



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

João Vítor Fontana Battisti

**DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA AUSCULTAÇÃO PIEZOMÉTRICA DE
BARRAGEM DE TERRA NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**

Florianópolis
2023

João Vítor Fontana Battisti

**DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA AUSCULTAÇÃO PIEZOMÉTRICA DE
BARRAGEM DE TERRA NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.º Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Battisti, João Vítor Fontana

Definição de parâmetros para auscultação piezométrica de barragem de terra na região metropolitana de Curitiba / João Vítor Fontana Battisti ; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi, 2023.

111 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Segurança de Barragens. 3. Instrumentação. 4. Níveis de controle. I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

João Vítor Fontana Battisti

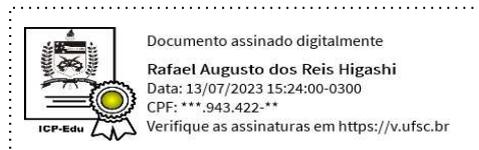
**DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA AUSCULTAÇÃO PIEZOMÉTRICA DE
BARRAGEM DE TERRA NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil.

Local: Florianópolis, 28 de junho de 2023.

Coordenação do Curso

Banca examinadora



Prof.(a) Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Orientador

Prof.(a) Patrícia de Oliveira Faria, Dra.

UFSC

Eng. Civil Vicente Mafra,
Mestre em Geotecnia

Florianópolis, 2023.

*A meus pais e meu irmão,
que sempre me incentivaram e
acreditaram no meu potencial.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marilei e Alcedir, por repetidamente e insistentemente, me apoiarem e incentivarem a estudar desde cedo para “passar numa federal”. O apoio incondicional de vocês por meio de palavras de conforto impetuosas como “capacidade tu tens, só precisa focar” durante toda a vida me possibilitaram a realização de feitos significativos. Os abraços apertados nos encontros e despedidas, o olhar tenro vendo sair de um ônibus ou entrar em um carro, desde os meus 14 anos, em busca de uma formação melhor e de oportunidades, tudo isso me dava forças para continuar. Vocês são exemplos para mim.

Agradeço ao meu irmão, Jorge, pelo companheirismo e pela compreensão das situações adversas as quais eu passava durante a faculdade. Sendo meu colega de morada, viu de perto pelo que passa um estudante de engenharia. Sou grato por me escutar quando eu precisava espairar e por me situar quando estava desatinado.

Ao professor Rafael Augusto dos Reis Higashi, agradeço pela orientação. Tive o prazer de ter iniciado no mundo da mecânica dos solos e estabilidade de taludes em suas aulas, ainda que remotamente. À professora Patrícia de Oliveira Faria, agradeço por ter me aceitado como voluntário em seu Laboratório de Túneis. Foi essencial para que eu conseguisse minha primeira bolsa de extensão. Ao LabTrans, agradeço a possibilidade de primeira inserção ao mercado de trabalho. Conheci profissionais de extrema competência que me ensinaram muito.

À Nova Engevix Engenharia, por ter me proporcionado nos últimos anos de graduação uma inserção definitiva à área que hoje mais me identifico: geotecnia. Agradeço a possibilidade de utilizar o *software* da GeoStudio, bem como todo o apoio que recebi ao realizar esse trabalho. Em especial, a Vicente Mafra, Lucas Heckraft e Marília Moreira, que não mediram esforços em apoio à conclusão do presente trabalho. Ao longo de meu estágio, auxiliei diversos profissionais, aos quais me ensinaram muito, e os agradeço por isso. Alguns deles, mas não somente, são João Raphael Leal, Eliane Oliveira e Gisele Reginatto.

À minha amiga incrível que conheci realmente nas aulas remotas, Juliana, agradeço pela lealdade nesses últimos anos de graduação. Sem dúvida, as noites sem dormir estudando foram mais leves com você. A Gabriela e Raul, agradeço a amizade que mantemos desde o ensino fundamental. À Natália, manter nossa

amizade desde o ensino médio nos permitiu testemunhar as várias fases pelas quais passamos, e sou grato por isso. Agradeço a todos os familiares que, talvez não da forma tradicional, incentivaram a conclusão dessa tarefa homérica, que é uma graduação.

Agradeço à USFC, Colégio Tiradentes e E.E.B. Mariano Moro, todas instituições de ensino públicas que proporcionaram base à conclusão desse trabalho. Sou infinitamente grato aos professores aos quais fui aluno, mestres que não mediram esforços para sanar minhas intermináveis perguntas.

*“Desde pequeno falam que eu sou curioso
Quem me viu quem me vê
Fala que eu nunca cresci
Não tenho medo de errar
Só medo de desistir
Mas tenho vinte e poucos anos
E não vou parar aqui”*

(LAGUM, 2021)

RESUMO

O impulso para este trabalho é a Lei 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens. Esta política determina que certos tipos de barragens devem obedecer a um Plano de Monitoramento e Inspeção, de acordo com as disposições e resoluções existentes. Portanto, barragens recém-construídas ou existentes devem prover de parâmetros de auscultação. A auscultação piezométrica é uma técnica de monitoramento utilizada na segurança de barragens para analisar a pressão da água em diversos pontos. Essa técnica envolve a medição de níveis piezométricos, que indicam a pressão de coluna da água em relação a um ponto de referência, no caso o ponto de instalação de piezômetros na barragem. Com a definição de critérios de auscultação, é criada uma sistemática que permite avaliação pragmática sobre a situação do instrumento, definindo entre Normal, Atenção, Alerta ou Emergência. O principal objetivo deste trabalho é estabelecer valores de controle para o monitoramento de áreas críticas da barragem, usando a barragem M como estudo de caso. Consiste em análises de percolação em condição normal, utilizando o método de elementos finitos, e definição de fatores de segurança para gradientes de saída. Segue com uma análise da estabilidade da barragem em três cenários distintos, utilizando critérios pré-determinados e o método do equilíbrio limite. Por fim, valores de controle para piezômetros são determinados e servirão como pontos de referência para o monitoramento da barragem estudada.

Palavras-chave: Segurança de Barragens; Instrumentação; Níveis de controle.

ABSTRACT

The impetus for this work is the Brazilian Law 12,334/2010, which instituted the National Policy for Dam Safety. This policy determines that certain types of dams must comply with a Monitoring and Inspection Plan, in accordance with existing provisions and resolutions. Therefore, newly built or existing dams must provide auscultation parameters. Piezometric auscultation is a monitoring technique used in dam safety to analyze water pressure at various points. This technique involves the measurement of piezometric levels, which indicate the water column pressure in relation to a reference point, in this case the installation point of piezometers in the dam. With the definition of auscultation criteria, a systematic is created that allows a pragmatic assessment of the situation of the instrument, defining between Normal, Attention, Alert or Emergency. The main objective of this work is to establish control values for the monitoring of critical areas of the dam, using the M dam as a case study. It consists of percolation analyzes under normal conditions, using the finite element method, and definition of safety factors for output gradients. This is followed by an analysis of dam stability in three different scenarios, using predetermined criteria and the limit equilibrium method. Finally, control values for piezometers are determined and will serve as reference points for monitoring the studied dam.

Keywords: Dam Safety; Instrumentation; Control levels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Barragem de Terra Homogênea.....	19
Figura 2-2 Dispositivos de Drenagem Interna	35
Figura 2-3 Piezômetro Casagrande simples e duplo	37
Figura 2-4 Exemplo de locação de piezômetros em barragem de aterro homogêneo	43
Figura 2-5 Filtro operando em carga com gradiente hidráulico de 5% - Atenção	45
Figura 2-6 Filtro operando em carga com gradiente hidráulico de 15% - Alerta	45
Figura 2-7 Filtro operando em carga com gradiente hidráulico de 20% - Emergência	46
Figura 3-1 Diagrama do Procedimento Metodológico.....	47
Figura 3-2 Imagem de Satélite da Barragem M	56
Figura 3-3 Arranjo Geral da Barragem M	57
Figura 3-4 Seção Típica da Barragem M.....	59
Figura 3-5 Faixa Granulométrica dos Materiais	60
Figura 3-6 Faixa Granulométrica dos Materiais	61
Figura 3-7 Locação de investigações	63
Figura 3-8 Mapa Geológico-geotécnico.....	65
Figura 3-9 Perfil Geológico-geotécnico do eixo – Parte 1.....	66
Figura 3-10 Perfil Geológico-geotécnico do eixo – Parte 2.....	67
Figura 3.11 Planta de Locação dos Instrumentos	72
Figura 3-12 Localização das Seções de Análise da Barragem – Planta	74
Figura 3-13 Seção 1	75
Figura 3-14 Seção 2	76
Figura 3-15 Seção 3	76
Figura 3-16 Seção 4	76
Figura 3-17 Seção 5	77
Figura 3-18 Seção 6	77
Figura 3-19 Exemplo de malha de pontos – Seção 1	79
Figura 3-20 Condições de Contorno – Seção 1.....	79
Figura 3-21 Condições de Contorno – Seção 2.....	80

Figura 3-22 Condições de Contorno – Seção 3.....	80
Figura 3-23 Condições de Contorno – Seção 4.....	81
Figura 3-24 Condições de Contorno – Seção 5.....	81
Figura 3-25 Condições de Contorno – Seção 6.....	82
Figura 4-1 Análise de Percolação – Seção 1.....	85
Figura 4-2 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 1.....	85
Figura 4-3 Análise de Percolação – Seção 2.....	86
Figura 4-4 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 2.....	86
Figura 4-5 Análise de Percolação – Seção 3.....	87
Figura 4-6 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 3.....	87
Figura 4-7 Análise de Percolação – Seção 4.....	88
Figura 4-8 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 4.....	88
Figura 4-9 Análise de Percolação – Seção 5.....	89
Figura 4-10 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 5.....	89
Figura 4-11 Análise de Percolação – Seção 6.....	90
Figura 4-12 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 6.....	90
Figura 4-13 Gradiente de saída – Seção 1.....	91
Figura 4-14 Gradiente de saída – Seção 2.....	91
Figura 4-15 Gradiente de saída – Seção 3.....	91
Figura 4-16 Gradiente de saída – Seção 4.....	92
Figura 4-17 Gradiente de saída – Seção 5.....	92
Figura 4-18 Gradiente de saída – Seção 6.....	92
Figura 4-19 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 1.....	93
Figura 4-20 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 2.....	94
Figura 4-21 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 3.....	94
Figura 4-22 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 4.....	95
Figura 4-23 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 5.....	95
Figura 4-24 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 6.....	96
Figura 4-25 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 1.....	96
Figura 4-26 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 2.....	97
Figura 4-27 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 3.....	97
Figura 4-28 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 4.....	98
Figura 4-29 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 5.....	98
Figura 4-30 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 6.....	99

Figura 4-31 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 1...	100
Figura 4-32 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 2...	100
Figura 4-33 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 3...	101
Figura 4-34 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 4...	101
Figura 4-35 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 5...	102
Figura 4-36 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 6...	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1 Características Técnicas	22
Quadro 2-2 Estado de Conservação	23
Quadro 2-3 Plano de Segurança	25
Quadro 2-4 Dano Potencial Associado (DPA)	27
Quadro 2-5 Quadro para classificação das barragens de acumulação de água	28
Quadro 2-6 Matriz de Classificação.....	29
Quadro 2-7 Tipos de Ensaio de Caracterização	32
Quadro 2-8 Coeficientes de Segurança para Estabilidade de Barragens.....	41
Quadro 2-9 FS e Gradiente hidráulico de filtro horizontal operando em cargas	44
Quadro 3-1 Características Técnicas	50
Quadro 3-2 Estado de Conservação	51
Quadro 3-3 Plano de Segurança	53
Quadro 3-4 Dano Potencial Associado (DPA)	54
Quadro 3-5 Quadro para classificação das barragens de acumulação de água	55
Quadro 3-6 Matriz de Classificação.....	55
Quadro 3-7 Parâmetros do Material de Fundação	68
Quadro 3-8 Resultados de Ensaio no Material de Aterro.....	69
Quadro 3-9 Resultados de Ensaio Triaxiais do Material de Aterro	70
Quadro 3-10 Parâmetros do Material de Aterro.....	70
Quadro 3-11 Parâmetros do Material Granular	70
Quadro 3-12 Localização dos Piezômetros	73
Quadro 3-13 Parâmetros dos Materiais.....	77
Quadro 4-1 Resultados de Análise de Estabilidade	103
Quadro 4-2 Diferenças entre Resultados de Valores de Controle.....	104
Quadro 4-3 Parâmetros de Auscultação Piezométrica da Barragem M	105

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivos específicos	18
1.1.2	Limitações	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	BARRAGENS DE TERRA	19
2.2	SEGURANÇA DE BARRAGENS	20
2.2.1	Classificação da Barragem	20
2.2.1.1	<i>Categoria de Risco (CRI)</i>	20
2.2.1.2	<i>Dano Potencial Associado (DPA)</i>	26
2.2.1.3	<i>Classe da Barragem</i>	28
2.2.2	Plano de Segurança de Barragem	29
2.2.3	Plano de Monitoramento e Instrumentação	31
2.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	32
2.4	PERCOLAÇÃO EM ATERROS.....	33
2.4.1	Sistema de Drenagem Interna	34
2.5	AUSCULTAÇÃO	35
2.5.1	Piezometria	36
2.6	MÉTODOS DE ANÁLISE	37
2.6.1	Elementos Finitos e Percolação	38
2.6.2	Gradiente de Saída e <i>Piping</i>	39
2.6.3	Equilíbrio Limite e Estabilidade	40
2.6.4	Definição de Critérios de Auscultação Piezométrica	42
3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	47
3.1	MOTIVAÇÃO.....	47
3.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	48
3.3	APRESENTAÇÃO DA BARRAGEM	48
3.3.1	Classe da Barragem	49
3.3.2	Descrição do Empreendimento	55
3.3.3	Perfil Geológico	62
3.3.3.1	<i>Fundação</i>	68
3.3.3.2	<i>Material de Jazida</i>	69

3.3.3.3	<i>Material Granular</i>	70
3.4	INSTRUMENTAÇÃO	70
3.5	ELABORAÇÃO DAS SEÇÕES	74
3.6	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	78
3.7	ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO DAS SEÇÕES	79
3.8	VERIFICAÇÃO DE GRADIENTE DE SAÍDA	82
3.9	MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE	82
3.10	ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE ATENÇÃO	83
3.11	ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE ALERTA...	83
3.12	ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE EMERGÊNCIA	83
3.13	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA CADA PIEZÔMETRO	84
4	RESULTADOS	85
4.1	ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO DAS SEÇÕES	85
4.2	VERIFICAÇÃO DE GRADIENTE DE SAÍDA	91
4.1	ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE ATENÇÃO	93
4.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE ALERTA...	96
4.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE EMERGÊNCIA	99
4.4	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA CADA PIEZÔMETRO	102
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	107
5.1	CONCLUSÕES	107
5.2	SUGESTÕES	107
	REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

Barragens de acumulação de água imperam como estruturas indispensáveis para o bom desenvolvimento humano em determinadas regiões do planeta. Sejam de terra ou de concreto, os paramentos revelam complexidades em seus projetos, período construtivo, operação e manutenção. Ainda assim, são 23.245 barragens, destinadas aos mais diversos fins no Brasil, como revela o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB, 2023) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Dessas, 1.834 são para abastecimento humano e 2.556 são para regularização de vazão.

O perigo é a primeira das motivações para se fazer avaliações de segurança da barragem – seguido do anseio de se proteger dele. Sendo uma motivação psicológica – surgida a partir da experiência – é associada à possibilidade de ruptura, expectativas sobre o futuro e avaliação de probabilidades de acidentes e incidentes no barramento. Posto isso, gera-se o conceito de Segurança de Barragem (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2008).

A auscultação da barragem consiste em uma série de processos destinados a observar, detectar e caracterizar qualquer deterioração que represente um risco potencial à sua postura de segurança global (FONSECA, 2003). Ela também visa a comprovação de validade de hipóteses e de métodos de cálculo utilizados no projeto. Assim, é possível a verificação de necessidade da utilização de medidas corretivas (OLIVEIRA DOS SANTOS, 2018).

No final do século 19, piezômetros foram usados na Índia para estudar a infiltração nas fundações de barragens de irrigação em materiais aluvionares. Em 1907, engenheiros na Inglaterra usaram um instrumento semelhante para determinar o nível de água de um paramento homogêneo. A partir de 1917, foi aumentado o uso de piezômetros em barragens de terra nos Estados Unidos (SILVEIRA, 2006). A leitura do parâmetro gerado pelo piezômetro geralmente é executada utilizando-se um cabo graduado que possui um sensor elétrico em sua extremidade inferior, e um emissor luminoso ou sonoro em sua superfície (FONSECA, 2003).

Segundo Bretas (2020), carregamentos devido a ações gravitacionais, poropressão, sobrecargas acidentais ou mesmo alívios de tensões causados por escavações tendem a causar instabilização em taludes, sejam eles naturais ou não. Dessa forma, análises de estabilidade constituem parte importante no projeto de aterros, escavações, diques, pilhas, barragens. Na prática, os métodos de análise

determinísticos, baseados em equilíbrio-limite (bidimensionais), são os mais utilizados na avaliação da estabilidade de taludes em que a resistência ao cisalhamento requerida para se manter o equilíbrio é comparada com a resistência ao cisalhamento disponível do maciço. Mesmo com as vantagens comparativas das barragens de terra citadas anteriormente, análises de percolação e estabilidade para definição de níveis piezométricos toleráveis se fazem necessários. Tanto para evitar iminência ou ruptura destas estruturas, quanto para garantir segurança de trabalho para os colaboradores do empreendimento.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a definição de valores de controle para auscultação de seções críticas da Barragem M.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Realizar análises de percolação em condição normal;
- b) Definir fator de segurança de gradiente de saída;
- c) Analisar a estabilidade da barragem estudada em três cenários diferentes;
- d) Determinar valores de controle para piezômetros, a serem utilizados como referência na auscultação do paramento estudado;

1.1.2 Limitações

O trabalho aqui exposto não busca fazer análise de tensão-deformação, nem as possíveis patologias para essa situação. Ele se tornaria muito abrangente e extenso, de modo a ser inviável a sua execução em tempo hábil. Não busca analisar critérios de projeto, nem dispositivos de vazão, tampouco contato dispositivo-barragem. Embora cite a legislação pertinente, não objetiva realizar uma Inspeção de Segurança Regular, nem um Plano de Segurança de Barragem, embora apresente dados relevantes a partes desses documentos. O presente trabalho foca nas análises necessárias para a obtenção dos valores de controle de piezômetros. Deste modo, não avalia a estabilidade a montante, tampouco estabilidades de encostas no entorno.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

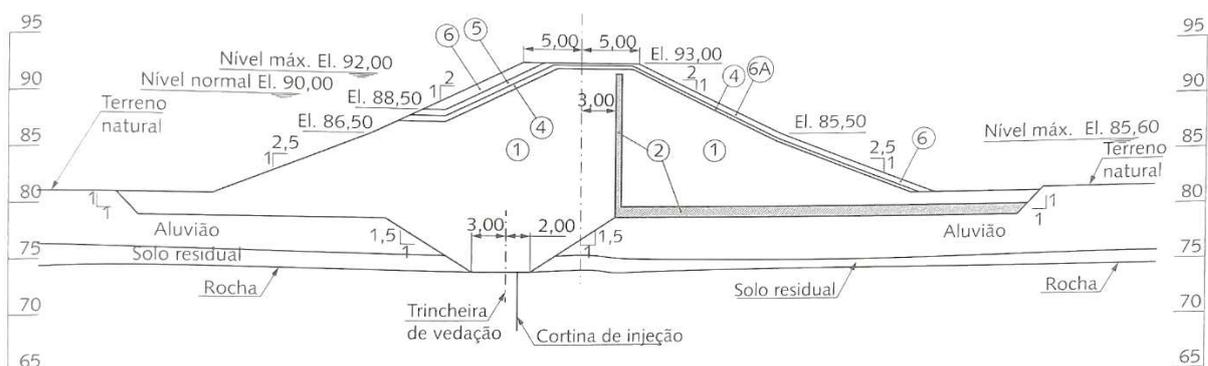
Para a construção e entendimento do presente trabalho, foram abordados os fundamentos teóricos neste capítulo. São revisadas as características de barramentos de terra, explicando sobre os meios utilizados para sua caracterização e a instrumentação utilizada, no presente estudo de caso. A segurança de barragens segundo a legislação brasileira também é tratada. Foram abordados os temas de estabilidade e percolação em paramentos e como foram calculados, pelo MEL (Método de Equilíbrio Limite) e MEF (Método de Elementos Finitos), respectivamente. Por fim, é levantado o método de definição de critérios de auscultação piezométrica.

2.1 BARRAGENS DE TERRA

Barragens de terra têm sido usadas para retenção e armazenamento de água para consumo, irrigação e movimento de rodas d'água. Continuam sendo, até hoje, o tipo mais comum, porque a construção envolve a utilização de materiais em seu estado natural e com um mínimo de processamento (PEREIRA, 2015). As barragens de terra possuem algumas vantagens quando comparadas às barragens de concreto, pois sua construção é viável em uma gama maior de fundações e topografia, e geralmente possuem um custo menor, visto que os materiais utilizados requerem um baixo processamento (MIRANDA, 2016).

Define-se que barragem de terra é um método convencional de construção de barramentos e é separada em dois tipos, homogênea quando há predominância de um único material, salvo estruturas como *rip-rap*, filtros, entre outros (Figura 2-1), ou zoneada quando há zoneamento de materiais terrosos em função de suas características de materiais e/ou permeabilidade (COSTA, 2012).

Figura 2-1 Barragem de Terra Homogênea



Fonte: PEREIRA (2015)

Em resumo, um barramento busca maciços razoavelmente homogêneos em cada zoneamento de mesmo material, de modo que a compactação em qualquer local, seja com características físicas dentro de intervalos projetados (SANDRONI; GUIDICINI, 2022).

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

O avanço técnico, bem como regulamentos e códigos de práticas mais rigorosos possibilitaram um acréscimo nos níveis de segurança. As estatísticas descrevem que a frequência de acidentes em barramentos, especificados em rupturas totais ou parciais, era de 10^{-4} por barragem-ano até 1950. Em 1995, passou para menos de 10^{-5} por barragem-ano. Atesta-se, desse modo, notável aumento de segurança. Todavia, ressalta-se que segurança de barragem não é uma grandeza definida categoricamente, uma vez que ela é sujeita a fatores, entre os quais intempéries, ações corretivas, danos e melhoramentos nas ciências de barragens (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2008).

A partir de 2010, com a implementação da Lei 12334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, foi reforçado o movimento para avaliação e reavaliação de segurança das barragens. Após sua publicação, com a delimitação de agências reguladoras com poder de fiscalização, foram publicadas diversas resoluções e procedimentos. Parte deles serão detalhados nos próximos itens.

2.2.1 Classificação da Barragem

Para a definição do escopo das barragens de armazenamento de que trata a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, são considerados a altura da barragem (maior ou igual a 15m), o volume do reservatório de armazenamento (não inferior a 3hm^3) e os associados dano potencial (médio ou alto) (BRASIL, 2010).

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 143, de 10 de julho de 2012 (BRASIL, 2012) estabelece critérios gerais para classificação de barragens por categoria de risco (CRI), dano potencial associado (DPA) e volume do reservatório, de acordo com o art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

2.2.1.1 Categoria de Risco (CRI)

Em conformidade ao art. 4º da resolução citada no parágrafo anterior, a classificação de barramento quanto à categoria de risco há de ser realizada de acordo

com aspectos da própria barragem que possam afetar a probabilidade de acidentes, levando em consideração os seguintes critérios gerais:

- "1) *Características técnicas:*
 - a) *Altura do barramento;*
 - b) *Comprimento do coroamento da barragem;*
 - c) *Tipo de barragem quanto ao material de construção;*
 - d) *Tipo de fundação da barragem;*
 - e) *Idade da barragem;*
 - f) *Tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro.*
- 2) *Estado de conservação da barragem:*
 - a) *Confiabilidade das estruturas extravasoras;*
 - b) *Confiabilidade das estruturas de captação;*
 - c) *Eclusa;*
 - d) *Percolação;*
 - e) *Deformações e recalques;*
 - f) *Deterioração dos taludes.*
- 3) *Plano de Segurança da Barragem:*
 - a) *Existência de documentação de projeto;*
 - b) *Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem;*
 - c) *Procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento;*
 - d) *Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;*
 - e) *Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação.*"(BRASIL, 2012)

O Quadro 2-1 apresenta adaptação do quadro de pontuação referente às características técnicas (CT) que deverão ser atribuídas a um empreendimento. O Quadro 2-2 sintetiza a avaliação no que tange ao Estado de Conservação (EC) do barramento. A terceira parte da avaliação da Categoria de Risco julga itens sobre o Plano de Segurança da Barragem (PS). O Quadro 2-3 mostra as pontuações designadas a cada situação. As adaptações em todas os quadros foram visuais, de modo a dinamizar o entendimento, não sendo alteradas em conteúdo.

Quadro 2-1 Características Técnicas da Barragem

1 - Características Técnicas							
Altura				Comprimento			
Altura ≤ 15m	15m < Altura < 30m	30m ≤ Altura ≤ 60m	Altura > 60m	Comprimento ≤ 200m		Comprimento > 200m	
0	1	2	3	2		3	
Tipo de barragem quanto ao material de construção			Tipo de fundação				
Concreto convencional	Alvenaria de pedra/ concreto ciclópico/ concreto rolado - CCR	Terra homogênea/ enrocamento/ terra enrocamento	Rocha sã	Rocha alterada dura com tratamento	Rocha alterada sem tratamento/rocha alterada fraturada com tratamento	Rocha alterada mole/ saprólito/ solo compacto	Solo residual/aluvião
1	2	3	1	2	3	4	5
Idade da barragem				Vazão de projeto			
entre 30 e 50 anos	entre 10 e 30 anos	entre 5 e 10 anos	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar	Milenar	TR = 500 anos	TR < 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável
1	2	3	4	3	5	8	10

Fonte: Adaptado de Brasil (2012).

Quadro 2-2 Estado de Conservação da Barragem

2 - Estado de Conservação			
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras			
Estruturas civis e hidroeletrômecânicas em pleno funcionamento/canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos	Estruturas civis e hidroeletrômecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência/canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos à estrutura vertente	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrômecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação/canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrômecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas/canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas
0	4	7	10
Confiabilidade das Estruturas de Adução			
Estruturas civis e dispositivos hidroeletrômecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrômecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrômecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas	
0	4	6	

2 - Estado de Conservação			
Percolação			
Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente
0	3	5	8
Deterioração dos Taludes/Paramentos			
Inexistente	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo	Erosões superficiais, ferrugem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança
0	1	5	7
Deformações e Recalques			
Inexistente	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança
0	1	5	8
Eclusa			
Não possui eclusa	Estruturas civis e hidroeletrônicas bem mantidas e funcionando	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e sem medidas corretivas
0	1	2	4

Fonte: Adaptado de Brasil (2012).

Quadro 2-3 Plano de Segurança da Barragem

3 - Plano de Segurança da Barragem								
Existência de documentação de projeto					Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem			
Projeto executivo e "como construído"	Projeto executivo ou "como construído"	Projeto básico	Anteprojeto ou Projeto conceitual	inexiste documentação de projeto	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem	Possui técnico responsável pela segurança da barragem	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem	
0	2	4	6	8	0	4	8	
Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento				Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem		Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação		
Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre	Não	Emite regularmente os relatórios	Emite os relatórios sem periodicidade	Não emite os relatórios
0	3	5	6	0	6	0	3	5

Fonte: Adaptado de Brasil (2012)

2.2.1.2 *Dano Potencial Associado (DPA)*

A Resolução nº 143 de 2012 do CNRH classifica quanto ao Dano Potencial Associado, junto das disposições da Resolução nº 121 de 2022 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (BRASIL, 2012, 2022). Deste modo, os fatores a serem considerados são volume total do reservatório, potencial de perdas de vidas humanas; impacto ambiental e impacto socioeconômico.

No que diz respeito a tentar sintetizar categorias de escalas de impacto relacionadas a pressuposta rotura, perda potencial de vidas humanas, impactos ambientais e socioeconômicos, a análise se volta à investigação da região a jusante do barramento, podendo se utilizar desde mapeamentos existentes até inspeções de campo. A avaliação do Dano Potencial Associado é delimitada pelas pontuações dispostas no Quadro 2-4, designadas a cada situação (adaptações visuais foram realizadas sem alteração de conteúdo).

Quadro 2-4 Dano Potencial Associado (DPA)

Dano Potencial Associado							
Volume Total do Reservatório				Potencial de perdas de vidas humanas			
Pequeno < = 5 milhões m ³	Médio 5 milhões a 75 milhões m ³	Grande 75 milhões a 200 milhões m ³	Muito Grande > 200 milhões m ³	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/ residentes ou temporárias/ transitando na área afetada a jusante da barragem)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)
1	2	3	5	0	4	8	12
Impacto ambiental				Impacto socioeconômico			
POUCO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais)	SIGNIFICATIVO (quando a área afetada incluir áreas de proteção de uso sustentável – APA, FLONA, RESEX, etc. – ou quando for área de interesse ambiental pouco descaracterizada)	MUITO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada incluir áreas de proteção integral – ESEC, PARNA, REBIO, inclusive Terras Indígenas – ou quando for de grande interesse ambiental em estado natural)	INEXISTENTE (Quando não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem)	BAIXO (quando existem de 1 a 5 instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou infraestrutura na área afetada da barragem)	MÉDIO (quando existem mais de 5 até 30 instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem)	ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias)	
1	2	5	0	1	3	8	

Fonte: Adaptado de Brasil (2012)

2.2.1.3 Classe da Barragem

O Anexo II da Resolução nº143 do CNRH, traz um quadro voltado para a determinação da CRI e do DPA por meio do somatório das pontuações previamente dispostas. Os dois itens são classificados entre alto médio ou baixo, seguindo as delimitações que são apresentadas no Quadro 2-5.

Quadro 2-5 Quadro para classificação das barragens de acumulação de água

QUADRO PARA CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA		
II.1 - CATEGORIA DE RISCO		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	> = 60 ou EC* > =8 (*)
	MÉDIO	35 a 60
	BAIXO	< = 35
(*) Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providencias imediatas pelo responsável da barragem.		
II.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		Pontos
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	> = 16
	MÉDIO	10 < DPA < 16
	BAIXO	< = 10
RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:		
	CATEGORIA DE RISCO	
	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	

Fonte: BRASIL (2012)

A partir de matriz de classificação disposta na Resolução ANA nº121 de 2022, adaptada no Quadro 2-6, utilizando-se dos resultados anteriores, é determinada a classe da barragem (BRASIL, 2022).

Quadro 2-6 Matriz de Classificação da Barragem

CATEGORIA DE RISCO (CRI)	DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	B	D
BAIXO	A	B	D

Fonte: BRASIL, 2022

Essa classificação é essencial para a gestão e fiscalização da barragem e auxilia a orientar os esforços de monitoramento, manutenção e segurança da estrutura.

2.2.2 Plano de Segurança de Barragem

O Plano de Segurança de Barragem (PSB) é uma estrutura abrangente que inclui vários volumes com diretrizes e procedimentos detalhados a serem seguidos. Sendo um instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens para o gerenciamento da segurança de barragens, possui um detalhamento mínimo de acordo com a Resolução nº236 de 2017 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (BRASIL, 2017).

Os volumes que devem constar no Plano de Segurança de Barragem (PSB) são seis, caso a barragem for de classe A ou B. Caso o paramento for classe C ou D, somente são necessários os 5 primeiros volumes. São eles (BRASIL, 2017, 2022) :

- 1) VOLUME I – de nome “Informações Gerais”, contém dados empresariais, características do empreendimento, características técnicas da estrutura, estrutura organizacional, aspectos do ambiente de instalação e classificação de barragens quanto às categorias de risco e danos potenciais associados.
- 2) VOLUME II – nomeado como “Documentação Técnica do Empreendimento”, apresenta a caracterização geotécnica do maciço, projetos executivos ou “Como Construídos” das fundações e estruturas associadas, manuais de equipamentos, licenças e outorgas (BRASIL, 2017, 2022).
- 3) VOLUME III – chamado de “Planos e Procedimentos”, dispõe de planos de operação, de manutenção e de monitoramento e instrumentação, e o planejamento das inspeções. O primeiro discorre sobre as características operacionais do empreendimento, levando em conta reservatório, órgãos

extravasores e órgãos de operação. As regras operacionais dos órgãos extravasores, do reservatório, o regime de operação e as medidas de proteção pública também não de estar dispostas. Por sua vez, o plano de manutenção contempla as datas e a periodicidade das visitas relacionadas ao ISR e define as atribuições de cada órgão envolvido, como as estruturas, instrumentos, saídas e reservatórios devem ser mantidos e planeja as inspeções a serem realizadas, incluindo ISR e ISE. Explicita que recursos são essenciais, itinerário e anomalias com possibilidade de ocorrência. O Plano de Monitoramento e Instrumentação gerencia e fornece informações sobre os recursos hídricos, bem como define as grandezas a serem monitoradas (BRASIL, 2017, 2022).

- 4) VOLUME IV – intitulado como “Registros e Controles”, fornece registros operacionais, como informações de nível do reservatório, vazões operadas nas tomadas d’água e operação do mecanismo de transbordo. Nele são relatadas ocorrências significativas sobre o comprometimento da segurança da barragem, quando existentes, registros de operação, manutenção; dados de monitoramento e instrumentação; resultados de testes de equipamentos hidráulicos, elétricos e mecânicos. O Volume IV concentra as ISR’s realizadas, servindo de arquivo para elas. Os comprovantes de execução das ações estabelecidas em Inspeções também não de ser armazenados (BRASIL, 2017, 2022).
- 5) VOLUME V – denominado “Revisão Periódica De Segurança da Barragem”, apresenta os resultados das inspeções especiais de segurança exigidas pela RPSB, bem como as últimas inspeções periódicas de segurança da barragem e suas estruturas associadas. Ela serve para avaliar sistematicamente todos os aspectos de projeto, construção, manutenção, operação e vigilância, bem como outros fatores que podem afetar a segurança de uma barragem (CANADÁ, 2011). A reavaliação do projeto existente, a análise conclusiva da estabilidade e segurança, e a atualização das séries e estudos hidrológicos da barragem são necessárias de acordo com os critérios de projeto aplicáveis à data de revisão. Requer a reavaliação dos procedimentos de operação, manutenção, testes, instrumentação e monitoramento e Plano de Ação de Emergência - PAE, se houver. Por fim, elabora-se recomendações de

melhorias a serem implementadas, incluindo estimativas de custos e planos de implementação, compilados em um sumário executivo (BRASIL, 2017, 2022).

- 6) VOLUME VI – “Plano de Ação de Emergência” (PAE) para barragens deve ser elaborado e implementado para garantir a segurança das pessoas e do meio ambiente em caso de acidentes ou situações de emergência. O documento traz dados de empreendedor e responsáveis pelo PAE, comprovações de entrega às autoridades competentes, seguido da caracterização geral do local do empreendimento, mencionando possíveis cenários emergenciais. Procedimentos de mitigação e prevenção são elaborados. Há também detalhamento de plano de comunicação, com detalhamento dos procedimentos de notificação (incluindo o Fluxograma de Notificação) e Sistema de Alerta, das estruturas extravasoras e instrumentação. O documento segue com os recursos disponíveis, citando mobilizáveis e integrais à presente barragem. A Definição do Nível de Resposta para ocorrências excepcionais ou circunstâncias anômalas é encontrada em quadros e descrições. As ZAS's (Zonas de Auto Salvamento) são definidas e expostas, bem como as responsabilidades, planejamento de rotas de fuga, pontos de encontro, e treinamentos (BRASIL, 2017, 2022).

2.2.3 Plano de Monitoramento e Instrumentação

O Plano de Monitoramento e Instrumentação visa a medição de grandezas relevantes à segurança da barragem, como poropressões, deformações, percolação e surgências, levando em conta as especificidades do empreendimento. Elaborado inicialmente na fase de Projeto, há de ser adaptado e revisto nas fases posteriores (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016a).

O processo de monitorar e controlar a segurança e o desempenho das estruturas envolve definir as grandezas a serem monitoradas, especificar os instrumentos adequados, garantir a instalação adequada, selecionar equipamentos para leitura e transmissão de dados, determinar a frequência das leituras e desenvolver metodologias para processamento de dados e conservação dos instrumentos. Para barragens de Terra, as grandezas de maior relevância e sensibilidade são pressões neutras no aterro (poropressões), recalques do aterro,

subpressões na fundação, vazões de percolação, pressões totais e poropressões nas interfaces, e materiais sólidos carregados pelas águas de percolação (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016a). Das seis grandezas descritas anteriormente, metade é medida por meio de piezometria, assim demonstrando a pertinência do correto dimensionamento, instalação, medição e definição de critérios de auscultação piezométrica.

2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A caracterização técnica dos diferentes tipos de materiais utilizados em todo maciço deve ser efetuada por meio de ensaios *in situ* (densidade natural e umidade natural), ensaios granulométricos, determinação dos limites de consistência e densidade real das partículas, como também caracterização laboratorial e testes de compactação de amostras. Esses ensaios são voltados à determinação das características dos solos locais, como sua variabilidade e distribuição ao longo dos depósitos e, conseqüentemente, realiza-se o zoneamento do sedimento em certa parcela considerada homogênea (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016b).

O Quadro 2-7, a seguir, apresenta os principais ensaios para a caracterização de materiais para a construção de aterros, bem como as normas.

Quadro 2-7 Tipos de ensaio de caracterização aplicados em barragens

Tipo de ensaio	Objetivo
Umidade Natural	Umidade é a diferença entre o peso úmido e o peso seco do solo "in situ", sendo o teor de umidade o quociente, expresso em percentagem, da umidade do solo pelo seu peso seco (ABNT NBR 6457)
Densidade Natural	Peso total do solo (P) dividido pelo seu volume total (V). O ensaio mais comum para determinação do peso específico natural do solo "in situ" é o método do cilindro de cravação (ABNT NBR 09813)
Granulometria por peneiramento e sedimentação	Diâmetros das diversas partículas existentes no solo (ABNT NBR 7181)
Limites de consistência	Teores em umidade para os quais a consistência do solo muda de um estado para o outro
Limite de plasticidade	Teor em umidade a partir do qual um solo passa a exibir plasticidade (ABNT NBR 7180)
Limite de liquidez	Teor em umidade acima do qual o solo perde as características de plasticidade, passando a comportar-se como um fluido viscoso (ABNT NBR 6459)

Tipo de ensaio	Objetivo
Peso específico real dos grãos	Relação entre o peso e o volume de uma partícula individual de solo (ABNT NBR 6508)
Ensaio de Compactação	Determinação da umidade ótima do solo, para uma dada energia de compactação, e do peso específico aparente seco máximo associada à umidade ótima (ABNT NBR 7182)
Ensaio de Permeabilidade	Obtenção do coeficiente de permeabilidade de uma amostra de solo (podem ser realizados em permeâmetro de carga variável, em células de adensamento edométrico ou em câmaras triaxiais, sendo estes últimos os mais fiáveis)
Cisalhamento direto	Determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (coesão e ângulo de atrito)
Compressão triaxial	Determinar os parâmetros de resistência e de deformabilidade do solo. Dependendo das condições de drenagem, seja na fase de adensamento sob a tensão confinante, seja na fase de aplicação da tensão desviadora, o ensaio pode ser classificado como: <ul style="list-style-type: none"> • Adensado drenado (CD) • Adensado não drenado, com ou sem medição de poropressões, e saturados, ou não (CU ou CUsat) • Não adensado não drenado, com medição ou não de poropressões (UU)

Fonte: Agência Nacional de Águas, 2016b

2.4 PERCOLAÇÃO EM ATERROS

Sandroni e Guidicini (2022) afirmam que as barragens não são obras destinadas a impedir totalmente a passagem de água quer por suas fundações, quer pelos aterros. Desse modo, a percolação de certa quantidade de água é inevitável e, até certo ponto, desejável. Isso se deve à necessidade de dissipação de pressões na fundação e no barramento.

Cruz (1996) sustenta que a arte de projetar uma barragem está ligada à habilidade de controle de fluxo de água pelo conjunto barragem-fundação. A estabilidade externa e interna deve atender aos requisitos básicos de segurança, bem como estabelecidos em função do tipo de obra e das diversas condições de carregamento.

A avaliação da condição segura de uma barragem de terra depende em grande parcela do conhecimento da magnitude e evolução das pressões intersticiais geradas na massa compactada de solo do barramento e de sua fundação. Aplica-se essa lógica durante as fases de construção e operação da barragem, ainda que ocorra redução abrupta do nível de água do reservatório. São três os principais geradores de

pressões intersticiais: acréscimo de tensões devido à construção do maciço; posterior consolidação do material da barragem; e fluxo estabelecido induzido pelo próprio alteamento que está sendo construído (FONSECA, 2003).

Além do anteposto, o que se propõe é verificar se a percolação conduz ao risco de integridade do aterro ou da fundação. A ameaça que pode vir a se realizar é o carreamento de partículas sólidas devido ao fluxo de água. Ele pode acontecer tanto internamente no corpo da barragem, causando a colmatação de elementos drenantes ou instrumentos de auscultação, quanto de uma região a outra – barragem a fundação ou vice-versa – com a formação de espaços vazios, ou de “tubos” de percolação (em inglês, *pipe*), gerando um fluxo descontrolado – fenômeno conhecido por *piping*, que causou inúmeros rompimentos ao longo da história (SANDRONI; GUIDICINI, 2022).

Pereira (2015) define o princípio do controle do fluxo como princípio básico de projeto a ser obedecido. Ele indica que, com relação ao eixo, pelo lado de montante, todo esforço deve ser concentrado no sentido de vedar ao máximo a barragem e sua fundação. Pelo lado de jusante, deve-se facilitar ao máximo a saída da água, introduzindo todos os sistemas de drenagem necessários na barragem e na fundação.

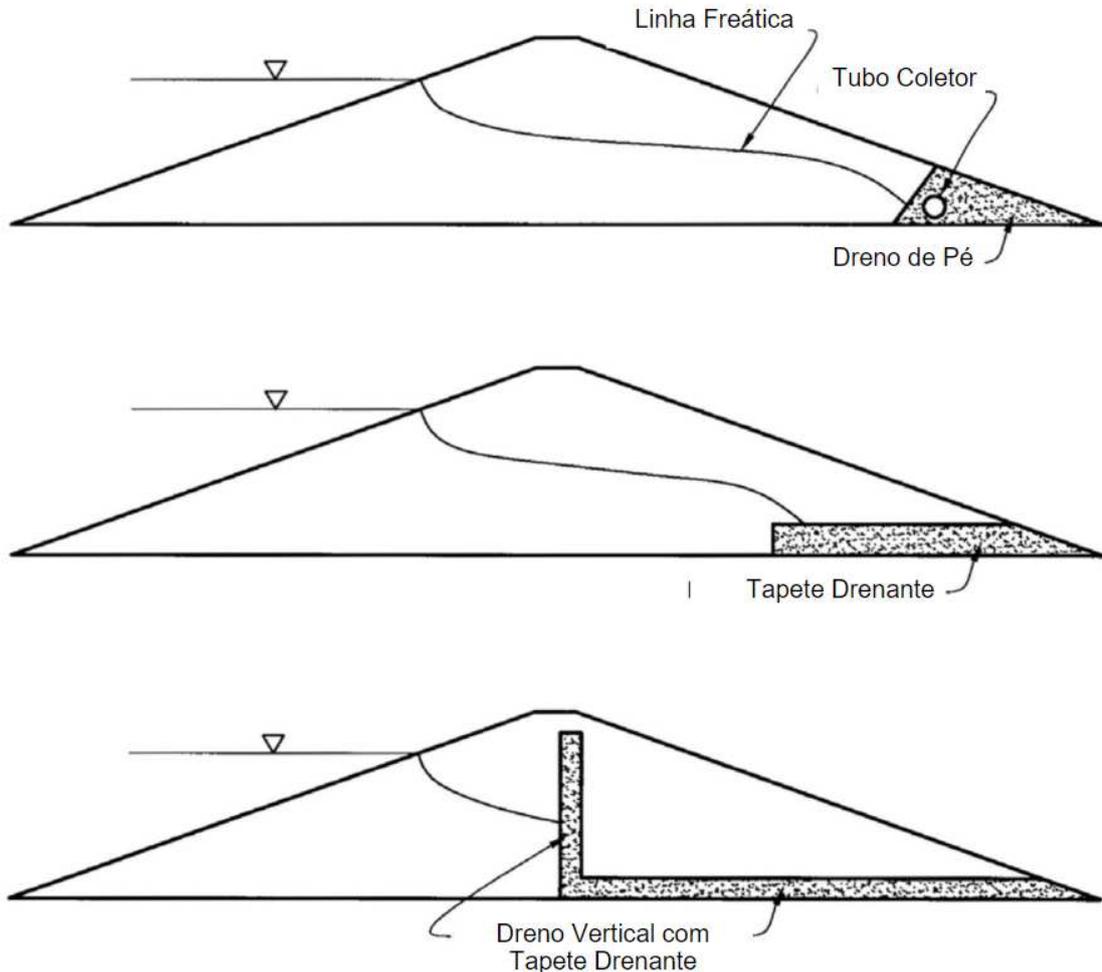
2.4.1 Sistema de Drenagem Interna

À medida que a água começa a percolar pela barragem, ela se acumula no ponto de saída, fazendo com que o gradiente hidráulico (∇u) se intensifique. Além disso, a água amolece o aterro, tornando-o mais suscetível à erosão. Mesmo que a massa de terra esteja completamente compactada e uniforme, ela ainda pode desenvolver rachaduras ou fissuras. Essas rachaduras servem como caminhos preferenciais de percolação para a água, que pode então fluir com maior capacidade de carga. O material que reveste a parede da rachadura é deixado sem suporte, e mesmo o solo coeso pode se tornar vulnerável a arraste e "amolecimento" sob essas condições (SANDRONI; GUIDICINI, 2022). Desse modo, utiliza-se de elementos drenantes internos para a prevenção dos problemas antepostos.

Normalmente, os componentes de drenagem das barragens consistem em materiais granulares, como areia e cascalho, que não contenham partículas finas. A permeabilidade destes materiais é determinada pelo seu tamanho de grão, bem como pela sua densidade. A Figura 2-2 apresenta os principais tipos de dispositivos de drenagem interna, sendo dreno de pé, disposto na parte inferior da face de jusante,

filtro vertical, que divide o espaldar de montante e jusante, e o tapete drenante, situado na parte inferior do espaldar de jusante.

Figura 2-2 Dispositivos de Drenagem Interna



Fonte: MIRANDA, 2016

2.5 AUSCULTAÇÃO

A auscultação pode ser realizada por meio de inspeções visuais – que resulta numa avaliação qualitativa, praticada através de vistorias periódicas de campo – e por meio de instrumentação – por meio produção, registro e processamento de informações obtidas com o uso de instrumentação instalados no corpo do paramento ou nas suas fundações (FONSECA, 2003). A instrumentação hidrogeotécnica não só garante o controle de segurança da obra, como também possibilita a verificação de hipóteses, critérios e parâmetros utilizados no projeto, permitindo a adaptação de métodos construtivos que garantam condições mais econômicas mantendo a segurança da obra (OLIVEIRA DOS SANTOS, 2018).

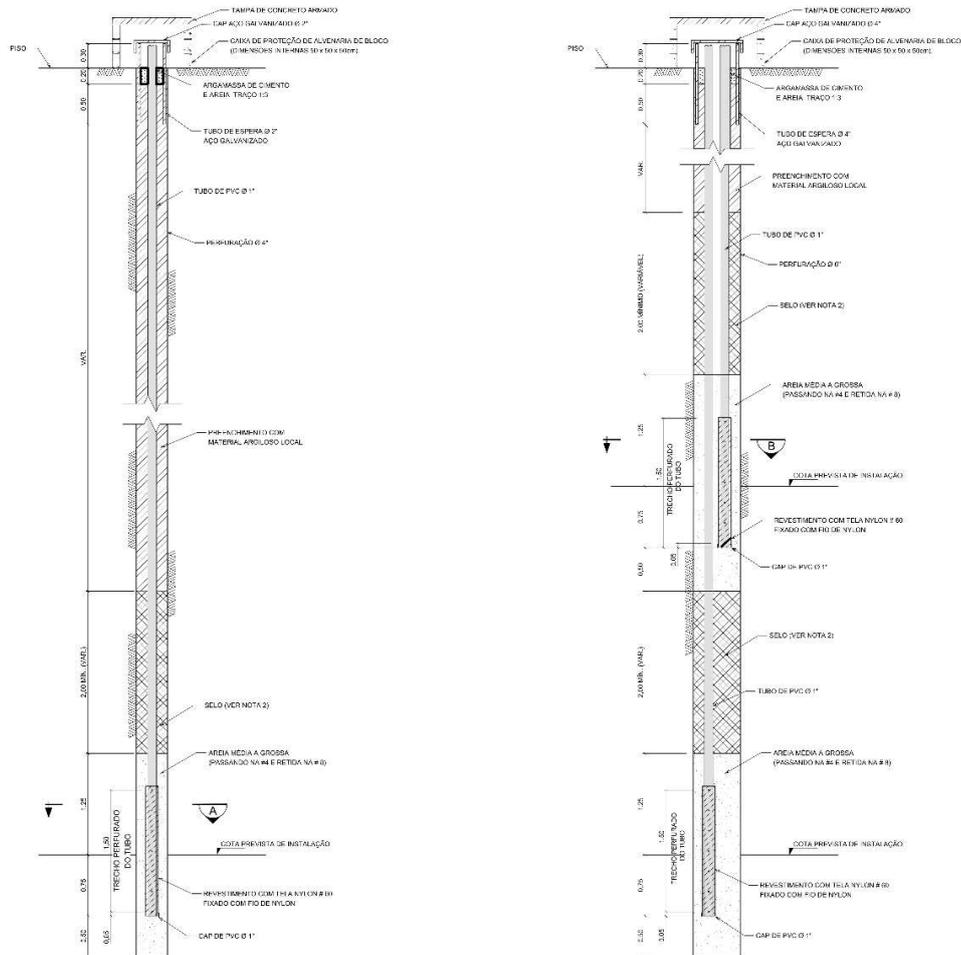
A utilização de instrumentação se justifica apenas na previsão das magnitudes das medições e dos valores considerados normais ou alarmantes para tais magnitudes. O projetista deve ser o preferencial a conduzir a análise da instrumentação, pois possui o conhecimento mais amplo das hipóteses formuladas no projeto (CRUZ, 1996).

2.5.1 Piezometria

A carga piezométrica representa a pressão dos poros ou pressão neutra em um ponto específico dentro de uma barragem que experimenta fluxo interno ou percolação de água. Este valor é determinado pelas condições de limite ou fluxo do maciço ou fundação da estrutura. Pode indicar vários cenários, incluindo fluxo estabelecido, redução repentina do nível do reservatório ou condições anormais decorrentes de deformações de cisalhamento (CRUZ, 1996).

Os piezômetros são os instrumentos utilizados para medir a carga piezométrica precisamente. São aplicados em barragem com maior frequência: piezômetro de tubo aberto (Casagrande), piezômetro pneumático, piezômetro hidráulico, piezômetro elétrico de resistência e piezômetro elétrico de corda vibrante (CRUZ, 1996). Na Figura 2-3 apresenta-se tipos de piezômetro de tubo aberto. Neste equipamento, a água dos poros passa através do filtro do bulbo drenante do instrumento (parte inferior) até atingir o equilíbrio com a poropressão da fundação. A poropressão corresponde, então, à pressão equivalente à altura de coluna de água medida pelo bulbo do instrumento em comparação ao seu ponto de instalação. Por outro lado, o nível freático é a superfície superior de um corpo de água subterrânea a uma pressão equivalente à pressão atmosférica (SILVEIRA, 2006).

Figura 2-3 Piezômetro Casagrande simples e duplo



Fonte: Projeto Executivo Barragem M.

2.6 MÉTODOS DE ANÁLISE

Um modelo é uma representação abstrata de um problema do mundo real que envolve teorização, adoção de hipóteses e simplificações com o objetivo de permitir uma representação "tratável" enquanto ainda mantém o máximo de fidelidade possível à realidade (STRUFALDI, 2004).

Modelos matemáticos utilizados na análise possuem natureza não diversificada, de modo que modelos diferentes têm de ser usados para análise de fenômenos diferentes. Assim, eles descrevem o comportamento de respostas parciais do barramento a variações de influências externas. Antes da definição do modelo numérico utilizado, deve-se atentar à capacidade de análise do fenômeno a ser estudado atribuída a ele, bem como a fase de análise. Realmente, o mesmo modelo quando avaliando determinado fenômeno pode ter diferentes níveis de confiabilidade

quando em fases distintas ao longo da vida útil do barramento (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2008).

2.6.1 Elementos Finitos e Percolação

A permeabilidade de um meio pode ser pensada como a facilidade que ele fornece para o fluido passar por seus poros ou vazios. Assim, quanto maior a permeabilidade, mais fácil será o deslocamento de um fluido no meio que o contém (CRUZ, 1996).

Normalmente, as análises de percolação se enquadram na categoria de análises não associadas, o que significa que não envolvem a consideração de fatores tensão-deformação, como adensamento, compactação do material ou alterações nas características de permeabilidade. Dependendo do problema específico em questão, pode ser necessário realizar análises de regime permanente ou de regime transitório (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2008).

Strufaldi (2004) faz a constituição de um modelo numérico para análise de percolação. Ela combina a Lei de Darcy com os princípios fundamentais de conservação de energia e massa, chegando à Equação de Laplace, que serve como a teoria escolhida para elucidar esse fenômeno junto com as equações correspondentes. Para resolver a equação de Laplace, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado como um procedimento numérico de escolha. E a análise de percolação envolve a seleção de seções transversais apropriadas com os materiais, a geometria e os materiais usados e especificando as condições iniciais e de contorno.

Segundo a Lei de Darcy:

$$Q = k \cdot (\nabla u) \quad (1)$$

- k coeficiente de permeabilidade
- Q vazão percolada
- u pressão no fluido

A partir de (1), utiliza-se a equação de Laplace, simplificada para situação bidimensional, considerando um fluxo permanente, para se determinar o fluxo d'água (MARANGON, 2018):

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

- k_j permeabilidade na direção j

- h carga hidráulica total

A solução da equação (2), estando os eixos coordenados orientados segundo as direções principais de permeabilidade, pode ser representada por duas famílias de curvas que se interceptam com ângulo reto, formando a chamada rede de fluxo (STRUFALDI, 2004).

Com essas equações, utiliza-se o MEF com a seguinte formulação:

$$T(h).h = q \quad (3)$$

- T Matriz de transmissibilidade
- q_i Fluxo modal no nó i
- h Carga hidráulica

Assim, deve-se elaborar o modelo da seção no programa escolhido, com materiais geometria e condições de contorno, e processá-lo segundo as equações previamente dispostas. Depois, não de ser interpretados os resultados, bem como comentados os pontos relevantes (STRUFALDI, 2004).

Pelo Índice de Confiabilidade (IC), o Método de Elementos Finitos (MEF) para análise de percolação do corpo da barragem pode ser utilizado com confiança como modelo numérico, tendo a melhor pontuação possível: 1. A escala de avaliação parte de 1 (mais confiável) até 4 (não pode ser analisado). Todavia, apresenta a ressalva de que uma maior complexidade de estudo deve ser atribuída às análises realizadas para período de enchimento do reservatório. Quanto à avaliação da fundação, devido às dificuldades com definição de distribuição da permeabilidade, bem como fraturamentos e juntas, nessa situação o MEF recebe pontuação de 2 na mesma escala (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2008).

2.6.2 Gradiente de Saída e *Piping*

A principal causa do *piping* são os altos gradientes hidráulicos (percolação) na fundação ou maciço. Harza (1935) *apud* Das (2012) afirma que a segurança das estruturas hidráulicas em relação à erosão interna (*piping*) pode ser expressa como:

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{saída}} \quad (4)$$

no qual,

- $i_{saída}$ gradiente de saída
- i_{cr} gradiente crítico
- FS Fator de Segurança

Sendo o $i_{saída}$ a perda de carga entre dois pontos, ou também a inclinação da linha freática, e i_{cr} como:

$$i_{cr} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (5)$$

no qual,

- γ_{sat} peso específico saturado
- γ_w peso específico água

Ainda segundo Harza (1935) *apud* Das (2012), $FS \geq 3$ configura um comportamento adequado, logo:

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{saída}} \geq 3 \quad (6)$$

2.6.3 Equilíbrio Limite e Estabilidade

Pereira (2015) estipula o princípio da estabilidade como princípio básico de projeto a ser cumprido. Ele baliza que os espaldares da barragem devem ter características de resistência que garantam a estabilidade dos taludes. Essas características têm que ser compatibilizadas com os materiais de fundação, a fim de garantir a estabilidade do conjunto barragem-fundação para as várias condições de carregamento.

Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (2008) o Método de Equilíbrio Limite (MEL) com o solo modelado como um meio rígido (idealmente plástico) é geralmente utilizado para análise de estabilidade global de paramentos. Esses métodos oferecem informações sobre a diferença entre os estados de tensão presentes durante a fase operacional e aqueles condizentes a mecanismos de falha hipotéticos. Neste caso o comportamento de uma estrutura não pode ser utilizado para avaliação, os profissionais da área contam com fatores de segurança para vários mecanismos de falha a adequação.

Para garantir a estabilidade do maciço de terra e do enrocamento, é necessário avaliar os fatores de segurança para diferentes casos de análise. É importante observar que a análise de estabilidade durante condições normais de operação com percolação em regime permanente deve ser abordada com mais cautela do que a análise realizada no final da construção. O nível de cautela na adoção de hipóteses de análise, principalmente em relação aos parâmetros de resistência e pressão neutra, pode interferir significativamente nas medidas de segurança implementadas

(ELETROBRÁS, 2003). No Quadro 2-8 estão dispostos os coeficientes de segurança a serem utilizados em cada caso de ciclo de vida de barramentos.

Quadro 2-8 Coeficientes de Segurança para Estabilidade de Barragens

Caso	Coeficiente de Segurança
Final de Construção	1,3 [1]
Rebaixamento rápido	1,1 a 1,3 [2]
Percolação Estável	1,5
Análise Sísmica	1,0

Fonte: Adaptado de U.S. Corps Of Engineer *apud* Eletrobrás (2003)

[1] Barragens de 15 m de altura ou mais sobre fundações fracas, usar fator de segurança mínimo de 1,4.

[2] Nos casos em que o rebaixamento ocorre com frequência, considerar o coeficiente 1,3.

Para estabilidade de barragens, o modelo bidimensional geralmente resulta em resultados satisfatórios. Isso porque os mecanismos por trás das rupturas podem se desenvolver ao longo de várias superfícies, sejam elas circulares ou de natureza mais complexa. Para avaliar a estabilidade das barragens de aterro usando as técnicas mencionadas, é necessário examinar a distribuição das pressões intersticiais ao longo do aterro (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2008).

Existem vários métodos de análise disponíveis utilizando a técnica de fatias, com suposições variadas sobre as tensões entre elas. O grau de cumprimento das condições de equilíbrio para forças e momentos verticais e horizontais difere de acordo com a hipótese particular adotada por cada método. Ao selecionar um método para análise, é importante considerar as características da superfície de ruptura em estudo (ELETROBRÁS, 2003).

Para garantir a estabilidade em cada seção, três condições de equilíbrio devem ser atendidas: (1) as forças verticais devem estar em equilíbrio, (2) as forças horizontais devem estar em equilíbrio e (3) os momentos devem estar em equilíbrio. Certas técnicas satisfazem todas as três condições de equilíbrio estático, enquanto outras satisfazem apenas algumas, como o "Método Ordinário de Fatias" e o Bishop simplificado. Por outro lado, o método de Spencer e o método de Morgenstern-Price satisfazem todas as condições de equilíbrio e são, portanto, referidos como métodos rigorosos. Spencer é também um método preciso e aplicável a virtualmente todas as geometrias e perfis do terreno, e o mais simples de equilíbrio completo (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014 *apud* BRETAS, 2020). Portanto, definiu-se o método de Spencer como o utilizado para a análise do trabalho.

A representação da força de interação pode ser feita sintetizando Q através do mesmo ponto de aplicação da força normal N, ou seja, no ponto base da fatia, com inclinação constante θ inicialmente desconhecida (SILVA, 2013):

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot \Delta l}{FS} + \frac{\tan \phi' \cdot (W \cdot \cos \alpha - U \Delta l)}{FS} - W \sin \alpha}{\cos(\theta - \alpha) \cdot \left[1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan(\theta - \alpha)}{FS} \right]} \quad (7)$$

Sendo:

- c' coesão [kPa];
- Δl largura da base da fatia [m];
- FS fator de segurança;
- θ inclinação da resultante das forças de interação [°];
- ϕ' ângulo de atrito do solo [°];
- W peso próprio da fatia [kN];
- α inclinação da base de uma fatia [°];
- U resultante da pressão da água nos poros na base da fatia [kN/m];

Para chegar à solução final, deve-se navegar por vários valores de θ e, para cada valor, calcular tanto o fator de segurança para o equilíbrio de forças (FSf) quanto o fator de segurança de equilíbrio de momentos (FSm). Portanto, o FS de Spencer é representado pela interseção das duas curvas (a de FSm e de FSf), quando a função das forças de interação é constante (SILVA, 2013).

Pelo Índice de Confiabilidade (IC), o MEL, para análise de estabilidade do corpo da barragem, em todas as fases do empreendimento, pode ser utilizado com confiança como modelo numérico, tendo a melhor pontuação possível: 1. A escala de avaliação parte de 1 (mais confiável) até 4 (não pode ser analisado). Para a análise de estabilidade de fundação, em todas as fases ele também é muito indicado. Porém, devido às dificuldades com definição de parâmetros da fundação, interação aterro-fundação e condições geológico-geotécnicas insidiosas, na avaliação da fundação o MEL recebe pontuação de 2 na mesma escala (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2008).

2.6.4 Definição de Critérios de Auscultação Piezométrica

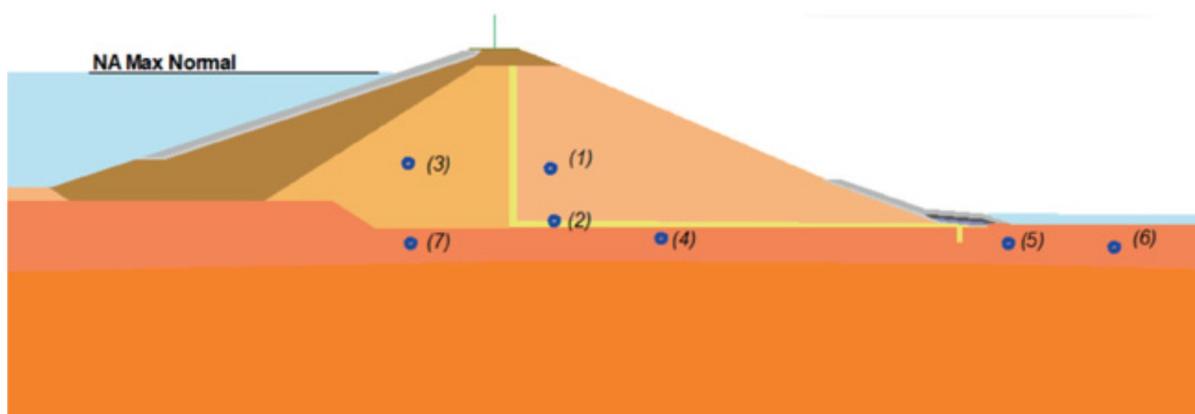
É necessário reanalisar as condições de estabilidade para garantir um fator de segurança nas verdadeiras condições piezométricas apresentadas pela estrutura.

Dessa forma, podem ser verificados alguns critérios para serem utilizados para calcular o valor de controle do piezômetro. Existem alguns métodos para definição desses parâmetros, como os realizados por Fusaro (2007) e Heuko (2014). Eles utilizam de análises estatísticas dos níveis piezométricos medidos junto da avaliação de estabilidade da barragem. Ou seja, baseiam seus modelos em bancos de dados extensos de barragens em condição de operação. Para barramentos ainda em construção, pode haver níveis piezométricos medidos, mas eles não refletem a condição de operação da barragem, não sendo representativos para definição de parâmetros de controle.

Assim, buscou-se métodos que não se utilizassem de análise estatística. O mais recente método encontrado em literatura brasileira é de Ferreira (2022), publicado na Revista Brasileira de Engenharia de Barragens, que segue:

Os parâmetros usados para definir os valores de controle para esses instrumentos são altamente específicos e variam conforme sua localização no barramento e da natureza do fenômeno que está sendo observado. Por exemplo, tratando-se dos piezômetros localizados no talude de jusante e/ou a jusante do filtro vertical (ambos indicados como ponto 1 e 2 na Figura 2-4) os Valores de Controle - que são classificados como atenção, alerta e emergência - podem ser estabelecidos considerando o funcionamento do filtro horizontal sob carga até atingir o fator de segurança necessário para evitar a ruptura total (FERREIRA, 2022). Os valores de fator de segurança estão dispostos na Quadro 2-9, para os casos em que a barragem possui filtro. Esse quadro foi adaptado, de modo a demonstrar o gradiente hidráulico também definido por Ferreira (2022) para cada valor de controle.

Figura 2-4 Exemplo de locação de piezômetros em barragem de aterro homogêneo



Fonte: FERREIRA, 2022

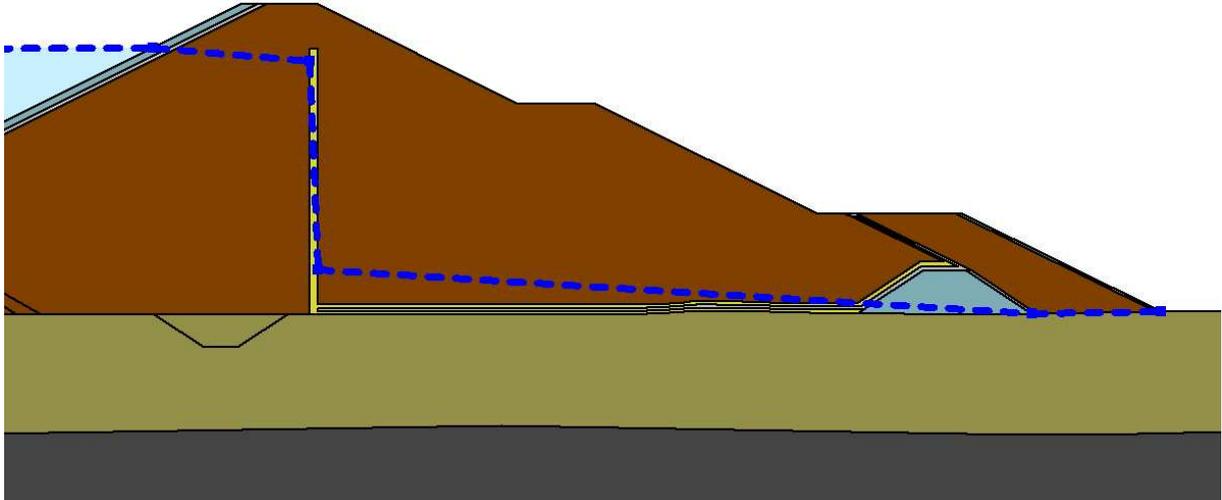
Nos casos em que os níveis piezométricos não representam risco a ponto de baixar o fator de segurança a menos de $FS = 1,50$, uma outra abordagem é relacionar os valores de controle aos gradientes hidráulicos e à capacidade de fluxo dos mecanismos internos de drenagem do paramento. O filtro vertical e o horizontal dentro do sistema de drenagem interna são dimensionados de acordo com um fator de ampliação de vazão igual a 10. Caso o lençol freático ultrapasse o limite do tapete drenante, é sinal de que o dispositivo começou a operar sob carga, o que é típico na prática da engenharia quando sob uma pequena inclinação, de aproximadamente 5%. Da extremidade a montante do filtro horizontal, pode-se supor que o dispositivo sai do estado normal e entra no estado de atenção porque está operando fora do limite de projeto (vazão) (FERREIRA, 2022). Desse modo, estipula-se como critério a condição de filtro operando em carga com gradiente hidráulico, disposto no Quadro 2-9 a seguir. A Figura 2-5, a Figura 2-6 e a Figura 2-7 apresentam as situações de Filtro operando em carga com gradiente hidráulico para cada Valor de Controle.

Quadro 2-9 FS e Gradiente hidráulico de filtro horizontal operando em cargas

Valor de controle	Fator de segurança	Observações	Gradiente hidráulico de filtro operando em carga
Atenção	1,5	Considera-se que se o fator de segurança está abaixo de 1,5 ele passa a operar numa condição atípica que merece monitoramento	5%
Alerta	1,4	Considera-se que se o fator de segurança está abaixo de 1,4 a condição atípica está se agravando e pode representar riscos à segurança, sendo necessário cuidados para manutenção da segurança	15%
Emergência	1,3	Considera-se que se o fator de segurança está abaixo de 1,3 ele passa a operar numa condição crítica apresentando riscos a ruptura da barragem	20%

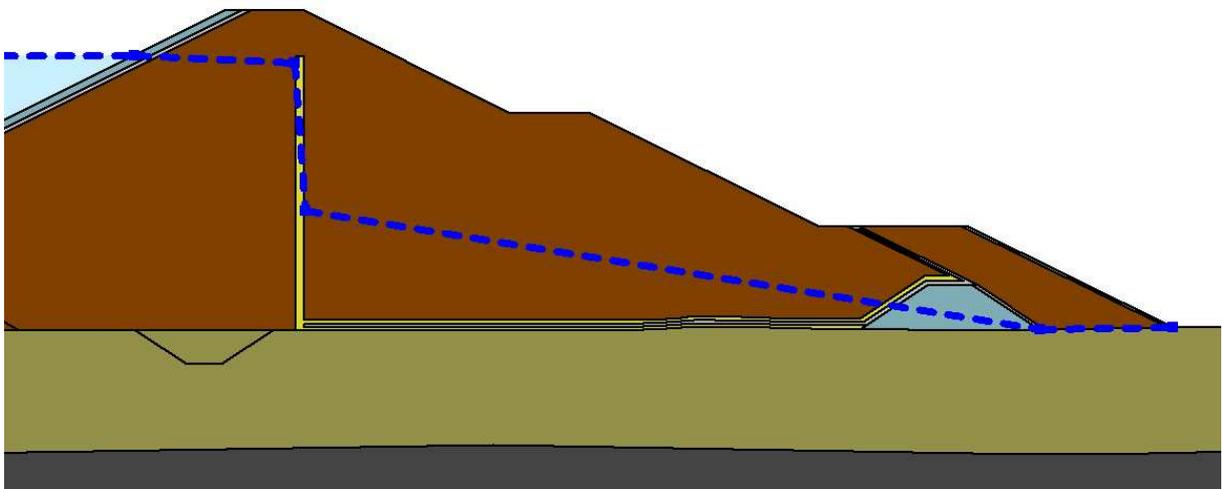
Fonte: Adaptado de Ferreira (2022)

Figura 2-5 Filtro operando em carga com gradiente hidráulico de 5% - Atenção



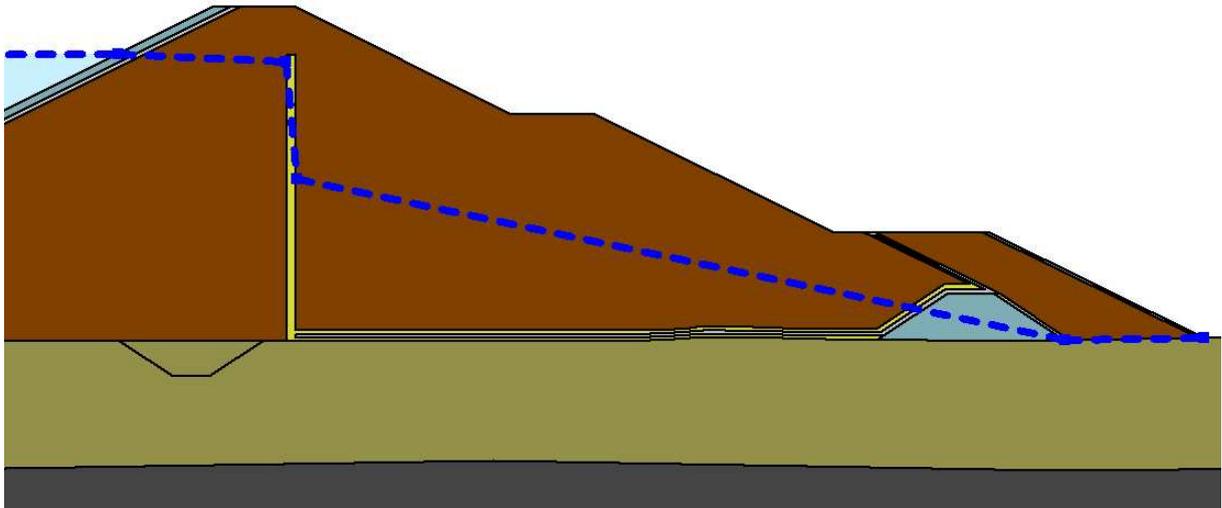
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

Figura 2-6 Filtro operando em carga com gradiente hidráulico de 15% - Alerta



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

Figura 2-7 Filtro operando em carga com gradiente hidráulico de 20% - Emergência



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

Para barragens que requerem drenagem interna com a aplicação de um dreno de pé, é crucial verificar os valores de controle dos piezômetros localizados a montante e a jusante do dreno (consulte o ponto 5 na Figura 2-4). A verificação também deve considerar o gradiente crítico para fundação da estrutura (conforme explicitado nos parágrafos anteriores) e gradientes de fluxo de saída para atingir um fator de segurança contra *piping* de $FS=3,0$ para valores de atenção e $FS=2,0$ para valores de alerta (FERREIRA, 2022).

Os piezômetros situados a jusante da barragem e dentro da faixa de influência da estrutura, instalados em terreno natural, no qual o nível piezométrico não causa interferência na análise de estabilidade do barramento (conforme ponto 6 da Figura 2-4), só podem ser utilizados para apresentar referência de valores através do tratamento estatístico das medições. Assim, se diferente do estimado pela vida do barramento, está ocorrendo alguma anormalidade na barragem, mas não necessariamente ligada à sua estabilidade (FERREIRA, 2022).

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A seguir, na Figura 3-1, é apresentado o Diagrama do procedimento metodológico, o qual é separado em treze subitens e segue a ordem de fatores disposta.

Figura 3-1 Diagrama do Procedimento Metodológico



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software diagrams.net

3.1 MOTIVAÇÃO

A Lei 12334/2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010) motiva o presente trabalho. Junto da Resolução nº 143 de 2012 do CNRH e das disposições da Resolução nº 121 de 2022 da ANA (BRASIL, 2012, 2022), definem classificações quanto à Categoria de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA) do barramento. Os resultados são dispostos numa Matriz de Classificação, que geram a classe da barragem.

A partir dessa classe, são definidos os elementos mínimos constantes num Plano de Segurança de Barragens (PSB). Assim, definiu-se o CRI, o DPA e a Classe da barragem, considerando as características do estudo de caso. Na exposição dos itens obrigatórios ao PSB, ressalta-se o Volume III – Planos e Procedimentos. Dentro dele é determinada a necessidade de elaboração de planos de operação, de manutenção, de monitoramento e instrumentação, e de inspeções. O Plano de

monitoramento e instrumentação é realizado principalmente para a mensuração de grandezas pertinentes à segurança da barragem. Deste modo, o presente trabalho supriu parte significativa de um Plano de Monitoramento e Instrumentação, ao passo que objetivou a determinação de parâmetros de auscultação piezométrica. Os dados poderiam ser utilizados na análise das medições piezométricas a serem realizadas periodicamente pelos responsáveis pela barragem, reforçando a segurança do barramento.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho foi desenvolvido inicialmente por meio de revisão bibliográfica de modo a apontar a legislação vigente – motivadora do presente trabalho –, os principais modelos teóricos, os métodos utilizados e as abordagens adotadas por autores. O objetivo é embasar o procedimento metodológico escolhido para o trabalho em questão.

Ainda na Revisão Bibliográfica, dissertou-se sobre os principais ensaios de caracterização dos materiais empregados nos barramentos. Sobre percolação em aterros, foi delimitado que a verificação de risco de integridade por percolação deve ser feita para que se evite patologias como *piping*. Foram definidos os principais dispositivos de drenagem interna, bem como as maneiras de auscultação e o instrumento do estudo de caso: o piezômetro. Assim, determinou-se quatro análises e modelos matemáticos de modo a abranger a análise de percolação por Método de Elementos Finitos, a avaliação da relação do gradiente hidráulico com a formação de *piping* em condição normal do barramento, a análise da estabilidade por Método de Equilíbrio Limite e a definição da parâmetros de auscultação piezométrica.

3.3 APRESENTAÇÃO DA BARRAGEM

Este item fornece uma descrição geral do empreendimento, cujo conteúdo mínimo a ser abordado remonta o necessário para as análises. Devido à anonimização dos dados, não será utilizado o nome real do barramento, de modo a ser chamado somente de Barragem M. Todas as informações deste subcapítulo foram obtidas do Projeto Executivo da Barragem M ou de seu Plano de Segurança de Barragem, enquanto as demais informações foram referenciadas de acordo com os dados dispostos na literatura consultada.

3.3.1 Classe da Barragem

A seguir nas Quadro 3-1, Quadro 3-2, Quadro 3-3, Quadro 3-4, Quadro 3-5 e Quadro 3-6, faz-se a classificação do barramento nos padrões dispostos no subitem 2.2.1 Classificação da Barragem.

Quadro 3-1 Características Técnicas da Barragem M

1 - Características Técnicas							
Altura				Comprimento			
Altura ≤ 15m	15m < Altura < 30m	30m ≤ Altura ≤ 60m	Altura > 60m	Comprimento ≤ 200m		Comprimento > 200m	
0	1	2	3	2		3	
Tipo de barragem quanto ao material de construção				Tipo de fundação			
Concreto convencional	Alvenaria de pedra/ concreto ciclópico/ concreto rolado - CCR	Terra homogênea/ enrocamento/ terra enrocamento	Rocha sã	Rocha alterada dura com tratamento	Rocha alterada sem tratamento/rocha alterada fraturada com tratamento	Rocha alterada mole/ saprólito/ solo compacto	Solo residual/aluvião
1	2	3	1	2	3	4	5
Idade da barragem				Vazão de projeto			
entre 30 e 50 anos	entre 10 e 30 anos	entre 5 e 10 anos	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar	Milenar	TR = 500 anos	TR < 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável
1	2	3	4	3	5	8	10

Fonte: Plano de Segurança de Barragem M

Quadro 3-2 Estado de Conservação da Barragem M

2 - Estado de Conservação			
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras			
Estruturas civis e hidroeletrômecânicas em pleno funcionamento/canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos	Estruturas civis e hidroeletrômecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência/canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos à estrutura vertente	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrômecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação/canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrômecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas/canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas
0	4	7	10
Confiabilidade das Estruturas de Adução			
Estruturas civis e dispositivos hidroeletrômecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrômecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrômecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas	
0	4	6	

2 - Estado de Conservação			
Percolação			
Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente
0	3	5	8
Deterioração dos Taludes/Paramentos			
Inexistente	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo	Erosões superficiais, ferrugem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança
0	1	5	7
Deformações e Recalques			
Inexistente	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança
0	1	5	8
Eclusa			
Não possui eclusa	Estruturas civis e hidroeletrônicas bem mantidas e funcionando	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletrônicos com problemas identificados e sem medidas corretivas
0	1	2	4

Fonte: Plano de Segurança de Barragem M

Quadro 3-3 Plano de Segurança da Barragem M

3 - Plano de Segurança da Barragem								
Existência de documentação de projeto					Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem			
Projeto executivo e "como construído"	Projeto executivo ou "como construído"	Projeto básico	Anteprojeto ou Projeto conceitual	inexiste documentação de projeto	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem	Possui técnico responsável pela segurança da barragem	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem	
0	2	4	6	8	0	4	8	
Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento				Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem		Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação		
Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre	Não	Emite regularmente os relatórios	Emite os relatórios sem periodicidade	Não emite os relatórios
0	3	5	6	0	6	0	3	5

Fonte: Plano de Segurança de Barragem M

Quadro 3-4 Dano Potencial Associado (DPA) da Barragem M

Dano Potencial Associado							
Volume Total do Reservatório				Potencial de perdas de vidas humanas			
Pequeno < = 5 milhões m ³	Médio 5 milhões a 75 milhões m ³	Grande 75 milhões a 200 milhões m ³	Muito Grande > 200 milhões m ³	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/ residentes ou temporárias/ transitando na área afetada a jusante da barragem)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)
1	2	3	5	0	4	8	12
Impacto ambiental				Impacto socioeconômico			
POUCO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais)	SIGNIFICATIVO (quando a área afetada incluir áreas de proteção de uso sustentável – APA, FLONA, RESEX, etc. – ou quando for área de interesse ambiental pouco descaracterizada)	MUITO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada incluir áreas de proteção integral – ESEC, PARNA, REBIO, inclusive Terras Indígenas – ou quando for de grande interesse ambiental em estado natural)	INEXISTENTE (Quando não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem)	BAIXO (quando existem de 1 a 5 instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou infraestrutura na área afetada da barragem)	MÉDIO (quando existem mais de 5 até 30 instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem)	ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias)	
1	2	5	0	1	3	8	

Fonte: Plano de Segurança de Barragem M

Quadro 3-5 Quadro para classificação da barragem M

QUADRO PARA CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA		
II.1 - CATEGORIA DE RISCO		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	19
2	Estado de Conservação (EC)	0(*)
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	10
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		29
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	> = 60 ou EC* > =8 (*)
	MÉDIO	35 a 60
	BAIXO	< = 35
(*) Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providencias imediatas pelo responsável da barragem.		
II.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		Pontos
		27
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	> = 16
	MÉDIO	10 < DPA < 16
	BAIXO	< = 10
RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:		
CATEGORIA DE RISCO		BAIXO
DANO POTENCIAL ASSOCIADO		ALTO

Fonte: Plano de Segurança de Barragem M

[1] – foi atribuído valor 0 uma vez que a barragem ainda está em período construtivo, não sendo possível avaliar seu EC

Quadro 3-6 Matriz de Classificação da Barragem M

CATEGORIA DE RISCO (CRI)	DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	B	D
BAIXO	A	B	D

Fonte: Plano de Segurança de Barragem M

3.3.2 Descrição do Empreendimento

A Barragem M, fica localizada no município de São José dos Pinhais (PR), região metropolitana de Curitiba. O empreendimento busca a garantia de abastecimento de água para a região. Outro objetivo da barragem é mitigar as áreas afetadas por inundações durante os períodos de cheias nas regiões a jusante da barragem. Além disso, o paramento é responsável por barrar o corpo hídrico do Rio M, pertencente à Bacia Hidrográfica do Alto Iguaçu. O eixo do barramento situa-se em latitude 25°38'28.91"S e longitude 49°4'22.41"W. A Figura 3-2 apresenta uma imagem

de satélite do empreendimento, que está em construção no momento de elaboração deste trabalho.

Figura 3-2 Imagem de Satélite da Barragem M

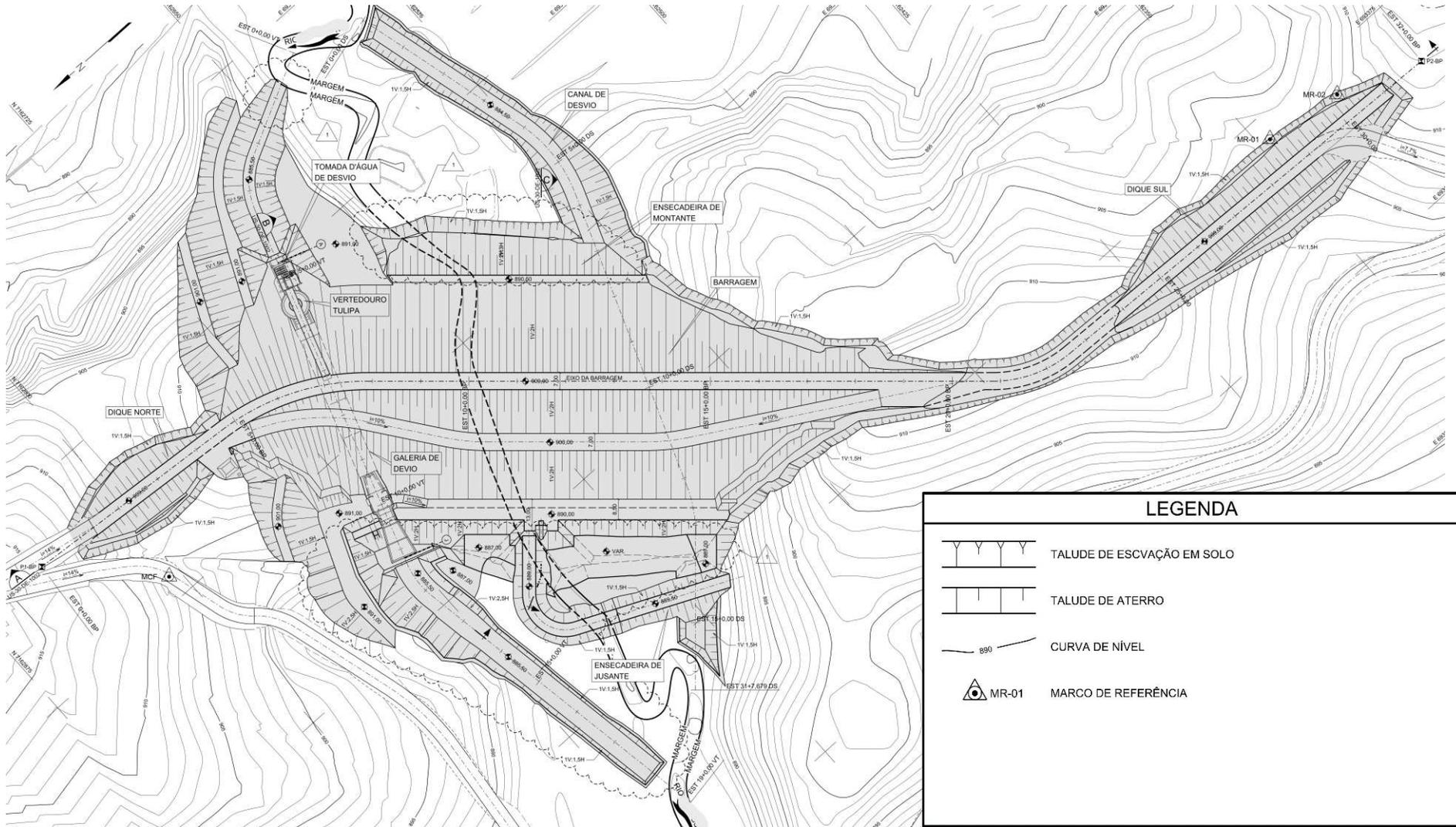


Fonte: Google Earth (2023)

A crista da barragem está posicionada a uma altura de 909,00 m, com 7,00 m de largura e comprimento total aproximado de 596,0 m. Este comprimento inclui a extensão da barragem principal e dois diques laterais posicionados perto das ombreiras esquerda e direita da barragem, conhecidos como diques norte e sul. A barragem está equipada com um vertedouro tipo Tulipa. O nível de água (N.A.) de operação máxima da barragem está em uma elevação de 905,00 m, enquanto o de máximo maximum está na elevação de 907,01 m. O reservatório da barragem pode armazenar até 38,2 hm³ de água durante sua operação normal de N.A. A barragem é de categoria de terra homogênea, com talude composto por solo argiloso compactado. A inclinação dos parâmetros de montante e jusante é a mesma: 1V:2H.

Na Figura 3-3 é apresentado o arranjo geral da Barragem M.

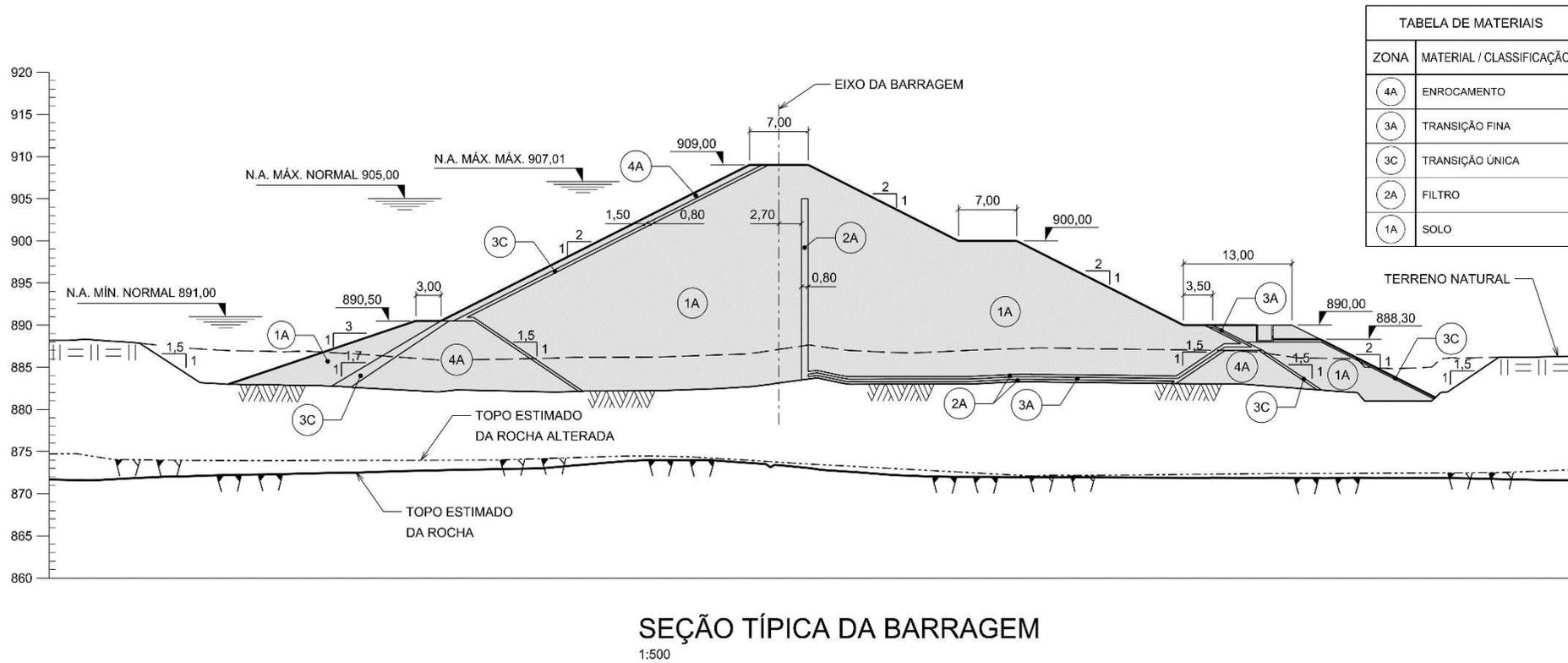
Figura 3-3 Arranjo Geral da Barragem M



Fonte: Projeto Executivo Barragem M

Para regular o fluxo das águas de percolação pelo maciço da barragem, foi projetado um filtro vertical com 80 cm de espessura que abrange toda a extensão da barragem. Este filtro é conectado a um tapete de drenagem horizontal. Na Figura 3-4 é apresentada a seção típica da Barragem M. Seguindo, tem-se a Figura 3-5 e a Figura 3-6 que ilustram as faixas granulométricas para delimitar os materiais utilizados no barramento.

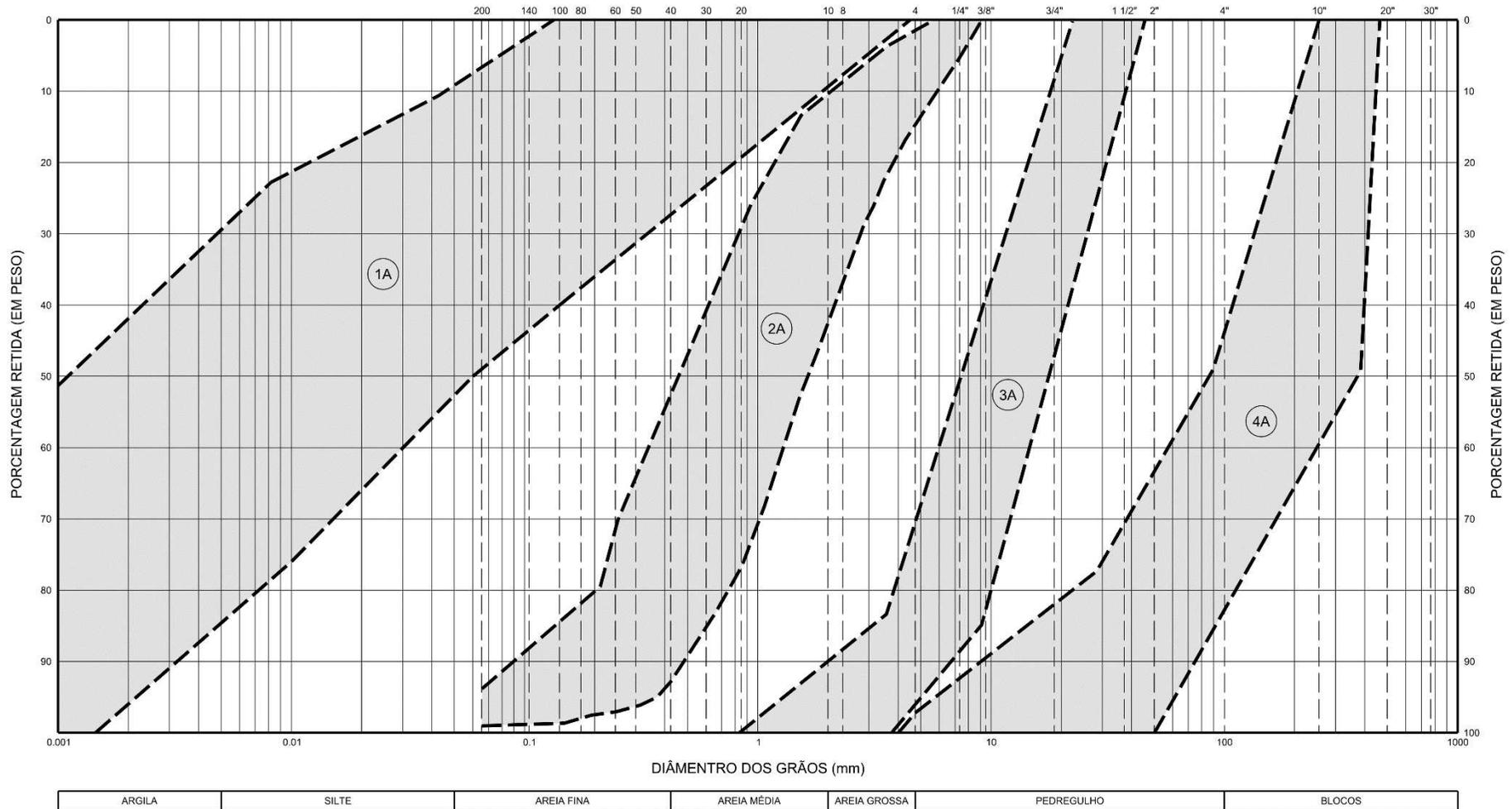
Figura 3-4 Seção Típica da Barragem M



Fonte: Projeto Executivo Barragem M

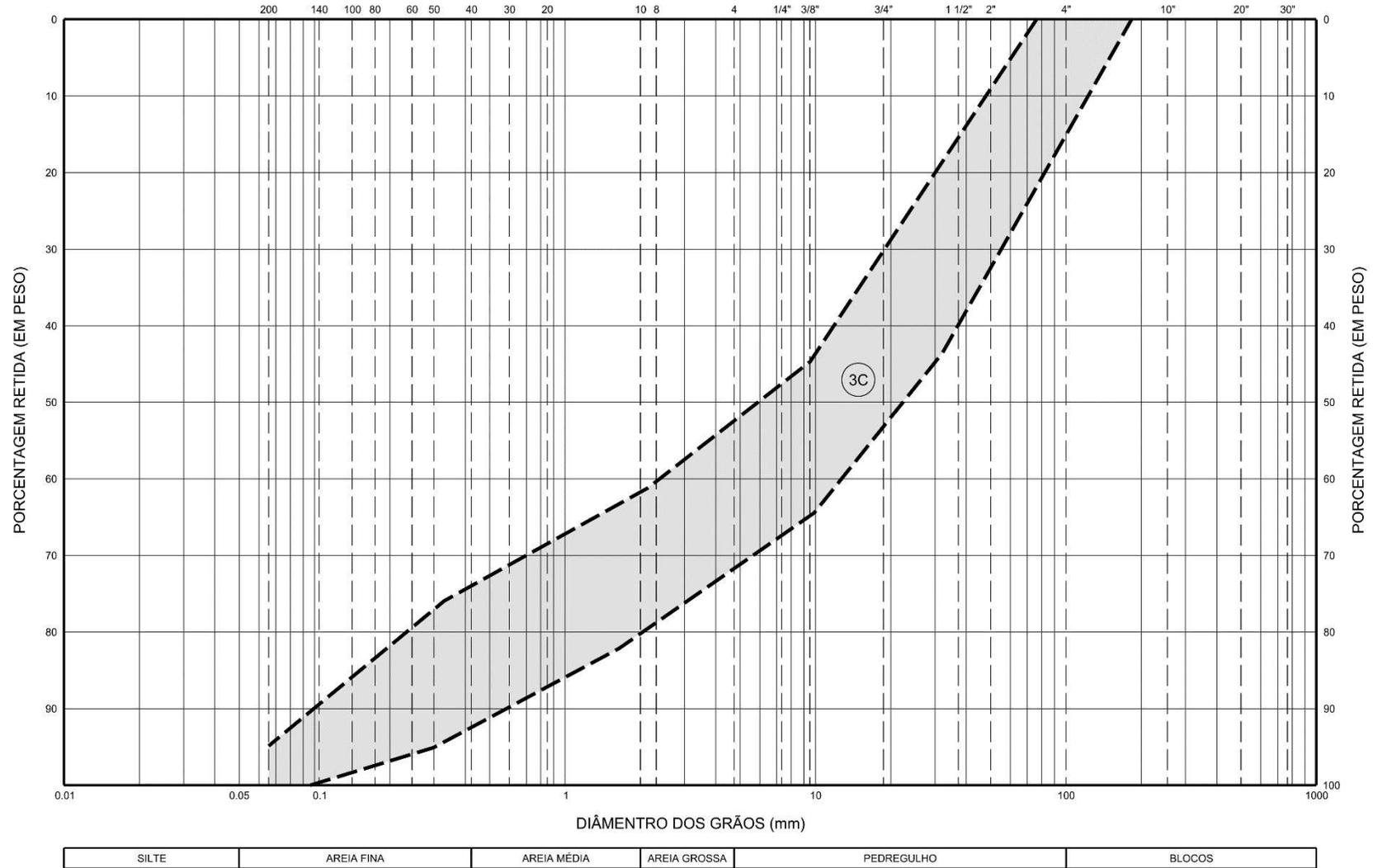
TABELA DE MATERIAIS	
ZONA	MATERIAL / CLASSIFICAÇÃO
4A	ENROCAMENTO
3A	TRANSIÇÃO FINA
3C	TRANSIÇÃO ÚNICA
2A	FILTRO
1A	SOLO

Figura 3-5 Faixa Granulométrica dos Materiais 1A, 2A, 3A e 4A



Fonte: Projeto Executivo Barragem M

Figura 3-6 Faixa Granulométrica do Material 3C



Fonte: Projeto Executivo Barragem M

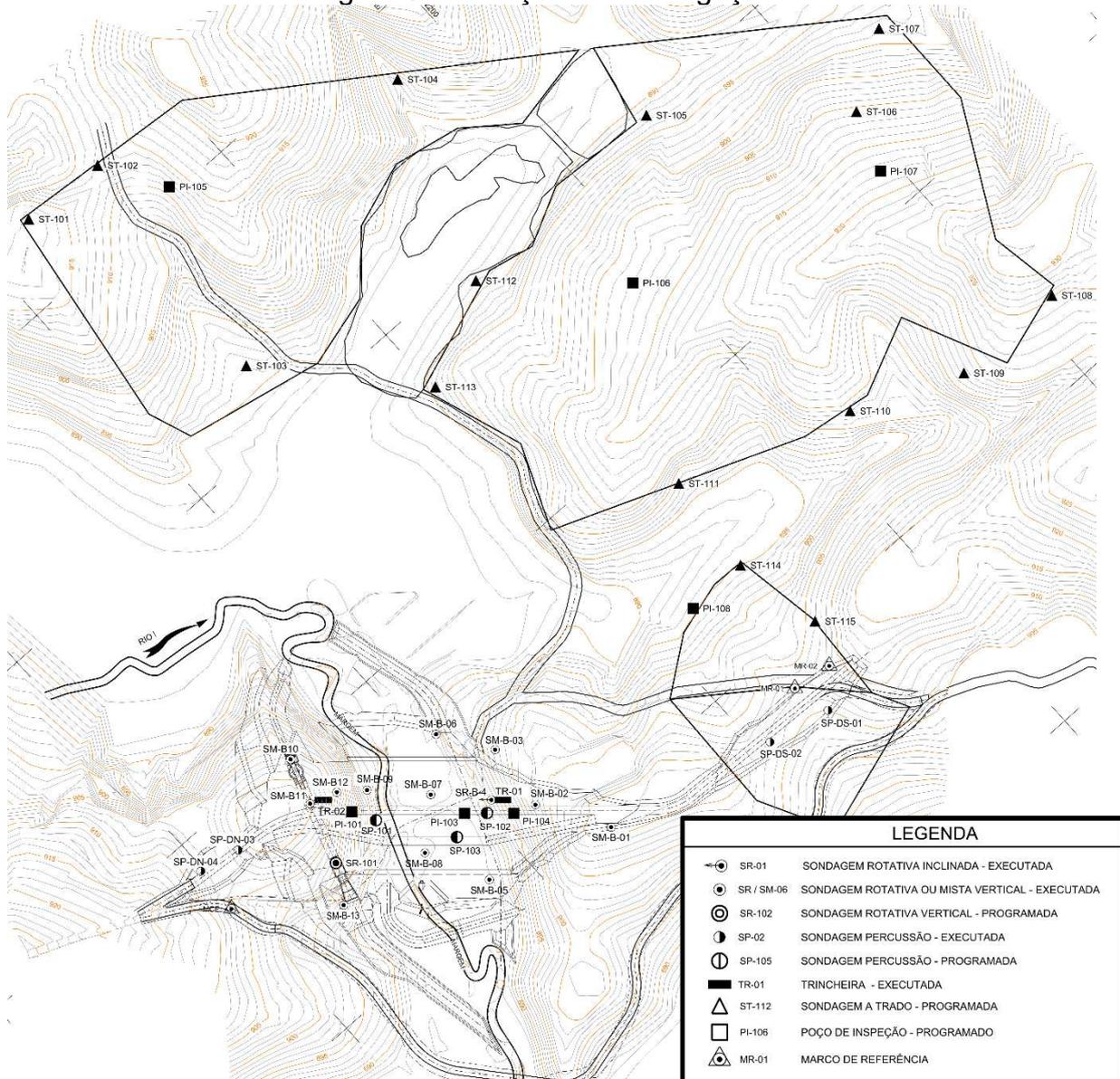
3.3.3 Perfil Geológico

Foram realizadas investigações geológico-geotécnicas na fase do Projeto da barragem M, compreendendo sondagens rotativas (SR), sondagens a percussão (SPT), ensaios de campo, sondagens a trado (ST), poços de inspeção (PI) e coleta de amostras deformadas e indeformadas para ensaios de laboratório. A área em questão situa-se em terreno de rochas graníticas e depósitos.

Foram executados 08 (oito) furos de sondagem à percussão, 12 (doze) furos de sondagem mista, 02 (dois) furo de sondagem rotativa, 15 (quinze) sondagens a trado com e 10 (dez) poços de inspeção, com coletas deformadas e indeformadas de modo a caracterizar o material local. Quanto aos ensaios de laboratório, suas coletas foram executadas na fundação da barragem e nas áreas de empréstimo.

Na Figura 3-7 são apresentadas as locações das investigações realizadas na região do barramento.

Figura 3-7 Locação de investigações



Fonte: Projeto Executivo Barragem M

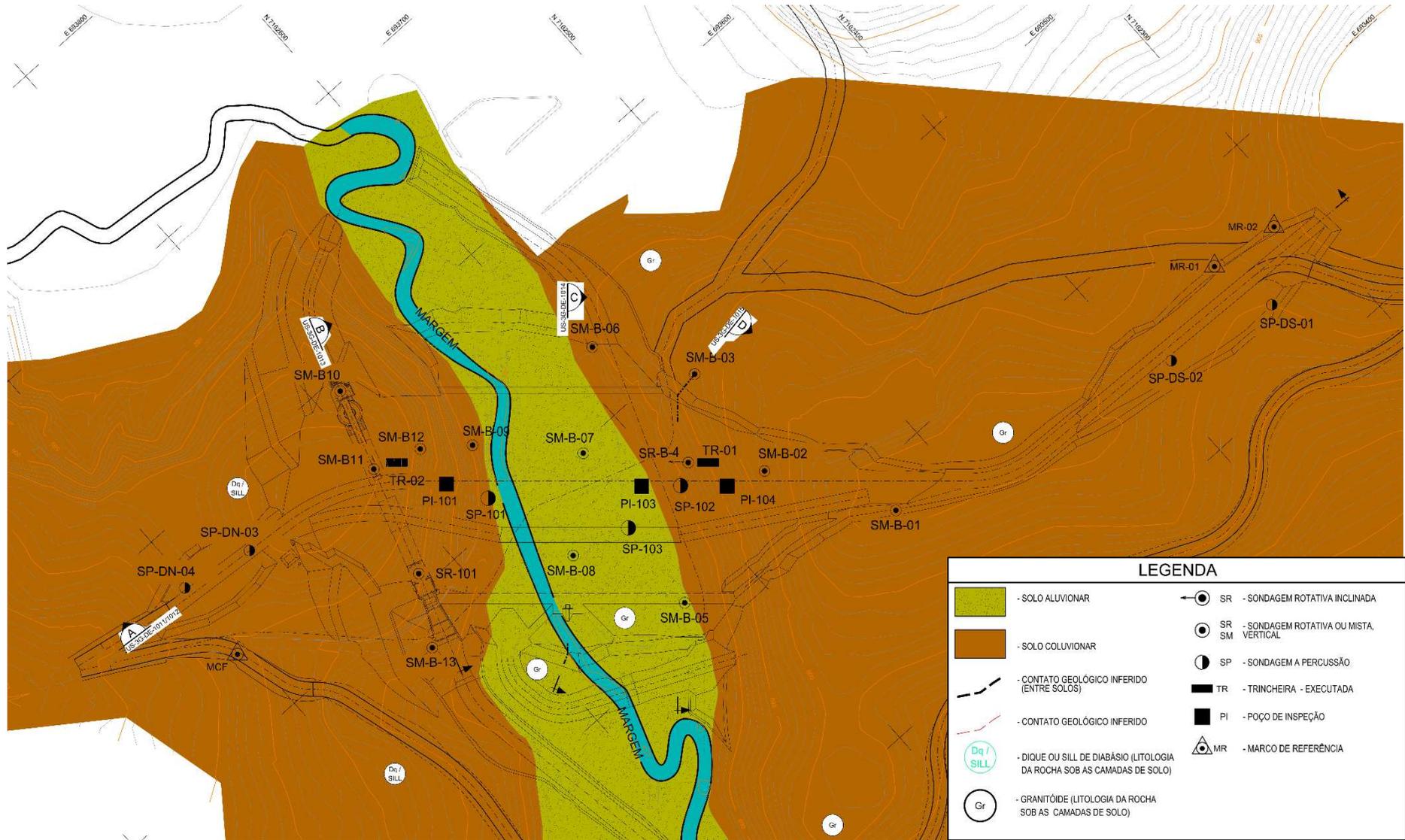
A classificação dos materiais para o projeto da Barragem M. inclui os diversos recursos naturais a serem utilizados dispostos em:

- Materiais granulares, consistindo de areia, transições e enrocamento, atendem a uma variedade de propósitos, como filtros, drenos e revestimento de canais. Também são utilizados na construção de transições e rip-rap para barragens, diques e enscadeiras. Estes materiais podem ser obtidos em pedreiras ou por meio de escavações obrigatórias.

- Solo de empréstimo, advindo de locais escavados para esse fim e outras áreas de escavações obrigatórias, é utilizado na construção de barragens, diques e ensecadeiras.
- Solo de fundação, constitui a base das obras de terraplenagem e aterros, bem como faz parte das encostas e dos cortes para a implantação estrutural da Barragem.

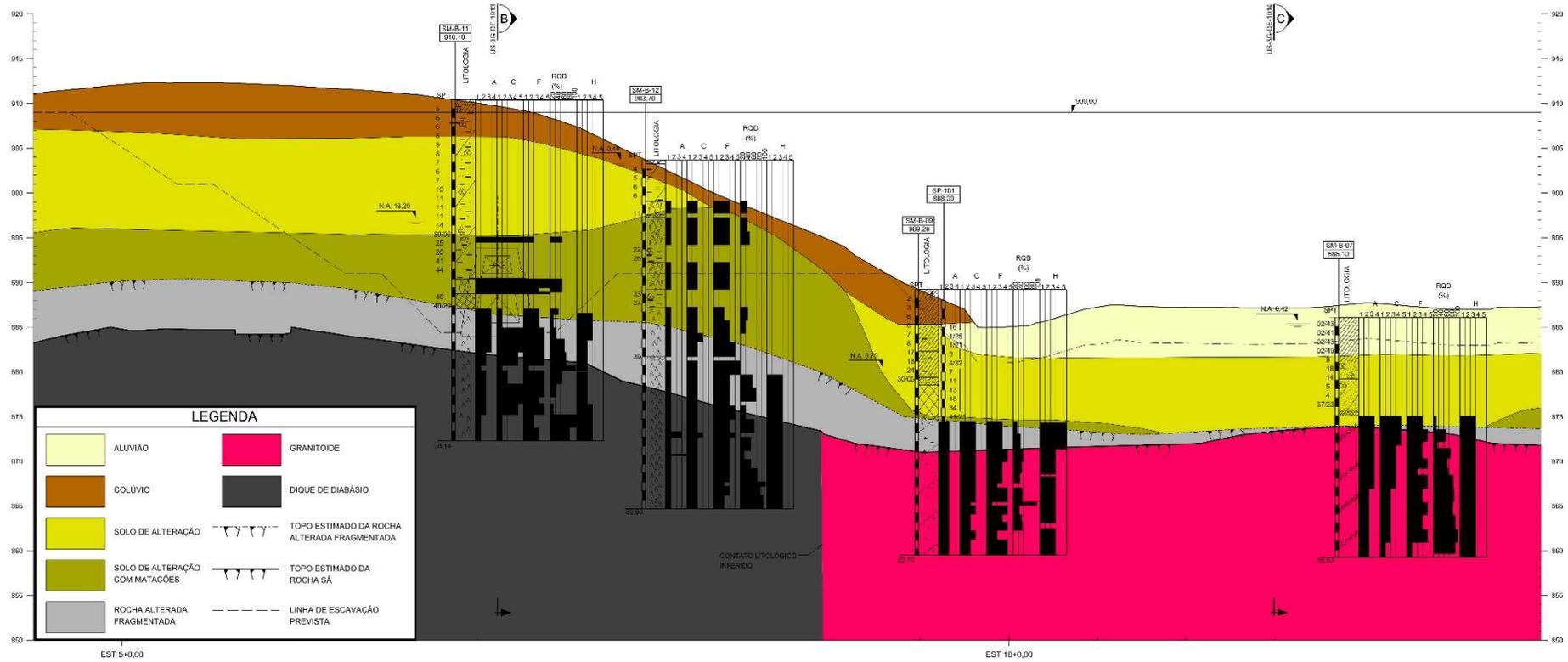
A Figura 3-8 exhibe o Mapa Geológico-geotécnico da Barragem M. Nele estão dispostos os tipos de solos existentes no topo, bem como indicadas as litologias das rochas encontradas. O Perfil Geológico-geotécnico do eixo do barramento é exposto em duas partes para melhor visualização, na Figura 3-9 e na Figura 3-10. Explicações sobre os solos e rochas encontrados encontram-se nos subitens subsequentes.

Figura 3-8 Mapa Geológico-geotécnico



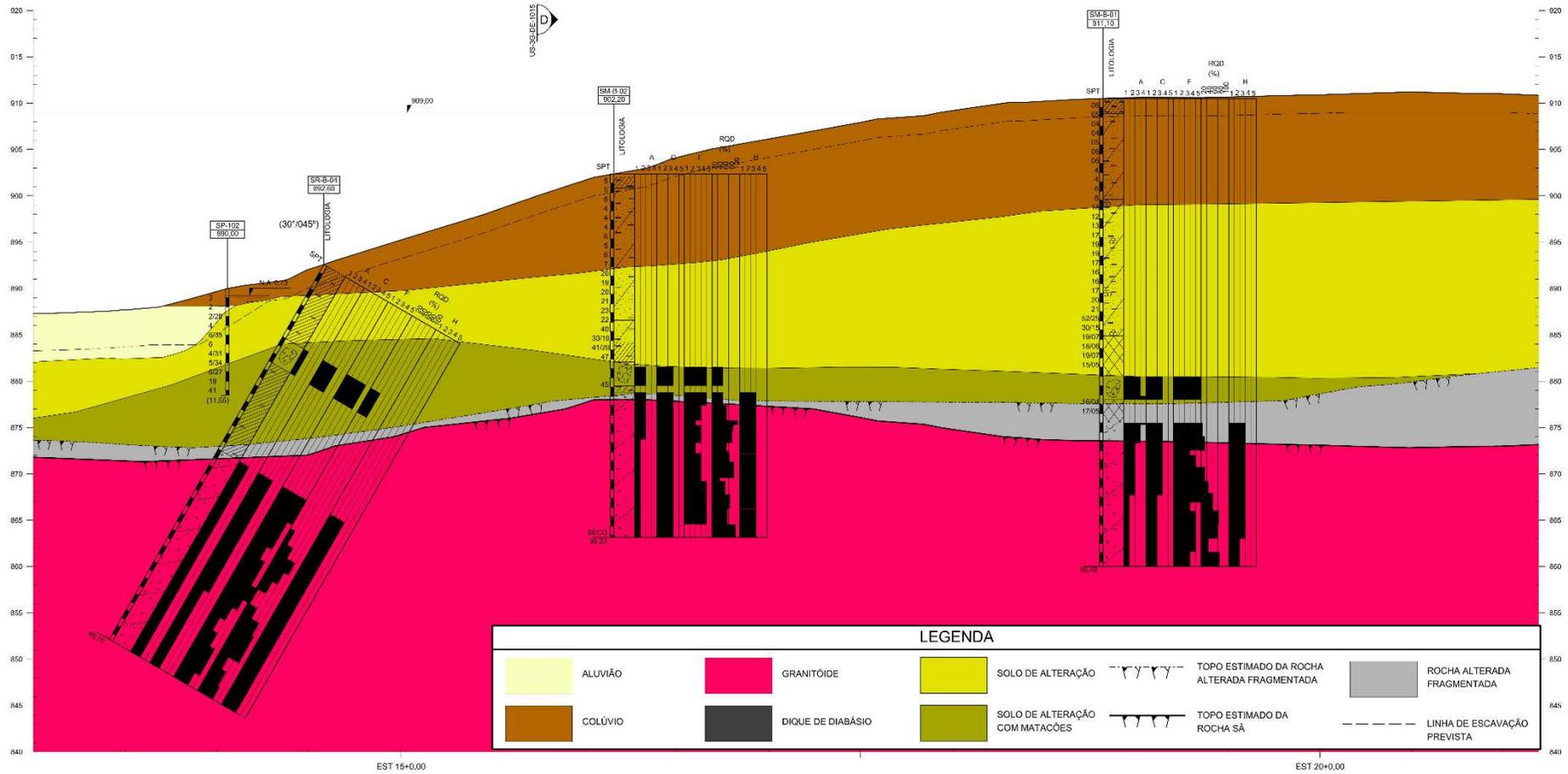
Fonte: Projeto Executivo Barragem M

Figura 3-9 Perfil Geológico-geotécnico do eixo – Parte 1



Fonte: Projeto Executivo Barragem M

Figura 3-10 Perfil Geológico-geotécnico do eixo – Parte 2



Fonte: Projeto Executivo Barragem M

3.3.3.1 Fundação

As investigações geológico-geotécnicas realizadas, embasam que na área das ombreiras, um solo coluvionar foi identificado. Esse tipo de solo, que é transportado por gravidade, tem profundidade média de 5,0 m na ombreira direita e de até 12 m na ombreira esquerda. Sua característica mais comum é o valor SPT, que tem uma média de cerca de 6 golpes para os 30 cm finais de alcance testados. Além disso, é composto principalmente de areia com algumas porções de silte-argila. Em contraste, a região de várzea possui um solo aluvial que foi transportado pelo rio. Sua espessura varia de 4 a 7 m, e é caracterizada por ser solo mole, apresentando valores de N_{spt} que variam de 0 a 4 golpes. Abaixo dessas camadas superiores encontra-se um solo de alteração, que é dominado por material silto-argiloso. Em certos trechos dessa camada também foram observados matacões. Ainda sob essas camadas, com profundidade média de 20 m, encontra-se o topo de rocha alterada, apresentando fragmentação. A espessura dessa camada varia de 7 m na margem esquerda a 2 m na margem direita, que se encontram com rocha sã.

Na região da baixada, o projeto prevê que os solos moles sejam totalmente removidos para a implantação do maciço, o qual ficará assente no solo de alteração ou coluvionar. Porém, para a correta análise de percolação e estabilidade do maciço, fez-se necessário estimar os parâmetros geotécnicos desses solos, uma vez que não serão removidos da porção a jusante do barramento, fora da fundação, assim influenciando nos resultados.

A Quadro 3-7 apresenta os parâmetros que foram estimados com base nos SPT's e a média dos ensaios SPT e Cruz (1996).

Quadro 3-7 Parâmetros do Material de Fundação

Material	Peso específico saturado γ (g/cm ³)	Ângulo de Atrito Φ (°)	Coesão C (kPa)	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)
Solo Coluvionar (SPT \geq 6) (silte argiloso)	17,0	30,0	5,0	2,80E-08
Solo Coluvionar Superficial Ombreira Esquerda (SPT<6) (silte argiloso)	17,0	22,0	5,0	2,80E-07
Solo Aluvionar (argila mole)	15,0	10,0	15,0	2,40E-05
Solo Residual/Alteração (silte argiloso)	17,0	30,0	10,0	1,70E-05

Fonte: Projeto Executivo Barragem M e Cruz (1996)

Ao determinar a fundação da barragem, o critério de projeto centrou-se na remoção completa de solos aluviais moles. Adicionalmente, foram feitos esforços para que a barragem assentasse em solos residuais ou coluvionares com um N_{spt} mínimo de 6 golpes. Segundo Cruz (1996), recomenda-se um mínimo N_{spt} 7 para este tipo de estrutura. No

entanto, esta tolerância extra para um Nspt mínimo de 6 golpes é resultado dos solos dispostos nas ombreiras e abaixo da camada de aluvião, que são caracterizados com valores Nspt adequados para capacidade de suporte.

3.3.3.2 Material de Jazida

Estudos de materiais têm de ser realizados de forma a potencializar o aproveitamento dos materiais escavados necessários para a construção do empreendimento, dentro da própria obra. Caso estes materiais não apresentem características técnicas e volume suficientes, deve-se empregar solo e/ou rocha de jazidas antecipadamente selecionadas. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016b). Partindo dessa premissa, fez-se a caracterização do material de jazida.

Foram previstas 4 áreas de empréstimo. As investigações geológico-geotécnicas realizadas contemplaram todas as jazidas. Os ensaios de caracterização, compactação e permeabilidade e suas respectivas coletas foram realizados em trincheiras, poços de inspeção e também em material aplicado no maciço. A Quadro 3-8 dispõe dos resultados de alguns desses ensaios, os quais são significativos ao estudo.

Quadro 3-8 Resultados de Ensaio no Material de Aterro

Amostra	Peso específico saturado γ (g/cm ³)	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)	Silte (%)	Argila (%)	< #200
1	18,46	2,40E-08	43,2	32,6	75,8
2	18,19	2,40E-08	40,1	44,3	84,4
3	18,52	2,60E-08	34,7	52,3	87
4	19,31	1,52E-08	22,9	67	89,9
5	19,36	2,07E-08	29,9	53,3	83,2
6	19,48	1,20E-07	26,7	30,6	57,3
7	18,18	7,40E-09	22,1	53,6	75,7
8	19,63	1,30E-08	23,6	49,3	72,9
9	18,30	6,80E-09	3,4	48,8	52,2
10	19,84	1,30E-08	18,5	51,2	69,7
11	19,22	8,10E-09	49,4	15	64,4

Fonte: Projeto Executivo Barragem M

Assim, definiu-se de modo conservador o maior k (em negrito) como o utilizado para as análises de permeabilidade, de modo a gerar o maior fluxo no corpo do barramento, porém limitado ao valor de campo aferido. Também se define o maior γ (em negrito) de modo a gerar maiores esforços sobre as fatias inferiores e gerar um Fator de Segurança mais conservador.

Foram realizados 2 ensaios triaxiais tipo CU e 2 ensaios triaxiais tipo CD nos materiais de jazida a serem implementados no barramento. Os valores obtidos nos ensaios realizados forneceram parâmetros muito elevados para o tipo de material observado em análises granulométricas, em comparação com bibliografia. Desse modo, adotou-se valores conservadores para este tipo de material com base em Cruz (1996), conforme Quadro 3-9.

Quadro 3-9 Resultados de Ensaio Triaxiais do Material de Aterro

	CU-ST-03	CU-ST-17	CD-ST-03	CD-ST-17	Média	Adotado
Ângulo de Atrito Φ (°)	51,6	40,0	38,5	24,7	38,7	27,0
Coesão C (kPa)	16,0	49,9	12,8	93,0	42,9	15,0

Fonte: Projeto Executivo Barragem M

Assim, obteve-se o Quadro 3-10 para os parâmetros do material de jazida a ser utilizado no aterro.

Quadro 3-10 Parâmetros do Material de Aterro

Material	Ângulo de Atrito Φ (°)	Coesão C (kPa)	Peso específico saturado γ (g/cm ³)	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)
1A – Solo Compactado	27	15	19,63	1,20E-07

Fonte: Projeto Executivo Barragem M

3.3.3.3 Material Granular

Dentre os materiais granulares, 2A – Filtro e 3A – Transição Fina foram os únicos ensaiados, sendo gerados Coeficiente de permeabilidade k para ambos e o peso específico saturado (γ) para o filtro. 3C – Transição Única e 4A – Enrocamento, não foram submetidos a ensaios. Desse modo, utilizou-se parâmetros baseados em Cruz (1996) para ângulo de atrito (Φ) e coesão (C) em todos presentes na Quadro 3-11. De forma conservadora, adotou-se o Coeficiente de permeabilidade k do 3A para o 3C e para o 4^a. Além disso, ressalta-se a obrigatoriedade de atendimento às faixas granulométricas indicadas na Figura 3-5 e na Figura 3-6 para aprovação como materiais utilizados nos trabalhos finais.

Quadro 3-11 Parâmetros do Material Granular

Material	Ângulo de Atrito Φ (°)	Coesão C (kPa)	Peso específico saturado γ (g/cm ³)	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)
2A – Filtro	30	0	20,59	2,52E-02
3A – Transição fina	35	0	21,00	2,44E+01
3C – Transição única	35	0	21,00	2,44E+01
4A – Enrocamento	40	0	21,00	2,44E+01

Fonte: Projeto Executivo Barragem M e Cruz (1996)

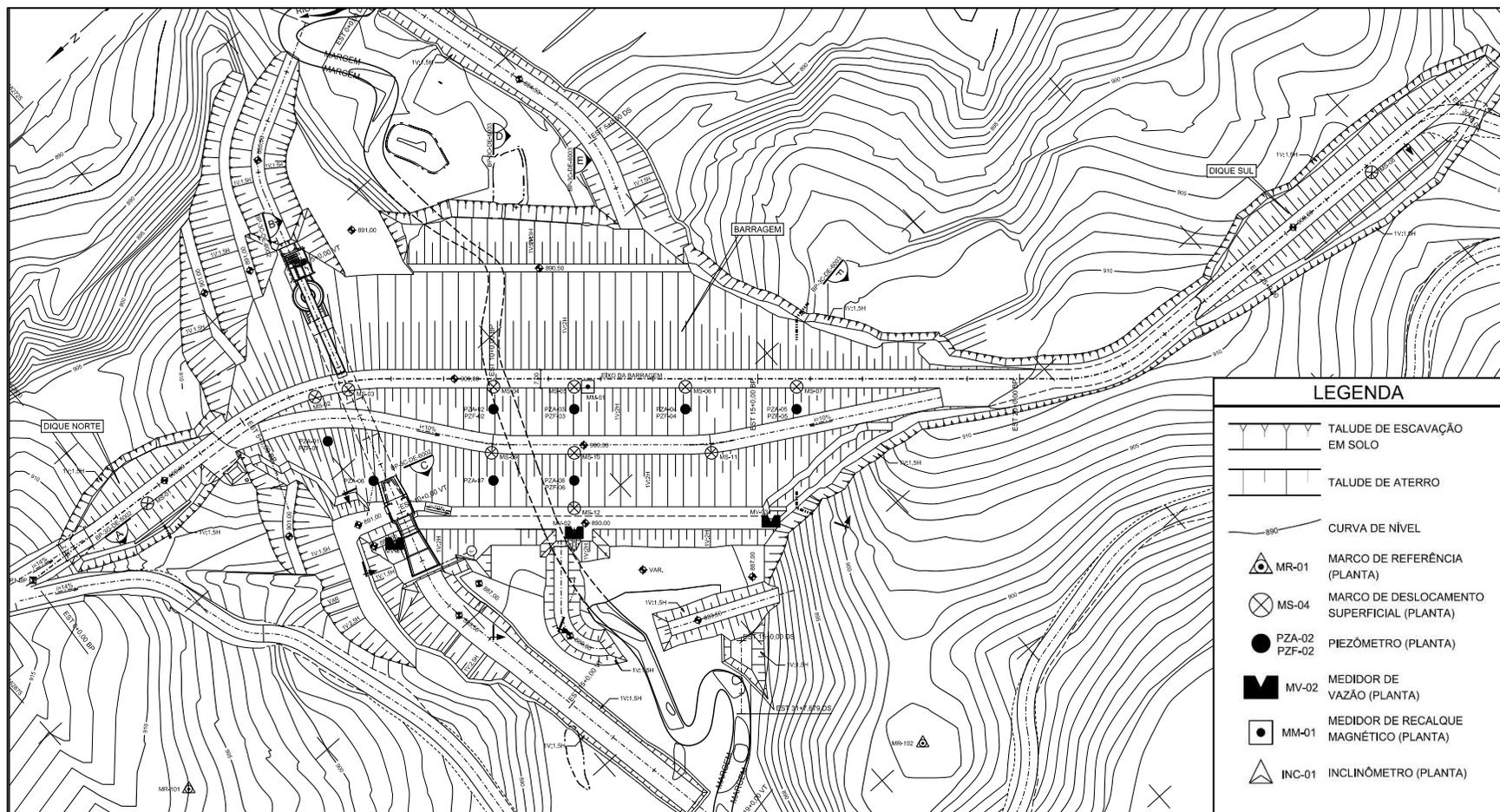
3.4 INSTRUMENTAÇÃO

O projeto do sistema de monitoramento por instrumentação da barragem não leva em consideração sistemas automatizados para obtenção dos dados. O processo de

aquisição de dados será feito por meio de leitura direta do instrumento. O tipo de piezômetro utilizado foi o standpipe, mais especificamente o Casagrande.

A Figura 3.11 apresenta a locação dos instrumentos em planta:

Figura 3.11 Planta de Locação dos Instrumentos



Fonte: Projeto Executivo Barragem M

Os instrumentos de auscultação previstos para o Projeto Executivo da Barragem de M. são 12 (doze) Marcos Superficiais (MS), 02 (dois) Marcos de Referência (MR), 01 (um) Medidor Magnético de Recalque (MM), 03 (três) Medidores de Vazão (MV) e 14 (quatorze) Piezômetros Casagrande (PZ).

Com piezômetros Casagrande, é possível medir com precisão os níveis piezométricos presentes na fundação e no maciço do aterro da barragem. Esta medição é fundamental para avaliar se os critérios de subpressão adotados no projeto e estimativas de nível piezométrico no maciço são adequados. Para obter as medições do nível de água, uma sonda é usada. Ela é composta por uma fita métrica equipada com equipamento na extremidade que emite um som ao entrar em contato com a água. Pode determinar o nível da água com uma precisão de +1,0 cm.

A leitura consiste na determinação da distância entre a boca do tubo do piezômetro e o nível de água no interior do tubo. A leitura deve ser expressa na forma de cota piezométrica, calculada pela expressão (8), a seguir:

$$P = C - L \quad (8)$$

Sendo:

P cota piezométrica [m];

C cota da boca do tubo do piezômetro [m];

L leitura da sonda [m, com 2 casas decimais de precisão];

No Quadro 3-12 apresentam-se os dados de instalação dos piezômetros:

Quadro 3-12 Localização dos Piezômetros

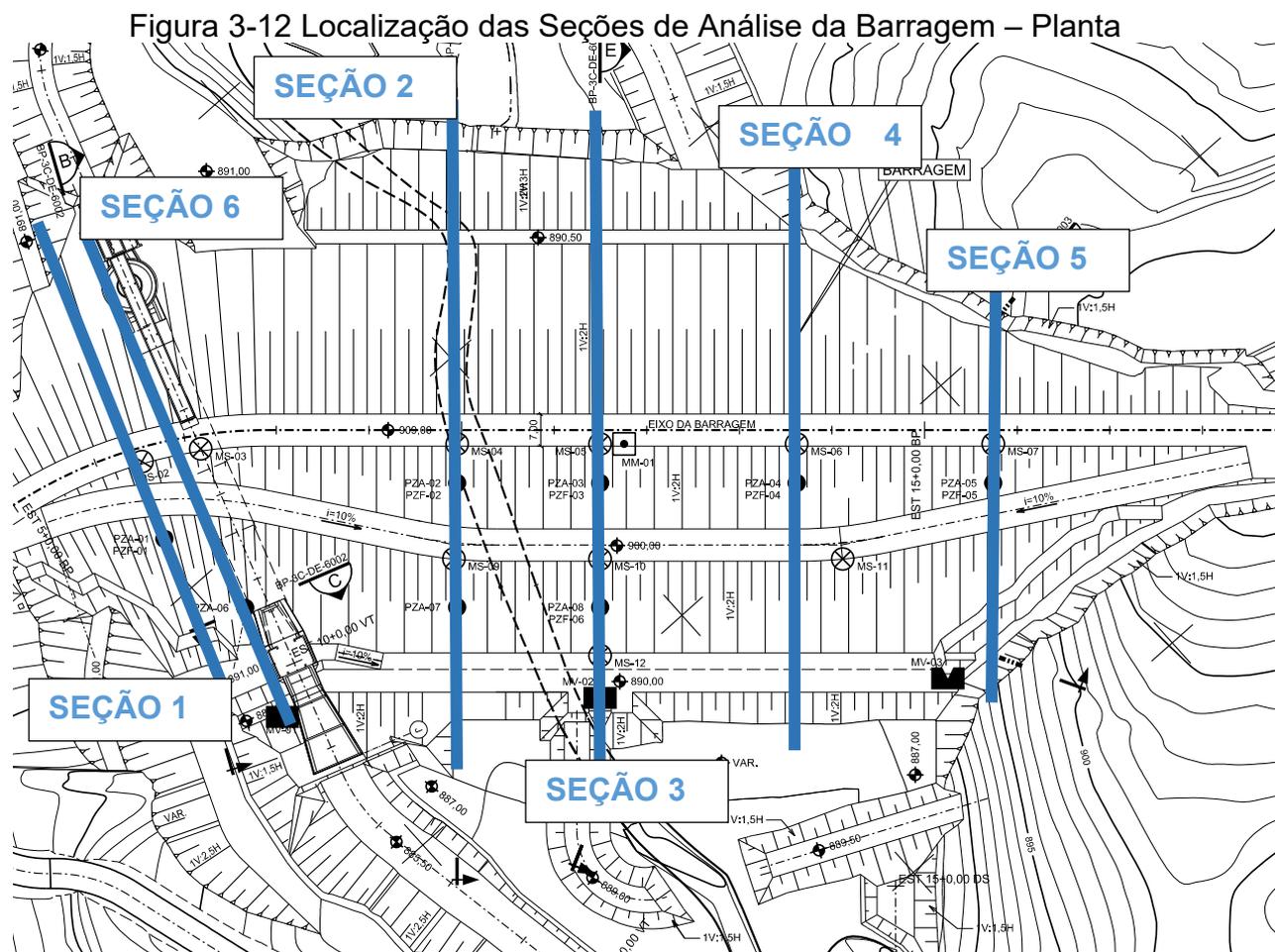
Instrumento	Seção de Análise	Estaca	Afastamento do Eixo (m)	Cota Instalação (m)	Material a ser instrumentado
PZA-01	SEÇÃO 1	06+09,74	20,49 (J)	891,00	Filtro Horizontal
PZA-02	SEÇÃO 2	09+19,03	11,5 (J)	883,40	Filtro Horizontal
PZA-03	SEÇÃO 3	11+09,90	11,5 (J)	883,00	Filtro Horizontal
PZA-04	SEÇÃO 4	13+12,36	11,5 (J)	884,00	Filtro Horizontal
PZA-05	SEÇÃO 5	15+14,82	11,5 (J)	896,60	Filtro Horizontal
PZA-06	SEÇÃO 6	07+10,30	38,46 (J)	884,40	Filtro Horizontal
PZA-07	SEÇÃO 2	09+19,03	38,5 (J)	884,10	Filtro Horizontal
PZA-08	SEÇÃO 3	11+09,90	38,5 (J)	883,20	Filtro Horizontal
PZF-01	SEÇÃO 1	06+09,74	20,49 (J)	886,80	Contato Solo Alteração / Topo de Rocha
PZF-02	SEÇÃO 2	09+19,03	11,5 (J)	874,15	Contato Solo Alteração / Topo de Rocha

Instrumento	Seção de Análise	Estaca	Afastamento do Eixo (m)	Cota Instalação (m)	Material a ser instrumentado
PZF-03	SEÇÃO 3	11+09,90	11,5 (J)	873,10	Contato Solo Alteração / Topo de Rocha
PZF-04	SEÇÃO 4	13+12,36	11,5 (J)	873,00	Contato Solo Alteração / Topo de Rocha
PZF-05	SEÇÃO 5	15+14,82	11,5 (J)	877,30	Contato Solo Alteração / Topo de Rocha
PZF-06	SEÇÃO 3	11+09,90	38,5 (J)	872,20	Contato Solo Alteração / Topo de Rocha

Fonte: Projeto Executivo Barragem M.

3.5 ELABORAÇÃO DAS SEÇÕES

Para o desenvolvimento da análise de percolação do barramento, foram elaboradas seis seções (1, 2, 3, 4, 5 e 6) no barramento principal, de modo a abranger por totalidade os piezômetros instalados. Baseada na Quadro 3-12, a Figura 3-12 exibe a Planta contendo a localização das seções da barragem para análise.

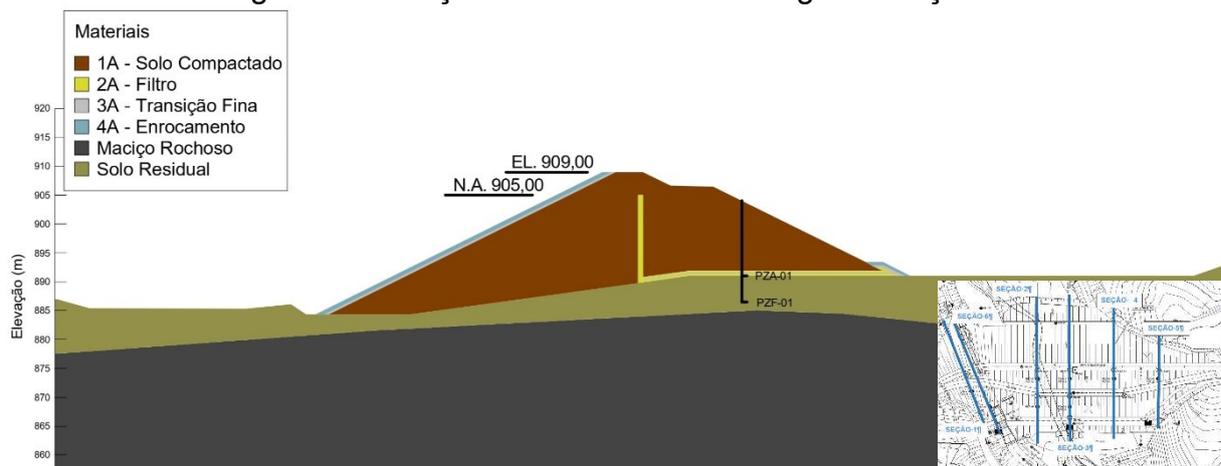


Fonte: Projeto Executivo Barragem M

As seções foram locadas de modo a abranger os piezômetros, possibilitando produzir perfis transversais do barramento e fundação com suas respectivas distribuições de materiais. Em posse do perfil geológico-geotécnico, de sondagens a percussão e sondagens mistas, foi elaborado um perfil de fundação única para cada seção, com base nos resultados das sondagens. Os materiais foram separados em nove tipos, sendo: 1A – Solo Compactado; 2A – Filtro; 3A – Transição Fina; 3C – Transição Única; 4A – Enrocamento; Aluvião; Maciço Rochoso; Rocha Alterada; Solo Coluvionar; Solo Coluvionar $N_{spt} < 6$, Solo Residual. Para cada seção utilizou-se materiais distintos, porém condizentes com a geologia local.

A seção 1 abrange os piezômetros PZA-01 e PZF-01, se usa dos materiais 1A – Solo Compactado; 2A – Filtro; 3A – Transição Fina; 4A – Enrocamento; Maciço Rochoso e Solo Residual e está disposta na Figura 3-13:

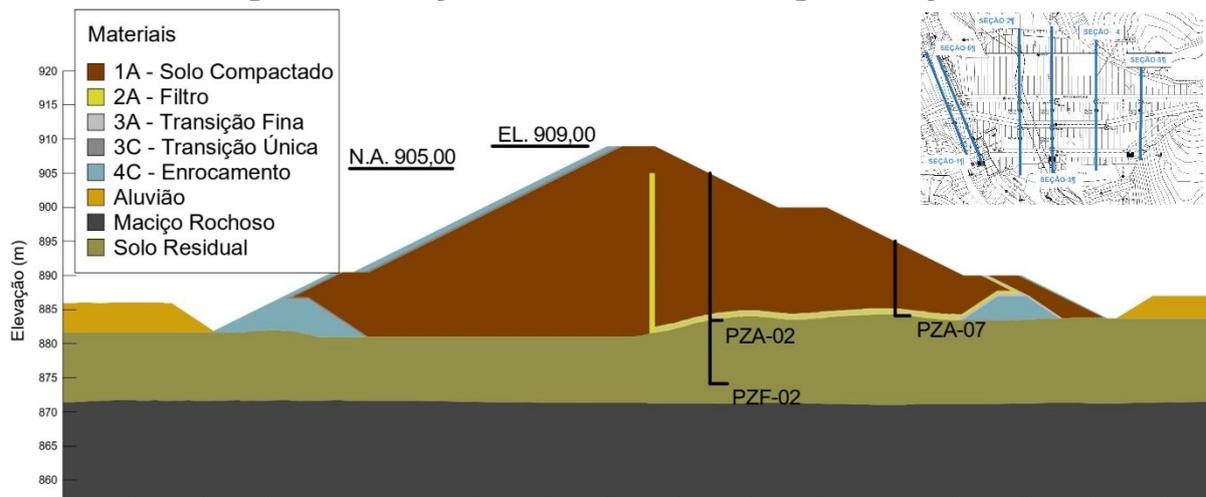
Figura 3-13 Seções de Análise da Barragem - Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

A seção 2 abrange os piezômetros PZA-02, PZF-02 e PZA-07, é apresentada na Figura 3-14 e se usa dos materiais 1A – Solo Compactado; 2A – Filtro; 3A – Transição Fina; 3C – Transição Única; 4A – Enrocamento; Aluvião; Maciço Rochoso e Solo Residual.

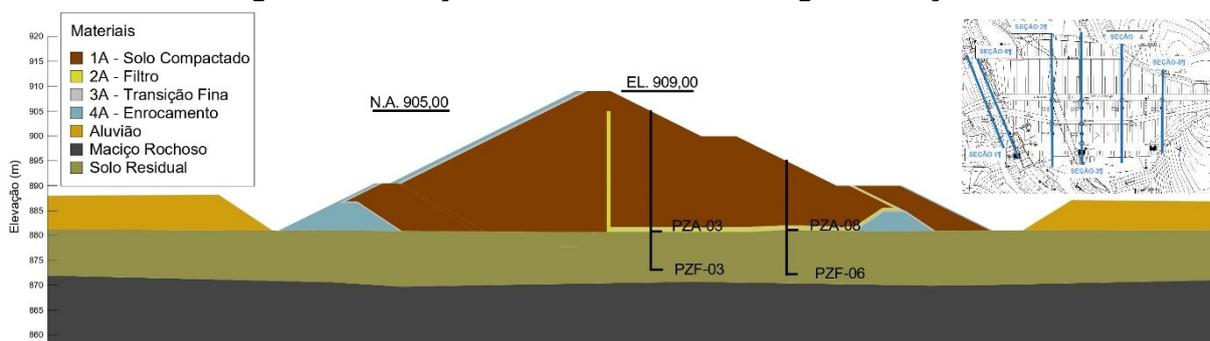
Figura 3-14 Seções de Análise da Barragem - Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

A seção 3 abrange os piezômetros PZA-03, PZF-03, PZA-08 e PZF-06, é exibida na Figura 3-15 e se usa dos materiais 1A – Solo Compactado; 2A – Filtro; 3A – Transição Fina; 4A – Enrocamento; Aluvião; Maciço Rochoso e Solo Residual.

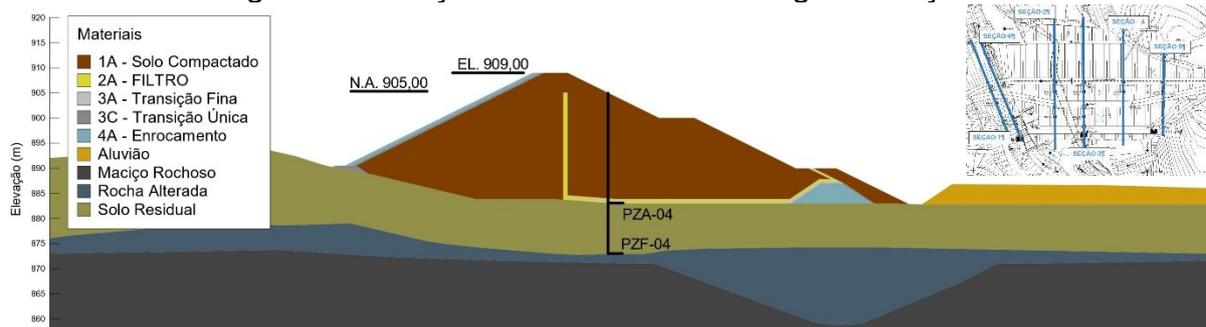
Figura 3-15 Seções de Análise da Barragem - Seção 3



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

A seção 4 abrange os piezômetros PZA-04 e PZF-04 e está disposta na Figura 3-16, sendo composta dos materiais: 1A – Solo Compactado; 2A – Filtro; 3A – Transição Fina; 3C – Transição Única; 4A – Enrocamento; Aluvião; Maciço Rochoso; Rocha Alterada e Solo Residual.

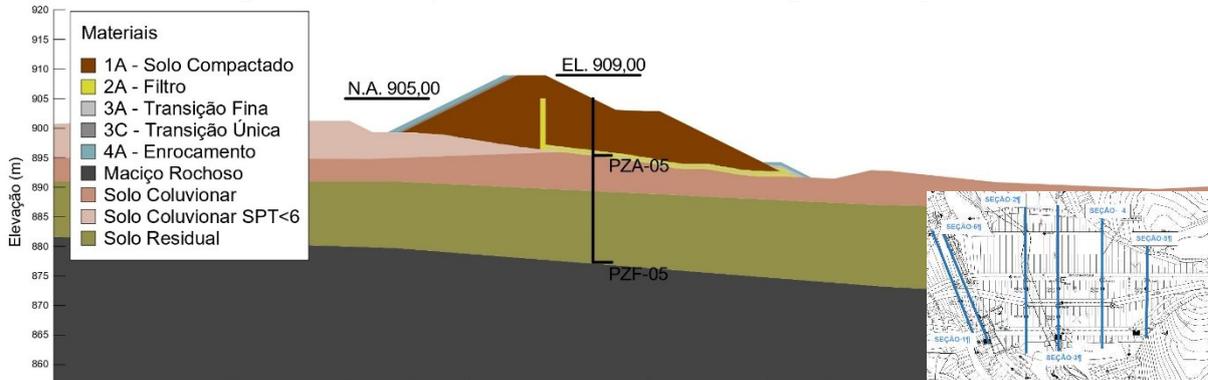
Figura 3-16 Seções de Análise da Barragem - Seção 4



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

A seção 5 abrange os piezômetros PZA-05 e PZF-05 e é apresentada na Figura 3-17, Solo Coluvionar; Solo Coluvionar $N_{spt} < 6$ e Solo Residual. Além dos citados, houve uso de material 1A – Solo Compactado; 2A – Filtro; 3A – Transição Fina; 3C – Transição Única; 4A – Enrocamento; Maciço Rochoso; Rocha Alterada;

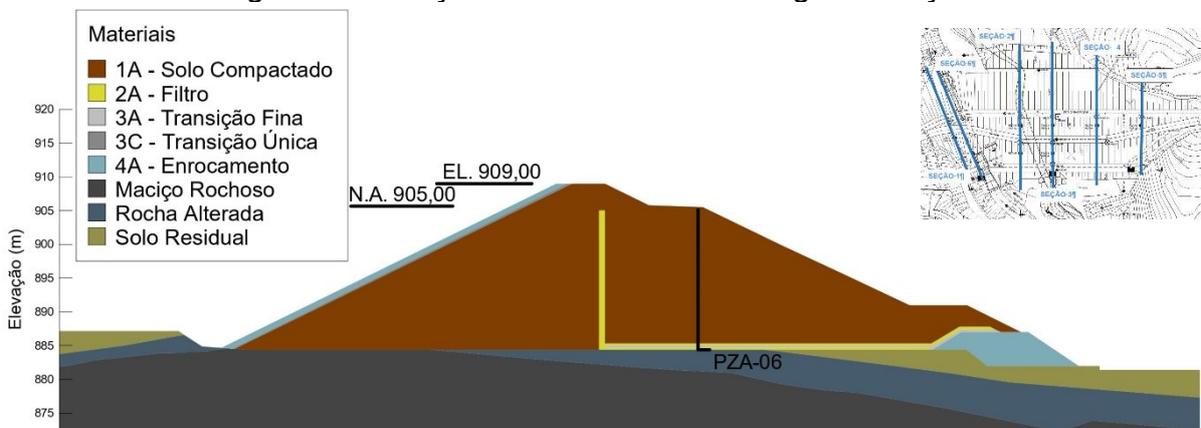
Figura 3-17 Seções de Análise da Barragem - Seção 5



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

A seção 6 abrange o piezômetro PZA-06 e é exibida na Figura 3-18, sendo composta pelos materiais: 1A – Solo Compactado; 2A – Filtro; 3A – Transição Fina; 3C – Transição Única; 4A – Enrocamento; Maciço Rochoso; Rocha Alterada e Solo Residual.

Figura 3-18 Seções de Análise da Barragem - Seção 6



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Para cada um dos materiais foram atribuídos os parâmetros necessários para as análises. Um resumo é encontrado no Quadro 3-13. Não foram delimitados parâmetros para o maciço rochoso pois não foi prevista falha nem percolação pelo maciço.

Quadro 3-13 Parâmetros dos Materiais

Material	Peso específico saturado γ (kN/m ³)	Ângulo de Atrito Φ (°)	Coesão C (kPa)	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)
Solo Coluvionar (SPT \geq 6) (silte argiloso)	17,0	30,0	5,0	2,80E-08
Solo Coluvionar Superficial Ombreira Esquerda (SPT<6) (silte argiloso)	17,0	22,0	5,0	2,80E-07

Material	Peso específico saturado γ (kN/m ³)	Ângulo de Atrito Φ (°)	Coesão C (kPa)	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)
Solo Aluvionar (argila mole)	15,0	10,0	15,0	2,40E-05
Solo Residual/Alteração rocha (silte argiloso)	17,0	30,0	10,0	1,70E-05
1A – Solo Compactado	19,63	27	15,0	1,20E-07
2A – Filtro	20,59	30	0	2,52E-02
3A – Transição fina	21,00	35	0	2,44E+01
3C – Transição única	21,00	35	0	2,44E+01
4A – Enrocamento	21,00	40	0	2,44E+01

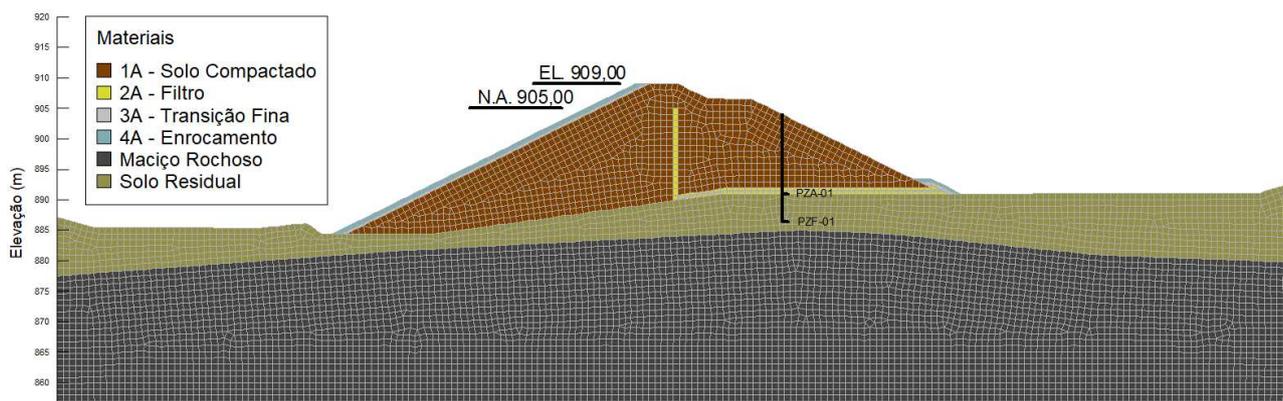
Fonte: Projeto Executivo Barragem M e Cruz (1996)

3.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O Método de Elementos Finitos foi delimitado para a elaboração da análise de percolação. Ele segue todas determinações conforme item 2.6.1 - Elementos Finitos e Percolação. Para realizar avaliações de percolação com o recurso SEEP/W do software GeoStudio®, é essencial inserir os parâmetros hidráulicos do solo. Isso inclui tanto a permeabilidade quanto a anisotropia do material. O único material que foi considerada anisotropia foi o 1A – Solo Compactado, com relação $k_y/k_x = 0,25$, devido à compactação do material e sua permeabilidade. As camadas de compactação em interação com os equipamentos utilizados para compactar, geram a anisotropia. Portanto para os outros materiais considerou-se a relação $k_y/k_x = 1,00$, uma vez que os materiais são mais permeáveis e a compactação não afeta significativamente sua permeabilidade.

Foi selecionado o regime permanente de percolação para a análise, sem aplicação de tempo de duração (0 seg). A malha de nós para todas as seções foi delimitada para ter elementos de cerca de 1 m de comprimento. A seguir na Figura 3-19 é mostrada a malha de pontos da Seção 1, de modo a exemplificar o que foi elaborado em software. procurou-se diminuir o comprimento dos elementos para que fosse aumentada a acurácia, todavia o hardware do computador não suportou. Porém, ressalta-se que mesmo com 1 m de tamanho para os elementos, a análise da Seção 1 foi realizada com 8275 nós e 8100 elementos.

Figura 3-19 Exemplo de malha de pontos – Seção 1



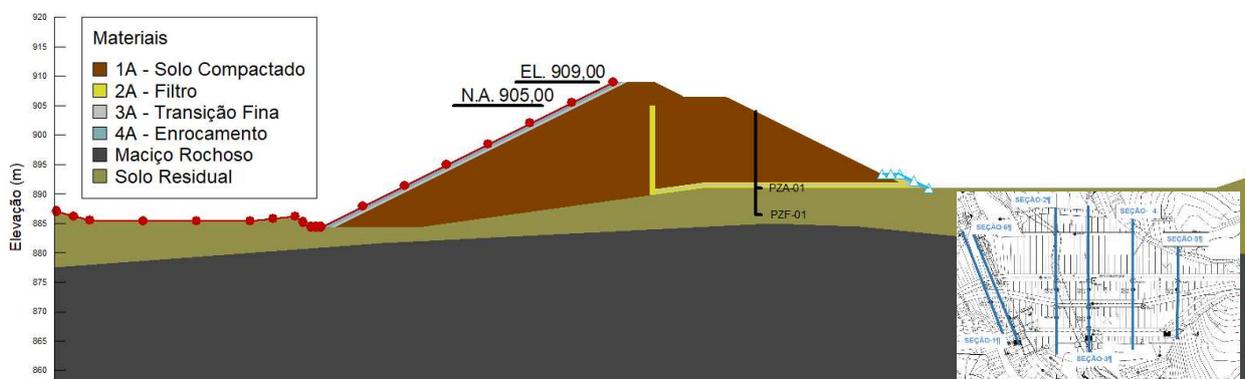
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

3.7 ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO DAS SEÇÕES

A análise de percolação teve as condições de contorno delimitadas para cada uma das seções. A condição de contorno padrão para montante foi o N.A. Máximo Normal = 905 m, ou seja, a carga d'água nessa altitude. Para jusante foram delimitadas condições diferenciadas para cada seção, uma vez que algumas elevações da berma final ou do dreno de pé eram maiores que o N.A. de jusante = 885,45 m.

Na Seção 1 o ponto mais a jusante do espaldar situa-se na cota aproximada de 890,0 m. Assim foi necessário delimitar uma condição de contorno permeável para a superfície externa do dreno de pé e adotou-se o N.A. de jusante nos elementos finais do solo de fundação a jusante. A motivação para não aplicar o N.A. de jusante no dreno de pé é que, nessa posição, a condição do N.A. seria imposta muito próxima do maciço rochoso. A Figura 3-20 apresenta a posição das condições de contorno utilizadas.

Figura 3-20 Condições de Contorno – Seção 1

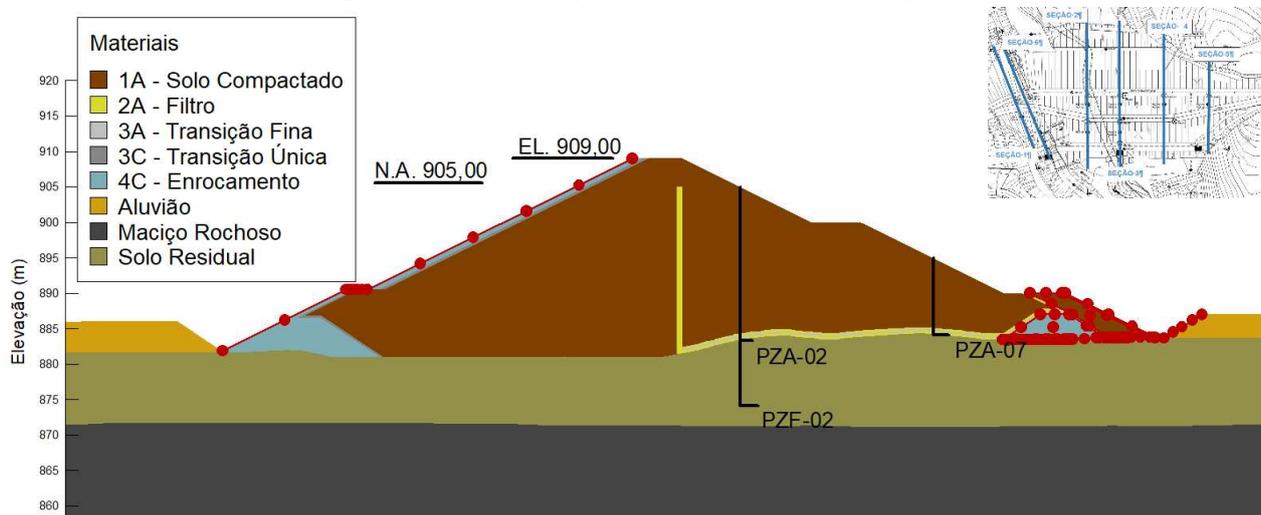


Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Na Seção 2, o ponto mais a jusante da barragem situa-se abaixo do N.A. de jusante. Assim, delimitou-se o N.A. de jusante para a superfície do material Aluvião, bem como para as regiões de enrocamento de dreno de pé e berma final de aterro compactado. Para tanto,

considerou-se que essas regiões estariam comunicando-se no mesmo N.A. uma vez que a permeabilidade do enrocamento é muito maior que a permeabilidade dos materiais a montante. A Figura 3-21 apresenta a posição das condições de contorno utilizadas.

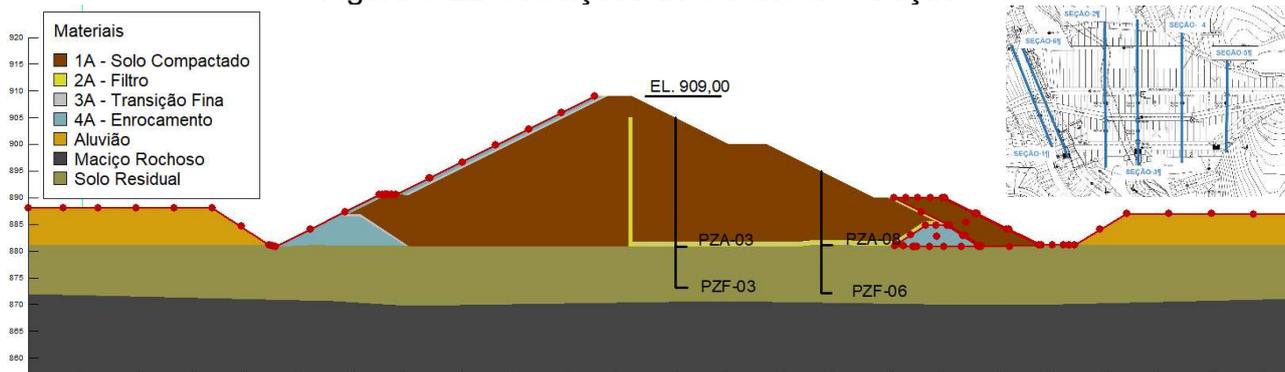
Figura 3-21 Condições de Contorno – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

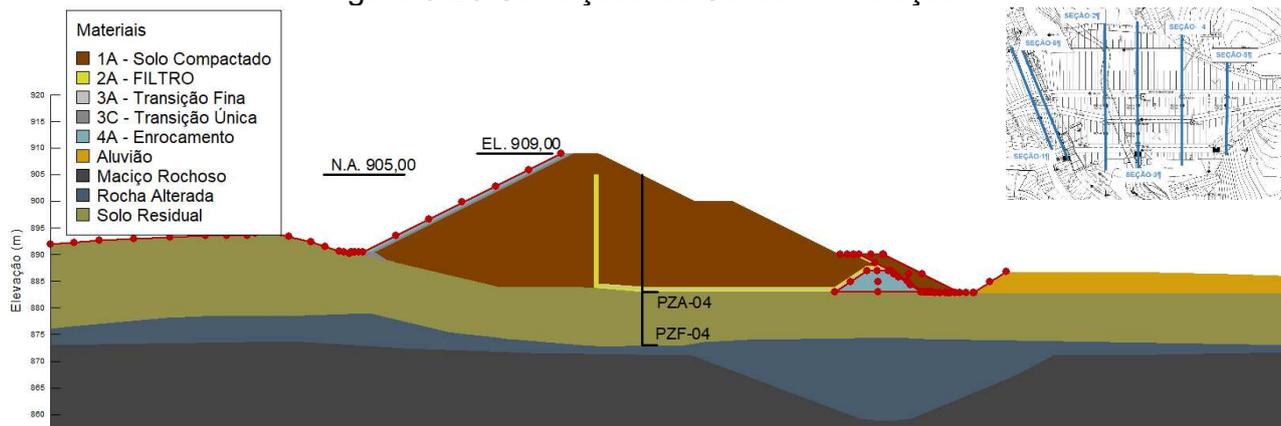
Na Seção 3 e na Seção 4, foram aplicadas as mesmas condições de contorno com as mesmas justificativas delimitadas à Seção 2. A Figura 3-22 apresenta a posição das condições de contorno utilizadas na Seção 3 e a Figura 3-23 mostra as delimitações na Seção 4.

Figura 3-22 Condições de Contorno – Seção 3



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

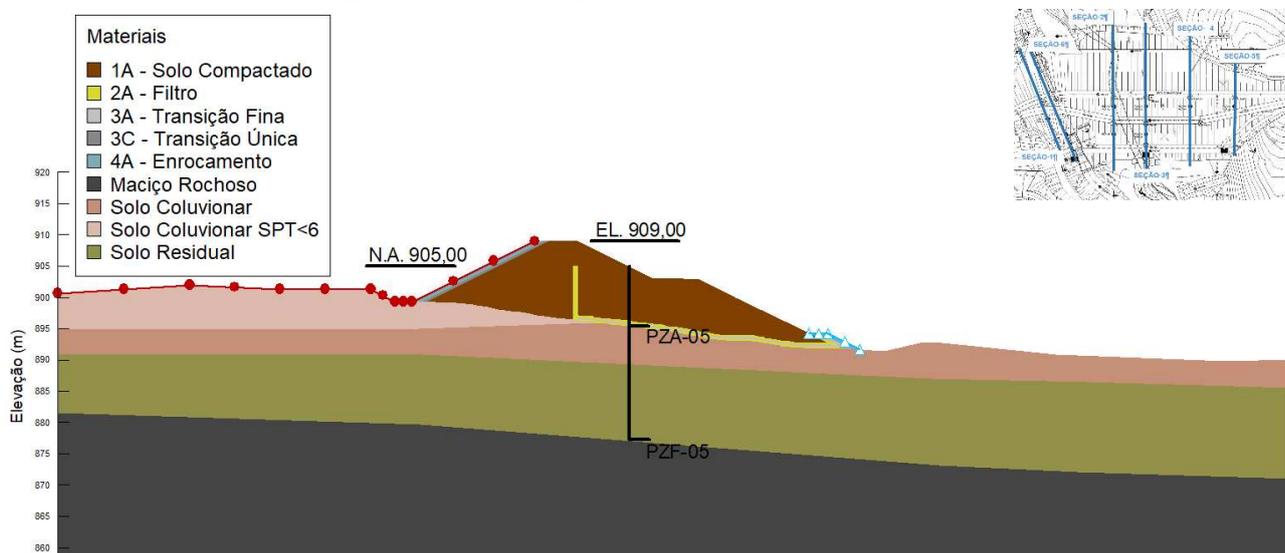
Figura 3-23 Condições de Contorno – Seção 4



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

O ponto mais a jusante do barramento pode ser encontrado em torno de 891,5 m de altitude na Seção 5. Portanto, era imperativo estabelecer a condição de contorno permeável para o exterior do dreno vertical, tal qual na seção 1, e o N.A. de jusante, que se estende até os últimos componentes do solo de fundação rio abaixo. O motivo da não utilização do N.A. de jusante no pé do talude se dá em razão de distorções deletérias causadas pelo mesmo. A posição das condições de contorno aplicadas é ilustrada na Figura 3-24.

Figura 3-24 Condições de Contorno – Seção 5

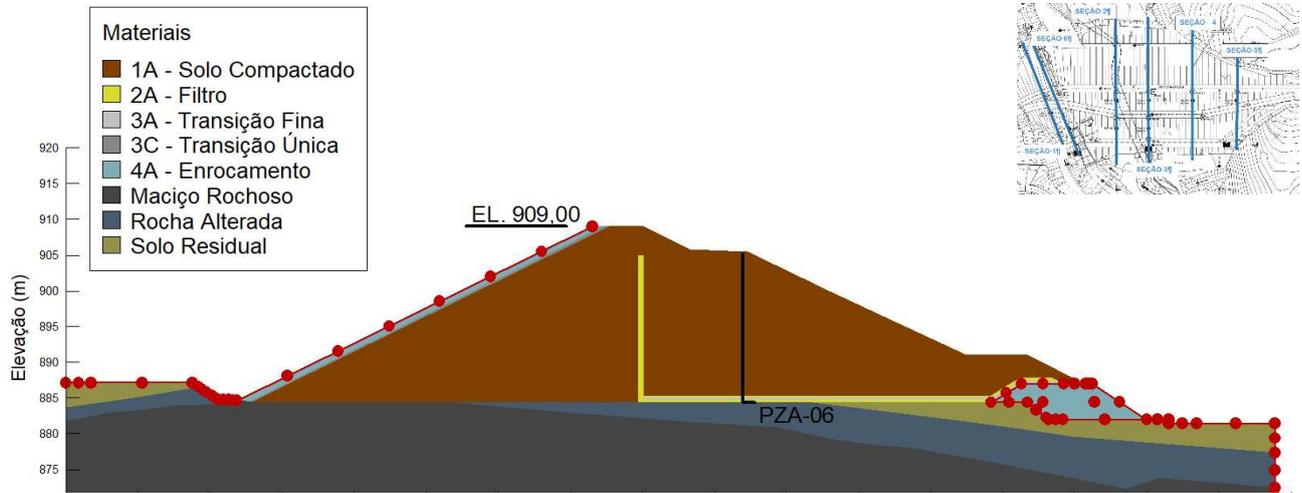


Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Na Seção 6, tal como na Seção 2, o ponto mais a jusante da barragem situa-se abaixo do N.A. de jusante. Assim, delimitou-se o N.A. de jusante para a superfície do material coluvionar, para as regiões de enrocamento de dreno de pé e berma final de aterro compactado. Para tanto, considerou-se que essas regiões estariam se comunicando no mesmo N.A. uma vez que o enrocamento é significativamente mais permeável que os

materiais anteriores. A Figura 3-25 apresenta a posição das condições de contorno utilizadas.

Figura 3-25 Condições de Contorno – Seção 6



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* SEEP/W 2007

Foram realizadas as análises e seus resultados estão dispostos em capítulo específico.

3.8 VERIFICAÇÃO DE GRADIENTE DE SAÍDA

Visou-se a avaliação de segurança ante erosões internas. Foram utilizadas as equações (4), (5) e (6). O material crítico de uso será o 1A – solo compactado. Assim, obteve-se por meio da análise do *software* SEEP/W 2007 realizada anteriormente o valor do gradiente de saída para cada seção. O valor do Peso específico saturado do material crítico “1A – solo compactado” é $\gamma = 19,63 \text{ kN/m}^3$. Desse modo, utilizando o peso específico da água $\gamma_w = 9,78 \text{ kN/m}^3$, obteve-se:

$$i_{cr} = \frac{19,63 - 9,78}{9,78} = 1,01$$

Foram calculados os FS's e seus resultados estão dispostos em capítulo específico.

3.9 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE

O Método de Equilíbrio Limite foi aplicado para elaboração da análise de estabilidade. Este método segue todas as determinações conforme item 2.6.3 Equilíbrio Limite e Estabilidade. Para avaliar a estabilidade de taludes com o recurso SLOPE/W do *software* GeoStudio®, é necessário fornecer os parâmetros de caracterização e resistência do solo. São eles: Peso específico saturado γ (kN/m^3); Ângulo de Atrito Φ ($^\circ$) e Coesão c (kPa).

Foi selecionado Spencer como o método de análise padrão. A superfície de pesquisa também foi padronizada, de modo a se especificar região de pontos de entrada e pontos de saída. Delimitou-se 25 pontos para cada uma dessas regiões. O número de fatias para cada análise restringiu-se em 30, bem como a profundidade mínima da superfície de ruptura delimitada em 0,1 m.

Previamente à análise de estabilidade em fatores críticos, obteve-se o N.A. resultante da análise de percolação. Delimitou-se, então, um ponto de partida para as análises visando encontrar valores de controle. Os resultados finais foram organizados em um capítulo dedicado.

3.10 ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE ATENÇÃO

Para a realização da análise de estabilidade para o valor de controle Atenção, primeiramente foi delimitado em cada uma das seis seções que o filtro operava em carga com gradiente hidráulico de 5% para o tapete drenante e materiais acima do tapete. Após, de modo iterativo, foi sendo aumentado o nível da linha freática dos materiais abaixo do filtro, buscando induzir uma redução do fator de segurança. O processo foi finalizado ao encontrar $FS=1,50$ ou saturação máxima considerada no barramento. A partir do disposto foram calculados os FS's e seus resultados estão dispostos em capítulo específico, junto do resultado das iterações.

3.11 ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE ALERTA

A análise de estabilidade para o Valor de Controle de Alerta foi realizada para cada uma das seções. Para o componente de Alerta, foram considerados os mesmos materiais utilizados nas análises anteriores. No entanto, um filtro horizontal operando em carga com gradiente hidráulico de 15% foi implementado e em materiais acima do filtro. Enquanto isso, a linha piezométrica para os materiais subjacentes foi gradualmente elevada até atingir um FS de 1,40 ou saturação máxima considerada no barramento. Desse modo, a iteração final com seu FS e sua linha piezométrica foi apresentada em um capítulo dedicado.

3.12 ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE EMERGÊNCIA

Cada uma das seis seções foi submetida a uma análise de estabilidade, visando à obtenção de valores de controle de Emergência. Foram adotados, para a análise relacionada ao controle de emergência, materiais com mesmas características que os

materiais adotados para as análises já detalhadas. No entanto, foi feita uma alteração adicionando um tapete drenante operando em carga com gradiente hidráulico de 20%. Os materiais situados abaixo do componente drenante sofreram uma elevação gradual do nível freático até atingir um FS de 1,30 ou a saturação máxima considerada. Os cálculos dos FS's foram computados e organizados em um capítulo dedicado, juntamente com os resultados das iterações.

3.13 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA CADA PIEZÔMETRO

Com os resultados das iterações, dividiu-se os piezômetros em dois grupos:

- Grupo 1 - refere aos PZA's. São os piezômetros que foram instalados no filtro horizontal. Para esses, foi considerado como os valores de Atenção, Alerta e Emergência as alturas de coluna d'água do gradiente hidráulico especificado para cada um dos filtros.
- Grupo 2 – refere-se aos PZF's. São os Piezômetros instalados na fundação do barramento que o aumento do nível freático foi capaz de reduzir o FS aos valores previamente delimitados. Para esses, foi considerado como os valores de Atenção, Alerta e Emergência as alturas de coluna d'água referente ao nível freático iterado em casa caso.

4 RESULTADOS

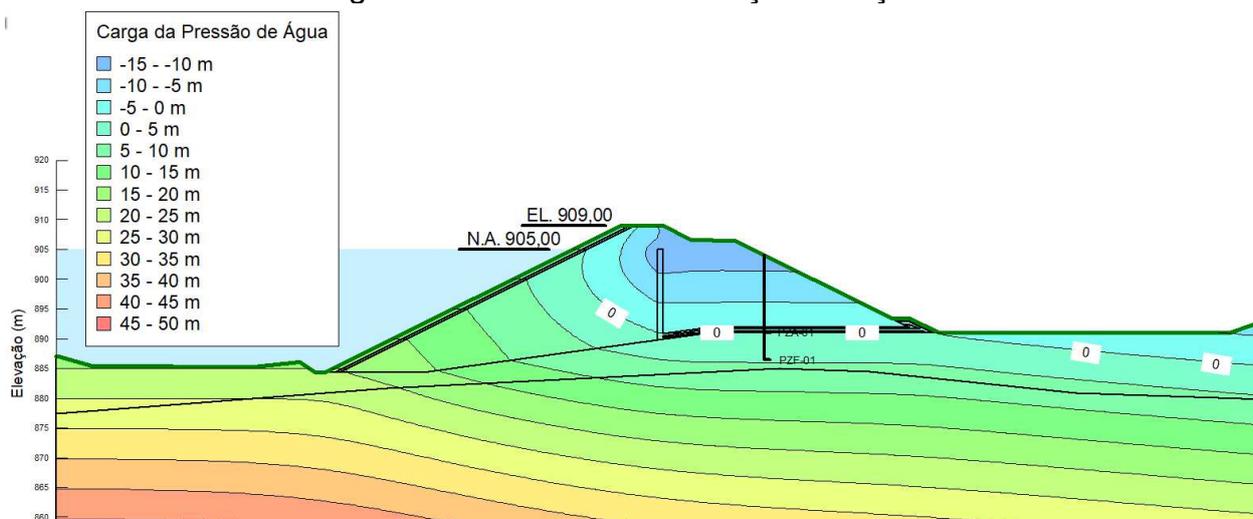
Buscou-se sintetizar os principais resultados de discussões apresentadas ao longo do trabalho, seguindo o disposto procedimento metodológico.

4.1 ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO DAS SEÇÕES

Com as Seções elaboradas e seus parâmetros definidos, seguindo a padronização previamente disposta, analisou-se a percolação do barramento. O objetivo dessa análise é fornecer N.A. de operação normal para ser utilizado como ponto de partida para as análises de estabilidade que seguem e fornecer os gradientes de saída para verificação.

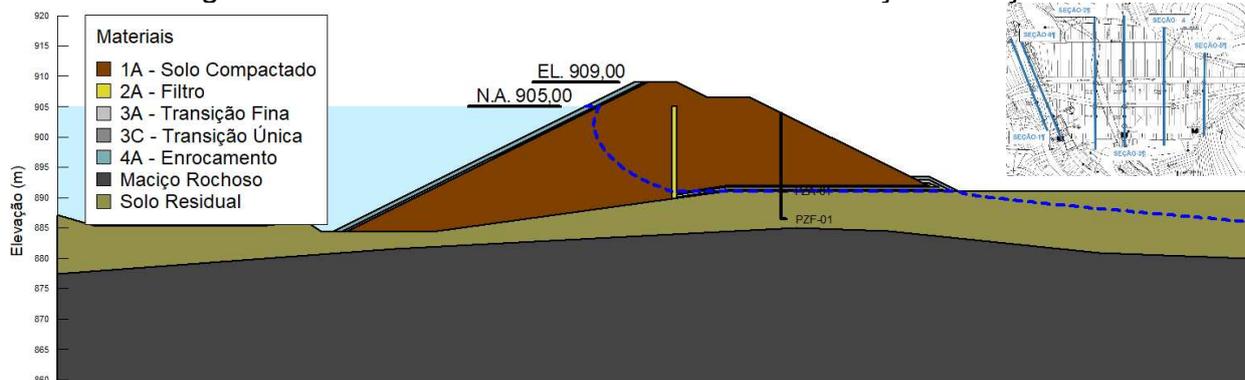
A seguir, na Figura 4-1 é apresentada a carga de pressão de água na seção 1. Na Figura 4-2 revela-se o N.A. para ser utilizado como ponto de partida na análise de estabilidade. A partir da análise realizada, pode-se afirmar que, em condição normal, o filtro projetado detém de dimensionamento capaz de dissipar suficientemente as poropressões no maciço, visto que o N.A. surge no tapete drenante ou em camada inferior

Figura 4-1 Análise de Percolação – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

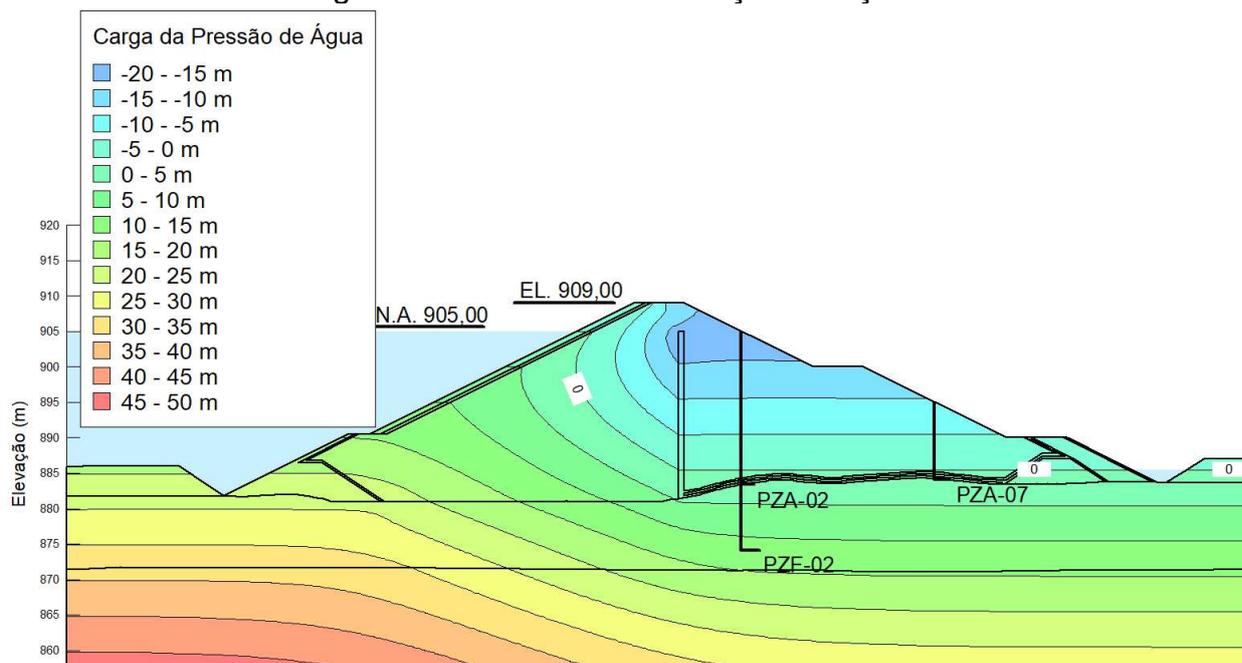
Figura 4-2 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

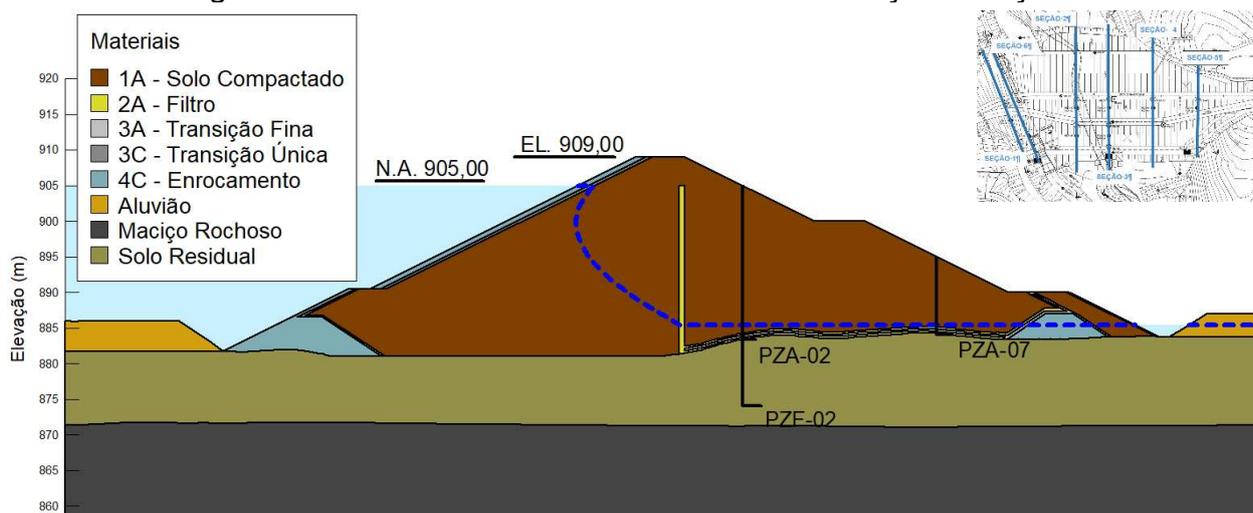
Em seguida, a carga hidráulica para a seção 2 é mostrada na Figura 4-3. Na Figura 4-4, o N.A. usado como ponto de partida para a análise de estabilidade é exibido. Pode-se dizer que, em condições normais, o filtro é projetado para ter um tamanho capaz de dissipar adequadamente a pressão dos poros. Embora o N.A. ocorra no nível ou pouco acima do tapete drenante, o dispositivo é encontrado na cota do N.A. de jusante, justificando assim sua sobre-elevação.

Figura 4-3 Análise de Percolação – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Figura 4-4 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 2

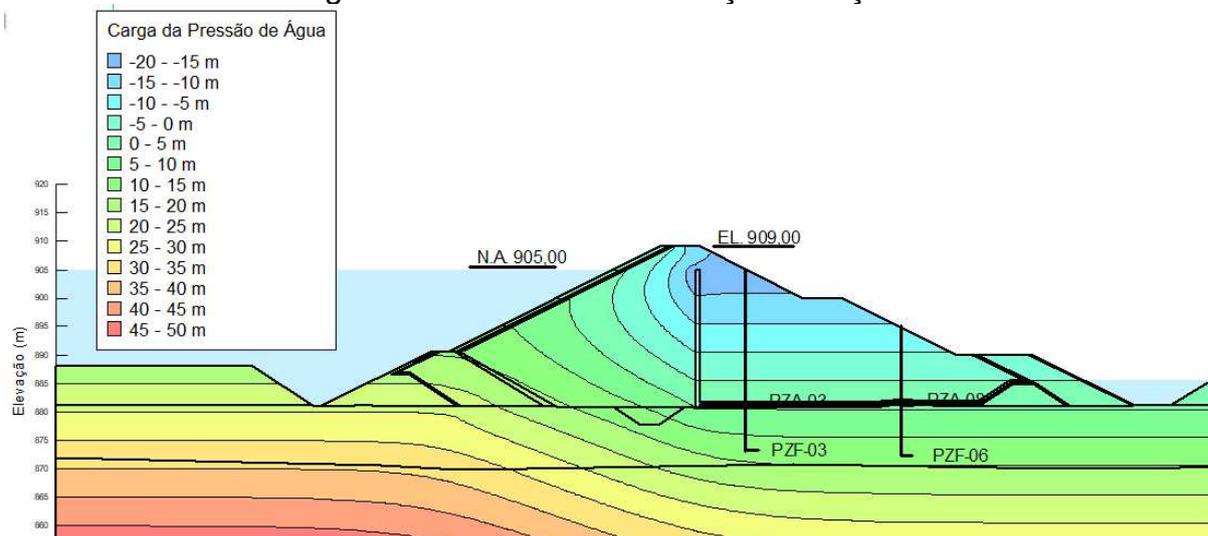


Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Desta forma, o carregamento hidráulico da Seção 3 é mostrado na Figura 4-5. Na Figura 4-6, o N.A. mostrado é a superfície usada como ponto de partida para a análise de estabilidade. Pode-se dizer que, em condições normais, os filtros são projetados para ter

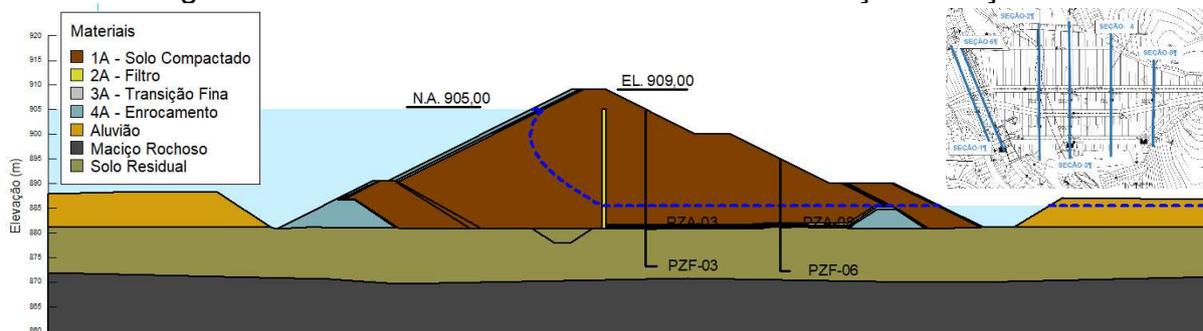
dimensões que dissipem adequadamente a poropressão, embora o N.A. ocorra no Filtro horizontal um pouco acima dele. Isso se deve ao fato de estar majoritariamente na cota de N.A. de jusante, justificando assim seu excesso.

Figura 4-5 Análise de Percolação – Seção 3



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

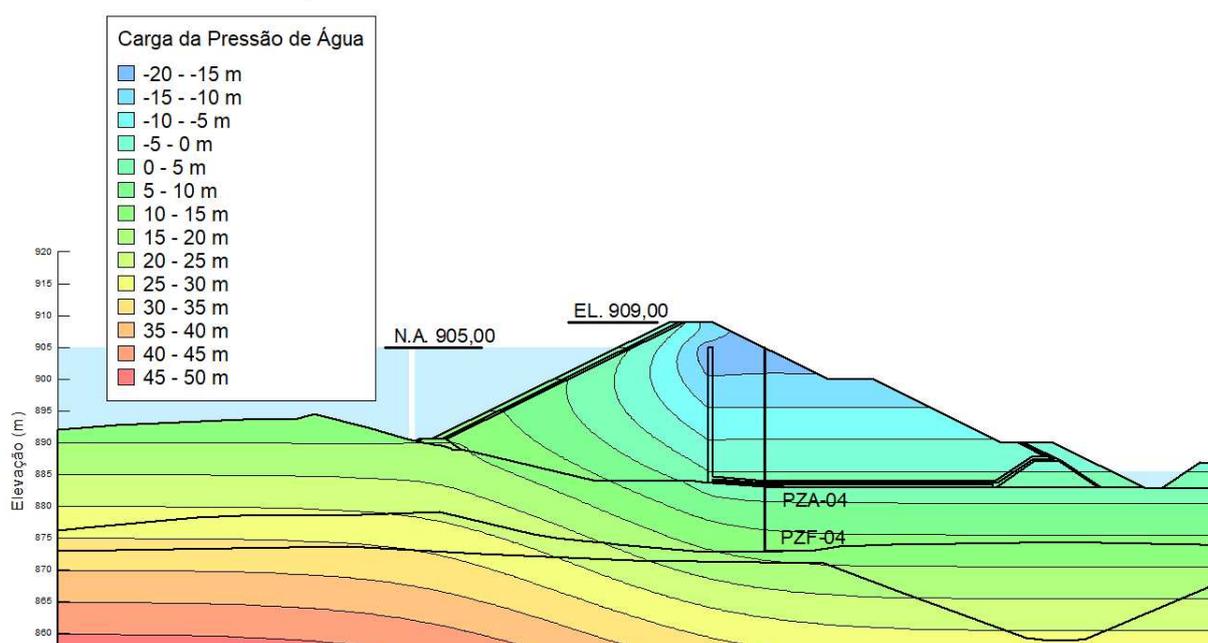
Figura 4-6 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 3



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

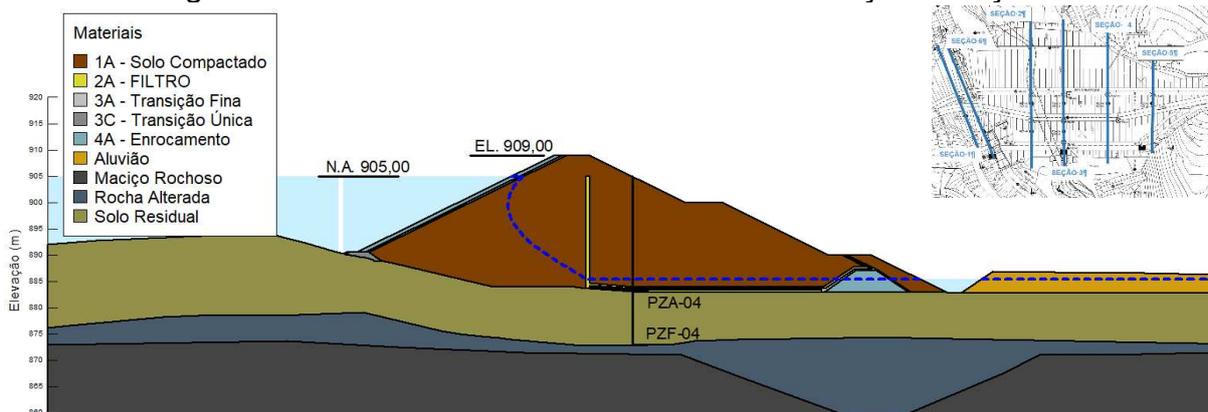
A Figura 4-7 ilustra a carga de pressão de água presente na seção 4, enquanto a Figura 4-8 mostra o ponto de partida para a análise de estabilidade, ou seja, o N.A. resultante. É razoável afirmar que, em circunstâncias típicas, as dimensões do filtro são adequadas para a dissipação de poropressões dentro do maciço. No entanto, o Filtro Horizontal experimenta um N.A. logo acima dele. Esse excesso é justificado porque a cota de N.A. a jusante é maior que a posição do filtro, influenciando no resultado.

Figura 4-7 Análise de Percolação – Seção 4



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

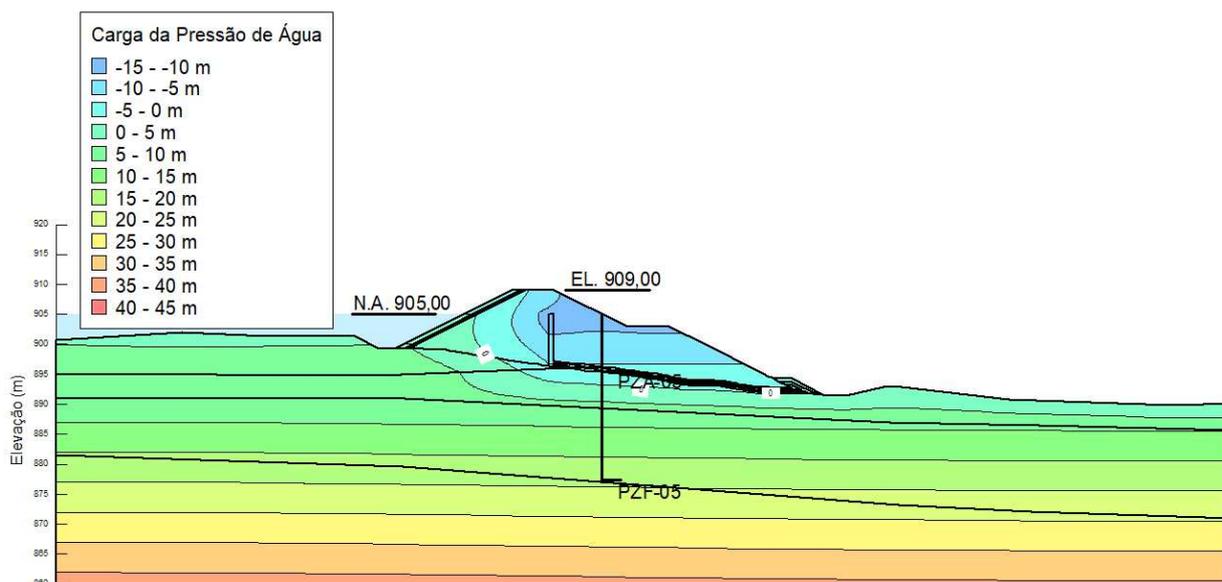
Figura 4-8 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 4



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

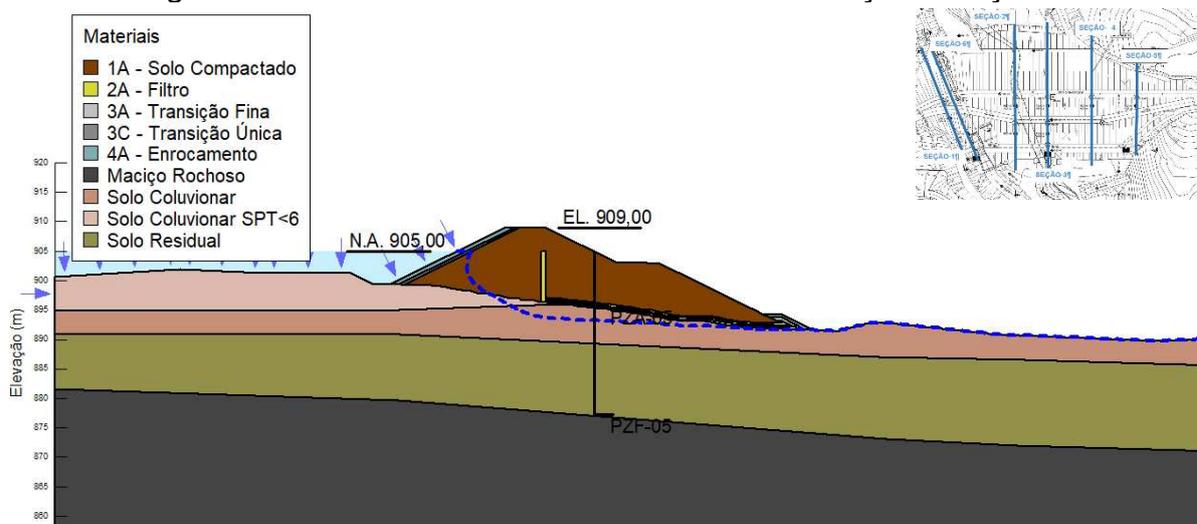
Na Figura 4-9, pode-se observar a carga de pressão de água presente na seção 5. Passando para a Figura 4-10, ilustra-se o ponto de partida para a análise de estabilidade: o N.A. resultante da análise de percolação. É seguro dizer que os filtros foram projetados adequadamente para acomodar as poropressões em circunstâncias normais, com dimensões que garantem dissipação suficiente, uma vez que o N.A. é encontrado abaixo do filtro.

Figura 4-9 Análise de Percolação – Seção 5



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

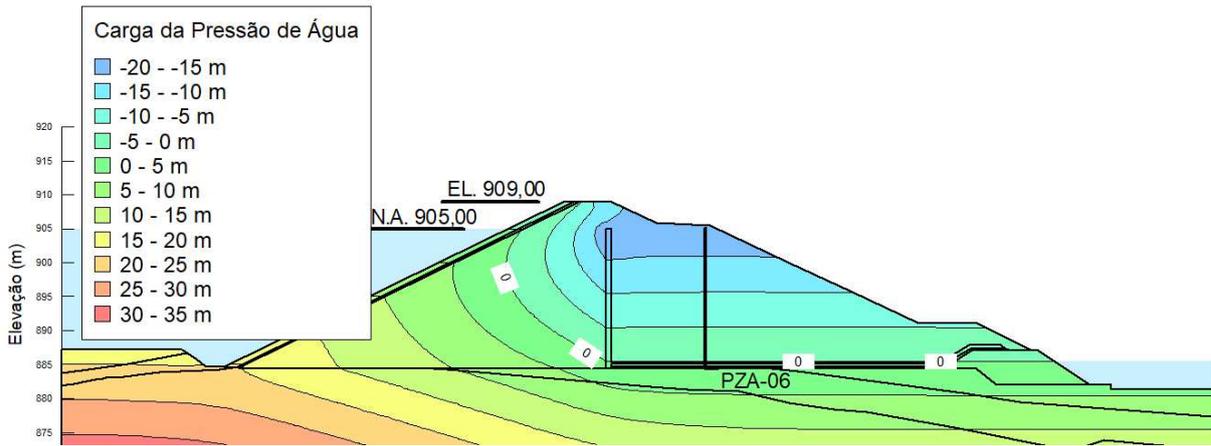
Figura 4-10 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 5



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

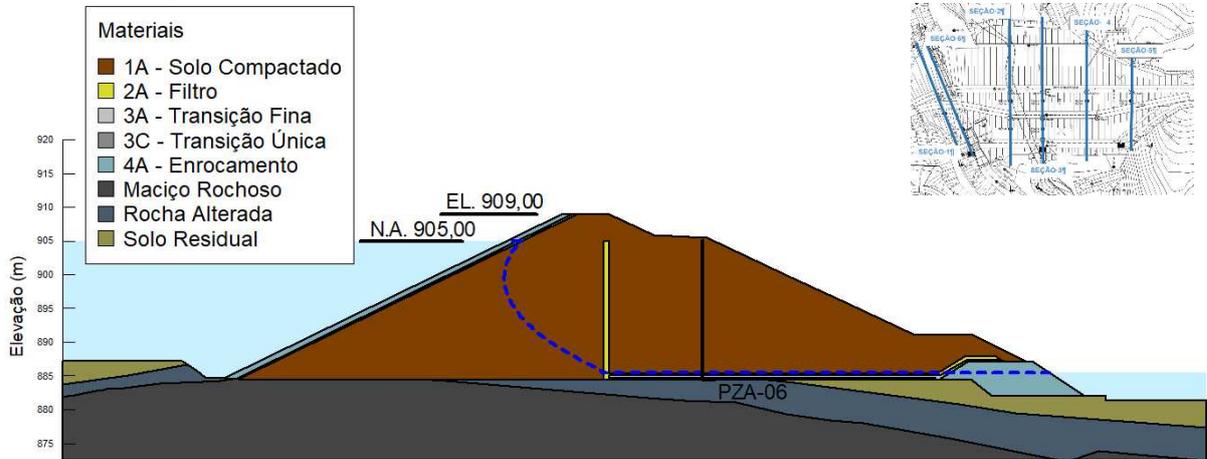
A Figura 4-11 mostra a carga de pressão de água presente na seção 6. Da mesma forma, a Figura 4-12 mostra o N.A. que servirá como ponto de partida para a análise de estabilidade. Encontrou-se N.A. na altura do filtro horizontal, assim, define-se que o filtro possui capacidade para dissipar a pressão dos poros em condições normais.

Figura 4-11 Análise de Percolação – Seção 6



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* SEEP/W 2007

Figura 4-12 N.A. Resultante da Análise de Percolação – Seção 6

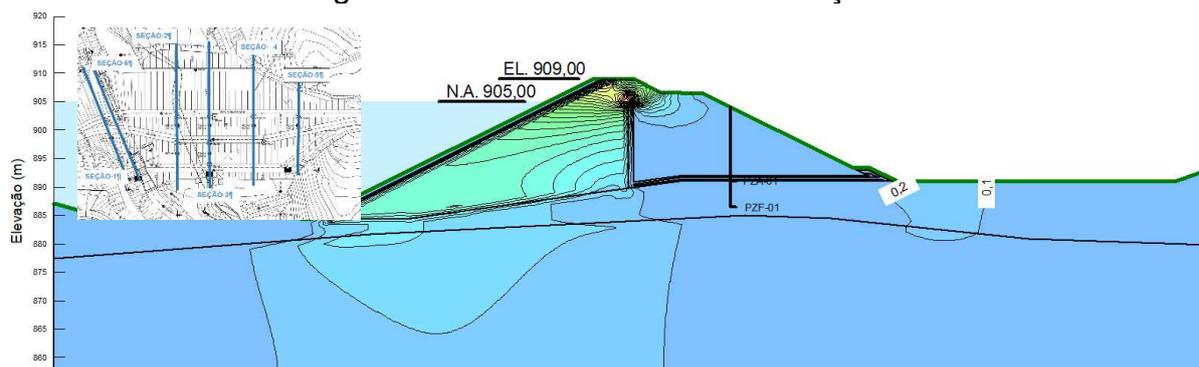


Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* SEEP/W 2007

4.2 VERIFICAÇÃO DE GRADIENTE DE SAÍDA

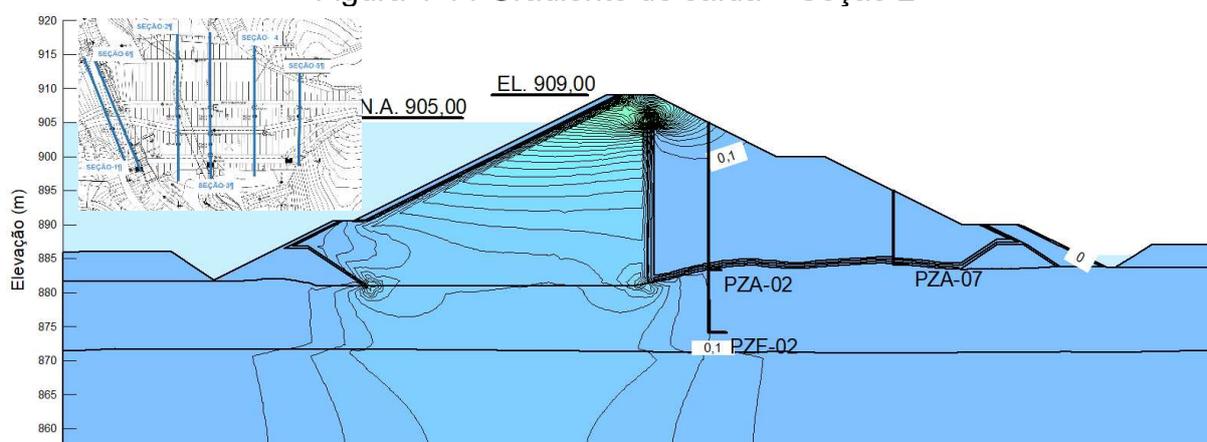
As seções e seus valores de gradientes de saída são apresentados a seguir em Figura 4-13, Figura 4-14, Figura 4-15, Figura 4-16, Figura 4-17 e Figura 4-18. São resultados da análise de percolação realizada.

Figura 4-13 Gradiente de saída – Seção 1



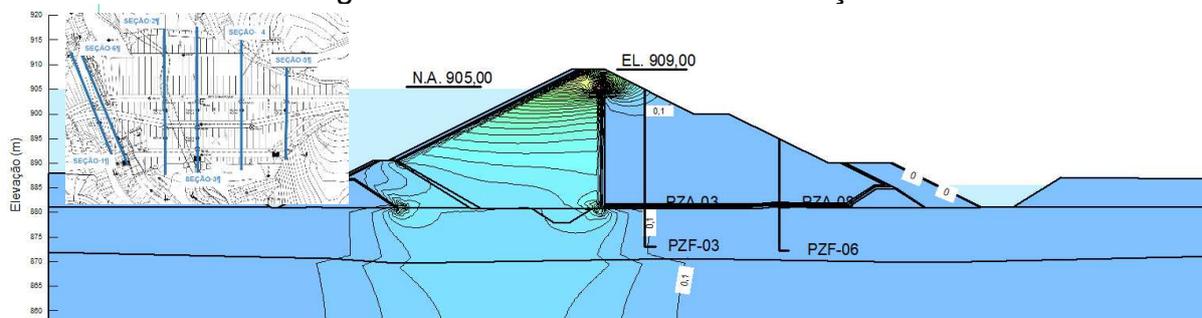
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Figura 4-14 Gradiente de saída – Seção 2



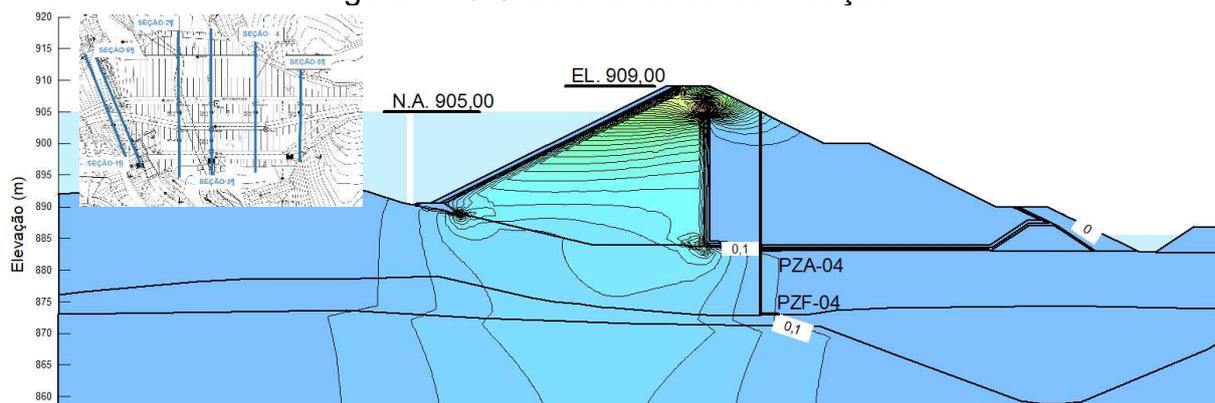
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Figura 4-15 Gradiente de saída – Seção 3



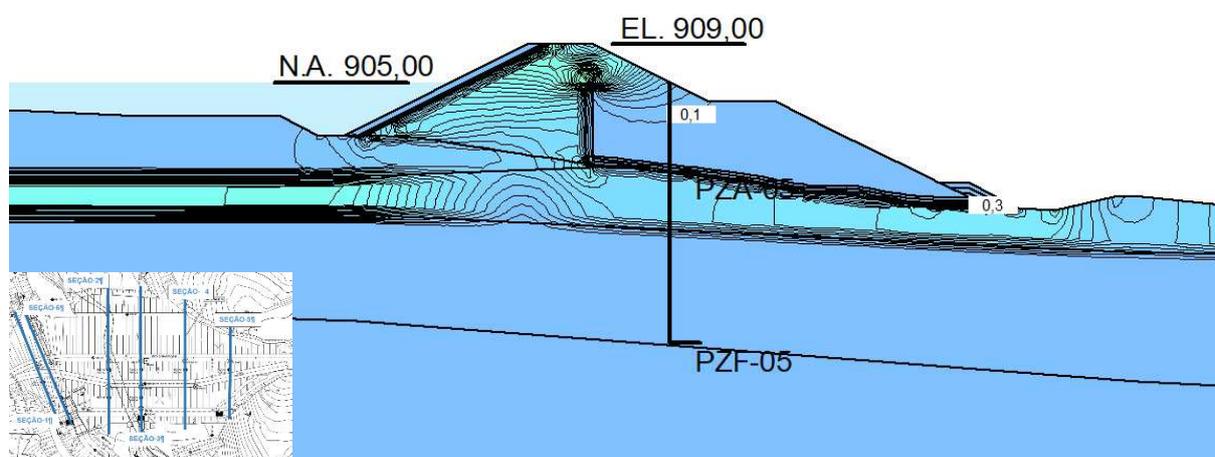
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Figura 4-16 Gradiente de saída – Seção 4



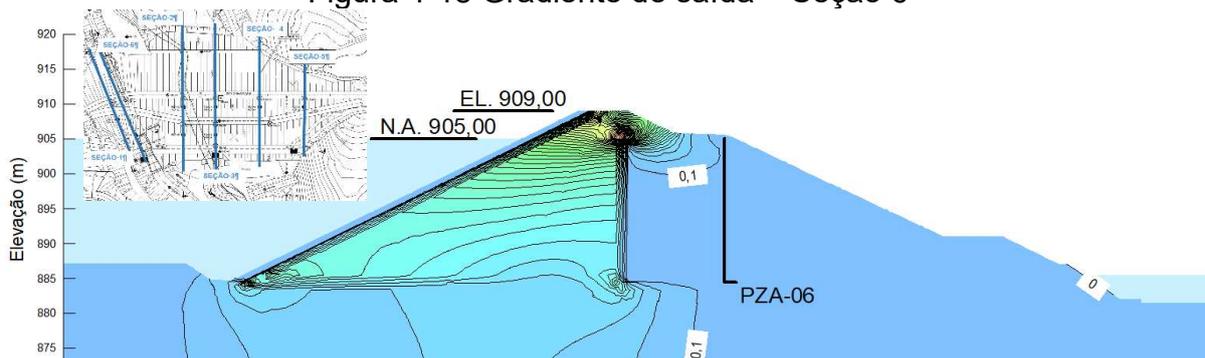
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Figura 4-17 Gradiente de saída – Seção 5



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Figura 4-18 Gradiente de saída – Seção 6



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SEEP/W 2007

Assim, delimita-se que os dois maiores gradientes de saída dos espaldares de jusante são 0,3 e 0,2, respectivamente para a seção 5 e para a seção 2. Utilizando-se da equação (6), o gradiente crítico já delimitado e os valores de gradiente de saída descobrem-se o fator de segurança quanto ao gradiente de saída.

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{saida}} = \frac{1,01}{0,3} = 3,37 \geq 3 \rightarrow \text{OK}$$

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{saída}} = \frac{1,01}{0,2} = 5,05 \geq 3 \rightarrow \text{OK}$$

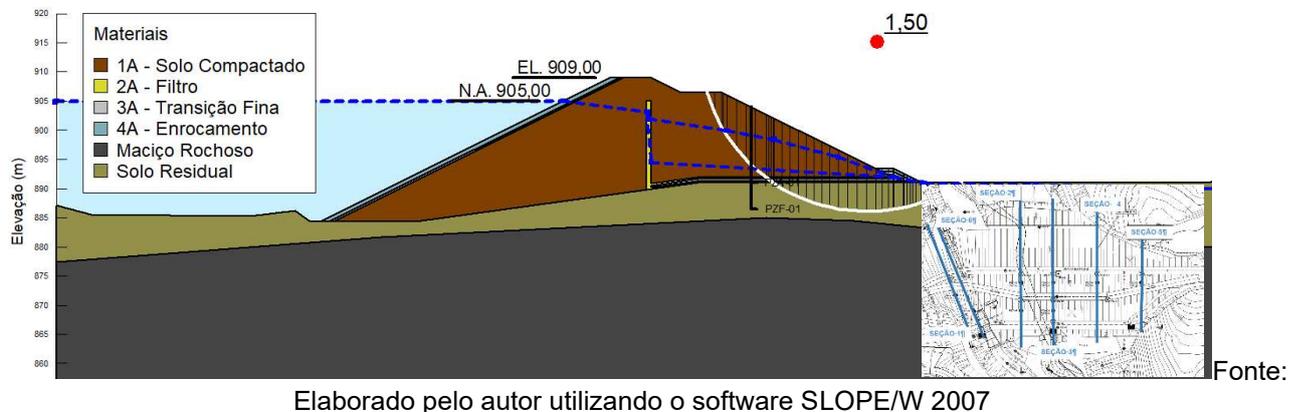
Assim, em condições normais de operação, segundo métodos dispostos, a Barragem não dispõe de predisposição à ocorrência de erosão interna.

4.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE ATENÇÃO

Partindo dos resultados da análise de percolação, realizou-se a análise de estabilidade levando em conta também os parâmetros comuns dispostos em 3.10 Análise de Estabilidade para Valor de Controle Atenção. Desse modo, foi delimitado o N.A. referente à operação em carga do filtro com gradiente de 5% e o segundo N.A. partiu do N.A. resultante de análise de percolação, sendo iterado o seu alteamento até encontrar o $FS = 1,50$.

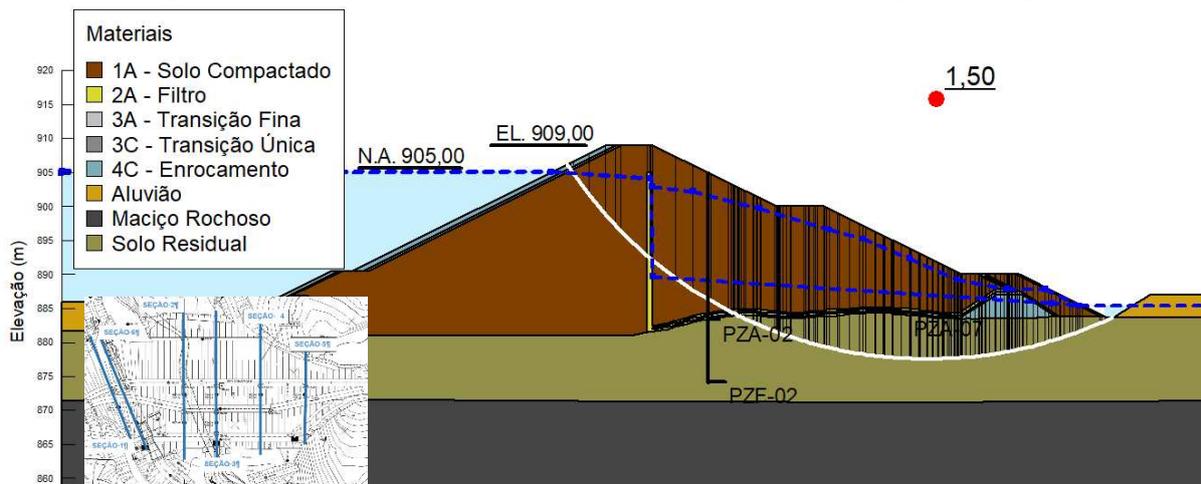
Na Figura 4-19 é ilustrado o resultado da iteração e da análise de estabilidade da seção 1. Portanto, o Valor de Controle para o PZA-01 é 893,43 m e para o PZF-01 é 899,15 m.

Figura 4-19 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 1



O resultado da iteração e análise de estabilidade para a seção 2 é apresentado na Figura 4-20. Como resultado desta análise, o valor de controle para o PZA-02 é determinado como 889,14 m, o PZF-02 como 901,69 m, enquanto o PZA-07 tem um valor de controle de 897,33m. O nível piezométrico iterado necessitou ser alteado significativamente, se comparado ao valor de operação normal. Isso se deve à geometria da seção 2, que possui duas bermas, sendo muito estável. Assim o alteamento do N.A. atua de modo a baixar o FS a 1,50.

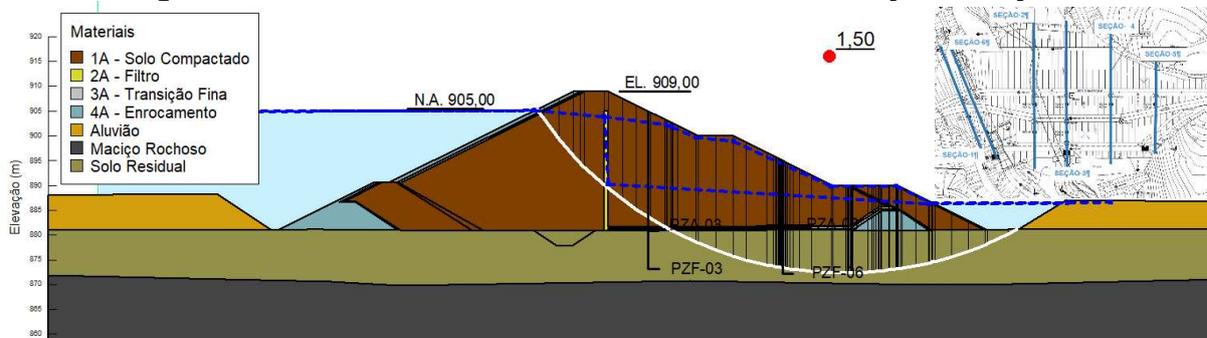
Figura 4-20 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

A Figura 4-21 mostra o resultado da iteração e análise de estabilidade conduzida na seção 3. A análise determinou valores de controle para PZA-03, PZF-03, PZA-08 e PZF-06 como 889,81 m, 902,75 m, 888,12 m e 894,24 m, respectivamente. Observou-se que o nível piezométrico iterado teve que ser substancialmente aumentado em comparação com o nível inicial. Isso pode ser atribuído à estabilidade da seção 3 devido à sua geometria, composta por duas bermas.

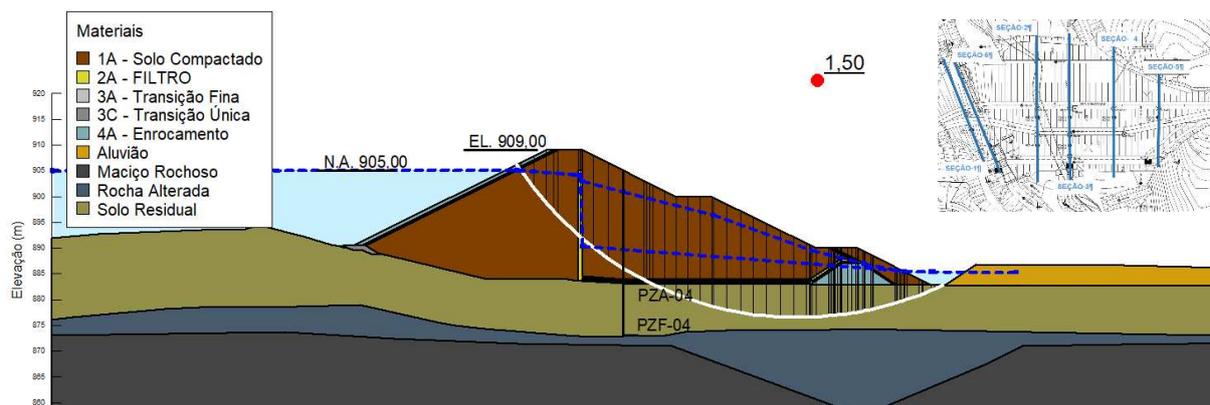
Figura 4-21 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 3



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

Os resultados da análise de estabilidade e da iteração conduzida na seção 4 estão representados na Figura 4-22. A análise produziu valores de controle de 889,68 m e 900,97 m para PZA-04 e PZF-04, respectivamente.

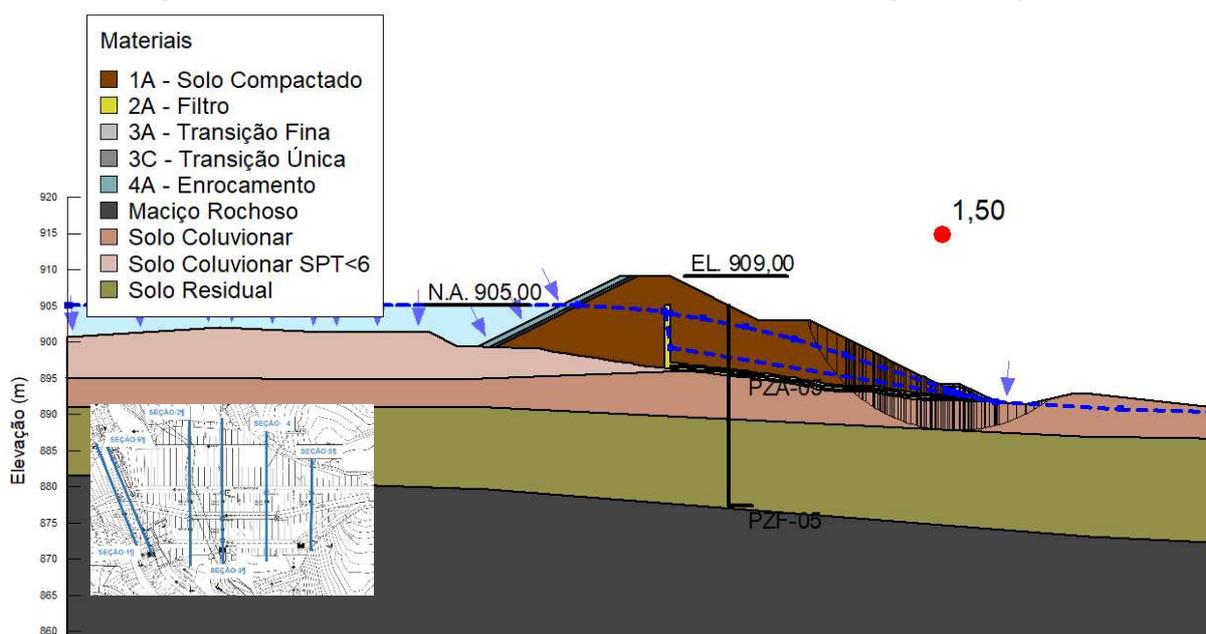
Figura 4-22 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 4



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

A Figura 4-23 exibe os resultados da análise de estabilidade juntamente com a iteração realizada na seção 5. Os valores de controle de PZA-05 e PZF-05 foram determinados como 897,86 m e 902,52 m, respectivamente, como resultado da análise. O gradiente aplicado no filtro foi adicionado à inclinação existente do tapete horizontal na seção 5, assim minorando o FS e servindo a favor da segurança.

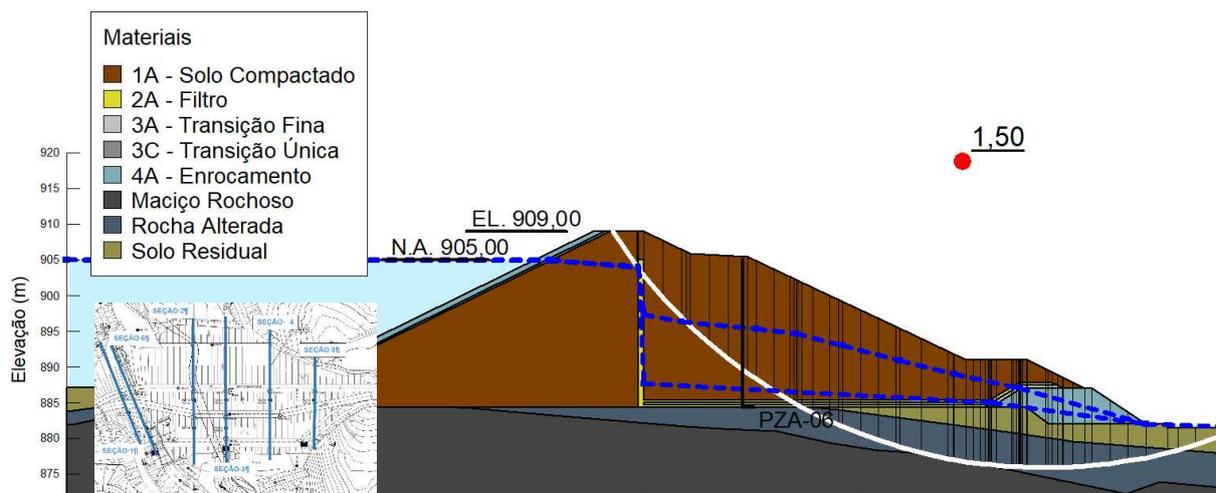
Figura 4-23 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 5



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

O resultado da iteração e análise de estabilidade para a seção 6 é mostrado na Figura 4-24. Como resultado, o valor de controle para o PZA-06 é 886,922 m.

Figura 4-24 Resultado Análise de Estabilidade - Atenção – Seção 6



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

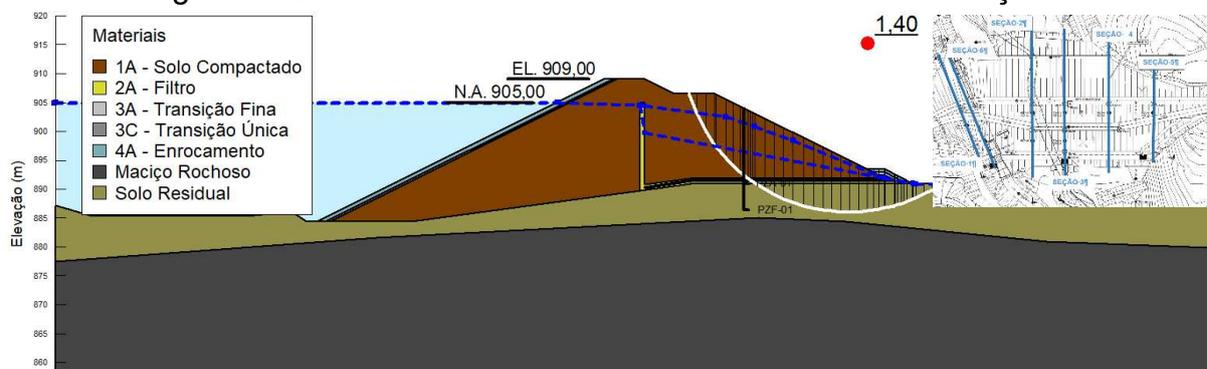
Ressalta-se que nessa etapa de análise de estabilidade somente a seção 3 se aproximou de uma saturação do maciço completa com respeito à cota de N.A. de montante.

4.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE ALERTA

Após a análise de estabilidade para valores de atenção, foi realizada uma análise de estabilidade, que considerou os parâmetros típicos descritos no subitem 3.11 Análise de Estabilidade para Valor de Controle Alerta. Isso envolveu a determinação do N.A. para operação do filtro sob uma carga de gradiente de 15%, bem como o ajuste do segundo N.A. até atingir um valor de FS de 1,40, a partir do N.A. obtido na análise de estabilidade para valor de controle atenção.

O resultado da iteração e da análise de estabilidade para a seção 1 é mostrado na Figura 4-25. Como resultado, o valor de controle alerta para PZA-01 é 896,47 m, enquanto o Valor de controle PZF-01 é 901,46 m.

Figura 4-25 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 1

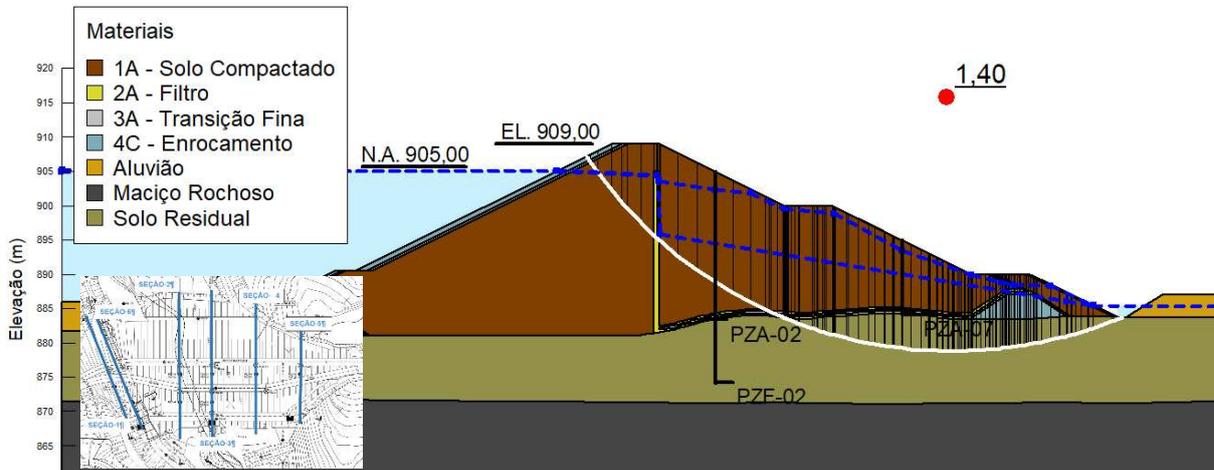


Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

A Figura 4-26 apresenta o resultado da análise de estabilidade e iteração para a seção 2. A análise resultou na determinação de valores de controle alerta para

PZA-02, PZF-02 e PZA-07 como 894,51 m, 902,32 m e 889,99 m, respectivamente. Para obter o FS de 1,4 o nível piezométrico iterado foi aumentado, de modo à saturação quase abranger todo o maciço abaixo do N.A. de montante.

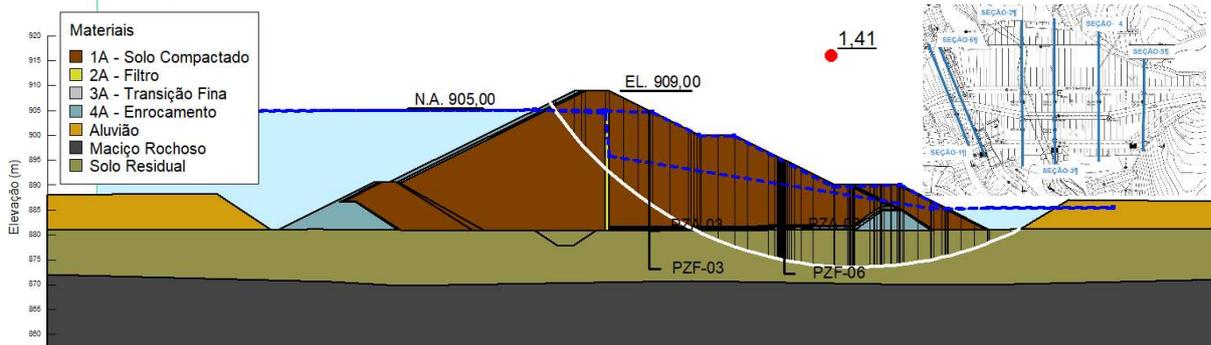
Figura 4-26 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

O resultado da análise de estabilidade e iteração descrita na Seção 3 pode ser observado na Figura 4-27. A análise levou à determinação dos valores de controle para PZA-03, PZF-03, PZA-08 e PZF-06, que foram 894,46 m, 904,68 m, 890,06 m e 894,70 m, respectivamente. Embora o nível piezométrico resultou em uma área totalmente saturada, delimitada pela elevação do N.A. a montante, o fator de segurança (FS) de 1,40 era inatingível, chegando ao limite de 1,41.

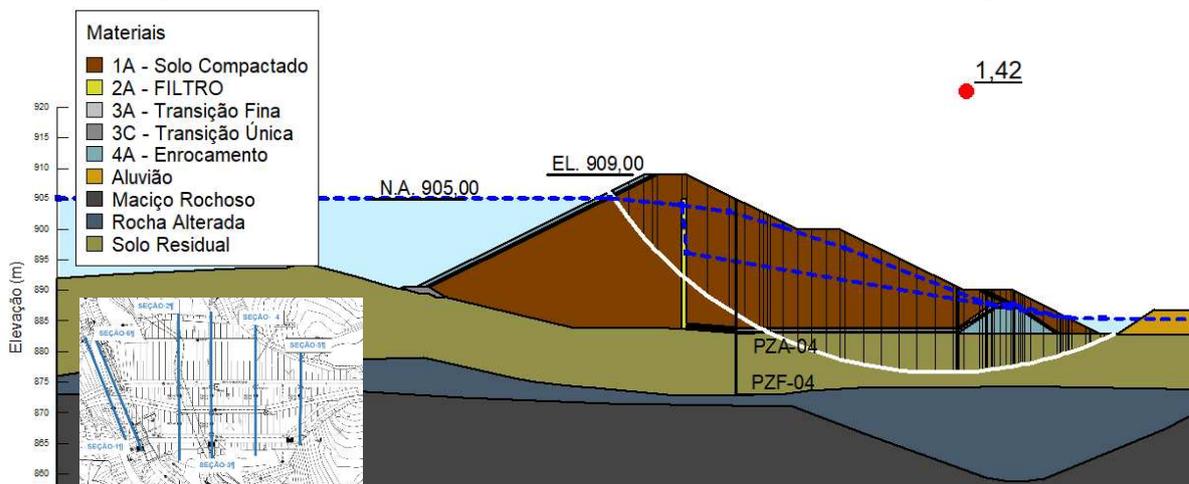
Figura 4-27 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 3



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

A Figura 4-28 exibe o resultado da análise de estabilidade e iteração discutida na seção 4. Os valores de controle para PZA-04 e PZF-04 foram determinados como 894,82 m e 902,52 m, respectivamente, como resultado da análise.

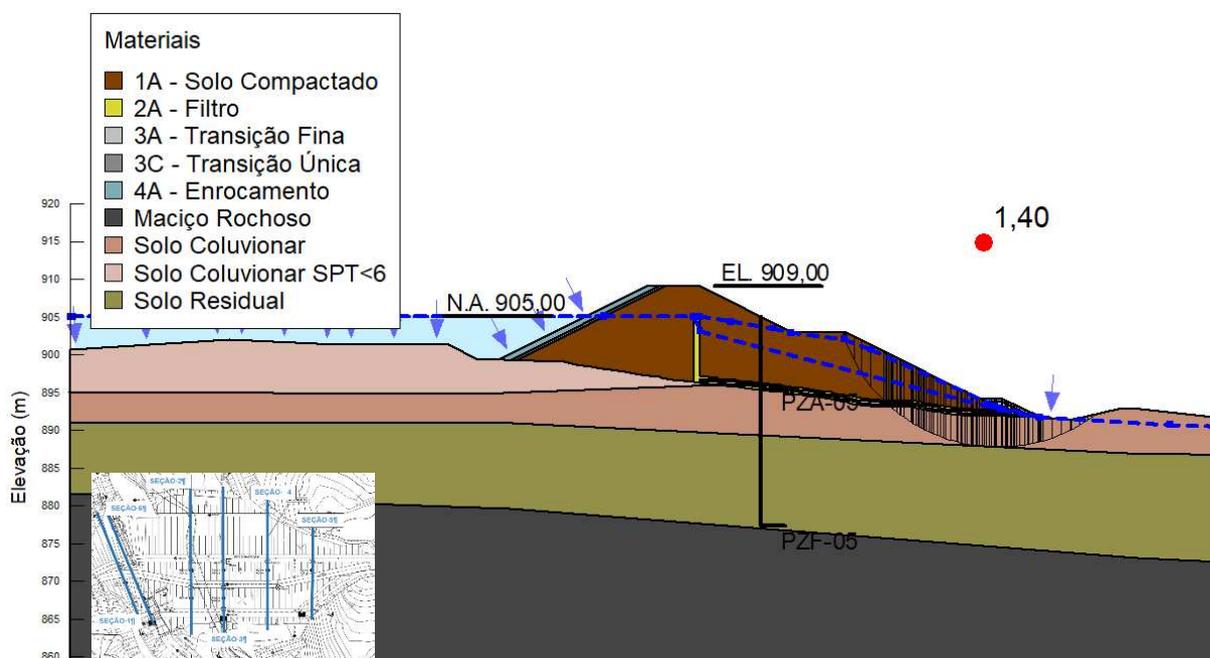
Figura 4-28 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 4



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

Os resultados da avaliação de estabilidade, além da iteração realizada na seção 5, são apresentados na Figura 4-29. Após análise, os valores de controle para PZA-05 e PZF-05 foram 901,02 m e 903,72 m, respectivamente. Conforme realizado anteriormente na análise acima, o gradiente que foi aplicado ao filtro foi combinado com a inclinação pré-existente do tapete drenante na seção 5. Este fato levou a uma redução no FS.

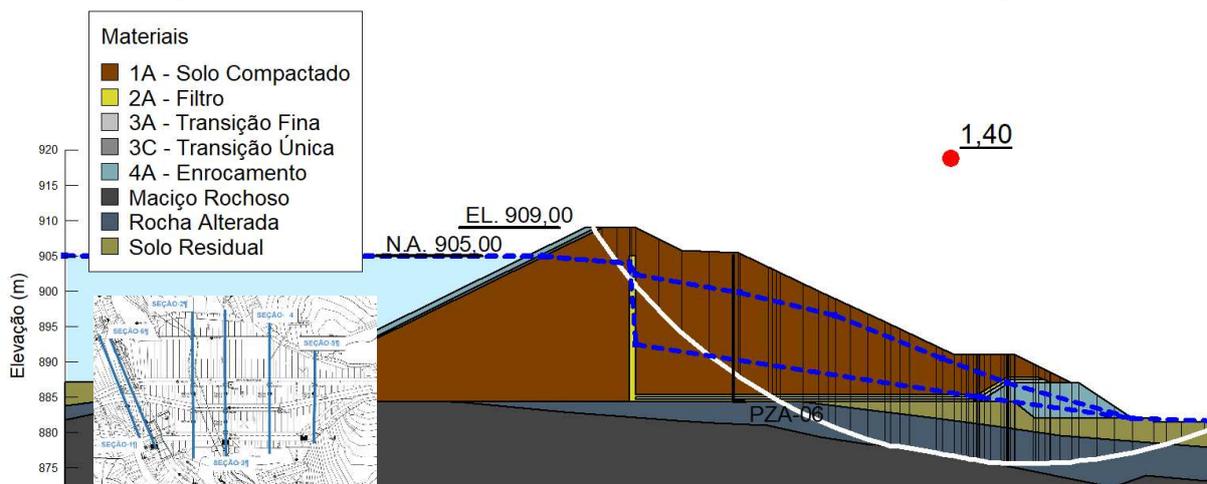
Figura 4-29 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 5



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

A Figura 4-30 exibe os resultados da análise de iteração e estabilidade realizada na seção 6. O valor de controle alerta PZA-06 é determinado como 890,37 m.

Figura 4-30 Resultado Análise de Estabilidade - Alerta – Seção 6



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

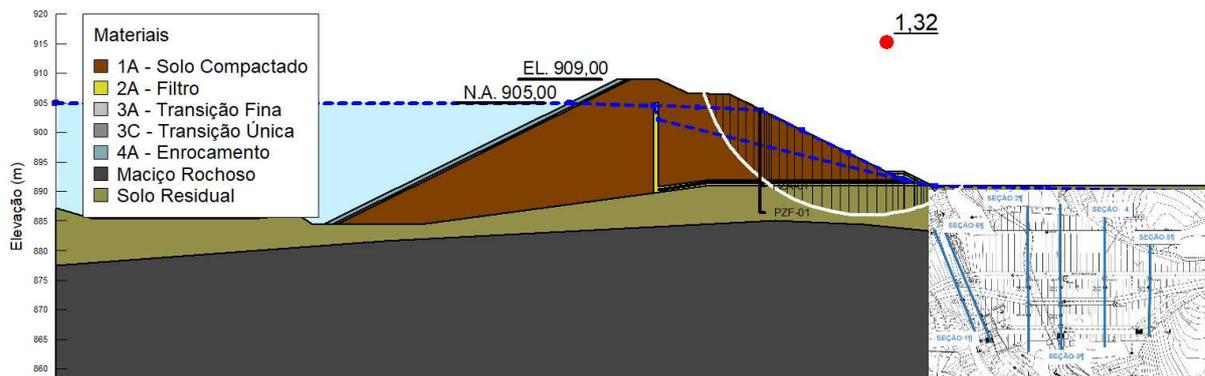
Enfatiza-se o aumento de seções já com o talude majoritariamente ou completamente saturado. Seção 2, seção 3, seção 4 e seção 5 apresentaram essa condição. A seção 3 não foi capaz de atingir o FS estipulado em bibliografia para a análise.

4.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA VALOR DE CONTROLE EMERGÊNCIA

Após a avaliação dos valores de alerta para estabilidade, uma nova análise foi realizada, levando em consideração os parâmetros padrão descritos no subitem 3.12, que diz respeito à Análise de Estabilidade para Valor de Controle Emergência. Incluiu a avaliação do N.A. para operação do filtro quando submetido a uma carga de gradiente de 20%, bem como a calibração do segundo N.A. até atingir um valor FS de 1,30, com base no N.A. derivado da análise de estabilidade Alerta.

A Figura 4-31 demonstra o resultado da análise de iteração e estabilidade para a seção 1. O valor de controle de alerta para PZA-01 é 897,63 m, e o valor de controle PZF-01 é 903,72 m, como resultado. Apesar do nível piezométrico indicar uma zona totalmente saturada baseada no N.A. a montante, o fator de segurança (FS) de 1,30 não foi atingido. Em vez disso, o FS chegou próximo do objetivo, resultando em um valor de 1,32.

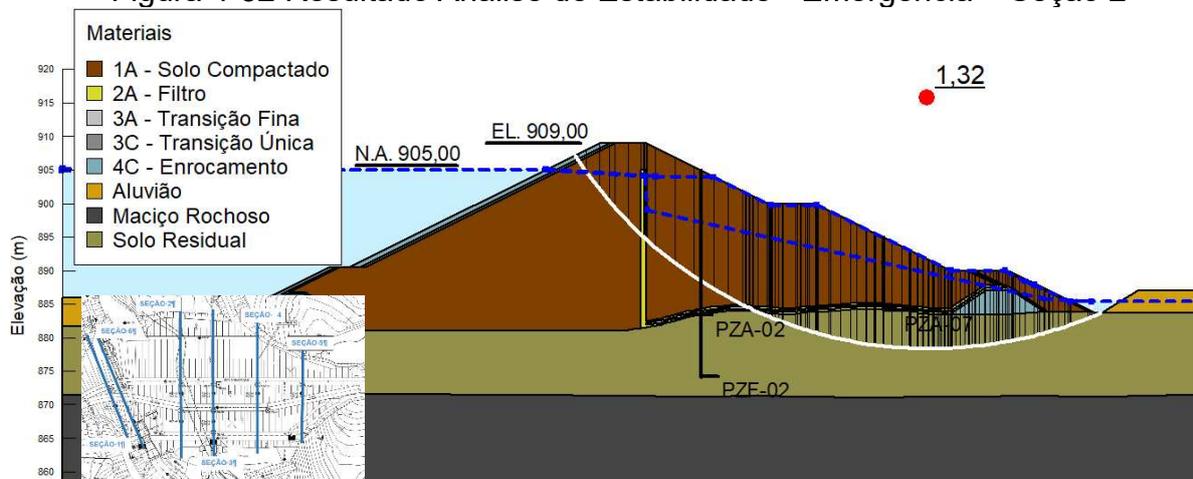
Figura 4-31 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

O resultado da análise de estabilidade e iteração para a seção 2 é exibido na Figura 4-32. A conclusão da análise foi que as medidas de controle de emergência devem ser aplicadas para PZA-02, PZF-02 e PZA-07 em 897,24 m, 903,96 m, e 891,15 m, respectivamente. Apesar do nível piezométrico sugerir que existe uma região totalmente saturada, delimitada pelo N.A. a montante, o fator de segurança (FS) de 1,30 não foi atendido. Em vez disso, aproximou-se dele, chegando a FS=1,32.

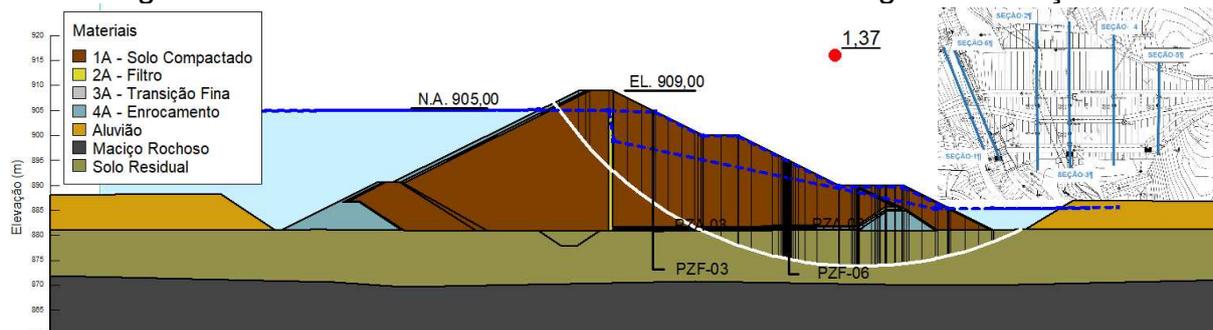
Figura 4-32 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

Na Figura 4-27, os efeitos da análise de estabilidade e iteração descritos na Seção 3 são visíveis. A conclusão desta análise produziu valores de controle específicos para PZA-03, PZF-03, PZA-08 e PZF-06, que foram 897,24 m, 904,72 m, 891,50 m e 894,77 m, respectivamente. A região de jusante foi saturada, levando em conta a cota de N.A. de montante e mesmo assim o fator de segurança (FS) não conseguiu encontrar 1,30. O FS resultante foi de 1,37.

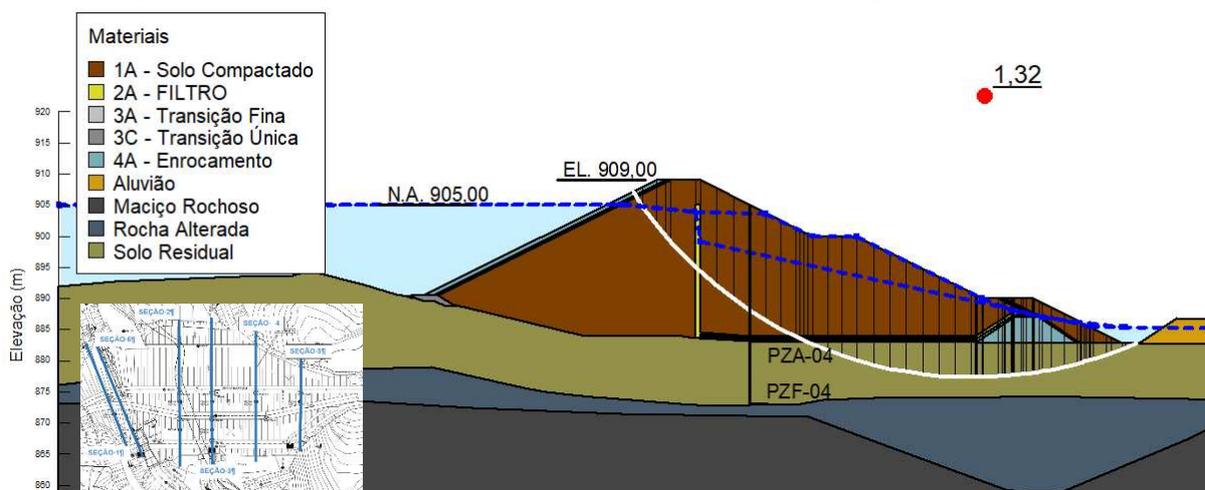
Figura 4-33 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 3



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

Os resultados da análise de estabilidade e iteração descritos na seção 4 são expostos na Figura 4-34. Como resultado dessa análise, os valores de controle para PZA-04 e PZF-04 foram estabelecidos em 897,34 m e 903,73 m, respectivamente. Apesar do nível piezométrico apontar para saturação, o fator de segurança (FS) não atingiu o limiar desejado de 1,30, tendo atingido um valor mínimo de 1,32.

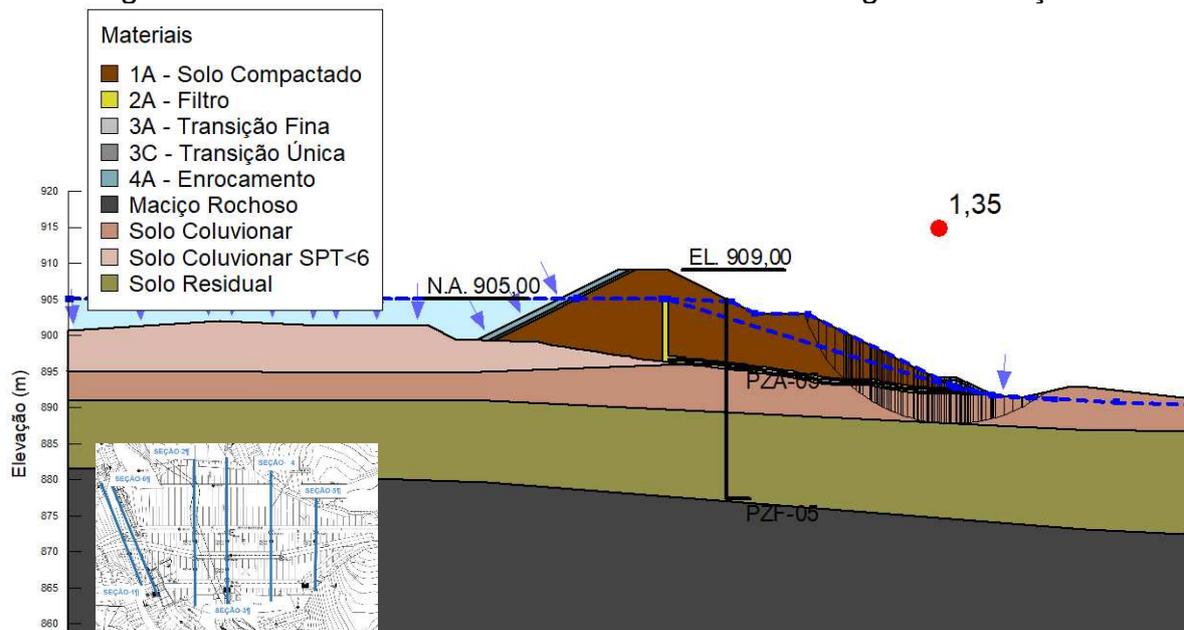
Figura 4-34 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 4



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

A Figura 4-35 apresenta os resultados da avaliação da estabilidade junto com a iteração executada na seção 5. Ao avaliar as iterações, descobriu-se que PZA-05 e PZF-05 resultaram valores de controle de 902,50 m e 904,70 m, respectivamente. Embora o nível piezométrico indicasse um estado de saturação, o fator de segurança (FS) não cerceou o limite desejado de 1,30, alcançando o valor de 1,35.

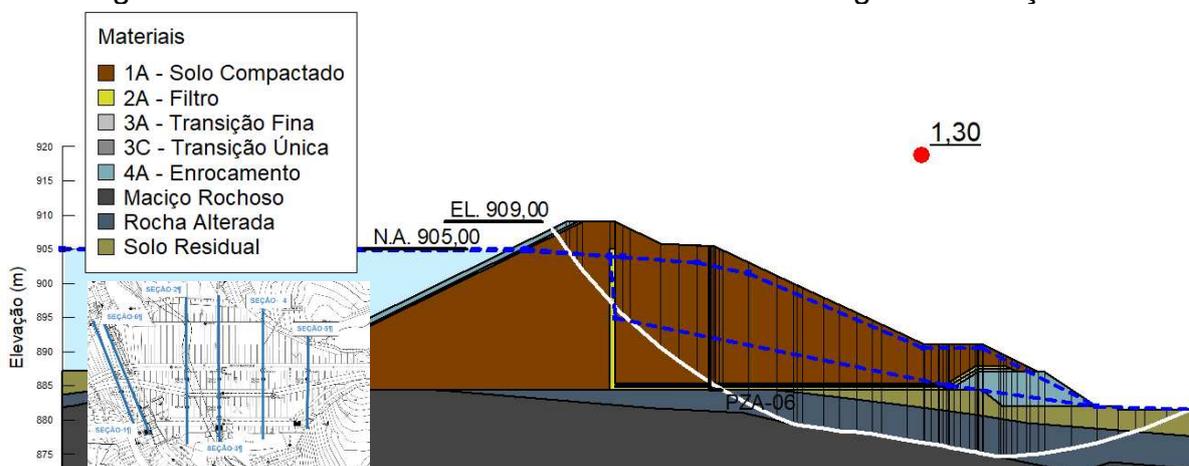
Figura 4-35 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 5



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

A Figura 4-36 exibe o resultado da análise de estabilidade e iteração discutida na seção 6. O valor de controle emergência para PZA-06 foi determinado como 892,09 m como resultado da análise. A seção 6 foi a única da análise de emergência a alcançar o FS=1,30.

Figura 4-36 Resultado Análise de Estabilidade - Emergência – Seção 6



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software SLOPE/W 2007

4.6 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS PARA CADA PIEZÔMETRO

A seguir, no Quadro 4-1, apresenta-se o resumo dos resultados de análise de estabilidade que geraram parâmetros para cada piezômetro. Após, os resultados foram divididos em 2 grupos e foram validados os Valores de Controle. A validação foi realizada visando uma análise crítica dos resultados, explicitando as premissas utilizadas.

Quadro 4-1 Resultados de Análise de Estabilidade

Instrumento	Seção de Análise	Valor de controle Atenção (m)	FS Atenção (1,50)	Valor de controle Alerta (m)	FS Alerta (1,40)	Valor de controle Emergência (m)	FS Emergência (1,30)
PZA-01	Seção 1	893,43	1,50	896,47	1,40	897,63	1,32
PZA-02	Seção 2	889,14	1,50	894,51	1,40	897,24	1,32
PZA-03	Seção 3	889,81	1,50	894,46	1,41	897,24	1,37
PZA-04	Seção 4	889,68	1,50	894,82	1,40	897,34	1,32
PZA-05	Seção 5	897,86	1,50	901,02	1,40	902,50	1,35
PZA-06	Seção 6	886,92	1,50	890,37	1,40	892,09	1,30
PZA-07	Seção 2	887,33	1,50	889,99	1,40	891,15	1,32
PZA-08	Seção 3	888,12	1,50	890,06	1,41	891,50	1,37
PZF-01	Seção 1	899,15	1,50	901,46	1,40	903,72	1,32
PZF-02	Seção 2	901,69	1,50	902,32	1,40	903,96	1,32
PZF-03	Seção 3	902,75	1,50	904,68	1,41	904,72	1,37
PZF-04	Seção 4	900,97	1,50	902,52	1,40	903,73	1,32
PZF-05	Seção 5	902,52	1,50	903,72	1,40	904,70	1,35
PZF-06	Seção 3	894,24	1,50	894,70	1,41	894,77	1,37

Fonte: Elaborado pelo autor

O grupo 1 de piezômetros é formado pelos piezômetros com código PZA. Estes piezômetros foram instalados no filtro horizontal, portanto se os filtros operarem em carga, são os piezômetros que irão informar os valores naquele ponto. Conforme disposições no subitem 2.6.4 que trata da Definição de Critérios de Auscultação Piezométrica, um fator já considerado crítico é quando filtros operam em cargas, uma vez que são dimensionados com margem significativa, na ordem de múltiplo de 10. Isso significa que o filtro está operando para além do que foi projetado. Portanto, os valores de controle estipulados por meio de aplicação de carga hidráulica são válidos como parâmetros para esses piezômetros, mesmo que os N.A.'s em algumas seções não sejam capazes de instabilizar o maciço.

O grupo 2 de piezômetros é formado pelos piezômetros com código PZF. Estes dispositivos são instalados na fundação do barramento e buscam coletar dados das pressões de água e pontos críticos. Todavia, nenhum FS de valor de controle emergência nos PZF's se igualou ao de procedimento metodológico, 1,30. Assim, buscou-se analisar criticamente os resultados. No Quadro 4-2, são apresentadas as diferenças entre resultados de valores de controle.

Quadro 4-2 Diferenças entre Resultados de Valores de Controle

Instrumento	Seção de Análise	Valor de controle Atenção (m)	Diferença entre Atenção e Alerta (m)	Valor de controle Alerta	Diferença entre Alerta e Emergência (m)	Valor de controle Emergência
PZF-01	SEÇÃO 1	899,15	2,31	901,46	2,26	903,72
PZF-02	SEÇÃO 2	901,69	0,63	902,32	1,64	903,96
PZF-03	SEÇÃO 3	902,75	1,93	904,68	0,04	904,72
PZF-04	SEÇÃO 4	900,97	1,55	902,52	1,21	903,73
PZF-05	SEÇÃO 5	902,52	1,20	903,72	0,98	904,70
PZF-06	SEÇÃO 3	894,24	0,46	894,70	0,07	894,77

Fonte: Elaborado pelo autor

Para os piezômetros PZF-01, PZF-02, PZF-04 e PZF-05, todas as diferenças são maiores que 0,5 m, assim sendo significativas no momento da leitura do piezômetro. Para esses piezômetros, assume-se discricionalmente os valores resultantes do procedimento metodológico.

Os piezômetros PZF-03 e PZF-06, ambos na seção 3, apresentam diferenças entre os níveis de alerta e emergência excessivamente pequenas. Isso se deve à geometria do barramento e materiais utilizados que impedem que maciço instabilize mesmo que esteja todo saturado. Nos dois piezômetros citados, na análise de estabilidade de obtenção de valor de controle alerta foi aplicada saturação máxima do maciço de jusante. Assim, poucas variáveis restaram em aberto na análise de estabilidade de valor de controle emergência, que resultou em $FS=1,37$, virtualmente distante de 1,30. Desse modo, adota-se para esses piezômetros somente valores de controle atenção e alerta, uma vez que as análises de estabilidade demonstram que mesmo quando o barramento é saturado ao máximo, o F.S. resultante é significativamente mais alto que 1,30.

A seguir, no Quadro 4-3 são apresentados de forma visual os valores de controle, em formato que pode ser utilizado em futura inspeção de campo.

Quadro 4-3 Parâmetros de Auscultação Piezométrica da Barragem M

Instrumento	Seção de Análise	Medição (m)	Assinale se menor que Valor de Controle Atenção (Normal) (m)	Valor de controle Atenção	Assinale se maior que Valor de Controle Atenção (m)	Valor de controle Alerta	Assinale se maior que Valor de Controle Alerta (m)	Valor de controle Emergência	Assinale se maior que Valor de Controle Emergência (m)
PZA-01	SEÇÃO 1		<input type="checkbox"/>	893,43	<input type="checkbox"/>	869,47	<input type="checkbox"/>	897,63	<input type="checkbox"/>
PZF-01	SEÇÃO 1		<input type="checkbox"/>	899,15	<input type="checkbox"/>	901,46	<input type="checkbox"/>	903,72	<input type="checkbox"/>
PZA-02	SEÇÃO 2		<input type="checkbox"/>	889,14	<input type="checkbox"/>	894,51	<input type="checkbox"/>	897,24	<input type="checkbox"/>
PZA-07	SEÇÃO 2		<input type="checkbox"/>	887,33	<input type="checkbox"/>	889,99	<input type="checkbox"/>	891,15	<input type="checkbox"/>
PZF-02	SEÇÃO 2		<input type="checkbox"/>	901,69	<input type="checkbox"/>	902,32	<input type="checkbox"/>	903,96	<input type="checkbox"/>
PZA-03	SEÇÃO 3		<input type="checkbox"/>	889,81	<input type="checkbox"/>	894,46	<input type="checkbox"/>	897,24	<input type="checkbox"/>
PZA-08	SEÇÃO 3		<input type="checkbox"/>	888,12	<input type="checkbox"/>	890,06	<input type="checkbox"/>	891,5	<input type="checkbox"/>
PZF-03	SEÇÃO 3		<input type="checkbox"/>	902,75	<input type="checkbox"/>	904,68	<input type="checkbox"/>		
PZF-06	SEÇÃO 3		<input type="checkbox"/>	894,24	<input type="checkbox"/>	894,7	<input type="checkbox"/>		
PZA-04	SEÇÃO 4		<input type="checkbox"/>	889,68	<input type="checkbox"/>	894,82	<input type="checkbox"/>	897,34	<input type="checkbox"/>
PZF-04	SEÇÃO 4		<input type="checkbox"/>	900,97	<input type="checkbox"/>	902,52	<input type="checkbox"/>	903,73	<input type="checkbox"/>
PZA-05	SEÇÃO 5		<input type="checkbox"/>	907,86	<input type="checkbox"/>	901,02	<input type="checkbox"/>	902,5	<input type="checkbox"/>
PZF-05	SEÇÃO 5		<input type="checkbox"/>	902,52	<input type="checkbox"/>	903,72	<input type="checkbox"/>	904,7	<input type="checkbox"/>
PZA-06	SEÇÃO 6		<input type="checkbox"/>	895,54	<input type="checkbox"/>	890,37	<input type="checkbox"/>	892,09	<input type="checkbox"/>

Fonte: Elaborado pelo autor

É importante reconhecer que os valores de controle atribuídos a cada instrumento, incluindo atenção, alerta e emergência, são específicos para a condição desse instrumento. A determinação do nível de segurança da barragem, categorizada em normal, atenção, alerta e emergência, depende de uma avaliação ampla de todas as condições estruturais, levando em consideração dados de instrumentação, resultados de inspeção e considerações relevantes. Portanto, se determinados instrumentos estão em alerta ou emergência, isso não indica necessariamente que a barragem está em risco imediato. Ao contrário, significa a necessidade de medidas direcionadas a serem tomadas em uma determinada área (FERREIRA, 2022).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O objetivo do trabalho é definir os parâmetros de controle piezométrico para a Barragem M, e esse objetivo foi alcançado com sucesso. É fundamental observar que os métodos e dados utilizados neste projeto não devem ser aplicados diretamente em outras estruturas.

5.1 CONCLUSÕES

Foram realizadas análises de percolação em condição normal do barramento. A partir disso, foi possível delimitar nas seções os gradientes críticos de saída, por consequência validar o fator de segurança de gradiente de saída – que resultaram $FS > 3,0$.

Três cenários foram delimitados: Atenção, Alerta e Emergência. Por meio de variáveis definidas com o uso de bibliografia e projeto da barragem, foi possível analisar a estabilidade da Barragem estudada. Foi adotado um método iterativo, no qual o objetivo era encontrar o FS predeterminado para cada cenário. Como resultado complementar dessas análises, foram estimadas as cotas linhas freáticas resultantes, referentes a cada piezômetro. Com essas cotas, determinou-se valores de controle para os piezômetros, a serem utilizados como referência na auscultação do paramento estudado. Além disso, foi elaborado um quadro-resumo para que seja utilizada em campo, nas medições.

Assim que a barragem entrar em operação, é fortemente recomendado o início das medições de instrumentação. Não apenas para que se consiga delimitar a situação de cada piezômetro por meio dos resultados do presente trabalho, mas principalmente para que haja um banco de dados e medições que possibilite a elaboração de estudos estatísticos complementares como os de Fusaro (2007) ou Heuko (2014).

5.2 SUGESTÕES

A seguir encontram-se sugestões de trabalhos futuros:

- elaborar análise de tensão-deformação;
- elaborar estudo de possíveis patologias para as situações resultantes da presente análise;
- Produzir plano de monitoramento e instrumentação completo;

- Estudo de suscetibilidade de erosão das encostas no entorno, bem como suas análises de estabilidade;
- Elaboração de estudos estatísticos complementares.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens Volume VII-Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens**. 1ª ed. Brasília: 2016a

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens Volume V-Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens**. 1a. ed. Brasília: 2016b

BRASIL. **Lei 12334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Brasília, DF Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Poder Executivo, 2010.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CNRH No 143, de 10 de julho de 2012**. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, 2012.

BRASIL. **RESOLUÇÃO ANA No 236, de 30 de janeiro de 2017**. Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, DF. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, 2017.

BRASIL. **RESOLUÇÃO ANA Nº121, de 09 de maio de 2022**. Altera a Resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017. Brasília, DF. Diário Oficial [da] República Federativa, 2022.

BRETAS, T. C. **Retroanálise Probabilística Tridimensional por Equilíbrio-Limite de Rupturas de Talude em Belo Horizonte/MG**. Dissertação—Ouro Preto: Universidade Federal De Ouro Preto, 2020.

CANADÁ. **Safety reviews for dam owners | ontario.ca**. Disponível em: <<https://www.ontario.ca/page/safety-reviews-dam-owners>>. Acesso em: 24 de maio de 2023.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Boletim 122: Procedimentos Computacionais para Engenharia de Barragens**. Rio de Janeiro: 2008.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, P. T. DA. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Texto, 1996.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

ELETROBRÁS, C. E. B. S. A. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: 2003.

FERREIRA, J. A. Critérios para Definição de Valores de Controle para Piezômetros e Medidores de Vazão em Barragens de Aterro. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, n. 13, p. 58–63, dez. 2022.

FONSECA, A. D. R. **Auscultação por Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento para Geração de Energia Elétrica-Estudo de Caso das Barragens da UHE São Simão**. Dissertação—Ouro Preto: Universidade Federal De Ouro Preto, 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**. Dissertação—Ouro Preto: Universidade Federal De Ouro Preto, 2007.

HEUKO, E. L. **Definição de parâmetros de controle de uma barragem de terra através de análises estatísticas e avaliação de desempenho: estudo de caso da UHE Capivari-Cachoeira**. Dissertação—Curitiba: Universidade Federal Do Paraná, 2014.

MARANGON, M. **MECÂNICA DOS SOLOS: Notas de aula**. Juiz de Fora: 2018.

MIRANDA, A. N. DE. **Curso: Inspeção e Segurança de Barragens. Notas de Aula: Inspeção de Barragens de Aterro**. Foz do Iguaçu, Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil; Agência Nacional De Águas 2016. Acesso em: 3 maio. 2023

OLIVEIRA DOS SANTOS, V. **Segurança de barragens de concreto: auscultação por instrumentação da barragem da UHE Dona Francisca-RS**. Dissertação—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

PEREIRA, G. M. **Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de terra e enrocamento**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2022.

SILVA, M. J. F. DA. **Análise de Estabilidade de Taludes pelo Método de Equilíbrio Limite Geral**. Dissertação—Porto: Universidade do Porto, 2013.

SNISB - Sistema de Segurança de Barragem. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/inicio>>. Acesso em: 1 maio. 2023.

STRUFALDI, E. G. B. **Retroanálise Probabilista: Aplicação Prática De Análise De Percolação Em Uma Barragem De Terra**. Dissertação — São Paulo: Universidade de São Paulo, 2004.