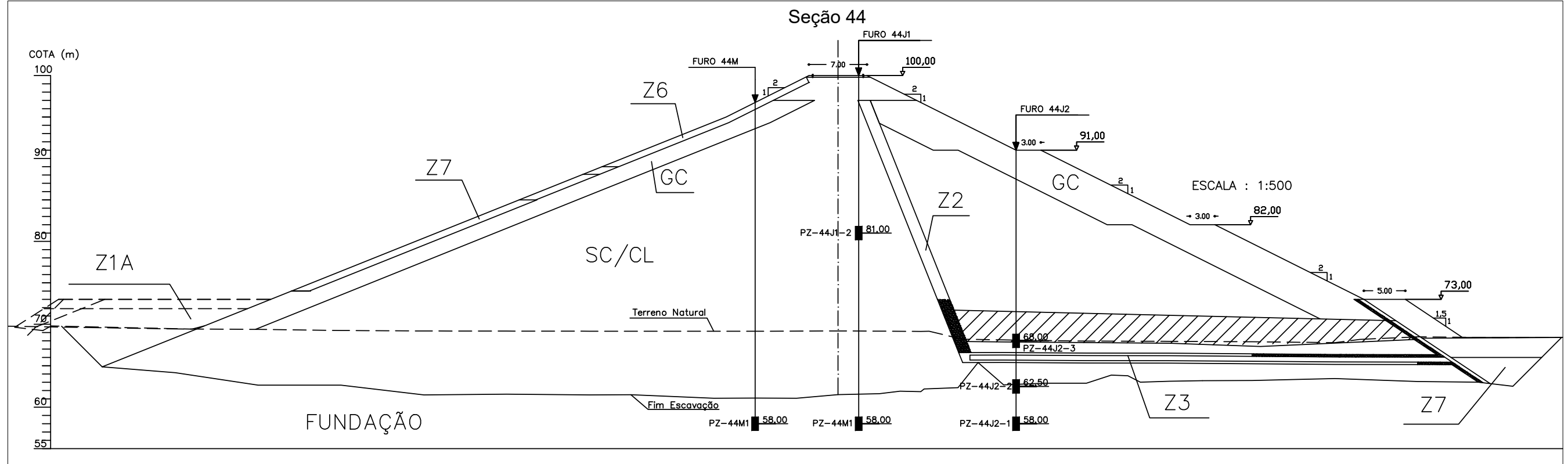
Variação de cargas piezométricas no histórico da Barragem de Aracoiaba (Seção 44 - Período 1)



Variação de cargas piezométricas no histórico da Barragem de Aracoíaba (Seção 44 - Período 2)



**Anexo II: Seção Instrumentada 44**



ESCALA : 1:500

LEGENDA:

-----	Eixo
- - - - -	Terreno Natural
-----	Fim Escavação
-----	Projeto
-----	Extravasor
///////	Argila Reaproveitada

- Z1 Areia
- Z2 Filtro de areia
- Z3 Dreno (Brita)
- Z4 Transição (material Procesado)
- Z5 Enrocamento fino (material detonado)
- Z6 Proteção do talude
- Z7 Rip rap
- Z1A Enchimento com solos das escavações

REVISÕES			
N°	Natureza da Revisão	Data	Aprov.

**GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ**  
 SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS - SRH  
 COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS - COGERH  
 PROJETO DE DESENVOLVIMENTO URBANO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ - PROURB/CE

**BARRAGEM DE ARACOIABA**

"COMO CONSTRUÍDO"  
 PERFIS DAS SEÇÕES INSTRUMENTADAS  
 Seções 43+10 e 48  
 PIEZÔMETROS

PROJETO: Orlando	DESENHISTA: João Carlos
VISTO: Francisco José	DATA DA EMISSÃO: FEV/2003
VERIFICADO: Francisco José	ESCALA: INDICADA
APROVADO: Murilo	EXECUTADO POR: <b>COBA</b>
	N° DO DESENHO: 01/02