



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
MESTRADO PROFISSIONAL EM DEFESA E SEGURANÇA CIVIL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARLOS JOSÉ DE PETRIBÚ GUIMARÃES

**ASPECTOS DA DRENAGEM DE BARRAGENS DE REJEITO COM ALTEAMENTO  
A MONTANTE: CASO DA BARRAGEM I, DA MINA DE CÓRREGO DO FEIJÃO,  
EM BRUMADINHO - MG**

Niterói

2021

CARLOS JOSÉ DE PETRIBÚ GUIMARÃES

**ASPECTOS DA DRENAGEM DE BARRAGENS DE REJEITO COM ALTEAMENTO  
A MONTANTE: CASO DA BARRAGEM I, DA MINA DE CÓRREGO DO FELJÃO,  
EM BRUMADINHO - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Relatório Técnico apresentado ao Programa de Pós-graduação em Defesa e Segurança Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Defesa e Segurança Civil.

Área de concentração: Planejamento e Gestão de Eventos Críticos.

Linha de Pesquisa: Ameaças de Riscos e Desastres.

Orientador

Professor Manoel Isidro de Miranda Neto, D.Sc.

Niterói

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BFD  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

P495a Guimarães, Carlos José de Petribú  
ASPECTOS DA DRENAGEM DE BARRAGENS DE REJEITO COM ALTEAMENTO  
A MONTANTE: CASO DA BARRAGEM I, DA MINA DE CÓRREGO DO FEIJÃO  
EM BRUMADINHO-MG / Carlos José de Petribú Guimarães;  
Manoel Isidro de Miranda Neto, orientador. Niterói, 2021.  
59 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso(mestrado profissional)-  
Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDSC.2021.mp.83413600710>

1. Barragem de Rejeitos. 2. Drenagem do Solo. 3. Segurança  
de Barragem. 4. Produção intelectual. I. Miranda Neto,  
Manoel Isidro de, orientador. II. Universidade Federal  
Fluminense. Instituto de Ciências da Sociedade e  
Desenvolvimento Regional. III. Universidade Federal  
Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Universidade  
Federal Fluminense. Instituto de Saúde da Comunidade. V.  
Título.

CDD -

CARLOS JOSÉ DE PETRIBÚ GUIMARÃES

**ASPECTOS DA DRENAGEM DE BARRAGENS DE REJEITO COM ALTEAMENTO  
A MONTANTE: CASO DA BARRAGEM I, DA MINA DE CÓRREGO DO FEIJÃO,  
EM BRUMADINHO - MG**

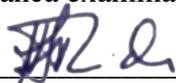
Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Relatório Técnico apresentado ao Programa de Pós-graduação em Defesa e Segurança Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Defesa e Segurança Civil.

Área de concentração: Planejamento e Gestão de Eventos Críticos.

Linha de Pesquisa: Ameaças de Riscos e Desastres.

Aprovada em 30 de setembro de 2021.

Banca examinadora



---

Prof. Manoel Isidro de Miranda Neto, D.Sc.  
Universidade Federal Fluminense – Orientador



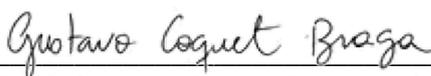
---

Prof. Elson Antonio do Nascimento, D.Sc.  
Universidade Federal Fluminense



---

Prof<sup>a</sup> Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora, D.Sc.  
Universidade Federal Fluminense



---

Prof. Gustavo Coquet Braga, D.Sc.  
Universidade La Salle - Rio de Janeiro

Niterói  
2021

## DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, permitindo-me a oportunidade e também, pelo seu apoio nos momentos mais difíceis desta dissertação.

À minha esposa Marcia, pelo amor, amizade, apoio, compreensão e companheirismo.

Aos meus pais, Carlos Alberto e Beatriz Miriam, *in memoriam*, que certamente estarão muito felizes com a minha vitória.

Aos colegas de profissão, que contribuíram, com a troca de seus conhecimentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao orientador D.Sc. Manoel Isidro de Miranda Neto, minha imensa gratidão por toda a atenção e compreensão, dispensadas ao longo de todo o curso e na elaboração deste trabalho.

Ao coorientador D.Sc. Elson Antonio do Nascimento, pelos ensinamentos, contribuições e colaboração na elaboração desta dissertação.

Agradeço a D.Sc Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora, pelas contribuições e colaborações na elaboração deste trabalho.

Agradeço ao D.Sc Gustavo Coquet Braga, pelas contribuições e colaborações na elaboração deste trabalho.

Ao Corpo Docente do Curso de Mestrado em Defesa e Segurança Civil da UFF, Niterói / RJ, pelo acréscimo de novos conhecimentos, na vida acadêmica.

A todos os colegas, de vários perfis profissionais desta turma, que contribuíram através de trocas de informações, durante os debates nas aulas, intervalos e reuniões de alunos, na troca de seus conhecimentos tácitos.

Agradeço a Deus, por ter me direcionado ao caminho certo, nesta jornada.

“Não fiz o melhor, mas fiz tudo para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas não sou o que era antes.”

*Martin Luther King (1929 – 1968)*

## RESUMO

No Brasil, acidentes graves envolvendo barragens de rejeito têm sido frequentes. Este trabalho procura mostrar aspectos dessas barragens relacionados com o sistema de drenagem que podem comprometer a segurança, em especial nas barragens de rejeito construídas com alteamento a montante. O método adotado consiste na pesquisa bibliográfica e apresentação de algumas técnicas e dispositivos de drenagens e sua relação com a percolação, carregamentos e desenvolvimento de poropressões que possam afetar a segurança do barramento. São também apresentadas técnicas construtivas e por fim é apresentado um estudo de caso envolvendo o acidente, ocorrido em janeiro de 2019, na barragem da mina do Córrego do Feijão no município de Brumadinho no Estado de Minas Gerais. Em que pese o acidente não ter ainda uma definição formal técnica e jurídica sobre quais fatores possam ter contribuído para o colapso, sem dúvida pode-se supor que uma causa importante pode estar relacionada com o desenvolvimento de poropressões no maciço. A questão relacionada com causas externas não está sendo tratada neste trabalho, embora sobrecargas e vibrações possam também contribuir para uma perda de estabilidade do barramento. Por fim, são apresentadas algumas considerações indicadas em relatórios técnicos que apontam algumas hipóteses sobre a dinâmica do acidente e uma possível vinculação com a presença de água no maciço composto por resíduos da mineração de ferro, contidos por barragem alteada a montante e encerrada em 2016 após o décimo alteamento.

Palavras-chave: Alteamento a Montante, Drenagem Horizontal Profunda, Estabilidade e Segurança de Barragem.

## **ABSTRACT**

In Brazil, serious accidents involving tailings dams have been frequent. This work seeks to show aspects of these dams related to the drainage system that can compromise safety, especially in tailings dams built with upstream raising lifts. The method adopted consists of bibliographical research and presentation of some drainage techniques and devices and their relationship with percolation, loading and development of pore pressures that may affect the safety of the dam. Construction techniques are also presented and, finally, a case study involving the accident, which occurred in January 2019, at the Córrego do Feijão mine dam in the municipality of Brumadinho in the State of Minas Gerais is presented. Despite the fact that the accident does not yet have a formal technical and legal definition of which factors may have contributed to the collapse, it is undoubtedly possible to assume that an important cause may be related to the development of pore pressures in the massif. The issue related to external causes is not being addressed in this work, although overloads and vibrations can also contribute to a loss of bus stability. Finally, some considerations indicated in technical reports are presented that point out some hypotheses about the dynamics of the accident and a possible link with the presence of water in the massif composed of iron mining residues, contained by an upstream elevated dam and closed in 2016 after the tenth upgrade.

**Keywords:** Upstream Raising Lifts, Deep Horizontal Drainage, Dam Stability and Safety.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	X
LISTA DE TABELAS .....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	XIII
INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVO GERAL .....	15
1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO .....	16
1.3 METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS .....	16
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1 CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO.....	17
2.2 SISTEMA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS. ....	18
2.3 CARACTERÍSTICAS DO NÍVEL DA LINHA FREÁTICA .....	19
2.4 CONTROLE DE FLUXO .....	23
2.5 SISTEMAS DE DRENAGEM EM BARRAGEM DE TERRA.....	24
2.5.1 PERCOLAÇÃO EM ATERROS.....	24
2.5.2 DIMENSIONAMENTO DE FILTROS DE BARRAGENS .....	25
2.6 DRENOS HORIZONTAIS PROFUNDOS – DHP. ....	33
MATERIAIS E MÉTODOS CONSTRUTIVOS .....	39
3.1 PROPRIEDADES DOS REJEITOS .....	39
3.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITO .....	40
3.2.1 MÉTODO CONSTRUTIVO DE ALTEAMENTO A MONTANTE. ....	40
3.2.2 MÉTODO CONSTRUTIVO DE ALTEAMENTO A JUSANTE. ....	41
3.2.3 MÉTODO DE ALTEAMENTO POR LINHA DE CENTRO .....	42
ESTUDO DE CASO.....	44
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO .....	44
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM I.....	46
4.3 ESPECIFICAÇÃO DA BARRAGEM I.....	47
4.4 POSICIONAMENTO DA LINHA FREÁTICA .....	51
CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Linha de fluxo em barragem de rejeito com ausência de drenagem interna.....	19
Figura 2 - Riscos de ruptura em barragens pelo método de alteamento a montante. ....	20
Figura 3 – Rede de fluxo em dique de partida de barragem de rejeito.....	21
Figura 4 - Posicionamento do nível freático em função de características do projeto. ....	21
Figura 5 - Fatores influenciadores na localização da superfície freática em barragens a montante. ....	22
Figura 6 - Progressão de uma ruptura por piping em barragem. ....	23
Figura 7 - Evolução dos tipos de dreno usados na drenagem interna.....	25
Figura 8 - Filtro de uma barragem de terra.....	26
Figura 9 - Tapete trabalhando em carga. ....	27
Figura 10 - Tapete trabalhando com linha freática inclinada. ....	27
Figura 11 - Escolha da faixa de variação granulométrica do filtro (a partir dos pontos a e b..	31
Figura 12 - Materiais para filtros de proteção. ....	31
Figura 13 - Perfuratriz realizando um dhp, com limpeza de furo.....	33
Figura 14 - Desenho esquemático de um dhp. ....	34
Figura 15 - Tubo de pvc geomecânico. ....	34
Figura 16 - Nível de água antes e depois da instalação dos dhp. ....	35
Figura 17 - Variação do na em função dos comprimentos dos dhp. ....	36
Figura 18 - Variação do na para drenos de 500 pés com diferentes elevações. ....	37
Figura 19 - Variação do na em função do espaçamento dos dhp. ....	37
Figura 20 - Variação do na em função da condutividade hidráulica (k) e da taxa de recarga (r). .....	38
Figura 21 - Método construtivo de alteamento à montante. ....	41
Figura 22 - Método construtivo de alteamento à jusante.....	41
Figura 23 - Método construtivo de alteamento por linha de centro.....	43
Figura 24 - Localização da bacia do rio paraopeba. ....	44
Figura 25 - Principais usos da água na bacia do rio paraopeba. ....	45
Figura 26 - Vista aérea do local antes do acidente com a barragem i. ....	46
Figura 27 - Dique inicial e linha freática projetada por cristoph erb em 1975.....	47

Figura 28 - Ilustração da geometria da barragem i na seção de máxima altura. ....	49
Figura 29 - Linha freática passando pela seção 4-4 da b i (cor azul) .....	51
Figura 30 - Perfil geotécnico da seção crítica da barragem i.....	52
Figura 31 - Superfície de ruptura para o caso não drenado. ....	53
Figura 32 - Superfície de ruptura para o caso drenado.....	53

## LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Classificação das barragens por categoria de risco e dano potencial associado. ...	18
Quadro 2 - Critérios de filtro. ....	32
Quadro 3 - Características de projeto e construção dos alteamentos da barragem i. ....	49

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas.
ANM	Agência Nacional de Mineração.
C	coeficiente de forma.
CNU	coeficiente de não uniformidade.
CPTU	piezocone penetration test.
$D_{\text{efet.}}$	diâmetro efetivo do solo.
$D_{10}$	diâmetro corresponde a 10% em peso de todas as partículas do solo menores que ele.
DPH	Drenos Horizontais Profundos.
$e$	índice de vazios.
EIR	Extratos de Inspeção Regulares.
EL	Cota de nível de elevação dos alteamentos, relativo cota da base e cota da crista de cada Elevação, referenciadas a RN (referência de nível) de implantação da barragem.
FS	Fator de Segurança.
$g$	aceleração da gravidade, em $\text{m/s}^2$ .
H	carga hidráulica, em m.
$H_f$	espessura de um filtro horizontal de barragem.
K	condutividade hidráulica do solo.
$k$	coeficiente de permeabilidade do solo.
$k_v$	coeficiente de permeabilidade vertical, do solo.
$k_h$	coeficiente de permeabilidade horizontal do solo.
NA	nível d'água.
$N_f$	número de canais de fluxo.
$N_d$	número de faixa de perda de carga hidráulica.
$N_{kt}$	fator empírico de capacidade de carga considera a profundidade da camada de solo em condição não drenada.
PNSB	Plano Nacional de Segurança de Barragem
PSB	Plano de Segurança de Barragens.
PVC	policloreto de vinil.

Q	vazão.
$q_t$	valor da resistência de ponta do CPTU.
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
$S_u$	resistência não drenada ao cisalhamento.
V	Vertical.
$\phi'$	ângulo de atrito efetivo.
$\gamma$	peso específico aparente do solo.
$\gamma_w$	peso específico da água.
$\mu$	viscosidade da água.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Acidentes envolvendo ruptura de barragem de rejeito têm sido frequentes no Brasil, em especial no estado de Minas Gerais. Pode-se afirmar que alguns desses eventos envolvem a forma como o material é depositado, que contribui para que a presença de água no reservatório seja um importante fator a se considerar.

Em relação a barragens de acumulação de água, a ANA (2021) relata a ocorrência de alguns acidentes, sobretudo nas regiões sudeste e centro-oeste do país, indicando que a maioria desses eventos ocorre devido às chuvas intensas nos meses de janeiro a março.

Para os rejeitos de mineração, em que pese a legislação sobre segurança de barragens (BRASIL, 2010) ter sido alterada (BRASIL, 2020), no sentido de proibir a construção pelo método a montante, o presente trabalho considera que existem muitas barragens de rejeito ainda em operação, ou até encerradas, que justificam a preocupação com esse tipo de empreendimento. Ressalta-se que a lei (BRASIL, 2010) estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Após o acidente ocorrido com a barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho MG, a Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio do Comitê Técnico de Segurança de Barragens de Rejeitos de Mineração (CTBMin), informou que foram vistoriadas 249 barragens de mineração, restando vistoriar 186 (ANM, 2021). Isso mostra o tamanho do problema relacionado com a disposição de rejeitos no Brasil.

#### 1.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo abordará os aspectos da drenagem de barragens de rejeitos com al-  
teamento a montante e apresentará o caso da Barragem de I da Mina de Córrego do Feijão em  
Brumadinho MG.

## 1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Após o acidente ocorrido em janeiro de 2019 com a Barragem I, em Brumadinho, no Estado de Minas Gerais, as barragens para armazenamento de rejeitos minerais construídas pelo método de alteamento a montante foram muito questionadas em relação à segurança. Diversos debates, na mídia e em ambientes técnicos, sugeriram hipóteses variadas sobre o acidente, que se destacou pela quantidade de vítimas fatais e pelo dano material e ambiental causado.

Assim, é relevante o estudo sobre aspectos da drenagem da barragem I de Brumadinho, uma vez que pode ter havido alguma deficiência nos sistemas de drenagem e/ou nos sistemas de controle e monitoramento.

## 1.3 METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A metodologia deste estudo baseia-se na pesquisa e no levantamento, apresentados em forma de capítulos.

Neste Capítulo 1 apresenta-se a situação problema, o objetivo do trabalho e sua relevância, além da apresentação da organização deste estudo.

O Capítulo 2 apresenta alguns conhecimentos teóricos relacionados à área temática deste trabalho, em especial com relação a sistemas de drenagens.

No Capítulo 3 são apresentados sistemas de disposição de rejeitos e métodos construtivos das barragens de rejeito, com destaque para o método de montante.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso da Barragem I da mina Córrego do Feijão em Brumadinho MG, envolvendo descrições iniciais sobre projeto, método construtivo utilizado e posicionamento da linha freática no reservatório.

No Capítulo 5 são apresentadas considerações finais e sugestão de futuras pesquisas.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO

Os rejeitos são consequências inevitáveis dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios, sendo gerados, paralelamente ao produto de interesse. Esses rejeitos, que são produzidos em grande quantidade, impactam o meio ambiente (PORTES, 2013).

Em decorrência do grande volume de rejeitos gerados nas atividades de produção mineral, dispostos em áreas cada vez menores, as barragens de rejeitos têm experimentado maiores taxas de carregamento e maiores alturas. As grandes taxas de alteamento em conjunto com estruturas de disposição cada vez mais altas culminam na geração de excessos de poropressão nas massas de rejeitos dispostas, que por sua vez podem desencadear processos de liquefação estática e ter, como consequência, rupturas por fluxo (RIBEIRO, 2015).

Segundo Zattelli (2019), a segurança de um barramento deve ser considerada como uma ponderação entre seu grau de qualidade técnica construtiva e sua alternativa locacional.

O Quadro 1 resume os itens a serem observados para classificação de barragens segundo a categoria de risco, dano potencial associado e volume, conforme Resolução nº 143/2012 do CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2012).

Essa norma (CNRH, 2012) estabelece que, quanto à Categoria de Risco (CRI), as barragens serão classificadas de acordo com aspectos próprios que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, levando-se em conta os seguintes critérios gerais: (i) Características Técnicas (CT); (ii) Estado de Conservação (EC); e (iii) Plano de Segurança da Barragem (PSB).

Para cada item é estabelecida uma pontuação, baseada nas informações do empreendedor, que resulta em uma classificação quanto à Categoria de Risco em alto, médio ou baixo risco.

O mesmo procedimento é adotado para a classificação do Dano Potencial Associado (DPA), levando-se em conta os seguintes critérios: (i) volume do reservatório; (ii) existência de população a jusante; (iii) impacto ambiental; (iv) impacto socioeconômico.

Classificação	Tipo de avaliação	Crerios a serem valorados
Categoria de Risco – CRI	Características Técnicas – CT	Altura, comprimento, tipo de barragem quanto ao material de construção, tipo de fundação, idade da barragem, tempo de recorrência da vazão de projeto.
	Estado de Conservação – EC	Confiabilidade das estruturas extravasoras, confiabilidade das estruturas de adução, percolação, deformações e recalques, deterioração do talude/paramento, eclusa.
	Plano de Segurança da Barragem – PSB	Documentação de projeto, estrutura organizacional e qualificação dos profissionais na equipe de segurança e monitoramento, regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem, relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação.
Dano Potencial Associado - DPA		Volume total do reservatório, potencial de perdas de vidas humanas, impacto ambiental, impacto socioeconômico.

Quadro 1 - Classificação das barragens por categoria de risco e dano potencial associado.  
Fonte: CNRH (2012).

## 2.2 SISTEMA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS.

Nas operações de lavra e beneficiamento dos minérios de ferro, o material descartado nos processos de beneficiamento do minério é denominado rejeito (ABNT, 2017).

Esse material deve ser disposto, na forma mais adequada, no meio ambiente. O aumento das atividades de mineração pressupõe aumento na geração de rejeitos.

Dentre as estruturas mais usuais do sistema de disposição de rejeitos, estão as pilhas e os diques/barragens.

A norma ABNT (2017) especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens de mineração. Destaca-se que a instrumentação de controle deve:

- apresentar as plantas de localização, as especificações técnicas e os detalhes construtivos

dos instrumentos de monitoramento da barragem; b) prever a instalação de instrumentos para, no mínimo, controle das vazões da drenagem interna, dos níveis de água e poropressão no interior do maciço da barragem, das suas fundações e deformações; c) estabelecer critérios de avaliação de segurança periódica com base no monitoramento que deve ser baseado nos potenciais modos de falha identificados no projeto de cada barragem.

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DO NÍVEL DA LINHA FREÁTICA

As forças induzidas pela percolação descontrolada no maciço e na fundação podem favorecer o carreamento das partículas de solo, gerando um processo de erosão regressiva, denominado *piping* (ABNT, 2017). A Figura 1 ilustra uma linha freática que atinge o talude de jusante por ausência de drenagem interna. Isso pode ocasionar a elevação das poropressões no corpo da barragem reduzindo a tensão efetiva e favorecendo a ruptura do maciço.

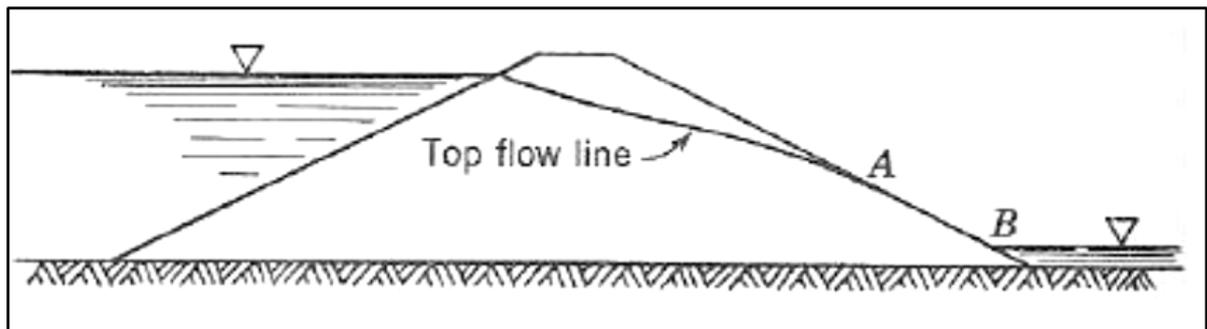


Figura 1 - Linha de fluxo em barragem de rejeito com ausência de drenagem interna.  
Fonte: Massad (2010).

Segundo Castro (2008), a constante avaliação do comportamento do nível da linha freática nas barragens de alteamento pelo método da linha de montante, com um adequado programa de instrumentação e monitoramento, gera significativo aumento na segurança do empreendimento.

Cruz (2004) alerta que, nos projetos de barragens, o controle de fluxo no corpo da barragem, na fundação e nas ombreiras é fundamental para a segurança do empreendimento.

A Figura 2 ilustra algumas situações de risco. Na Figura 2A, a linha freática elevada causa exfiltração no talude de jusante. A Figura 2B mostra uma provável superfície de ruptura

passando pelo rejeito. A Figura 2C mostra a formação do processo de *piping* entre dois diques de alteamento a montante, com surgimento de água no talude de jusante.

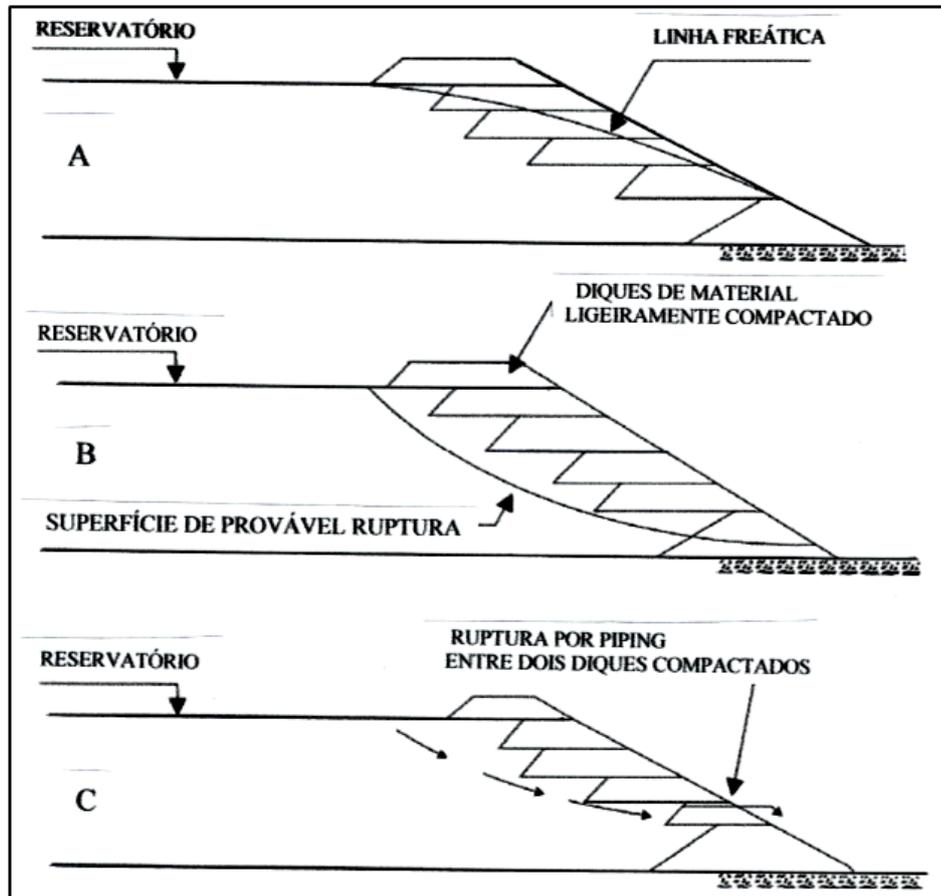


Figura 2 - Riscos de ruptura em barragens pelo método de alteamento a montante.  
Fonte: adaptado de Soares (1998, apud CASTRO, 2008).

Redes de fluxos são compostas por linhas de fluxo e linhas equipotenciais, como indicadas na Figura 3. Nota-se que a linha freática alta pode desencadear uma rede de fluxo no barramento tal que haja exfiltração no talude de jusante, contribuindo para erosão interna e *piping*. Para isso a barragem de rejeito deve ter um adequado sistema de drenagem que, além de reduzir a poropressão, mantenha um baixo gradiente hidráulico na rede de fluxo.

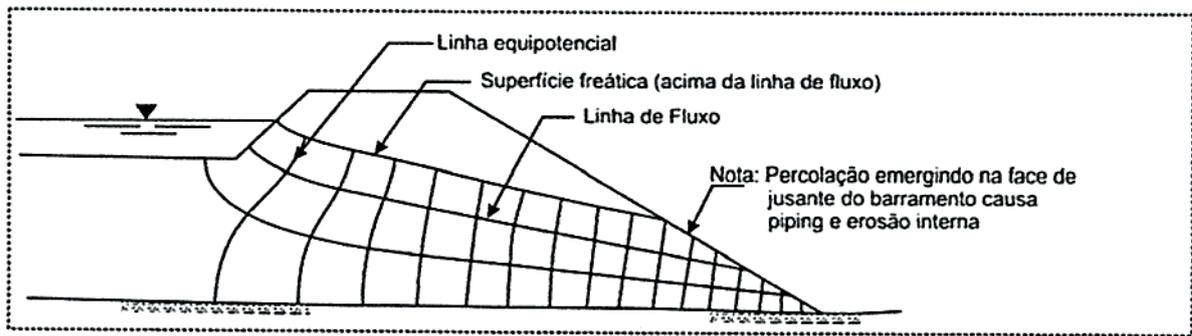


Figura 3 – Rede de fluxo em dique de partida de barragem de rejeito.  
Fonte: adaptado de EPA (1994 apud CASTRO, 2008).

A Figura 4 (A, B e C) mostra alguns aspectos relacionados com a drenagem e a posição da linha freática nos reservatórios e barragens.

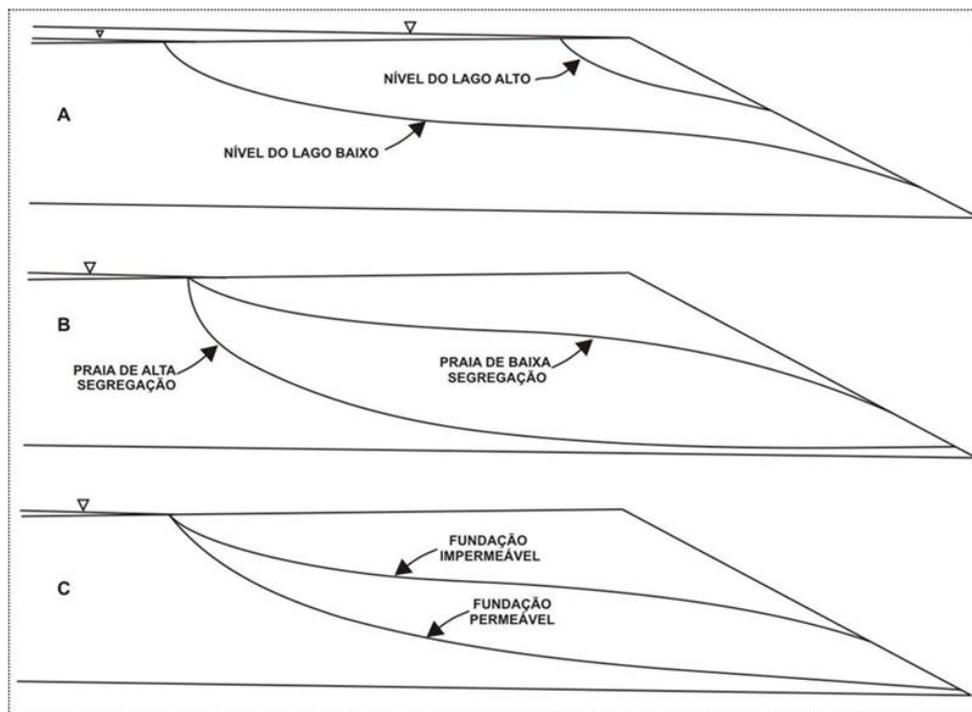


Figura 4 - Posicionamento do nível freático em função de características do projeto.  
Fonte: adaptado de Soares (1998, apud CASTRO, 2008).

A Figura 4A foi descrita por Soares (2010) como sendo:

A estabilidade destas obras está vinculada a distância do lago de decantação, uma vez que o nível freático no corpo da barragem é função desta distância. Com a proximidade do lago; ocorre o levantamento do nível freático; fazendo com que surja água nas partes altas do talude de jusante, possibilitando o início fenômeno do *piping* nesta estrutura.

A Figura 4B foi descrita por Soares (2010) como sendo:

Praia com lançamento de baixa segregação de rejeitos, apresentando baixa permeabilidade, causando a elevação do nível freático na estrutura da barragem, devido a maior retenção de água, podendo iniciar-se o fenômeno do *piping*, devido à surgência de água no talude de jusante.

A Figura 4C foi descrita por Soares (2010) como sendo:

Barragem com fundações impermeáveis, causam a elevação do nível freático, obriga passagem da água pelo corpo da barragem, causando erosão interna com o surgimento de água no talude de jusante.

Segundo EPA (1995, apud CASTRO, 2008), fatores vinculados ao lançamento de rejeitos influenciam na ruptura de barragens de rejeitos a montante, como ilustra a Figura 5.

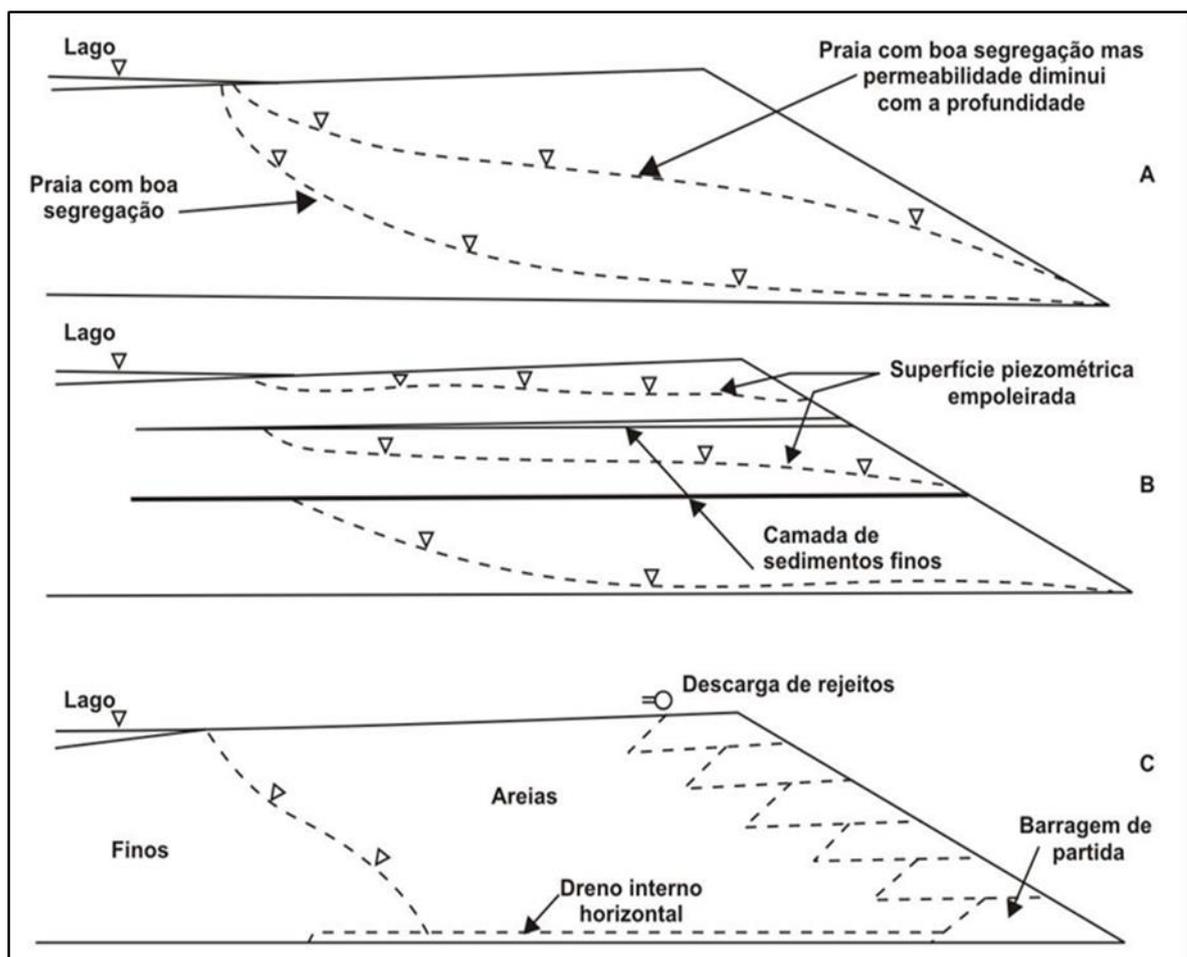


Figura 5 - Fatores influenciadores na localização da superfície freática em barragens a montante.

Fonte: EPA (1995, apud CASTRO, 2008).

Na Figura 5A, com a segregação de rejeitos na praia, e a diminuição da permeabilidade com a profundidade, ocorre elevação do nível do lençol freático, possibilitando o início do processo de erosivo devido à surgência da água no talude de jusante (CASTRO, 2008).

Na Figura 5B, a presença de camadas de argilosas, formadas pelo lançamento de rejeitos muito finos, contribui para a formação de superfícies piezométricas empoeiradas, modificando o padrão da rede de fluxo projetada. Há possibilidade da ocorrência do *piping* pela surgência de água no talude de jusante nas camadas mais permeáveis (CASTRO, 2008).

Na Figura 5C, os efeitos produzidos na superfície freática, pela instalação dos filtros horizontais internos, que direcionam o fluxo de percolação para o ponto extravasor, aumentando a segurança da barragem (CASTRO, 2008).

Em uma ruptura por *piping*, a erosão evolui para montante formando uma espécie de tubo através do maciço ou da fundação, podendo resultar em um desabamento do maciço sobrejacente, abrindo uma brecha na barragem (MIRANDA, 2016). A Figura 6 ilustra uma ruptura por *piping* no solo de fundação.

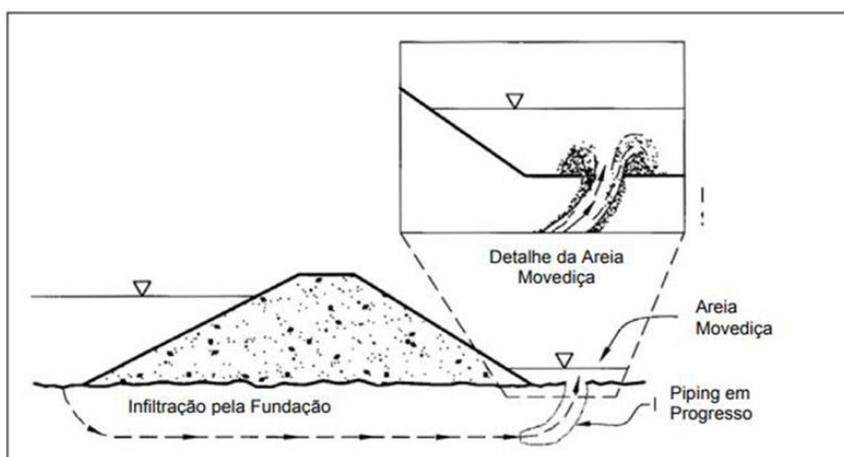


Figura 6 - Progressão de uma ruptura por piping em barragem.  
Fonte: Miranda (2016).

## 2.4 CONTROLE DE FLUXO

Segundo Sandroni (2012), as barragens de terra não são obras destinadas a impedir totalmente a passagem de água por suas fundações ou pelo corpo do barramento.

A percolação de certa quantidade de água é inevitável e, até certo ponto, desejável (SANDRONI, 2012).

A questão que se põe é estabelecer se a percolação coloca em risco a segurança da barragem. Para tanto, realiza-se um estudo de controle de fluxo, que é feito para evitar o *piping*, gradientes elevados, minimizar as vazões e poropressões (SOUZA, 2013).

Segundo Sandroni (2012), deve-se evitar que o fluxo de água promova “erosão interna”, isto é, carreamento de partículas sólidas ou de material em solução (*piping*). O carreamento pode se dar das seguintes maneiras: (i) de um ponto para outro, no interior da barragem ou nas fundações, causando colmatagem dos elementos drenantes necessários à estabilidade da barragem; e (ii) da barragem para fundação ou para jusante, gerando aparecimento de espaços vazios, cavernas e “tubos”, no interior do talude da barragem, ocasionando o colapso da mesma. Este fenômeno é conhecido como entubamento (*piping*).

A percolação é o modo responsável por algo como 2/3 de todos os acidentes de natureza geotécnica em barragens com reservatório cheio. Assim, a segurança das obras de barramento e de suas fundações, quanto à ocorrência de carreamento, coloca-se, por força da experiência, como o principal objeto de atenção da geotecnia de barragens (SANDRONI, 2012).

## 2.5 SISTEMAS DE DRENAGEM EM BARRAGEM DE TERRA

### 2.5.1 Percolação em aterros.

O controle de percolação no aterro, feito através da implantação de um sistema através de drenagem interna adequada. Sem este sistema, a linha freática atinge o talude de jusante, como mostrado na Figura 6, podendo causar erosão no talude de jusante (*piping*) e elevando as poropressões no corpo da barragem.

O sistema de drenagem interna consiste na utilização de drenos verticais ou inclinados, e horizontais. Os drenos verticais (ou inclinados) interceptam o fluxo que passa dentro do corpo da barragem, enquanto os horizontais interceptam o fluxo da fundação e encaminham o fluxo do corpo da barragem até o pé do talude de jusante.

Massad (2010) apresenta a evolução do sistema de drenagem das barragens de terra, ilustrada na Figura 7.

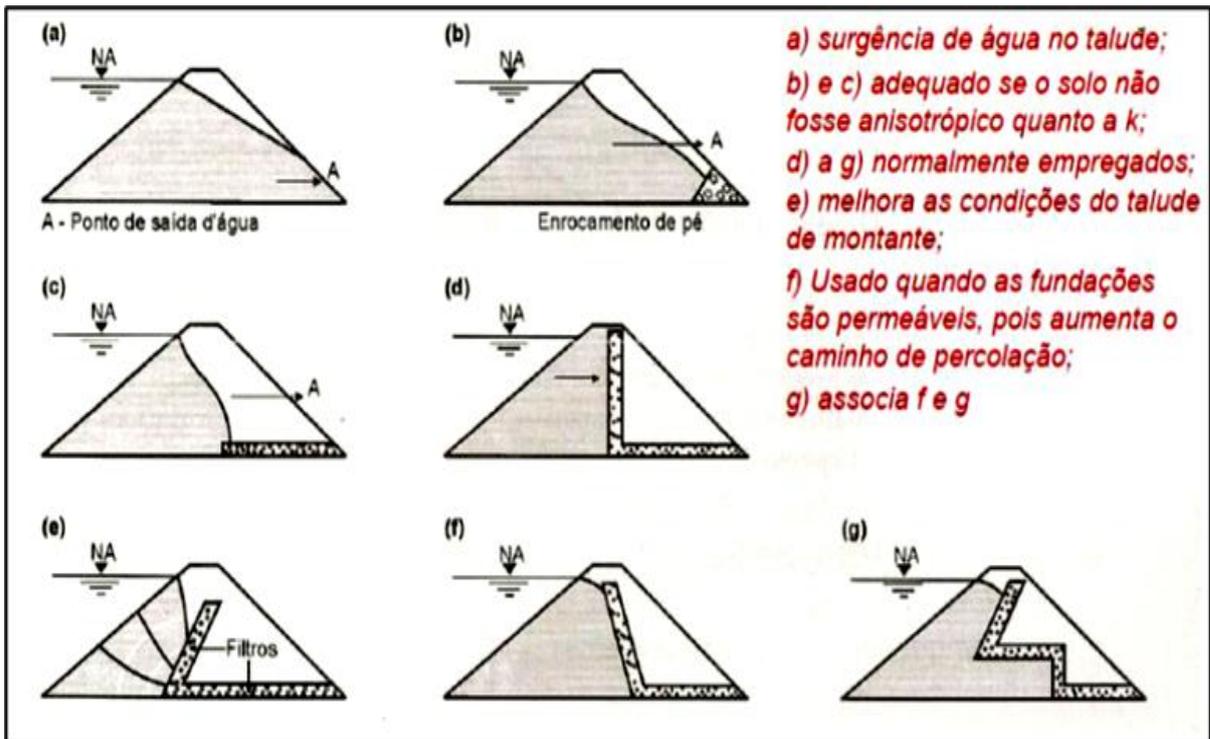


Figura 7 - Evolução dos tipos de dreno usados na drenagem interna.  
Fonte: Massad (2010).

### 2.5.2 Dimensionamento de Filtros de Barragens

Segundo Massad (2010), o projeto de um filtro é baseado fundamentalmente na granulometria do material a ser empregado. Esta granulometria deve ser de tal forma, que:

a) As partículas menores devem se acomodar nos vazios entre as partículas maiores, de modo que o conjunto atue sempre como camada filtrante, ou seja, com retenção de todo material sólido, facilitando apenas a percolação da água. Quando isto ocorre, a água que surge a jusante do filtro se apresentará límpida, com isenção de material sólido;

b) O material mais fino retido no filtro evitará o carreamento das dessas partículas sólidas, impedindo a formação de erosão regressiva (*piping*);

c) Os vazios do material do filtro devem ser suficientemente pequenos, de forma a impedir a passagem das partículas finas do solo, a ser protegido;

d) Os vazios do filtro devem ser suficientemente grandes, de forma a proporcionar a livre drenagem da água e o controle de forças de percolação, impedindo o desenvolvimento de altas pressões hidrostáticas, cargas a serem dissipadas no filtro.

O correto dimensionamento segue as seguintes etapas descritas abaixo:

1º) Construção da rede de fluxo no interior da barragem.

Através da rede de fluxo são obtidas informações importantes, sendo elas: vazão, gradientes e poropressões. A vazão que passa pelo interior da barragem é dada pela equação:

$$Q = k \cdot H \cdot \frac{N_f}{N_d} \quad (1)$$

Onde:

Q - Vazão (por metro de barragem);

k - permeabilidade do talude da barragem (para taludes isotrópicos ou anisotrópicos com seção transformada);

H - Diferença de carga hidráulica ao longo da seção transversal do talude;

$N_f$  - Número de canais de fluxo;

$N_d$  - Número de faixa de perda de carga hidráulica.

2º) Filtros Horizontais de Barragens

Segundo Massad (2010), há duas hipóteses simplificadoras para determinar a espessura  $H_f$  do filtro horizontal, ilustrado na Figura 8, sujeito a uma vazão Q: (i) a primeira superestima a espessura; e (ii) a segunda subestima a espessura. Em ambos os casos, admite-se que, na entrada do filtro horizontal, o nível d'água represado tenha altura igual a espessura  $H_f$ .

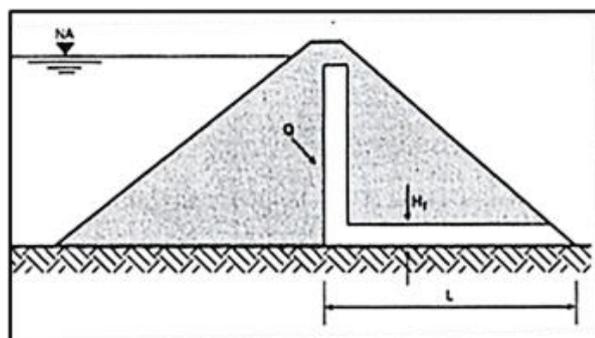


Figura 8 - Filtro de uma barragem de terra.

Fonte: adaptada de Massad(2010).

A primeira delas é considerar que o tapete trabalha em carga, utilizando toda sua seção para o fluxo de água, como mostra na Figura 9.

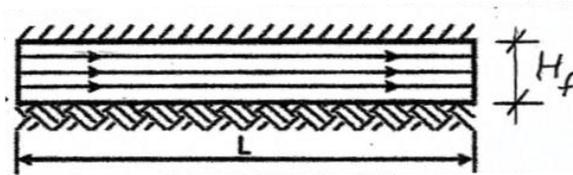


Figura 9 - Tapete trabalhando em carga.  
Fonte: adaptada de Massad (2010).

Segundo Massad (2010), nessa hipótese:

$$Q = k_f \cdot \frac{H_f}{L} \cdot H_f = k_f \cdot \frac{H_f^2}{L} \quad (2)$$

onde:

Q - Vazão;

$k_f$  - permeabilidade do dreno horizontal;

$H_f$  - Espessura do dreno horizontal;

L - Comprimento do dreno horizontal;

Portanto, a espessura  $H_f$  é dada pela seguinte expressão:

$$H_f^{real} > \sqrt{\frac{Q \cdot L}{k_f}} \quad (3)$$

A segunda hipótese considera que o filtro trabalhe livremente, como mostrado na Figura 10, com uma linha freática na seção de escoamento. Admitindo a validade da equação de Dupuit (MASSAD, 2010). Nesse caso tem-se que:

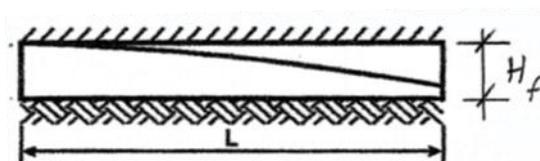


Figura 10 - Tapete trabalhando com linha freática inclinada.  
Fonte: adaptada de Massad (2010).

$$Q = k \cdot \frac{(h_1^2 - h_2^2)}{2L} = \frac{k_f \cdot H_f^2}{2L} \quad (4)$$

onde:

Q - Vazão;

$k_f$  - permeabilidade do dreno horizontal;

$h_1$  - altura inicial da linha freática;

$h_2$  - altura final da linha freática;

L – Comprimento do dreno horizontal.

Daí,

$$H_f^{real} < \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot L}{k_f}} \quad (5)$$

Portanto,

$$\sqrt{\frac{Q \cdot L}{k_f}} < H_f^{real} < \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot L}{k_f}} \quad (6)$$

Tanto Massad (2010) quanto Sandroni (2012) consideram que quando o filtro horizontal capta, também, água das fundações, na desigualdade da expressão 6, deve-se adotar:

$$Q = Q_m + (Q_f / 2) \quad (7)$$

Onde  $Q_m$  e  $Q_f$  referem-se, respectivamente, às contribuições do maciço e das fundações para a vazão total (Q).

Segundo Cruz (2004), recomenda-se que a espessura do dreno horizontal não seja maior que 2,0 m, indicando uso do “dreno sanduíche” caso haja necessidade de dreno com espessura maior que 2,0 m. O dreno sanduíche é constituído por três camadas, sendo as camadas externas de areia e a central de brita.

De acordo com Sandroni (2012), o fator de segurança adotado nos drenos deve ser no mínimo igual a 100. Ou seja, a vazão de projeto deve ser cem vezes a vazão de cálculo.

3º) Determinação da largura do dreno vertical.

Pela lei de Darcy:

$$Q = k.i.A \quad (8)$$

onde:

Q - Vazão;

k - permeabilidade do dreno vertical (deve ser maior do que 100 vezes a permeabilidade do maciço da barragem);

A - área do filtro vertical; e

i - gradiente hidráulico (adotando-se  $i = 1$ ).

Tomando a rede de fluxo por cada metro, tem-se que:

$$A = 1.H_f \quad (9)$$

onde  $H_f$  é a espessura do dreno.

Logo:

$$H_f = \frac{Q}{k} \quad (10)$$

Cruz (2004) recomenda que, por razões construtivas, a largura do dreno vertical seja maior que 0,80 m.

4º) Critério para Dimensionamento de Filtros

Os elementos filtrantes têm que permitir a passagem da água e também evitar que haja o carreamento das partículas finas do solo. O carreamento de partículas ocorre quando o gradiente hidráulico é tal que a velocidade de percolação provoca o arraste das partículas finas. Por outro lado, os elementos filtrantes não podem ser tão finos que passem a impedir o fluxo

de água. Portanto, o filtro não pode ser muito fino, a ponto de impedir a passagem de água, nem muito grosseiro que cause carreamento dos finos do solo adjacente.

Seguindo esta linha de pensamento, Terzaghi, Peck e Mesri (1996), estabeleceram as seguintes condições a serem satisfeitas, pelo filtro e pelo solo a ser protegido:

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{solo})} < 4 \text{ ou } 5 \quad (11)$$

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{solo})} > 4 \text{ ou } 5 \quad (12)$$

Sendo:

$D_{15}(\text{filtro})$  é o diâmetro do filtro tal que 15% das partículas são menores que ele;

$D_{15}(\text{solo})$  é o diâmetro do solo tal que 15% das partículas são menores que ele;

$D_{85}(\text{solo})$  é o diâmetro do solo tal que 85% das partículas são menores que ele.

Para garantir a proteção contra o *piping*, e para garantir a passagem da água. Os índices 15 e 85 referem-se à porcentagem do material, em peso, com partículas menores do que o diâmetro D, a eles associados.

A Figura 11 apresenta um detalhe da faixa de variação granulométrica de um filtro, adotando-se as condições dadas nas expressões 11 e 12.

A Figura 12 apresenta as considerações:

O material P não é um bom filtro, para o solo S, porque não é muito mais permeável do que ele, enquanto que o material R não é adequado por ser muito mais grosso e, eventualmente, permitir a passagem de finos do solo S, pelos seus vazios. O material Q é o que satisfaz as duas condições (PINTO, 2006).

A granulometria do filtro deve atender a esse critério, como o critério de filtro indicado por Cruz (2004) para solos arenosos:

$$5 \cdot (D_{15} \text{ do solo}) \leq D_{15} \text{ do dreno} \leq 5 \cdot (D_{85} \text{ do solo}) \quad (13)$$

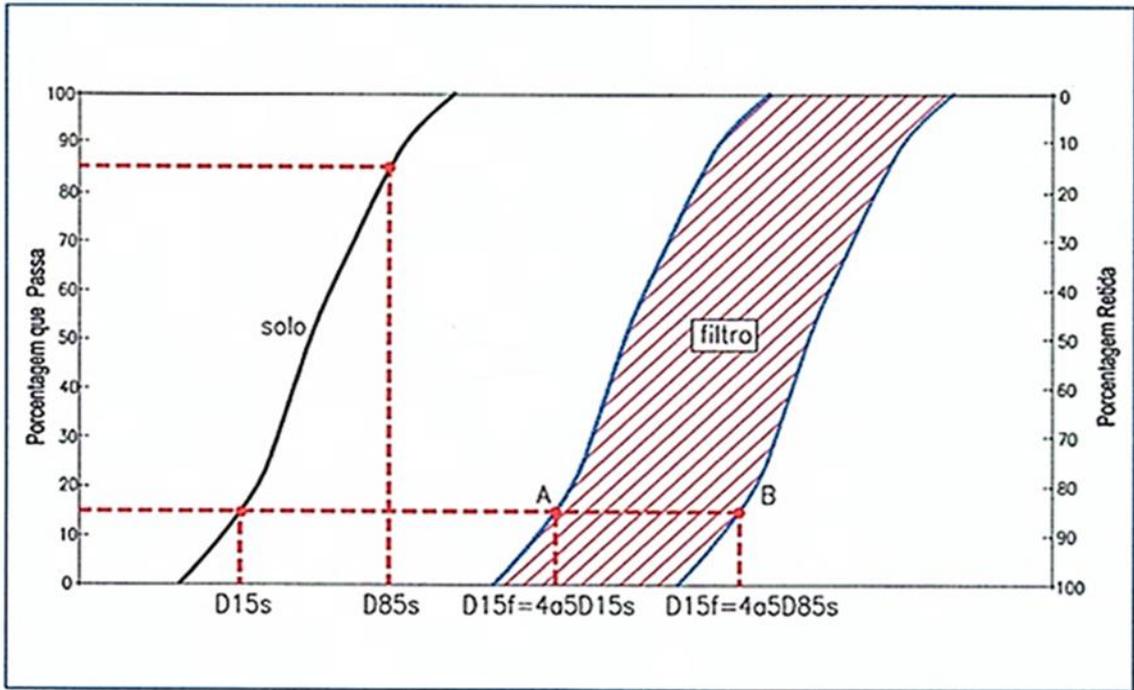


Figura 11 - Escolha da faixa de variação granulométrica do filtro (a partir dos pontos A e B determinados, são traçadas curvas paralelas à curva granulométrica do solo).  
 Fonte: Modificado de Bueno e Vilar (1985).

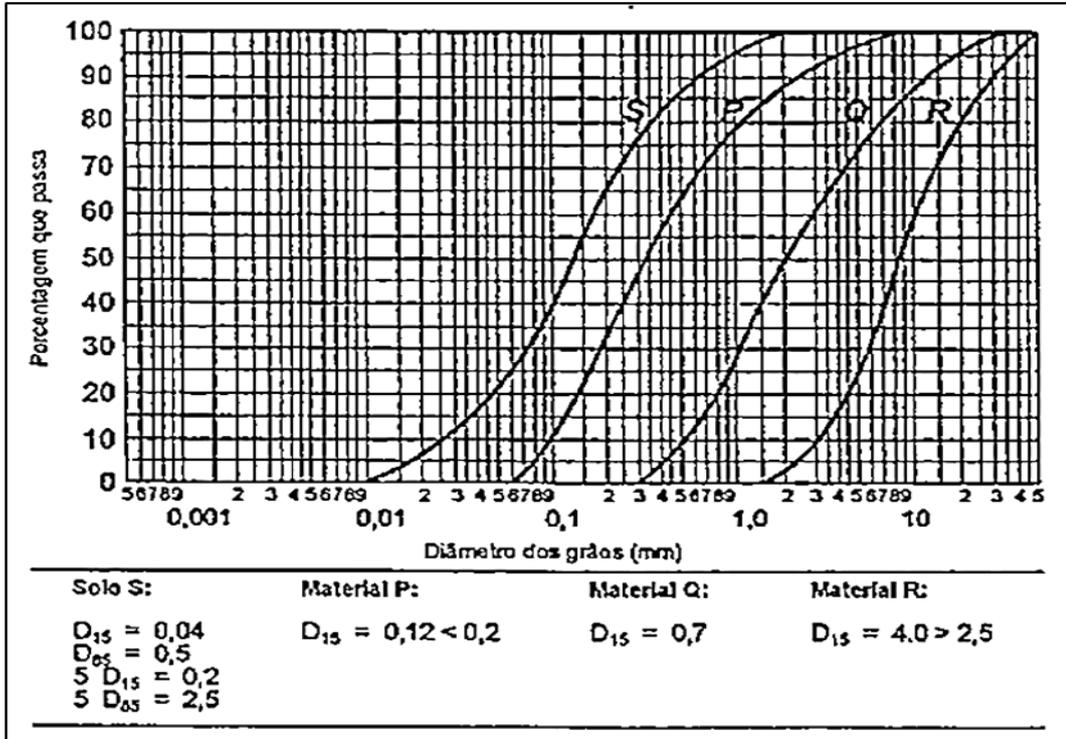


Figura 12 - Materiais para filtros de proteção.  
 Fonte: Pinto (2006).

Onde a expressão 14, garante a proteção contra *piping*:

$$\frac{D_{15 \text{ do dreno}}}{D_{85 \text{ do solo}}} \leq 5 \quad (14)$$

E, a expressão 15, garante a permeabilidade do dreno:

$$\frac{D_{15 \text{ do dreno}}}{D_{15 \text{ do solo}}} \geq 5 \quad (15)$$

O Quadro 2 adiante mostra algumas considerações propostas por Sandroni (2012) relacionadas com o critério de filtração, para diversos tipos de solos.

Material a proteger.	Critério
Materiais granulares grossos, areias, siltes arenosos e argilas arenosas com $D_{85} > 0,1$ mm.	$D_{15 \text{ do filtro}} \leq 5.D_{85 \text{ do solo}}$
Solos argilosos plásticos com $0,03 \text{ mm} < D_{85} < 0,1$ mm, dispersivos ou não.	$D_{15 \text{ do filtro}} \leq 10.D_{85 \text{ do solo}}$ ou $D_{15 \text{ do filtro}} \leq 0,4$ mm
Siltes finos (sem quantidade apreciável de areia) com $0,03 \text{ mm} < D_{85} < 0,1$ mm, baixa plasticidade ( $LL < 30$ , abaixo da linha A)	$D_{15 \text{ do filtro}} \leq 0,3$ mm
Solos muito finos, $D_{85} < 0,03$ mm	$D_{15 \text{ do filtro}} \leq 0,2$ mm
Areia envolvendo tubulação drenante	$D_{85 \text{ da areia}} > 1,2$ da largura das ranhuras no tubo; ou $D_{85 \text{ da areia}}$ maior que o diâmetro dos furos do tubo.
OBS:	
1º) Os drenos devem ser bem graduados, porém com $\frac{D_{60}}{D_{10}} < 20$ e as transições $\frac{D_{60}}{D_{10}} < 10$ ;	
2º) Drenos arenosos não devem conter grãos com diâmetro maior do que 50,8 mm.	

Quadro 2 - Critérios de filtro.  
Fonte: adaptado de Sandroni (2012).

## 2.6 DRENOS HORIZONTAIS PROFUNDOS – DHP.

As técnicas de traçado das redes de fluxo permitem a consideração da anisotropia e heterogeneidades. O traçado das redes requer experiência, sendo úteis às recomendações propostas por Casagrande (1964), Taylor (1948) e Cedergren (1968).

O dreno horizontal profundo (DHP), ilustrado na Figura 13 e Figura 14, tem por finalidade drenar a água de percolação interna do maciço de solo ou rejeito, rebaixando o nível do lençol freático, a fim de minimizar a carga exercida sobre o talude ou o muro de contenção, gerando também alívio de poropressões ou pressões neutras.

Diversos autores (CARVALHO, 1991; DOBEREINER; VAZ, 1998; ANDRADE, 2003; TECPER, 2021a; MÜLLER, 2004) propõem a utilização de DHP para rebaixar o nível da água subterrânea de modo eficaz.



Figura 13 - Perfuratriz realizando um DHP, com limpeza de furo.

Fonte: TECPER (2021b).

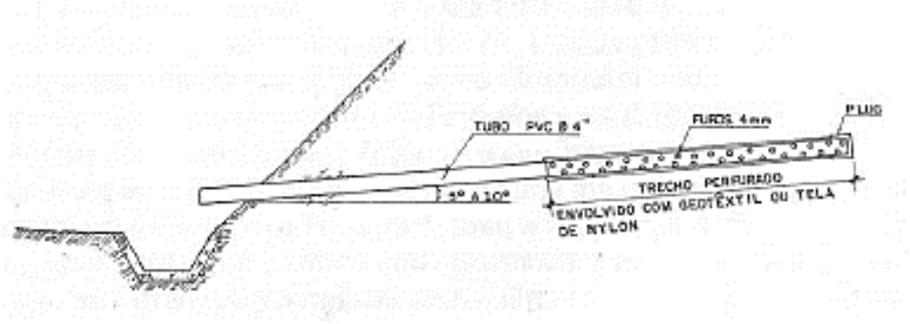


Figura 14 - Desenho esquemático de um DHP.  
Fonte: Carvalho (1991).

As aplicações deste método demonstram que drenos mais longos e espaçados são mais eficientes do que os drenos curtos com espaçamento menor, pois o rebaixamento ocorre ao longo do dreno e quanto mais longo mais distante da face do talude estará a superfície freática. Assim, quanto mais suave o talude, maior deverá ser o comprimento do dreno (ANDRADE, 2003).

O revestimento dos drenos deve ocorrer imediatamente após a conclusão dos trabalhos de perfuração e retirada das hastes, para evitar que ocorram desmoronamentos no furo, impedindo o revestimento do dreno.

Pode também ser utilizada tubulação de PVC tradicional rígido, com diâmetro de 38 a 50 milímetros, sendo a maior parte constituída por um tubo filtrante (furos ou ranhuras) envolvido em geotêxtil quando instalado em solo ou envolvido em duas voltas de tela plástica quando instalado em rocha (Figura 15).

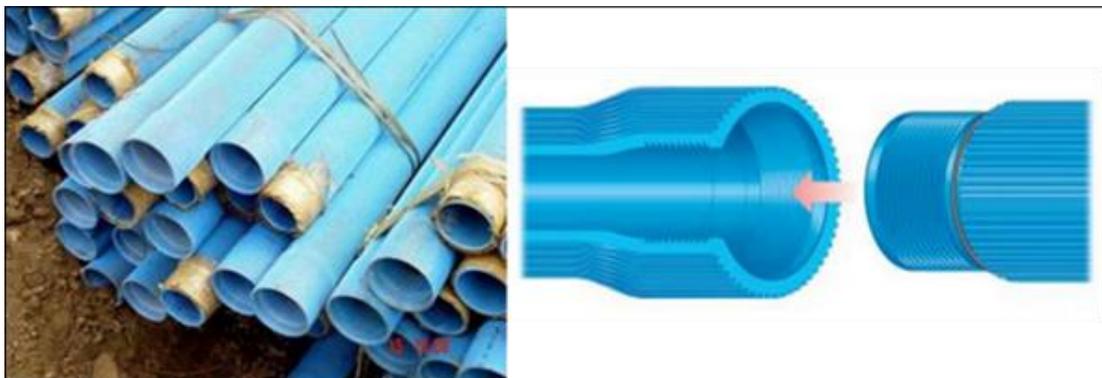


Figura 15 - Tubo de PVC Geomecânico.  
Fonte: TECPER (2021b).

Segundo Andrade (2003), após um período de operação dos DHP é possível avaliar o rebaixamento de nível d'água por INAS (indicadores de nível de água subterrânea), adotando DHP mais profundos ou novos DHP caso persistam surgências de água no talude.

A Figura 16 (CARVALHO, 1991) ilustra o efeito da instalação de DHP em taludes com superfície freática alta e com surgências no pé do talude, sendo que, após um tempo de operação dos DHP as águas subterrâneas foram afastadas da superfície potencial de ruptura, devido ao rebaixamento do nível de água.

Outros autores também apresentam resultados semelhantes aos da Figura 16, quanto ao rebaixamento do nível de água após a utilização dos DHP, pode-se citar Alonso (2007, p.139) e Bastos (2006, p. 27).

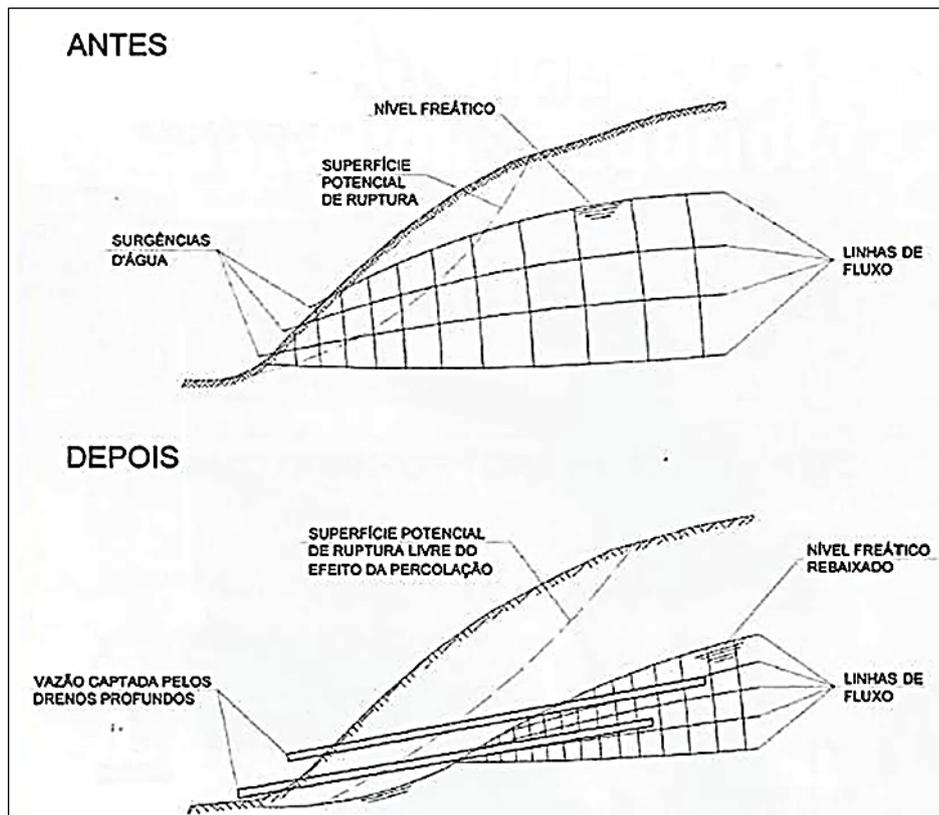


Figura 16 - Nível de água antes e depois da instalação dos DHP.

Fonte: Carvalho (1991, p. 241)

Pohl e outros (2013) simularam o efeito do dreno no rebaixamento do nível d'água em taludes. Os resultados mostram a eficiência dos drenos, considerando principalmente o seu comprimento, elevação, espaçamento e características do aquífero. São expostos os resultados das simulações em forma de seções transversais, apresentando o comportamento do nível de água em um terreno inclinado em cada mudança nos parâmetros do dreno, sob o estado de recarga constante e com mesma condutividade hidráulica do material geológico.

A Figura 17 ilustra uma seção transversal idealizada sem drenagem e com drenos de diversos comprimentos, instalados na base do declive. Essa simulação mostra o efeito do comprimento do dreno no rebaixamento do nível d'água (NA).

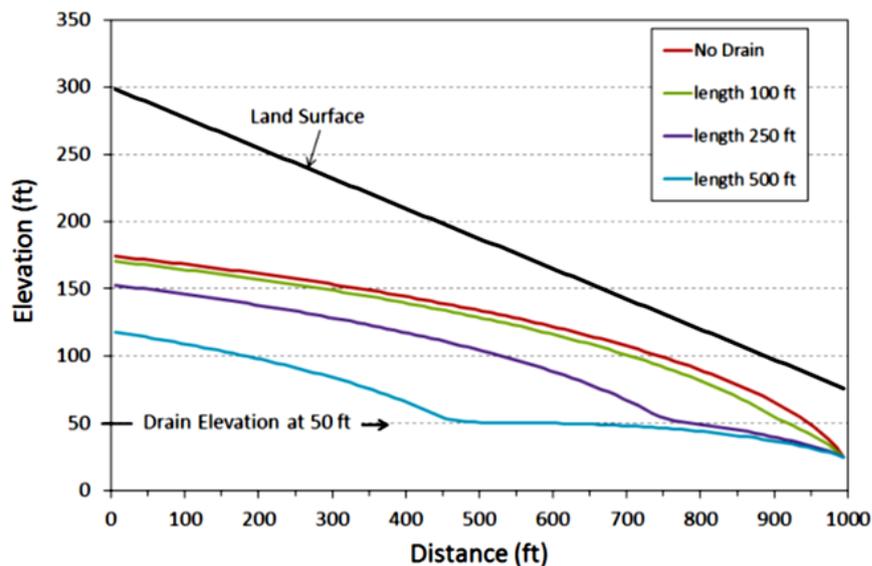


Figura 17 - Variação do NA em função dos comprimentos dos DHP.  
Fonte: Pohl *et al.* (2013).

A Figura 18 ilustra uma seção transversal sem drenagem e com drenos horizontais profundos (DHP), instalados na base do declive, e com diversas elevações (inclinações). Essa simulação mostra o efeito da inclinação do dreno no rebaixamento do nível d'água (NA). Nota-se que os drenos com menor inclinação propiciam uma maior queda do nível de água (POHLL *et al.*, 2013).

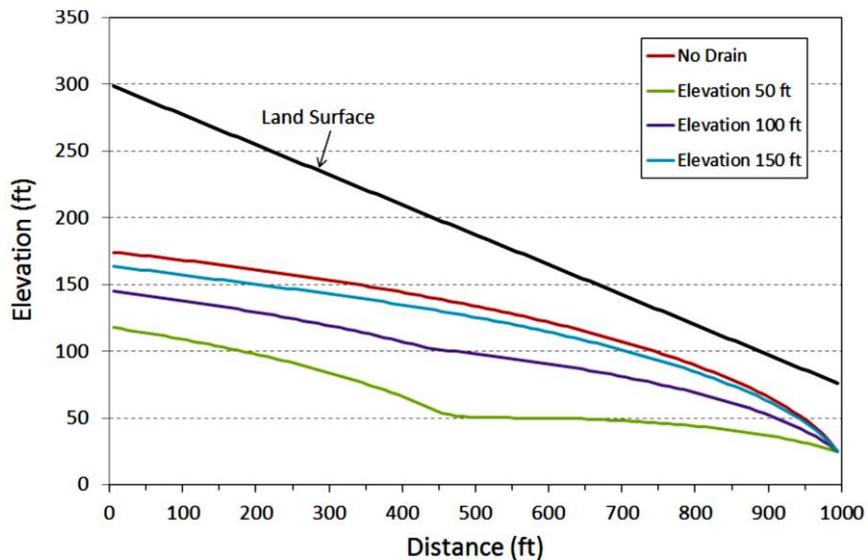


Figura 18 - Variação do NA para drenos de 500 pés com diferentes elevações.  
Fonte: Pohll *et al.* (2013).

A Figura 19 ilustra o resultado da simulação para drenos com diferentes espaçamentos, mantidas mesmas inclinações e comprimento. Para essa simulação os drenos foram posicionados com uma elevação de 50 pés, que foi a que melhor apresentou resultado na simulação anterior. Nessa simulação, dada igual recarga e características hidráulicas do terreno, diminuir o espaçamento dos DHP acarreta maior redução do NA (POHLL *et al.*, 2013).

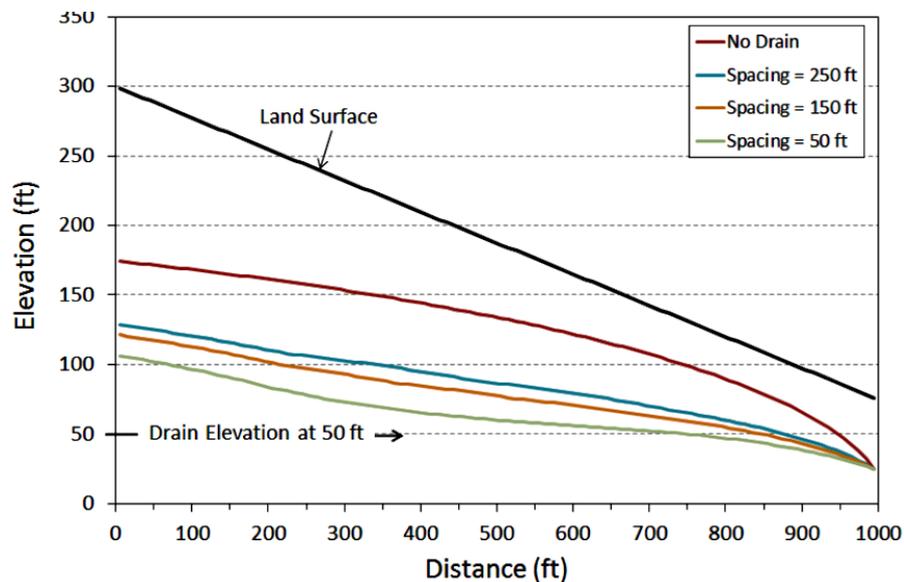


Figura 19 - Variação do NA em função do espaçamento dos DHP.  
Fonte: Pohll *et al.* (2013).

Pohll e outros (2013) verificaram a resposta do nível da água em função das características do local. As características examinadas foram a condutividade hidráulica (K) e taxa de recarga (R), ambas na unidade de pés por dia. O comprimento do dreno é de 250 pés e na Figura 20 o dreno está representado por uma linha preta na elevação de 50 pés.

Os resultados da modelagem, apresentados na Figura 20, indicam que, para diferentes características (taxa de recarga e condutividade hidráulica), há diferentes respostas para a posição do nível d'água. Na Figura 20, pode-se verificar que o nível de água aumenta com o aumento da taxa de recarga e/ou com a redução da condutividade hidráulica.

No caso, a condutividade hidráulica e as taxas de recarga são importantes para o projeto de drenagem e precisam ser consideradas.

O estudo de Pohll e outros (2013) mostrou que, além das condições hidrológicas e propriedades hidráulicas do meio, o projeto de drenagem precisará considerar também espaçamento comprimento e inclinação dos DHP.

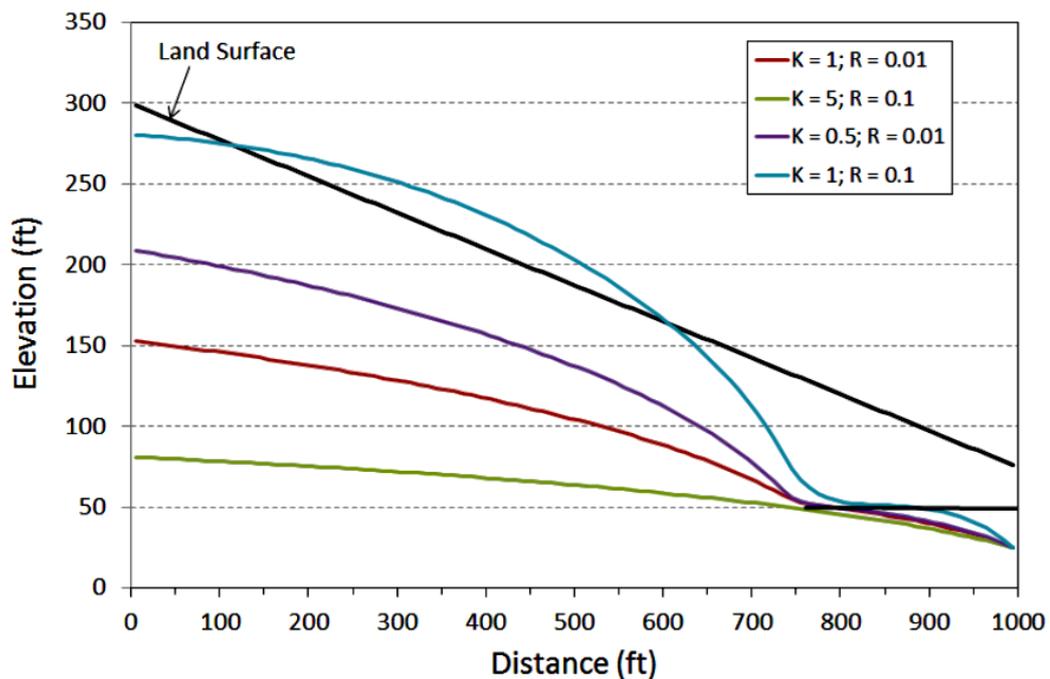


Figura 20 - Variação do NA em função da condutividade hidráulica (K) e da taxa de recarga (R).  
Fonte: Pohll *et al.* (2013).

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS CONSTRUTIVOS

#### 3.1 PROPRIEDADES DOS REJEITOS

Todo material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios, é denominado rejeito (ABNT, 2017).

O rejeito deve, necessariamente, ser disposto na forma mais adequada no meio ambiente. Esses rejeitos são, normalmente, dispostos em barragens. O aumento das atividades de mineração pode levar a um aumento significativo na geração de volume de rejeitos.

Segundo Nieble (1986), rejeitos são definidos como a fração do minério destituída de mineral útil ou valor econômico originada no processo de beneficiamento mineral. Os rejeitos podem ser caracterizados por três fases distintas: sólida, líquida e gasosa, que na prática estão dispersas na massa, mas podem, para efeitos teóricos, serem separadas. Em geral, pode-se dizer que os rejeitos se classificam em rejeitos totais, *underflow* e lamas. Os rejeitos totais constituem o produto dos processos de britagem e moagem, enquanto que os termos *underflow* e lamas são utilizados para os rejeitos grossos e finos obtidos por concentrações posteriores.

Segundo Vick (1983), grande parte do comportamento dos rejeitos é explicável a partir de sua origem geológica e de seu processamento. Porém, dentro de limites amplos, algumas generalizações podem mostrar um resumo útil das características físicas do rejeito. Deste modo, os rejeitos podem ser agrupados em quatro categorias gerais segundo a granulometria e plasticidade.

Em razão da grande diversidade dos rejeitos de mineração, as características dos materiais depositados podem apresentar variações significativas, quer em termos de diluição (o *overflow* dos hidrociclones chega ao máximo de 5% em peso, enquanto que o *underflow* dos espessadores frequentemente atinge 60%, ambos em peso), quer em termos de comportamento reológico, onde os rejeitos depositados podem ser muito plásticos (argilas/lamas) ou não plásticos (areias/grosseiros) (SOARES, 2010).

## 3.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITO

Tipicamente, para Barragens de Rejeito, se identificam três métodos construtivos básicos. Estes métodos fazem referência à técnica e direção de alteamento empregado, seguindo em direção montante, jusante ou acompanhando uma linha de centro. Tais barramentos podem ser executados com material proveniente de áreas de empréstimo, estéril ou com o próprio rejeito do beneficiamento (opção mais comum), desde que tratado e que atenda especificações geotécnicas de projeto. Para tanto, este rejeito é passível de processos adicionais como a ciclonagem, para deslamarem, passando a ser chamado de aterro hidráulico (MAFRA, 2016).

### 3.2.1 Método construtivo de alteamento a montante.

Segundo Araújo (2006), o alteamento a montante, ilustrado na Figura 21, é a técnica mais antiga, simples e o método mais econômico de construção de barragens. A etapa inicial na execução deste tipo de barragem consiste na construção de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento compactado. Construído o dique de partida, o rejeito é lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o primeiro alteamento. O processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida.

Para que o material lançado sirva de base para um alteamento, exige-se que os rejeitos contenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa, favorecendo a segregação granulométrica (SOARES, 2010).

Ressalte-se também, que nesse método construtivo existe uma dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura (FARIAS; PARANHOS, 2019).

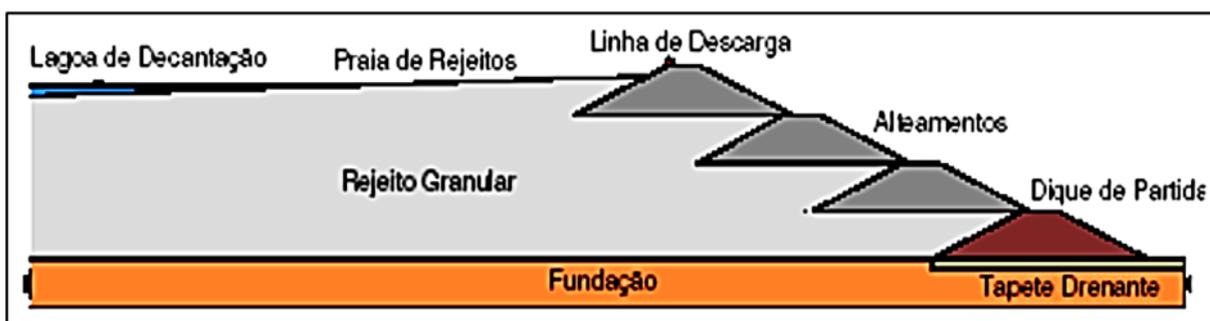


Figura 21 - Método construtivo de alçamento à montante.  
Fonte: Albuquerque Filho (2004).

As empresas mineradoras adotam, preferencialmente, o método de montante, que apresenta como principais vantagens o baixo custo de sua construção, a necessidade de menor volume de materiais, a rapidez e a simplicidade na execução dos alçamentos, normalmente realizados pela equipe técnica da própria mineradora (VICK, 1983).

### 3.2.2 Método construtivo de alçamento a jusante.

A construção de barragens de rejeitos pelo método de jusante, tem como premissa que a construção dos alçamentos sucessivos, não fossem executados sobre o rejeito previamente depositado e pouco consolidado, como ilustra a Figura 22.

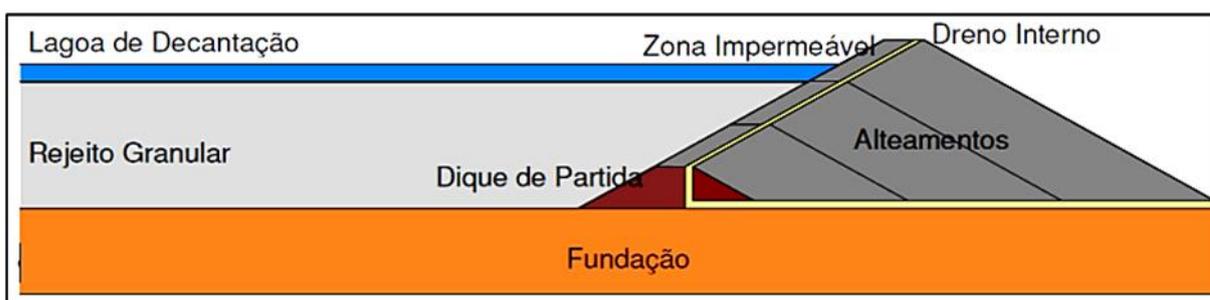


Figura 22 - Método construtivo de alçamento à jusante.  
Fonte: Albuquerque Filho (2004).

Este método necessita maiores volumes de material, gerando custos maiores, associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material. Além disto, com este método, a área ocupada pelo barramento é muito maior, devido ao progresso da estrutura para jusante em função do acréscimo.

Klohn (1981) relaciona uma série de vantagens envolvidas no processo de construção de barragens de rejeitos com alteamentos sucessivos à jusante. Dentre elas, destacam-se:

- ✓ Nenhuma parte da barragem é construída sobre o rejeito depositado e conseqüentemente pouco consolidado;
- ✓ O processo de lançamento e compactação da barragem pode ser controlado pelas técnicas construtivas convencionais;
- ✓ O sistema de drenagem interna pode ser executado durante a construção dos alteamentos da barragem, permitindo o controle da linha de saturação e aumentando a estabilidade da barragem;
- ✓ A barragem construída pelo método jusante resiste satisfatoriamente a efeitos dinâmicos, como forças sísmicas;
- ✓ As atividades de construção da barragem não provocam interferência na operação de rejeitos;
- ✓ A construção escalonada sem comprometimento da segurança da estrutura;
- ✓ Não existe limitação técnica quanto a altura da estrutura.

Ferraz (1993) destaca ainda como vantagem do método de jusante a possibilidade de redução significativa das dimensões do extravasor de cheias. A inexistência de restrições ao contato da lâmina d'água junto à crista da barragem, devido à presença de uma zona impermeável no talude de montante, justifica esta afirmação. Assim, o nesse sentido, a adoção de estruturas construídas pela técnica de alteamento para jusante possibilitou a execução de barragens de rejeitos de maior porte e com fatores de segurança mais satisfatórios.

A principal desvantagem na construção de barragens de rejeitos pelo método de jusante destaca-se a necessidade de grandes volumes de material e conseqüentemente o alto custo.

### 3.2.3 Método de alteamento por Linha de Centro

O método de alteamento de linha de centro, Figura 23, apresenta uma solução de construção com variação do método de alteamento a jusante, neste caso, o alteamento da crista é realizado no sentido vertical. O primeiro alteamento é feito com o aterro, sobre o limite montante da praia e o talude de jusante do maciço do dique de partida, com os alteamentos poste-

riores sendo coincidentes a este eixo durante toda a vida útil da barragem (ALBUQUERQUE, 2004).

Segundo Albuquerque Filho (2004), o método da linha de centro pode ser considerado uma solução geometricamente intermediária entre os dois métodos anteriormente descritos, agregando assim vantagens e desvantagens de ambos. Entretanto, o comportamento estrutural destas estruturas encontra-se mais próximo das barragens construídas pelo método de jusante.

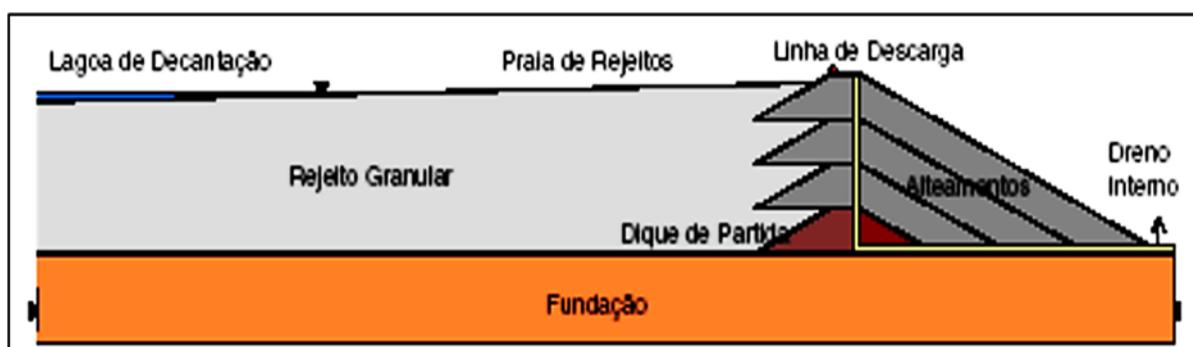


Figura 23 - Método construtivo de alçamento por linha de centro.  
Fonte: Albuquerque Filho (2004).

Segundo Assis e Espósito (1995), seu comportamento geotécnico se assemelha mais a barragens por alçamento a jusante, tendo seu eixo vertical de alçamento coincidente com o eixo do dique inicial. Neste método, torna-se possível a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alçamento, o que possibilita o controle da linha de saturação e promove uma dissipação de poropressões, tornando o método apropriado para utilização inclusive em áreas de alta sismicidade.

Lozano (2006) apresenta desvantagens no uso deste método: (i) a necessidade de sistema de drenagem eficiente; e (ii) a necessidade de sistema de contenção à jusante, porque a saturação do rejeito compromete a estabilidade do maciço, além da complexidade de operação, os investimentos globais podem ser altos.

Segundo Troncoso (1997), como grande vantagem deste método em relação ao de jusante, pode-se destacar a necessidade de um menor volume de material compactado para construção do corpo da barragem, mas esse tipo de estrutura pode apresentar ângulos muito inclinados na face de montante. Se a parte superior do talude perde eventualmente o confinamento, podem aparecer fissuras, causando problemas de erosão, e aumentos de poropressão.

## CAPÍTULO 4

### ESTUDO DE CASO

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

A bacia do Rio Paraopeba abrange área de drenagem da ordem de 13.640 km<sup>2</sup>, e está localizada na região central do estado de Minas Gerais, próxima a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), como ilustrado na Figura 24. Possui importantes mananciais de abastecimento da RMBH, que atende aproximadamente 5,15 milhões de habitantes. Três de seus afluentes tem em suas bacias, reservatórios usados para este abastecimento: Rio Manso; Ribeirão Juatuba; e Rio Betim (ANA, 2019).

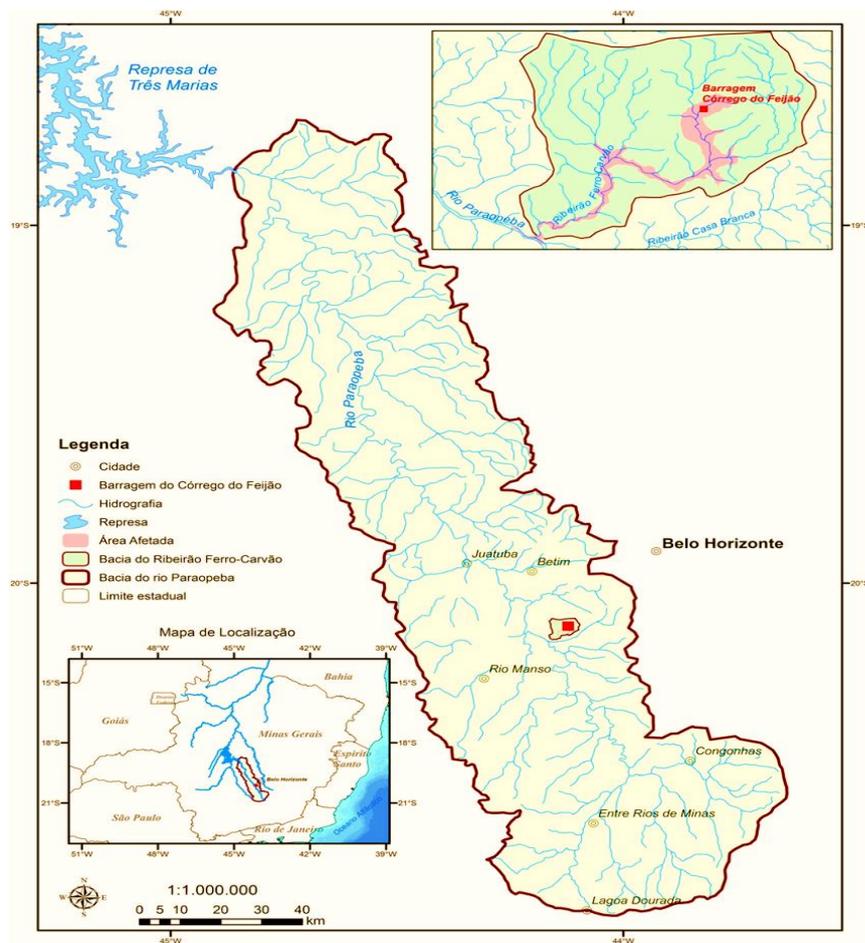


Figura 24 - Localização da bacia do Rio Paraopeba.  
Fonte: CPRM (2019).

O Rio Paraopeba é afluente da margem direita do Rio São Francisco e é um dos formadores do reservatório da usina de Três Marias, da Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG). No Rio Paraopeba existem as usinas hidrelétricas de Salto do Paraopeba e Retiro Baixo, e a barragem de nível da usina termelétrica de Igarapé.

Os principais usos da água da bacia do rio Paraopeba são: geração de energia elétrica; abastecimento público; abastecimento industrial, com destaque para mineração e irrigação,

O Ribeirão Ferro Carvão, afluente pela margem direita do rio Paraopeba, forma uma sub-bacia com área de 32,8 km<sup>2</sup>, e a vazão média em sua foz é da ordem de 600 L/s, obtida através de regionalização de vazão (ANA, 2019).

No alto da Figura 24 destaca-se essa sub-bacia, onde está contida a Mina Córrego do Feijão, local do acidente com a barragem objeto desse estudo de caso.

A Figura 25 ilustra o eixo do Rio Paraopeba e os principais pontos de outorga.

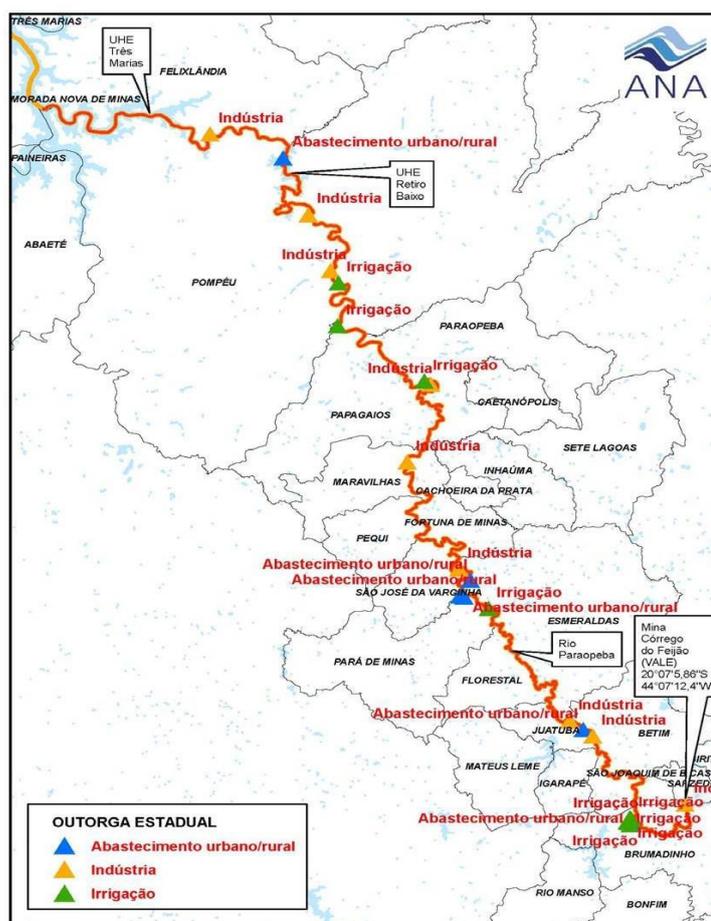


Figura 25 - Principais usos da água na bacia do Rio Paraopeba.  
Fonte: ANA (2019).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM I

A Figura 26 ilustra a paisagem local onde pode ser vislumbrada a Barragem I em primeiro plano.

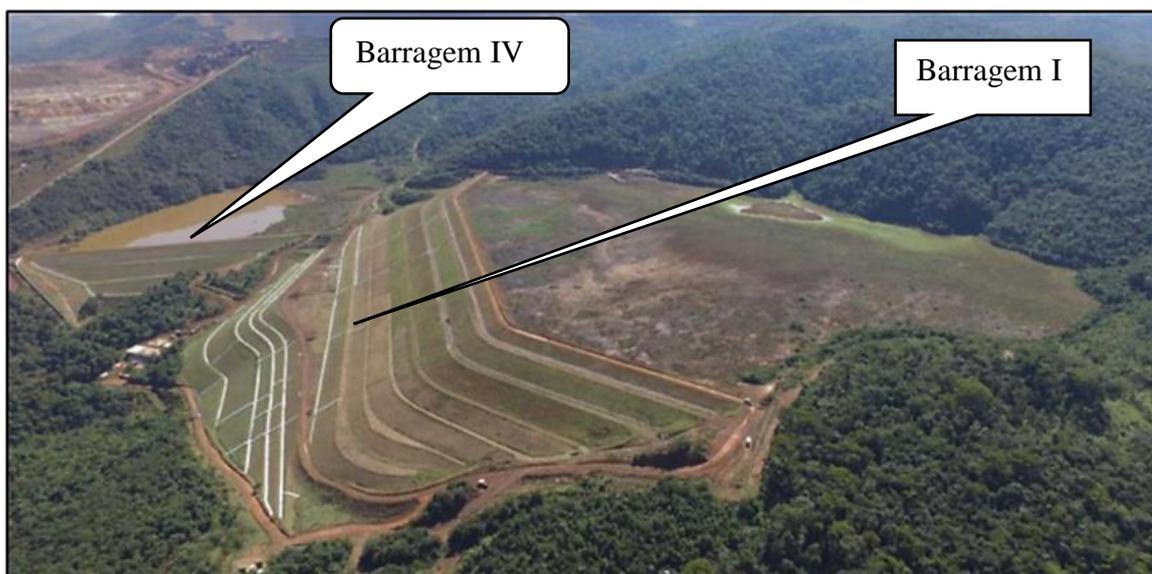


Figura 26 - Vista aérea do local antes do acidente com a Barragem I.  
Fonte: VALE (2018).

Conforme SEGUR (2019), a Barragem I da Mina de Córrego do Feijão possuía, entre barramento e rejeitos armazenados, aproximadamente 11.600.000 m<sup>3</sup>, em 2016, quando foi encerrada a disposição de rejeito (descomissionamento da barragem).

O efluente coletado da Barragem I era direcionado para armazenamento na Barragem IV e posterior reutilização no processo de beneficiamento do minério de ferro.

A SETEC (2019, p.17), descreve que a Barragem I foi construída pelo método de alçamento a montante, de acordo com o projeto, elaborado em 1975, pela empresa Christoph Erb. Foi implantada no vale do Ribeirão Ferro Carvão, em 1976, tendo como proprietária a Ferteco Mineração S/A. Em 2001, a Ferteco foi adquirida pela Vale, que manteve a atividade de disposição de rejeitos em operação até 2016, quando houve o descomissionamento.



1,0 m de espessura no talude de jusante, seguindo o projeto. Essa etapa inicial teve o coroamento da crista na cota 874,00 m, com barramento de 18,0 m de altura.

Segundo SEGUR (2019), o dique de partida possuía inclinações a montante de 1V:1,5H e a jusante 1V:1,75H. No talude a jusante existia uma berma de 5,0 m de largura na cota 864 m. Os relatórios de acompanhamento desta obra, não fazem referências à drenagem interna.

A Barragem I foi idealizada para possuir alteamentos para montante, conforme os rejeitos fossem sendo dispostos na estrutura. A Figura 28 ilustra o perfil da barragem após seu encerramento. Tomando o dique de partida como o primeiro alteamento, na cota 874 m, o segundo alteamento foi composto por uma série de cinco alteamentos. O primeiro com 3 m e o segundo com 2 m, ambos a montante, e o terceiro com 5 m em linha de centro. O quarto com 5 m e o quinto com 2,5 m, ambos a montante, formando todo o conjunto do então tido como o segundo alteamento até a cota 891,5 m.

O terceiro alteamento consistiu também em pequenos alteamentos a montante, coroadando a crista na cota 899 m. O quarto alteamento foi até a cota 905 m e teve um recuo acentuado para tornar sua crista retilínea. Para isso esse quarto alteamento foi construído avançando sobre a praia de rejeito. Pela Figura 28 pode-se verificar que até o terceiro alteamento a declividade média do barramento era de aproximadamente 23°. Dessa forma, o recuo também proporcionou o abatimento da declividade do talude de jusante do barramento, que passou para aproximadamente 18°.

Os alteamentos subsequentes avançaram a montante a partir da crista do alteamento anterior, tendo, a crista do décimo alteamento, alcançado a cota de 942 m. Ao final a barragem possuía 86 m de altura e com 720 m de comprimento. No projeto, o volume previsto do reservatório (armazenamento) seria de 8.797.136 m<sup>3</sup> de rejeito. Em 2016, com interrupção da operação, o volume de rejeitos armazenados só atingiu 7.529.033 m<sup>3</sup> (SETEC, 2019).

O Quadro 3 resume os alteamentos havidos na Barragem I.

Como indicaram Robertson e outros (2019), o dique de partida não possuía drenos e a drenagem interna até o quarto alteamento consistia em uma camada de drenagem horizontal na base da berma. Para o quinto e subsequentes alteamentos, os projetos especificaram sistemas de drenagem interna consistindo de drenos verticais e horizontais construídas em forma de “L”. Esses especialistas concluíram que a barragem de rejeito teve muito pouca drenagem

e que a drenagem interna inadequada instalada na barragem durante a construção inicial contribuiu para altos níveis de água na barragem e na bacia (ROBERTSON *et al.*, 2019).

Etapa	Ano	Alteamento	EI. (m)	Altura máx. (m)	Tipo de alteamento	Projetista	Construtora
1	1976	Bar. Inicial	874	18	-	Christoph Erb	Emtel
2	1982	2.º	877	21	montante	Tecnosan	Tercam
3	1983		879	23	montante		?
4	1984		884	28	Linha centro		Construtora Sul Minas
5	1986		889	33	montante		?
6	1990		891,5	35,5	montante		Unienge Com. e Constr. Ltda.
7	1991	3.º	895	39	montante	Riad Chammas	Construtora Sul Minas
8	1993		899	43	montante		.
9	1995	4.º	905	49	montante	Tecnosolo	CMS Constr.S.A
10	1998	5.º	910	54	montante		U&M
11	2000	6.º	916,5	60,5	montante		Constr. Dragagem Paraopeba
12	2003	7.º	922,5	66,5	montante		Construtora Impar Ltda.
13	2004	8.º	929,5	73,5	montante		Integral
14	2008	9.º	937,0	81,0	montante	Geoconsultoria	Integral
15	2013	10.º	942,0	86,0	montante	Geoconsultoria	Salum Enga.

Quadro 3 - Características de projeto e construção dos alteamentos da Barragem I.  
Fonte: SEGUR (2019).

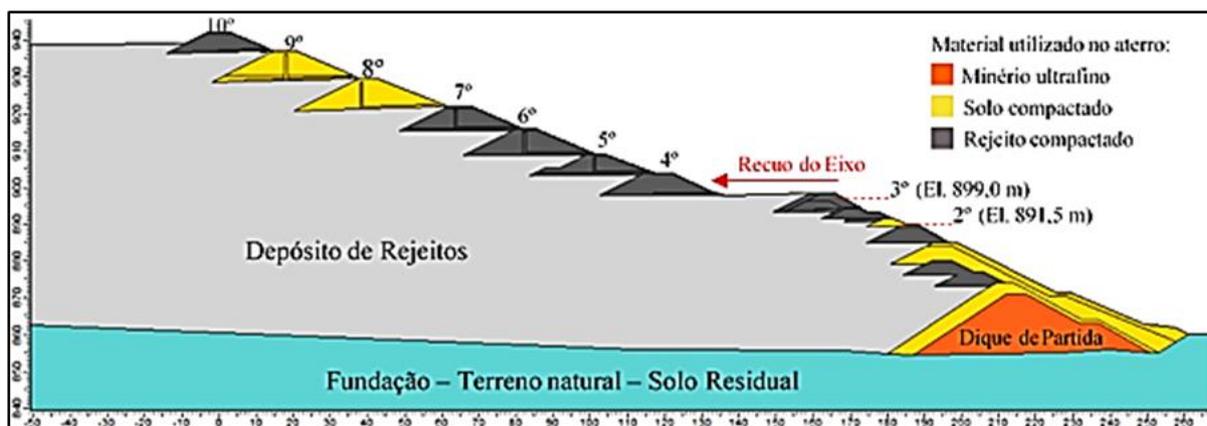


Figura 28 - Ilustração da geometria da Barragem I na seção de máxima altura.  
Fonte: VALE (2018).

Segundo a SETEC (2019) o 2º alteamento, que correspondia ao envelopamento de alteamentos menores realizados, decorreu, supostamente, devido à existência de surgências nas etapas intermediárias.

O material constituinte na maior parte dos alteamentos foi o próprio rejeito de minério compactado, sendo que alguns alteamentos, como o 8º e 9º alteamentos, foram construídos com solo compactado, retirado de áreas de empréstimo. Na Figura 28 é possível observar a distinção entre alteamentos executados com diferentes materiais.

Ainda segundo a SETEC (2019), nos sistemas de drenagem interna utilizados, foram empregadas diferentes soluções ao longo da execução dos alteamentos. Destacando-se que são relatadas várias incertezas quanto ao sistema de drenagem interna em diversos alteamentos, devido à carência de informações históricas, não se tendo a certeza de que a solução projetada foi efetivamente implantada na sua totalidade. De forma simplificada, com base nos dados disponíveis, os primeiros alteamentos supostamente foram executados sem sistema de drenagem, sendo que os alteamentos subsequentes foram utilizados sistemas baseados no emprego de tapetes drenantes constituídos de “sinterfeed” (material que passou pelo processo de sinterização para homogeneização e granulação), conjugados com filtros verticais, até o 7º alteamento. Os alteamentos seguintes (8º, 9º e 10º) adotaram sistemas baseados no uso de tapetes drenantes executados em areia, conjugados ou não com filtros verticais.

Em 2018 foram realizadas tentativas de otimizar a drenagem interna, tais como a instalação de DHP (Drenos Horizontais Profundos). Foram executadas 15 unidades desse tipo de dreno, sendo que o 15º DHP foi posteriormente selado, devido a problemas ocorridos durante sua execução (SETEC, 2019).

Conforme citou a SETEC (2019), a drenagem superficial no talude de jusante era composta basicamente por canaletas e descidas de água em concreto. O sistema extravasor era formado por torres interligadas a uma galeria de fundo conectada a um canal, descarregando na Barragem VI.

O monitoramento geotécnico da Barragem I era realizado, no seu estágio final, por 194 instrumentos ativos, sendo 93 piezômetros, 37 indicadores de nível d'água, 7 marcos superficiais, 53 pontos de medição de vazão em saída de drenos, um medidor de vazão residual, dois inclinômetros, um pluviômetro e um sismógrafo. Em dezembro de 2018 foram imple-



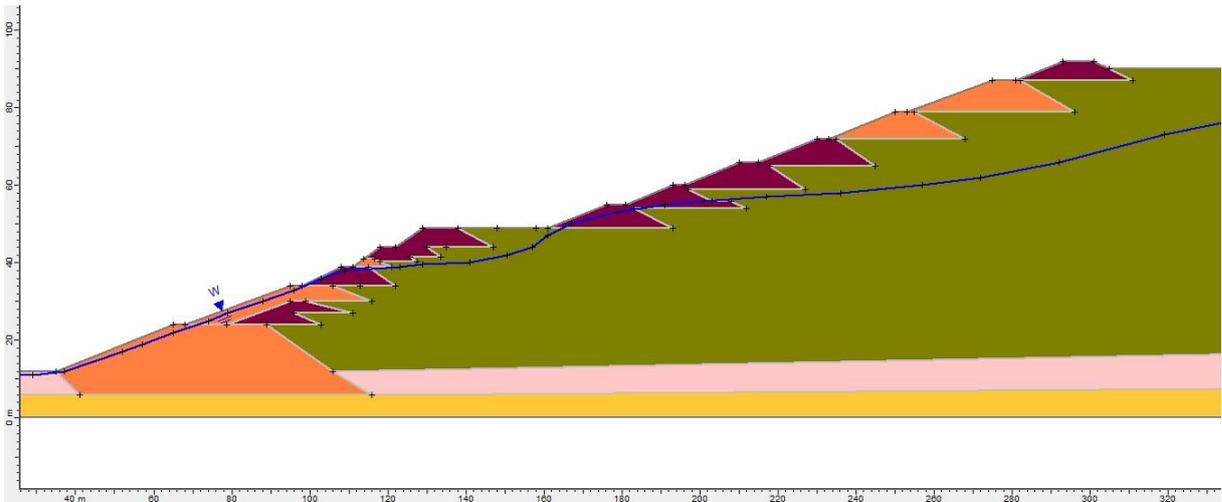


Figura 30 - Perfil geotécnico da seção crítica da Barragem I.

Fonte: Miranda Neto e Santos (2020).

A retroanálise conduzida por Miranda Neto e Santos (2020) mostrou que poderia ter havido tanto uma ruptura não drenada como uma ruptura drenada, sendo esta última a mais provável de ter ocorrido. A Figura 31 ilustra a superfície de ruptura para o caso da ruptura não drenada e a Figura 32 ilustra a superfície de ruptura para o caso drenado.

Para o caso não drenado a razão de resistência ( $S_u / \sigma'_v$ ) seria de 0,294 e para o caso drenado o ângulo de atrito seria de  $19^\circ$ , admitindo uma coesão de 5 kPa.

Miranda Neto e Santos (2020) admitem que outros fatores como carregamentos externos do tipo vibração (perfurações, explosões, tráfego ou sismos) poderiam ter contribuído para que o barramento tivesse um comportamento não drenado. No entanto, a realidade dos fatos que levaram a ruína da barragem ainda está sendo discutida.

O que se evidencia é que a linha freática elevada certamente contribuiu para uma redução na resistência da barragem e que a elevação da linha freática elevada pode ter sido ocasionada por deficiências no sistema de drenagem.

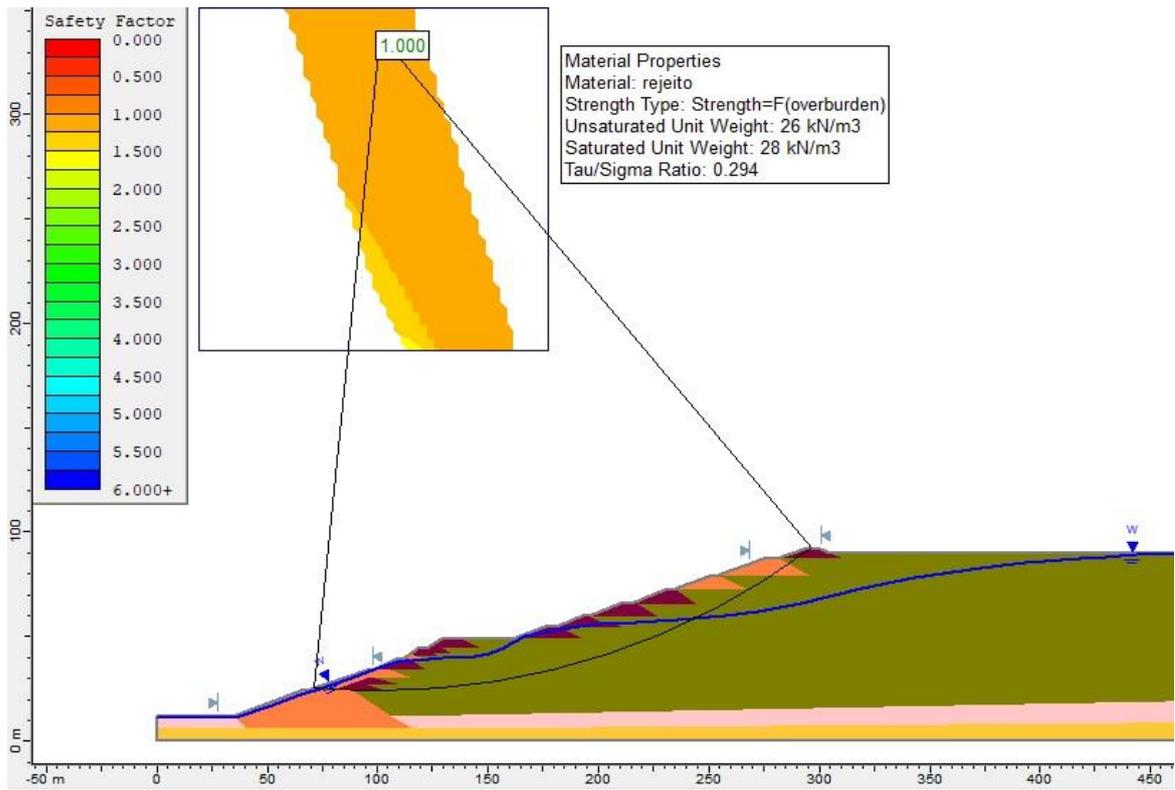


Figura 31 - Superfície de ruptura para o caso não drenado.  
Fonte: Miranda Neto e Santos (2020).

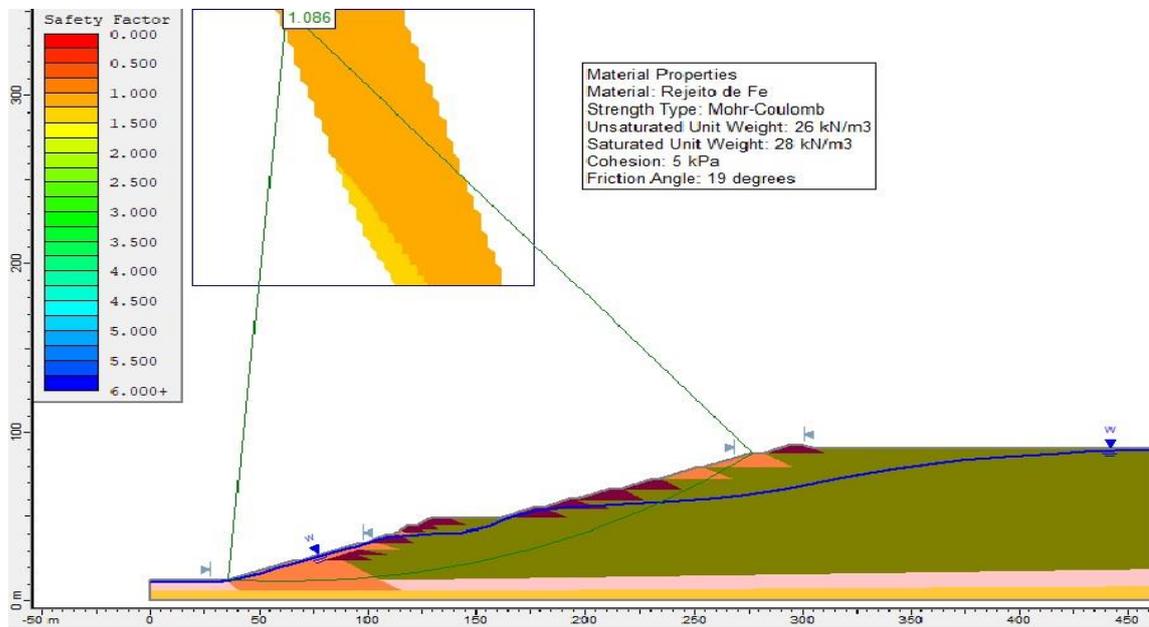


Figura 32 - Superfície de ruptura para o caso drenado.  
Fonte: Miranda Neto e Santos (2020).

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Desse estudo pode-se concluir que os aspectos da drenagem em barragens de contenção de rejeitos construídas pelo método da linha de montante têm grande importância no comportamento do nível d'água da bacia de rejeitos, e o controle do nível d'água pode contribuir para reduzir o número de acidentes e danos ao meio ambiente.

A elaboração do projeto executivo do sistema de drenagem eficiente, empregando tapetes drenantes, drenos verticais drenos horizontais profundos e sistemas de coleta adequados e também um programa de monitoramento e instrumentação, no controle do nível da água, no reservatório, no corpo da barragem e na vazão jusante, podem significar um aumento da segurança da barragem. Portanto, sua execução e operação são imprescindíveis ao método construtivo da alteamento a montante.

Conforme a metodologia, quando o projeto segue os trâmites normativos no dimensionamento, execução e monitoramento, permite a adoção de medidas de controle ao ser detectada alguma variação anômala da percolação e na poropressão, no corpo da barragem e em seu reservatório.

Este Trabalho de Conclusão de Curso visou contribuir com a ciência relatando aspectos específicos relativos aos sistemas de drenagem, que podem favorecer a segurança estrutural e ambiental de barragens de contenção de rejeitos de mineração, focando sobre a importância da eficiência dos projetos de drenagem.

Como sugestão para futuros trabalhos são indicados estudos de sistemas de drenagem alternativos compatíveis com barragens de rejeitos pelo método de alteamento a montante que já estejam em operação e apresentem alguma deficiência nos seus atuais sistemas de drenagens.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13028 Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2017. 3ª ed. 16p.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. *Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone*. Ouro Preto, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

ALONSO, U. R. *Rebaixamento temporário de aquíferos*. Oficina de textos. São Paulo, 2007. 152p.

ANDRADE, H. A. C. *Implementação de Procedimentos Numéricos para a Análise de Elementos Drenantes em Solos*. Rio de Janeiro, 2003. 125p. Dissertação (mestrado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4301/4301\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4301/4301_3.PDF)>. Acessado em 20/06/2021.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Relatório de segurança de barragens 2020*. Brasília, 2021. 130 p.

ANM - Agência Nacional de Mineração. *Relatório Comitê Técnico de Segurança de Barragens de Mineração Ano 2020*. Ministério de Minas e Energia. Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral. Brasília, 2021. 62 p.

ARAÚJO, C. B. *Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro*. Rio de Janeiro, 2006. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ.

ASSIS A.; ESPÓSITO, T. *Construção de Barragens de Rejeito Sob uma Visão Geotécnica*. In: III Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO, 1995 pp. 259-273.

BASTOS, I. G. *Estabilização de encostas através de drenagem profunda: estudo de um caso de estabilização com túnel de drenagem*. São Paulo 2006, 219p. Dissertação (mestrado) USP- São Paulo. 2006.

BRASIL. *Lei Federal nº 12.334 de 20 de setembro de 2010*. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm)>. Acessado em 06/10/2021.

\_\_\_\_\_. *Lei Federal nº 14.066 de 30 de setembro de 2020*. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art3](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art3)>. Acessado em 06/10/2021.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. *Mecânica dos solos*. Gráfica EESC/USP, vols. 1 e 2. São Carlos, 1985.

CARVALHO, P. A. S. *Manual de Geotecnia: Taludes de Rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas*. São Paulo, 1991. 388p. Instituto de Pesquisa Tecnológicas. Disponível em <<http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Documentos/Geotecnia.aspx>>. Acesso em 05/07/2021.

CASAGRANDE, A. *Percolação de Água através de Barragens de Terra*. Manual Globo, 1964, v. 5, 2º tomo, p. 155-192.

CASTRO, L. V. P. *Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem c de contenção de rejeito alteada a montante*. São Paulo, 2008. ed. rev. 103 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

CEDERGREN, H. R. *Seepage, Drainage and Flownets*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968. 489p.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012*. Diário Oficial da União nº 172 de 4 de setembro de 2012, seção I. Brasília, 2012 pp 149-152.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. *Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba - Relatório 04: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico*. Belo Horizonte/MG. Julho 2019.

CRUZ, P. T. *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos Materiais de Construção Projeto*. 2ª ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2004. 680 p.

DOBEREINER, L.; VAZ, L. F. *Tratamento de Maciços Naturais*. In: OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia ABGE. São Paulo, 1998, 380p.

EPA – Australia Environment Protection Agency. *Tailing Containment*. Best Practice Environment Management in Mining. Australian Federal Environment Department. Australia, Junho 1995.

EPA – U. S. Environment Protection Agency. *Design and evaluation of tailing dams*. Office of Solid Waste. Washington: August 1994 (Technical Report EPA 530-R-94-038).

FARIAS, R.; PARANHOS, H. (2019). *Notas de Aula de Engenharia de Barragens*. UnB. Brasília, 2019. 175p. Disponível em <<https://docero.com.br/doc/8e8n5sx>>. Acessado em 23/6/2021.

FERRAZ, F. *Disposição de Rejeitos de Mineração*. Ouro Preto, 1993. 62p. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

KLOHN, E.J. *The development of current tailings dam design and construction methods. Design and Construction of Tailings Dams*. Colorado School of Mines, USA. Colorado, 1981. 75p.

LOZANO, F. A. E. *Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica*. São Paulo, 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, USP, São Paulo, SP.

MAFRA, J. M. Q. *Barragem construída com rejeito ciclonado: uma possível solução para disposição de rejeitos no Brasil*. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABMS. 2016.

MASSAD, F. *Obras de Terra: curso básico de geotecnia*. 2ª ed. Oficina dos Textos Ltda. São Paulo, 2010. 216p.

MIRANDA, A. N. *Notas de aula: Inspeção de barragens de aterro*. Curso: Inspeção e Segurança de Barragens. Fundação Parque Tecnológico do Itaipu, Agência Nacional de Águas. 2016.

MIRANDA NETO, M. I.; SANTOS, T. B. N. *Retroanálise de estabilidade sobre o acidente na barragem de rejeito do Córrego do Feijão em Brumadinho – MG*. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Campinas, 2020. No prelo.

MÜLLER, M. C. N. *Rebaixamento Lençol Freático: Indicações, métodos e impactos decorrentes*. São Paulo, 2004. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, SP.

NIEBLE, C.M. *Deposição de rejeitos*. Apostila para o curso de geotecnia aplicada a minas a céu aberto. Paulo Abib Engenharia S.A. Itabira, 1986. 28p.

PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª ed. Oficina dos Textos. São Paulo, 2006.

POHLL, G.M.; CARROLL, R. W.; REEVES, D.M.; PARASHAR, R.; MUHUNTHAN, B.; THYIYAGARJAH, S.; BADGER, T.; LOWELL, S.; WILLOUGHBY, K. *Design Guidelines for Horizontal Drains used for Slope Stabilization*. Olympia. Washington State Department of Transportation. Washington, 2013. 390p.

PORTES, A. M. C. *Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta*. Belo Horizonte, 2013, 170p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transporte). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais.

RIBEIRO, V. Q. F. *Proposta de metodologia para avaliação do efeito de rupturas de estruturas de contenção de rejeitos*. Belo Horizonte, 2015, 267p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais.

ROBERTSON, P. K.; MELO, L.; WILLIAMS, D. J.; WILSON, G. W. *Relatório do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da barragem I do Córrego do Feijão*. 2019. Disponível em <<http://www.b1technicalinvestigation.com/pt/report.html>>. Acessado em 27/02/2020.

SANDRONI, S. S – *Notas de aula: Geotecnia das Barragens*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2012.

SEGUR - Seção de Segurança e Saúde do Trabalhador. *Relatório de Análise de Acidente de Trabalho - Rompimento da barragem B I da Vale S.A. em Brumadinho/MG, em 25/01/2019*. Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais. Ministério da Economia. Belo Horizonte, 2019, 238p. Disponível em: [https://sinait.org.br/docs/305346580-relatorio\\_bi\\_-\\_a\\_corpo\\_assinado.pdf](https://sinait.org.br/docs/305346580-relatorio_bi_-_a_corpo_assinado.pdf). Acessado em 05/07/2021.

SETEC. Setor Técnico-Científico. *Laudo de Perícia Criminal Federal nº 1070/2019*. Superintendência Regional da Polícia Federal em Minas Gerais. MJSP. Belo Horizonte, 2019. 207p. Disponível em [https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/laudo\\_1070\\_2019\\_setec\\_sr\\_pf\\_mg\\_assinado-2.pdf](https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/laudo_1070_2019_setec_sr_pf_mg_assinado-2.pdf). Acessado em 14/05/2021.

SILVA, D. S. *Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens*. Ouro Preto, 2016. 181 p. Dissertação de Mestrado - UFOP, Setembro/2016.

SOARES, L. *Barragens de Rejeitos: Metodologia de implantação, operação e manutenção*. São Paulo, 1998. 74p. Apostila para a disciplina de pós-graduação do Departamento de Minas e de Petróleo, PMI-5883.

SOARES, L. *Barragem de Rejeitos*. Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia. Comunicação Técnica elaborada para compor o capítulo 19 do livro Tratamento de Minérios, editores Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. Rio de Janeiro, 2010. 5ª ed. pp. 831–896.

SOUZA, M. M. *Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC*. Rio de Janeiro, 2013. 129p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Curso de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.

TAYLOR, D. *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1948. 711p.

TECPER. *TECPER Fundações e Geotecnia Ltda*. São Paulo, 2021a. Disponível em <<https://tecper.com.br/servicos/dreno-sub-horizontais-dhp>>. Acessado em 17/06/2021.

TECPER. *TECPER Fundações e Geotecnia Ltda*. São Paulo, 2021b. Disponível em <<https://tecper.com.br/atuacao/mineracao-dhp>>. Acessado em 17/06/2021.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1996. 529p.

TRONCOSO, J. H. *Geotechnics of Tailings dams and sediments*. International Congress of Environmental Geotechnics – ICEG. 1997. pp. 1405-1423

VALE. Vale S/A e TÜV SÜD Bureau de Projetos. *Revisão Periódica de Segurança, Barragem Mina Córrego do Feijão, Relatório Técnico*. Belo Horizonte, 2018. 265p. Disponível em [https://worldminetailingsfailures.org/wp-content/uploads/2019/03/TUV\\_SUD\\_2017\\_Periodic\\_Safety\\_Review-1.pdf](https://worldminetailingsfailures.org/wp-content/uploads/2019/03/TUV_SUD_2017_Periodic_Safety_Review-1.pdf). Acessado em 10/05/2021.

VICK, S.G. *Planning, design and analysis of tailings dams*. 2<sup>nd</sup> ed. Bitech Publishers Ltd. Canada, 1990.

ZATELLI, K. S.- *Segurança das Barragens de Mineração ao Redor do Mundo: Arcabouço legal*. 2019. Disponível em <https://www.matanativa.com.br/seguranca-barragens-mineracao-mundo/>. Acessado em 01/06/2021