

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**DOBLE TITULACIÓN  
CONVENIO DE INTERCAMBIO DE ESTUDIANTES  
PUCP-USP**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

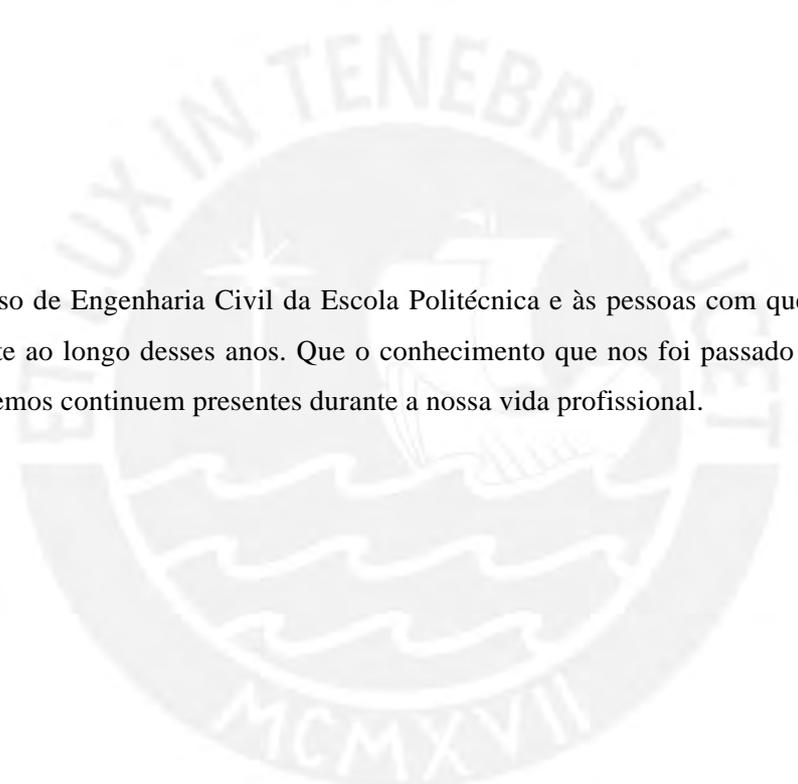
**COMPORTAMIENTO E PROJETO DE BARRAGEM DE REJEITOS  
CONSTRUÍDA PARA MONTANTE**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta:

**Robert Jesús Mendoza Zambrano  
Matheus Bueno da Silveira Endler  
Henrique Figueiredo Maceira  
Raul Moysés Neto**

**ASESOR: Fernando A.M. Marinho**

Lima, Febrero del 2018



Ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica e às pessoas com quem convivi nesse ambiente ao longo desses anos. Que o conhecimento que nos foi passado e os colegas que conhecemos continuem presentes durante a nossa vida profissional.

## **Agradecimentos**

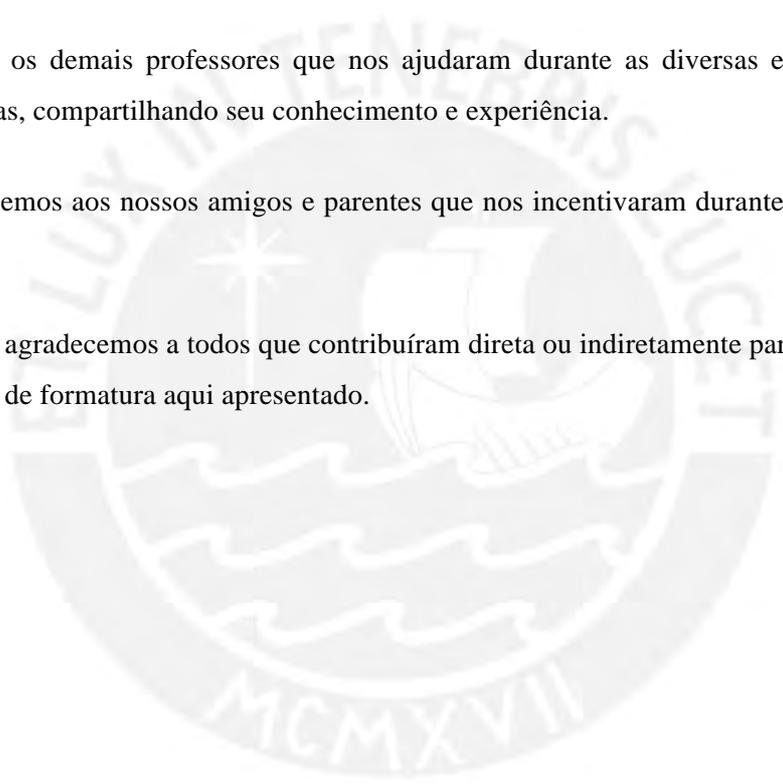
Agradecemos, primeiramente, a Deus, que nos deu a oportunidade e energia necessária para concluirmos esse trabalho.

Ao nosso professor orientador, Fernando Marinho, que disponibilizou seu tempo e dedicação para nos auxiliar com ideias e decisões durante toda execução deste estudo.

A todos os demais professores que nos ajudaram durante as diversas etapas e pesquisas realizadas, compartilhando seu conhecimento e experiência.

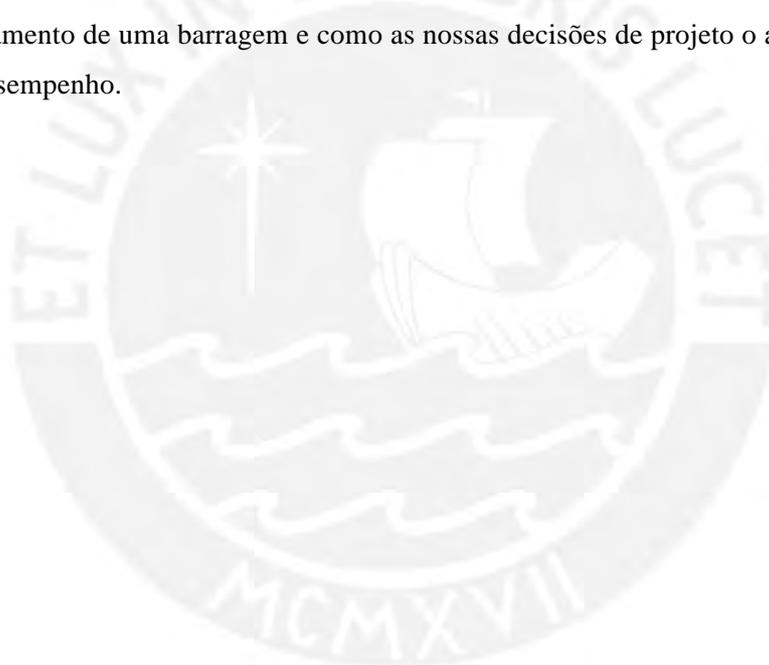
Agradecemos aos nossos amigos e parentes que nos incentivaram durante todo o tempo de curso.

Por fim, agradecemos a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão do trabalho de formatura aqui apresentado.



## Resumo

Uma barragem de rejeito é uma estrutura de terra, e o método mais utilizado para a disposição de rejeitos de mineração, atividade econômica de grande peso na receita nacional, porém, é um tipo de construção de elevado risco, cujas falhas históricas causaram impactos catastróficos à sociedade e ao meio ambiente, vide rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana-MG. Por este motivo, este estudo visa revisar os conceitos envolvidos em um projeto de barragem de rejeitos, suas etapas e diferentes alternativas, e, posteriormente, sugerir dados hipotéticos para elaborar um projeto tecnicamente viável, cujo método de alteamento é a montante. Para o projeto, foram utilizadas ferramentas computacionais para realizar diversas análises, como percolação de água, evolução de pressões no solo e deformação, para compreender melhor o funcionamento de uma barragem e como as nossas decisões de projeto o afetam, assim como o seu desempenho.



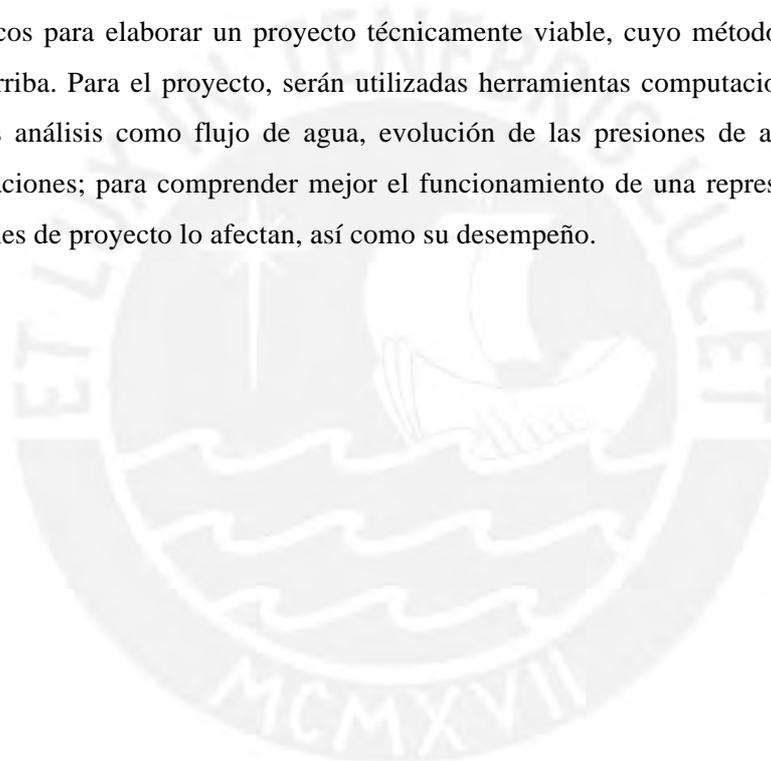
## Abstract

A tailings dam is a land structure, and the most widely used method for disposing of tailings, a major economic activity in national revenue. It is a high-risk construction whose historical failures have caused catastrophic impacts on society and the environment, like the accident at Fundão dam in Mariana-MG. With this in mind, this study aims to review the concepts involved in a tailings dam project, its stages and different alternatives, and later to suggest hypothetical data to elaborate a technically feasible project, whose method is upstream. For the project, computational tools were used to perform various analyzes, such as percolation of water, evolution of soil pressures and deformation, to better understand the operation of a dam and how our design decisions affect it, as well as its performance.



## Resumen

Una represa de relaves mineros es una estructura para almacenar residuos de la actividad minera, y es el método más utilizado para la disposición de relaves mineros, actividad económica de grande peso en el ingreso Nacional. Es un tipo de construcción de elevado riesgo, cuyas fallas históricas causaron impactos catastróficos a la sociedad y al medio ambiente, por ejemplo, el rompimiento de la “Barragem de Fundão”, en Mariana-MG. Con esto en mente, este estudio pretende revisar los conceptos involucrados en un proyecto de represa de relave minero, sus etapas y diferentes alternativas; y posteriormente, sugerir datos hipotéticos para elaborar un proyecto técnicamente viable, cuyo método de disposición es aguas arriba. Para el proyecto, serán utilizadas herramientas computacionales para realizar diversos análisis como flujo de agua, evolución de las presiones de agua en el suelo, y deformaciones; para comprender mejor el funcionamiento de una represa y cómo nuestras decisiones de proyecto lo afectan, así como su desempeño.





**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**COC-CIVIL**

---

**TRABALHO DE FORMATURA II**  
**ATA DA COMISSÃO JULGADORA**

ALUNOS: Henrique Figueiredo Maceira  
Raul Moysés Neto  
Matheus Bueno da Silveira Endler  
Robert Jesús Mendoza Zambrano

TÍTULO DO TRABALHO: **Comportamento e projeto de  
barragem de rejeitos construída para montante**

ORIENTADOR(A): Fernando Antônio Medeiros Marinho

DATA DA REALIZAÇÃO DO EXAME: **07/12/2016**

A COMISSÃO JULGADORA ABAIXO ASSINADA CONSIDEROU O GRUPO

APROVADO (  )

REPROVADO (  )

NOTA DO GRUPO: 9,5

MEMBROS DA BANCA JULGADORA:

Fernando Antônio Medeiros Marinho

ASS.: 

Guillermo José Zavala Rosell

ASS.: 

Edilson Pissato

ASS.: 



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**COC-CIVIL**

**\*\*\* INFORMAÇÕES ESPECIAIS \*\*\***

**Método de avaliação:**

Devem existir duas avaliações: uma individual, nota NI, dada pelo orientador em função da participação do aluno no Trabalho, e uma em grupo. A nota do grupo, NG, é dada pela banca, escolhida pelo grupo e aprovada pelo orientador, diante da qual o grupo defenderá o trabalho, ao final do semestre.

**Critério de avaliação:**

Se  $NI > 5$  e  $NG > 7$ , a MF é:  $(NI + NG) / 2$

Se  $NI > 5$  e  $5 < NG < 7$ , o grupo vai para recuperação, isto é: MF=4

Se  $NG < 5$  o grupo é reprovado sem recuperação, isto é: MF=2

Alunos com  $NI < 5$  estão reprovados, isto é: MF=2

A presença nas aulas e nas reuniões de orientação é fundamental, não se admitindo mais de três faltas no semestre, o que reprovaria o aluno com FF < 70%.

ALUNO	NOTA DO GRUPO NG	NOTA INDIVIDUAL NI	MÉDIA FINAL MF	FREQÜÊNCIA FINAL FF
Henrique Figueiredo Maceira	9,5	9,0	9,25	100
Raul Moysés Neto	9,5	9,0	9,25	100
Matheus Bueno da Silveira Endler	9,5	9,0	9,25	100
Robert Jesús Mendoza Zambrano	9,5	10,0	9,75	100

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Número de falhas de barragens de rejeito ao longo do tempo .....	19
Figura 2– Incidentes em barragens de rejeito segundo o tipo de barragem .....	21
Figura 3 – Comparação dos incidentes segundo o tipo de barragem de rejeito .....	22
Figura 4 - Variação na razão $Su/ \sigma_c$ em função da taxa de sobre adensamento (OCR).....	27
Figura 5 - Permeabilidade em função da distância do ponto de descarga .....	29
Figura 6 - Ensaios de tensão cíclica de cisalhamento para alguns rejeitos típicos.....	30
Figura 7 - Método de alteamento a montante .....	33
Figura 8 - Método de alteamento a jusante .....	34
Figura 9 - Método de alteamento em linha de centro .....	35
Figura 10 - Tipos de drenos usados nas barragens de rejeitos .....	39
Figura 11 - Drenagem superficial da barragem.....	40
Figura 12 - Tubulação de distribuição de rejeitos: (a) múltiplos pontos de descarga, (b) ponto único de descarga .....	42
Figura 13 - Distribuição das dimensões das partículas depositadas na praia de rejeitos de uma barragem de rejeitos .....	43
Figura 14 - Piscina de rejeitos e a formação da praia de rejeitos.....	45
Figura 15 - Efeito da permeabilidade na linha freática e na estabilidade da barragem.....	46
Figura 16 - Métodos de decantamento: (a) método baseado no uso de barcaças munidas de bombas e sifões, (b) torre de decantação .....	48
Figura 17 - Esquema de um piezômetro hidráulico.....	50
Figura 18 - Inclinômetro .....	51
Figura 19 - Marco topográfico.....	52
Figura 20 - Drenos verticais para aceleração do recalque por adensamento.....	58
Figura 21 - Análise da estabilidade de um talude pelo método do equilíbrio-limite .....	61
Figura 22 - Fluxo d'água em um ponto infinitesimal da massa do solo.....	64
Figura 23 - Fatores que influenciam a posição da superfície freática: (a)Efeito da localização da lagoa. (b) Efeito da segregação da praia e a variação da permeabilidade lateral. (c) Efeito da permeabilidade da fundação.....	66
Figura 24 - Efeito do zoneamento interno na linha freática: (a) configuração apropriada da permeabilidade interna para controle da superfície freática. Flechas indicam a direção do fluxo, (b) infiltração bloqueada por um material de baixa permeabilidade na face do aterro, produzindo uma superfície freática alta .....	68
Figura 25 - Uso de um tapete drenante no dique inicial de barragens contruídas pelo método de alteamento a montante .....	68
Figura 26 - Uso do rejeito para drenagem interna no método a montante .....	69
Figura 27 - Média histórica de precipitação.....	74
Figura 28 - Chuva de projeto em função do período de retorno e modelo de extrapolação.....	75
Figura 29 - Perfil geológico .....	76

Figura 30 - Propriedades do material da Fundação .....	76
Figura 31 - Curva granulométrica comparando rejeito arenoso e argiloso .....	78
Figura 32 - Gráfico para comparação entre as curvas de deformabilidade do rejeito arenoso e argiloso. Em vermelho o rejeito fino e em cinza o granular .....	79
Figura 33 - Primeira tentativa do desenho do Dique Inicial .....	82
Figura 34 - Análise de fluxo no momento de lançamento na cota máxima de rejeito arenoso admitida para o dique inicial .....	83
Figura 35 - Fatores de Segurança (F.S.) pelo método Bishop dos taludes da barragem: (a) F.S. local do talude superior, (b) F.S. local do talude inferior, (c) F.S. local do talude intermediário, (d) F.S. global .....	84
Figura 36 - Análise de fluxo na condição crítica do dique inicial com a instalação de um tapete drenante de enrocamento .....	84
Figura 37 - Fatores de segurança (F.S.) pelo método Bishop dos taludes da barragem: (a) F.S. local do talude superior, (b) F.S. local do talude inferior, (c) F.S. local do talude intermediário, (d) F.S. global .....	85
Figura 38 - Análise da estabilidade do talude do dique secundário mediante o método de Bishop .....	86
Figura 39 - Análise de fluxo d'água seguindo a ordem de operação do sistema, indicando as cargas totais e as linhas de fluxo nas etapas críticas: (a) dique inicial, (b) primeiro alteamento, (c) segundo alteamento, (d) terceiro alteamento, (e) quarto alteamento, (f) quinto alteamento, (g) sexto alteamento .....	87
Figura 40 - Análise de fluxo d'água em ordem de operação do sistema indicando as cargas totais e as linhas de fluxo para a situação crítica do último alteamento (sexto) .....	88
Figura 41 - Análise de estabilidade do talude: (a) F.S. local do dique secundário, (b) F.S. global superior, (c) F.S. global inferior .....	89
Figura 42 - Seção dos dique inicial e secundários na fase final da operação das barragens .....	90
Figura 43 - Condição inicial da modelagem .....	91
Figura 44 - Localização dos pontos da malha de elementos finitos a serem analisados .....	92
Figura 45 - Pressão d'água ao longo da camada de rejeito arenoso até 2m (condição inicial da modelagem) .....	92
Figura 46 - Dissipação da pressão d'água ao longo da camada de rejeito arenoso até 4m (desde t=0 até t=60 dias) .....	93
Figura 47 - Pressão d'água ao longo da elevação de rejeito arenoso após o lançamento até a cota 24 m (volume de armazenamento do dique inicial esgotado) .....	94
Figura 48 - Pressão d'água ao longo da elevação de rejeito após 60 dias do lançamento de rejeito arenoso até a cota 48 m (fundação do último alteamento) .....	94
Figura 49 - Estado de tensões (q - p') dos pontos em análise: (a) imediatamente após a aplicação da última camada de rejeito arenoso (até cota 54m); (b) após 60 dias da aplicação do item (a) .....	95

<b>Figura 50 - Tensão média efetiva imediatamente após o lançamento até a cota 54m (última camada de rejeito) ao longo da elevação do rejeito arenoso .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 51 - Descolamento vertical ao longo da elevação do rejeito arenoso após 60 dias do lançamento até a cota 48m .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 52 - Pressão d'água ao longo da elevação do rejeito argiloso após o lançamento até a cota 54 m (final da vida útil da barragem) .....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 53 - Resultados da pressão d'água da lagoa de rejeito da barragem Brenda (Canadá)..</b>	<b>98</b>
<b>Figura 54 - (a) Seção da interface rejeito argiloso - rejeito arenoso lançado até a conta 54m; (b)Deslocamento vertical do rejeito argiloso ao longo da elevação (até cota 54m).....</b>	<b>99</b>



## Lista de tabelas

<b>Tabela 1 – Resumos das diferenças entre uma barragem de rejeito e uma barragem para retenção de água.....</b>	<b>18</b>
<b>Tabela 2– Parâmetros de barragens brasileiras selecionadas .....</b>	<b>25</b>
<b>Tabela 3 - Outros parâmetros de barragens brasileiras selecionadas .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabela 4 - Critérios de classificação das barragens.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabela 5 - Média de precipitação mensal histórica.....</b>	<b>74</b>
<b>Tabela 6 - Chuva de projeto em função do período de retorno e modelo de extrapolação.....</b>	<b>75</b>
<b>Tabela 7 - Propriedades típicas de rejeitos granulares e finos .....</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 8 - Vazão de disposição de rejeitos em barragens asiáticas.....</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 9 - Características e propriedades dos materiais .....</b>	<b>82</b>



## Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CBR	"California Bearing Ratio"
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídrico
CPTu	Ensaio de piezocone
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
MEF	Método dos elementos finitos
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
OCR	Taxa de sobre adensamento
PAEBM	Plano de Ação de Emergências das Barragens de Mineração
PIB	Produto Interno Bruto
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
RAL	Relatório Anual de Lavra
SAMARCO	Samarco Mineração S.A.
SISEMA	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SPT	"Standard Penetration Test"
VALE	Vale S.A.

## Lista de símbolos

B	Largura (ou diâmetro)
$c'$	Intercepto de coesão efetiva do diagrama de Mohr
cm	Centímetro
$\text{cm}^2$	Centímetro quadrado
$C_u$	Coesão não drenada
D15	Diâmetro equivalente para o qual passa 15
D50	Diâmetro equivalente para o qual passa 50
D85	Diâmetro equivalente para o qual passa 85
$D_r$	Densidade relativa ou compacidade
$e$	Índice de vazios
E	Módulo de elasticidade
$e_{\text{max}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mín}}$	Índice de vazios mínimo
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
Fe	Ferro
F	Coefficiente de segurança
$\gamma_d$	Peso específico seco
$\gamma_s$	Peso específico dos sólidos
GC	Grau de compactação
ha	Hectare
h	Carga total / hora
H	Altura
I	Coefficiente de forma
Kgf	Quilograma-força
$\text{km}^2$	Kilômetro quadrado
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
$K_h$	Coefficiente de permeabilidade horizontal
$K_v$	Coefficiente de permeabilidade vertical
$K_x$	Condutividade hidráulica segundo eixo x
$K_z$	Condutividade hidráulica segundo eixo z
Log	Logarítmo
l	Comprimento
mm	Milímetro

m	Metro
M	Torque máximo medido
$m_v$	Compressibilidade volumétrica
$m^3$	Metro cúbico
$N_k$	Fator de capacidade de carga
N	Índice de resistência à penetração proveniente do ensaio SPT
°	Graus
%	Por cento
$\phi'$	Ângulo de atrito interno efetivo
P	Probabilidade
$q_c$	Resistência de ponta medida no ensaio de piezocone
$\rho$	Recalque
$\sigma'_c$	Tensão confinante efetiva
$\sigma'_{v0}$	Tensão vertical efetiva in situ
$\sigma'_v$	Tensão vertical efetiva
$\sigma_0$	Tensão confinante efetiva / tensão distribuída
s	Segundo
S	Forças atuantes
$\tau$	Forças resistentes mobilizadas
$\theta$	Ângulo
t	Tempo
T	Período de retorno
v	Coefficiente de Poisson

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>17</b>
1.1	Barragem de rejeito e barragem de retenção de água - Principais diferenças.	17
1.2	Barragens de rejeito: Estatísticas de falhas .....	19
1.3	Causas de falha de barragem de rejeito .....	20
1.4	Objetivo .....	23
1.5	Metodologia.....	23
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica .....</b>	<b>24</b>
2.1	Rejeitos: Conceitos gerais .....	24
2.2	Métodos construtivos de barragem de rejeito .....	31
2.2.1	Alteamento para montante .....	32
2.2.2	Alteamento para jusante .....	33
2.2.3	Alteamento pelo método de linha de centro.....	34
2.2.4	Escolha do método de alteamento.....	35
2.3	Componentes de um sistema de contenção de rejeitos.....	36
2.3.1	Estrada de acesso .....	36
2.3.2	Fundações.....	37
2.3.3	Barramento.....	38
2.3.4	Drenos .....	39
2.3.5	Adução e disposição dos rejeitos .....	40
2.3.5.1	Praias de rejeito .....	44
2.3.5.2	Pilhas de rejeitos.....	46
2.3.6	Decantamento da água armazenada .....	47
2.3.7	Sistema de monitoramento.....	49
2.3.7.1	Instrumentação para medições do comportamento do nível d'água .....	49
2.3.7.2	Instrumentação para medições do deslocamento na barragem.....	50
2.4	Legislação .....	52
2.5	Estudo hidrológico.....	54
2.6	Estudo geológico .....	55
2.7	Conceitos teóricos para análise .....	55
2.7.1	Recalque.....	55
2.7.1.1	Recalque elástico .....	56
2.7.1.2	Teoria do adensamento do Terzaghi.....	57
2.7.1.3	Teoria do adensamento para grandes deformações .....	59
2.7.2	Estabilidade .....	60

2.7.2.1	Métodos de equilíbrio-limite .....	60
2.7.2.2	Shear strength reduction method .....	62
2.7.3	Percolação .....	63
2.7.3.1	Equação da continuidade de Laplace .....	63
2.7.3.2	Superfície freática em uma barragem de rejeitos .....	64
2.7.4	Método dos elementos finitos .....	70
<b>3</b>	<b>Projeto da barragem.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1</b>	<b>Localização.....</b>	<b>71</b>
<b>3.2</b>	<b>Estudo ambiental.....</b>	<b>72</b>
3.2.1	Classificação quanto ao potencial de dano ambiental.....	72
<b>3.3</b>	<b>Estudo hidrológico.....</b>	<b>74</b>
<b>3.4</b>	<b>Estudo geológico .....</b>	<b>76</b>
<b>3.5</b>	<b>Parâmetros e características do rejeito de minério de ferro .....</b>	<b>76</b>
<b>3.6</b>	<b>Lançamento e alteamentos .....</b>	<b>79</b>
<b>3.7</b>	<b>Análise da estabilidade e percolação .....</b>	<b>81</b>
<b>3.8</b>	<b>Modelagem do projeto da barragem .....</b>	<b>81</b>
3.8.1	Dique inicial .....	82
3.8.2	Diques secundários (alteamentos).....	86
3.8.3	Sistema dique inicial + diques secundários + rejeito .....	86
3.8.4	Pressão da água e deformações .....	90
<b>3.9</b>	<b>Sistemas de monitoramento.....</b>	<b>100</b>
<b>4</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>101</b>
	<b>Referências.....</b>	<b>102</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>105</b>

# 1 Introdução

Com isso em mente, este estudo visa revisar os conceitos envolvidos em um projeto de barragem de rejeitos, suas etapas e diferentes alternativas, e, posteriormente, sugerir dados hipotéticos para elaborar um projeto tecnicamente viável, cujo método de alteamento é a montante. Para o projeto, serão utilizadas ferramentas computacionais para realizar diversas análises, como percolação de água, evolução de pressões no solo e deformação, para compreender melhor o funcionamento de uma barragem e como as nossas decisões de projeto o afetam, assim como o seu desempenho.

Durante o processo de mineração, são geradas milhares de toneladas de material (estéril e rejeito) que, a princípio, não possuem valor econômico. Este material deve ser, ocasionalmente, tratado e destinado a locais adequados para que sejam evitados e amenizados os potenciais impactos socioambientais negativos.

Visando a segurança da obra, o contínuo monitoramento do comportamento dessas barragens é de suma importância para que se possam evitar desastres ambientais como os ocorridos em Mariana-MG no ano de 2015. Ainda neste aspecto, a preocupação deve vir desde a escolha da localização, métodos construtivos e disposição dos rejeitos, e ser mantida durante a sua utilização, até o fim da vida útil da barragem.

O método de alteamento para montante é, como será descrito adiante, o mais econômico e utilizado, porém, também o que atribui mais risco à obra. Dadas às discussões que vêm surgindo sobre a possível proibição deste tipo de método no Brasil, percebemos a necessidade de fazermos um estudo a respeito.

A escolha deste tema foi feita por considerarmos que a solução para os acidentes frequentes que ocorrem com a utilização do método de alteamento a jusante não deve ser simplesmente a não utilização do mesmo, mas sim um processo de projeto e execução de qualidade, que aumente a segurança da barragem, e maneira que a obra, execução e manutenção do projeto sejam financeira e economicamente viáveis.

## 1.1 Barragem de rejeito e barragem de retenção de água - Principais diferenças

Inicialmente, é importante lembrar que as barragens de rejeito apresentam diferenças significativas quando comparadas às barragens de retenção de água apesar de, em alguns casos, serem visualmente parecidas.

A principal diferença entre uma barragem de rejeito e uma barragem de armazenamento de água está no fato de que o material armazenado na barragem de rejeito possui maior resistência ao cisalhamento e seu peso específico é aproximadamente duas vezes o da água. Além disso, o material de rejeito induz elevada perda de carga ao sistema de drenagem e a forma de deposição do rejeito dificulta o cálculo da posição da linha freática. Portanto, nas barragens de rejeito, deve ser considerado o fato de que a carga estática será maior tanto para a barragem como para a fundação.

Na Tabela 1 apresenta-se as principais diferenças entre a barragem de rejeito e a de armazenamento de água.

**Tabela 1 – Resumos das diferenças entre uma barragem de rejeito e uma barragem para retenção de água**

<b>Componente</b>	<b>Barragem de rejeito</b>	<b>Barragens para retenção de água</b>
Material armazenado	Sólidos de rejeito, água do processo, água do escoamento	Água
Regime Regulatório	Ministério de Minas, Ministério do Meio Ambiente	Ministério Público do Trabalho, Autoridades regionais, Associação Nacional de Barragens
Vida útil de operação	Vida de operação finita (5 até 40 anos)	Tipicamente são designadas para 100 anos, mas é "tão longa quanto a sociedade exija"
Período de Construção	Etapa depende da vida da mina de 2 até 25+ anos	Usualmente de 1 até 3 anos
Fechamento da Barragem	Período de fechamento infinito, induzindo o "walk away" design	Com frequência não realizada, mas pode ser fechada
Garantia de Qualidade/ Controle de Qualidade	Geralmente bom no começo da barragem e níveis variáveis durante a operação. Pode ser de baixo nível para algumas empresas mineiras	Alto nível
Consequências de falha	Os fluxos dos restos do rejeito resultantes ocasionam danos físicos e contaminação ambiental	Danos de inundação
Seção da Barragem	Pode variar durante a vida do empreendimento. P.ex. Mudança a Linha de centro, ou a jusante	Usualmente uma seção consistente desde o início da obra

Modificado de McLeod (2003)

É importante mencionar também que, no caso das barragens de rejeito, ao contrário das barragens para retenção de água, existe a possibilidade de ocorrência de liquefação, fenômeno que pode ocorrer em materiais granulares com baixa coesão e grau de saturação elevado. Além disso, devido à forma de sua disposição, é possível que o material alcance o índice de vazio crítico, fenômeno que já foi causa de falha de muitas barragens ao redor do mundo. (AZAM; LI, 2010).

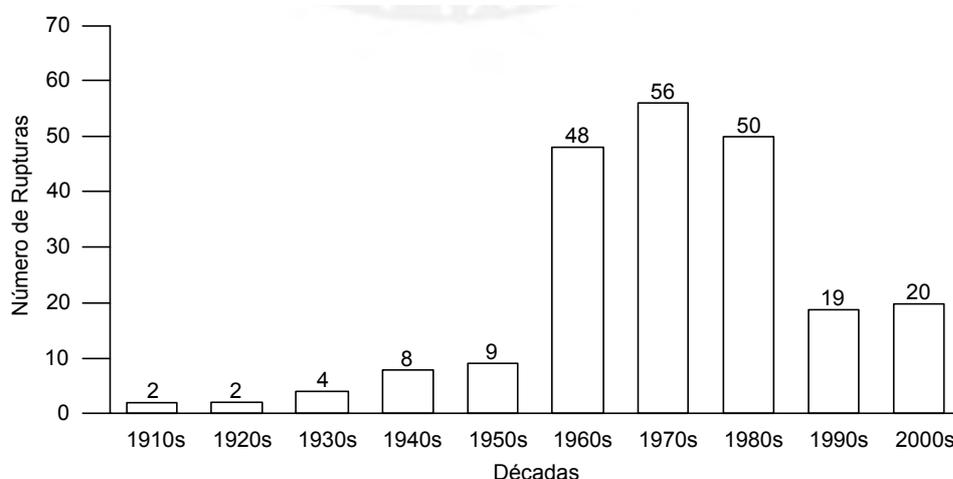
## 1.2 Barragens de rejeito: Estatísticas de falhas

O fato de barragens serem estruturas robustas pode causar a falsa impressão de que não são estruturas propensas a falhas, no entanto, por motivos que serão mencionados no próximo tópico, existe um alto índice de colapso em estruturas deste tipo.

Com base nos dados históricos de barragem que romperam, podem-se obter diferentes gráficos que ilustram esta situação, sugerindo quais são as causas mais usuais. Na Figura 1, são indicados os eventos de falhas de barragens de rejeito desde a década de 1910 até os anos 2000. Observa-se que até os anos 1950s os valores são pequenos, sendo 9 o maior valor, embora crescente. A partir dos 1960s até os 1980s, o número de ruptura de barragens de rejeito se eleva consideravelmente até um pico com um valor de 56. Pode se relacionar isso ao avanço e desenvolvimento da indústria mineradora. (AZAM; LI, 2010).

Observa-se, porém, que há uma redução no número de rupturas a partir dos anos 1980s, o que pode ser interpretado como uma melhora na qualidade das barragens, com avanço nas técnicas construtivas, no monitoramento e na manutenção.

Figura 1 – Número de falhas de barragens de rejeito ao longo do tempo



Modificado de Azam & Li (2010)

### 1.3 Causas de falha de barragem de rejeito

Com base em dados históricos, nota-se que as causas de ruptura em barragens de rejeitos são as mais diferentes, variando desde problemas provenientes de uma deficiência no método construtivo, até fenômenos puramente físicos.

Inicialmente destacamos o fenômeno da liquefação, já citado anteriormente. Em termos gerais, este pode ser definido como a perda de resistência ao cisalhamento devido à geração de pressão neutra graças a uma sollicitação externa. Existem dois tipos de liquefação: estática e dinâmica.

A liquefação estática pode ocorrer devido a sollicitações em condições não drenadas, por exemplo, pelo alteamento do próximo dique antes que ocorra o adensamento do rejeito que, no futuro, servirá como sua fundação.

Já no caso da liquefação dinâmica, as sollicitações são de origem sísmica ou pela geração de ondas que originem uma sobre pressão de água no rejeito, por exemplo, no caso de escorregamentos de taludes vizinhos ou detonações.

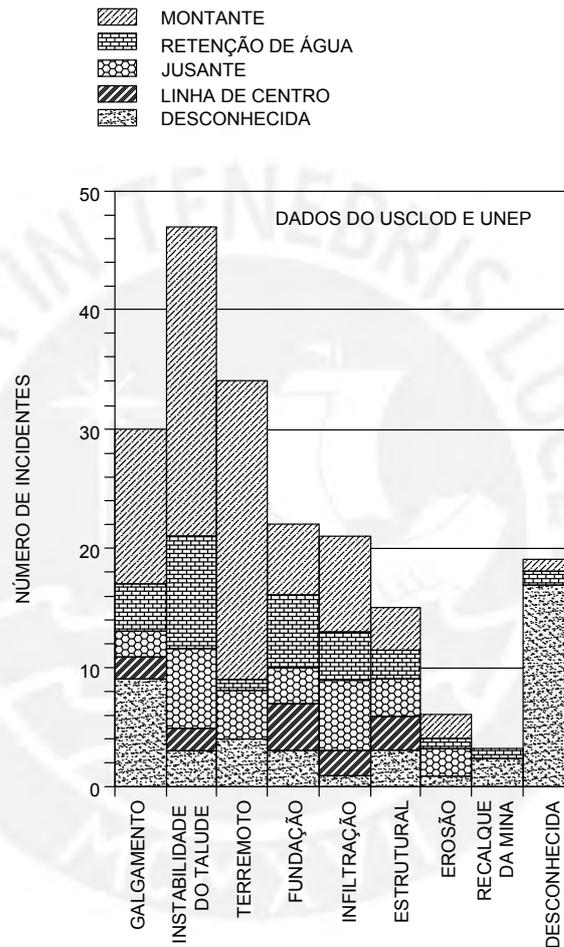
Assim, percebe-se que o excesso de pressão de água gerado por alguma sollicitação, junto a uma determinada relação de vazios do solo, é a causa principal do fenômeno da liquefação; portanto, é de relevante importância o dimensionamento de um sistema de drenagem que permita a drenagem da água do rejeito, favorecendo seu adensamento.

Na sequência, são resumidas as causas de rupturas em barragens de rejeito na seguinte lista, em ordem decrescente de número de ocorrências:

- 1) Instabilidade do Talude
- 2) Sísmicas- liquefação
- 3) Galgamento
- 4) Infiltração
- 5) Fundação
- 6) Estrutural
- 7) Erosão
- 8) Recalque da mina
- 9) Desconhecidas

Com base na Figura 2, baseada em dados de ICOLD (2001), são quantificados os números absolutos de incidentes devidos a cada uma destas causas, divididos por tipo de alteamento utilizado. Nota-se que a ruptura por instabilidade de talude é a causa mais comum, podendo ser gerada por diversos fatores, relacionado às investigações geológicas e geotécnicas iniciais e a aspectos construtivos, de manutenção e de gerenciamento e planejamento da obra.

**Figura 2– Incidentes em barragens de rejeito segundo o tipo de barragem**



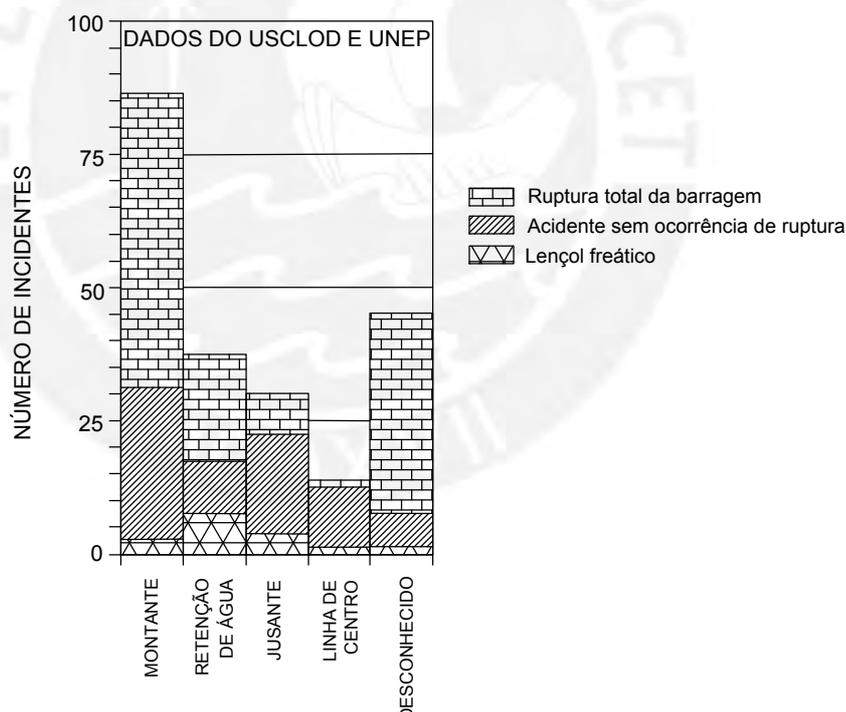
Modificado de ICOLD (2001)

As causas mencionadas anteriormente são em sua maioria, causas físicas e estruturais relacionadas à construção e operação da barragem, que poderiam ser evitadas com um melhor planejamento, gerenciamento e controle da obra antes e depois da construção. (AZAM; LI, 2010)

Existem, no entanto, situações que fogem do controle de projeto e operação. Deve-se, contudo, garantir a melhor investigação, projeto, controle e operação da barragem de forma a minimizar os acidentes nestes casos.

Na Figura 3 é mostrado o número absoluto de incidentes envolvendo os diferentes métodos de alteamento. Os incidentes são divididos em rupturas totais; outros acidentes sem a ocorrência de ruptura total, como transbordamentos; e ocorrências de contaminação do lençol freático pelo rejeito armazenado no interior da barragem. A figura, no entanto, não é representativa no sentido de explicar qual método de alteamento é mais seguro, uma vez que já é esperado que o número de incidentes com os métodos mais utilizados seja maior, independente da segurança do mesmo. O número absoluto de incidentes com barragens de linha de centro, por exemplo, é menor do que com barragens a jusante, que é mais segura na teoria, como será explicada a seguir.

Figura 3 – Comparação dos incidentes segundo o tipo de barragem de rejeito



Modificado de ICOLD (2001)

## **1.4 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é compreender os diversos processos envolvidos no projeto de uma barragem de rejeitos, suas etapas e as diferentes alternativas, e entender como estes influenciam a tomada de decisão durante sua elaboração.

Com base nos resultados, foram analisadas as dificuldades técnicas e teóricas da elaboração de um projeto real, procurando sempre possíveis melhorias em relação à segurança das barragens que utilizam o método de alteamento à montante.

## **1.5 Metodologia**

Para a obtenção dos objetivos anteriormente descritos, foi feita uma revisão bibliográfica dos principais componentes de uma barragem de rejeitos, assim como as normas e instruções que regulam e orientam a elaboração de um projeto e as teorias com base nas quais são feitas as análises quantitativas, que serviriam para as decisões de projeto.

Em seguida, foi proposta uma série de dados, com base em geografia e barragens pré-existentes, para que fosse possível analisar computacionalmente o dique inicial e os alteamentos. Estas informações foram retiradas da literatura do assunto e de bancos de dados disponíveis online.

Para a análise computacional, inicialmente foi utilizado o software Plaxis. As dificuldades com o seu manuseio e as incertezas quanto a se as teorias por trás do programa eram adequadas para o caso de uma barragem de rejeitos, decidiu-se por migrar para o Phase 2. Este, por sua vez, não apresentava resultados compatíveis com o esperado, o que fez com que migrássemos uma segunda vez para o GeoSlope, software com o qual efetivamente foi feita a modelagem.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Rejeitos: Conceitos gerais

Neste tópico, iniciam-se os estudos das barragens de rejeito com a análise dos materiais a serem depositados dentro das mesmas, os próprios rejeitos.

Dentre os principais parâmetros para todo o dimensionamento e projeto de uma barragem de rejeito, está o tipo de material a ser armazenados. Materiais diferentes, com propriedades físicas e químicas diferentes, além das mais variadas granulometrias, fazem com que cada projeto de barragem de rejeito seja único, na medida em que se deve considerar cada uma dessas propriedades.

Resíduos de minérios são divididos, principalmente, em estéril e rejeito. Segundo a definição do CNRH (2002), estéril é todo o material não aproveitável retirado antes do processo de beneficiamento do minério, enquanto rejeito refere-se ao material descartado após o beneficiamento.

Devido a essa grande variedade de tipos e formas, os rejeitos muitas vezes são colocados separadamente uns dos outros. No entanto, a maior parte deles é transportada hidraulicamente e disposta nas barragens, onde, por meio da gravidade ou por bombeamento, fluem e assentam a montante, criando camadas sobre camadas de material descartado.

Quanto aos parâmetros que caracterizam estes rejeitos, na Tabela 2 apresentamos os valores obtidos para os rejeitos de minério de ferro (que será o tipo de rejeito utilizado na nossa barragem fictícia) das minas da Vale S.A. e da Samarco Mineração S.A. em parte de um estudo realizado por Pereira (2005). É dada maior importância à condição não drenada, uma vez que esta é a utilizada em projetos de barragens.

Uma característica que deve ser estudada cuidadosamente é a resistência não drenada dos rejeitos. A resistência não drenada é resultante da pressão neutra gerada a partir da aplicação de uma força cortante rapidamente aplicada sobre o material, sendo extremamente importante para prever o comportamento do fluxo de rejeitos.

Nota-se nesta tabela, que os diferentes rejeitos ensaiados neste estudo apresentam coesão insignificante, com valor máximo de 6 kPa, tendo sua resistência dependente basicamente do

ângulo de atrito interno. Segundo Vick (1983), inclusive é comum encontrar rejeitos com ângulos de atrito interno maiores do que solos naturais de mesma densidade e nível de tensão.

De acordo com o autor, o ângulo de atrito interno costuma ser obtido em laboratórios através de ensaios triaxiais e é influenciado basicamente pelo nível de tensão, sendo o efeito da densidade muito reduzido.

**Tabela 2– Parâmetros de barragens brasileiras selecionadas**

<b>Amostra</b>	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	<b>e</b>	<b>Dr (%)</b>	<b>GC (%)</b>	<b>c'</b> (kPa)	$\phi'$ (°)
Cava do Germano (SAMARCO)	16,4	1,07	36,8	78	2	35
Barragem Itabiruçu (VALE)	15,8	1,11	39,5	79	0	26
Barragem Forquilha 3 (VALE)	18,5	1,13	56,5	77	6	29
Barragem Campo Grande (VALE)	19,9	1,09	30,8	83	0	29

Pereira (2005)

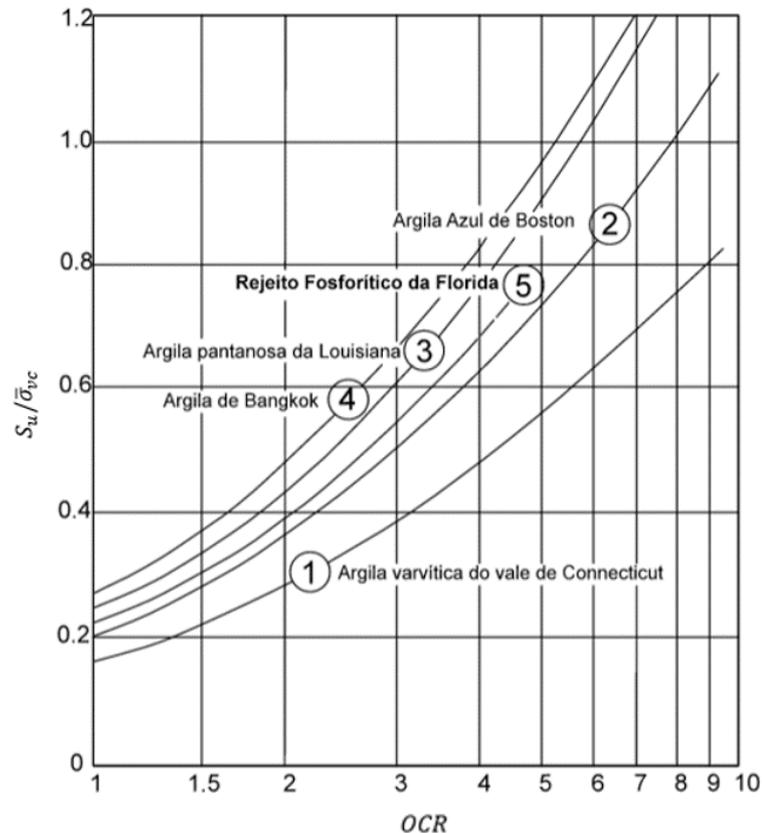
Além disso, observa-se na Tabela 3, que as razões  $S_u/\sigma'_c$ , onde  $S_u$  é a resistência não drenada e  $\sigma'_c$  é a tensão confinante efetiva, tendem a apresentar valores muito similares, mesmo com grandes variações no divisor. Isso comprova a teoria de que essa razão deveria variar unicamente em razão de mudanças na taxa de sobre adensamento. No gráfico da Figura 4, é apresentada, para alguns materiais, a variação nessa razão em função de mudanças na taxa de sobre adensamento.

Tabela 3 - Outros parâmetros de barragens brasileiras selecionadas

Amostra	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Dr (%)	e	$e_{min}$	$e_{max}$	$\sigma'_c$ (kPa)	Su (kPa)	Su/ $\sigma'_c$
Cava do Germano (SAMARCO)	34,0	36,8	1,07	0,62	1,33	50	30,86	0,62
						100	58,91	0,59
						200	120,38	0,60
Barragem Itabiruçu (VALE)	33,4	39,5	1,11	0,67	1,39	50	15,17	0,30
						100	29,07	0,29
						200	59,59	0,30
Barragem Forquilha 3 (VALE)	39,5	56,5	1,13	0,64	1,77	50	17,75	0,36
						100	30,6	0,31
						200	61,21	0,31
Barragem Campo Grande (VALE)	41,5	30,8	1,09	0,74	1,25	50	19,69	0,39
						100	40,81	0,41
						200	88,27	0,44

Pereira (2005)

Figura 4 - Variação na razão  $S_u/\sigma'_{vc}$  em função da taxa de sobre adensamento (OCR)



Modificado de Vick (1983)

Neste gráfico, nota-se que o comportamento do rejeito fosforítico, utilizado como exemplo, é similar ao comportamento das argilas naturais, com a razão  $S_u/\sigma'_{vc}$ , tendo seu valor aumentado com o aumento da taxa de sobre adensamento.

Tanto a resistência não drenada, quanto o ângulo de atrito interno, além de outros parâmetros geotécnicos, costumam ser obtidos indiretamente através de parâmetros provenientes dos ensaios de campo, por serem muito mais baratos do que ensaios em laboratórios. No entanto, essa prática não é a mais aconselhável, uma vez que a correlação utilizada para estes cálculos podem trazer resultados muito diferentes, influenciando no dimensionamento da estrutura. Dois dos principais parâmetros que podem ser obtidos através de correlações são a coesão não drenada e a resistência não drenada.

Uma correlação proposta por Schnaid (2000), por exemplo, sugere que a resistência não drenada ( $S_u$ ) pode ser obtida através de parâmetros obtidos pelo ensaio de piezocone (CPTu)

e pela aplicação de um fator de capacidade de carga ( $N_k$ ), que pode ser obtido na literatura, pela fórmula:

$$S_u = \frac{(q_c - \sigma'_{v0})}{N_k}$$

Onde:

$q_c$ : resistência de ponta medida no ensaio de piezocone

$\sigma'_{v0}$ : tensão vertical efetiva in situ

Além disso, a resistência não drenada também pode ser obtida através de parâmetros obtidos no ensaio de palheta, com a seguinte fórmula empírica:

$$S_u = \frac{0,86M}{\pi D^3}$$

Onde:

M: torque máximo medido (kN.m)

D: diâmetro da palheta (m)

Esta mesma equação também pode ser utilizada de maneira inversa, quando se tem o valor da resistência não drenada obtido a partir de ensaios de palheta, obtendo-se o valor de  $N_k$ .

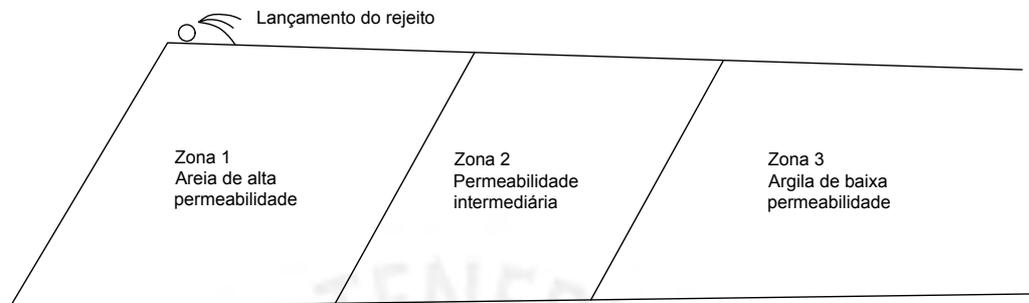
Idealmente, no entanto, a resistência não drenada deveria ser obtida em laboratório, através de ensaio de cisalhamento direto não drenado, uma vez que ensaios triaxiais podem induzir a valores maiores, devido à consolidação isotrópica gerada pela tensão de confinamento aplicada. Isto não é feito com frequência por ser um procedimento muito mais custoso.

Um dos principais parâmetros dos rejeitos que ainda não foi citado é a sua permeabilidade. Mais do que qualquer outro parâmetro a permeabilidade é de difícil generalização, variando de  $10^{-2}$  cm/segundo para rejeitos de areia, até  $10^{-7}$  cm/segundo para lodos bem consolidados. Deve-se, também, atentar para o fato de que, devido à natureza anisotrópica dos rejeitos, as suas permeabilidades horizontais e verticais são diferentes, sendo usualmente as horizontais de 2 a 10 vezes maior que a verticais. Além disso, um mesmo rejeito tende a apresentar diferentes permeabilidades em suas diferentes camadas e distâncias do ponto de descarga. (VICK, 1983)

De maneira extremamente simplificada pode-se dizer que a permeabilidade de um rejeito aumenta com o aumento das partículas que compõe o rejeito. Assim, nas camadas mais

inferiores, com partículas maiores e mais pesadas, a permeabilidade tende a ser maior, e quanto maior a distância do ponto de descarga, maior será a porcentagem de partículas leves e menores, e assim, menores a permeabilidade, como é mostrado na Figura 5.

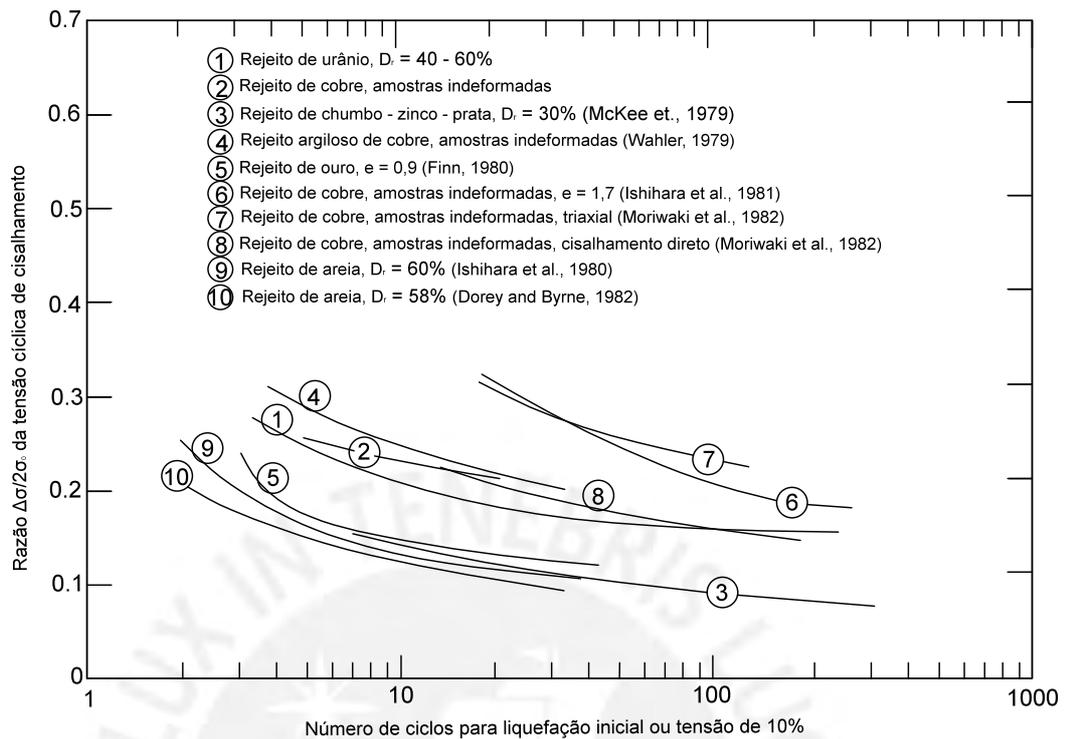
**Figura 5 - Permeabilidade em função da distância do ponto de descarga**



Modificado de Vick (1983)

Outra característica dos rejeitos que também merece aqui ser apresentada é a sua resistência cíclica, isto é, a sua capacidade de resistir a ciclos sucessivos de tensão antes de ocorrer o fenômeno da liquefação. Esta característica é governada basicamente pela sua densidade. Como os rejeitos tendem a apresentar densidades menores que a de solos naturais, eles tendem a necessitar de menos ciclos antes de liquefazerem.

Figura 6 - Ensaio de tensão cíclica de cisalhamento para alguns rejeitos típicos



Modificado de Vick (1983)

No gráfico da Figura 6 é apresentada a relação entre a razão  $\Delta\sigma/2\sigma_0$ , que é a razão geralmente aceita para relacionar tensão cíclica de cisalhamento e a tensão confinante aplicada simultaneamente no teste, e o número de ciclos necessários para que se inicie a liquefação ou para que se atinja um valor de 10% da tensão cíclica, que é o critério usualmente usado para caracterizar uma ruptura devida a esforços cíclicos.

Nota-se que os rejeitos na forma de lodo resistem de um maior número de ciclos em relação aos rejeitos de areia e também em relação a rejeitos que não passam por qualquer processo de separação.

Por fim, deve-se atentar para o fato de que os rejeitos de mineração podem possuir elevado grau de toxicidade, metais pesados e reagentes. Desta forma, sua disposição deve atender critérios socioambientais e de estabilidade. Ela precisa ser feita de maneira que se evite qualquer tipo de poluição aos cursos de água próximos à barragem, se respeite a legislação vigente para a construção de barragens de rejeito próximas a áreas urbanizadas e atenda aos ângulos de inclinação que garantam a estabilidade.

No Brasil, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) disponibiliza as Normas Reguladoras de Mineração (NRM) para diversos tópicos relacionados à mineração. (NRM19, 2002)

## **2.2 Métodos construtivos de barragem de rejeito**

Para o descarte dos rejeitos, a construção das barragens, foco deste estudo, é o procedimento mais implementado pelas mineradoras. (SANTOS; CURI; SILVA, 2012)

As características e o tipo de barragem dependem do tipo de rejeitos. Quando na forma de lamas, cuja granulometria se assemelha a das argilas, geralmente são dispostos em barragens convencionais, semelhantes às barragens de contenção de água, mas construídas com solo argiloso ou em enrocamento com núcleo argiloso, onde se faz a deposição subaquática do material.

Para a deposição dos rejeitos granulares a construção mais favorável é a de barragens por aterro hidráulico, sendo o próprio rejeito utilizado para a construção dos alteamentos. Esta técnica permite a construção de alteamentos sucessivos na barragem, mas exige a aplicação de princípios geotécnicos durante o seu projeto e construção, porque o comportamento da barragem pode ser afetado pela velocidade do fluxo de rejeitos, concentração da lama, propriedades mecânicas dos rejeitos e das características de deposição.

A construção das barragens de rejeito pode ser feita com material compactado trazido de áreas de empréstimo ou com o próprio rejeito. O uso do próprio rejeito na construção das barragens é o método mais difundido devido ao seu baixo custo, disponibilidade do material e facilidade construtiva. (AMORIM, 2007)

Quando as barragens são construídas com o próprio rejeito, elas comportam-se como aterros hidráulicos, que são estruturas construídas pelo transporte e deposição de solo em meio aquoso. A maior desvantagem desta técnica é que o lançamento hidráulico de rejeitos provoca segregação hidráulica - processo fundamental na construção de aterros hidráulicos, afetando diretamente a distribuição granulométrica e as condições de fluxo ao longo da praia. (AMORIM, 2007)

Outro problema é a formação de potenciais focos de liquefação, fenômeno estudado anteriormente, provocada por vibrações no terreno devido ao desmonte com explosivos próximo das barragens ou alteamentos muito rápidos, entre outros, aumentando o risco de

ruptura. (SANTOS; CURI; SILVA, 2012). A seguir, serão enumerados os três principais métodos de alteamento utilizados.

### **2.2.1 Alteamento para montante**

O método de montante é o mais antigo, simples e econômico método 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. Depois de realizada esta etapa, o rejeito é lançado por canhões (spigots) e (ou) por hidrociclones 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 próximo alteamento. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida.

Geralmente é o mais econômico em curto prazo, pois permite obter a menor relação entre volumes de areia e de lama, além de permitir a melhor utilização do espaço, uma vez que a área não é alterada com a construção de novos diques, diferentemente do que ocorre nos outros métodos.

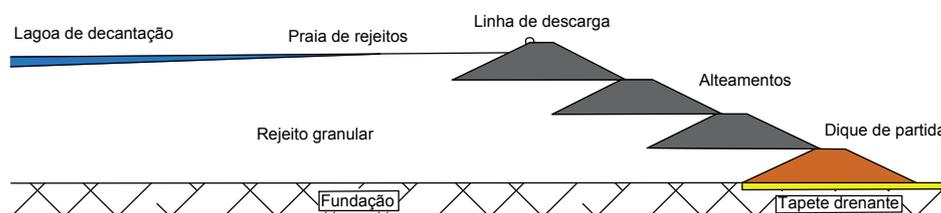
Embora seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método de montante apresenta um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em relação à segurança, o que faz com que a ABNT-NBR 13028 (1993) explicitamente sugira que não seja utilizado esse tipo de método de alteamento.

O agravante neste caso está ligado ao fato dos alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de compactação fofa, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos, como terremotos, e estáticos.

Ressalta-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.

A Figura 7 exemplifica como, em teoria, deveria ser o corte de uma típica barragem alteada a montante.

**Figura 7 - Método de alteamento a montante**



Modificado de Vick (1983)

### 2.2.2 Alteamento para jusante

O método de alteamento para jusante é mais conservador, visto que, neste, a pressão resultante no maciço é a menor dentre os métodos, e a execução é mais segura e facilmente monitorada, tendo sido desenvolvido para reduzir os riscos de liquefação em zonas de atividade sísmica. (RAFAEL, 2012)

Neste método, a etapa inicial consiste na construção de um dique de partida, normalmente de solo, enrocamento compactado ou do próprio rejeito. Depois de realizada esta etapa, os alteamentos subsequentes são realizados para jusante do dique de partida e os rejeitos são depositados a montante do mesmo. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida, e é repetido à medida que é necessário aumentar a capacidade do reservatório.

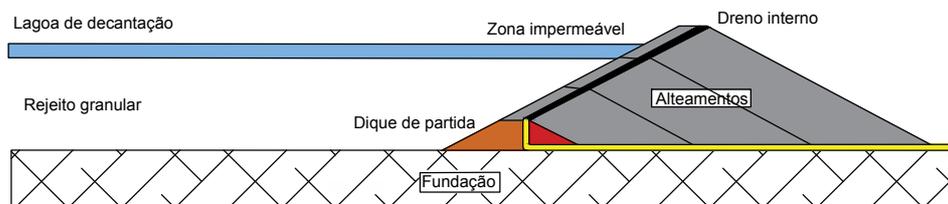
As desvantagens são o alto custo dos alteamentos, devido ao grande volume de aterro necessário, além da grande área ocupada pela barragem. A altura final de uma barragem de rejeitos alteada para jusante dependerá basicamente da área de terreno disponível.

De acordo com Leonoff (1981), as vantagens envolvidas no processo de alteamento para jusante consistem no controle do lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção; nenhuma parte ou alteamento da barragem é construída sobre o rejeito previamente depositado; além disso, os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem, e prolongados durante seu alteamento, permitindo o controle da linha de saturação na estrutura da barragem e, conseqüentemente, aumentando a estabilidade. Assim, a barragem pode ser projetada e subsequentemente construída apresentando a resistência necessária ou requerida, inclusive podendo ser

dimensionada para resistir a qualquer tipo de forças sísmicas, já que há a possibilidade de seguimento integral das especificações de projeto.

A Figura 8 exemplifica como, em teoria, deveria ser o corte de uma típica barragem alteada à jusante.

**Figura 8 - Método de alteamento a jusante**



Modificado de Vick (1983)

### 2.2.3 Alteamento pelo método de linha de centro

Barragens alteadas pelo método de linha de centro apresentam uma solução intermediária entre os dois métodos citados anteriormente, apresentando vantagens dos dois métodos anteriores, tentando minimizar suas desvantagens.

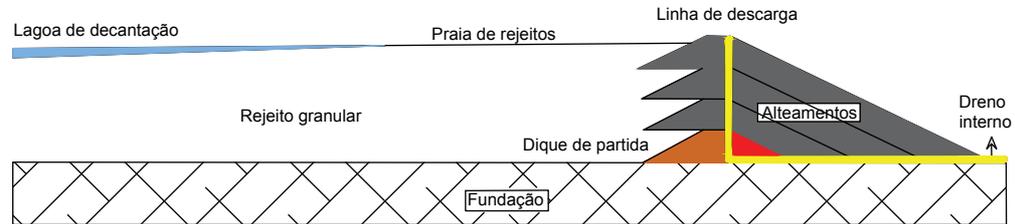
Barragens alteadas pelo método de linha de centro apresentam uma solução intermediária entre os dois métodos citados anteriormente, apresentando vantagens dos dois métodos anteriores, tentando minimizar suas desvantagens.

O método de alteamento na linha de centro tem estabilidade superior à da barragem alteada para montante, porém não requer um volume de materiais tão grande, ou espaço para construção, como no alteamento para jusante.

Da mesma forma que nos outros dois métodos, são construídos um dique de partida, a fim de formar uma praia de rejeitos a montante. O sistema de disposição dos rejeitos é similar ao do método de alteamento para montante: os rejeitos são lançados a partir da crista do dique inicial. Quando os alteamentos se tornam necessários, novos diques são construídos, tanto sobre os rejeitos dispostos a montante quanto sobre o aterro do dique anterior, de forma que o eixo de simetria se mantém.

A Figura 9 exemplifica como, em teoria, deveria ser o corte de uma típica barragem construída pelo método de alteamento em linha de centro.

**Figura 9 - Método de alteamento em linha de centro**



Modificado de Vick (1983)

#### 2.2.4 Escolha do método de alteamento

A escolha de um ou outro método de execução irá depender de uma série de fatores, tais como:

- Tipo do rejeito;
- Características geotécnicas e nível de produção dos rejeitos;
- Graus de poluição física, química e físico-química;
- Necessidade de reserva d'água ou do controle das águas percoladas;
- Sismicidade da região onde se localiza o barramento;
- Topografia, hidrologia, hidrogeologia e geologia local;
- Custos do método de execução.

Dentre as práticas normais das empresas mineradoras, o método de montante tem ganhado um importante espaço em função dos baixos custos e alta flexibilidade construtiva.

É importante ressaltar que a utilização de rejeitos como materiais de construção, costuma gerar problemas no comportamento da barragem, como a alta suscetibilidade ao piping, superfícies erodíveis e alta probabilidade de liquefação sob condições de carregamento sísmicas em rejeitos fofos e saturados.

## **2.3 Componentes de um sistema de contenção de rejeitos**

Concluído o estudo das características gerais dos rejeitos e das barragens, bem como os principais métodos construtivos destas últimas, serão agora enumeradas as diferentes partes constituintes de um sistema de contenção de rejeitos tradicional.

Levando-se em consideração que cada sistema tem suas particularidades construtivas devido a inúmeros fatores como, por exemplo, o tipo de rejeito a ser contido e a topografia do local, pode acontecer de alguns desses elementos não estarem presentes ou outros, não aqui discutidos, serem utilizados. No entanto, considera-se que estes aqui citados são os principais dentre a maioria significativa dos casos estudados.

Assim sendo, listam-se, na sequência, tais elementos, suas principais características e funções no sistema.

### **2.3.1 Estrada de acesso**

A primeira preocupação do projeto é a implantação de estradas para acessar a área que será analisada e, posteriormente, implantada o barramento.

Para que obras de reparo ou de manutenção sejam executadas com velocidade e eficiência, é extremamente importante que seja mantida uma estrada em boas condições e com largura suficiente para o tráfego de veículos e máquinas pesadas.

Para tal, o solo sob o qual será feito o acesso deve ser estudado, e classificado de maneira que se possam tirar parâmetros como resistência, permeabilidade, deformabilidade e estabilidade. Caso o solo não seja compatível com o tráfego que haverá, será necessário avaliar soluções para melhoramento do solo. Assim, o primeiro passo é a avaliação do solo.

A próxima etapa será avaliar o volume e característica dos veículos que circularão. É preciso um estudo geotécnico para avaliar com precisão a qualidade da superfície. Para isso, é preciso coletar materiais para ensaios de granulometria, resistência, compactação e densidade real, além de identificar se existe a necessidade de uma readequação geral da estrada.

Caso a última seja verdadeira, seguem algumas alternativas possíveis para melhoramento do solo:

- Instalação de galerias ou equipamentos para melhorar a eficiência da drenagem do solo;
- Transportar jazidas de outro solo, mais adequado, para usar nas estradas. (É importante que as jazidas não sejam longe do local, para não elevar de maneira significativa o custo da obra);
- Injetar aditivos, como cimento Portland, que melhoram a resistência.

### 2.3.2 Fundações

Assim como para as estradas de acessos, será necessária a investigação e análise do solo para escolha do posicionamento e tipo de fundação da barragem. Será necessária a obtenção de informações como:

- Perfis de solo na região de interesse;
- Profundidade até rocha impenetrável;
- Posição da linha d'água;
- Resistencia do solo;
- Permeabilidade do solo;
- Possíveis falhas geológicas na região.

Para tal, além de revisão de literatura sobre os solos da região, e análise visual, testes in situ como SPT e Palheta podem ser opção, e ensaios em laboratório, como o de granulometria, permeabilidade, adensamento, Proctor, CBR e compressão triaxial.

Bates (2008) cita como materiais adequados para a execução da fundação as argilas, areia, cascalho e o granito e seus derivados. No caso das argilas deve-se ter cuidado com o tempo de consolidação da argila e no caso das areias, do cascalho e do granito, deve-se fazer uma análise cuidadosa da composição do solo a ser utilizado.

Como exemplos de materiais inadequados, Bates (2008) descreve o silte, que julga não ser aconselhável, e a turfa, considerada uma péssima fundação.

É de suma importância no projeto das fundações a análise do nível freático determinado pela geologia e hidrologia locais. Estes estudos serão exemplificados mais adiante quando iniciarmos a etapa de projeto de uma barragem fictícia.

Além disso, vale destacar que o projeto das fundações deve levar em consideração este nível na época de maior quantidade de chuvas no ano. (BATES, 2008)

### 2.3.3 Barramento

A primeira preocupação que se deve ter quando iniciado o projeto do barramento

O local de implantação do mesmo, visando o melhor aproveitamento do terreno e atentando-se para as propriedades do solo nos diferentes locais. Segundo Bates (2008), o local ideal apresentaria um solo com boa drenagem e capacidade de resistência. Caso a vizinhança da barragem seja ocupada, um maior cuidado será necessário, como, por exemplo, o reforço das bermas com seixos. Como estas barragens sofrem modificações severas ao passar do tempo, é necessário que seu projeto seja flexível e considere mudanças climáticas e nas características dos materiais despejados. Além disso, a cada aumento na capacidade de armazenamento da barragem com a construção de um novo dique sobre o dique inicial, uma nova análise de risco deve ser feita, uma vez que o comportamento estrutural da barragem pode mudar severamente. (RAJARAM; DUTTA; PARAMESWARAN, 2005)

No entanto, caso o rejeito seja tóxico, deve ser usada argila de baixa permeabilidade para prevenir vazamentos que permitam que o material entre em contato com a água da superfície ou do lençol freático. (RAJARAM; DUTTA; PARAMESWARAN, 2005)

Ainda podem ser utilizados, segundo Blight (2010), resíduos grosseiros ou resíduos de rocha que normalmente seriam descartados, atentando-se para a drenagem adequada ou impermeabilização, garantindo a estabilidade da obra.

A manutenção do talude externo deve ser feita regularmente, uma vez que o intemperismo e a acumulação de solo podem criar uma camada menos permeável que o restante, caracterizando-se como um possível plano de falha. Sendo assim, deve ser feita uma limpeza periódica acompanhada da colocação de novo material de enchimento.

Além disso, os taludes, interno e externo, deverão ser protegidos contra a erosão em determinados casos através de canais de admissão e drenos de estrada, por exemplo. Além disso, deve-se atentar para a possível erosão interna junto às tubulações que passem pelo meio da barragem ou por baixo da mesma.

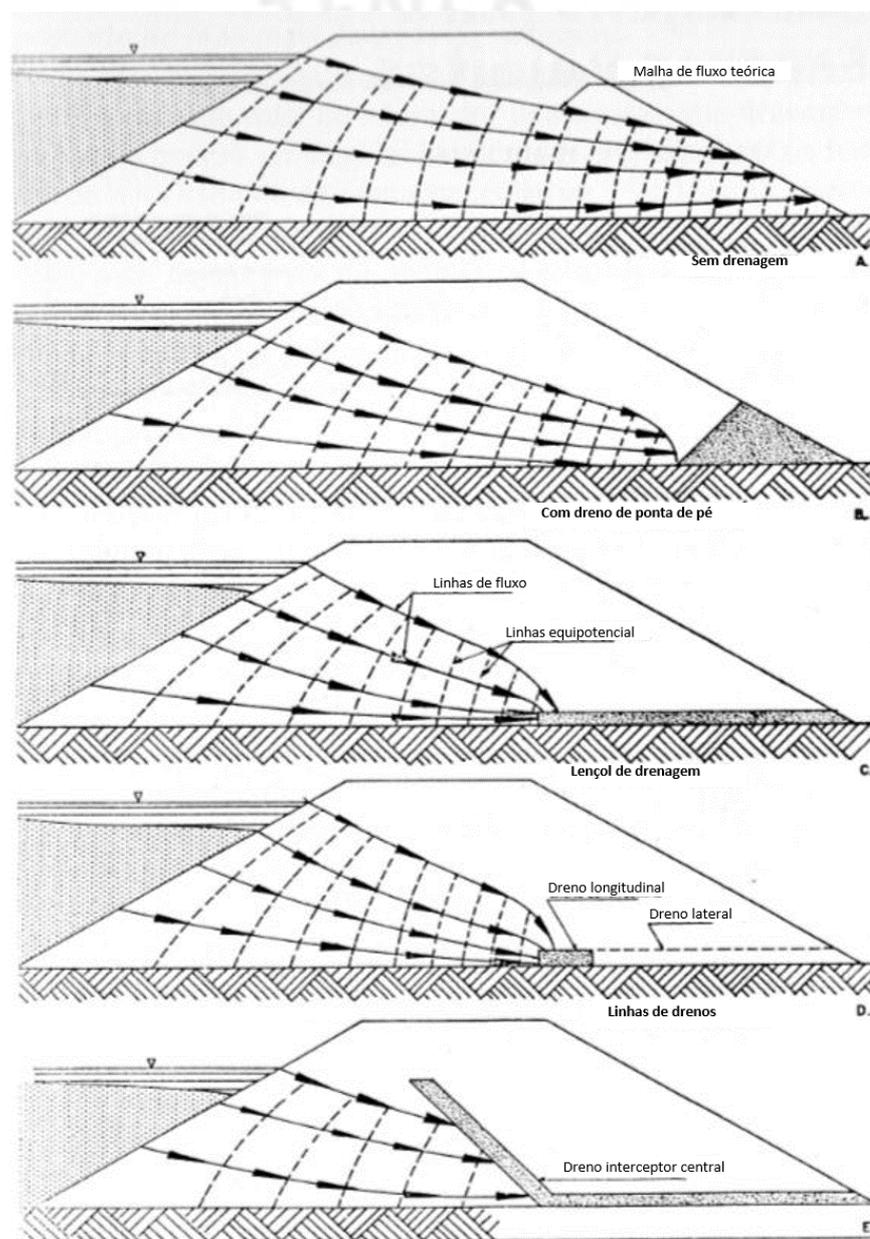
Por sua vez, para o cálculo da altura da barragem, deve ser considerada uma altura mínima, chamada de borda livre, em relação ao nível máximo possível de água, onde serão instalados canais de descarga. Esta altura deve ser maior, quanto maior e mais suscetível à ação de ventos for à barragem, que podem gerar ondas.

Por fim, de acordo com Rajaram, Dutta e Parameswaran (2005), a possibilidade de atividade sísmica e suas possíveis consequências para a estabilidade da barragem deve ser levada em consideração através de análises dinâmicas.

### 2.3.4 Drenos

A drenagem do barramento, por sua vez, é feita de diferentes formas, dependendo dos materiais disponíveis e do tipo de dreno a ser utilizado. Como se pode verificar na Figura 10, a principal diferença entre os tipos de drenagem é a geometria e a disposição dos drenos, o intuito, no entanto é o mesmo: rebaixar o nível freático na barragem o máximo possível.

Figura 10 - Tipos de drenos usados nas barragens de rejeitos

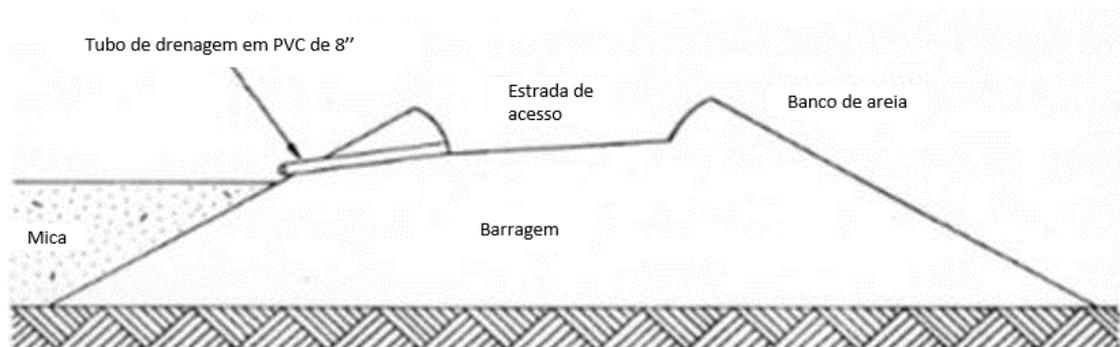


Modificado de Bates (2008)

O despejo do canal de drenagem deve ser feito o mais distante possível da barragem. Isto torna o processo mais eficiente, na medida em que evita que a água drenada volte a se infiltrar no material da barragem.

Por fim, ainda se faz necessária uma drenagem superficial que evite que ocorram enchentes na barragem. É de suma importância que a água drenada da superfície da barragem (da estrada de acesso, por exemplo) seja descarregada para dentro da própria barragem, como ilustra a Figura 11.

**Figura 11 - Drenagem superficial da barragem**



Modificado de Bates (2008)

### 2.3.5 Adução e disposição dos rejeitos

A adução dos rejeitos é comumente feita por via hidráulica, não só por se tratar da forma mais viável na maioria dos casos, mas também por ser a mais econômica. Neste caso, é utilizada a técnica de aterros hidráulicos, construídos através da técnica de hidromecanização. (CRUZ, 2004)

Existem três maneiras de se depositar os rejeitos de minério, a céu aberto, subterrânea e subaquática. Focaremos na disposição a céu aberto em barragens.

Além disso, existem duas formas com as quais os rejeitos costumam ser dispostos: líquida (polpas ou lama), através de tubulações por gravidade ou por meio de bombas, e sólida (pasta ou granel), fazendo-se uso de caminhões ou correias transportadoras. (SANTOS; CURI; SILVA, 2012)

A frequência de lançamento desse rejeito será dada de acordo com o volume produzido após o beneficiamento do minério e a capacidade da barragem.

O sistema de transporte e disposição dos rejeitos deve ser estudado cuidadosamente, levando em consideração as propriedades dos rejeitos a serem transportados, o local de presença de água no reservatório e a composição das camadas de solo do local. (SANTOS; CURI; SILVA, 2012)

O transporte dos rejeitos em forma de polpa pode se dar por gravidade ou por sistemas de bombeamento. Quando transportados por gravidade, são utilizados canais ou tubulações. A decisão de se utilizar ou não bombas será feita de acordo com as elevações relativas entre a planta de beneficiamento e o local onde será descartado. Há outros métodos de transporte do rejeito, como através de caminhões e correias transportadoras, quando estes são dispostos pelo método de secagem, método que não será tratado neste trabalho. O dimensionamento do sistema de tubulações deve levar em conta a velocidade mínima necessária para que o rejeito não sedimente dentro da tubulação, obstruindo-a. Esta velocidade depende tanto da densidade da polpa, como do tamanho das partículas, variando aproximadamente entre 1,5 a 3,0 m/s. As tubulações mais utilizadas atualmente são as tubulações de polietileno de alta densidade. (RAFAEL, 2012)

A densidade da polpa de rejeitos é dada pela razão entre o peso de sólidos e seu correspondente peso da polpa, densidade esta que varia no intervalo entre 0,15 e 0,55. Essa polpa é comumente abrasiva e de alta viscosidade.

Os rejeitos são lançados a partir de um ponto de descarga ou vários pontos de descarga (spigotting). Há duas maneiras mais usuais de se fazer a disposição do material, através de canhões ou hidrociclones. Quando se utiliza canhões, a separação do rejeito granular do rejeito fino se dá através da na própria praia através da velocidade de descarga, uma vez que os rejeitos granulares, mais pesados, sedimentam antes. Ao se utilizar hidrociclones, a separação é feita antes do lançamento e materiais finos e granulares são disponibilizados em pontos distintos dentro da barragem.

De acordo com Vick (1983), os rejeitos são quase sempre transportados em forma de lama. O transporte dessa lama algumas vezes é feito por gravidade, a partir de calhas abertas, no entanto, é mais comum a utilização de tubulações, com ou sem a presença de bombas centrífugas, dependendo das distâncias e elevações entre a origem do rejeito e o interior da barragem.

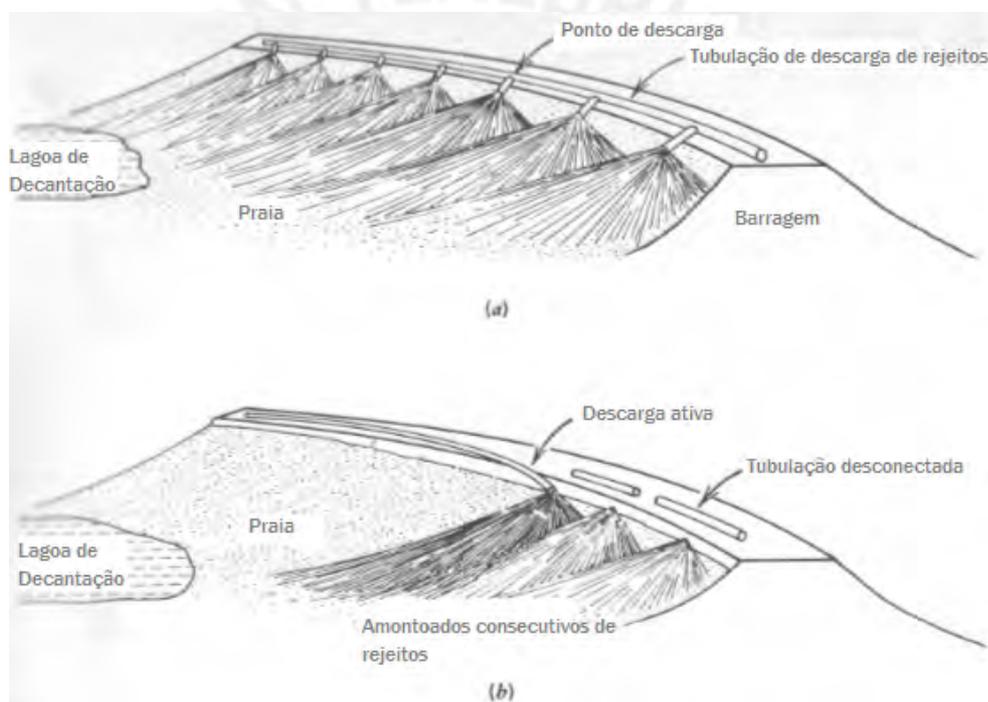
Acima de determinado valor de teor de sólidos, as bombas centrífugas já não conseguem bombear os rejeitos. Existem mecanismos de fluidificação que, através da agitação da lama,

tornam possível o seu bombeamento com bombas centrífugas, mesmo com maiores teores de sólidos.

As bombas de deslocamento positivo podem ser utilizadas para os rejeitos muito densos, porém, para bombear estes rejeitos estas bombas trabalham com altas pressões e menores vazões. O resultado será um maior número de bombas e uma linha de tubulação para pressões mais altas, isto é, maior investimento no sistema e maior custo de energia.

Algumas plantas industriais têm utilizado o transporte, via caminhões ou mesmo correias transportadoras, de rejeitos de alto teor de sólidos obtidos através de bombas de vácuo.

**Figura 12 - Tubulação de distribuição de rejeitos: (a) múltiplos pontos de descarga, (b) ponto único de descarga**



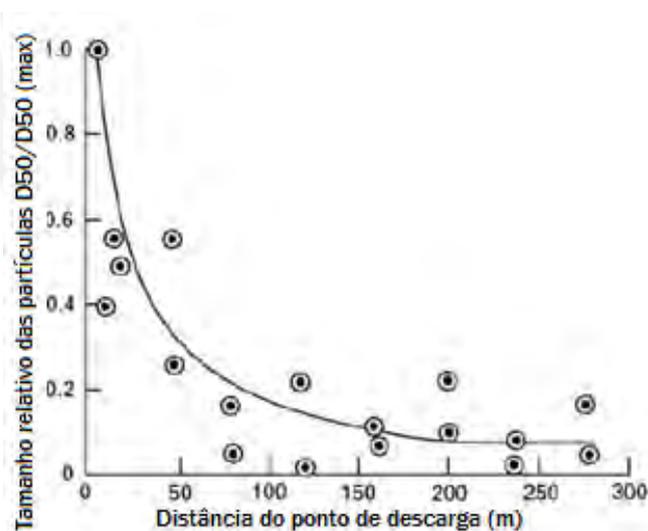
Modificado de Vick (1983)

Na Figura 12, verificam-se dois métodos de disposição dos rejeitos. O primeiro método propicia a formação de diversos amontoados de rejeitos através de diversos pontos de descarga (também chamados de tomadas de entrada) espaçados entre si. O outro método, que faz uso de um único ponto de descarga, necessita que periodicamente este ponto seja movimentado através da separação ou conexão com o restante da tubulação para que se atinja este mesmo objetivo. (VICK, 1983)

Segundo Blight (2010), a velocidade de transporte dos rejeitos deve ser suficiente para manter as partículas sempre em suspensão, o que faz necessário o uso, em muitos casos, de bombas centrífugas. Essa energia presente no sistema de adução é dissipada no momento da descarga, fazendo com que os rejeitos sejam lançados próximos ao final da tubulação. Além disso, como as partículas mais pesadas exigem mais energia para serem lançadas do que as partículas pequenas, existe uma maior probabilidade que as partículas maiores se acumulem perto do ponto de descarga do que os menores, o que auxilia na formação da praia de rejeitos, que será estudada mais adiante.

Este fenômeno é comprovado no gráfico da Figura 13, que utiliza dados reais obtidos de uma barragem de rejeitos de uma mina de diamantes. O gráfico mostra as relações entre os D50 (o diâmetro dos furos da peneira pela qual passam 50% dos grãos da amostra) provenientes de amostras obtidas a diferentes distâncias do ponto de descarga. Nota-se que o maior valor de D50 é proveniente da amostra obtida junto ao ponto de descarga, chamado, então de D50 (máx.). Para cada distância do ponto de descarga, é obtido um novo valor de D50 e calculada a razão entre este e o D50 (máx.). Assim, percebe-se que quanto maior a distância do ponto de descarga, menor a razão entre seu D50 e o D50 (máx.), provando que a granulometria do solo contém cada vez partículas menores.

**Figura 13 - Distribuição das dimensões das partículas depositadas na praia de rejeitos de uma barragem de rejeitos**



Modificado de Blight (2010)

Assim, este fenômeno, somado ao fato de que os métodos de distribuição dos rejeitos citados acima fazem o lançamento a partir da crista da barragem, faz com que as partículas mais grossas dos rejeitos se assentem próximas à barragem, formando a praia de rejeitos. Esta, segundo Vick (1983), é desejável, e até obrigatória em alguns casos, do ponto de vista da

estabilidade da barragem. Por outro lado, as partículas mais finas, bem como a água, acabam por se depositar mais ao centro do vale. A praia é elemento importante de segurança à barragem, pois diminui a elevação do nível de água interno do maciço, melhorando sua estabilidade.

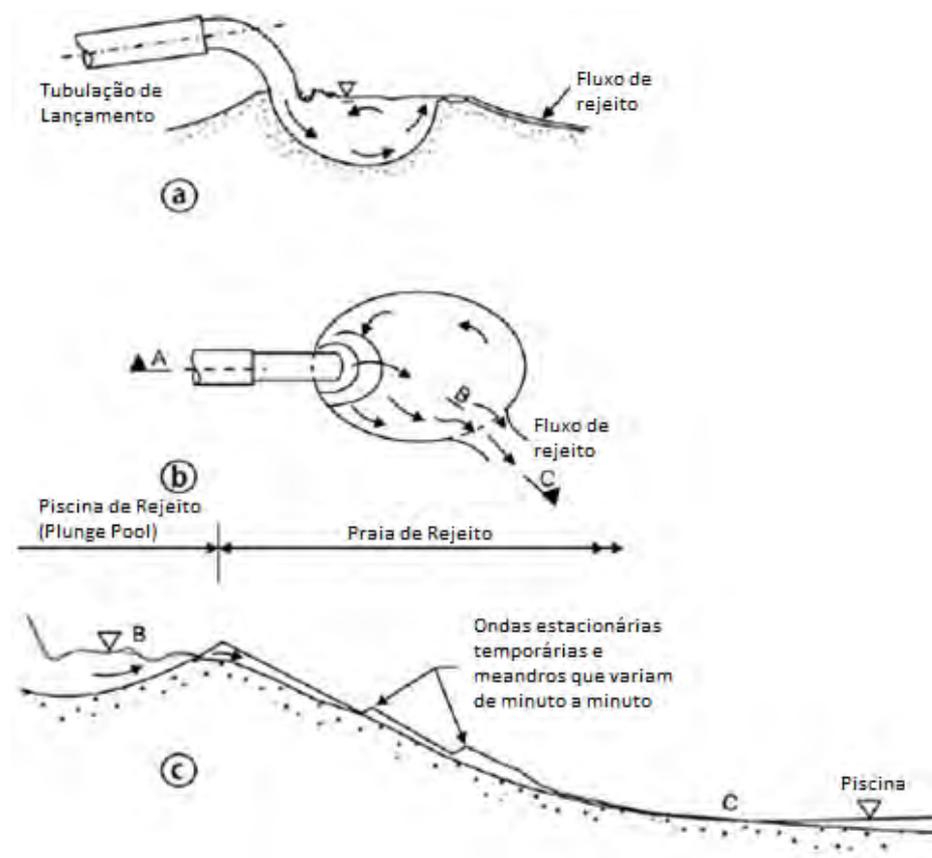
### **2.3.5.1 Praias de rejeito**

No alteamento de montante, há, ao longo da crista do dique, a formação do que se denomina praia de rejeitos. Devido à elevada diferença na granulometria dos rejeitos de minério, as maiores partículas sedimentam com maior velocidade e, portanto, tendem a se concentrar mais próximas do ponto de lançamento, enquanto os mais leves ficam concentrados nas zonas mais distantes.

Os perfis das praias de rejeito dependem principalmente da composição granulométrica e da velocidade do rejeito depositado. O rejeito deve ser lançado com velocidade suficiente para que suas partículas sejam mantidas em suspensão, essa velocidade é garantida utilizando-se um sistema de bombas adequado.

Ao ser lançado pelas tubulações, o rejeito forma uma “plunge pool”, que é uma piscina de rejeito. A partir dessa piscina o rejeito escorre para a praia de rejeitos como pode ser observado na Figura 14(a) e (b) que apresenta um esquema contendo a tubulação de lançamento, a piscina e a praia de rejeito em perfil e em planta, respectivamente.

Figura 14 - Piscina de rejeitos e a formação da praia de rejeitos



Modificado de Blight (2010)

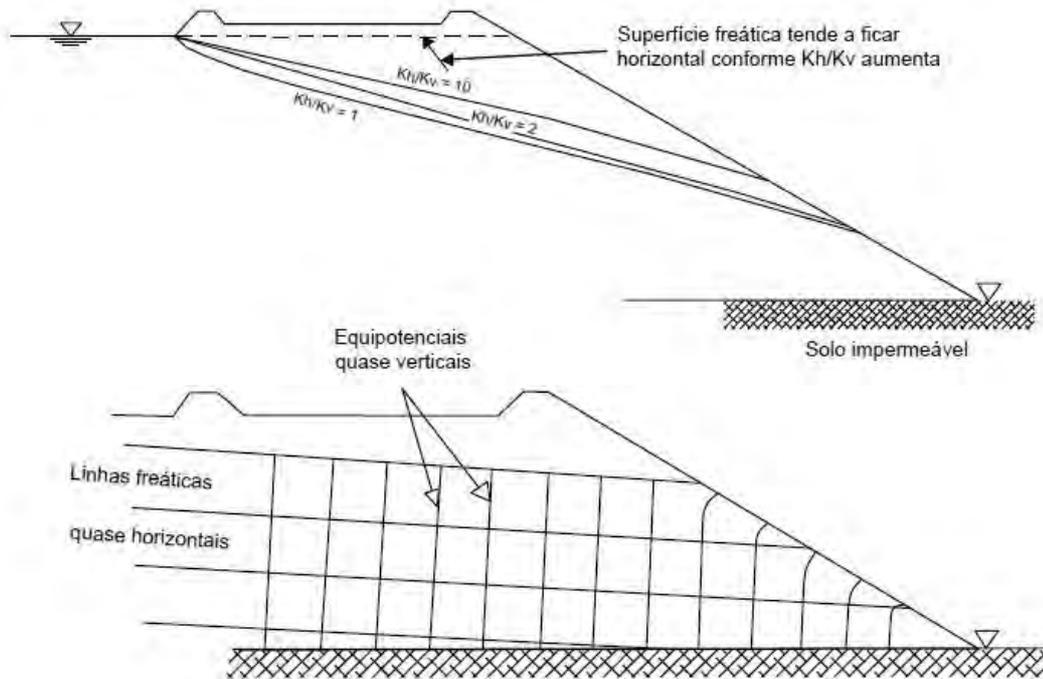
Ainda na Figura 14(c) pode-se observar que no início do escoamento do rejeito pode haver a formação de ondas, que interferem diretamente no perfil da praia de rejeito, uma vez que esse perfil tende a ser linear nos pontos de ocorrência das ondas e curvilíneo onde o escoamento torna-se laminar.

Para se compreender melhor como a granulometria e velocidade interferem no perfil das praias de rejeito utilizaremos o conceito da dissipação da energia. Partículas maiores necessitam de uma maior energia cinética para serem carregadas do que os menores, por esse motivo há um depósito de partículas maiores próximas aos pontos de lançamento. A velocidade de lançamento, por sua vez, interfere diretamente na energia cinética do escoamento e, portanto, pode alterar completamente o perfil.

Além de influenciar no perfil da praia de rejeito, a granulometria influencia na permeabilidade da praia, que por sua vez tem consequências diretas na estabilidade da mesma. Os rejeitos compostos por um grau muito elevado de argila fazem com que a permeabilidade vertical seja

muito menor do que a permeabilidade horizontal, fazendo com que as linhas freáticas sejam quase paralelas ao sair da encosta, o que pode provocar erosão e ser extremamente grave para a estabilidade como mostra a Figura 15.

**Figura 15 - Efeito da permeabilidade na linha freática e na estabilidade da barragem**



Modificado de Blight (2010)

Conclui-se, portanto, que apesar de ser extremamente difícil de prever com precisão o perfil da praia de rejeito e suas características de permeabilidade, é necessário fazer um estudo da mesma para evitar problemas de estabilidade de grande escala.

### 2.3.5.2 Pilhas de rejeitos

Apesar de não ser o método de disposição de rejeito a ser utilizado em nosso projeto, citaremos brevemente como é feita a disposição em pilhas, uma vez que é um método comumente utilizado para alguns tipos de rejeitos, especialmente aqueles mais pesados e pouco solúveis em água.

Os rejeitos armazenados no interior da barragem são dispostos em pilhas sem a utilização de água, que podem ser construídas com diferentes materiais e métodos construtivos. Entre os materiais utilizados para incorporar os rejeitos estão areias, decapeamentos e seixos.

As pilhas formadas de areia em geral são construídas com o uso de um sistema de correias transportadoras de grande eficiência. Entretanto, em alguns casos as pilhas também podem ser formadas com o uso de equipamentos de terraplenagem. As pilhas devem ser formadas por camadas adensadas, cada uma delas com a menor altura possível.

No caso das pilhas de decapeamentos, os materiais podem variar desde areias, cascalhos e rochas fragmentadas, que proporcionam maior estabilidade, até solos moles, que devem ter tratamento especial. Na construção, deve-se tomar cuidado especial com relação à umidade dos materiais a serem empilhados, sempre deixando o material mais seco embaixo.

Por fim, temos as pilhas de seixos. De acordo com Bates (2008), estas costumam ser muito estáveis, principalmente quando contém apenas rochas. Elas costumam ser utilizadas para reforçar, proteger ou servir como fundação para outras pilhas, além de servir como camada destinada a drenagem ou a estradas.

Na sequência o rejeito será incorporado ao material escolhido, que deve ter elevado grau de permeabilidade. A pilha final de rejeitos deverá ter seu planejamento e projeto finalizados antes do início das obras.

### **2.3.6 Decantamento da água armazenada**

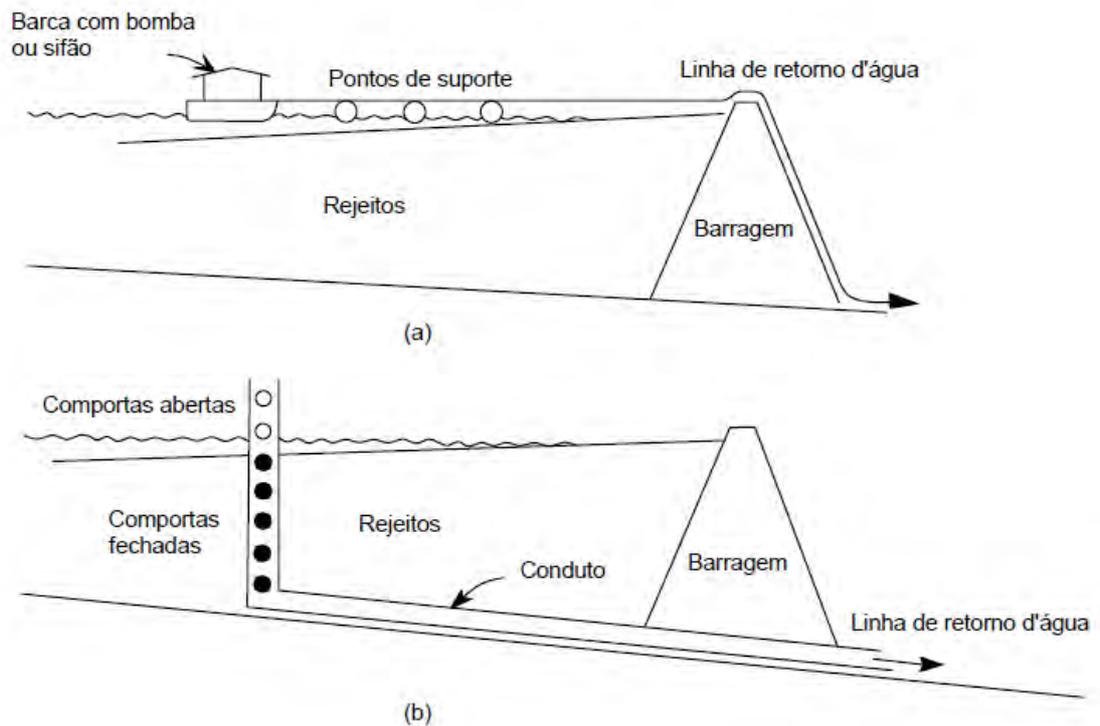
Em muitos casos, é desejável que a água armazenada dentro da barragem seja reconduzida para fora da mesma para reutilização. Além disso, existem outros motivos para se desejar que essa água seja removida do interior da barragem, como: para prevenir a acumulação excessiva de água, prevenindo overtoppings, reduzir a infiltração na barragem e manter o nível freático o mais rebaixado possível e diminuir as perdas de água por evaporação.

Esse processo de decantamento deve ocorrer a uma velocidade controlada, pois, caso contrário, a velocidade do fluxo d'água muito elevada pode atrapalhar o assentamento dos sólidos em suspensão ou estes sólidos podem acompanhar o fluxo d'água. A água deve, portanto, ser sempre removida o mais lentamente possível, exceto em situações de fortes chuvas, quando esta remoção deve ter seu ritmo acelerado. (BLIGHT, 2010).

Assim, para esse propósito, são utilizados, em alguns casos, bombas e sifões sobre barcaças, que são ligadas em tubulações capazes de transportar essa água estocada por cima da crista da barragem, como se exemplifica na Figura 16(a). No entanto, um método mais sofisticado envolve a construção de uma torre de decantamento, mostrada na Figura 16(b).

A torre de decantamento necessita de um conduto de concreto passando por debaixo dos rejeitos e da barragem que pode ser danificado devido à elevada carga sobre ele ou à reação do concreto com possíveis materiais contidos na água. Assim, pode ocorrer ruptura desse conduto, proporcionando erosão interna e possibilitando até o colapso da barragem. Desta forma, este método não costuma ser aconselhável na maioria dos casos. (VICK, 1983)

**Figura 16 - Métodos de decantamento: (a) método baseado no uso de barcas munidas de bombas e sifões, (b) torre de decantação**



Modificado de Vick (1983)

### 2.3.7 Sistema de monitoramento

O sistema de monitoramento tem como objetivo prever possíveis regiões de risco, além de avaliar o desempenho da barragem, o que dá suporte para a manutenção da segurança, além de auxiliar a gestão desta.

Informações referentes ao sistema, como a frequência da medição, o número de aparelhos, a posição e a manutenção destes devem estar descritos detalhadamente no projeto. Essas informações serão muitas vezes decididas com base em estudos, experiência de outras barragens e recomendações de órgãos como o International Commission of Large Damns.

Usualmente, os instrumentos de controle do comportamento da barragem procuram medir os seguintes parâmetros:

- Pressão da água no solo
- Nível d'Água
- Deslocamento do solo

Importante ressaltar que deve existir um estudo teórico que prevê o comportamento da área medida, para servir como referência na comparação com os valores efetivamente medidos.

#### 2.3.7.1 Instrumentação para medições do comportamento do nível d'água

O sistema de medição das ocorrências hidráulicas é, tipicamente, um dispositivo para registro contínuo dos níveis e pressão de água, que constituem o limite para desencadeamento de um nível de alerta e ação da medida corretiva para tal anomalia.

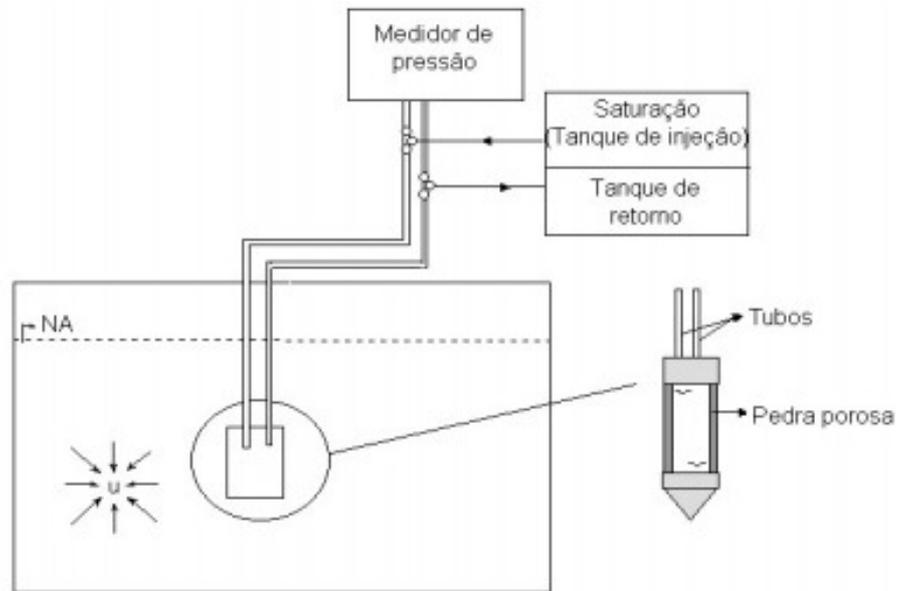
Segundo Bates (2008), estes aparelhos se fazem necessários principalmente em locais adjacentes a terrenos ocupados, nas extremidades à jusante da barragem, nas vizinhanças dos sistemas de drenagem e em qualquer outro local onde se suspeita que possa haver uma pressão neutra alta.

Os instrumentos de piezometria tem sido amplamente utilizado no monitoramento e previsão de comportamento de diversas barragens em todo o mundo. Um piezômetro tradicional é ilustrado na Figura 17.

Atualmente existem diversos tipos de piezômetros, com características peculiares. Dentre os vários tipos de piezômetros existentes, o mais simples é o hidráulico, que não envolve

necessariamente dispositivos elétricos ou eletrônicos sofisticados. A desvantagem é que estes, em comparação, apresentam um tempo de resposta muito lento.

**Figura 17 - Esquema de um piezômetro hidráulico**



Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas

De acordo com Blight (2010), os piezômetros devem ser instalados, nos pontos críticos do barramento, em tubulações perpendiculares a curvatura da mesma e em número suficiente para permitir a precisa determinação do nível freático.

A variação dos registros piezométricos pode ocorrer quando se verifica uma das seguintes condições:

- Aumento da vazão de percolação;
- Elevação do nível d'água de montante e jusante;
- Aumento da permeabilidade de materiais a montante do piezômetro;
- Redução da permeabilidade de materiais a jusante do piezômetro.

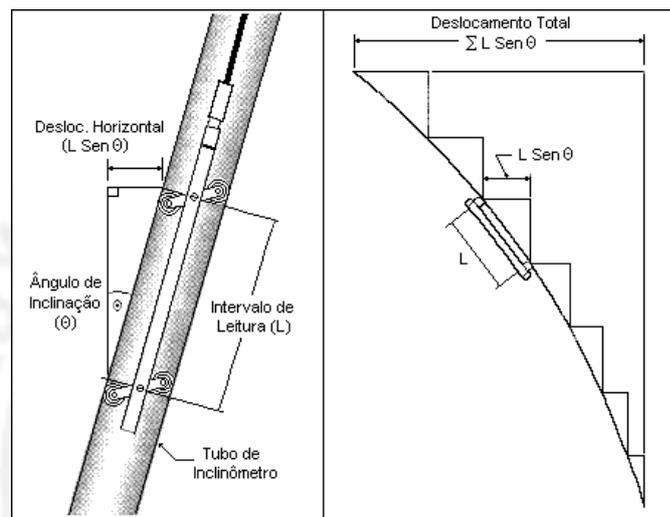
### **2.3.7.2 Instrumentação para medições do deslocamento na barragem**

O monitoramento dos deslocamentos ocorridos ao longo de seções críticas do conjunto barramento/fundação é particularmente importante em termos da quantificação e distinção dos recalques oriundos do próprio maciço compactado e da fundação (principalmente no caso de estruturas assentes em solos compressíveis), da locação de superfícies críticas de ruptura em profundidade.

Em fundações de baixa resistência, é imprescindível o controle sistemático dos deslocamentos horizontais e verticais ao longo de algumas seções normais ao eixo da barragem, de forma a se caracterizar as zonas mais críticas de estabilização.

Diversos instrumentos podem ser utilizados para a quantificação dos deslocamentos ocorridos em uma barragem, dentre eles, o mais simples é o inclinômetro, instrumento ilustrado na Figura 18.

**Figura 18 - Inclinômetro**



Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal da Bahia

O inclinômetro é composto de uma haste cilíndrica com um sensor de inclinação embutido no seu interior e duas ou quatro rodas distribuídas nas laterais. As rodas se encaixam nas ranhuras existentes em um tubo flexível enterrado no solo, fazendo com que o sensor acompanhe a direção do tubo. É então medida a inclinação do tubo em intervalos constantes, e calculado, a partir do ângulo, o deslocamento de cada segmento de tubo.

Outro instrumento de monitoramento amplamente utilizado são os marcos superficiais. O objetivo destes é o acompanhamento dos deslocamentos verticais e horizontais do maciço em relação a uma referência indeslocável, com o auxílio de aparelhos como estação total. Um destes marcos é ilustrado na Figura 19.

**Figura 19 - Marco topográfico**



Veiga et al. (2012)

#### **2.4 Legislação**

No âmbito legislativo, existe um conjunto de normas que disciplinam o tema das barragens do horizonte da mineração. Um destaque para normas regulamentares e técnicas é a DNPM nº 416/2012 que dispõe sobre o cadastro nacional de barragens de mineração e planos de segurança além da fiscalização e inspeção. Existe ainda, a norma que especifica os requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos de beneficiamento, contenção de sedimentos e preservação de água em mineração (ABNT-NBR 13028, 1993), além da lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

A PNSB estabelece diretrizes para as barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e prevê como fundamentos a segurança das barragens, considerada desde a fase de planejamento até a desativação e usos futuros, a informação e o estímulo à participação da população em ações preventivas e emergenciais e a responsabilidade do empreendedor pela segurança da barragem.

De acordo com a norma a segurança de uma barragem influi diretamente na sua sustentabilidade e no alcance de seus potenciais efeitos sociais e ambientais.

A fiscalização da segurança de barragens caberá sem prejuízo das ações fiscalizatórias dos órgãos ambientais integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) à

entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária de rejeitos. Ainda, a PNSB prevê que o órgão fiscalizador das atividades é o responsável pelo enquadramento das barragens em categoria de riscos, dano potencial associado e volume, cabendo ao DNPM no caso das barragens de rejeitos referida obrigação.

A classificação por categoria de risco é feita em razão das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem já a classificação por categoria de dano potencial associado é feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

A partir das informações declaradas anualmente no Relatório Anual de Lavra (RAL) o DNPM classifica as em categorias e identifica quais barragens estão ou não adstritas à PNSB.

A principal obrigação decorrente da sujeição à PNSB é a obrigatoriedade de se possuir o Plano de Segurança de Barragens cujo conteúdo mínimo esta previsto na Portaria a Portaria DNPM nº 416/2012 em que pese o plexo de normas, em parte descrito acima, a regular a matéria, fatores outros como a falta de aparelhamento adequado dos órgãos minerários e ambientais, a baixa qualidade dos planos de segurança e por vezes a ausência de implementação adequada das medidas por parte dos empreendedores ocasiona a carência de efetividade de todo esse regramento.

Em resumo:

- Lei Nº 12.334, 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, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.

- Portaria Nº 416 em 03/09/2012 do Diretor-Geral do DNPM

Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens.

- 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 volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

- Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012

Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.

- Portaria nº 526, de 09 de dezembro de 2013

Estabelece a periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM), conforme art. 8º, 11 e 12 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e art. 8º da Portaria nº 416, de 3 de setembro de 2012.

## **2.5 Estudo hidrológico**

A partir deste capítulo será retratado o estudo hidrológico no âmbito das barragens de mineração. Com o intuito de promover parâmetros de uma chuva de projeto, que deve ser considerada no estudo de drenagem e estabilidade será realizada análise da série histórica de precipitação da região que será implantada a barragem. Para uma dada série histórica, a chuva de projeto será uma extrapolação desta, segundo um modelo dentre os listados abaixo, sendo que a decisão de qual modelo usar dependerá do tamanho e tipo do espaço amostral, quanto à assimetria e desvio padrão.:

- Distribuição Normal;
- Distribuição Log Normal;
- Distribuição Dumbel;
- Distribuição Log Dumbel.

## **2.6 Estudio geológico**

A importância do estudo geológico, no âmbito das barragens de mineração, fundação do aspecto geológico e geotécnico, está relacionada à etapa do projeto de tomada de decisões.

Este estudo implica a caracterização mineralógica (componentes mineralógicos no solo); estudos de hidrogeologia (presença de aquíferos), geologia estrutural (presença de fraturas).

No aspecto geotécnico, é necessária a realização de um estudo para determinação das características sobre a constituição física entre elas, resistência ao cisalhamento, coeficiente de permeabilidade, parâmetros edométricos, módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Isto implica a realização de ensaios de campo e ensaios de laboratório e revisão com a literatura de estudos já existentes. Estes parâmetros serão utilizados principalmente na modelagem que será feita no software de elementos finitos para modelagem de estabilidade, percolação e deformação.

## **2.7 Conceitos teóricos para análise**

Dentre as finalidades deste estudo, está a análise geotécnica da disposição para montante dos alteamentos das barragens e o estudo do comportamento do rejeito que será armazenado.

Com relação às barragens, será realizada a análise de percolação, estabilidade, e de deformação. No caso do rejeito que será armazenado, ele vai servir no futuro como fundação para o próximo alteamento, e, por essa razão, deve ter características de resistência e permeabilidade adequadas para o bom funcionamento do sistema.

### **2.7.1 Recalque**

Haverá uma escolha num momento adiante, em que deveremos eleger se haverá um tratamento do material lançado para separar materiais finos dos arenosos. Caso o alteamento seja feito sobre solo com materiais finos, este deve estar completamente adensado para conseguir resistir os carregamentos, e não existir deformações residuais decorrentes da lenta expulsão de água dos espaços vazios do solo.

Com essa possibilidade em mente, será apresentada aqui uma pequena revisão de alguns conceitos e modelos teóricos que existem e a sua aplicação para a análise do processo de deformações devido a carregamentos verticais.

Das (2014) analisa o recalque total de uma massa de solo sob pressão como a soma de três:

- Recalque elástico: causado pela resposta elástica imediata do solo.
- Recalque por adensamento primário: resultado da redução de volume em solos coesivos saturados devido à expulsão de água.
- Recalque por compressão secundária: resultado do ajuste plástico da estrutura do solo.

Para as deformações rápidas, será utilizada a teoria da elasticidade, enquanto para as deformações lentas será utilizada a teoria de adensamento.

### 2.7.1.1 Recalque elástico

A teoria da elasticidade tem como principal hipótese o fato de que a relação entre tensão e deformação de um corpo são lineares.

O problema das tensões em uma massa de solo segundo a teoria da elasticidade foi resolvida por Boussinesq (1883), como a resposta do solo para uma carga pontual. Integrando a equação de Boussinesq, é possível obter a tensão vertical em um determinado ponto do solo devido à aplicação de diversos tipos de carregamento na superfície. (DAS, 2014)

Assim, os recalques na superfície de uma área carregada podem ser expressos pela equação proposta por Pinto (2006):

$$\rho = I * \frac{\sigma_0 * B}{E} * (1 - \nu^2)$$

Em que :

I: Coeficiente de forma da superfície e sistema de aplicação de pressão

$\sigma_0$ : Tensão distribuída

B: Largura (ou diâmetro) da área carregada

E: Módulo de Elasticidade do Solo

$\nu$ : Coeficiente de Poisson

Para a utilização dessa equação seria necessário realizar ensaios para a determinação dos parâmetros elásticos de compressibilidade do solo. O ensaio de compressão triaxial poderia nos fornecer esses parâmetros.

As dificuldades da aplicação dessa teoria para o cálculo de recalques se refere à incerteza sobre os dados usados na equação. Segundo Pinto (2006), o emprego dessa teoria é debatível,

visto que o solo não é um material homogêneo, perfeitamente elástico ou isotrópico. Apesar disso, a teoria da elasticidade é comumente utilizada para a estimativa de tensões e recalque no interior de massas de solo e em sua superfície, devido à relativa aderência com resultados. (PINTO, 2006)

Segundo Das (2014), pode-se esperar uma diferença de 25% a 30% entre valores estimados pela teoria e valores reais.

### **2.7.1.2 Teoria do adensamento do Terzaghi**

Perante uma solicitação, a poropressão da massa de um solo saturado é aumentada, criando um gradiente hidráulico, caso este não esteja confinado. Em solos permeáveis, como os arenosos, a drenagem causada pelo aumento da pressão é concluída rapidamente, assim, os recalques elásticos e por adensamento ocorrem simultaneamente. (DAS, 2014)

Quando o solo é coesivo, no entanto, esse processo é mais lento, devido à sua baixa permeabilidade. Assim, existe a necessidade de um estudo que analise o tempo e o recalque nesses casos.

A teoria de Adensamento desenvolvida por Terzaghi apresenta algumas hipóteses que são apresentadas e comentadas a seguir.

Hipóteses da teoria do Adensamento do Terzaghi (PINTO, 2006):

- 1) O solo é totalmente saturado;
- 2) A compressão é unidimensional;
- 3) O fluxo de água é unidimensional;
- 4) O solo é homogêneo;
- 5) As partículas sólidas e a água são praticamente incompressíveis perante a compressibilidade do Solo;
- 6) O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais, apesar de ser constituído de partículas e vazios;
- 7) O fluxo é governado pela lei de Darcy;
- 8) As propriedades do solo não variam no processo de Adensamento;
- 9) O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

O tema é complexo e é objeto presente de estudos e discussões no meio acadêmico. (PINTO, 2006)

Em suma, a teoria procura relacionar o recalque por expulsão de água dos vazios com o tempo.

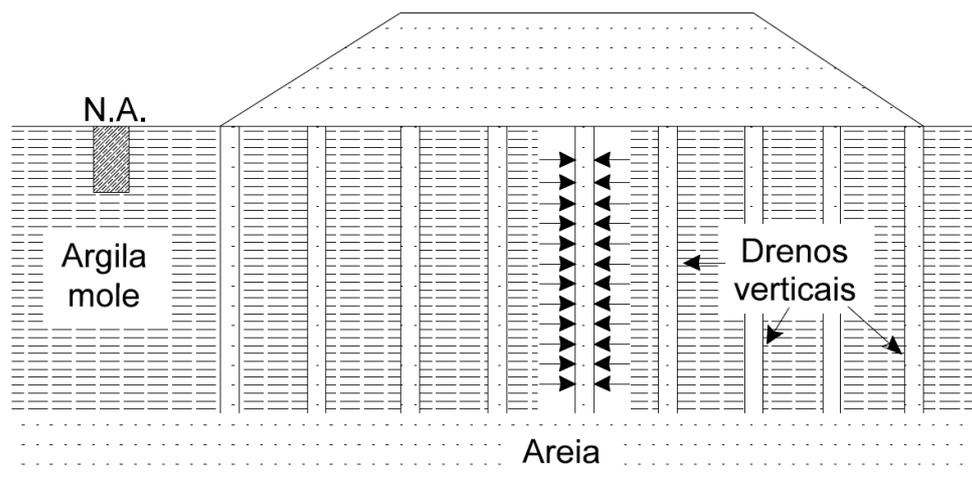
O que se percebe na prática é que existem dois estágios na evolução do recalque de uma massa de solo carregado. A primeira etapa é a chamada de adensamento primário, tratada pela teoria do adensamento. É o processo de expulsão de água dos vazios do solo. Antes mesmo que este termine, inicia-se uma deformação residual, que é a segunda etapa, chamada de adensamento secundário. (PINTO, 2006)

A aplicação da teoria depende de um coeficiente de compressibilidade, cuja obtenção é dificultada pelo fato de que existe, além do recalque inicial, a segunda etapa de adensamento, que ocorre concomitantemente com o primário. Existem diversos métodos para contornar esse problema, dentre eles o Método de Casagrande e o Método de Taylor. (PINTO, 2006)

Muitas vezes, para minimizar o tempo de recalque, são instalados drenos verticais no solo, para acelerar o processo de expulsão de água do solo. (DAS, 2014)

Este sistema de drenos é ilustrado na Figura 20.

**Figura 20 - Drenos verticais para aceleração do recalque por adensamento**



Massad (2010)

Avaliando a representabilidade dessa teoria, podemos inferir que algumas delas como, por exemplo, as hipóteses 4 e 7 são muito razoáveis com a realidade, mas é importante ressaltar que na hipótese 8 não se assemelha sempre na realidade e depende muito das propriedades do solo. Por exemplo, depois do adensamento, o solo não apresenta o mesmo índice de vazios, por isso a permeabilidade varia. A justificativa desta hipótese é que as propriedades do solo se modificam em grau pequeno e que pode ser desconsiderada alguma mudança; mas isso não ocorre em todas as situações especialmente onde as deformações são grandes.

A hipótese 9 seria válida em situações onde o incremento de tensão efetiva é pequeno, porque o índice de vazios varia aproximadamente linearmente só após de ter atingido a pressão de pré-adensamento e os valores da tensão efetiva precisam estar na escala logarítmica.

### **2.7.1.3 Teoria do adensamento para grandes deformações**

Após ver as necessidades de desenvolver novas teorias para suprir algumas considerações com a finalidade que se assemelhem melhor na realidade, foram criadas diversas teorias que consideram grandes deformações no solo e não somente deformações infinitesimais como é no caso da teoria do Adensamento de Terzaghi.

Certos autores começaram a desenvolver uma teoria de adensamento unidimensional para grandes deformações tendo as seguintes hipóteses básicas: (GONÇALVES, 1992)

- O solo é saturado e formado por uma matriz de solo compressível e fluido incompressível. As partículas individuais do solo são consideradas incompressíveis;
- A velocidade de fluxo do fluido é pequena e governada pela lei de Darcy;
- Há uma relação única entre o valor da permeabilidade do solo e do índice de vazios  $k=k(e)$ ;
- Há uma relação única entre o valor da tensão vertical efetiva e o índice de vazios  $\sigma' v = \sigma' v(e)$ ;
- O material é homogêneo.

É importante mencionar que quando trata-se de grandes deformações, o assunto do sistema de coordenadas (Localização das partículas) é muito importante, por essa razão, estes autores adicionaram um sistema de coordenadas moveis que é chamado de coordenadas convectivas vai ao deslocamento das camadas. Além disso foi considerado adicionalmente um sistema chamado coordenadas materiais que serve para medir somente o volume das partículas sólidas. (GONÇALVES, 1992).

Foi utilizado o seguinte sistema de coordenadas:

- Coordenadas Fixas (Lagrangianas): Medida do solo no tempo zero ( $t=0$ );
- Coordenadas Convectivas: Medida do solo no tempo maior que zero ( $t > 0$ );
- Coordenadas Materiais: Medida somente do volume das partículas sólidas.

No processo de definição da teoria, utiliza-se três equações geradas a partir de cada sistema de coordenadas considerando as leis de equilíbrio e a conservação da massa.

Como o solo apresenta duas fases (sólida e fluido), obtiveram-se três equações de equilíbrio; uma o esqueleto do solo, outra do fluido, e a terceira é da mistura. Por causa do princípio das tensões efetivas, na teoria são utilizadas as equações de equilíbrio da mistura e dos fluidos.

## **2.7.2 Estabilidade**

As barragens que contêm o rejeito precisam ser projetadas de maneira que o funcionamento seja o adequado durante toda a vida útil do projeto. Historicamente, este tipo de barragem no mundo, poderá apresentar rupturas por diversos fatores sendo o mais recorrente a instabilidade do talude.

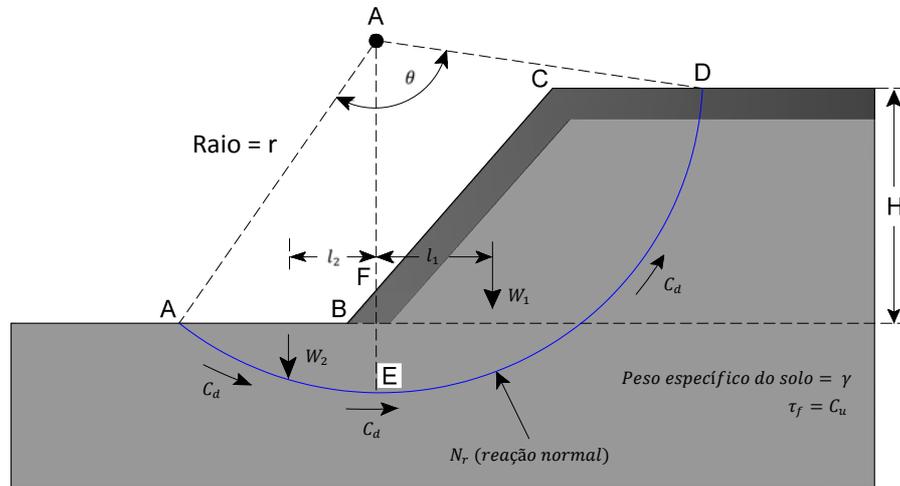
Para uma melhor compreensão sobre como estudar e analisar a estabilidade de taludes neste trabalho, abaixo será resumido diversos tópicos relacionados aos métodos de análise de estabilidade de taludes.

### **2.7.2.1 Métodos de equilíbrio-limite**

Este método é o mais popular e utilizado para este assunto, devido ao fato de que é relativamente mais simples, pois utiliza um mínimo de dados de entrada. A suposição principal do método é que a falha do talude ocorre devido ao deslizamento de um bloco ou uma massa através de uma superfície. (MASSAD, 2010)

A Figura 21 ilustra o cálculo da estabilidade de um talude pelo método do equilíbrio-limite.

Figura 21 - Análise da estabilidade de um talude pelo método do equilíbrio-limite



Das (2014)

Assim, conhecidas as forças resistentes mobilizadas ( $\tau$ ) e as atuantes ( $s$ ), temos que o coeficiente de segurança ( $F$ ), cujo objetivo da análise é ser maximizado, é dado por:

$$F = \frac{s}{\tau}$$

Assim, são as hipóteses do método:

- O comportamento do solo como rígido elasto-plástico
- As equações de equilíbrio são válidas até a iminência do colapso
- O coeficiente de segurança é constante ao longo da superfície de ruptura

Existem diferentes tipos de métodos, que podem compreender a massa de solo como:

- Um todo (Método do Círculo de Atrito)
- Subdividida em lamelas (Método Sueco)
- Em cunhas (Método das Cunhas)

Ao avaliar a representabilidade dessa teoria, percebe-se que uma das hipóteses do método é de que a deformação da massa do solo enquanto não há a ruptura é desprezível, assim, o fator de segurança calculado por este método assume que as deformações estão dentro do rango aceitável. Portanto, como não é considerado o comportamento esforço-deformação do solo, esta análise fica deficiente quando se apresenta uma análise de problemas de estabilidade de talude onde o comportamento é mais complexo e que envolva a deformação do solo.

### 2.7.2.2 Shear strength reduction method

Analistas e acadêmicos, cada vez mais, estão usando o Shear Strength Reduction Method, em conjunto com ferramentas de análise por elementos finitos, para a determinação do fator de segurança e mecanismo de colapso de estruturas de contenção. Isso se explica pelo fato de que o método clássico, de análise por equilíbrio limite negligencia o comportamento do domínio sob pressão, para que se atenda a hipótese de não deformação da teoria. Este fato dificulta a sua utilização em estruturas que tem grandes deformações até o colapso.

No método SSR (Shear Strength Reduction) se calcula o fator de segurança utilizando um modelo de resistência elasto-plástica para os materiais do talude, e a análise é baseada na redução da resistência ao cisalhamento do material progressivamente até que ocorra a ruptura, momento em que se determina o mecanismo de colapso e seu fator de segurança.

Para materiais avaliados pelo critério de Mohr-Coulomb, a resistência ao cisalhamento fica reduzida pelo fator de segurança expresso na seguinte equação:

$$\frac{\tau}{F} = \frac{c'}{F} + \frac{\tan\phi'}{F} \rightarrow \frac{\tau}{F} = c^* + \tan\phi^*$$

Portanto, a redução dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb servirão como dado de entrada no software e podem ser expresso da seguinte forma:

$$c^* = \frac{c'}{F} \text{ e } \phi^* = \arctan\left(\frac{\tan\phi'}{F}\right)$$

(ROCNEWS, 2004)

Para realizar o projeto pode ser escolhidos um dos tipos de métodos anteriormente mencionados. Neste trabalho, como será discutido mais adiante, optou-se por utilizar o método de equilíbrio limite.

### 2.7.3 Percolação

O fato do solo ser um conjunto de grãos de rocha nos remete ao fato de que existem espaços vazios no seu interior, e portanto, é um material permeável à passagem de água. O estudo do fluxo de água por este meio é de extrema importância, para que se possa estimar o fluxo subterrâneo da barragem, assim como a estabilidade do barramento, que estará sujeita a forças de percolação.

Abaixo revisaremos a teoria da continuidade de Laplace, que rege o comportamento das redes de fluxo em uma estrutura de contenção de terra, e discutiremos os tópicos a serem atentados para o caso específico da barragem de rejeito.

#### 2.7.3.1 Equação da continuidade de Laplace

As redes de fluxo provenientes da Equação da Continuidade de Laplace é uma ferramenta poderosa para o cálculo da percolação e pressão neutra subterrânea em estruturas de contenção.

A teoria de percolação é baseada na Lei de Darcy (1856), que define uma relação entre a velocidade do fluxo, o gradiente hidráulico e a condutividade hidráulica do material (também conhecida como permeabilidade), e a Equação de Bernoulli, que define um valor energético para ponto na água, composto pela soma de um fator piezométrico, cinético e altimétrico.

Com base nessas teorias, foi definida a Equação da Continuidade de Laplace, conforme descrita abaixo:

$$k_x * \frac{d^2 h}{dx^2} + k_z * \frac{d^2 h}{dz^2} = 0$$

Em que:

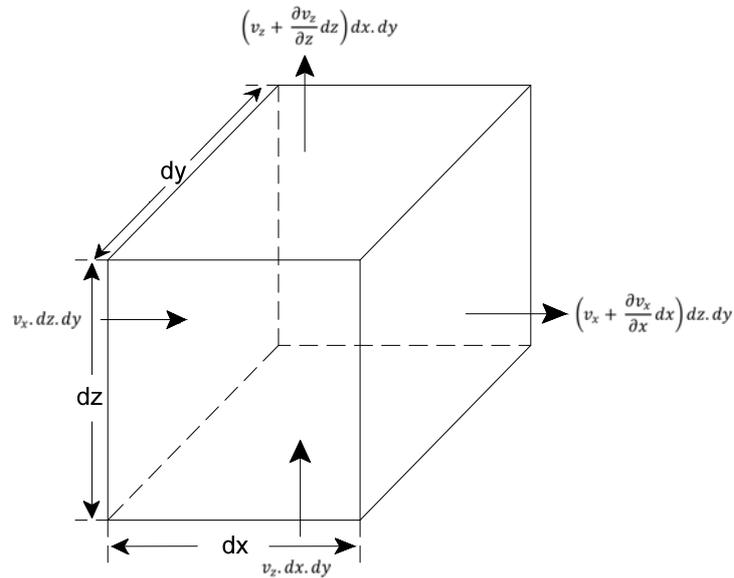
$k_x$ : condutividade hidráulica segundo eixo x

$k_z$ : condutividade hidráulica segundo eixo z

h: carga total

Na Figura 22, é representado o fluxo d'água um ponto infinitesimal da massa do solo.

Figura 22 - Fluxo d'água em um ponto infinitesimal da massa do solo



Das (2014)

Esta que é uma equação diferencial de segundo grau pode ser solucionada de diversas maneiras. Mais adiante veremos como será tratada computacionalmente, mas, até a elaboração desta tecnologia, o método gráfico era o mais comum.

### 2.7.3.2 Superfície freática em uma barragem de rejeitos

Os fatores que preocupam a aplicação de alteamento para montante, são principalmente os seguintes:

- O controle da superfície freática
- A capacidade de armazenamento de água
- A susceptibilidade de liquefação sísmica

Assim se evidencia a grande importância do controle da superfície freática, visto que esta vai influenciar diretamente a estabilidade geral da barragem sob carregamentos estáticos e dinâmicos.

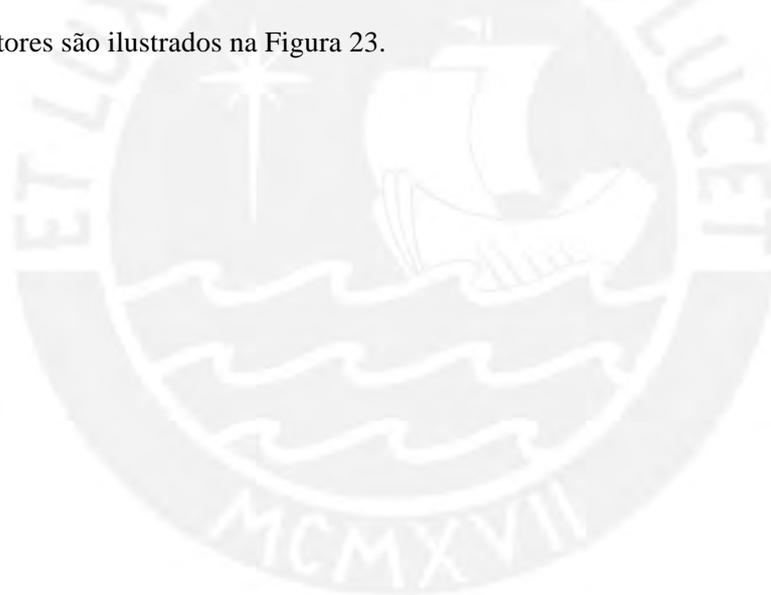
O volume de água mantida na barragem tem duas origens: as precipitações que são captadas pela própria subbacia do sistema, e a água que é acarreada junto com o rejeito lançado, por se tratar de um lançamento hidráulico.

Um dos pontos importantes é a localização da superfície freática, visto que existe uma relação direta desta com a estabilidade da barragem.

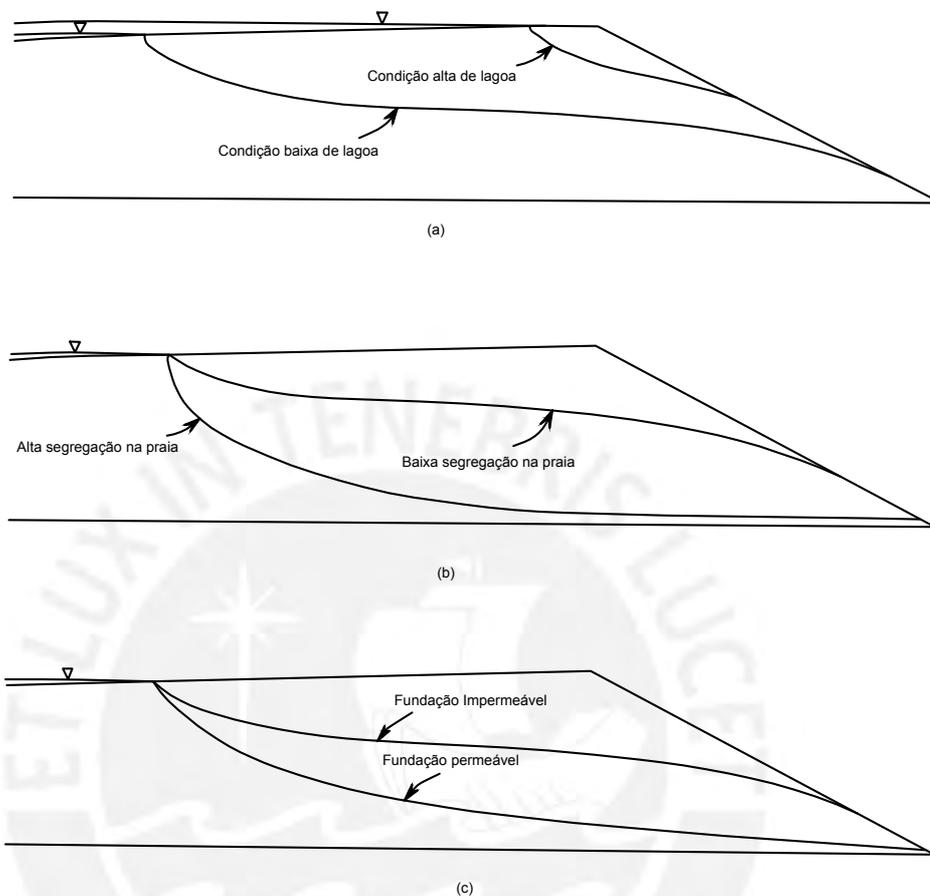
Assim, os fatores que influenciam a posição da superfície freática são principalmente três, mencionados e representados abaixo:

- A localização relativa da lagoa à cresta do dique;
- O tamanho das partículas da segregação e a variação da permeabilidade lateral dentro do depósito;
- A permeabilidade da fundação do rejeito.

Estes fatores são ilustrados na Figura 23.



**Figura 23 - Fatores que influenciam a posição da superfície freática: (a) Efeito da localização da lagoa. (b) Efeito da segregação da praia e a variação da permeabilidade lateral. (c) Efeito da permeabilidade da fundação.**



Modificado de Vick (1983)

A segregação do rejeito, através da ciclonagem, é fundamental para separar as partículas grossas das finas. Isto é importante finalmente para ter um melhor controle da linha freática, porque o material grosso (areia) vai ser colocado como fundação para os próximos alteamentos e por tratar-se de um material granular significa que vai permitir uma boa drenagem, e de alguma maneira garante um melhor conhecimento da superfície freática através do monitoramento.

A percolação de água através da barragem precisa de toda a atenção e cuidado no desenho das barragens para armazenar rejeitos. E para ter um adequado controle da percolação é necessário:

- Manter a superfície freática dentro do aterro de areia para considerações de estabilidade
- Por motivos de fornecimento de água.
- Controlar a contaminação da água do subsolo para jusante.

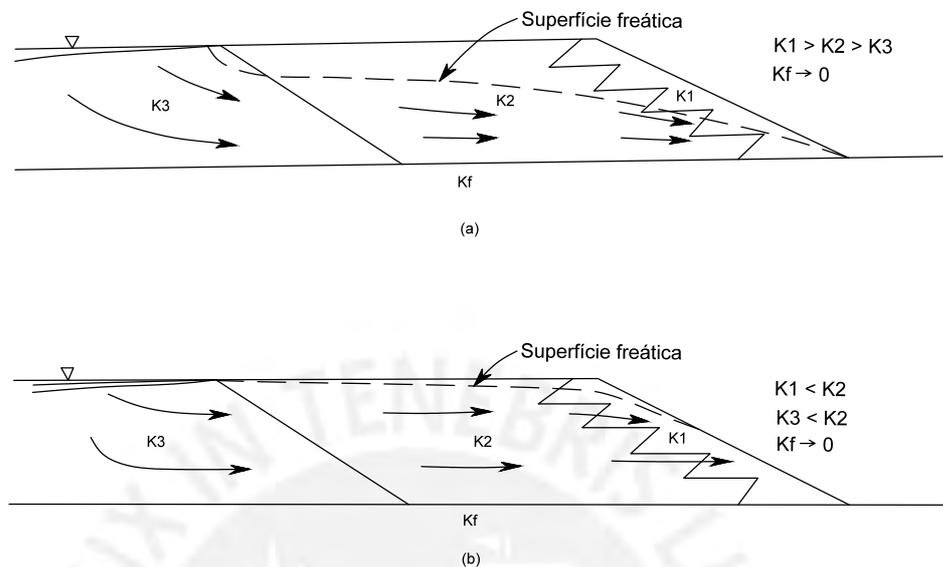
Para diminuir a percolação, é recomendado impermeabilizar a superfície de montante da barragem.

O arranjo interno da barragem tem grande influência no comportamento da superfície freática. O objetivo principal é fazer com que a superfície freática fique a mais baixa possível ao encontrar a face do dique. Para que isto seja feito, é necessário que a permeabilidade aumente em direção ao fluxo. É importante mencionar que a permeabilidade relativa entre esses materiais é o fator que define a posição da linha freática e não a permeabilidade individual de cada material. Devido a este fator, o material que compõe o dique é usualmente composto de material arenoso e é mais permeável que a camada de rejeito adjacente.

Na Figura 24(a) observa-se o design ideal de uma barragem construída com o alteamento à montante. A primeira camada à esquerda possui a menor permeabilidade das três, enquanto a última, material que compõe o dique, possui a maior. É possível perceber que a superfície freática está baixa na face do dique, fazendo com que se evite a ocorrência de piping e erosões que possam afetar a estabilidade da barragem.

Na Figura 24(b) temos um caso muito semelhante com o da anterior, no entanto, o material que compõe o dique tem baixa permeabilidade, o que leva a um grande aumento da superfície freática em sua face. Esse elevado nível d'água causa extrema instabilidade com a ocorrência de piping e erosões excessivas.

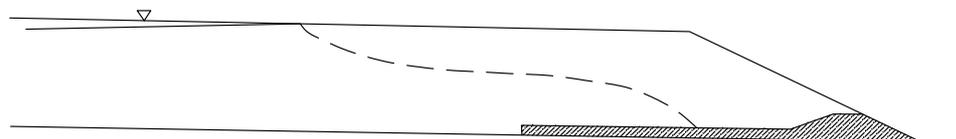
**Figura 24 - Efeito do zoneamento interno na linha freática: (a) configuração apropriada para controle da superfície freática. Flechas indicam a direção do fluxo, (b) infiltração bloqueada por um material de baixa permeabilidade na face do aterro, produzindo uma superfície freática alta**



Modificado de Vick (1983)

No caso das barragens construídas à montante, segundo Vick (1983), como uma alternativa à construção de um dique com elevada permeabilidade, pode-se implantar um dreno em forma de tapete, uma camada de alta permeabilidade construída na execução do dique inicial. Esse dreno, em teoria, seria suficiente para garantir o baixo nível da superfície freática como mostra a Figura 25. Vale ressaltar que a aplicação de tal camada está sujeita à disponibilidade do material nas proximidades da barragem, caso contrário pode ser uma alternativa financeiramente inviável.

**Figura 25 - Uso de um tapete drenante no dique inicial de barragens contruídas pelo método de alteamento a montante**

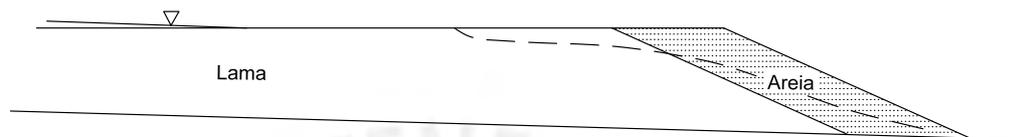


Modificado de Vick (1983)

Alternativamente, para o caso em que não há a presença de material que se possa utilizar nas camadas de drenos, há o processo de ciclonação do rejeito. Como foi dito anteriormente, é necessário que haja uma relação entre as permeabilidades das diferentes camadas. Para

atingir tal objetivo, a separação dos materiais finos dos arenosos presentes no rejeito pode ser a solução. Quando o rejeito chega à crista do dique, ele passa por um processo de ciclonação, que fará essa separação. O rejeito fino, então, será lançado há certa distância do dique, enquanto o arenoso uma parte será parte da composição do alteamento e outra será lançada da crista do mesmo, dessa maneira garantindo-se as condições necessárias de permeabilidade como lustrado na Figura 26.

**Figura 26 - Uso do rejeito para drenagem interna no método a montante**



Modificado de Vick (1983)

Além da preocupação relacionada à permeabilidade das diferentes camadas, deve-se também levar em conta os critérios de filtro para que não haja a migração de partículas de solos para as camadas adjacentes. A falta de controle desse fator é um dos motivos para causa de instabilidade em algumas barragens. Os critérios que devem ser atendidos estão simplificados nas fórmulas descritas a seguir.

$$\frac{d_{15} \text{ do filtro}}{d_{85} \text{ do solo protegido}} < 5$$

$$\frac{d_{50} \text{ do filtro}}{d_{50} \text{ do solo protegido}} < 25$$

A seleção dos materiais é crítica para o sucesso do design escolhido. Há três possibilidades de materiais a serem utilizados na construção dos diques, solos naturais, estéril e rejeito ciclonado.

Quando se trata de barragens de rejeito, a utilização de solos naturais deve ser feita de maneira criativa, uma vez que, ao contrário de barragens de água, as barragens de rejeito são exclusivamente despesas do início ao fim do processo de mineração. Por esse motivo é necessário que se utilize os materiais disponíveis nas proximidades da barragem. Além da não disponibilidade, muitas vezes os solos naturais não apresentam as características necessárias para serem utilizados nos diferentes componentes da barragem, por exemplo, no tapete drenante o que impossibilita seu uso. Por sorte, os solos naturais só são realmente necessários

na construção do dique inicial, outras etapas podem ser feitas utilizando-se o rejeito ciclonado e o estéril.

O uso de estéril é bastante atrativo, pois seu custo é muito baixo, já que de uma maneira ou de outra, deverá ser feita a correta disposição do mesmo. Em muitos casos, dependendo da distância entre a barragem e o local de mineração, mesmo havendo a disponibilidade de solos naturais adequados, é preferível o uso do estéril na construção devido à vantagem econômica. Os problemas enfrentados pelo uso do estéril na construção dos alteamentos são devidos a, principalmente, suas propriedades quanto ao design dos filtros. Sua granulometria costuma conter elevadas quantidades de finos e granulares, muitas vezes incapacitando-o de atender aos critérios de filtro citados anteriormente. Um dos maiores problemas relacionados ao uso de estéril no design é a ocorrência de piping.

O uso de rejeito ciclonado para a construção dos alteamentos, assim como o de estéril, é uma alternativa barata. Há grandes vantagens relacionadas ao uso desse material, pois é possível controlar de maneira eficiente as características do material para que atinja os requisitos do design. Além disso, segundo Vick (1983), estima-se que o seu uso pode reduzir de 10% a 30% do volume de rejeito lançado, sendo esta, mais uma vantagem econômica.

#### **2.7.4 Método dos elementos finitos**

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais parciais, dividindo o domínio de um problema em partes menores, denominadas elementos finitos.

Apesar de algumas das teorias apresentadas já existirem a décadas, foi o advento dos computadores e metodologia de cálculo computacional que fizeram que os modelos pudessem ser solucionados de maneira relativamente simples. (BUCALEM; BATHE, 2011)

Segundo Bucalem e Bathe (2011), em uma análise com elementos finitos, é importante que exista uma fase inicial, em que o modelo matemático adequado seja escolhido, e uma segunda fase, em que o método de elementos finitos é usado. O analista deve estar familiarizado com a primeira fase, para que possa ter uma análise crítica dos resultados provenientes da análise por elementos finitos, motivo pelo qual este é o último dos tópicos dos conceitos para análise.

## 3 Projeto da barragem

### 3.1 Localização

As diretrizes gerais para o projeto foram baseadas na Lei N° 12.334, de 20 de Setembro de 2010, que especifica que as disposições de rejeitos devem ser:

- O mais próximo possível do sistema de beneficiamento;
- De preferencia em áreas lavradas e já exauridas ou degradadas;
- Preferencialmente em locais de níveis inferiores ao sistema de beneficiamento.

Além destas, deve ser evitado à implantação do barramento em:

- Áreas de preservação permanente e unidades de conservação;
- Áreas com vegetação nativa exuberante;
- Áreas com solos férteis;
- Áreas a montante de captação de água para abastecimento público e atividades agrícolas.

Outras diretrizes em relação à localização do barramento sugerem que os barramentos sejam preferencialmente implantados em:

- Locais com fundação firme e baixa permeabilidade;
- Locais que evitem interceptar cursos d'água perenes;
- Locais em que uma eventual ruptura não cause sérios transtornos e prejuízos à população vizinha;
- Local que permita o uso múltiplo.

O projeto a ser desenvolvido assume que a barragem será implantada num município hipotético, no estado de Minas Gerais (Brasil). Nesta oportunidade, com a utilização dos software: Google Earth, Global Mapper e o Civil 3D, obteve-se a informação da topografia básica da zona a qual foi modificada de forma favorável para que esteja pronta para começar a projetar e implementar a barragem, que é o foco e objetivo deste trabalho. Com base na topografia do terreno, gerou-se vários planos que vão ser apresentados a seguir.

Como ponto inicial da localização, é apresentada na PLANTA 1 (Figura 55, nos Anexos) a topografia da região e na PLANTA 2, (Figura 56, nos Anexos) a localização do eixo principal da barragem.

Na PLANTA 3 (Figura 57, nos Anexos), são apresentados dois perfis. O primeiro (superior) mostra o corte do terreno no eixo principal da barragem. Este perfil indica o comprimento da barragem que deve ser construído na fase inicial até a final. O segundo perfil (inferior), representa um rascunho geral do dique inicial e dos próximos alteamentos.

O eixo principal geológico, por sua vez, está indicado na PLANTA 4 (Figura 58, nos Anexos).

## **3.2 Estudo ambiental**

### **3.2.1 Classificação quanto ao potencial de dano ambiental**

O projeto de uma barragem de rejeito de minérios só pode ser executado uma vez que tenham sido preenchidos e adquiridos todos os requisitos ambientais relacionados a ele. Deve-se fazer uma Avaliação de Impacto Socioambiental de maneira que sejam tomadas medidas preventivas ou compensatórias durante a implantação e operação da barragem.

O Potencial de Dano Ambiental é calculado pela somatória dos valores “V” da Tabela 4 de acordo com as características da barragem. Esse método faz parte da legislação ambiental de Minas Gerais para barragens de rejeitos e resíduos, disponibilizado pelo SISEMA (Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos) e pela FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente).

Tabela 4 - Critérios de classificação das barragens

Altura da barragem H (m)	Volume do reservatório ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	Ocupação humana a jusante	Ocupação ambiental a jusante	Instalações na área a jusante
H < 15 V = 0	Vr < 0,5 V = 0	Inexistente V = 0	Pouco significativo V = 0	Inexistente V = 0
15 <= H <= 30 V = 1	0,5 <= Vr <= 5 V = 1	Eventual V = 2	Significativo V = 1	Baixa concentração V = 1
H > 30 V = 2	Vr > 5 V = 2	Existente V = 3	Elevado V = 3	Alta concentração V = 2
-	-	Grande V = 4	-	-

Conselho Estadual de Política Ambiental (2005)

Após somar os valores de “V” as barragens são classificadas em Classe I ou Baixo Potencial de Dano Ambiental quando a somatória for igual ou inferior a 2, Classe II ou Médio Potencial de Dano Ambiental quando a somatória for superior a dois e igual ou inferior a 5 e Classe III ou Alto Potencial de Dano Ambiental quando for superior a 5. Essa classificação determina a frequência com que se devem realizar auditorias técnicas de segurança de barragem, variando de 3 em 3 anos, 2 em 2 anos ou anualmente conforme o aumento do Potencial de Dano Ambiental.

Os relatórios gerados durante as auditorias devem estar sempre disponíveis nos empreendimentos para consulta durante as fiscalizações ambientais.

Usaremos esses dados para classificar a barragem de rejeito hipotética tratada nesse trabalho de formatura. Quanto à altura da barragem utilizaremos V=2, o volume do reservatório também fornece V=2, a ocupação humana a jusante trataremos como eventual, portanto, V=2. Pela ausência de cursos d’água à jusante, o interesse ambiental é pouco significativo, V=0, por fim, as instalações na área de jusante são consideradas de baixa concentração, V=1. Totalizando uma somatória equivalente a 7 e portanto nossa barragem será de Classe III, devendo-se realizar auditorias anualmente.

### 3.3 Estudio hidrológico

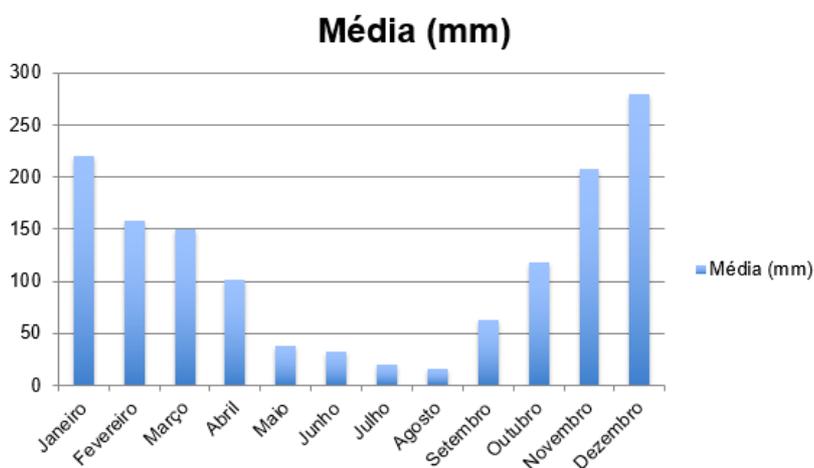
Em um estudo preliminar, foram coletados dados de série histórica de precipitação de 55 anos, através do hidroweb, aplicativo fornecido pela ANA – Agência Nacional de Águas. Segue, abaixo, Tabela 5 com as médias no período da série histórica utilizada, bem como gráfico apresentando tais valores, na Figura 27.

Tabela 5 - Média de precipitação mensal histórica

Mês	Média
Janeiro	220,0
Fevereiro	157,6
Março	149,4
Abril	101,1
Mai	38,5
Junho	32,7
Julho	19,4
Agosto	15,6
Setembro	62,3
Outubro	117,9
Novembro	208,4
Dezembro	279,3

Elaborada pelos próprios autores

Figura 27 - Média histórica de precipitação



Elaborada pelos próprios autores

A bacia da qual foram pegos os dados foi a Bacia Hidrográfica dos Rios Pomba e Muriaé, situada na mesorregião da Zona da Mata, abrangendo um total de 68 sedes municipais e apresentando área de drenagem de 13.552 km<sup>2</sup>. A bacia possui uma população estimada de 776.608 habitantes. O clima na bacia é considerado semiúmido, com período seco durando entre quatro e cinco meses por ano, situando-se a disponibilidade hídrica entre 10 e 20 litros por segundo por quilômetro quadrado.

Na PLANTA 5 (Figura 59, nos Anexos), observa-se áreas de influência de retenção de precipitações pela barragem. A soma destas áreas resulta em um total de 891622,16 m<sup>2</sup> (89,16 ha).

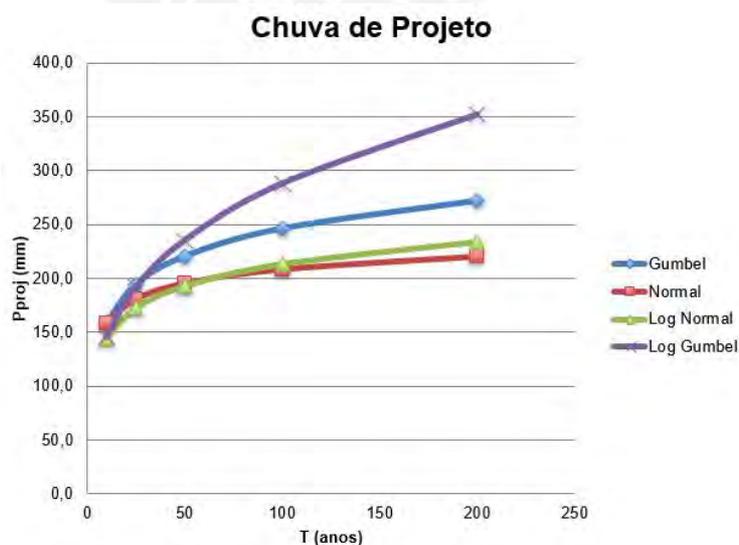
Na Tabela 6 e na Figura 28, são enumerados os resultados de chuva de projeto em função do período de retorno, para cada modelo de extrapolação.

**Tabela 6 - Chuva de projeto em função do período de retorno e modelo de extrapolação**

T	Probabilidade	P Normal	P Log Normal	Gumbel	Log Gumbel
10	10,00%	158,6	145,3	159,7	146,5
25	4,00%	180,9	172,7	194,8	192,5
50	2,00%	195,3	193,2	220,9	235,6
100	1,00%	208,2	213,6	246,7	288,1
200	0,50%	220,1	234,2	272,5	351,9

Elaborada pelos próprios autores

**Figura 28 - Chuva de projeto em função do período de retorno e modelo de extrapolação**



Elaborada pelos próprios autores

Este estudo hidrológico serviu no projeto para definir algumas das condições de contorno envolvidas durante a modelagem

### 3.4 Estudo geológico

A fundação da barragem a projetar apresenta a cota de 585 m e a crista da barragem do último alteamento tem a cota 635 m (50 m de altura). A fundação da barragem é um maciço de Rocha impermeável que apresenta uma profundidade suficiente de maneira que não permita percolação dos fluidos através desta. Pode-se observar o perfil geológico na Figura 29.

Figura 29 - Perfil geológico



Elaborada pelos próprios autores

Na Figura 30, observa-se as propriedades do material da fundação.

Figura 30 - Propriedades do material da Fundação

Name: Rocha (Fundação)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 27 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion': 15 kPa  
Phi': 50 °  
Phi-B: 0 °

Elaborada pelos próprios autores

### 3.5 Parâmetros e características do rejeito de minério de ferro

Para se fazer o projeto de uma barragem de rejeito, deve-se compreender as características do mesmo, pois estas influenciarão em uma série de fatores importantes relacionados à estabilidade e segurança da barragem. O minério de ferro foi escolhido como objetivo desse estudo porque tem o Brasil como um dos seus principais extratores. Aqui será apresentada uma série de dados relacionados a ele e algumas de suas características.

Os rejeitos associados à barragem de rejeito estudada nesse relatório se encontram na forma de polpa, caracterizada pela mistura solido-água e, portanto, passível de segregação. Há outras

maneiras que esses rejeitos podem se apresentar, mas estas não são tratadas nesse trabalho por não se tratarem do objetivo principal do mesmo.

O ferro (Fe) é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, ocupando a quarta posição, representa aproximadamente 5% e entre os metais, é o segundo mais abundante, perdendo apenas para o alumínio. Isto se deve ao fato de ele fazer parte de diversas classes minerais, sua concentração variando de menos de 1% a até 70%. É o metal mais utilizado atualmente, ocupando cerca de 95% de toda a produção mundial de metal. O que o torna indispensável é seu baixo custo e dureza, sendo amplamente utilizado na indústria automobilística por exemplo. (KAWA, 2015)

Após extraído, o minério de ferro deve passar por um processo de beneficiamento. O processo de beneficiamento do minério visa, principalmente, a separação dos minerais de ganga (sem valor econômico) dos minerais de minério (passíveis de exploração econômica). Alguns dos principais processos de beneficiamento são a fragmentação, classificação, concentração, amostragem. (FIGUINHA et al., 2011)

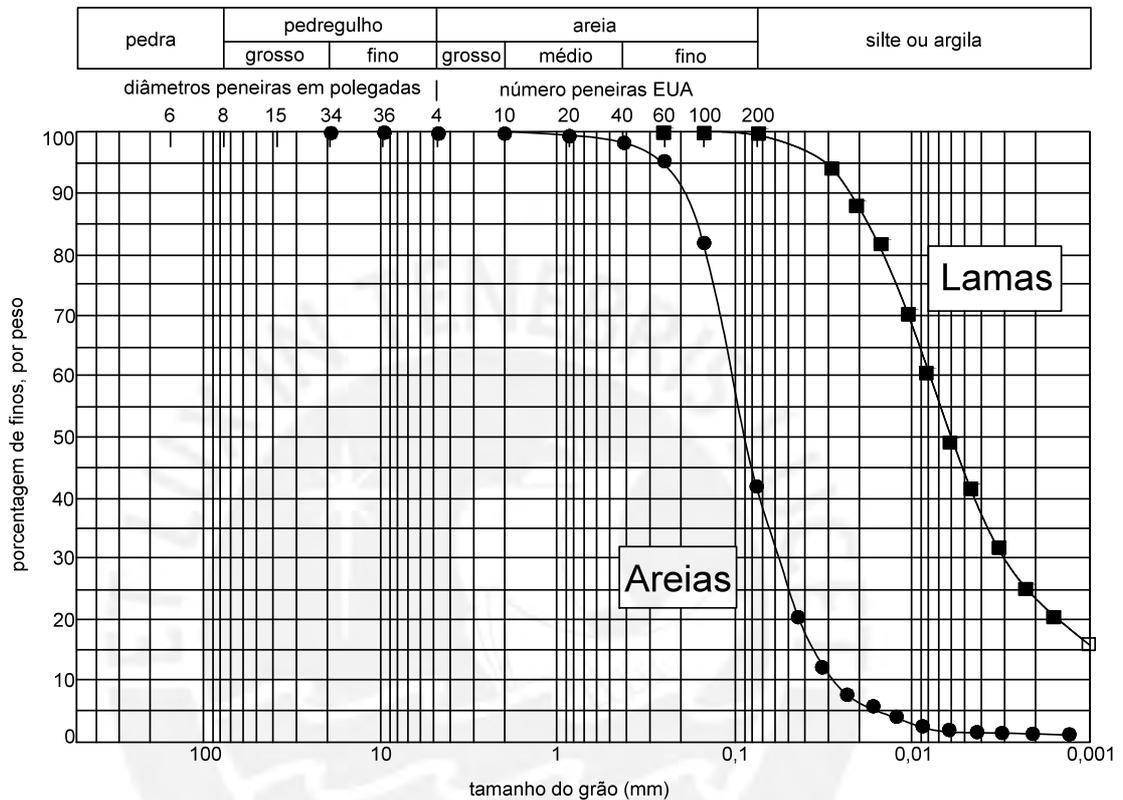
Para o minério de ferro, aproximadamente 40% do volume que passa pelos processos de lavra e beneficiamento acabam resultando em rejeito. Este rejeito e sua destinação são os objetos de estudo desse projeto. Como é de se esperar, as características do rejeito estão diretamente ligadas às características do mineral lavrado e ao processo de beneficiamento adotado. Algumas características relevantes do rejeito de minério de ferro são baixa deformabilidade e boas condições de drenagem e resistência. (KAWA, 2015)

O rejeito de minério de ferro tem dois componentes granulométricos: rejeitos finos e rejeitos granulares. É importante estudar as características de cada uma delas de forma separada, pois suas diferenças são determinantes na escolha de como cada um destes devem ser dispostos na barragem de maneira que se alcance a melhor estabilidade e segurança possível. Quando as duas parcelas ainda se encontram misturadas, quem controla as características geotécnicas, de uma maneira geral, é a parte granulométrica. No entanto, para este projeto trataremos cada uma delas separadamente, já que a ideia é separá-las através do processo de ciclonagem.

Para o projeto será adotado dados relacionados ao rejeito encontrado na barragem de fundão, esses dados foram obtidos no relatório relativo aos motivos que levaram ao rompimento da mesma, disponibilizado na internet. (MORGENSTERN et al., 2016)

As granulometrias dos dois materiais são comparadas na Figura 31, que mostra que o rejeito arenoso contém aproximadamente 40% de silte, enquanto o rejeito argiloso é composto quase que totalmente de partículas siltosas e argilas.

Figura 31 - Curva granulométrica comparando rejeito arenoso e argiloso



Morgenstern et al. (2016)

A concentração de minerais derivados do ferro no rejeito argiloso faz com que este tenha um peso específico de aproximadamente 4,0 o que o diferencia das areias mais leves. Algumas das propriedades de ambos os rejeitos são apresentadas na tabela a seguir.

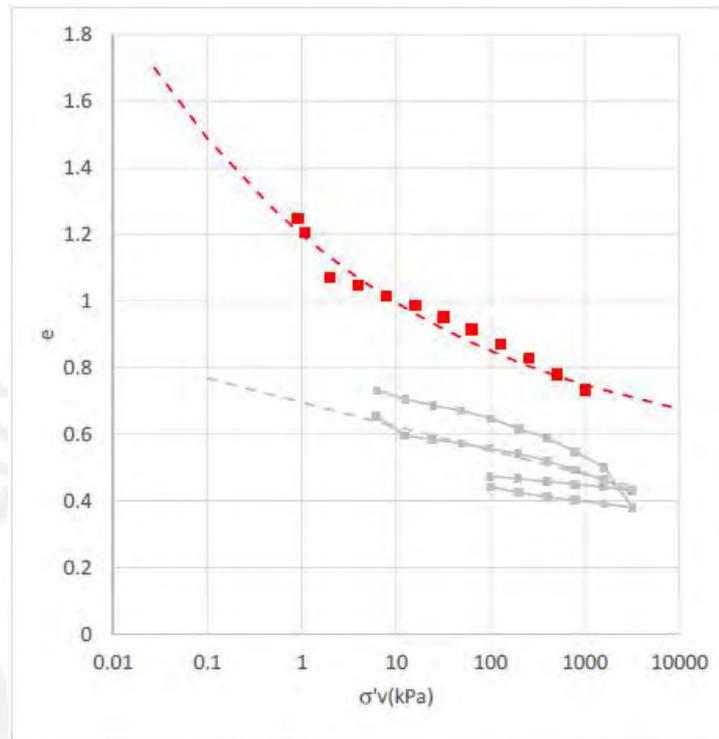
Tabela 7 - Propriedades típicas de rejeitos granulares e finos

Propriedade	Rejeito granular	Rejeito fino
Porcentagem menor 0,074 mm	40 - 45	98 - 100
Porcentagem menor 0,002 mm	< 2	20 - 25
Peso específico	2,8 - 2,9	3,9 - 4,0
Índice de plasticidade	Não plástico	7 - 11
Permeabilidade	$3 \times 10^{-4}$ cm/s	$< 10^{-6}$ cm/s

Morgenstern et al. (2016)

A principal característica que diferencia o rejeito argiloso do arenoso é a deformabilidade. A curva de compressão da Figura 32, a seguir, mostra que o primeiro é mais mole e compressível. A deformabilidade da argila é um fator importante a ser considerado, pois pode provocar a liquefação do rejeito arenoso.

**Figura 32 - Gráfico para comparação entre as curvas de deformabilidade do rejeito arenoso e argiloso. Em vermelho o rejeito fino e em cinza o granular**



Morgenstern et al (2016)

### 3.6 Lançamento e alteamentos

Como hipótese, adotamos que o rejeito será tratado por ciclonagem antes do lançamento, de maneira que possamos separar o material fino dos arenosos, e assim, controlar melhor o comportamento da barragem.

O rejeito de maior granulometria, arenoso, será lançado do topo dos alteamentos, enquanto o rejeito de menor granulometria, argiloso, será lançado por volta de 200 metros de distância do alteamento. Essa separação será feita para que seja possível controlar com maior eficiência as características de estabilidade e drenagem das diferentes camadas presentes na barragem, dessa maneira aumentando a segurança da mesma. Desta maneira, ao final de cada lançamento, não será necessário um período de espera para que o rejeito se consolide e o nível

d'água rebaixe, pois o próximo alteamento sempre será sobre material arenoso, cujo recalque por adensamento se dá simultaneamente ao elástico, imediatamente após a solicitação.

Com base em barragens existentes, elaboramos uma geometria inicial da seção transversal do barramento, e os seguintes alteamentos, e essa geometria poderá ser reavaliada conforme fazemos as simulações e progredimos no projeto da barragem.

Conforme topografia proposta, na PLANTA 3, podemos afirmar que se trata de uma área de aproximadamente  $17.500 \text{ m}^2$ , com um comprimento máximo de 650 m. Além disso, a nossa elevação máxima na seção onde estará a barragem é 60 metros. Assim, a capacidade de armazenamento que possuímos é de aproximadamente 1,5 milhões de metros cúbicos.

Ao comparar esses dados com as de outras barragens (Tabela 8), percebe-se que se trata de uma barragem pequena. A partir desta mesma tabela, podemos estimar uma vazão que a barragem receberá durante o seu funcionamento. obtém-se uma média de  $720 \text{ m}^3/\text{h}$ . Além disso, consideraremos que a barragem operará somente em dias úteis, e 12 horas por dia, o que resultará em uma vida útil de cerca de 5 anos. A seguir, são apresentados valores de barragens asiáticas divulgados pela Engineering (2016).

**Tabela 8 - Vazão de disposição de rejeitos em barragens asiáticas**

Nome	Vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Comprimento máximo (km)	Altura (m)
Koktauksky Mining Complex	326	4	15
The Kuranakhsкая Gold Recovery Plant	1200	8,3	52
"Blagodatnoye" Deposit Operation	745	3	25
Zhezkazgan Plant Cell I	14000	9	60
Zhezkazgan Plant Cell II	14000	10	15
Kostomuksha Mining Complex Plant	50000	15	35
Nurkazgansky Mining Complex	670	2	15
Olenegorsky Mining Complex	17450	10	50
Kolskaya Mine-and-Mill Company Plant	4500	7	45
Satpayevskaya Plant	2500	5	30
Tyrnyauzsky Tungsten-molybdenum Mining Complex Plant	4000	12	170
Almalyksky Mine-and-Mill Complex Plant	12500	15	60
Severalmaz Plant	500	15	2,3
Production Amalgamation Erdenet Plant	12500	15	60

Mekhanobr Engineering

### **3.7 Análise da estabilidade e percolação**

A análise da estabilidade do talude será feita, concomitantemente com a análise do fluxo de água, conforme redefinimos as características do barramento. Usaremos o programa GeoStudio, que utiliza o Método do Equilíbrio Limite de Bishop para modelar o a barragem e o faremos de maneira que considere os diversos estágios da vida útil do projeto:

- Dique Inicial;
- Preenchimento do primeiro volume, dado pelo dique inicial;
- Repete-se essas simulações para os seguintes alteamentos, até o preenchimento do volume dado pelo último alteamento, que será o fim da vida útil do projeto.

### **3.8 Modelagem do projeto da barragem**

Nesta parte do trabalho, serão apresentados os resultados parciais e finais do desenvolvimento do desenho de projeto e comportamento do rejeito e dos diques. A estabilidade de talude, deformações, e a análise de percolação serão o foco da análise computacional. É importante mencionar que a modelagem foi realizada nos pacotes de software SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W do GeoStudio 2012.

No caso da análise de estabilidade utilizou-se o pacote SLOPE/W, que utiliza o método de equilíbrio-limite, optando-se pelo método de Bishop.

Em relação à análise de percolação, utilizou-se o pacote SEEP/W, que realiza a análise através da lei de Darcy em elementos finitos.

Em relação à análise de deformação, utilizou-se o pacote SIGMA/W que realiza a análise através de elementos finitos.

A análise, por sua vez, foi dividida nas três partes apresentadas a seguir, com a finalidade de garantir o bom comportamento e desenho tanto da estabilidade quanto do fluxo.

- Dique Inicial
- Dique secundários (alteamentos)
- Sistema dique inicial + diques secundários + rejeito

Na Tabela 9, pode-se observar o resumo das propriedades dos materiais utilizados na modelagem.

**Tabela 9 - Características e propriedades dos materiais**

	Material arenoso	Material argiloso	Enrocamento
Peso específico(kN/m <sup>3</sup> )	17	16	20
Coesão (kPa)	0	0	0
Ângulo de atrito efetivo (°)	35	25	34
Phi b (°)	0	0	0
Permeabilidade horz. (m/dias)	1,0 *10 <sup>-5</sup>	1,0*10 <sup>-7</sup>	0,5
Permeabilidade Vertical (m/dias)	1,0 *10 <sup>-5</sup>	1,0*10 <sup>-7</sup>	0,5
Modulo elasticidade efetivo E' (kPa)	30000	10000	30000
Coefficiente de Poisson	0,334	0,334	0,334

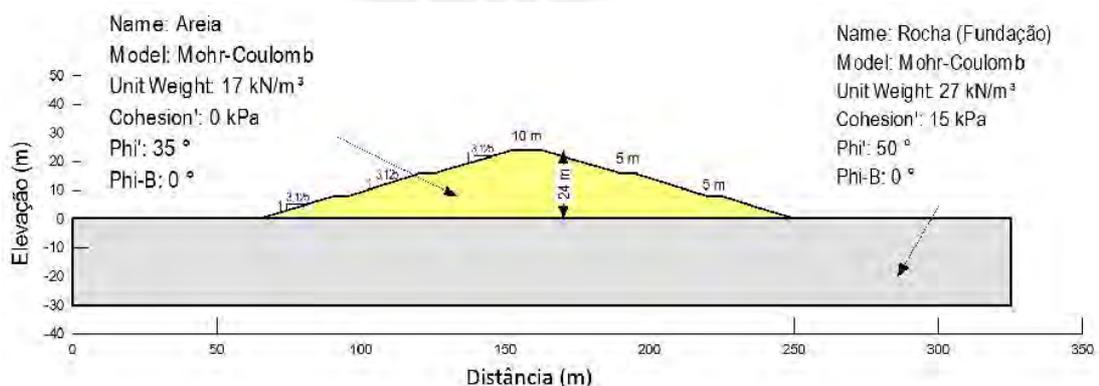
Elaborada pelos próprios autores

### 3.8.1 Dique inicial

Na Figura 33, pode-se observar a geometria da primeira tentativa de desenho do dique inicial e algumas propriedades do material. O mesmo ocorre para a fundação.

O dique inicial é constituído de areia, apresentada no desenho de cor amarela. O dique apresenta uma altura total de 24 metros e tanto para a face de montante quanto para a face de jusante existem 3 taludes com inclinação de 1:3,125 (V:H) e também foram consideradas duas bermas de 5m cada, para apoiar o processo de monitoramento no processo de construção e operação do dique.

**Figura 33 - Primeira tentativa do desenho do Dique Inicial**



Elaborada pelos próprios autores

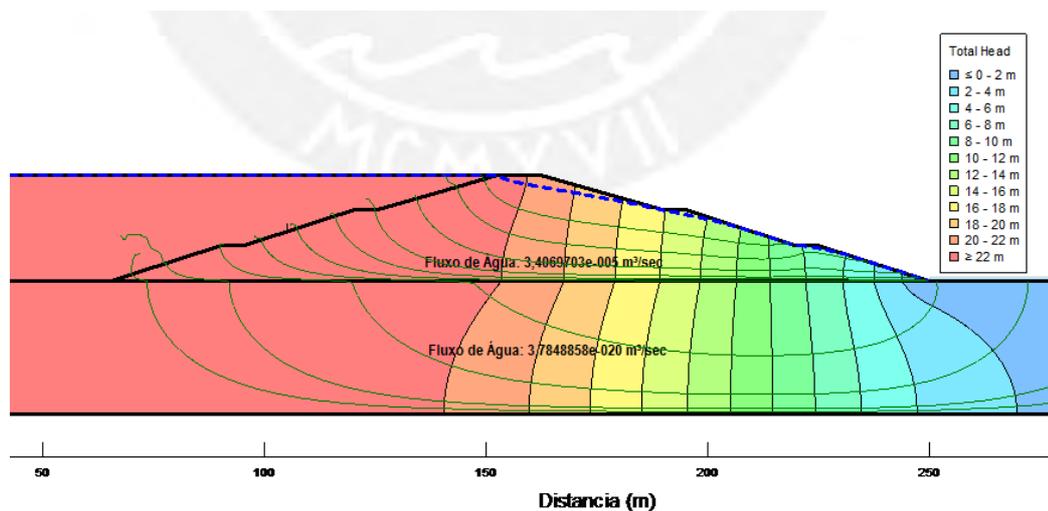
Como foi mencionado neste trabalho em seções anteriores, a localização da linha freática é de vital importância, pois é ela que vai definir o desenvolvimento da pressão neutra, que afeta diretamente a estabilidade do dique. Portanto, a função drenante do dique Inicial é fundamental para garantir a estabilidade do barramento como um todo.

Deste modo, seguindo a geometria do dique inicial anteriormente apresentado, modelou-se o fluxo de água que vem com o rejeito por se tratar de um lançamento hidráulico. Assim, na Figura 34, simula-se o rejeito lançado até a cota máxima admitida para o dique inicial (situação crítica). Também pode-se observar as equipotenciais e as linhas de fluxo.

Como o rejeito a ser lançado nesta barragem é ciclonado, o rejeito arenoso obtido ficará perto da barragem e o rejeito argiloso será lançado 200m a montante a partir do dique inicial. Neste caso, tem-se como hipóteses que as propriedades do dique inicial são iguais às do rejeito arenoso, por ser utilizado o mesmo material. No entanto, é importante reconhecer que, na obra real, o dique inicial pode apresentar características diferentes graças à utilização de outro material ou por influência do processo construtivo, por exemplo a compactação.

O mais importante a mencionar é a que o fluxo da água está ocupando toda a seção da barragem implicando na geração da pressão d'água positiva (diminuição das tensões efetivas) e esta situação é inviável devido ao problema de infiltração pelo talude para montante.

**Figura 34 - Análise de fluxo no momento de lançamento na cota máxima de rejeito arenoso admitida para o dique inicial**

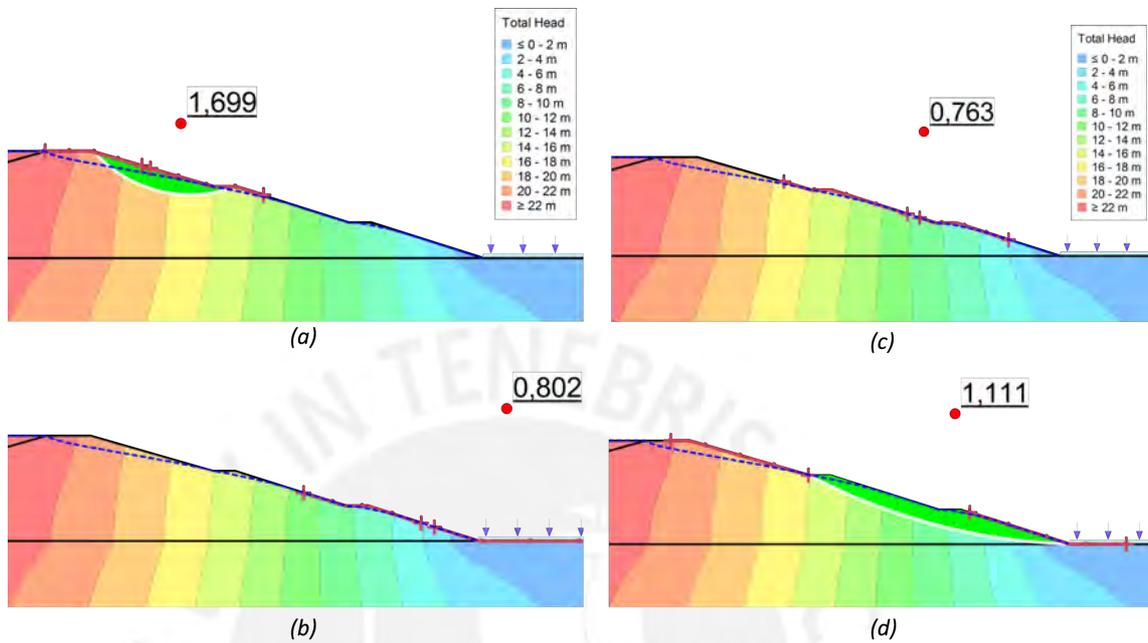


Elaborada pelos próprios autores

Para se ter conhecimento dos fatores de segurança, na Figura 35, pode-se observar os fatores de segurança tanto locais como o global do dique inicial sob a influência das pressões d'água

geradas pela localização da superfície freática. Em alguns dos casos o valor é menor que 1, representando o colapso do talude.

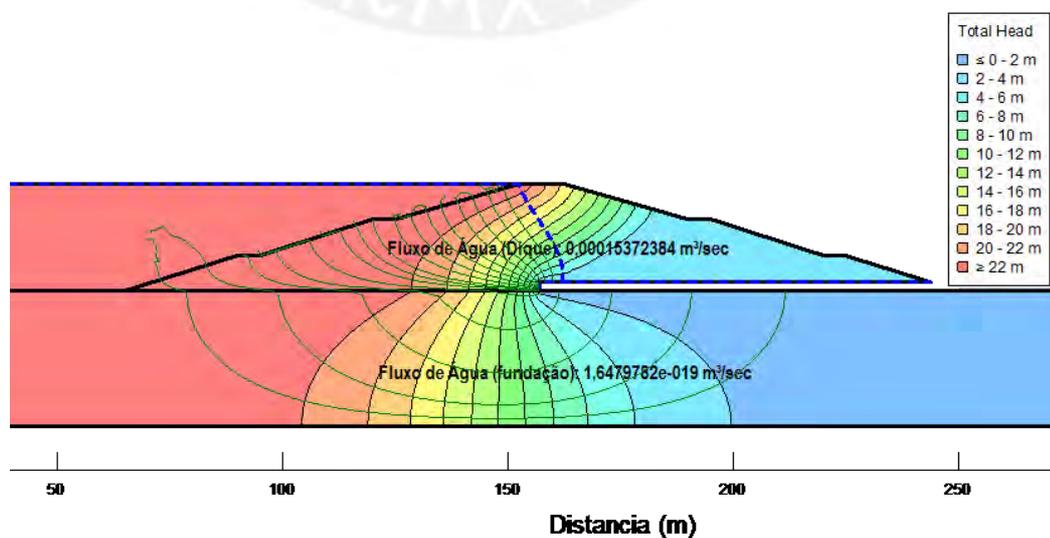
**Figura 35 - Fatores de Segurança (F.S.) pelo método Bishop dos taludes da barragem: (a) F.S. local do talude superior, (b) F.S. local do talude inferior, (c) F.S. local do talude intermediário, (d) F.S. global**



Elaborada pelos próprios autores

Na procura de uma alternativa para realocar a superfície freática, optou-se pela instalação de um tapete drenante de enrocamento de 2 metros de espessura, localizado na base do dique Inicial como evidenciado na Figura 36.

**Figura 36 - Análise de fluxo na condição crítica do dique inicial com a instalação de um tapete drenante de enrocamento**



Elaborada pelos próprios autores

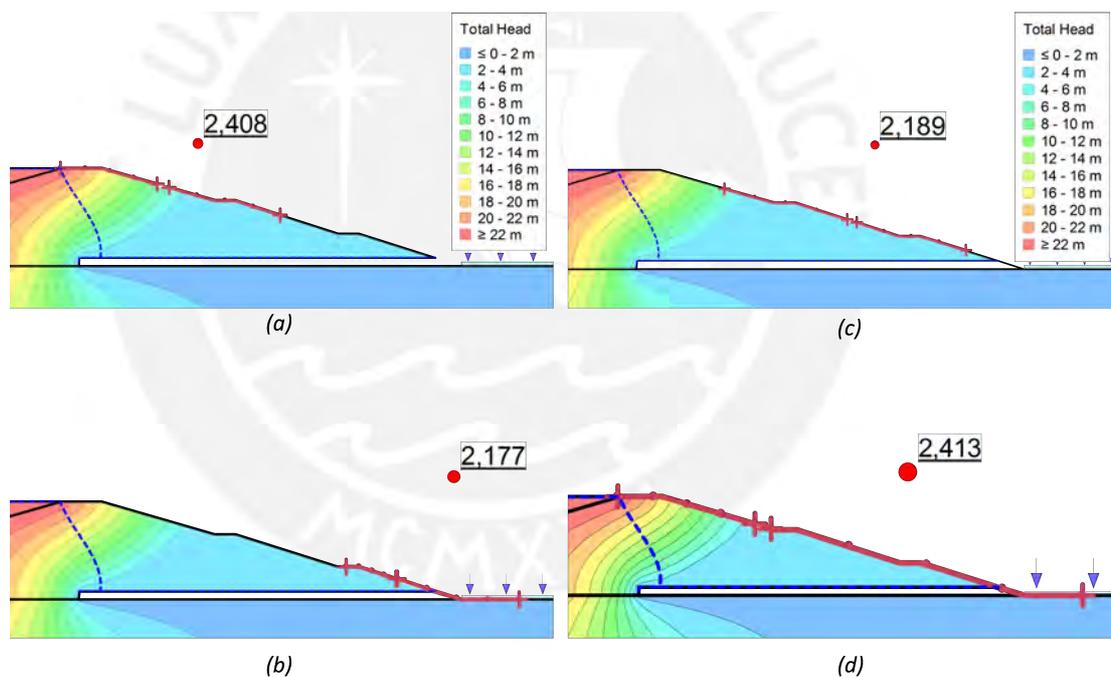
É importante mencionar que as pressões da água negativa (sucção), geradas em pontos acima da superfície freática, serão desconsideradas na análise de resistência, uma vez que foi admitido um valor de  $\phi^b=0$  como valor de entrada nas propriedades do material.

Equação da resistência de acordo com o critério de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$$

Em relação à análise da estabilidade, com efeito do tapete drenante, esta é obviamente favorecida devido ao rebaixamento da superfície freática e também à distância do talude. Na Figura 37, observa-se os resultados da análise local e global.

Figura 37 - Fatores de segurança (F.S.) pelo método Bishop dos taludes da barragem: (a) F.S. local do talude superior, (b) F.S. local do talude inferior, (c) F.S. local do talude intermediário, (d) F.S. global

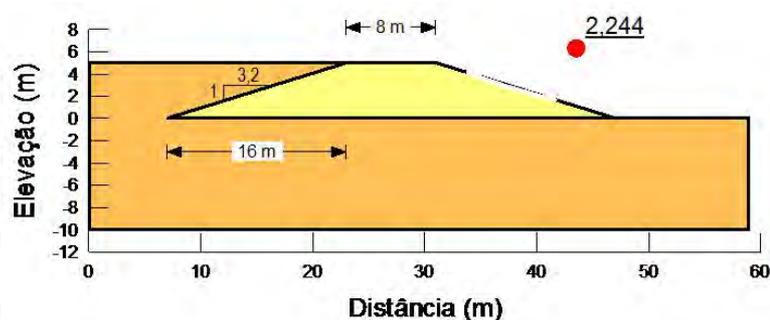


Elaborada pelos próprios autores

### 3.8.2 Diques secundários (alteamentos)

O dique inicial terá uma capacidade de armazenamento e chegará a seu fim quando o rejeito atingir a cota máxima estabelecida. Portanto, neste caso se utilizarão 6 diques secundários construídos para montante. Cada dique apresentará 5 metros de altura e serão de areia do mesmo material que do dique principal. Na Figura 38, mostra-se a análise do fator de segurança sem a presença de água, isto porque, para se avaliar a estabilidade com presença de água, precisa-se avaliar o sistema completo, uma vez que neste caso, diferentemente do dique inicial, a fundação é de areia (material ciclonado).

Figura 38 - Análise da estabilidade do talude do dique secundário mediante o método de Bishop



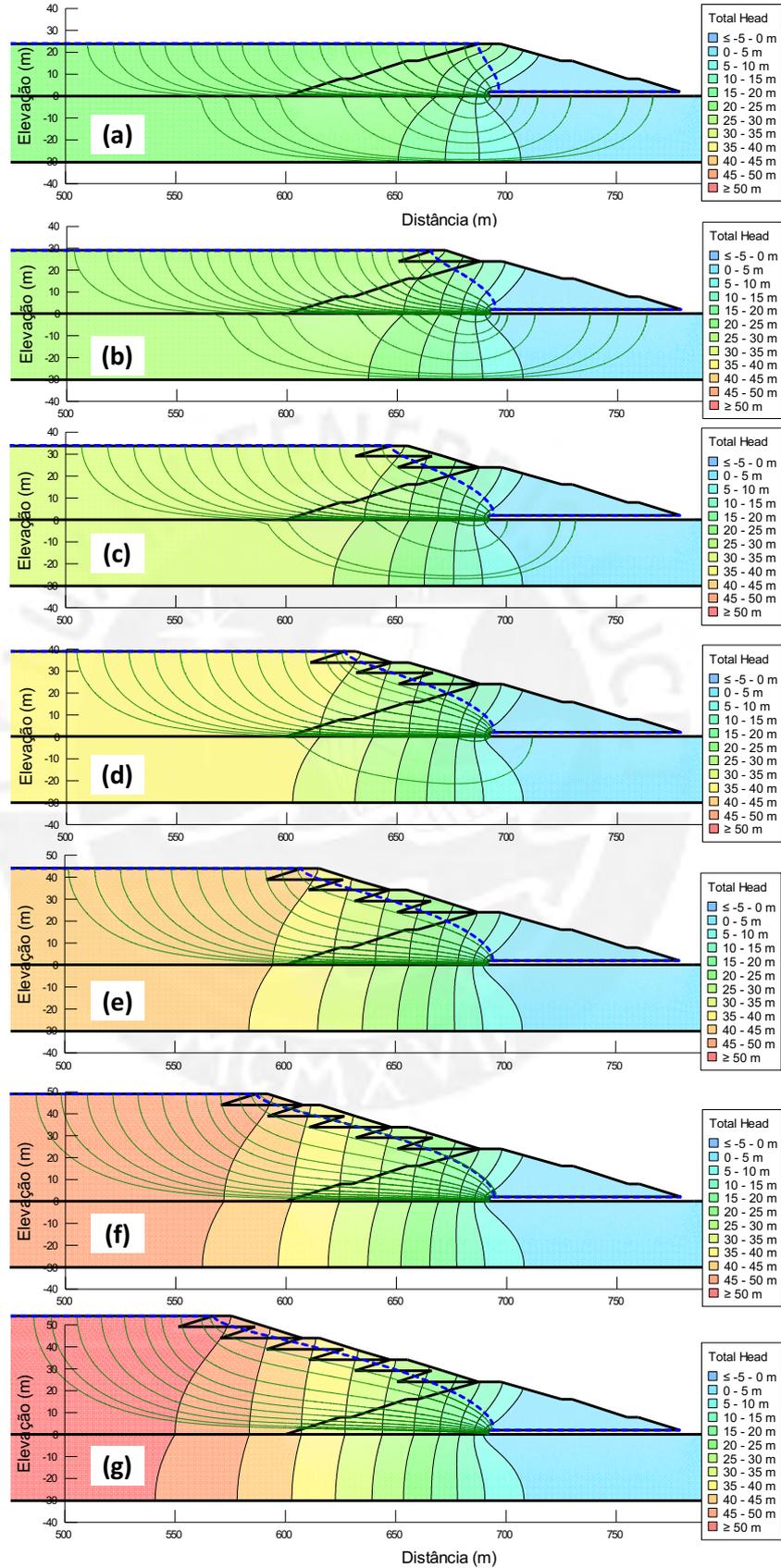
### 3.8.3 Sistema dique inicial + diques secundários + rejeito

A análise de fluxo do sistema, foi modelada em 7 etapas críticas para avaliar seu comportamento e como ele pode influenciar na estabilidade global.

A etapa crítica é considerada, neste trabalho, como a condição onde apresenta-se o volume de rejeito + água na cota máxima permitida para cada alteamento (lançamento hidráulico e chuva), e o motivo é que essa situação apresenta a superfície freática mais alta para o alteamento, gerando também as máximas pressões d'água, sendo a situação menos favorável.

Na Figura 39, são apresentadas as 7 etapas críticas seguindo a ordem que ocorrerá durante o processo de operação desde o dique inicial até o último alteamento. A figura ilustra as linhas de fluxo e a variação da carga total na mesma escala, sendo útil para a comparação.

**Figura 39 - Análise de fluxo d'água seguindo a ordem de operação do sistema, indicando as cargas totais e as linhas de fluxo nas etapas críticas: (a) dique inicial, (b) primeiro alteamento, (c) segundo alteamento, (d) terceiro alteamento, (e) quarto alteamento, (f) quinto alteamento, (g) sexto alteamento**

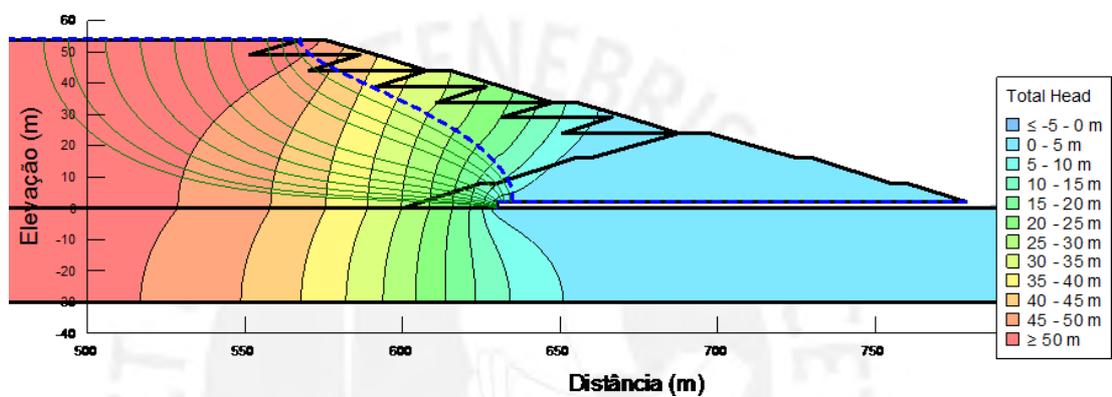


Elaborada pelos próprios autores

Como pode se observar na Figura 39, a superfície freática está muito perto do taludes dos alteamentos para montante representando um possível problema de infiltração lateral. Pode-se inferir, assim, que deve-se melhorar a permeabilidade do dique inicial para rebaixar a superfície freática.

Como solução, optou-se por aumentar o comprimento do tapete drenante garantindo, assim, o rebaixamento da superfície freática. Na Figura 40, pode-se observar sua nova localização para o último alteamento.

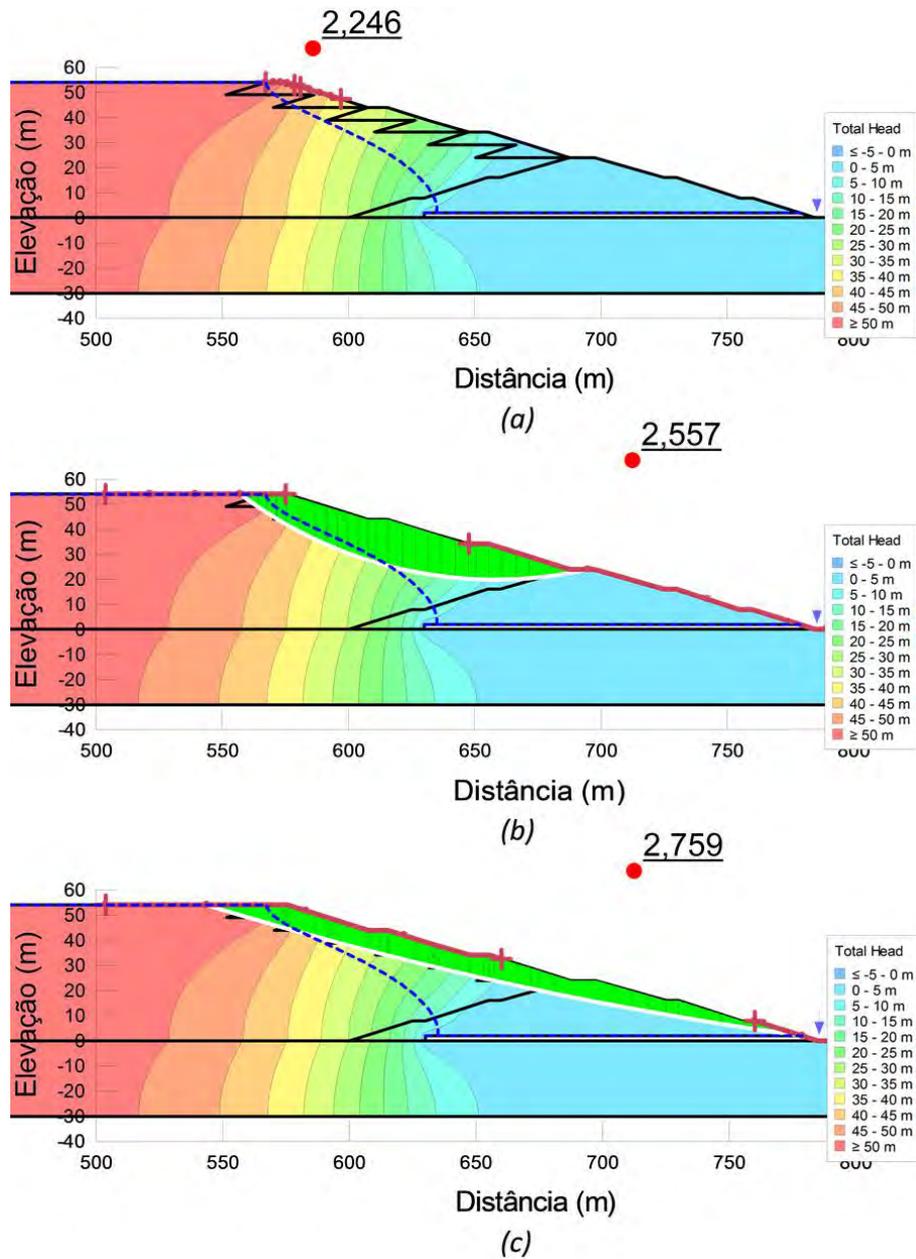
**Figura 40 - Análise de fluxo d'água em ordem de operação do sistema indicando as cargas totais e as linhas de fluxo para a situação crítica do último alteamento (sexto)**



Elaborada pelos próprios autores

Em relação à estabilidade com a modificação do comprimento do tapete drenante, a análise do fator de segurança local do dique secundário é 2,246. O fator de segurança global, por sua vez, resultou em um valor de 2,557. Na Figura 41, observa-se os resultados da estabilidade local e global para a condição crítica do último alteamento.

Figura 41 - Análise de estabilidade do talude: (a) F.S. local do dique secundário, (b) F.S. global superior, (c) F.S. global inferior



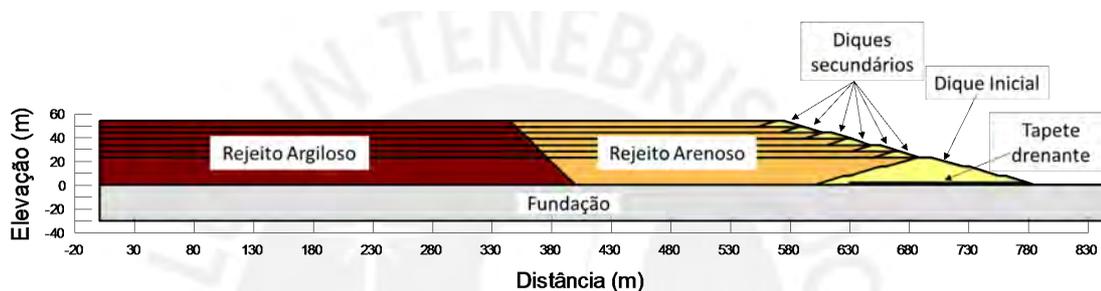
Elaborada pelos próprios autores

Como foi observado na Figura 41, os fatores de segurança estão acima do mínimo ( $F.S.=1,5$ ), o que poderia levar a pensar em modificar a geometria dos dique para obter valores próximos e superiores a 1,5, obtendo-se, assim, uma seção de barragem com menor quantidade de material a utilizar (mais económico). No entanto, isso não será possível (diminuição da geometria) em todos os casos devido à questão do fluxo (superfície freática). Por exemplo, no caso dos dique secundários, a diminuição do comprimento de base da barragem contribui para que a superfície freática fique mais próxima ao talude, sendo isso contra a segurança. Já no

dique inicial, uma diminuição na geometria de jusante para utilizar menos material pode ser considerada, uma vez que a superfície freática está relativamente distante do talude.

Portanto, como foi mencionado anteriormente, o rejeito será ciclonado de maneira a separar e lançar este material em pontos diferentes, ficando o material arenoso perto da barragem e o material argiloso do lado oposto. O principal motivo é o aproveitamento do mesmo material para realizar os dique e os alteamento com características drenantes para o controle da superfície freática (areia). Na Figura 42, são apresentadas as seções do dique inicial, diques secundários, tapete drenante e rejeito lançado na etapa final da operação das barragens.

**Figura 42 - Seção dos dique inicial e secundários na fase final da operação das barragens**



Elaborada pelos próprios autores

### 3.8.4 Pressão da água e deformações

As deformações dos materiais originam-se por causa das cargas do rejeito e das barragens dos alteamentos seguintes. Neste projeto, tanto o material que compõe a barragem quanto o rejeito próximo ao dique, é areia; sendo assim um material que favorece a dissipação do excesso de pressão d'água. No entanto, é importante analisar esses efeitos.

Portanto, a seguir, será estudado esse comportamento tanto do rejeito (material fino e areia), quanto da barragem.

Em relação ao processo construtivo em geral, os diques são construídos por camadas, significando que durante a construção ocorrem algumas deformações, no entanto, são construídos de maneira que no final atinjam a cota de projeto. Da mesma maneira, o rejeito deve atingir a cota máxima permitida antes da construção do próximo dique.

Para compreender melhor como se comportaria o rejeito perto da barragem (areia) e os efeitos sobre ele, realizou-se uma modelagem utilizando o pacote SIGMA/W.

A modelagem consiste em realizar lançamentos de rejeito por etapas sobre uma situação inicial simulando a operação da barragem. Nesta modelagem utilizasse a opção de sistema acoplado de tensões efetivas com pressão d'água. A finalidade são conhecer os recalque, bem como as pressões d'água e a dissipação destas.

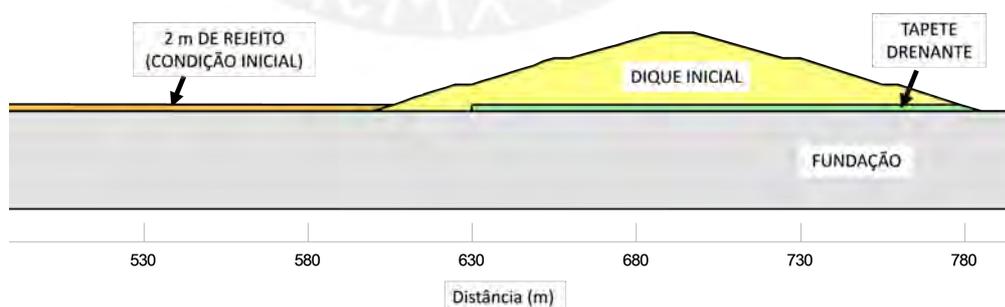
Para realizar uma análise de deformações, precisa-se conhecer o coeficiente de compressibilidade volumétrica ( $m_v$ ). No software utilizado é possível inserir o valor, no entanto, ele também pode ser calculado da seguinte maneira:

- Quando a relação de Poisson ( $\nu$ ) é 0,334,  $m_v=1/E$  (método utilizado nesta modelagem)

Condições da modelagem (pressão d'água e deformações):

- O rejeito será lançado (2 m por vez) instantaneamente, e posteriormente a isso, analisa-se o desenvolvimento de pressão de água e deformações por um período de 60 dias. Portanto, o lançamento de rejeito vai ter uma velocidade média de 9m/ano para 252 dias úteis por ano. Sendo, no total, um tempo de vida de aproximadamente 6 anos;
- Para cada nova camada de rejeito adicionada, o nível d'água também se elevará na mesma cota que o material, para que se adote os resultados do conjunto de pressões para aquela cota de lançamento de rejeito;
- Como situação inicial (Figura 43), considera-se o dique inicial construído e 2m de rejeito. A partir dele serão acrescentados cada 2 metros até a cota final (54m).

Figura 43 - Condição inicial da modelagem

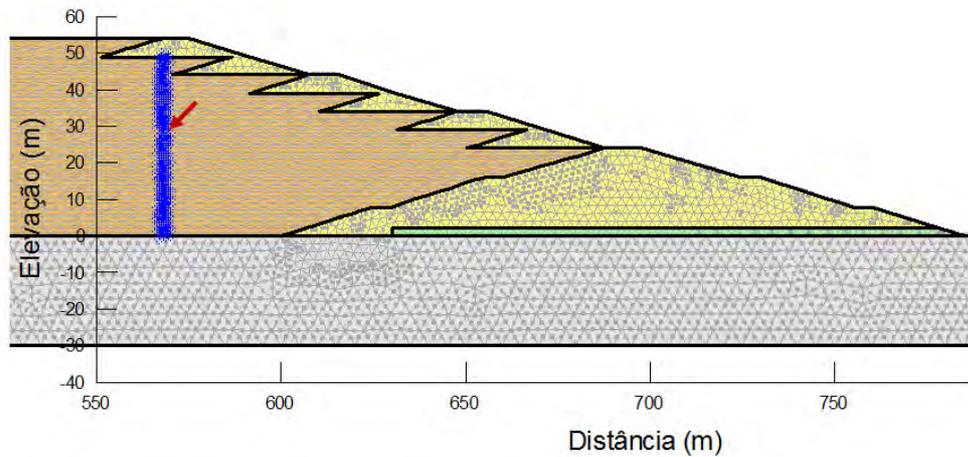


Elaborada pelos próprios autores

É importante mencionar que os resultados que serão apresentados a seguir, referem-se a uma seção vertical abaixo do último alteamento, indicada na Figura 44. A escolha destes pontos foi devida ao fato de que pretendesse estudar o comportamento do solo que servirá como fundação do alteamentos, portanto o solo que se encontra em cotas menores vão suportar a

pressões de água máximas já que a superfície freática atinge o valor mais alto. Serão obtidos não somente os resultados de recalque, mas também valores de pressão da água.

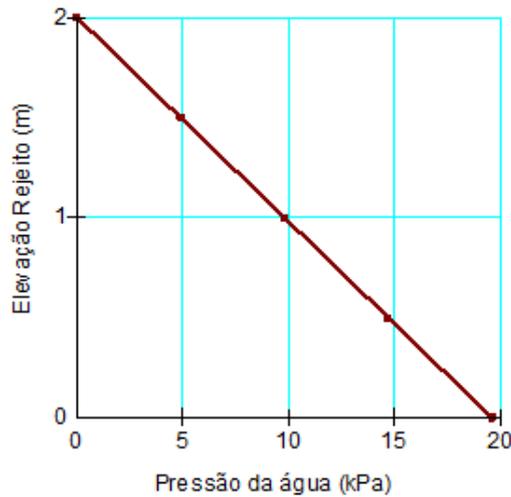
**Figura 44 - Localização dos pontos da malha de elementos finitos a serem analisados**



Elaborada pelos próprios autores

A condição inicial da modelagem consiste em uma camada de 2m de rejeito e o dique inicial, onde o valor da pressão da água é 19,6 kPa na cota 0m (base) e de 0 kPa (cota 2m) como se observa na Figura 45.

**Figura 45 - Pressão d'água ao longo da camada de rejeito arenoso até 2m (condição inicial da modelagem)**

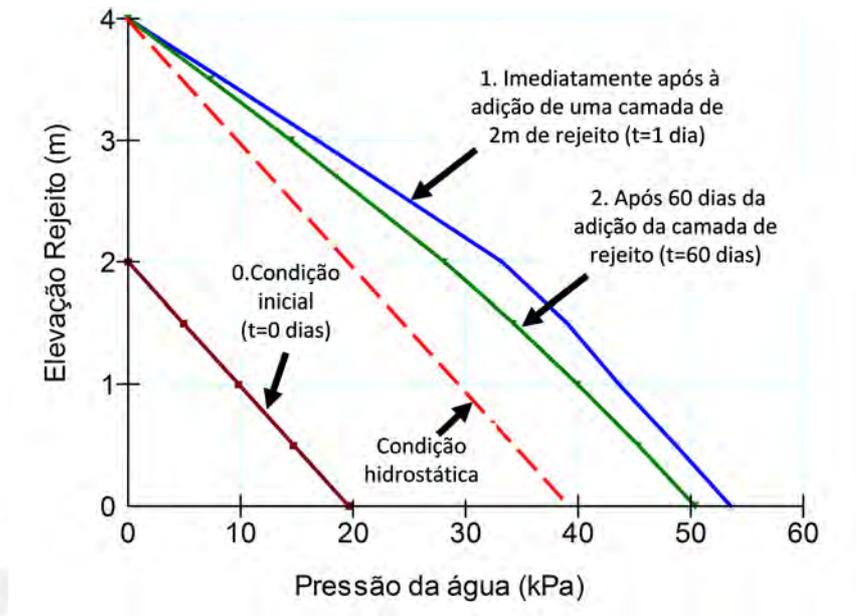


Elaborada pelos próprios autores

Na Figura 46, pode-se observar a pressão d'água ao longo das camadas de rejeito sendo indicada a pressão d'água na condição inicial (t=0 dias). Posteriormente, é lançada uma camada de 2m (em t=1 dia) e pode-se observar que, por exemplo, na base houve um incremento de pressão d'água de 34 kPa ( rejeito=17kPa, atingindo assim um valor de 53,6

kPa. Após 60 dias do lançamento, na base, a pressão d'água é de 50,4 kPa. Sabe-se que a pressão d'água, na base (cota 0m), na situação após dissipação, deveria de ser 39,2 kPa (condição hidrostática). Porém, neste caso, após 60 dias ainda há um excesso de 11,2 kPa.

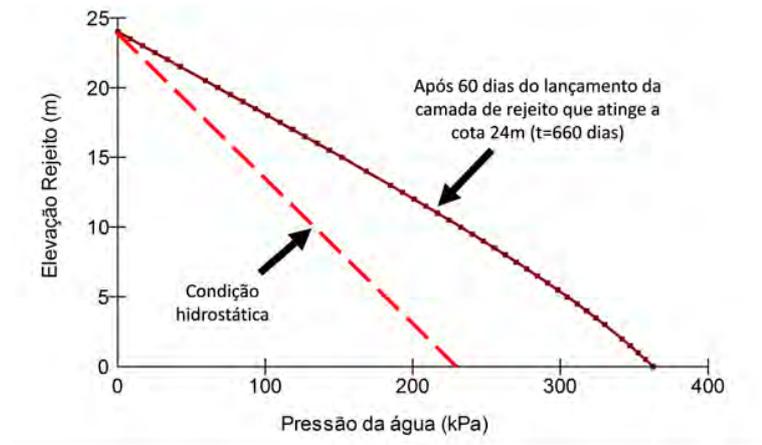
Figura 46 - Dissipação da pressão d'água ao longo da camada de rejeito arenoso até 4m (desde t=0 até t=60 dias)



Elaborada pelos próprios autores

Uma das cotas importantes do projeto é a de 24 metros, por ser a cota máxima do dique inicial. Portanto será um ponto de referência para a análise dos resultados. Na Figura 47, são apresentados os resultados da pressão d'água após 60 dias do lançamento da última camada de rejeito possível para o dique inicial (até a cota de 24m). Pode-se observar que o máximo excesso de pressão da água é na base, com valor de 127,3 kPa.

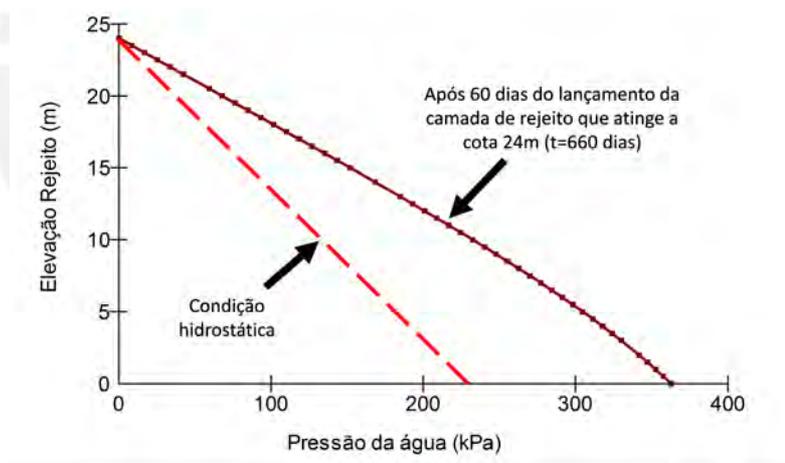
Figura 47 - Pressão d'água ao longo da elevação de rejeito arenoso após o lançamento até a cota 24 m (volume de armazenamento do dique inicial esgotado)



Elaborada pelos próprios autores

Continuando com os seguintes lançamentos de rejeito (até a cota 48m), a análise da pressão d'água indica que na base (cota 0m) há um excesso de 273 kPa. (Figura 48)

Figura 48 - Pressão d'água ao longo da elevação de rejeito após 60 dias do lançamento de rejeito arenoso até a cota 48 m (fundação do último alteamento)



Elaborada pelos próprios autores

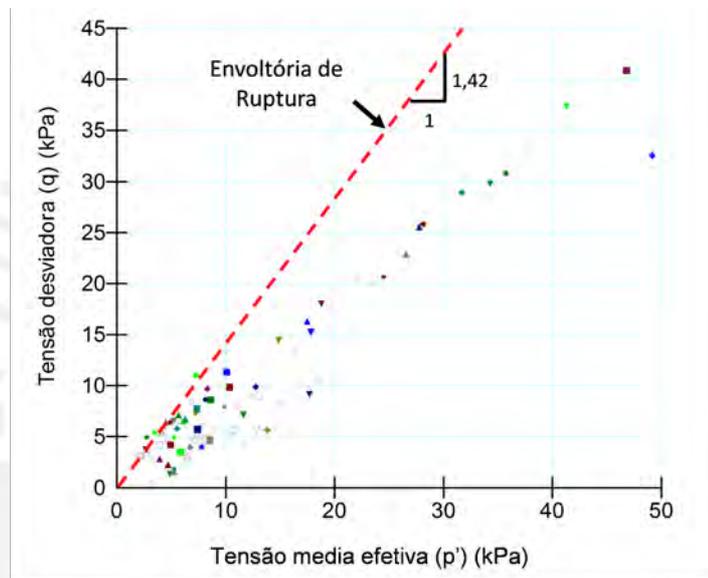
Sabe-se que a cota final de rejeito a ser armazenado na barragem atinge a cota de 54m, gerando na base um excesso de pressão d'água de 294 kPa. É importante mencionar que tem-se um maior grau de dissipação da pressão d'água na base e isso é devido ao fato de que os pontos em análise encontram-se relativamente perto do tapete drenante.

Analizando o comportamento do solo em termos de resistência, pode-se observar na Figura 49 o gráfico tensão desviadora ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) x tensão média efetiva ( $p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ ). Onde é

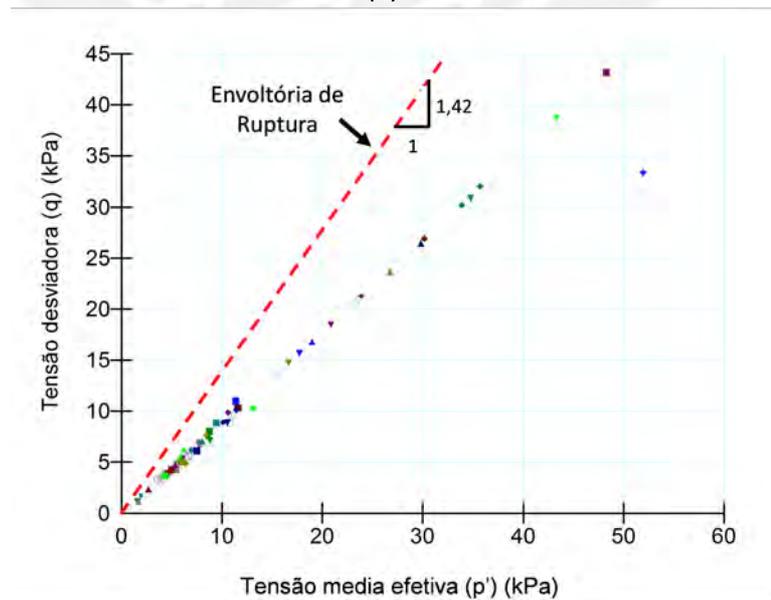
indicado o estado de tensões de cada um dos pontos em análise (pontos abaixo do último alteamento), sendo também indicada a envoltória de resistência do rejeito arenoso.

Na Figura 49(a), imediatamente após o lançamento da última cada de rejeito (cota 54m), pode-se perceber que a maioria dos pontos em análise do solo estão afastados da envoltória, porém existem alguns que estão muito próximos da envoltória ou que já plastificaram. Após 60 dias, alguma parte do excesso de pressão d'água foi dissipado, sendo afastadas as tensões da envoltória de ruptura (Figura 49(b)).

**Figura 49 - Estado de tensões ( $q - p'$ ) dos pontos em análise: (a) imediatamente após a aplicação da última camada de rejeito arenoso (até cota 54m); (b) após 60 dias da aplicação do item (a)**



(a)

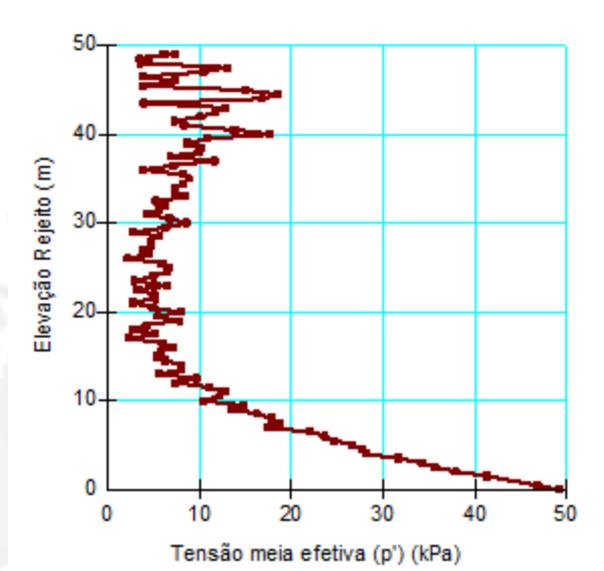


(b)

Elaborada pelos próprios autores

Os pontos que apresentam tensões médias efetivas ( $p'$ ) entre a faixa de 0 e 10 kPa são os que ficam muito próximos da envoltória de ruptura. Na Figura 50, é mostrada a variação da tensão media efetiva ( $p'$ ) ao longo da elevação do rejeito. Conclui-se que os pontos perto da envoltória de ruptura são os pertencentes à maior parte do rejeito (entre as cotas 12m e 48m). O rejeito abaixo da cota 10m, apesar de ter o maior excesso de pressão de água, encontra-se afastado da envoltória de ruptura.

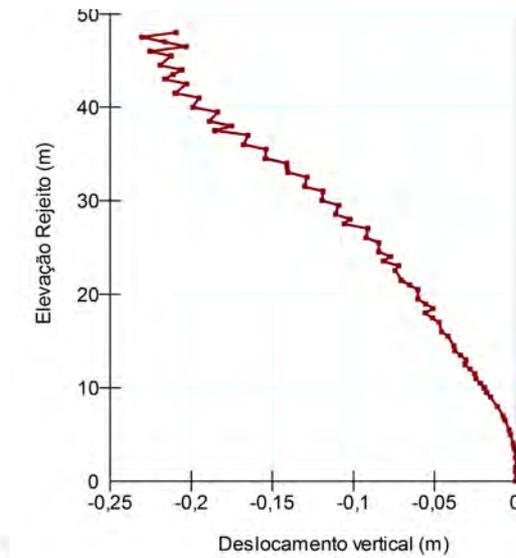
**Figura 50 - Tensão média efetiva imediatamente após o lançamento até a cota 54m (última camada de rejeito) ao longo da elevação do rejeito arenoso**



Elaborada pelos próprios autores

Os recalques do rejeito encontram-se relacionados ao processo de lançamento, devido ao fato de que o rejeito é disposto hidraulicamente de maneira a se acumular por camadas, significando que durante o lançamento surgem algumas deformações, no entanto, no final, deve ser atingida a cota estabelecida antes da construção do próximo dique. Assim, é importante ver o recalque nas cotas finais do rejeito. Na Figura 51, é mostrado o deslocamento vertical após 60 dias do lançamento até a cota 48m.

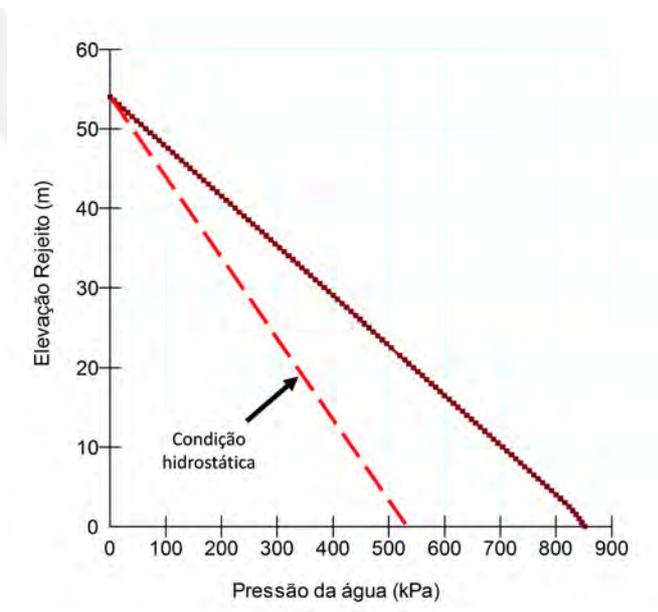
**Figura 51 - Descolamento vertical ao longo da elevação do rejeito arenoso após 60 dias do lançamento até a cota 48m**



Elaborada pelos próprios autores

As análises anteriores foram relacionadas ao rejeito arenoso que fica perto dos diques. Agora, se avaliará o comportamento do rejeito argiloso. Na Figura 52, observa-se a pressão da água ao longo da elevação do rejeito argiloso até a cota 54m, nota-se que o máximo excesso de pressão d'água ocorre na base com um valor de 321 kPa.

**Figura 52 - Pressão d'água ao longo da elevação do rejeito argiloso após o lançamento até a cota 54 m (final da vida útil da barragem)**

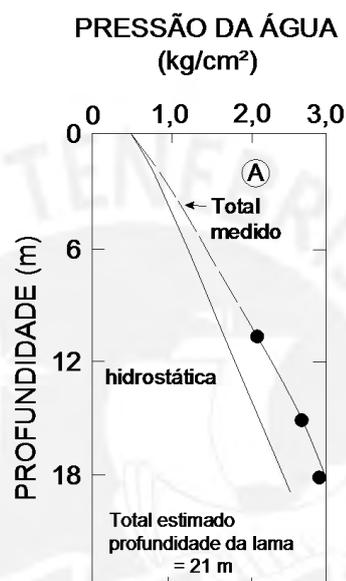


Elaborada pelos próprios autores

É importante mencionar que a dissipação do excesso de pressão d'água é lenta, quase nula para um curto espaço de tempo, em comparação com o rejeito arenoso.

Na literatura, Mittal e Morgenstern (1976) apresentam o gráfico da Figura 53, que mostra a pressão da água medida em campo em função da profundidade no rejeito fino, onde, para uma profundidade de 18m, tem-se  $3 \text{ kgf/cm}^2$  (294,2 kPa). No caso da modelagem, para a mesma profundidade de 18m desde o topo o rejeito, tem-se uma cota correspondente de 36m. Portanto nessa elevação o valor da pressão d'água é de 288,3 kPa.

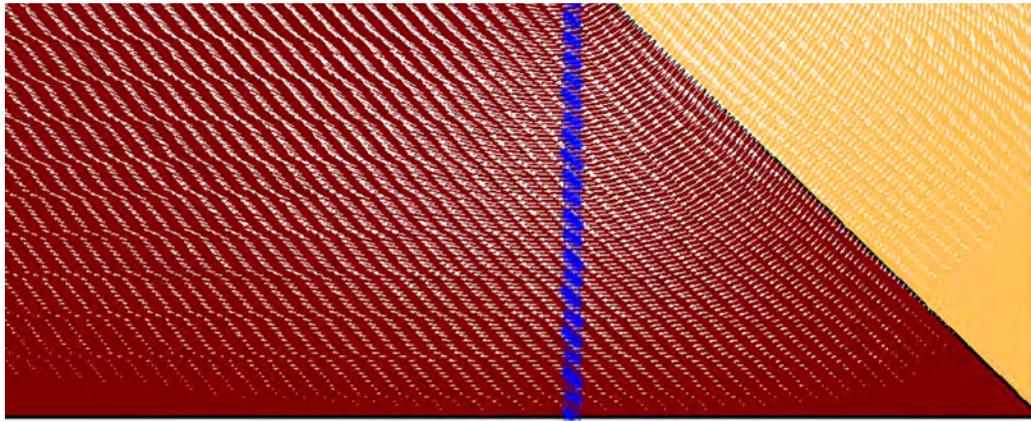
Figura 53 - Resultados da pressão d'água da lagoa de rejeito da barragem Brenda (Canadá)



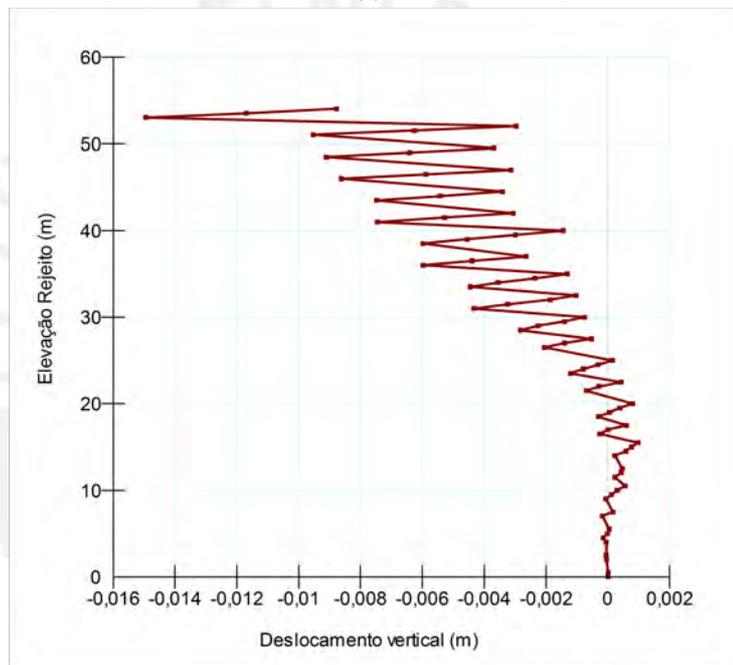
Hari & Morgenstern (1976)

Em relação aos deslocamentos verticais do rejeito argiloso, pegou-se os resultados dos pontos perto da interface rejeito argiloso e arenoso (Figura 54(a)). Na Figura 54(b), observa-se que o deslocamento vertical é positivo ou negativo (desce ou sobe) e isto é devido à interação entre os dois tipos de solo. No entanto, o valor máximo de recalque é de 1,5 cm, considerado baixo. É importante mencionar que a forma de zig zag que se apresenta nos resultados é resultado do fato de que os pontos avaliados estão em uma malha de elementos finitos inclinada devido à geometria das interfaces, tendo assim uma variação.

Figura 54 - (a) Seção da interface rejeito argiloso - rejeito arenoso lançado até a cota 54m;  
(b) Deslocamento vertical do rejeito argiloso ao longo da elevação (até cota 54m)



(a)



(b)

Elaborada pelos próprios autores

### 3.9 Sistemas de monitoramento

Com os resultados encontrados, podemos projetar um sistema de monitoramento, que irá comparar os resultados teóricos obtidos nas análises computacionais com os reais. Dessa maneira, será possível controlar o comportamento e desempenho da barragem, e prever possíveis falhas, caso em que ações adequadas devem ser tomadas.

As instalações serão arranjadas tendo em mente que a seção longitudinal do barragem tem um comprimento de 600 metros, e que os parâmetros a serem estudados/analísados são os mesmos tanto para o dique inicial quanto para os alteamentos.

A cada 50 metros, na crista do dique inicial e dos alteamentos será montada uma central de monitoramento, isto é, haverá 20 destes pontos na seção longitudinal do barramento. Estes centros contarão com um piezômetro hidráulico, inclinômetro e marco superficial, e, diariamente serão feitas leituras, as quais serão comparadas com os valores de pressão neutra, vazão e deslocamento calculadas na modelagem.

Importante ressaltar que os valores apresentados na modelagem, como na Figura 17, não são previsões de como a linha freática e as pressões neutras se comportarão na realidade, e sim resultados de um cenário crítico, no qual a barragem estaria completamente saturada até a última cota. Esses valores devem servir como limites operacionais, os quais não devem ser ultrapassados

## 4 Considerações Finais

Após todo o levantamento bibliográfico e estudo teórico dos diversos fatores que influenciam na execução de uma barragem de rejeitos, consideramos que, apesar de simplificado, nosso projeto hipotético alcançou resultados bastante satisfatórios comparados aos esperados e exemplifica satisfatoriamente como é feito um projeto real.

O projeto aqui desenvolvido atingiu o necessário para ser executado de acordo com as condições aqui definidas. Deve-se ressaltar, porém, que diversos parâmetros e situações considerados durante o trabalho foram arbitrados simulando uma situação particular. Concluindo-se, portanto, que todo projeto de barragem de rejeito deve ser pensado de acordo com os condições únicas encontradas para cada situação.

Apesar disso, avaliando os resultados obtidos, podemos perceber que a dificuldade de se obter relativa segurança em uma barragem de rejeitos não está relacionada à impedimentos técnicos para a sua construção, mas sim no desenvolvimento adequado do projeto e o comprometimento da equipe de obra de seguir aquilo que está detalhado nele, na construção e execução durante todo o período de funcionamento da barragem.

Existem diversos pontos nos quais o sistema poderia falhar devido à uma não conformidade com o que se espera em projeto, por exemplo, se o tipo de material lançado mudar, os recalques e fluxos de água se comportariam de maneira adversa, podendo causar até o colapso ou vazamento da estrutura. Ou ainda se o material fino for lançado na região em que se espera material arenoso, interferindo no perfil da superfície freática, e na resistência da fundação dos seguintes alteamentos.

Em suma, avaliamos que este relatório possibilitou uma melhor compreensão dos problemas relacionados a uma barragem de rejeito. Dando-nos a oportunidade de estudar sobre um tema importante, que ganhou grande destaque recentemente no Brasil devido ao desastre ocorrido em 2015. Pudemos também revisar diversos tópicos do curso de graduação e, finalmente, juntá-los em um único projeto.

## Referências

- ABNT-NBR 13028. Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. 1993.
- AMORIM, E. F. Efeito do Processo de Deposição no Comportamento de Rejeitos da Mineração de Ouro. 2007. 125 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.
- AZAM, S.; LI, Q. Tailing Dam Failures: A Review of the Last one Hundred Years. Geotechnical News Magazine, v. 28, n. 4, 2010.
- BATES, J. Barragens de Rejeitos. 1. ed. [S.l.]: Signus, 2008.
- BLIGHT, G. Geotechnical Engineering for MineWaste Storage Facilities. [S.l.]: Taylor & Francis Group plc, 2010.
- BOUSSINESQ, J. Application des Potentials à L'Etude de L'Equilibre du Mouvement des Solides Elastiques. [S.l.]: Gauthier-Villars, 1883.
- BUCALEM, M. L.; BATHE, K. The Mechanics of Solids and Structures - Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution. [S.l.]: Springer, 2011.
- CNRH. Resolução no. 29, de 11 de Dezembro de 2002 - Define diretrizes para outorga de uso dos recursos hídricos para o aproveitamento dos recursos minerais. 2002.
- CRUZ, P. T. da. 100 Barragens Brasileiras. 2. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2004.
- DAS, B. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica . 7. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2014.
- ENGINEERING, M. List of Tailings Disposal Facilities. 2016.
- FIGUINHA, B. et al. Tratamento e Beneficiamento. 2011. Disponível em: <<https://ge902ferro.wordpress.com/processos/tratamento-e-beneficiamento/>>. Acesso em: 14/11/2016.

- GONÇALVES, H. H. S. Análise crítica, através de modelos visco-elásticos, dos resultados de ensaios de laboratório, para previsão de recalques dos solos da Baixada Santista . 1992. Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ICOLD. Tailing Dams - Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences. Bulletin 121, 2001.
- KAWA, L. O Minério de Ferro e os Rejeitos das Minas. 2015. Disponível em: <<http://professoralucianekawa.blogspot.com.br/2015/11/o-minerio-de-ferro-e-os-rejeitos-das.html>>. Acesso em: 14/11/2016.
- LEONOFF, K. Design and construction of tailings dams. [S.l.]: Colorado School of Mines Press, 1981.
- MASSAD, F. Obras de Terra. 2. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2010.
- MITTAL, H. K.; MORGENSTERN, N. R. Seepage control in tailings dams. Canadian Geotechnical Journal, v. 13, n. 3, August 1976.
- MORGENSTERN, N. R. et al. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. [S.l.], 2016.
- NRM19. Norma Reguladora de Mineração 19 – Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos. Atualizada na Portaria nº 12 de 22 de Janeiro de 2002. 2002.
- PEREIRA, E. L. Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estático. 2005. 185 p. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) — Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
- PINTO, C. de S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2006.
- RAFAEL, H. M. A. M. Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- RAJARAM, V.; DUTTA, S.; PARAMESWARAN, K. Sustainable mining practices – a global perspective. [S.l.]: Taylor & Francis Group plc, 2005.

ROCNEWS. A New Era in Slope Stability Analysis: Shear Strength Reduction Finite Element Technique. RocNews, Summer 2004.

SANTOS, D. A. M. dos; CURI, A.; SILVA, J. M. da. Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro. 2012.

SCHNAID, F. Ensaio de Campo e Suas Aplicações à Engenharia de Fundações. 1. ed.

[S.l.]: Oficina de Textos, 2000.

VICK, S. G. Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1983.

