



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Marcus Vinícius Lima Dias

Avaliação da Segurança de Barragens por meio da Análise de Instrumentação
Geotécnica

Ouro Preto
2017

Marcus Vinícius Lima Dias

Avaliação da Segurança de Barragens por meio da Análise de Instrumentação
Geotécnica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro Civil

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dsc. Romero César Gomes

Co-orientadora: Eng.Civil Érika Gomes

Ouro Preto
2017

D541a Dias, Marcus Vinícius.
Avaliação da Segurança de Barragens por meio de Instrumentação Geotécnica
[manuscrito] / Marcus Vinícius Dias. - 2017.

60f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dsc. Romero César Gomes .

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Geologia - Cartas, diagramas, etc - Análise de Perigo de Ruptura. 2. Mecânica de rochas. 3. Barragens e açudes - Segurança. I. Gomes , Romero César . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624

Marcus Vinícius Lima Dias

Avaliação da Segurança de Barragens por meio da Análise de Instrumentação Geotécnica

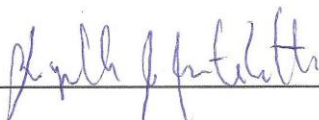
Monografia de conclusão de curso para a obtenção do Título de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto, defendida e aprovada em 11 de maio de 2017, pela banca examinadora constituída por:



Prof. Romero César Gomes (D.Sc.) – Orientador – UFOP



Prof. Lucas Deleon Ferreira(D.Sc.) – UFOP



Prof. Rosyelle Cristina Corteletti (D.Sc.) – NUGEO – UFOP

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder essa conquista.

À minha mãe Maria, exemplo de amor e dedicação.

Ao meu pai Macil, por toda luta e apoio incondicional.

À minha irmã Mariana, pelo carinho de sempre.

Aos meus avós (*In memoriam*), eterna gratidão.

À minha avó Helenita, pelo amor de sempre.

À minha namorada Gabriela, pelo incentivo e apoio.

À República Taranóia, pelo crescimento pessoal e amizades ao longo desses anos.

Ao PET CIVIL, pela oportunidade de crescimento.

À Fundação Gorceix, AngloGoldAshanti e IGEO, pelas oportunidades

À Escola de Minas, pelo ensino de qualidade.

Aos professores, Jaime Florêncio e Geraldo Donizetti de Paula, pela boa convivência e ensinamentos.

Ao professor Lucas, pela orientação e disponibilidade.

À Érika, pela orientação e apoio.

Aos amigos Eduardo Mendes e Henrique Teixeira, pela amizade e parceria nesses anos.

RESUMO

O histórico de ruptura de barragens dos últimos anos indica que é notória a importância da adequação dos procedimentos de gestão de risco. Para que seja realizada de forma cada vez mais efetiva e constante essa gestão segue a evolução dos criteriosos procedimentos de avaliação de segurança de barragens. O presente trabalho busca avaliar a estabilidade de uma barragem de terra para diferentes cenários de análise de perigo de ruptura. A elaboração dessa análise deu-se por meio do estudo de estabilidade de um modelo numérico que considera a seção principal instrumentada da estrutura, isto é, a seção de maior altura. Foram considerados ainda dados da instrumentação em campo, quanto ao cadastro dos instrumentos e leitura atual, para validação da funcionalidade. O perfil de análise possui piezômetros cujas leituras permitiram a verificação da estabilidade da estrutura, considerando cenários hipotéticos de risco conforme recomendações normativas. O modelo numérico foi simulado por meio do *software* SLIDE, e os dados provenientes do monitoramento juntamente com a análise de fluxo no interior do maciço da estrutura, geraram, a partir da análise de estabilidade por equilíbrio limite, um coeficiente de segurança atual. Outros níveis de poropressão foram simulados a partir de variações do fluxo na estrutura, sendo obtidos seus respectivos coeficientes de segurança. A comparação entre os coeficientes obtidos e os mínimos recomendados nas referências normativas e na literatura técnica permitiu a análise crítica dos métodos atualmente utilizados para atestar a estabilidade de barragens.

Palavras chave: Análise de Perigo de Ruptura. Instrumentação Geotécnica. Coeficiente de Segurança. Estabilidade de Barragens.

ABSTRACT

The recent history of dam ruptures indicates the importance of the appropriate use of risk management procedures. In order to be fulfilled effectively and constantly this management follows the development of meticulous procedures for the evaluation of dam safety. The goal of this paper is to evaluate the stability of an earthfill dam for different situations of risk of rupture analysis. The construction of this analysis was made through the stability study of a numerical model, which considers the main instrumented section of the structure, meaning the section of greater height. It was also considered data from the field instrumentation, as regards the instruments registration and current reading, to validate the functionality. The analysis profile presents piezometers readings, which allowed the verification of the structure stability, considering hypothetical scenarios of risk according to normative recommendations. The numerical model was simulated by the *software* SLIDE, and the data from the monitoring along with the flow analysis inside the structure mass, generated, through the equilibrium stability analysis, a current safety coefficient. Other levels of pore pressure were simulated from variations of the flow in the structure, thus obtaining their respective safety coefficients. The comparison between the coefficients obtained and the minimums recommended in the normative references and the technical literature allowed the critical analysis of the currently used methods to certify the stability of dams.

Key words: Risk of Rupture Analysis. Geotechnical Instrumentation. Coefficient of Security. Stability of Dams.

SUMÁRIO

1	Introdução	8
1.1	Justificativa	9
2	Objetivos	10
3	Revisão Bibliográfica	11
3.1	Barragens de Terra	11
3.2	Segurança de Barragens	13
3.2.1	Reavaliação da Segurança de Barragens	15
3.2.2	Gestão de Riscos em Barragens	16
3.3	Instrumentação Geotécnica em Barragens	17
3.3.1	Princípios e Instrumentos para a Medição do Nível D'água	19
3.3.2	Princípios e Instrumentos para a Medição de Poropressões	20
3.3.2.1	Piezômetros de Tubo Aberto (Casagrande)	20
3.4	Análise de Estabilidade em Barragens	23
4	Metodologia	26
4.1	Descrição da Seção da Barragem Analisada	26
4.2	Parâmetros Geotécnicos	27
4.3	Instrumentação	27
5	Estabilidade da Barragem	29
5.1	Análise de Estabilidade para o Nível Freático Atual	29
5.1.1	Programa SLIDE	29
5.1.2	Estudo da Estabilidade da Seção Crítica	30
5.2	Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Resistência	33
6	Análise do Perigo de Ruptura	35
6.1	Níveis de Sinalização de Segurança	35
6.2	Análises dos Níveis de Risco	36

6.3	Elaboração da Análise do Perigo de Ruptura	41
6.3.1	Estabelecimento dos Níveis de Risco para os Piezômetros Instalados na Seção	42
6.3.2	Leituras Piezométricas a partir da Instrumentação em Campo	43
6.3.3	Comparativo entre as Cotas Piezométricas Medidas e as Cotas Associadas aos Níveis de Risco	47
7	Considerações Finais	53
8	Recomendações para Trabalhos Futuros	56
	REFERÊNCIAS	57

1 Introdução

No mundo todo, a construção de barragens está atrelada ao desenvolvimento de uma determinada atividade socioeconômica, seja esta de mineração, do setor energético ou de outros. Como consequência da construção dessas estruturas, qualquer que seja o seu porte, tem-se de forma direta ou indireta um risco associado ao dano potencial relativo à perda de vidas, prejuízos contra o patrimônio e ao meio ambiente.

Nesse contexto, o histórico de acidentes envolvendo a construção e a operação das barragens exige a evolução das ferramentas de gestão de segurança dessas estruturas, com efeito nas mudanças da legislação que rege tais. Pode-se destacar como acidentes graves envolvendo rupturas de barragens no Brasil, os das barragens de Fundão (2015), e de Rio Verde (2001).

É de grande importância ressaltar que o conceito de segurança deve ser entendido em sentido global, envolvendo aspectos das mais variadas naturezas no âmbito da engenharia de barragens.

São várias as ferramentas utilizadas nos dias atuais para o controle da segurança de barragens nas fases de execução, operação e manutenção. Podemos citar como ferramentas usuais, o monitoramento por meio de instrumentação e inspeções de campo, além de projetos realizados para construção ou para adequação, contendo todos os critérios e parâmetros adequados.

O monitoramento pode assumir finalidades diferentes dependendo da etapa da obra que se deseja analisar. Para uma barragem em construção, a instrumentação tem por objetivo adequar as premissas do projeto ao método construtivo, garantido a execução de uma obra segura e econômica. Já para a avaliação da barragem ao longo da sua vida útil, essa instrumentação assume as características de controle da segurança, com detecções de variações no comportamento estrutural, geotécnico, hidráulico e operacional da estrutura.

Em muitas barragens de terra os instrumentos utilizados auxiliam significativamente nas reavaliações periódicas para uma correta gestão de risco. Um dos instrumentos mais utilizados nos procedimentos de monitoramento é o piezômetro. Esse aparelho mede leituras de poropressões ao longo do maciço da barragem, gerando com esses dados, informações relevantes em relação ao nível

freático e a percolação em toda a estrutura da seção analisada. Com a análise de fluxo feita é possível atestar, a partir de conhecimentos geotécnicos e elaboração de métodos pré-estabelecidos, a estabilidade da estrutura da barragem, assim como estabelecer medidas preventivas para um risco potencial identificado.

Todo o processo de análise e avaliação de segurança de uma barragem é intimamente ligado à qualidade dos procedimentos adotados tanto na execução do monitoramento em campo, como na leitura e interpretação dos resultados por uma equipe técnica qualificada.

1.1 Justificativa

O estudo da segurança de barragens no Brasil tem se tornado prioridade no âmbito da engenharia geotécnica, já que este assunto é de extrema importância devido ao grande porte dessas estruturas e aos recentes acidentes ocorridos.

O monitoramento e a conseqüente avaliação da segurança de barragens podem ser realizados por dois fundamentais processos discutidos nesse trabalho, Instrumentação e Análise de Perigo de Ruptura. Toda barragem, seja de terra ou concreto, precisa de um elaborado plano de instrumentação, desde a escolha de quais e quantos instrumentos utilizar, até a correta análise dos resultados obtidos no campo.

O presente trabalho estuda e relaciona a instrumentação de uma seção crítica com suas condições de operação, através da análise do perigo de ruptura. Este processo, que é uma importante forma de avaliar as condições de uma estrutura, se mostra incompleto em alguns aspectos quando é feito de forma convencional. Assim, além de se reproduzir esse processo, o trabalho busca criticá-lo, explicando alguns fatores que são essenciais em um estudo completo de avaliação de segurança de barragens.

2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar a segurança de uma barragem de terra por meio da instrumentação geotécnica da seção crítica. A partir de dados de leituras piezométricas e de parâmetros geotécnicos foi avaliado o fator de segurança com base no método de equilíbrio limite.

O trabalho objetiva também uma análise nas variações do nível freático na estrutura, simulando situações de elevação do fluxo na seção e obtendo respectivos fatores de segurança para níveis pré-estabelecidos na literatura, níveis estes, que simulam condições de normalidade, atenção e alerta para a operacionalidade da barragem.

Por fim, tem-se como objetivo, mostrar que apesar desse procedimento permitir um direcionamento da análise de risco e mostrar a criticidade da estrutura, ele desconsidera vários fatores fundamentais que deveriam compor uma análise de perigo mais detalhada e funcional, incluindo a variação da resistência, imprecisão na determinação dos parâmetros geotécnicos e análise da percolação interna.

3 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo descrevem-se de forma objetiva as barragens de terra e suas características, assim como a Instrumentação Geotécnica executada nessas estruturas, e ainda a Gestão de Risco atrelada a segurança dessas barragens. Também são definidos os processos de Análise de Estabilidade e Elaboração de Cartas de Risco.

3.1 Barragens de Terra

As barragens de terra são as barragens mais encontradas no Brasil, muitas vezes por se ter vales muito largos e ombreiras suaves, necessitando de grandes extensões de crista, assim como se dispõe abundantemente de solo. Segundo Mendonça (2002), comparadas com outros tipos de barragens, estas transmitem esforços baixos para as fundações, já que não são estruturas rígidas, sendo indicadas para todo tipo de solo ou rocha.

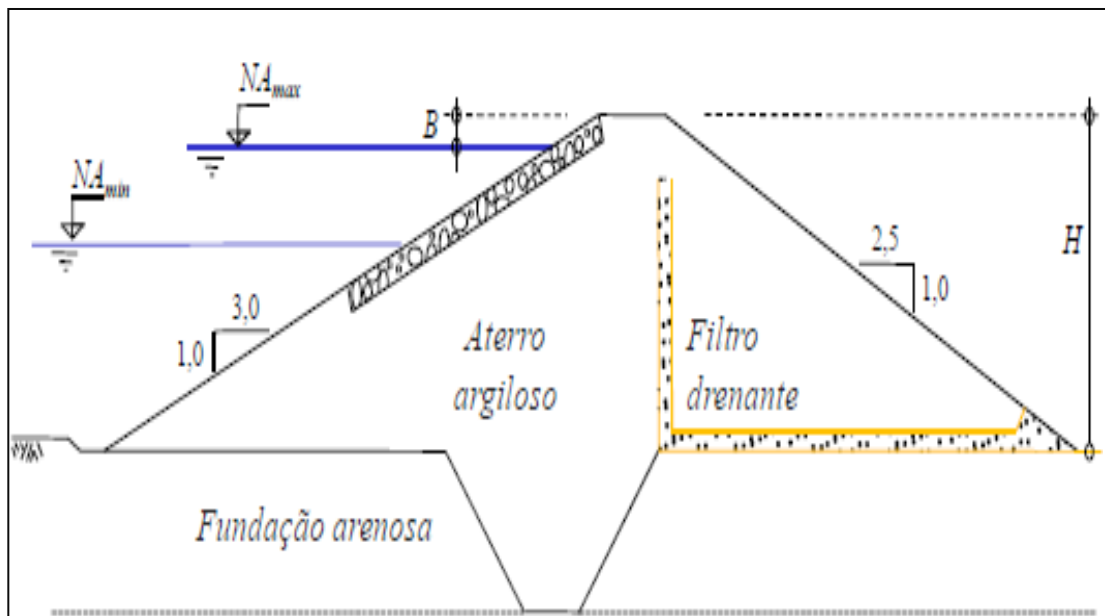
Para a construção desse tipo de barragem é necessário analisar a disponibilidade de materiais adequados nas proximidades do local de instalação da barragem.

As barragens de terra possuem certa variabilidade, podendo ser de dois tipos:

- Homogêneas: composta por um único material, excluindo-se a proteção dos taludes. Nesse tipo de barragem, o material precisa ser suficientemente impermeável, para garantir uma barreira adequada contra a água.
- Zoneadas: composta por diferentes tipos de solos, estes provenientes da disponibilidade de materiais, e em função da otimização da seção.

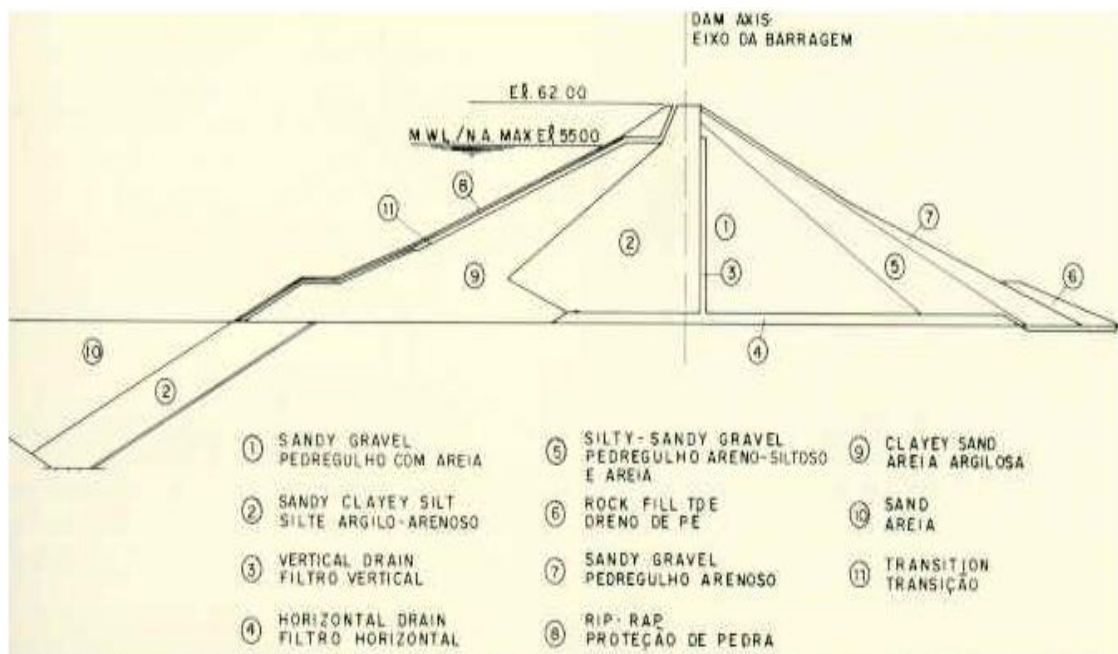
Os dois tipos de barragens citados anteriormente são mostrados nas Figuras 1 e 2 a seguir.

Figura 1: Esquema de barragem de terra homogênea



Fonte: Sayão (2009)

Figura 2: Esquema de barragem de terra zoneada



Fonte: Mendonça (2012)

3.2 Segurança de Barragens

De acordo com Smiderle (2014) cerca de 50 anos atrás, a engenharia de barragens não levava em consideração informações de problemas e suas respectivas causas em obras similares no que diz respeito a projetos e construção de barragens.

Contudo, com a evolução da engenharia, juntamente com o crescente aumento de obras desse porte, passou-se a valorizar a etapa de projeto e estudos de retro análise (LADEIRA, 2007).

De acordo com o Boletim 99 (ICOLD, 1995), por volta de 2,2% das barragens construídas no mundo até 1950 romperam. Após esse período, de 1951 a 1986, o percentual de rompimentos caiu para 0,5%.

Esse decréscimo do número de rompimentos de barragens está intimamente ligado ao desenvolvimento da engenharia e às políticas de segurança de barragens bem estabelecidas.

No Brasil, destaca-se o “Cadastro Brasileiro de Deteriorações de Barragens e Reservatórios” (CBDB, 1995) que apresenta 140 casos de acidentes em barragens, e descreve soluções adotadas para a recuperação.

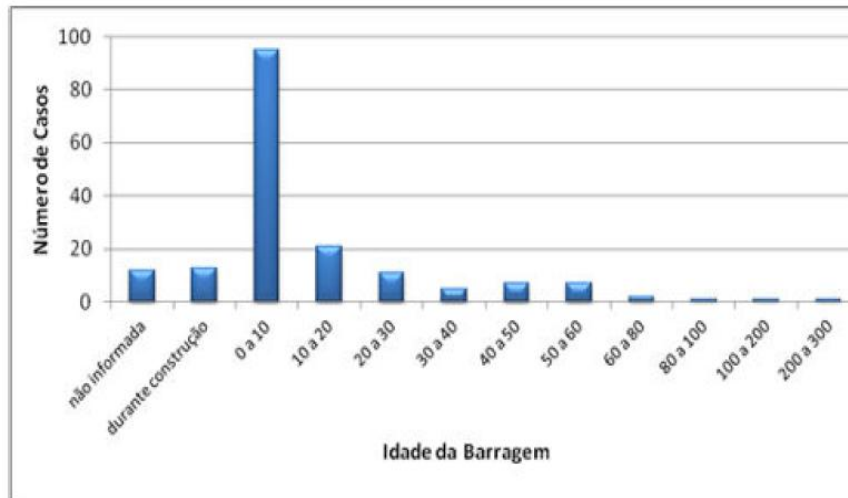
Segundo Zuffo (2005 *apud* SMIDERLE, 2014), quando verificados dados de rompimento de barragens, tem-se que as que mais sofreram falhas foram as de altura entre 11 e 20 metros, e que as estruturas acima de 81 metros possuem o menor percentual de acidentes.

Isso pode ser explicado pelo maior risco inerente a estas estruturas de grande porte, que leva ao monitoramento mais frequente e eficiente, sendo a grande maioria instrumentada e monitorada continuamente.

Em relação ao rompimento de barragem comparado com a idade da mesma, Smiderle (2014) explica que a maioria dos rompimentos está associada a estruturas com menos de 10 anos de construção, sendo este período considerado crítico, já que é nele que temos os primeiros carregamentos, pressões e deslocamentos.

Na Figura 3 é mostrada a relação entre ruptura e idade da barragem, e pode-se notar que quanto mais antiga a barragem, menor é o número de casos de rompimento.

Figura 3: Ruptura x Idade da Barragem



Fonte: Smiderle (2014)

Segundo Pierre (2003) o fato de uma barragem estar em operação há um longo tempo não é garantia de sua segurança, já que a deterioração de barragens se relaciona a vários fatores, como: ciclos de enchimento e esvaziamento do reservatório, variações de temperatura e alterações físico-químicas.

A maioria das anomalias ocorridas em barragens provavelmente poderiam ter sido evitadas, caso, essas estruturas tivessem sido monitoradas e instrumentadas de maneira correta, seguindo diretrizes básicas de segurança de barragens.

Sabendo-se do grande impacto a jusante que o rompimento de uma barragem pode causar, é preciso analisar como esse risco pode ser reduzido (SMIDERLE, 2014).

Pensando no correto entendimento dessas diretrizes para a segurança de barragens, o CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens) publicou em 1983, alguns documentos com recomendações para inspeção, verificação, procedimento de operação e instrumentação de barragens no Brasil. Mas, só a partir de 2010, foi publicada a Lei Federal 12.334, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens.

A lei obriga a classificação de todas as barragens em operação quanto ao risco e dano potencial, além da confecção do Plano de Ação Emergencial, se a barragem for classificada como estrutura de risco à ruptura.

Segundo Smiderle (2014) o monitoramento de uma barragem não deve ser feito apenas por obrigação da lei, é preciso pensar na segurança da estrutura com o

objetivo da preservação da vida da população a jusante da estrutura. É possível saber anomalias atuantes em uma barragem precocemente, se forem feitas inspeções visuais e o monitoramento da instrumentação periodicamente.

Os avanços obtidos com a segurança de barragens ainda não oferecem à engenharia um domínio total dos mecanismos que levam aos acidentes e incidentes nas rupturas. Os modelos e simulações matemáticas utilizados para os cálculos de estabilidade das estruturas geram muitas incertezas, visto que depende de dados de entrada não confiáveis ou inexistentes, além da dependência de equipes técnicas qualificadas para as atividades de manutenção e monitoramento das barragens (MEDEIROS, 2003).

3.2.1 Reavaliação da Segurança de Barragens

O Guia Básico de Segurança de Barragens define a reavaliação da segurança de barragem como:

Uma avaliação sistemática da segurança da barragem, por meio de inspeções pormenorizadas das estruturas, avaliação do desempenho e verificação dos registros originais de projeto e construção, para assegurar que estes obedeçam aos critérios em vigor. (GUIA BÁSICO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS, 1999, p.23).

A periodicidade das reavaliações feitas deve ser em tempos regulares, tanto para a barragem, como para suas estruturas associadas, incluindo-se seus planos de operação, manutenção, inspeção e de emergência. Assim, é possível determinar se as estruturas estão seguras, e caso não estejam, determinar as melhorias necessárias para a segurança. Para uma barragem nova, a primeira reavaliação de segurança deve ser completada em até 05 anos após o enchimento inicial.

Segundo o Guia Básico de Reavaliação de Barragens (1999), o nível de detalhes que é preciso para uma reavaliação satisfatória, deve ser função da importância, do conservadorismo do projeto e do porte da barragem, bem como das consequências de sua ruptura.

A Tabela 1 apresenta uma orientação a respeito da frequência de reavaliações baseada na possível consequência de ruptura.

Tabela 1: Frequência de Reavaliações da Segurança de Barragens

CONSEQUÊNCIA DE RUPTURA	PERÍODO ENTRE REAVALIAÇÕES
Muito Alta	5 anos
Alta	7 anos
Baixa	10 anos
Muito baixa	10 anos

Fonte: Guia Básico de Reavaliação de Barragens (1999)

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (2002), no relatório de cada reavaliação feita deve-se fixar a data da próxima. E caso ocorram mudanças significativas na estrutura ou nas condições locais, como: alterações de projeto, eventos hidrológicos ou sismos, deve-se efetuar imediatamente uma reavaliação da segurança.

3.2.2 Gestão de Riscos em Barragens

A gestão de riscos em barragens refere-se à realização de medidas para mitigar o risco e à reavaliação frequente da sua eficácia. São aplicadas técnicas e princípios de gestão adequados para minimizar as consequências de uma ocorrência ou a severidade de consequências adversas (PEREIRA, 2009).

Na Engenharia Geotécnica, a análise de risco, que é parte fundamental de uma gestão aplicável, está intimamente ligada à avaliação das condições de segurança de barragens e ao impacto da sua ruptura sobre indivíduos, sociedade e meio ambiente.

No contexto geral de avaliação das condições de segurança dessas estruturas, têm-se a instrumentação e o monitoramento como partes integrantes do plano de gestão de riscos e podendo ser usadas como ferramentas para a detecção de certas ações.

A manutenção de riscos em níveis toleráveis requer um controle contínuo através de medidas como o monitoramento e inspeções periódicas da obra, além de qualificação técnica dos responsáveis pela execução e projetos, e por fim, de procedimentos corretos de operação e manutenção (USSD, 2003).

3.3 Instrumentação Geotécnica em Barragens

Instrumentação é o processo que permite a coleta, registro e processamento dos dados obtidos a partir das leituras dos instrumentos instalados em lugares pré-determinados na barragem, geralmente nas fundações ou aterro (FONSECA, 2003).

Esse processo deve ser realizado durante toda a vida útil da barragem, de modo a proporcionar informações necessárias para uma atual revisão ou adaptação dos procedimentos adotados na construção ou manutenção da estrutura, permitindo verificar se há evidências de uma possível condição de risco (FUSARO, 2005).

Segundo Fonseca (2003) as técnicas usualmente adotadas na instrumentação geotécnica estão intimamente ligadas ao aprimoramento tecnológico dos instrumentos de medida e à aproximação de especificações técnicas de projeto para o controle das condições gerais de segurança das barragens. No Brasil, até cerca de 50 anos atrás, era predominante a sistemática de inspeções visuais feitas por especialistas da área. Com a detecção de anomalias graves que comprometiam a estrutura da barragem, as observações eram intensificadas, e posteriormente eram feitos reparos recomendados por especialistas.

Nas décadas seguintes houve uma sistematização dos planos gerais de monitoramento e controle das barragens brasileiras. Este processo resultou em uma substituição dos instrumentos inicialmente importados, por instrumentos desenvolvidos nacionalmente, gerando assim, uma reestruturação de metodologias adotadas num plano de instrumentação de barragens.

Segundo Rosso e Piasentin (1996 *apud* FONSECA, 2003), a reestruturação da instrumentação de barragens é caracterizada por:

- o número de instrumentos deve ser o mínimo possível, garantindo a avaliação global do desempenho da estrutura;
- é preciso instrumentar de forma correta as fundações, já que essa instrumentação é mais susceptível a incertezas;
- a escolha de instrumentos deve privilegiar aqueles em que a manutenção e eventual substituição seja feita de forma mais fácil;
- para a escolha do tipo de instrumento, deve-se considerar aspectos como: simplicidade, confiabilidade, resistência, custos de aquisição e manutenção e durabilidade. Para um projeto criterioso de barragem, não

existe uma metodologia ideal, e sim alguns princípios gerais devidamente adaptados para as complexas condições de campo.

Nesse aspecto, os princípios gerais compatibilizam projetos, condições do local da estrutura, instalação de instrumentos por equipe experiente e especificações claras de aquisição, registro e apresentação dos dados a serem medidos. De forma complementar, os procedimentos de reavaliação dos instrumentos devem ser feitos periodicamente, sendo indispensável para as análises dos dados da instrumentação.

De acordo com o livro “Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil”, que se baseou no II Simpósio de Instrumentação de Barragens (1996), é impossível saber, previamente, a quantidade de instrumentos adequados para um determinado tipo de barragem. Contudo, dado o maior número de incertezas que geralmente existem nas investigações geotécnicas e nas análises de projetos desse tipo, pode-se afirmar que toda avaliação de segurança de barragens, deve, necessariamente, prever algum tipo de instrumentação.

De acordo com o manual “Guia para Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens (2015)”, a manutenção dos instrumentos é de grande importância para se garantir a confiabilidade das leituras. Essa manutenção deve ser feita de forma sistemática pelos técnicos da equipe de segurança, e seus procedimentos devem ser devidamente registrados, bem como a reparação, substituição e instalação de novos instrumentos.

As literaturas técnicas e normas vigentes não especificam a periodicidade da avaliação de funcionalidade desses instrumentos, o que resulta em uma avaliação das condições dos instrumentos em inspeções de campo e revisões periódicas. Com isso, sabe-se que a manutenção dos instrumentos não é definida por um tempo específico, além de ser de inteira responsabilidade da equipe técnica do plano de avaliação da segurança.

Em relação ao número mínimo de instrumentos necessários para a instrumentação, não há nada especificado na literatura técnica. Nesse contexto, de acordo com Machado (2003), o estabelecimento do número de instrumentos a serem instalados em uma barragem, deve levar em conta os seguintes fatores:

- Extensão da área da estrutura;
- Aspectos geológico-geotécnicos da fundação e do maciço;
- Tipo de instrumento usado;

- Condição de acesso ao local de instalação;
- Orçamento para a execução da instrumentação.

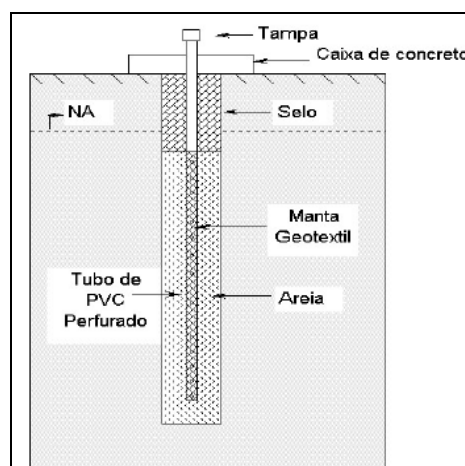
Segundo Cruz (1996 *apud* MACHADO, 2007), a instrumentação sem uma correspondente análise periódica e interpretação sistemática dos resultados é inútil e muitas vezes perigosa, na medida em que pode causar uma falsa sensação de segurança da barragem. Assim, é fato que a não execução correta das tarefas citadas equivale a não ter instrumentação.

3.3.1 Princípios e Instrumentos para a Medição do Nível D'água

Segundo Fonseca (2003) a determinação da posição da linha freática no interior do maciço de uma barragem tem grande importância nas análises de sua estabilidade. A medição do nível d'água em um maciço de solo é feita através do acesso à água em profundidade por meio da execução de furos, e através da leitura da cota de sua superfície por meio de um cabo graduado dotado de um sensor elétrico na extremidade inferior e um emissor sonoro na superfície.

Os instrumentos de medição de nível d'água (INA's) são constituídos por um tubo de PVC perfurado, envolvido por geotêxtil e areia, além de uma camada selante utilizada para vedar o espaço entre o furo e o tubo. Na sua superfície é feita uma estrutura de concreto para garantir a proteção do instrumento contra atos de vandalismo. Na Figura 4 é detalhado esse tipo de instrumento.

Figura 4: Esquema do Medidor do Nível D'água



Fonte: Fonseca (2003)

3.3.2 Princípios e Instrumentos para a Medição de Poropressões

A avaliação das condições de segurança de barragens depende de informações relativas da magnitude das pressões intersticiais que se desenvolvem nos solos de fundação, tanto na construção da estrutura, como na fase de operação da barragem. Outro aspecto relevante e que está intimamente ligado às evoluções das pressões intersticiais é o rebaixamento do nível do reservatório (FONSECA, 2003).

Os instrumentos utilizados para a medida de poropressões em obras geotécnicas são os piezômetros. Estes instrumentos medem a poropressão de forma direta (altura da coluna d'água no interior de um tubo), como de forma indireta (medidas das deformações de uma membrana no interior de um elemento poroso).

Segundo Vieira Netto (1975 *apud* MACHADO, 2007), para que as leituras nos piezômetros sejam confiáveis, é preciso verificar a calibração desses instrumentos e instalá-los de maneira correta, a fim de que os mesmos não venham sofrer quaisquer danos que os prejudiquem.

Existem alguns tipos de piezômetros usados para a instrumentação em barragens, sendo eles: piezômetro de tubo aberto (Casagrande), piezômetro pneumático, piezômetro de corda vibrante, piezômetro hidráulico e piezômetro elétrico.

Para o presente trabalho faz-se o detalhamento do piezômetro de tubo aberto (Casagrande), já que a instrumentação da seção crítica proposta é realizada por esse tipo de instrumento.

3.3.2.1 Piezômetros de Tubo Aberto (Casagrande)

A principal função dos piezômetros é fornecer a carga de pressão no ponto em que foi instalado. O piezômetro de tubo aberto, ou Casagrande, é um instrumento de simples operação e muito utilizado em obras de barragens. São constituídos por um tubo de PVC, com sua extremidade inferior acoplada com uma célula (tubo perfurado e protegido com geotêxtil). A célula, localizada em um bulbo, fica confinada em um trecho limitado de 1,0 a 1,50 m por uma camada selante de solo-cimento, que veda o furo do tubo. A pressão da água no bulbo é convertida em uma altura de coluna d'água.

Esse tipo de instrumento possui as seguintes vantagens: confiabilidade, durabilidade, sensibilidade, estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo, baixo custo e simplicidade para realizar leituras. Como desvantagens, tem-se: não adequação para medir poropressões em fase de construção, dificuldade de acesso para leituras a montante e tempo de resposta elevado em solos de baixa permeabilidade (MACHADO, 2007).

Para a leitura do nível d'água para piezômetros de tubo aberto tem-se um cabo elétrico com dois condutores, graduado de metro em metro, com um sensor na extremidade constituído por eletrodos, isolados eletricamente entre si, de acordo com a Figura 5.

Figura 5: Medidor do nível de água para piezômetros de tubo aberto

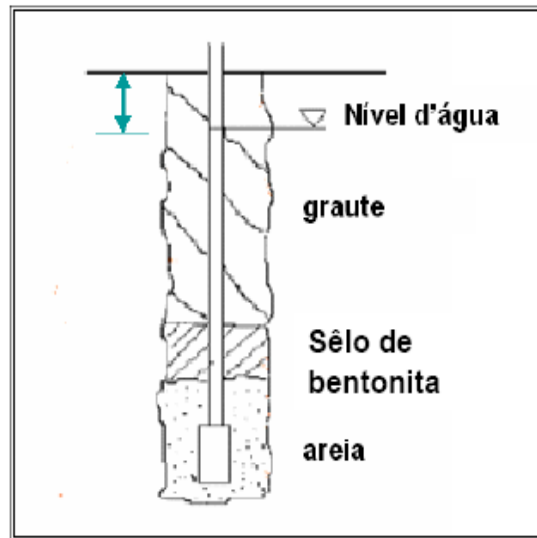


Fonte: Companhia Energética de São Paulo (2007)

Quando o sensor atinge o nível d'água no interior do tubo, é fechado o circuito elétrico formado pelo conjunto de medição. A leitura é percebida pelo sinalizador, que comumente é sonoro.

A cota piezométrica, de acordo com a Figura 6, é a cota da boca do tubo menos a leitura do comprimento do cabo. Essa cota é a elevação do nível d'água no interior do tubo. Por efeito de vasos comunicantes, o nível de água no interior do tubo fica em equilíbrio com o nível piezométrico no solo que circunda a ponteira.

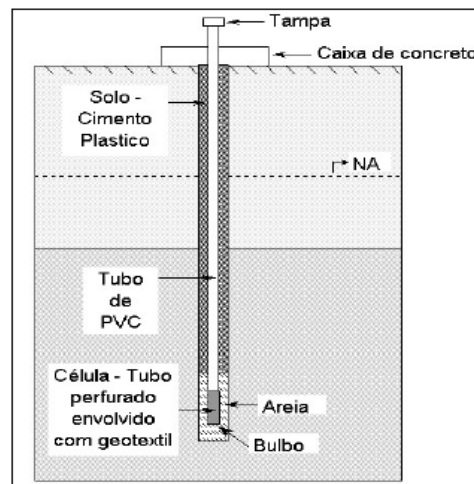
Figura 6: Medição da cota piezométrica



Fonte: GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTDA (2007)

Na figura 7 é mostrado o esquema do piezômetro de tubo aberto com a proteção contra o vandalismo e todos seus componentes para a correta medição de leituras.

Figura 7: Esquema do Piezômetro de Tubo Aberto ou Casagrande



Fonte: Fonseca (2003)

Um importante questionamento feito por diversos profissionais que atuam na instrumentação geotécnica diz respeito à instalação de piezômetros de tubo aberto em certas regiões onde o fluxo d'água é encontrado entre solos impermeáveis. Neste caso, a leitura do nível d'água será dada somente no ponto onde está a

extremidade do instrumento, já que o tubo só é perfurado na sua parte inferior. Nos medidores de nível d'água, é feita a leitura em todos os pontos ao longo da extensão do tubo, já que este é perfurado em praticamente todo seu comprimento.

Neste contexto, pode-se afirmar, dependendo do tipo de solo existente na barragem, que o uso exclusivo de piezômetros não é o ideal. Faz-se necessário também, a instalação de medidores de nível d'água.

Juntamente com a interpretação da instrumentação, busca-se, para a avaliação da segurança da estrutura, uma análise de estabilidade da mesma.

3.4 Análise de Estabilidade em Barragens

Segundo Cruz (1996 *apud* MONTES, 2003) as análises de estabilidade são aplicadas em várias fases de um projeto de barragens, e continuam ao longo da sua vida útil. Algumas de suas aplicações são:

- Para a implantação, em estudos de viabilidade, onde é determinada qual a seção mais economicamente adequada;
- Nas fases de projeto, para otimizar os materiais disponíveis;
- No acompanhamento da construção, através de medições de poropressões e reavaliação da estabilidade;
- Estabelecimento de níveis de alerta em barragens homogêneas, onde são determinados os níveis d'água críticos a serem acompanhados por piezômetros instalados na estrutura.

Os métodos analíticos são os mais utilizados para a análise de estabilidade de taludes em barragens, eles se baseiam na teoria do equilíbrio limite e nos modelos matemáticos de tensão e deformação.

Segundo Calle (2000 *apud* PEREIRA, 2014) a vantagem do método analítico está na quantificação do grau de segurança da estrutura, com o emprego do equilíbrio limite.

A análise de estabilidade por equilíbrio limite é muito empregada na prática desses estudos. De acordo com Thomaz (1984 *apud* PEREIRA, 2014), há alguns motivos para o emprego desse método, sendo eles: sua simplicidade, nível grande de acurácia dos resultados, facilidade e baixo custo para as estimativas dos parâmetros de resistência do solo.

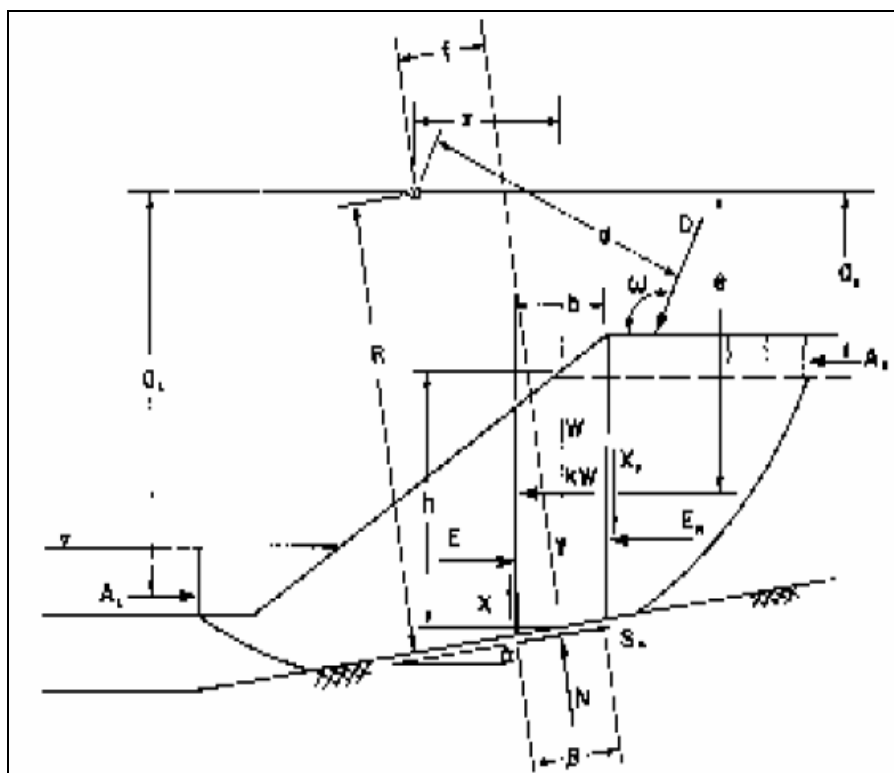
Foram vários os métodos de equilíbrio limite desenvolvidos ao longo do tempo e propostos na literatura. Dentre eles pode-se citar, Fellenius (1927), Morgenster e Price (1965), Bishop Simplificado (1955) e Spencer (1967). Esses métodos se diferenciam quanto à forma de superfície de ruptura considerada e nas simplificações adotadas para o cálculo do fator de segurança mínimo.

Para o presente trabalho foi aplicado o Método de Bishop Simplificado, já que se comprovou que esse método resulta em valores satisfatórios para ruptura de superfície circular, como é a da seção analisada.

Como dito acima, a determinação da estabilidade de taludes em barragens é usualmente baseada nos métodos de equilíbrio limite. Nesse processo de análise, a estabilidade de uma superfície é determinada por um fator de segurança (FS) que relaciona a resistência disponível com a resistência mobilizada. Para o cálculo das resistências é usado o conceito de equilíbrio de forças e momentos (MONTES, 2003).

A Figura 8 mostra as forças atuantes numa fatia de uma superfície potencial de ruptura circular. Essa superfície é comum em barragens de terra de solos homogêneos.

Figura 8: Forças atuantes numa fatia de superfície composta



Fonte: GEOSLOPE (2002)

O fator de segurança obtido pelo equilíbrio de momentos é relacionado com a resistência mobilizada com base no critério linear de Mohr - Coulomb, e pode ser expresso pela equação 3.1:

$$FS_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u\beta) R \tan \phi')}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kW e \pm [Dd] \pm Aa} \quad (3.1)$$

Sendo:

c' = coesão efetiva;

R = braço de alavanca;

N = força resistente normal na base da fatia;

f = braço de alavanca da força resistente normal na base da fatia;

Φ' = ângulo de atrito efetivo;

u = poropressão média na base da fatia;

β = espessura da fatia

W = peso da fatia;

x = braço de alavanca do peso da fatia;

kW = força horizontal (sismo);

e = braço de alavanca da força horizontal

D = força externa aplicada;

d = braço de alavanca da força externa aplicada;

A = força induzida pela água;

a = braço de alavanca da força induzida pela água.

Do mesmo modo, o fator de segurança obtido pelo equilíbrio de forças é expresso pela equação 3.2:

$$FS_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum (E_L - E_R) + \sum N \sin \alpha + \sum kW - [D \cos \omega] \pm A} \quad (3.2)$$

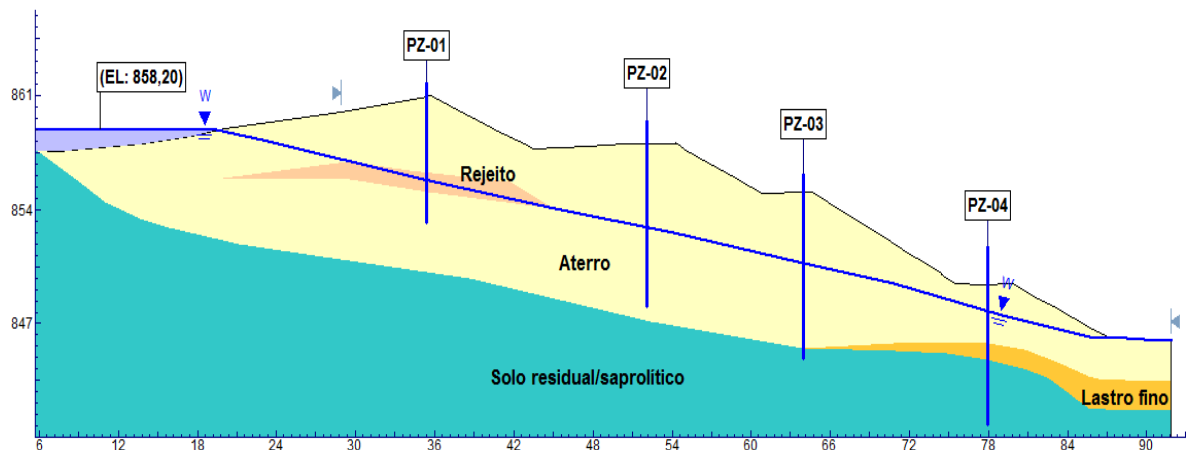
A determinação do fator de segurança global pelo Método do Equilíbrio Limite é baseada na congruência dos fatores de segurança expressos acima.

4 Metodologia

4.1 Descrição da Seção da Barragem Analisada

A barragem de terra estudada no presente trabalho é uma estrutura real de contenção de água, e a análise da instrumentação e estabilidade dessa estrutura foi feita para a seção crítica da mesma. Essa seção possui uma altura máxima de 21 metros e uma extensão de 86 metros. A cota do nível de água atual do reservatório é de 858,2 metros. Na Figura 9 é mostrada a seção da barragem analisada com sua geometria, seu nível freático atual e os tipos de solo presentes ao longo da sua extensão.

Figura 9: Seção da Barragem analisada



Pela Figura 9, pode-se perceber que a barragem tem a fundação constituída de solo residual saprolítico, com um maciço de aterro homogêneo. Encontra-se também uma camada de rejeito no maciço da barragem, e uma porção de lastro fino no pé do talude.

Para a seção estudada, é possível saber a condição atual do fluxo de água no maciço da estrutura, haja visto, que o comportamento da linha freática ao longo da extensão da barragem é conhecido, percolando desde o reservatório à montante até o pé do talude à jusante.

4.2 Parâmetros Geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos dos solos presentes na seção analisada foram obtidos por meio de investigação geotécnica, coleta de amostras, ensaios de campo e ensaios de laboratório para amostras dos solos especificados ao longo da seção crítica da barragem. Na Tabela 2, têm-se os valores dos parâmetros de resistência: coesão (c) e ângulo de atrito (Φ), além dos valores de peso específico (γ) para cada material.

Tabela 2: Parâmetros geotécnicos dos solos da barragem

Material	Peso Específico (γ) (KN/m³)	Coesão (C) (Kpa)	Ângulo de Atrito (ϕ)
Aterro	17	4	29,5
Rejeito	19	5	21
Lastro Fino	19	7	32
Solo Residual	20	30	27

A base de dados dos ensaios que atestam os parâmetros geotécnicos não foi disponibilizada para a publicação, contudo, o resumo dos ensaios é apresentado na tabela acima, sendo validado de acordo com a literatura técnica.

4.3 Instrumentação

A barragem foi instrumentada por uma equipe técnica qualificada e através de piezômetros de tubo aberto (Casagrande). Foram instalados quatro piezômetros ao longo da extensão da seção crítica da barragem, com o intuito de se obter a máxima precisão nas medidas das leituras piezométricas.

Essas leituras foram anotadas em campo no período de aproximadamente um ano. Foram feitas medidas nos instrumentos ao longo de todo esse tempo com intervalos de aproximadamente quatro dias de uma leitura para outra, dependendo do mês de monitoramento.

A escolha pelo piezômetro de tubo aberto (Casagrande) é justificada pela fácil operacionalidade tanto na instalação como nas medidas de leituras do instrumento, além desse tipo de piezômetro possuir um custo baixo de operação.

A carga de pressão obtida pelas leituras nos pontos onde foram instalados os instrumentos serve de auxílio para uma instrumentação rigorosa do nível freático ao longo da extensão do maciço.

Os piezômetros instalados na estrutura da barragem foram denominados por PZ-01, PZ-02, PZ-03 e PZ-04. Na Tabela 3, tem-se a denominação dos instrumentos como explicado acima, as cotas do terreno nos pontos onde foram instalados os piezômetros, além dos valores de cotas da boca dos tubos, cotas do fundo dos aparelhos e as profundidades de cada piezômetro.

Tabela 3: Cotas e profundidades dos instrumentos na barragem

Instrumento	Cota Terreno	Cota Boca Tubo	Cota Fundo	Profundidade (m)
PZ-01	860,946	861,810	853,170	8,64
PZ-02	858,014	859,470	848,030	11,44
PZ-03	855,068	856,170	844,820	11,35
PZ-04	849,342	851,670	840,780	10,89

Todas as cotas mostradas na Tabela 3 foram obtidas no campo com o auxílio da topografia do local e com a correta representação geométrica no *software* SLIDE da seção crítica da barragem. As profundidades dos quatro instrumentos foram obtidas pela diferença entre a cota do tubo do piezômetro na seção e a sua cota de fundo.

Esses valores de cotas foram retirados da seção da estrutura onde são encontrados todos os pontos de instalação dos piezômetros. Os instrumentos instalados na seção analisada são os mostrados na Figura 9 da seção 4.1.

5 Estabilidade da Barragem

5.1 Análise de Estabilidade para o Nível Freático Atual

O estudo da estabilidade da seção crítica considerada foi obtido através da análise em regime permanente, sendo a avaliação da segurança da barragem feita numa condição de normalidade operacional.

Para a obtenção da geometria com a representação da linha freática ao longo da estrutura, foi desenvolvida uma análise de fluxo através das leituras dos piezômetros instalados. Com essa análise, obteve-se uma força de percolação na direção desfavorável à estabilidade.

A estabilidade da barragem foi estudada através do método de equilíbrio limite “Bishop Simplificado”. Método este, que segundo a literatura técnica, se mostra satisfatório para rupturas de superfícies circulares.

A obtenção de um fator de segurança mínimo presente na estrutura deu-se por meio de fatores como, geometria da seção crítica da barragem, N.A. normal do reservatório, níveis d’água no interior do maciço medidos através da instrumentação e parâmetros de resistência dos solos.

5.1.1 Programa SLIDE

As análises de estabilidade foram desenvolvidas pelo programa de computador SLIDE 5.0, da Rocscience Inc.

O *software* SLIDE é muito utilizado na prática da engenharia geotécnica, por oferecer muitos recursos de análise em vários tipos de estruturas, criando e editando modelos complexos com muita facilidade. O programa permite a consideração de geometrias complexas, diferentes materiais, superfícies de ruptura definidas pelo usuário e simulação de carregamento.

Uma das vantagens desse *software* em comparação com outros de mesma função, é a integração da análise de infiltração de águas subterrâneas integrada com a análise de estabilidade de inclinação da seção. O projetista não precisa de outro programa para a análise de percolação no maciço e nem da importação de resultados, uma vez que o modelador de fluxo de água com análise de dados e

interpretação é totalmente integrado no Slide. Apenas um modelo precisa ser construído, sendo análise de fluxo e estabilidade sempre sincronizados. Fluxos, pressões e gradientes são calculados com base nas condições de contorno hidráulico definidas pelo usuário (ROCSCIENCE, 2017).

5.1.2 Estudo da Estabilidade da Seção Crítica

O estudo da estabilidade da seção crítica instrumentada é feito em termos de tensões efetivas. A análise de estabilidade dessa seção contempla uma superfície circular potencialmente instável, definida a partir da malha de centros e raios, no programa computacional de estudos bidimensionais SLIDE. A modelagem inclui uma pesquisa automática para a obtenção do fator de segurança mínimo, aplicando neste caso, equilíbrio limite pelo Método de Bishop Simplificado.

A busca pelo menor fator de segurança para a seção é justificada pela representação da pior situação possível de iminente ruptura da estrutura.

Como já mencionado anteriormente, a análise de estabilidade da estrutura foi feita na seção de maior criticidade da barragem, levando em conta critérios como: maior altura, perpendicularidade ao talude e posição da instrumentação para a posição freática interna ao maciço.

A análise da seção crítica da barragem é feita em termos de tensões efetivas e regime permanente. Como temos à jusante uma força de percolação na direção desfavorável à estabilidade, esse talude é o objeto de estudo desenvolvido para a obtenção do fator de segurança mínimo (FS). Nesta análise foram utilizados também os parâmetros de resistência efetivos dos solos, com coesão e ângulo de atrito constante ao longo do maciço da barragem para cada tipo de solo.

A avaliação da segurança da estrutura baseou-se na análise de estabilidade conforme critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 13028/2006, que estabelece para uma ruptura do talude de jusante, em condições freáticas normais, um coeficiente de segurança mínimo no valor de 1,50.

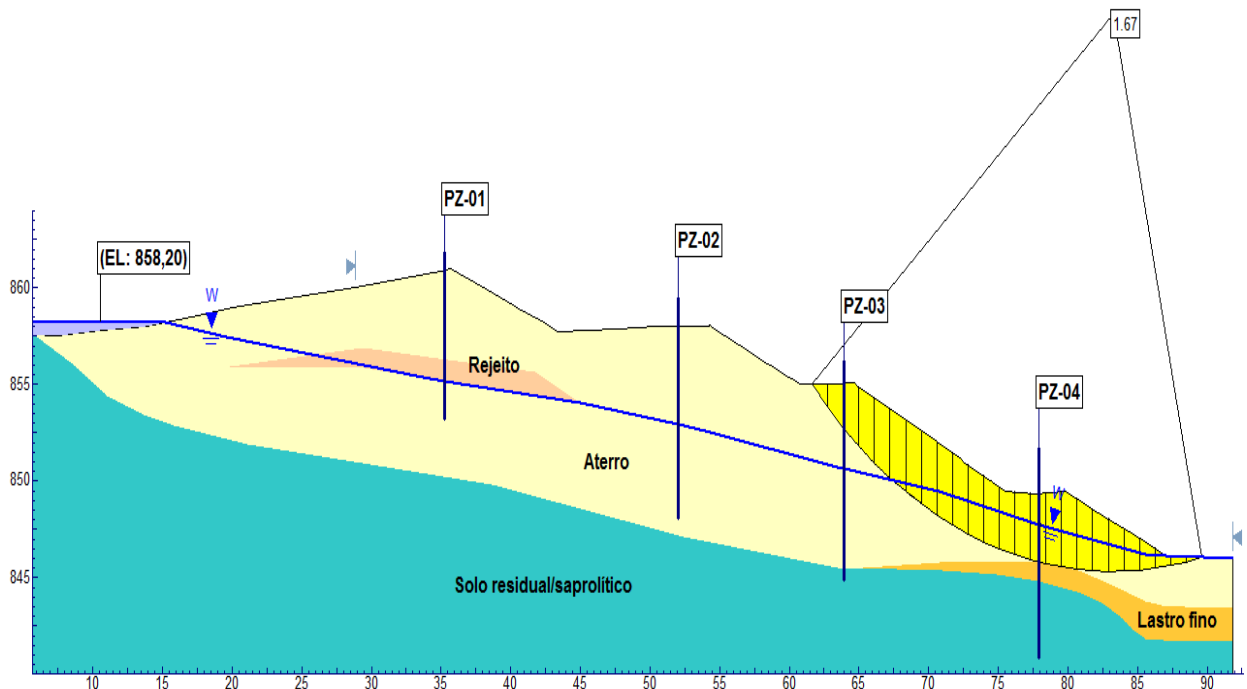
Na análise feita para a seção crítica da barragem, levando em consideração todos os fatores citados acima, obteve-se um fator de segurança mínimo igual a 1,67. Tomando por base o que diz a norma ABNT NBR 13028/2006, é notório que a seção analisada encontra-se em um estado satisfatório de segurança quando em

normalidade operacional, e levando-se em conta os limites pré-estabelecidos pela norma vigente.

Por outro lado, como o resultado do fator de segurança mínimo é obtido por equilíbrio limite, há várias limitações neste método que precisam ser consideradas, e que não dão a precisão exata do valor do fator de segurança da barragem. Essas limitações são discutidas ao longo do trabalho.

A Figura 10 ilustra o resultado da análise de estabilidade da seção, com sua superfície circular de ruptura e o respectivo fator de segurança mínimo encontrado.

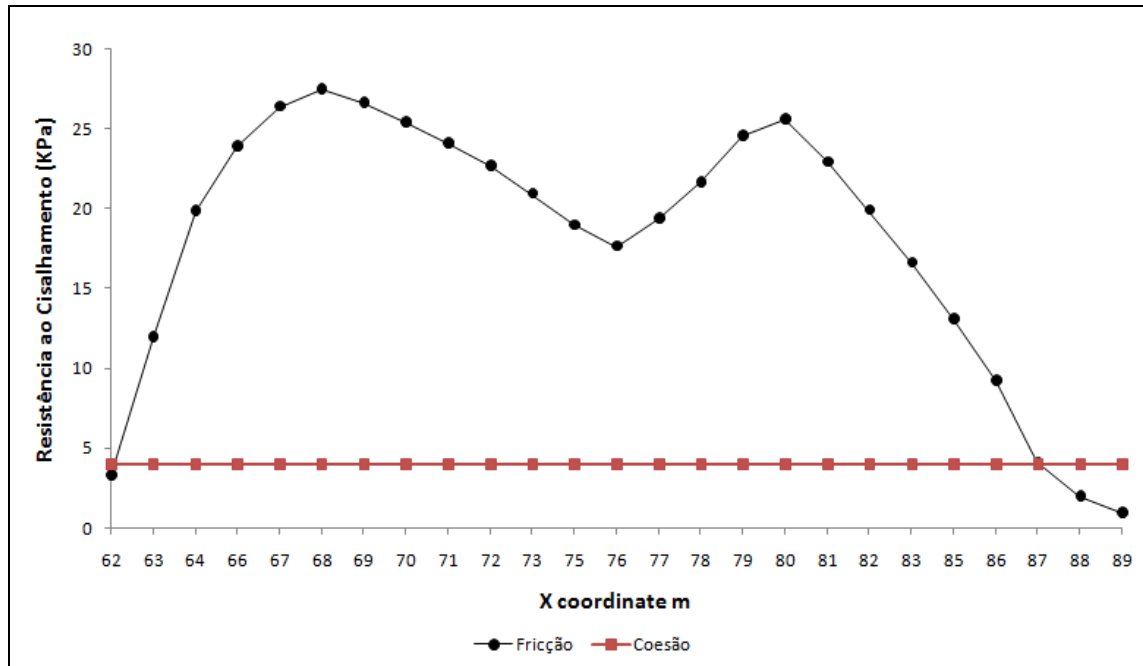
Figura 10: Superfície de ruptura circular e fator de segurança da seção crítica



Com a análise da superfície de ruptura e consequente obtenção do fator mínimo de segurança, é possível realizar o estudo gráfico de fatores importantes para um maior entendimento da análise de estabilidade. Dentre esses fatores, destaca-se a relação entre resistência por coesão e atrito, além dos valores de poropressão presentes na superfície potencial de ruptura.

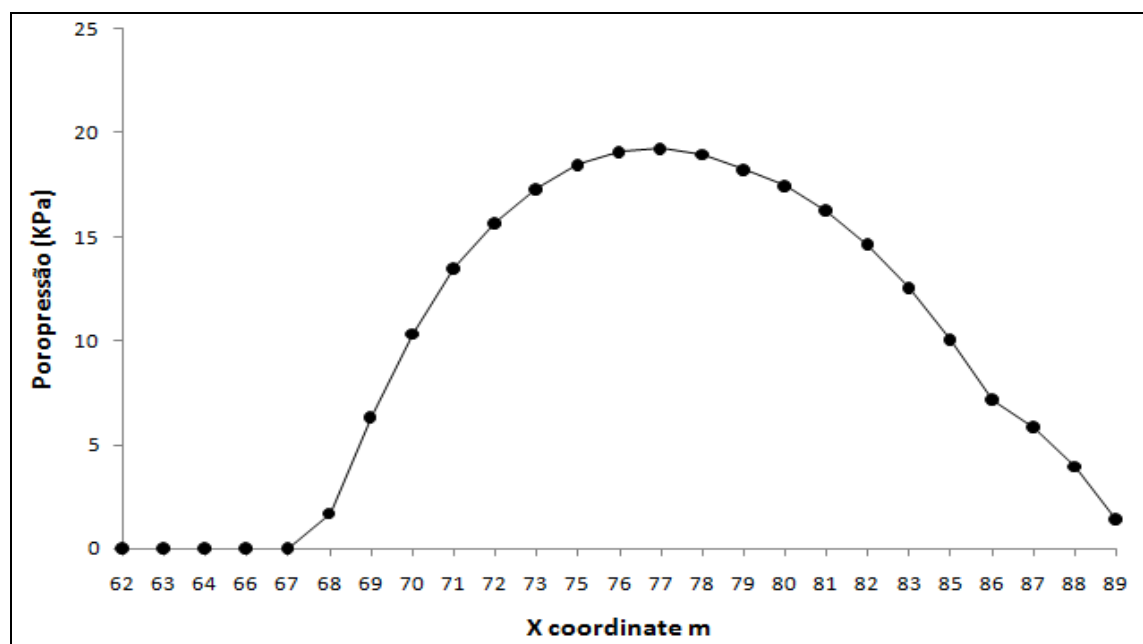
O gráfico 1 mostra a magnitude da resistência por coesão e atrito nesta superfície. Pode-se perceber pelos resultados apresentados no gráfico, que a estabilidade estaria condicionada basicamente a resistência por atrito do talude, sendo dependente do nível de tensão.

Gráfico 1: Resistência de coesão e atrito na superfície de ruptura, obtido através do SLIDE



Para as condições de poropressão presentes na base das fatias da superfície de ruptura, tem-se o gráfico 2. Com a forma da superfície de ruptura imposta pelo método de análise, o diagrama de poropressão se apresenta como uma parábola invertida.

Gráfico 2: Poropressão na superfície de ruptura, obtido através do SLIDE



Como resultado da análise feita, além do valor do fator de segurança obtido e das análises gráficas da superfície de ruptura geradas, também são revelados os materiais relevantes na estabilidade da seção, os quais são interceptados pela superfície de ruptura crítica. Esses materiais terão seus parâmetros variados para análise da influência das condições críticas da estrutura.

5.2 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Resistência

A variação dos parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, dos solos que compõem a barragem pode influenciar diretamente na análise de estabilidade da mesma, colocando em cheque as condições críticas da estrutura.

Para o estudo da sensibilidade desses parâmetros foi considerado o material “aterro”, já que este é interceptado pela superfície crítica. O material “lastro fino”, embora também interceptado, apresenta uma área de influência muito pequena em relação ao aterro, sendo assim, desprezado na análise.

Na análise de sensibilidade da coesão e do ângulo de atrito para a condição crítica da seção, variou-se esses parâmetros de resistência em relação aos seus valores médios.

Para a coesão, variou-se o valor obtido em ensaios para análise de estabilidade entre 0,0 kN/m² e 10,0 kN/m². Já, para o ângulo de atrito, essa variação foi de -10% e +10% do valor médio obtido. Essa faixa de variação do material de aterro para coesão foi devido ao seu valor ser muito baixo, tendo com uma variação maior, um melhor entendimento da influência desse parâmetro na análise. Já, para o ângulo de atrito, essa variação foi admitida em função da variação de resistência esperada para esse tipo de material, já que não tem-se a textura e o SPT dos materiais presentes na estrutura.

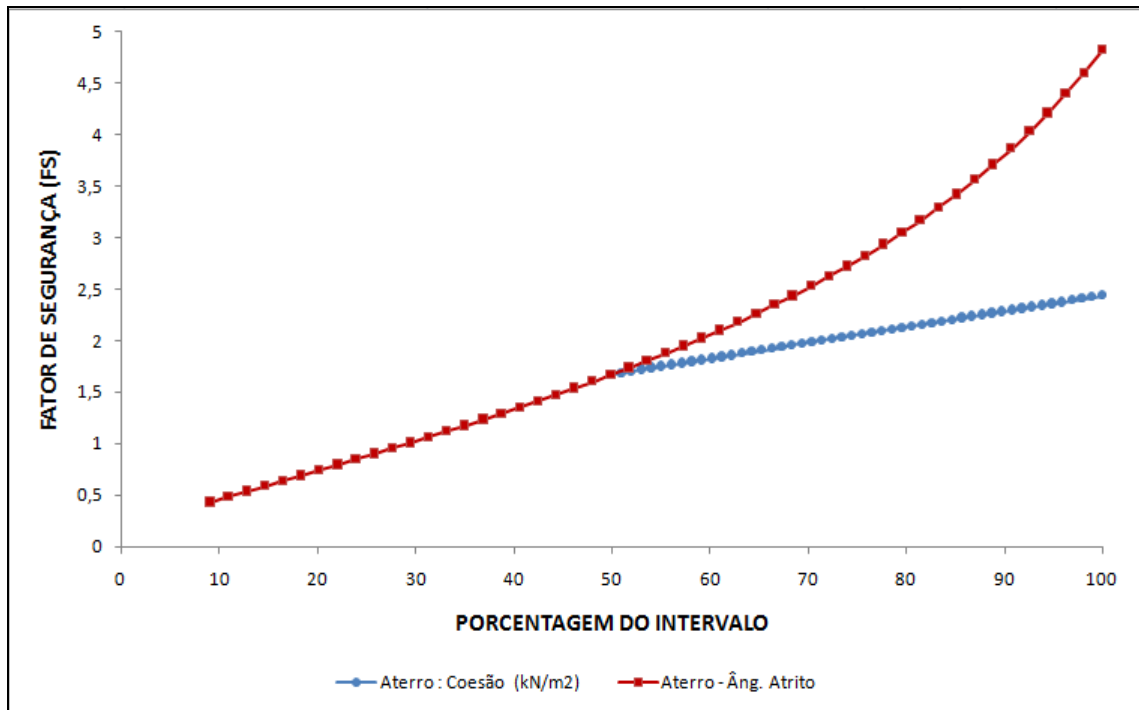
A Tabela 4 mostra os valores obtidos para cada cenário da variação de parâmetros.

Tabela 4: Variação dos parâmetros de resistência do aterro

Parâmetro	Valor médio	Valor mínimo	Valor máximo
Coesão (KN/m ²)	4,0	0,0	10,0
Parâmetro	Valor médio	Valor mínimo(-10%)	Valor máximo(+10%)
Ang. Atrito - ϕ	29,5	26,55	32,45

Com essa variação e por meio do *software* SLIDE, gerou-se graficamente, a influência desses parâmetros no valor do fator de segurança mínimo. O gráfico 3 mostra essa relação.

Gráfico 3: Influência dos parâmetros de resistência no fator mínimo de segurança



Percebe-se pelo gráfico acima que o ângulo de atrito assume uma influência muito significativa nas condições críticas da seção analisada, já que com uma variação de 10% acima e abaixo do valor médio obteve-se uma grande variação do fator de segurança mínimo. Em relação à coesão, esses valores influenciaram de forma mais discreta o fator de segurança, mas ainda com uma relativa importância.

O conhecimento dos parâmetros mais influentes na estabilidade permite uma análise mais criteriosa da estrutura, e faz com que o projetista tenha maior atenção com esses parâmetros.

Com a análise de sensibilidade feita, é fato que há falhas no método determinístico realizado em estudos de estabilidade, já que uma pequena variação de um parâmetro influencia de forma significativa nos fatores de segurança obtido.

6 Análise do Perigo de Ruptura

6.1 Níveis de Sinalização de Segurança

Para um rigoroso acompanhamento das condições de segurança da barragem analisada, foram estabelecidas quatro categorias relacionadas diretamente às condições de operação: Normal, Atenção, Alerta e Emergência.

Com a barragem em operação, sob um regime permanente de fluxo, tem-se como situação de operação Normal, aquela em que os níveis piezométricos no interior do maciço refletem uma condição de estabilidade com fatores de segurança (FS) iguais ou superiores a 1,5. Segundo Fell (1992 *apud* SARÉ, 2003), este limite é recomendado pelo “*Corps of Engineers*” dos EUA, para a estabilidade de barragens. Para o nível “Atenção”, foram consideradas as condições de fluxo que resultam em fatores de segurança entre 1,50 e 1,30. Condições de estabilidade com fatores de segurança entre 1,30 e 1,10, foram consideradas como nível “Alerta”. E por fim, fatores de segurança menores que 1,10 foram classificados como nível “Emergência”. Todos os fatores de segurança e suas respectivas condições de operação através dos níveis adotados foram baseados no que se é aplicado na prática da engenharia geotécnica.

A norma regulamentadora de Segurança de Barragens não relaciona de forma direta os níveis de sinalização de segurança com os fatores de segurança adotados acima. Dessa forma, fica a cargo do projetista essa relação, assim como as ações recomendadas para cada barragem analisada. Todo o processo de análises e recomendações é feito para uma barragem específica, e se faz necessário, equipe técnica qualificada e experiente, alinhado com a correta instrumentação e inspeção de campo.

Em relação às inspeções, a Agência Nacional de Águas (ANA), através da resolução 742/2011 estabelece diferentes periodicidades para sua realização, e compete à equipe responsável classificar o nível de perigo da barragem em:

- Normal: quando não se encontrou anomalias ou as encontradas não comprometem a segurança da barragem, mas devem ser monitoradas;

- Atenção: quando as anomalias encontradas não comprometeram a segurança da barragem a curto prazo, mas devem ser reparadas ou monitoradas;
- Alerta: quando as anomalias encontradas representam risco à segurança da barragem, devendo tomar providências para a eliminação do problema;
- Emergência: quando as anomalias encontradas representam risco de ruptura iminente, devendo ser tomadas medidas para prevenção e redução dos danos materiais e humanos, decorrentes de uma eventual ruptura.

Os níveis de risco adotados nesse trabalho e relacionados com seus respectivos fatores de segurança foram elaborados de acordo com o que se é aplicado por projetistas na avaliação de segurança desse tipo de estrutura.

6.2 Análises dos Níveis de Risco

Os níveis de risco adotados nesse trabalho e relacionados com seus respectivos fatores de segurança foram elaborados de acordo com o que se é aplicado por projetistas na avaliação de segurança desse tipo de estrutura. Para as condições de segurança foram fixados os níveis de acordo com os fatores de segurança 1,5; 1,3 e 1,1.

O estudo para a Análise de Perigo de Ruptura foi realizado considerando um nível crítico do reservatório (Máximo Maximorium) igual a 859,40 m, e simulando o comprometimento da capacidade de drenagem do maciço na seção crítica instrumentada do mesmo.

A Análise de Perigo de Ruptura se apresentou como estudo de uma condição crítica (hipotética), onde fez-se simulações de elevação do nível de água e de poropressões no interior do maciço até atingir os níveis de segurança adotados.

Para sua elaboração foram determinados fatores de segurança mínimos para a condição de ruptura global do talude, em função da elevação freática em cada condição de análise. Os níveis de segurança foram estabelecidos em função da posição dos níveis d'água nos instrumentos existentes.

No *software* SLIDE, obtiveram-se as análises de estabilidade para os fatores de segurança. Essas análises foram feitas de forma similar a análise de estabilidade

para seção com nível freático atual da estrutura, tendo como valores dos parâmetros de resistência, os mostrados na tabela 1.

Na figura 11, tem-se a análise de estabilidade para a seção crítica na condição normal de operação, com $FS = 1,50$. A elevação da freática do reservatório nessa condição de segurança não foi modificada em relação ao nível freático atual, sendo o nível do reservatório situado à cota de 858,20 m. A linha freática no interior do maciço foi elevada até a obtenção do fator de segurança citado acima.

Para as condições de níveis de operação Atenção e Alerta, foi elevado o nível do reservatório até o nível crítico máximo, que neste caso, situa-se à cota de 859,40 m. A linha freática foi elevada no interior do maciço até a obtenção dos fatores de segurança de 1,3 para a condição de Atenção, e de 1,1 para a condição Alerta. As Figuras 12 e 13 mostram as análises de estabilidade para a seção crítica da barragem nessas condições.

Figura 11: Análise de estabilidade da seção crítica para a condição Normal de operação, obtida através do SLIDE

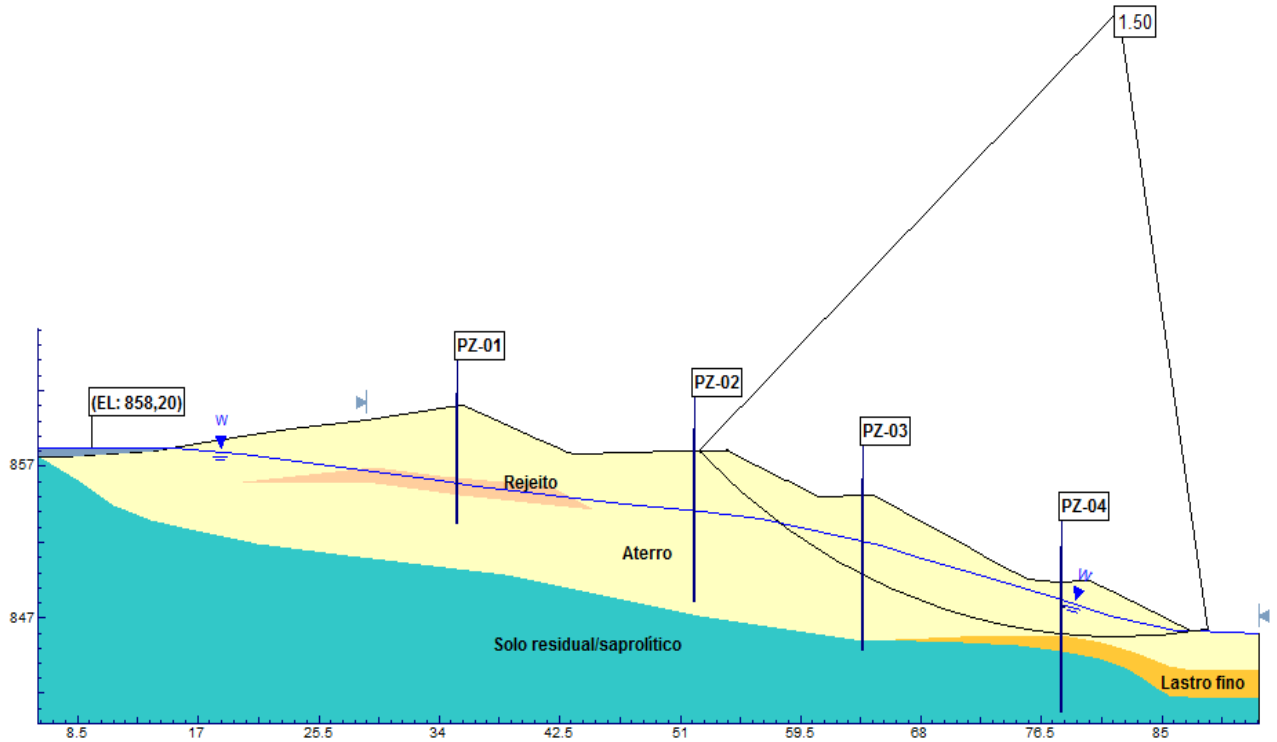


Figura 12: Análise de estabilidade da seção crítica para a condição Atenção de operação, obtida através do SLIDE

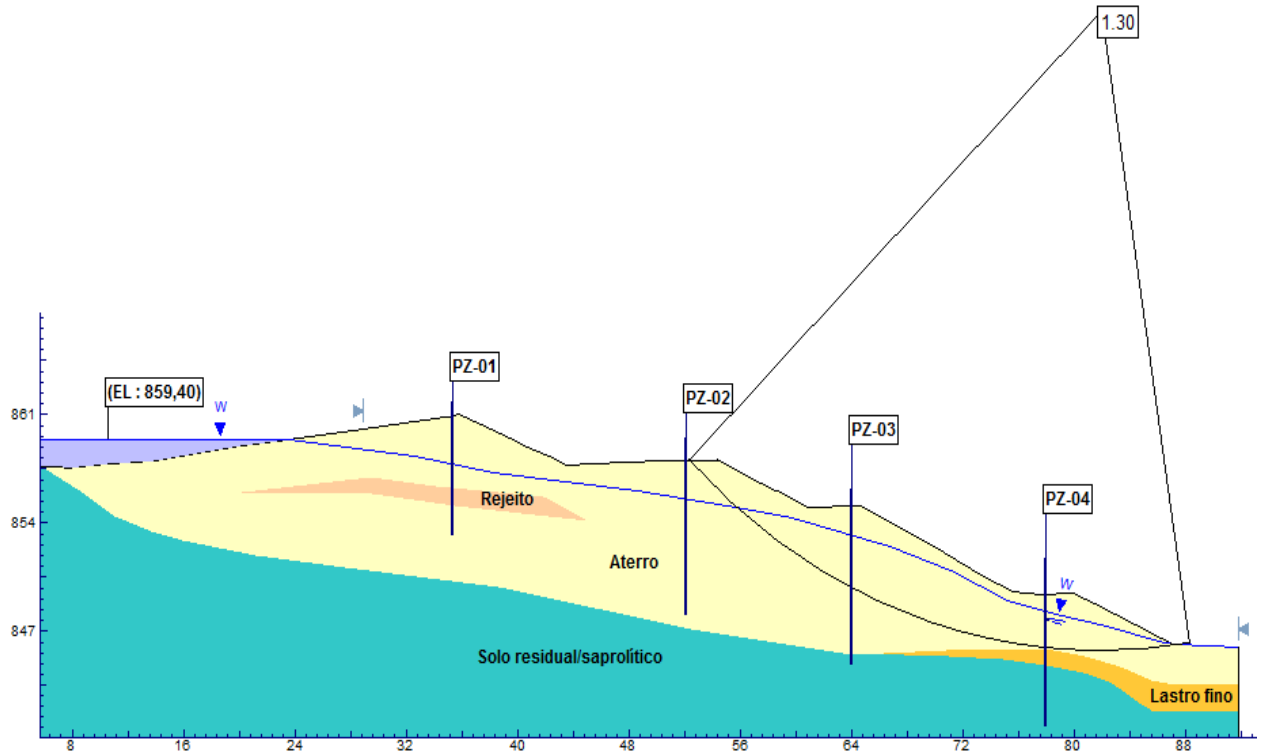
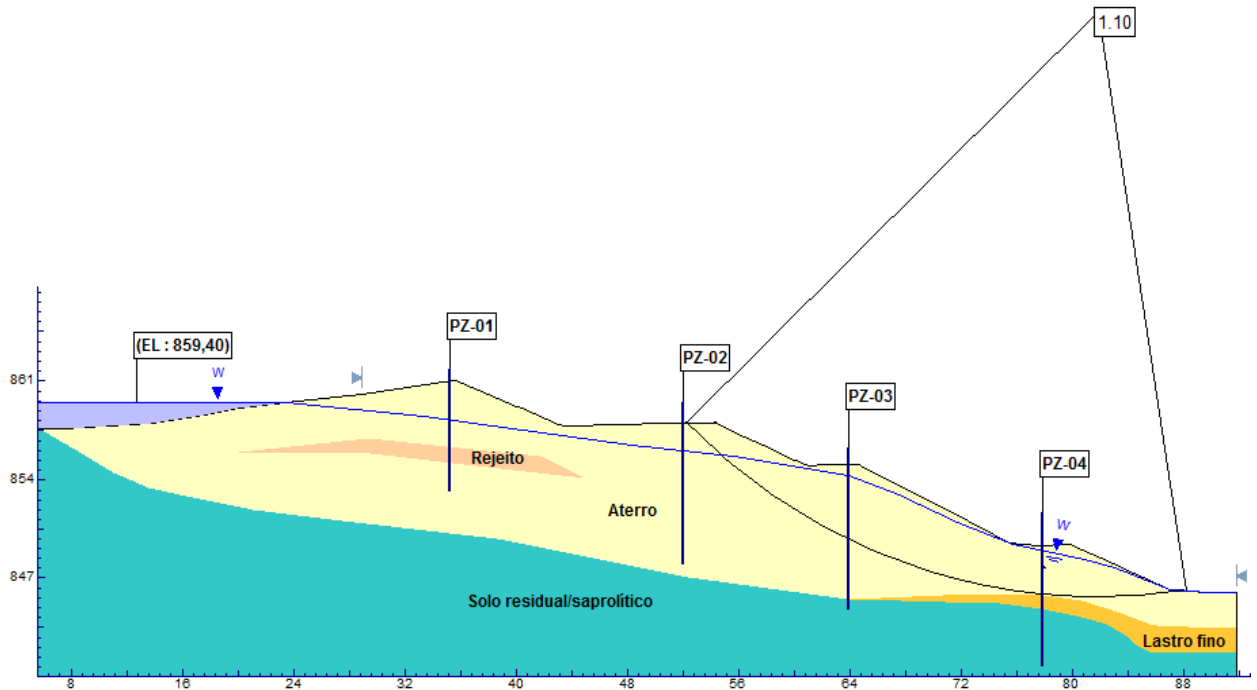


Figura 13: Análise de estabilidade da seção crítica para a condição Alerta de operação, obtida através do SLIDE



Pelas superfícies de rupturas circulares geradas de acordo com a consideração da projetista, tem-se que o fator de segurança de 1,1 é inadmissível para essa seção crítica, já que a linha freática está muito alta e próxima à borda do talude, como é mostrado na Figura 13. Essa elevação brusca da linha freática frente ao talude, alinhada com a imprecisão do resultado do fator de segurança obtido pelo método do equilíbrio limite, atesta para uma estrutura com evidente ruptura.

Para justificar a não adoção desse valor de fator de segurança para a condição de emergência, faz-se necessário citar as limitações envolvendo a análise por equilíbrio limite.

Uma limitação bastante questionável desse tipo de análise determinística é a consideração de que os materiais que compõe a estrutura possuem parâmetros de resistência constantes ao longo do maciço, o que se mostra incoerente aplicando uma simples análise de sensibilidade desses parâmetros como foi feito na seção 5.2. Outra falha presente nessa análise é a desconsideração de uma deformação contínua no maciço. Admite-se que o solo se rompe bruscamente, sem que haja antes, sinais de deformação. No contexto dessa análise, são questionáveis as expressões da estática usadas até o momento da ruptura, já que esta é progressiva e não estável. Assim, tem-se que o processo de ruptura é dinâmico e não estático.

Outro fator limitador do método aplicado é a consideração de um valor de segurança constante, o que não se mostra razoável, já que sabe-se que esse fator varia ao longo da estrutura.

Ainda sobre a imprecisão dos valores de fatores mínimos obtidos para a análise de estabilidade, pode-se citar a não consideração dos gradientes de percolação no talude.

Todos os fatores limitadores da análise por equilíbrio limite citados acima, juntamente com a freática elevada no talude de jusante resulta em uma desconsideração do nível emergencial com o fator de segurança de 1,1.

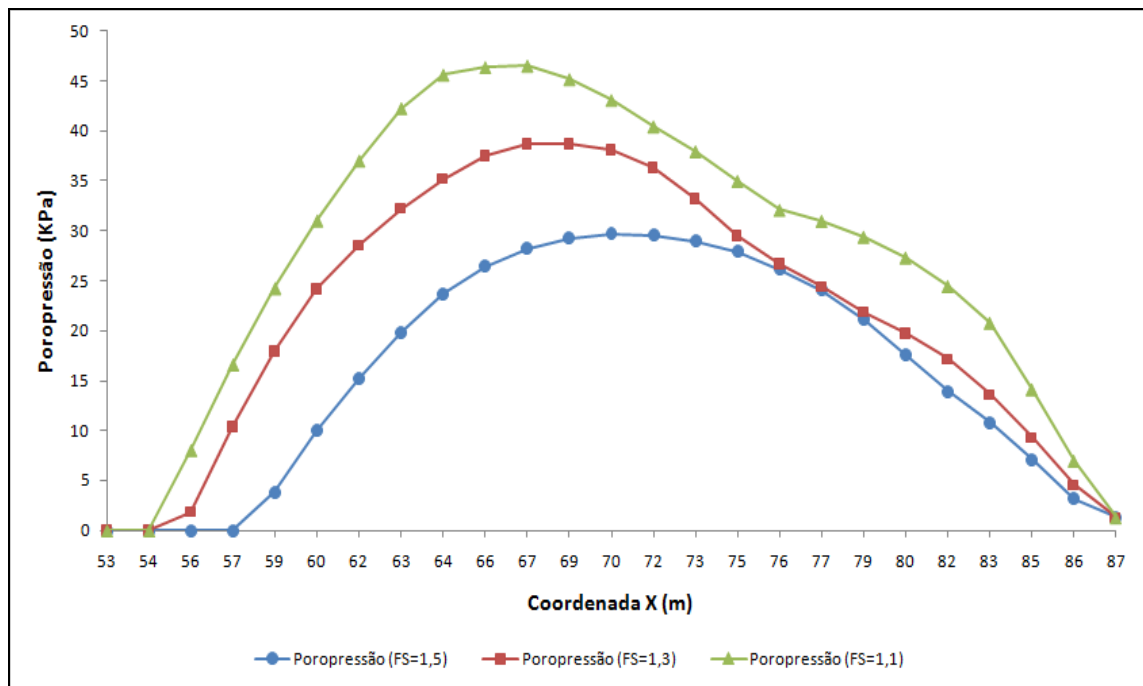
Em termos de análise dos níveis de risco, pode-se afirmar que a condição de emergência acontece com um fator de segurança acima do explicitado na Figura 16.

Mesmo com a desconsideração do nível emergencial de 1,1, tem-se com este trabalho, a elaboração de uma análise de perigo de ruptura padrão, na qual usa-se os limites gerados pelas Figuras 11,12 e 13. Nesse contexto, o trabalho questiona a consideração do $FS=1,1$, apesar de adotá-lo para o estudo.

Para cada nível de sinalização da segurança estimado na Análise de Perigo simulou-se a variação gradual da permeabilidade, utilizando o programa SLIDE, resultando em um acréscimo das poropressões ao longo de todo o maciço, principalmente na região de potencial ruptura circular. Esse acréscimo de poropressão está relacionado diretamente com a elevação da linha freática na seção analisada, levando assim, aos fatores de segurança adotados na elaboração da Análise de Perigo de Ruptura.

O gráfico 4 mostra os valores de poropressão na superfície potencial de ruptura da seção crítica da barragem, para os três níveis de operação pré-definidos neste trabalho: Normal, Atenção e Alerta.

Gráfico 4: Poropressões para os níveis de risco adotados, obtido através do Slide



Como era de se esperar, os maiores valores de poropressão na base das fatias da superfície circular de ruptura, foram identificados na análise de nível operacional Alerta, com $FS=1,1$. Sabe-se que quanto maior a elevação do nível freático no maciço, maior a possibilidade de uma ruptura global devido à surgências ao longo do talude.

Sendo assim, é possível afirmar que os valores de poropressão ao longo da superfície de ruptura estão diretamente relacionados a um maior ou menor fator de segurança, como já foi mostrado no gráfico acima.

6.3 Elaboração da Análise de Perigo de Ruptura

A geração da Análise de Perigo para a seção crítica analisada baseou-se em fatores já explicados anteriormente, como elevação freática do reservatório para um nível crítico máximo, elevação do nível freático no interior do maciço com o intuito de se analisar as poropressões, e a linha freática para as condições de operação descritas na Tabela 3.

É importante ressaltar que as leituras piezométricas feitas no campo e a correta análise das mesmas em formas gráficas tornam a Análise de Perigo um artifício de extrema utilidade para a avaliação da segurança da barragem em estudo.

6.3.1 Estabelecimento dos Níveis de Risco para os Piezômetros Instalados na Seção

Com a elevação do nível freático usada como um artifício para a elaboração da Análise de Perigo de Ruptura, obteve-se para os piezômetros PZ-01, PZ-02, PZ-03 e PZ-04, cotas piezométricas (nível de água no instrumento) nos pontos de instalação dos mesmos. Esses valores de nível d'água foram obtidos por meio do *software* SLIDE, com uma simples verificação dos valores das cotas nos pontos onde a linha freática encontra-se com o piezômetro. Pontos estes que refletem as cargas de pressão atuantes ao longo do maciço da barragem nos locais escolhidos para a instrumentação, de montante à jusante da seção.

No estudo do presente trabalho foram estabelecidos níveis d'água para os quatro piezômetros da seção analisada nas condições de operação definidas como Normal, Atenção, Alerta e Emergência. Esses níveis mostram para cada condição imposta, limites máximos das cotas piezométricas. A Tabela 5 mostra os instrumentos e seus respectivos valores máximos de níveis d'água para as condições de operação citadas acima.

Tabela 5: Níveis de água nos piezômetros para as condições de risco adotadas

Instrumento	Nível Normal		Nível de Atenção			Nível de Alerta			Nível de Emergência	
	N.A. ≤			≤ N.A. ≤			≤ N.A. ≤		N.A. ≥	
PZ-01	N.A. ≤	855,86	855,87	≤ N.A. ≤	857,41	857,42	≤ N.A. ≤	857,51	N.A. ≥	857,52
PZ-02	N.A. ≤	854,01	854,02	≤ N.A. ≤	855,52	855,53	≤ N.A. ≤	856,01	N.A. ≥	856,02
PZ-03	N.A. ≤	851,95	851,96	≤ N.A. ≤	853,17	853,18	≤ N.A. ≤	854,28	N.A. ≥	854,29
PZ-04	N.A. ≤	848,15	848,16	≤ N.A. ≤	848,39	848,40	≤ N.A. ≤	848,86	N.A. ≥	848,87

É notório que os fatores de segurança vão diminuindo com o aumento do nível de risco na seção analisada, o que é mostrado pela Tabela 5, onde para o nível de emergência, têm-se valores limites de cotas piezométricas maiores que para o nível normal, devido à elevação da linha freática no maciço da barragem, gerando assim uma situação mais provável de ruptura circular no talude de jusante, como já foi mostrado anteriormente.

Pela Tabela 5, sabe-se que a seção crítica apresentou níveis de risco para todas as quatro condições impostas na análise de perigo de ruptura, o que se mostra de grande importância para o correto monitoramento da estrutura.

6.3.2 Leituras Piezométricas a partir da Instrumentação em Campo

Já foram definidos anteriormente os níveis d'água nos quatro piezômetros referentes às condições de sinalização de segurança adotadas. Em um segundo momento, para uma análise de perigo de ruptura mais atualizada e de fácil entendimento, faz-se necessário compararmos valores das cotas piezométricas retiradas através da elevação da linha freática na seção, com os valores das cotas obtidos através das leituras piezométricas em campo.

Para a seção analisada, as leituras nos instrumentos vindas através do campo, foram realizadas em um período de aproximadamente um ano. Ao longo de todo esse tempo, foram feitas medidas nos piezômetros, com intervalos de dias variáveis entre uma leitura e outra, dependendo do mês de monitoramento da barragem.

Esses dados de leituras coletados no campo serviram para um diagnóstico sobre as condições de fluxo encontradas ao longo da estrutura da barragem para o período de monitoramento considerado nesta análise. Foram feitas leituras da medida em metros do cabo, desde a boca do tubo do piezômetro até o nível d'água onde se encontrava instalado o instrumento. Essas leituras foram feitas em vários dias durante o período de tempo considerado.

O registro das leituras feitas em campo para os quatro piezômetros instalados e a posterior análise dos níveis freáticos, além de permitir a averiguação dos instrumentos disponíveis, visou determinar a relação entre as cotas dos níveis encontrados nas leituras e as cotas piezométricas das análises de estabilidade para as condições de risco, obtidas no programa SLIDE.

Com o intuito de se avaliar de forma mais clara e objetiva as cotas dos níveis d'água nos piezômetros, manipulou-se as medidas trazidas do campo, e obtiveram-se as médias das leituras para os meses considerados no monitoramento. Desta forma, foi obtida para cada piezômetro e em cada mês de monitoramento, uma cota média do nível d'água no ponto de instalação do instrumento. Essa cota foi

determinada pela diferença entre a cota da boca do tubo do piezômetro e a medida do nível d'água lida no aparelho.

Na Tabela 6 é mostrada a média das cotas do nível d'água no instrumento PZ-01 em um ano. Além disso, são indicados também os níveis de água no reservatório na condição normal de operação para o mesmo período de tempo.

Tabela 6: Níveis freáticos de acordo com a Instrumentação para o PZ-01

Data	NA reservatório	Medida (m)	Cota Boca Tubo	Cota Nível d'água
Jan/15	857,99	7,23	861,80	854,57
Fev/15	858	7,11	861,80	854,69
Mar/15	858	7,09	861,80	854,71
Abr/15	857,80	7,17	861,80	854,63
Mai/15	858	7,19	861,80	854,61
Jun/15	857,97	7,30	861,80	854,50
Jul/15	857,98	7,37	861,80	854,43
Ago/15	858,22	7,44	861,80	854,36
Set/15	858,95	7,72	861,80	854,08
Out/15	857,99	7,60	861,80	854,20
Nov/15	857,98	7,34	861,80	854,46
Dez/15	857,97	7,21	861,80	854,59
Jan/16	858,08	7,07	861,80	854,73
Fev/16	857,82	7,23	861,80	854,57

A Tabela 7 a seguir, mostra a média das cotas do nível d'água no instrumento PZ-02, no período de monitoramento da barragem. Além disso, são indicados também os níveis de água no reservatório na condição normal de operação para o mesmo período de tempo, como já mostrado anteriormente.

Tabela 7: Níveis freáticos de acordo com a Instrumentação para o PZ-02

Data	NA reservatório	Medida (m)	Cota Boca Tubo	Cota Nível d'água
Jan/15	857,99	9,76	859,50	849,74
Fev/15	858	9,73	859,50	849,77
Mar/15	858	9,68	859,50	849,82
Abr/15	857,80	9,69	859,50	849,81
Mai/15	858	9,73	859,50	849,77
Jun/15	857,97	9,85	859,50	849,65
Jul/15	857,98	9,99	859,50	849,51
Ago/15	858,22	10,08	859,50	849,42
Set/15	858,95	10,10	859,50	849,40
Out/15	857,99	10,10	859,50	849,40
Nov/15	857,98	10,14	859,50	849,36
Dez/15	857,97	10,02	859,50	849,48
Jan/16	858,08	9,83	859,50	849,67
Fev/16	857,82	9,70	859,50	849,80

Os instrumentos PZ-01 e PZ-02 apresentaram grandes oscilações nas leituras medidas em campo no período de monitoramento da barragem, assim como verificou-se, pelos valores das tabelas, a existência de variações no nível do reservatório.

A Tabela 8 mostra os valores de níveis freáticos para o PZ-03. Já na Tabela 9, tem-se os valores para o piezômetro mais a jusante da barragem, o PZ-04. Nas duas tabelas a seguir, assim como para o PZ-01 e PZ-02, são indicados os níveis de água no reservatório na condição normal de operação.

Tabela 8: Níveis freáticos de acordo com a Instrumentação para o PZ-03

Data	NA reservatório	Medida (m)	Cota Boca Tubo	Cota Nível d'água
Jan/15	857,99	Inexistente	856,20	-
Fev/15	858	Inexistente	856,20	-
Mar/15	858	Inexistente	856,20	-
Abr/15	857,80	Inexistente	856,20	-
Mai/15	858	9,20	856,20	847,00
Jun/15	857,97	9,24	856,20	846,96
Jul/15	857,98	9,29	856,20	846,91
Ago/15	858,22	9,30	856,20	846,90
Set/15	858,95	9,26	856,20	846,94
Out/15	857,99	9,27	856,20	846,93
Nov/15	857,98	9,27	856,20	846,93
Dez/15	857,97	9,22	856,20	846,98
Jan/16	858,08	9,15	856,20	847,05
Fev/16	857,82	9,22	856,20	846,98

Tabela 9: Níveis freáticos de acordo com a Instrumentação para o PZ-04

Data	NA reservatório	Medida (m)	Cota Boca Tubo	Cota Nível d'água
Jan/15	857,99	Inexistente	851,70	-
Fev/15	858	Inexistente	851,70	-
Mar/15	858	Inexistente	851,70	-
Abr/15	857,80	Inexistente	851,70	-
Mai/15	858	5,26	851,70	846,44
Jun/15	857,97	5,32	851,70	846,38
Jul/15	857,98	5,36	851,70	846,34
Ago/15	858,22	5,37	851,70	846,33
Set/15	858,95	5,28	851,70	846,42
Out/15	857,99	5,31	851,70	846,39
Nov/15	857,98	5,32	851,70	846,38
Dez/15	857,97	5,27	851,70	846,43
Jan/16	858,08	5,24	851,70	846,46
Fev/16	857,82	5,32	851,70	846,38

Como já foram identificados para os outros instrumentos, os piezômetros PZ-03 e PZ-04 apresentaram pequenas oscilações nas médias das leituras medidas em campo no período de monitoramento da barragem. Como esses dois instrumentos

foram instalados em maio de 2015, não existem registros de leituras para o período entre janeiro e abril deste mesmo ano.

6.3.3 Comparativo entre as Cotas Piezométricas Medidas e as Cotas Associadas aos Níveis de Risco

Pelas tabelas expostas anteriormente é possível saber os níveis piezométricos através das leituras medidas em campo. Essas médias de cotas dos níveis d'água nos instrumentos devem ser constantemente comparadas com os valores das cotas obtidos através dos níveis de sinalização de segurança.

Para uma análise comparativa, fez-se primeiramente a relação entre as cotas máximas dos níveis d'água nos quatro piezômetros, simulando a pior condição de fluxo possível atuantes na estrutura, com as cotas dos níveis de segurança adotados. Para essas últimas, foram consideradas para o nível normal de operação (FS=1,50) um nível de reservatório igual a 858,20 m. E para os níveis de atenção e alerta (FS=1,30 e FS=1,10), foi considerado um nível de reservatório igual a 859,40 m.

A tabela 10 mostra o comparativo entre as cotas máximas obtidas através das leituras no campo e as associadas aos níveis de risco.

Tabela 10: Comparação entre as cotas piezométricas na seção

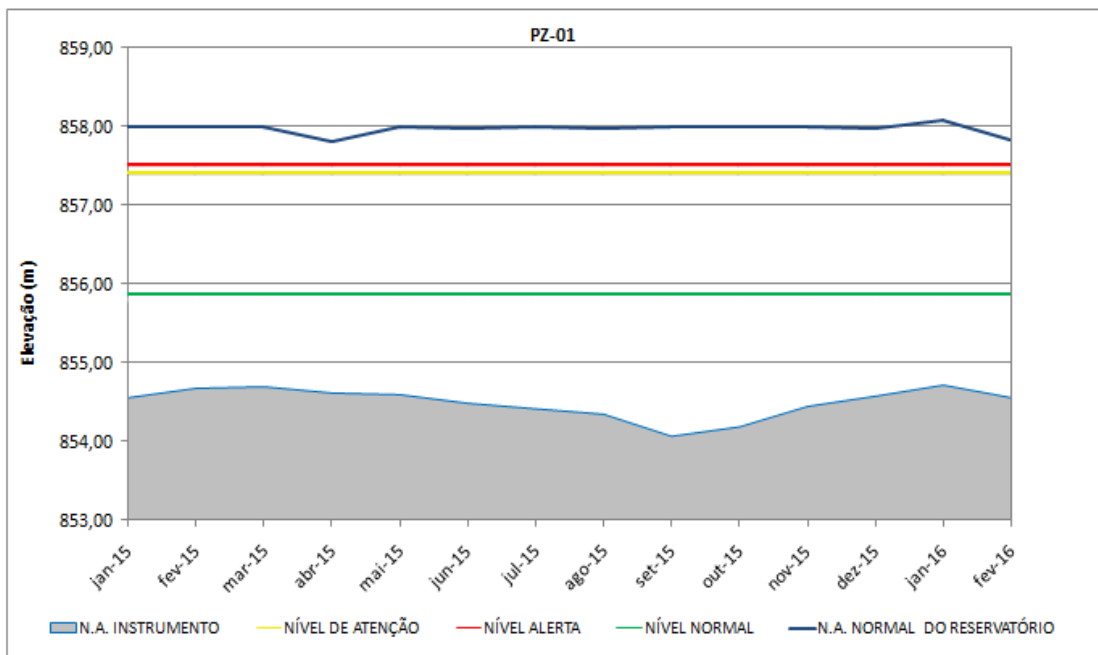
Piezômetro	Máxima cota nível d'água	Normal	Atenção	Alerta
PZ-01	854,73	855,86	857,41	857,51
PZ-02	849,82	854,01	855,52	856,01
PZ-03	847,05	851,95	853,17	854,28
PZ-04	846,46	848,15	848,39	848,86

Sabe-se, pela tabela 10, que a máxima cota piezométrica resultante das leituras em campo para cada piezômetro não excedeu aos valores limites das cotas associados ao nível Normal. Isso sugere uma condição de normalidade de operação da barragem na seção crítica analisada em termos de instrumentação.

Para um entendimento mais claro das condições de operação da estrutura em estudo, foram feitas análises gráficas comparativas entre os níveis de água nos instrumentos em todos os meses de monitoramento e os níveis de risco associados.

O gráfico 5 mostra para o piezômetro PZ-01, a correlação entre os níveis freáticos de segurança estabelecidos na Análise de Perigo, além dos níveis d'água nos instrumentos e no reservatório, no período de monitoramento.

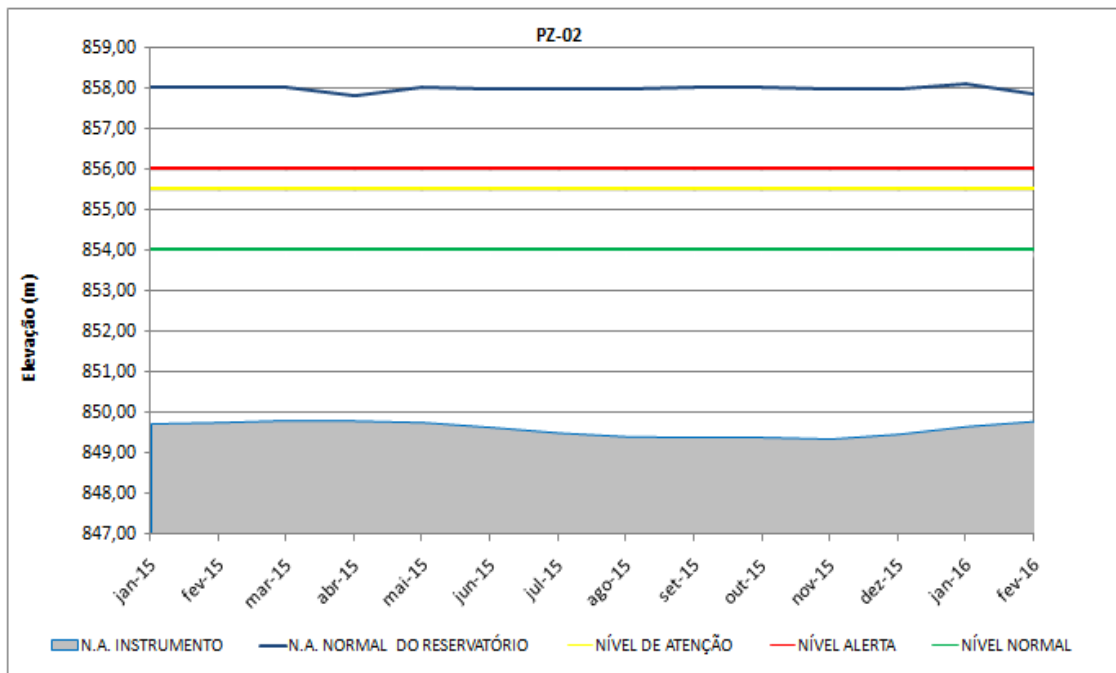
Gráfico 5: Condição de operação da barragem para o PZ-01



Observa-se que o nível de água no instrumento para período de monitoramento da seção está abaixo dos níveis de risco estipulados, mostrando assim, que a estrutura se apresenta em condições normais de operação. Pelas leituras mostradas, tem-se uma oscilação maior nas leituras piezométricas entre os meses de setembro de 2015 a janeiro de 2016. Percebe-se também que o maior registrado de leitura no campo aconteceu em janeiro de 2016, justamente no período do ano mais chuvoso.

No gráfico 6, tem-se a comparação entre os níveis piezométricos de campo e de perigo para o piezômetro PZ-02.

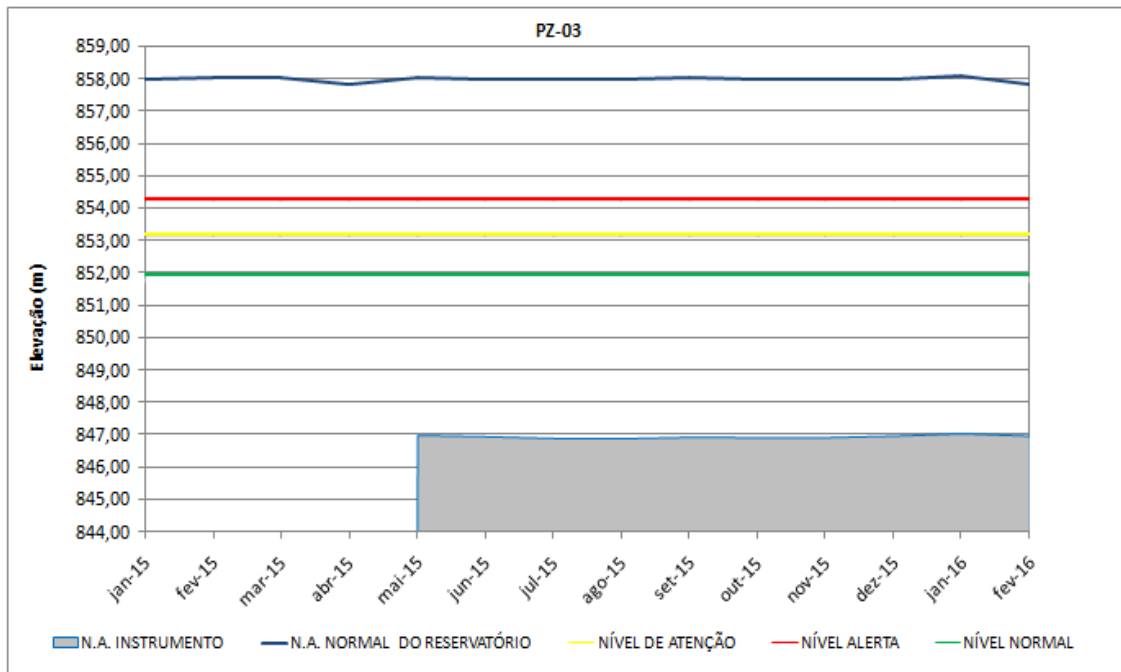
Gráfico 6: Condição de operação da barragem para o PZ-02



Nota-se, que para o monitoramento feito no PZ-02, há oscilações do nível de água no instrumento, sendo possível perceber também que as cotas piezométricas obtidas pela instrumentação no campo apresentaram valores abaixo dos valores limites estipulados pela Análise de Perigo, o que indica uma condição de normalidade operacional.

O gráfico 7 mostra o comparativo dos níveis de água no PZ-03 medidos em campo com os níveis de risco adotados para as condições Normal, Atenção e Alerta. Além disso, como para todos os piezômetros ao longo da barragem, temos a oscilação no nível de água do reservatório ao longo do período de tempo analisado.

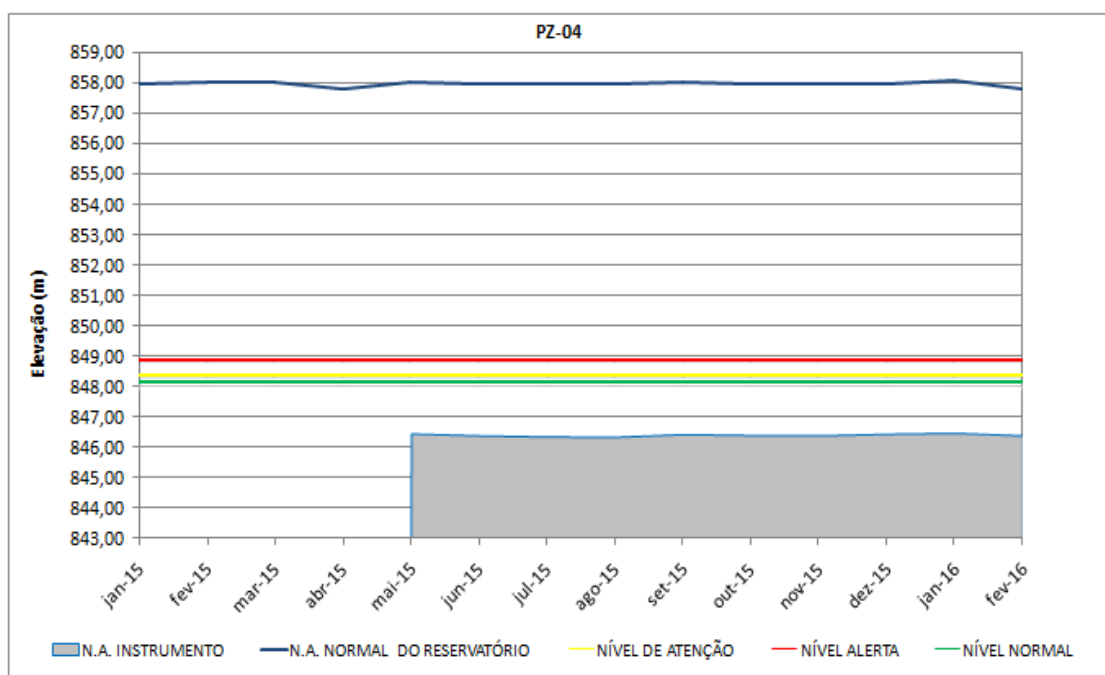
Gráfico 7: Condição de operação da barragem para o PZ-03



De acordo com o gráfico, tem-se que o monitoramento do nível de água neste piezômetro foi iniciado em maio de 2015, e se manteve praticamente constante ao longo dos meses de análise da instrumentação. Há nesse instrumento uma margem de segurança em relação à comparação dos níveis, já que as suas cotas piezométricas têm valores inferiores às cotas associadas dos níveis de sinalização de segurança.

No gráfico 8 é feita a comparação dos níveis analisados para o PZ-04.

Gráfico 8: Condição de operação da barragem para o PZ-04



Assim como para o PZ-03, o piezômetro analisado no gráfico 8 foi monitorado a partir de maio de 2015. Em relação às condições da seção no ponto do instrumento PZ-04, os registros indicam estabilidade nas leituras sem variações muito significativas para os meses de análises. Nota-se que os valores das cotas piezométricas nos instrumentos ficaram muito próximos dos limites estabelecidos nos níveis de risco, sugerindo a necessidade de maior atenção no monitoramento dessa região da estrutura, já que a região de jusante tem uma relevância significativa nas condições críticas da barragem, sendo de extrema importância para a avaliação das condições de segurança da barragem.

Na seção analisada percebe-se claramente falhas em relação à drenabilidade do maciço, já que não há drenagem interna. Essa drenagem seria necessária para um rebaixamento da linha freática à jusante, contribuindo para uma melhor percolação no maciço e ainda para um estudo mais detalhado das condições da estrutura.

Para o nível de emergência também determinado no estudo dos níveis de sinalização de segurança, foram considerados valores imediatamente acima dos níveis de alerta, representando neste caso, uma situação muito crítica na estabilidade da estrutura, já que tem-se uma elevação excessiva da linha freática na região da superfície potencial de ruptura. Essa elevação combinada com uma série

de fatores já discutidos nesse trabalho leva a barragem a uma condição provável de ruptura para o nível de emergência adotado.

Nos gráficos mostrados acima não foram considerados os níveis de emergência, sendo estes, imediatamente superiores aos níveis de alerta, o que pode ser verificado na Tabela 5.

Em relação às médias dos níveis de água nos reservatórios ao longo dos meses de monitoramento da estrutura, há pequenas oscilações nos registros feitos, tendo o reservatório um nível quase constante. As maiores oscilações ocorreram em abril de 2015 e janeiro de 2016.

7 Considerações Finais

Este trabalho teve como finalidade avaliar as condições de segurança da seção crítica de uma barragem através da instrumentação por piezômetros e do estudo da Análise de Perigo de Ruptura. A partir da geometria da seção, dos parâmetros de resistência dos solos e do nível freático presente na estrutura, analisou-se a estabilidade da seção. Esta análise foi feita em regime permanente, pelo método de equilíbrio limite “Bishop Simplificado”. Com a análise feita no programa computacional SLIDE, obteve-se um fator de segurança mínimo por ruptura circular na estrutura. A comparação desse fator de segurança com os valores mínimos sugeridos pela norma vigente ($FS > 1,50$) mostrou que a barragem encontra-se estável.

O método de equilíbrio limite para a obtenção do fator de segurança tem várias limitações que foram explicitadas nesse trabalho, assim é de grande importância considerar que há falhas na maioria dos estudos de estabilidade normalmente empregados na engenharia de barragens. E essas falhas precisam ser consideradas quando se deseja avaliar de forma criteriosa as condições críticas da estrutura.

Com as condições de fluxo estabelecidas no maciço da barragem foi possível simular diferentes níveis de operação do reservatório, associadas a diferentes leituras piezométricas.

Os registros de leituras da instrumentação no campo e as análises de estabilidade definiram quatro níveis de risco para a operação da barragem: Normal, Atenção, Alerta e Emergência. O nível de Emergência para o $FS = 1,1$ adotado no trabalho e que reproduz Cartas de Risco para fins comerciais, não é recomendável para essa seção analisada, já que a freática para esse fator de segurança está muito alta, podendo resultar, juntamente com vários outros fatores explicados nesse estudo, em uma ruptura no talude a jusante.

Para os níveis de risco já definidos foi feita uma Análise de Perigo de Ruptura, no qual se adotou fatores de segurança mínimos recomendados em literaturas técnicas para a sinalização de segurança da barragem. Essa análise foi de grande utilidade para a avaliação das condições críticas da barragem em operação analisada. Porém, o seu uso, como é feito comercialmente, se mostrou incompleto

para a representação das condições reais da estrutura, já que não considera alguns fatores que são indispensáveis em uma avaliação detalhada do nível de segurança da seção, sendo estes, análise das condições de percolação interna, variação da resistência da estrutura, precisão na obtenção dos parâmetros geotécnicos, consideração de falhas do método de equilíbrio limite e falhas executivas dos procedimentos de campo.

Para todas as condições de fluxo simuladas obteve-se um fator de segurança proposto, e cotas piezométricas nos instrumentos associadas a esses fatores. Apesar do estabelecimento do fluxo ser de grande importância para a correlação entre as elevações freáticas e os fatores de segurança adotados, este se mostra falho na maneira como é obtido em Análise de Risco para fins comerciais, como é reproduzido nesse trabalho. É necessária uma criteriosa análise de percolação interna da barragem, já que sem essa análise pode-se obter modelos não realistas, sendo estes, subdimensionados ou até mesmo hiperdimensionados.

Essas cotas foram comparadas com as médias das cotas piezométricas obtidas através dos registros de leituras no campo, e foi possível afirmar que as cotas obtidas através das leituras piezométricas nos meses considerados, foram mais baixas que as associadas aos níveis de risco, atestando assim, uma condição de normalidade operacional da seção.

Em relação aos piezômetros instalados ao longo da estrutura, é possível perceber que estes se apresentaram dentro da faixa de normalidade, além de apresentar pequenas oscilações nas leituras, o que indica boas condições de operação.

O registro de valores limites dos níveis d'água para as condições de risco analisadas estabelece para cada um dos piezômetros instalados na estrutura seus limites de operação. Limites esses, que com um simples acompanhamento da instrumentação, garantem um controle das condições de estabilidade do maciço.

É importante destacar que as condições de operação definidas como "normais" ou "boas", diz respeito à análise de instrumentação da barragem e não atestam para uma condição ampla de estabilidade, já que esta inclui uma série de fatores que não foram estudados nesse trabalho.

Com o exposto até aqui, é fato que um programa de monitoramento adequado, associado a um correto processo de análise, possibilita um gerenciamento das condições de segurança de barragens, mas muitas vezes não

reproduzem uma condição real da mesma, já que é preciso um estudo mais detalhado de fatores determinantes em uma análise de estabilidade. Sabe-se, assim, que o presente trabalho tem um papel importante na avaliação das condições da seção crítica analisada, mas assim como em Análise de Risco comerciais, tem muitos pontos falhos e que precisam ser estudados de maneira mais profunda.

8 Recomendações para Trabalhos Futuros

Como recomendações de estudos futuros da barragem apresentada nesse trabalho destacam-se: a avaliação conjunta entre a pluviometria da região de estudo e a instrumentação da seção crítica, a análise completa da percolação interna do maciço, e o estudo criterioso dos parâmetros de resistência dos solos presentes na estrutura.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-. **NBR 13.028**: Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragem para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água. Rio de Janeiro, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Guia para Elaboração de Projetos de Barragens**. 2015, Brasília – DF.

BRASIL. Congresso. Senado. Lei nº 12.334, de 2010. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens. **Coleção de Leis da República Federativa do Brasil**. Brasília - DF, 20 de setembro de 2010.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil. In: II SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 1996, **Anais**, vol.1, Belo Horizonte, 1996. Acesso em 12 abr. 2017.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Guia Básico de Segurança de Barragens. In: XXIII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1999, **Anais**, Belo Horizonte, 1999, p. 23-24.

DPOH. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. 2002, Brasília – DF.

FONSECA, A. R. **Auscultação por Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento para Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso das Barragens da UHE São Simão**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2003.

FUSARO, T. C. **Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2007.

GeoSlope International, 2002, Slope – User Guide, Versão 5.11, Calgary, Alberta, Canadá.

ICOLD. **Dam Failures Statistical Analysis**, Bulletin 99. Paris, CICB-ICOLD, 1997.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de segurança em barragens de terra, sob cenário de erosão tubular regressiva, por método probabilístico o caso UHE – São Simão**. 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.

MACHADO, G. de F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – MG, 2007.

MEDEIROS, C. H. de A.C. Segurança e Auscultação de Barragens. In: XXV SEMINÁRIO DE GRANDES BARRAGENS, 2003, **Anais**, Salvador, 2003 p. 13-50.

MENDONÇA, M. B. Notas de Aula da disciplina de Obras de Terra. 2012. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

MONTES, C. C. **Estudos Piezométricos e Análise de Estabilidade de Taludes da Barragem Bico de Pedra. 2003.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2003.

PEREIRA, M. D. S. **Gestão de Riscos e Plano de Ações Emergenciais aplicado à Barragem de Contenção de Rejeitos Casa de Pedra (CSN).** 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2009.

PIERRE, L. F. Avaliação da Segurança de Pequenas Barragens em Operação. In: XXV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2003, **Anais**, Salvador, 2003 p. 260-268.

SARÉ, A. R. **Análise do fluxo da barragem de Curuá – Una.** 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2003.

SMIDERLE, C. S. D. **Segurança de Barragens: Análise da Instrumentação da Barragem de Itaúba.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2014.