

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS  
DE REJEITOS SOB O PONTO DE VISTA GEOTÉCNICO**

**OTÁVIO DE SOUSA MOTA**

**BARREIRAS-BA  
MAIO-2017**

**OTÁVIO DE SOUSA MOTA**

**ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS  
DE REJEITOS SOB O PONTO DE VISTA GEOTÉCNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal  
do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção  
do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Msc. Vinícius de Oliveira Kuhn

**BARREIRAS-BA**

**MAIO-2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

M917 Mota, Otávio de Sousa.  
Estudo comparativo dos métodos construtivos de barragens de rejeitos sob o ponto de vista geotécnico. – 2017.  
78f.il.

Orientador: Prof. Msc Vinicius de Oliveira Kuhn  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -  
Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das  
Tecnologias, Barreiras, BA, 2017.

1. Barragens – Construção. I. Kuhn, Vinicius de Oliveira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 627.8

---

OTÁVIO DE SOUSA MOTA

**ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS  
DE REJEITOS SOB O PONTO DE VISTA GEOTÉCNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à  
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Aprovada em 02/05/2017

**Banca Examinadora**

Orientador(a): Vinicius de Oliveira Kuhn

MSc. Vinicius de Oliveira Kuhn  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Pedro Cláudio dos Santos Vieira

Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Pedro Paulo Martins de Carvalho

MSc. Pedro Paulo Martins de Carvalho  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Aos meus Pais, Sônia Maria de Sousa Mota e Edmundo Mota Bispo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar mais próximo dele a cada dia que passa, por me capacitar, por ter me dado fé nos momentos difíceis, e por me conceder uma família feliz e unida.

Aos meus pais, por todo amor dado, por terem me dado educação, motivação e sabedoria, mostrando sempre o caminho correto a ser seguindo.

Aos meus irmãos, Heitor Mota e Soraia Mota, que sempre me apoiaram com seu carinho, respeito e amor.

A minha avó, Benedita Ana de Sousa, por estar presente em minha vida me dando carinho e amor.

Aos meus amigos, Vinícius Porto e Bruno Augusto, pela amizade verdadeira que construímos e por ter me proporcionado tantas situações felizes.

Aos meu primos, Luiz Henrique Motta e Paulo Victor Motta, por estarem presente em minha vida desde criança construindo momentos felizes.

Aos amigões, Ícaro Camadaroba, Tácio Nogueira, Lucas Ribeiro, Rodolfo Novais, Rafael Malheiro, Pedro Henrique, José Guedes, Danillo Figueiredo, Pedro Itacarambi e Michael Pedrosa, por terem me ajudado a adquirir conhecimento durante a graduação, e por proporcionarem momentos felizes no decorrer desses anos juntos.

Ao meu professor de matemática do ensino médio, Leonardo Araújo, por passar ensinamentos matemáticos de maneira simples me ajudando na aprovação do vestibular.

Ao meu orientador, Vinícius de Oliveira Kuhn, por se mostrar sempre disposto a ajudar na realização desse trabalho, passando informações importantes e mostrando sempre profissionalismo, disponibilidade e sabedoria.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

## RESUMO

O rompimento da barragem de rejeito de Fundão em 2015, no município de Mariana-MG, liberou mais de 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos, deixou 19 pessoas mortas, causou destruição da vegetação e poluiu a bacia do Rio Doce. Esse desastre alertou a sociedade brasileira mostrando a importância do monitoramento e estudos sobre esse tipo de barragem, já que eles dão segurança e proteção fazendo com que esses desastres sejam evitados. Com finalidade de auxiliar nas pesquisas sobre barragens de rejeito, neste trabalho foi feito um estudo comparativo envolvendo dois dos seus métodos construtivos, método de montante e método de jusante, sob o ponto de vista geotécnico. Foram realizadas análises de percolação, tensão-deformação e de estabilidade de taludes de uma barragem com arranjos e parâmetros geotécnicos já conhecidos e com o auxílio do pacote Geostudio 2012 foi possível obter o resultados dessas análises. Com os resultados do Geostudio, nas análises de percolação, os valores de vazões e velocidades para os dois métodos construtivos foram parecidos, portanto optou-se por verificar possíveis ocorrências de piping e de areia movediça do corpo da barragem, resultando em condições favoráveis à ocorrência de piping e desfavoráveis ao estado de areia movediça. Nas análises de tensão-deformação avaliou-se os recalques em cada fase de alteamento, os resultados mostraram que os recalques máximos no método de jusante foram superiores ao de montante, porém foi observado que os recalques aconteceram em locais distintos. Nas análises de estabilidade de taludes foram obtidos os fatores de segurança e comparados seus valores no método de montante e jusante. Os fatores de segurança no talude de montante da barragem resultaram em valores altos nos dois métodos construtivos, resultando assim numa boa estabilidade em ambos os métodos. Já no nos taludes de jusante, o método de montante apresentou taludes com melhor estabilidade do que o método construtivo de jusante.

**Palavras-chave:** barragens de rejeitos; métodos construtivos; estabilidade de taludes; estudo de tensão-deformação; estudo de percolação.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	Fundamentos Geotécnicos para o Estudo de Barragens.....	14
2.1.1	Estudos de Percolação .....	14
2.1.2	Estudos de Tensão-Deformação .....	17
2.1.3	Estudos de Estabilidade de Taludes .....	18
2.2	Geomecânica dos Rejeitos de Mineração.....	24
2.3	Barragens de Rejeito .....	27
2.4	Métodos Construtivos de Barragens de Rejeito .....	29
2.4.1	Método de Montante .....	29
2.4.2	Método de Jusante .....	30
2.4.3	Método da Linha de Centro .....	31
2.4.4	Comparativo das Técnicas de Alçamento .....	32
2.5	Histórico de Ruptura de Barragens de Rejeito.....	34
3	MATERIAS E MÉTODOS .....	37
3.1	Arranjo das Barragens Estudadas .....	38
3.2	Parâmetros Geotécnicos .....	40
3.3	Metodologia para Análises de Percolação.....	42
3.4	Metodologia para Análises de Tensão-Deformação.....	43
3.5	Metodologia para Análises de Estabilidade de Taludes .....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	45
4.1	Análises de Percolação.....	45
4.2	Análises de Tensão-Deformação.....	51
4.3	Análises de Estabilidade de Talude .....	57

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	68
7	ANEXOS .....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo de estado de areia movediça criados em obra .....	16
Figura 2.2 - Método das lamelas .....	19
Figura 2.3 - Força na lamela de Fellenius .....	19
Figura 2.4 - Lamela de Bishop.....	20
Figura 2.5 - Método de Morgenstern e Price - Forças aplicadas a uma fatia de solo.....	21
Figura 2.6 - Propriedades geotécnicas de rejeitos finos: (a) produção de alumínia; (b) mineração de estanho; (c) lavra e beneficiamento de minério de ferro. ....	26
Figura 2.7 - Método de Montante.....	29
Figura 2.8 - Método de Jusante.....	30
Figura 2.9 - Método da linha de centro.....	31
Figura 2.10 - Comparação de volumes de para as três técnicas de alteamento: (a) Método de montante. (b) Método de Jusante. (c) Método da linha de centro. ....	32
Figura 3.1 - Divisão das 28 etapas analisadas.....	37
Figura 3.2 - Arranjo do dique de partida .....	38
Figura 3.3 - Arranjo da barragem para o 1º alteamento pelo método de montante e jusante .....	39
Figura 3.4 - Arranjo das etapas analisadas para o primeiro alteamento pelo método de montante .....	40
Figura 3.5 - Malha de elementos finitos.....	42
Figura 3.6 - Exemplo de situação do tipo "com nível d'água" com a carga hidrostática inserida .....	43
Figura 3.7 - Exemplo de situação do tipo "com nível d'água + rejeito recém lançado" na mesma cota do nível d'água.....	44
Figura 3.8 - Fluxograma do fatores de segurança calculados para os tipos de situações .....	44
Figura 4.1 - Local de provável ocorrência de areia movediça. ....	46
Figura 4.2 - Local próximo ao filtro, onde foi retirado os valores dos gradientes em X .....	46
Figura 4.3 - Dique de partida com gradientes atuando de baixo para cima no pé do talude de jusante .....	48
Figura 4.4 - Fluxo direcionado a região do filtro .....	49
Figura 4.5 - Local onde ocorre os gradientes máximos em X.....	50

Figura 4.6 - Valores e localizações dos recalques no dique de partida com nível d'água .....	52
Figura 4.7 - Diferença entre as quantidades de rejeitos adicionados no método de montante e no dique de partida .....	53
Figura 4.8 - Localização de recalques máximos no 1º alteamento para a situação de rejeito adensado .....	54
Figura 4.9 - Quantidade de material adicionado na região onde ocorre maiores recalques no método de montante .....	55
Figura 4.10 - Quantidade de material adicionado na região onde ocorre maiores recalques no método de jusante .....	55
Figura 4.11 - Recalques totais no terceiro alteamento com rejeito adensado para o método de montante .....	56
Figura 4.12 - Recalques totais no terceiro alteamento com rejeito adensado para o método de jusante .....	56
Figura 4.13 - Coluna d'água do dique de partida, 1º alteamento do método de montante e 1º alteamento pelo método de jusante.....	58
Figura 4.14 - Variação do FS para o rebaixamento rápido do dique de partida .....	59
Figura 4.15 - Região de provável ruptura do talude de jusante para situação de percolação estável usando o método construtivo de montante no seu primeiro alteamento .....	61
Figura 4.16 - Região de provável ruptura do talude de jusante para situação de percolação estável usando o método construtivo de jusante no seu primeiro alteamento .....	61
Figura 4.17 - Região de provável ruptura do talude de jusante para situação de percolação estável usando o método construtivo de montante no seu segundo alteamento.....	63
Figura 4.18 - Região de provável ruptura do talude de jusante para situação de percolação estável usando o método construtivo de jusante no seu segundo alteamento.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Alguns valores típicos de coeficientes de permeabilidade .....	15
Tabela 2.2 - Coeficientes de segurança para cada caso de carregamento. ....	24
Tabela 2.3 - Propriedades geotécnicas de três rejeitos finos brasileiros.....	25
Tabela 2.4 - Comparação entre as características das barragens de rejeito. ....	33
Tabela 2.5 - Vantagens e desvantagens dos três métodos de alteamento. ....	33
Tabela 2.6 - Principais fatores que acarretam rupturas de barragens de rejeito. ....	36
Tabela 3.1 - Cota de elevação e nível d'água de cada fase de alteamento.....	39
Tabela 3.2 - Parâmetros geotécnicos dos materiais da fundação. ....	41
Tabela 3.3 - Parâmetros geotécnicos do maciço e espaldares. ....	41
Tabela 3.4 - Parâmetros geotécnicos do filtro. ....	41
Tabela 3.5 - Parâmetros geotécnicos do material usado nos alteamentos.....	41
Tabela 3.6 - Parâmetros geotécnicos do rejeito. ....	41
Tabela 4.1 - Resultados das análises de percolação.....	46
Tabela 4.2 - Recalques máximos em cada etapa.....	51
Tabela 4.3 - Fatores de segurança para o dique de partida.....	57
Tabela 4.4 - Comparação dos métodos construtivos de barragem de rejeito para o 1º alteamento com base no fator de segurança. ....	60
Tabela 4.5 - Comparação dos métodos construtivos de barragem de rejeito para o 2º alteamento com base no fator de segurança. ....	62
Tabela 4.6 - Comparação dos métodos construtivos de barragem de rejeito para o 3º alteamento com base no fator de segurança. ....	64

## 1 INTRODUÇÃO

Na atividade mineradora ocorre o beneficiamento de minérios, este processo de beneficiamento acaba gerando os rejeitos de mineração. Quando não existe uma forma de tratamento desses resíduos, eles são armazenados nas barragens de rejeitos. Portanto os estudos sobre esse tipo de barragem se torna cada vez mais relevante, visto que os rejeitos tem alto poder de poluição ambiental e em caso de ruptura de barragem, toda a população e vegetação ao seu redor será prejudicada.

Barragens de rejeito são estruturas que têm função de reter os resíduos sólidos e água dos processos de beneficiamento de minério, seu planejamento inicia com a procura do local para implantação, etapa na qual se deve vincular todo tipo de variáveis que direta ou indiretamente influenciam a obra: características geológicas, hidrológicas, topográficas, geotécnicas, ambientais, sociais, avaliação de riscos, entre outras (LOZANO, 2006). Elas podem ser alteadas por três métodos construtivos diferentes: método de montante, método de jusante e método da linha de centro.

O monitoramento das barragens de rejeito é uma assunto que preocupa, devido aos acidentes ocorridos ultimamente no Brasil. A falta de conhecimentos dos principais conceitos técnicos nas operações de barragens de rejeito, bem como a dificuldade de monitoramento dos órgãos fiscalizadores, prejudicam seu desempenho e coloca em risco meio ambiente. Tanto é assim que, segundo o IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração), a maioria dos acidentes em barragens de rejeitos acontecem porque não foram tomadas providências devidas, como aplicar as ações de gestão plenamente difundidas e necessárias a garantir a segurança das estruturas, ou então utilizar as tecnologias disponíveis.

Os acidentes ocorridos com barragens de rejeito no mundo, mostra que a segurança delas ainda é uma questão desafiadora. Um dos motivos da fragilidade na segurança desse tipo de barragem é que elas vivem em constantes mudanças, pois alteamentos devem ser realizados de acordo com a quantidade de rejeitos gerada no beneficiamento de determinado minério. Além disso, os rejeitos variam suas propriedades geotécnicas com o tempo o que torna difícil o seu monitoramento.

Um dos grandes desafios da engenharia é realizar obras num curto período de tempo, com segurança e com um menor gasto possível. E o método construtivo usado para fazer uma barragem de rejeito é determinante no seu custo e segurança. Portanto a escolha de um dos métodos é importante e cada um trás às obras pontos positivos e negativos.

Com o intuito de abordar estudos sobre barragens de rejeitos, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo comparativo entre dois métodos construtivos de barragens de rejeitos, método de montante e método de jusante. Realizando análises de percolação, tensão-deformação e de estabilidade de taludes de uma barragem de rejeito com arranjo e propriedades geotécnicas pré definidas com base em trabalhos acadêmicos. E posteriormente comparado os resultados dessas análises entre os dois métodos construtivos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Fundamentos Geotécnicos para o Estudo de Barragens**

Para realizar comparações entre métodos construtivos de barragens de rejeito, é importante salientar os fundamentos geotécnicos (percolação, análise de tensão-deformação e estabilidade de taludes) pois, os estudos de percolação irão fornecer informações sobre as distribuições de pressões neutras no solo, subsidiando assim o dimensionamento de drenagem da barragem e as análises de estabilidade de talude. Os estudos de tensão-deformação visam analisar a ocorrência de possíveis recalques verificando os níveis de segurança da estrutura. E as análises de estabilidade de taludes irão avaliar a segurança dos taludes da barragem por meio do fator de segurança, para os casos de carregamento mais relevantes.

#### **2.1.1 Estudos de Percolação**

A percolação é o fenômeno de deslocamento da água no solo, tal deslocamento pode alterar fatores e características do solo, como o valor das vazões e a distribuição de pressões, podendo assim levar a ruptura da barragem. Segundo Pinto (2006), esse tipo de estudo é muito importante, já que ele intervém num grande número de problemas práticos como no cálculo de vazões, pressões neutras, estudos de erosão, análises de recalque e estudos de estabilidade.

Um modelo hidrogeotécnico dos maciços é a base fundamental para a elaboração de qualquer análise de percolação. A elaboração desse modelo deverá conter, essencialmente, a identificação e distribuição espacial dos materiais com suas características geotécnicas, a definição dos parâmetros geotécnicos de cada material e ele deve permitir realizar aplicações técnicas de análise matemática. (ELETROBRÁS, 2003).

Segundo Pinto (2006), no fluxo de água em barragens do tipo bidimensional, as partículas de água seguem caminhos curvos, porém contidos em planos paralelos, sendo que o estudo desse tipo de fluxo é facilitado pela representação gráfica dos caminhos percorridos pela água, tal representação é conhecida como rede de fluxo. Conforme Massad (2010), linha de fluxo é o trajeto que a água segue através de um meio saturado e uma linha equipotencial é o lugar geométrico dos pontos com igual carga total, sendo que entre duas linhas de fluxo considera-se uma vazão constante e entre duas linhas equipotenciais uma perda de carga

também permanente. Tais considerações irão facilitar o traçado da rede de fluxo, o qual terá figuras aproximadamente quadradas formadas pelas linhas de fluxo e equipotenciais.

O traçado da rede de fluxo pode ser dado pelo método dos elementos finitos, modelagem eletro-analógica ou técnica das diferenças finitas. Através do traçado da rede, tem-se a definição de gradientes, velocidades, pressões neutras e vazões (ELETROBRÁS, 2003). Conforme Eletrobrás (2003), o valor adotado para o coeficiente de permeabilidade deve ser ajustado de acordo com as tensões efetivas atuantes no maciço e fundação, bem como consideradas eventuais anisotropias no seu valor.

O coeficiente de permeabilidade é um parâmetro geotécnico que está diretamente ligado com as análises de percolação, segundo Pinto (2006), seus valores são tanto menores quanto menor os vazios no solo e, conseqüentemente, quanto menores as partículas. A Tabela 2.1 apresenta alguns valores típicos de coeficiente de permeabilidade.

Tabela 2.1 - Alguns valores típicos de coeficientes de permeabilidade

Argilas	$< 10^{-9} \text{ m/s}$
Siltos	$10^{-6} \text{ a } 10^{-9} \text{ m/s}$
Areias Argilosas	$10^{-7} \text{ m/s}$
Areias Finas	$10^{-5} \text{ m/s}$
Areias Médias	$10^{-4} \text{ m/s}$
Areias Grossas	$10^{-3} \text{ m/s}$

Fonte: Pinto (2006).

De acordo com os valores de gradiente, da sua localização e do tipo de material no corpo de uma barragem, pode ocorrer o fenômeno de areia movediça e piping.

Segundo Pinto (2006), o estado de areia movediça ocorre somente para fluxos d'água ascendentes, ou seja, de baixo para cima. Nesse estado, os grãos do solo permanecem, teoricamente, na mesma posição, mas não transmitem forças através dos pontos de contato. A ação dos pesos dos grãos (gravidade) se contrapõe à ação de arraste por atrito da água que percola de baixo para cima (força de percolação). Como a resistência das areias é proporcional à tensão efetiva, quando esta se anula, a areia perde completamente sua resistência e fica num estado definido como areia movediça chegando ao valor de gradiente crítico.

Segundo, Pinto (2006), o gradiente crítico é determinado de acordo com a equação a seguir.

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (1)$$

Em que:

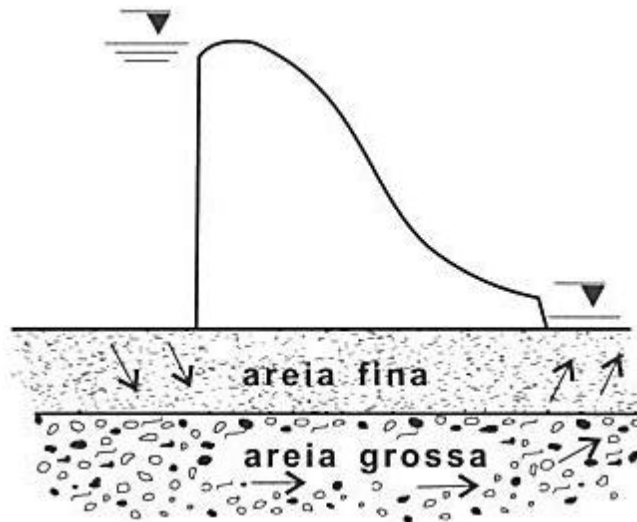
$i_{crit}$  = *gradiente crítico*;

$\gamma_{sub}$  = *peso específico submerso*;

$\gamma_w$  = *peso específico da água*.

Não existem argilas movediças, pois as argilas apresentam consistência mesmo quando a tensão efetiva é nula. Teoricamente, poderiam ocorrer areias grossas e pedregulhos movediços, mas as vazões correspondentes ao gradiente crítico seriam tão elevadas que não é fácil encontrar uma situação que provoque esse estado. Areia movediça, é uma situação típica de areias finas (PINTO, 2006).

Figura 2.1 - Exemplo de estado de areia movediça criados em obra



Fonte: Pinto (2006).

Em uma barragem construída sobre uma camada fina sobreposta a um sedimento de areia grossa, como ilustra a Figura 2.1, a água do reservatório se infiltra pelas fundações, percorre na horizontal, preferencialmente pela areia grossa, e emerge a jusante, através da areia fina. Nesse movimento ascendente, o gradiente pode atingir o valor crítico. A areia perderá resistência e a barragem tombará (PINTO, 2006).

Segundo Pinto (2006), quando a perda de resistência se inicia em um ponto, ocorre erosão nesse local, o que provoca uma maior concentração de fluxo para a região, com o aumento do gradiente, surge maior erosão e assim, progressivamente, forma-se um furo que progride para o interior do solo. Esse fenômeno conhecido pelo nome de piping, uma das mais frequentes causas de ruptura de barragens.

Os dados referentes aos gradientes, vazões, pressões neutras, valores dos potenciais e velocidade de fluxo irão subsidiar no dimensionamento do sistema de drenagem e impermeabilização da barragem.

O dimensionamento do sistema de drenagem deve ser realizado criteriosamente, já que o mesmo faz com que ocorra a redução das poro-pressões na estrutura da barragem, dando assim mais segurança e prevenindo-a de possíveis rupturas e desastres.

Para realizar o dimensionamento do sistema de impermeabilização da barragem é necessário fazer estudos da percolação, dando ênfase aos tipos de fundações e aterros envolvidos, juntamente com suas permeabilidades. Tal dimensionamento tem como objetivo a redução da vazão pela fundação e gradientes de saída a jusante, para isso, pode ser feito trincheiras impermeáveis, cortinas de injeção e tapetes permeáveis, podendo estar combinados com o sistema drenagem (ELETROBRÁS, 2003).

### **2.1.2 Estudos de Tensão-Deformação**

Segundo Eletrobrás (2003), as análises de tensão-deformação e recalque, tem como objetivos principais:

1. Verificar a compatibilidade de deformações entre os diversos materiais que compõem a barragem;
2. Avaliar o potencial de ocorrência de ruptura progressiva do maciço e da fundação;
3. Analisar os riscos de fissuramento do núcleo ocasionado por zonas de tração ou por fraturamento hidráulico;
4. Subsidiar o projeto de instrumentação, identificando os pontos críticos a serem instrumentados;
5. Otimizar o projeto de escavações, de modo a manter os recalques diferenciais dentro dos níveis admissíveis;
6. Determinar a sobrelevação da crista para compensar os recalques ocorridos após a construção da barragem.

Para a realização das análises de tensão-deformação das situações citadas acima é dado preferência ao método dos elementos finitos, usando programa computacionais que permitam a simulação de construção e operação em etapas e considerem os materiais com comportamento elástico linear (ELETROBRÁS, 2003).

Por Dyminski (1996) esta solução (Método dos Elementos Finitos) requer:

- Perfil Geotécnico (geometria do problema, incluindo estratigrafia);
- Processo de Formação do Solo;
- Determinação e modelagem das características de tensão-deformação (por esta etapa ser geralmente complicada, a representação do modelo para solos naturais pode ficar prejudicada).

Segundo Gerscovich (2008), esses programas usados são concebidos de forma a possibilitar a incorporação da:

- Não linearidade da curva de tensão-deformação;
- Anisotropia;
- Não homogeneidade;
- Influência do estado inicial de tensões;
- Etapas construtivas.

Quando necessário, as análises de tensão-deformação serão feitas para condições de enchimento de reservatório com fluxo transiente, período construtivo e regime permanente de operação com percolação estabelecida (ELETROBRÁS, 2003).

Segundo Eletrobrás (2003), na fundação e maciço das barragens, é aconselhável que os parâmetros de deformabilidade e compressibilidade sejam obtidos por meios de investigações geológicas e geotécnicas de campo e laboratório.

### **2.1.3 Estudos de Estabilidade de Taludes**

O estudo de estabilidade de taludes está diretamente ligado à segurança da barragem e para ser realizado é preciso ter conhecimento dos parâmetros geotécnicos dos materiais (peso específico, ângulo de atrito, coesão, etc.). Qualquer falta de conhecimento ou descuido em relação a esses elementos citados, pode ocasionar ruptura do talude da barragem, a qual ocorre quando as tensões cisalhantes mobilizadas forem iguais à resistência ao cisalhamento do solo na superfície de ruptura.

Segundo Eletrobrás (2003), para saber qual o método ideal para usar no cálculo do fator de segurança de uma barragem de terra, deve-se analisar a forma em que se dará a ruptura

do talude, sendo que todos os métodos consideram o método das fatias e lamelas, porém os esforços entre elas que irá mudar de um método para o outro.

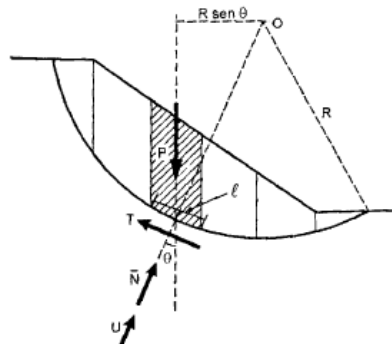
Será abordado três tipos diferentes de métodos de análise de estabilidade de taludes sendo que eles obedecem o método de equilíbrio-limite que segundo Massad (2010) partem dos seguintes pressupostos:

1. O solo se comporta como material rígido-plástico, isto é, rompe-se bruscamente sem se deformar;
2. As equações de equilíbrio estático são válidas até a eminência da ruptura, quando na realidade, o processo é dinâmico;
3. O coeficiente de segurança ( $F$ ) é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignora-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

➤ Método de Fellenius

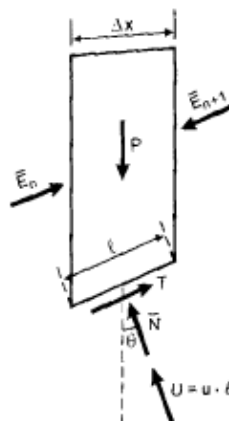
Segundo Massad (2010), Para o método de Fellenius e de Bishop Simplificado, admite-se que a linha de ruptura seja um arco de circunferência; além disso, a massa do solo é subdividida em lamelas como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 - Método das lamelas



Fonte: Massad (2010).

Figura 2.3 - Força na lamela de Fellenius



Fonte: Massad (2010).

Segundo Massad (2010), com base na Figura 2.3, o fator de segurança pelo método de Fellenius é obtido através da expressão abaixo:

$$F = \frac{\sum [c' \cdot l + (P \cdot \cos\theta - u \cdot \Delta x \cdot \sec\theta) \cdot \operatorname{tg}\varphi']}{\sum (P \cdot \operatorname{sen}\theta)} \quad (2)$$

Em que:

$F$  = Fator de segurança;

$c'$  = Coesão ao longo da superfície de ruptura;

$l$  = Comprimento da base da fatia;

$P$  = Peso da fatia;

$\theta$  = Ângulo entre o raio da superfície de ruptura e o eixo vertical da fatia;

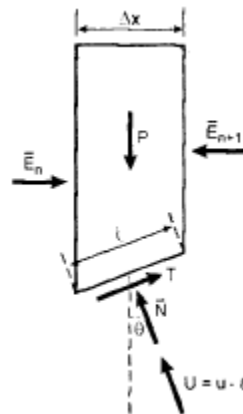
$u$  = Poropressão no centro da base da fatia;

$\Delta x$  = Comprimento da fatia;

$\varphi'$  = Ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura.

➤ Método de Bishop Simplificado

Figura 2.4 - Lamela de Bishop



Fonte: Massad (2010).

Segundo Massad (2010), com base na Figura 2.4, o fator de segurança pelo método de Bishop Simplificado é calculado por:

$$F = \frac{\sum \left[ c' \cdot l + \frac{P - u \cdot \Delta x - c' \cdot \Delta x \cdot \operatorname{tg}\theta / F}{\cos\theta + \operatorname{tg}\varphi' \cdot \operatorname{sen}\theta / F} \cdot \operatorname{tg}\varphi' \right]}{\sum (P \cdot \operatorname{sen}\theta)} \quad (3)$$

Em que:

$F$  = Fator de segurança;

$c'$  = Coesão ao longo da superfície de ruptura;

$l$  = Comprimento da base da fatia;

$P$  = Peso da fatia;

$\theta$  = Ângulo entre o raio da superfície de ruptura e o eixo vertical da fatia;

$u$  = Poropressão no centro da base da fatia;

$\Delta x$  = Comprimento da fatia;

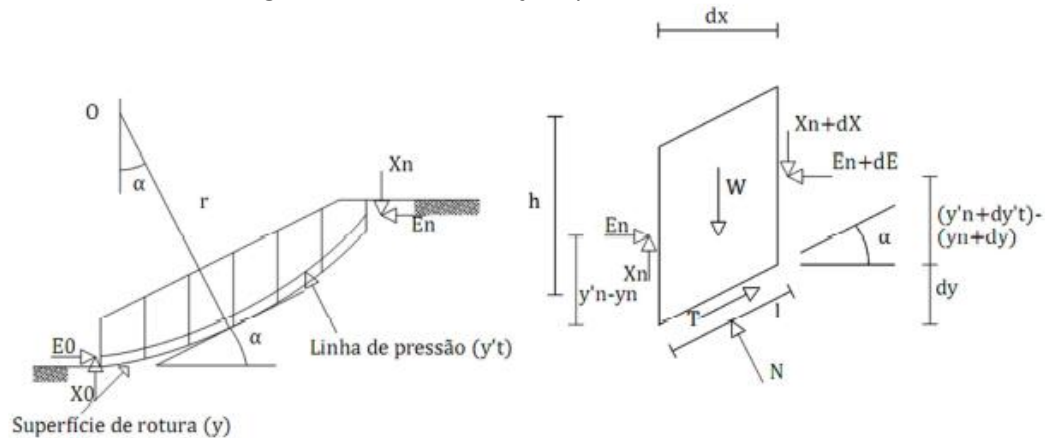
$\varphi'$  = Ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura.

O cálculo do fator de segurança é calculado por meio de método iterativo.

Segundo Das Braja (2007) o método simplificado de Bishop é provavelmente o mais utilizado hoje em dia e quando incorporado a programas de computador apresenta resultados satisfatórios na maioria dos casos.

➤ Método de Morgenstern e Price

Figura 2.5 - Método de Morgenstern e Price - Forças aplicadas a uma fatia de solo



Fonte: Freitas (2011)

Segundo Ferreira (apud REMÉDIO, 2014), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{c'}{F_S} (1 + \tan^2 \alpha_n) + \frac{\tan \varphi'}{F_S} \left[ \frac{dP}{l} + \frac{dX}{l} - \frac{dE}{l} \tan \alpha_n - u_n (1 + \tan^2 \alpha_n) \right] & \quad (4) \\ = \frac{dE}{l} + \frac{dX}{l} \tan \alpha_n + \frac{dP}{l} \tan \alpha_n & \end{aligned}$$

Sendo as incógnitas  $X$  e  $E$ , as forças e interação entre as fatias, com relação a  $p$ :

$$X = \lambda f(x) E \quad (5)$$

Onde:

- $c'$  = Coesão ao longo da superfície de ruptura;
- $\varphi'$  = Ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura;
- $P$  = Peso da fatia;
- $l$  = Comprimento da fatia;
- $u_n$  = Poropressão no centro da base da fatia;
- $\alpha_n$  = Ângulo entre a base da fatia e a horizontal;
- $\lambda$  = Parâmetro de escalonamento;
- $f(x)$  = Função que reflete a forma de  $\lambda$ .

A solução é alcançada por processo iterativo, procedendo-se a integração das diferenciais.

Existem quatro tipos de situações críticas de carregamento em que o fator de segurança da barragem deverá ser avaliado, logo após o final da construção da mesma, com

a barragem em condições normais de operação (percolação estável), durante o rebaixamento rápido do reservatório e sob excitação sísmica. Para achar o fator de segurança usa-se o método do equilíbrio limite, em especial o métodos das fatias, o qual pode ter duas formas de abordagem, em termos de tensões totais ou em termos de tensão efetiva (LIMA, [s.d]).

Segundo Lima [s.d], o caso que as análises sejam feitas por tensões totais, os parâmetros de resistência ao cisalhamento são obtidos por meio de ensaios não drenados, os quais são rápidos, e são ignorados os valores de pressão neutra. Porém sendo feito em termos de tensões efetivas os parâmetros de resistência ao cisalhamento decorrem de ensaios drenados ou não drenados com medidas de pressões neutras.

Os ensaios do tipo adensado drenado (CD) são aqueles em que há permanente drenagem do corpo de prova, aplica-se pressão confinante e espera-se que o corpo de prova se adense e a pressão neutra se dissipe, posteriormente, a tensão axial é aumentada lentamente para que a água sob pressão possa sair. Já no ensaios do tipo adensado não drenado (CU), aplica-se a tensão confinante e deixa-se dissipar a pressão neutra correspondente, assim, o corpo de prova adensa sob pressão confinante e posteriormente carrega-se axialmente sem drenagem. E no ensaio não adensado não drenado (UU), o corpo de prova é submetido à pressão confinante e, a seguir, ao carregamento axial, sem que se permita qualquer drenagem, o teor de umidade permanece constante, e, se o corpo de prova estiver saturado não haverá variação de volume (PINTO,2006).

A seguir, serão avaliados como se dão os estudos de estabilidade de taludes para os principais casos de carregamento na barragem.

- Final de Construção

“Para este caso, considera-se o final da construção, o momento em que o aterro já foi concluído, porém o reservatório ainda não está cheio”(ELETROBRÁS, 2003).

Os ensaios ideais para esse caso de carregamento são do tipo não drenado e não adensados (UU), eles irão dá as envoltórias de resistência por tensões efetivas, porém se a barragem ficar sobre argilas saturadas, a análise deverá ser feita também por tensões totais (ELETROBRÁS, 2003).

Conforme Eletrobrás (2003), na análise por tensões efetivas, os parâmetros de pressão neutra podem ser obtidos por meios de três formas:

1. Tomando como base os parâmetros já conhecidos de outra barragem que tenha tipo e lançamento de material semelhantes.

2. Usando o método de Hilf, sendo este prudente e criterioso, já que nele ocorre a majoração das cargas de compressão no solo, visando a segurança da obra.
3. Ensaio laboratoriais, usando os parâmetros de drenagem e trajetória de tensões do material usando em campo para construção da barragem.

Após usar um dos três métodos citados acima, é adotado intervalos de parâmetros de pressão neutra e relacionado com o fator de segurança por meio de gráficos (ELETROBRÁS, 2003).

- Rebaixamento Rápido

O Rebaixamento rápido do reservatório causa redução das tensões principais e aumento a diferença entre elas, conseqüentemente, ocorre aumento da tensão desvio. Além disso, acontece rotação da direção das tensões principais e ainda estabelece condições transitórias de fluxo gravitacional d'água. A intensidade do problema nesse caso de carregamento, está diretamente ligada com a pressão neutra que por sua vez depende da drenagem da água intersticial e, por conseguinte, da permeabilidade e compressibilidade do material da barragem (ELETROBRÁS, 2003).

Os processos de análise em termos de tensões totais, conduzem a valores conservadores do fator de segurança, portanto recomenda-se a análises em termos de tensões efetivas, para a qual é necessário a previsão em pressões neutras, obtidas por meio do traçado da rede de percolação (LIMA, s.d).

Se a variação do estado de tensões, que o rebaixamento irá causar no solo, afetar os valores da pressão neutra, as análises deverão ser feitas por tensão efetivas com envoltórias de resistência obtidas por meio de ensaios drenados (CD) ou ensaios adensados não drenados (R ou CU) com medida de pressão neutra, porém se não alterar, as análises serão feitas por tensões efetivas, considerando a resistência efetiva de ensaios drenados e pressões neutras obtidas de redes de fluxo de rebaixamento (ELETROBRÁS, 2003).

- Percolação Estável

Segundo Eletrobrás (2003), considera-se uma situação de percolação estável, quando o nível d'água da barragem chega ao máximo e se conserva por um período que deixe o maciço saturado e adensado, de tal forma que a percolação se estabilize.

No caso de condições normais de operação (percolação estável), recomenda-se a análise em termos de tensão efetiva, utilizando-se os parâmetros de  $c'$  e  $\varphi'$ , obtidos em ensaio

adensado drenado (CD) ou por meio de ensaio adensado são drenado (CU), com medida de pressão neutra, na etapa de ruptura. (LIMA, s.d).

- Análise Sísmica

Apesar de no Brasil não ser comum a ocorrência de terremotos, pode ocorrer sismicidade em barragens devido ao enchimento ou mesmo em alguns casos excepcionais, portanto é aconselhável realizar uma análise sísmica. Para isso, adota-se cargas sísmicas, com relação a aceleração, tanto na direção horizontal quanto na vertical de 0,05g e 0,03g respectivamente (ELETROBRÁS, 2003).

Cada caso de carregamento visto tem suas particularidades e um caso pode ter mais tendências de ocorrer instabilidade nos taludes que outros, então o fator de segurança mínimo a ser aceitável irá depender do caso de carregamento como recomendado pela Eletrobrás (2003):

Tabela 2.2 - Coeficientes de segurança para cada caso de carregamento.

CASO	COEFICIENTE DE SEGURANÇA	OBSERVAÇÕES
Final de Construção	1,3	Taludes de montante e Jusante Valor mínimo para solos dilatantes
Rebaixamento Rápido	1,1 a 1,3	Valor máximo para solos que contraem no cisalhamento
Percolação Estável	1,5	Talude de Jusante
Análise Sísmica	1	Talude de Montante e Jusante

Fonte: modificado de Eletrobrás 2003.

## 2.2 Geomecânica dos Rejeitos de Mineração

Os rejeitos de mineração são materiais derivados do processo de beneficiamento dos minérios, geralmente são compostos de partículas provenientes da rocha, de água e de outras substâncias adicionadas ao processo de beneficiamento. A sua quantidade gerada depende diretamente do produto final que se deseja obter e sua deposição geralmente é feita sobre a superfície do terreno, em bacias de disposição formadas por barragens e diques, para evitar que percolados atinjam águas superficiais e subterrâneas e que o material particulado cause assoreamento de cursos d'água (BOSCOV, 2008).

O comportamento geotécnico dos rejeitos está ligado às características do material, natureza do depósito e na forma que foi depositado. Esses depósitos resultam em duas classes diferentes de material: areias lançadas hidraulicamente e lamas depositadas por

sedimentação. Usualmente a granulometria é considerada a característica mais importante do material, determinando o comportamento do rejeito (D'AGOSTINHO, 2008).

Os rejeitos, que são transportados misturados com água, são caracterizados do ponto de vista geotécnico como materiais de granulometria fina, variando desde colóides com índice de plasticidade entre médios a altos e que são denominados de lama, até areias ou materiais granulares mais grossos, não plásticos e que são denominados de rejeitos granulares. Em geral a forma e tamanho dos grãos dependem do tipo de minério que está sendo explorado, das naturezas geológicas das reservas e dos diferentes processos de beneficiamento (HERNANDEZ, 2002).

Segundo Boscov (2008), os depósitos de rejeitos são formados por meio de três etapas: floculação, sedimentação e adensamento. Na fase de floculação as partículas aumentam de tamanho, na sedimentação elas se depositam no fundo do reservatório sob ação da gravidade e no adensamento elas transmitem as tensões devido ao peso próprio. Sendo que nos rejeitos granulares, pelas partículas serem mais pesadas, a fase de predominância é a sedimentação, já nos finos predomina o adensamento.

As propriedades geotécnicas dos rejeitos de mineração, como dito anteriormente, varia com o tipo de minério, portanto não é possível generalizar suas propriedades. Na tabela a seguir tem-se exemplos de propriedades geomecânicas de três tipos de rejeitos finos brasileiros, mostrando justamente a distinção entre elas.

Tabela 2.3 - Propriedades geotécnicas de três rejeitos finos brasileiros.

PROCESSO PRODUTIVO	PROCESSAMENTO DA BAUXITA PARA OBTENÇÃO DA ALUMINIA		MINERAÇÃO DE ESTANHO	LAVRA E BENEFICIAMENTO PARA OBTENÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO
Empresa	Alcan		*	Samarco
Limite de liquidez LL (%)	37 a 60		38 a 70	*
Limite de plasticidade LP (%)	23 a 41		14 a 38	*
Índice de plasticidade IP (%)	3 a 24		18 a 32	Não plástico
Peso específico aparente (kN/m <sup>3</sup> )	13 a 16		*	19,5 a 26
Teor de umidade w (%)	83 a 214		*	*
Teor de sólidos (%)	32 a 55		*	20 a 63
Peso específico dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	32,0 a 36,0		26,5 a 38,5	34,0 a 39,0
Índice de vazios inicial ei	2,3 a 7,3		*	0,6 a 5,6
Compressibilidade (kPa)	A	5,5	4,4	1,75
	B	-0,15	-0,25	-0,18
Permeabilidade (m/s)	C	$2,25 \times 10^{-11}$	$2,10 \times 10^{-11}$	$1,7 \times 10^{-8}$
	D	4,25	3	4,15

A,B – Coeficientes de ajuste da equação de compressibilidade  
 B, C – Coeficientes de ajuste da equação de permeabilidade  
 Fonte: Padula (2004, apud Boscov, 2008).

Na Tabela 2.3 a compressibilidade é expressa pela equação:

$$e = A \sigma^B \quad (1)$$

Em que:

$e$  = índice de vazios

$\sigma$  = tensão efetiva

$A, B$  = coeficientes de ajustes

A permeabilidade, por tua vez, é representada por:

$$k = C e^D \quad (2)$$

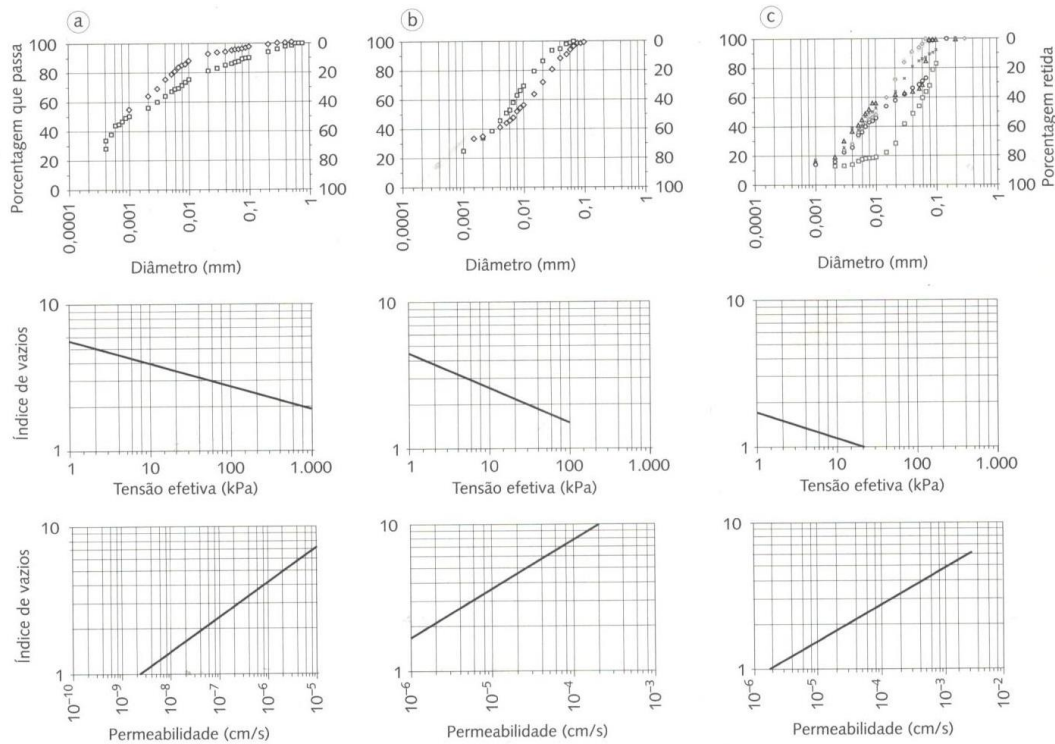
Em que:

$k$  = coeficiente de permeabilidade

$e$  = índice de vazios

$C, D$  = coeficientes de ajustes

Figura 2.6 - Propriedades geotécnicas de rejeitos finos: (a) produção de alumínia; (b) mineração de estanho; (c) lava e beneficiamento de minério de ferro.



Fonte: Padula(2004, apud Boscov, 2008).

No gráfico de tensão efetiva x índice vazios, percebe-se que os rejeitos de produção de alumina são os mais porosos e permeáveis, já que para uma mesma tensão efetiva, os rejeitos de produção de alumina tem um índice de vazios superior ao dos outros dois rejeitos finos.

Em relação a compressibilidade, o rejeito de produção de alumina e os da mineração de estanho tem compressibilidades iguais, já que para um acréscimo de tensão efetiva de 50 kpa, de 10 kpa para 50 kpa, ocorre uma mesma diminuição de índice de vazios de 0,8. Por outro lado, os coeficientes de permeabilidade correspondentes às tensões efetivas de 10 e 50 kpa são de, respectivamente,  $7,3 \times 10^{-9} \text{ m/s}$  e  $2,6 \times 10^{-9} \text{ m/s}$  para os rejeitos de produção de alumina, de  $3,2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  e  $9,5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$  para os rejeitos de mineração de estanho e de  $3,1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  e  $9,3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  para os rejeitos da lavra e beneficiamento de minério de ferro, portanto este último é muitos mais permeável que os dois anteriores (BOSCOV,2008).

### **2.3 Barragens de Rejeito**

Barragens de rejeito são estruturas que têm função de reter os resíduos sólidos e água dos processos de beneficiamento de minério, seu planejamento inicia com a procura do local para implantação, etapa na qual se deve vincular todo tipo de variáveis que direta ou indiretamente influenciam a obra: características geológicas, hidrológicas, topográficas, geotécnicas, ambientais, sociais, avaliação de riscos, entre outras (LOZANO, 2006).

Para Machado (2007), cada barragem de rejeito é uma obra particular, pois depende da finalidade, do tipo de rejeito a ser depositado, diferenças nas características granulométricas e nos processos de disposição. A geometria da barragem e o tipo de represamento depende da topografia do local, podendo ser implantada aproveitando o perfil de vales e possuir solo estável, facilitando a formação da lagoa ou em terrenos planos. O solo escolhido deve possuir capacidade de suporte suficiente para não ocorrer deslizamentos ou grandes acomodações devido ao peso de rejeito a cada alteamento. A construção de uma barragem de rejeitos é um processo contínuo, e o projeto deve ser objeto de contínuas discussões durante curto período de operação.

Segundo Espósito (1995), algumas considerações são importantes no que concerne à Barragem de Rejeito:

- Deve ser uma estrutura estável, juntamente com a fundação;
- Tem que permitir o controle adequado de toda a água que a ultrapassa;
- Deve reter inteiramente o rejeito em seu reservatório.

O projeto de uma barragem de rejeito compreende as seguintes etapas: seleção do local, projeto de instalação, construção, operação e fechamento definitivo. O fechamento é uma etapa complexa, pois envolve a garantia de segurança estrutural e ambiental a longo prazo. As etapas de projeto, construção e operação não são independentes, ou seja, estão fortemente relacionadas quando a barragem é feita por alteamento (BOSCOV, 2008).

Segundo Boscov (2008), o projeto geotécnico das barragens de rejeito, conceitualmente, é da mesma forma que uma barragem de terra convencional, englobando capacidade de carga da fundação, estabilidade de taludes, as perdas de água pela fundação e pelo maciço, os elementos de drenagem interna e superficial, a proteção dos taludes contra a erosão e a instrumentação. As suas particularidades são as práticas de alteamento ao longo do tempo e a utilização dos próprios rejeitos na construção da barragem. Num projeto são fundamentais as análises de estabilidade, previsão de recalques, estudos de percolação, controle de erosão, atenuação de impactos ambientais e recuperação ambiental. Os parâmetros de projeto são: permeabilidade da fundação, resistência ao cisalhamento, permeabilidade e parâmetro de pressão neutra do material de construção da barragem; funções de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos; velocidade de descarga dos rejeitos, teor de sólidos no lançamento, clima, entre outros.

Conforme Figueiredo Ferraz (1992, apud Espósito, 1995), em um projeto é fundamental que sejam definidas as características do barramento, incluindo a barragem, o dispositivo de desvio de cursos d'água durante a construção e o extravasor de cheias.

Quanto a barragem considera-se:

- Fundações – delimitação de toda a área total a ser desmatada e limpa; limites de escavação; tratamento superficial e profundo.
- Etapas de alteamento - definição da elevação e vida útil do dique de partida; definição da elevação e vida útil dos alteamentos (inclusive data prevista para execução).
- Geometria externa do maciço elevação das cristas – largura e elevação das cristas; largura e elevação das bermas intermediárias; altura e inclinação dos taludes; Amarração planialtimétrica dos eixos de referência.
- Geometria interna do maciço – distribuição interna dos materiais; espessura e inclinação de filtros, transições e drenos de pé.

- Materiais naturais de construção – localização e volume das fontes e áreas potenciais; faixas granulométricas e especificações para uso; características e aplicabilidade dos materiais.
- Proteção dos taludes – indicação dos tipos de proteção nos taludes de jusante e montante; geometria e características das obras de drenagem superficial (canaletas, escadas, etc.).

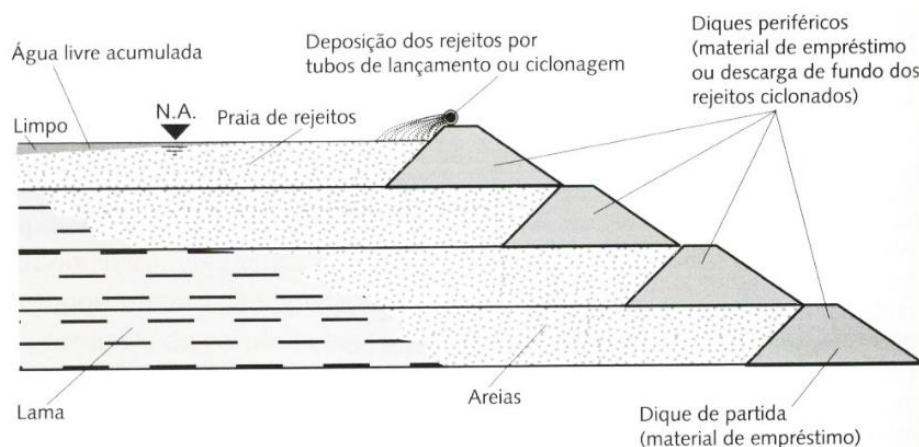
## 2.4 Métodos Construtivos de Barragens de Rejeito

As barragens de rejeitos são construídas inicialmente por um dique de partida constituídos de material de empréstimo, posteriormente ocorre a etapa de alteamentos sucessivos, nela a direção do alteamento pode variar, dando assim origem a três métodos distintos de alteamento: método de jusante, método de montante e método da linha de centro. Cada um suas características individuais tendo suas vantagens e desvantagens.

### 2.4.1 Método de Montante

Segundo Espósito (1995), no método de montante, após a construção do dique de partida, o rejeito é lançado a montante da periferia da crista, formando uma praia, a qual será a fonte de material de construção do próximo alteamento. Durante o lançamento, ocorrem segregações granulométricas, ficando a fração grossa depositada próximo ao maciço para servir de suporte ao próximo alteamento. Este processo é repetido com alteamentos sucessivos até a elevação final prevista, sendo que o eixo da crista sempre se desloca para montante como mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7 - Método de Montante.



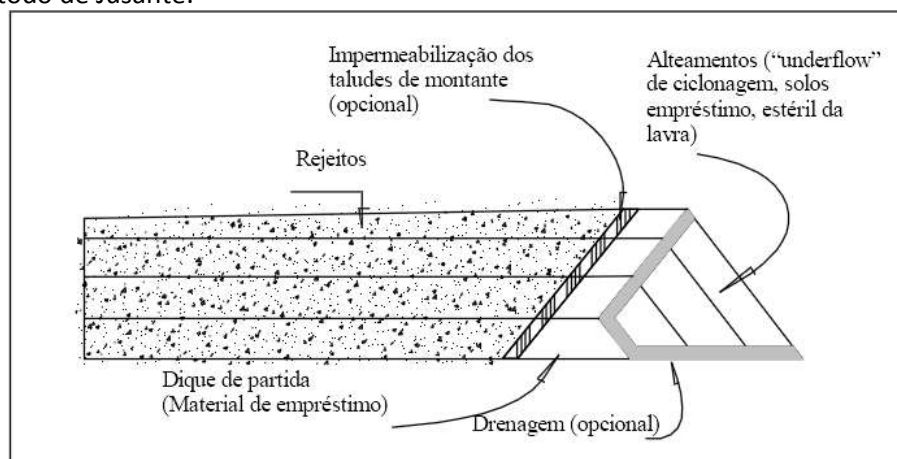
Fonte: Boscov, 2008.

Conforme Machado (2007), após a construção do dique de partida, usa-se a técnica de aterro hidráulico, segundo Boscov (2008) os aterros hidráulicos são construídos com transporte e deposição do solo em meio aquoso, sendo suas propriedades dependentes do método de deposição e composição da polpa (tipo de fluido de transporte, porcentagem de sólidos, distribuição granulométrica, geometria e densidade dos grãos). Essa técnica de aterro hidráulico, segundo Machado (2007), normalmente apresenta deficiências geotécnicas relacionada aos aspectos de segurança, pois sua construção é de forma desordenada e resulta em aterros de baixa qualidade e sujeito a ocorrência de instabilidade, já que o material armazenado encontra-se sob condição saturada e apresenta altos índices de vazios, levando o rejeito à perda significativa de rigidez por diminuição da coesão e de atrito com elevado potencial de susceptibilidade de liquefação.

#### 2.4.2 Método de Jusante

Segundo Espósito (1995), o método de jusante consiste no alteamento da barragem para jusante do dique de partida, inicialmente construído, de tal forma que o eixo da crista se desloque para jusante, como mostra a Figura 2.8. A construção pode ser feita empregando o próprio rejeito, solos de empréstimo ou estéril proveniente da lavra. Lozano (2006), afirma que em caso do emprego dos próprio rejeito nos alteamentos, os mesmos deverão ser ciclados e o “underflow”, que são as partículas mais sólidas e densas que saem na parte inferior do ciclone, é lançado no talude de jusante. Somente serão usados os rejeitos grossos no alteamento, os quais são compactados quando as características de umidade das zona o permitam.

Figura 2.8 - Método de Jusante.



Fonte: Vick, 1981 apud Lozano, 2006.

Devido a esse método realizar o procedimento de compactação dos rejeitos usados no alteamento, faz com que o índice de vazios do solo diminua, conseqüentemente a probabilidade de ocorrer recalques diminui. Portanto tal método é eficiente neste ponto, trazendo assim mais segurança e estabilidade à barragem.

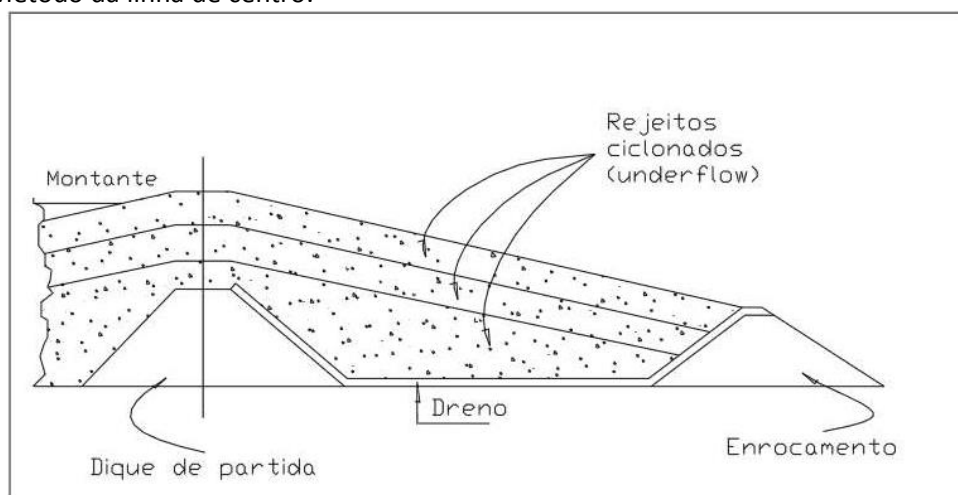
Conforme Lozano (2006), no método de jusante o dique inicial deve ser impermeável e haver uma drenagem interna, composta por filtro inclinado e tapete drenante. O talude de montante é impermeabilizado nos alteamentos. A drenagem interna e a impermeabilização do talude de montante não são obrigatórias se os rejeitos possuem características de alta permeabilidade e ângulo de atrito elevado.

Esse método é eficiente para o controle da linha freática, pois ele prevê a construção de um sistema de drenagem. Possibilita também a compactação de todo o corpo da barragem. Proporciona maior segurança graças aos seus alteamentos controlados, isto é, com composição da fração grossa dos rejeitos de jusante, compactação e sistema de drenagem. Com isso as probabilidade de piping e de liquefação são muito menores (BOSCOV, 2008).

### 2.4.3 Método da Linha de Centro

Este método construtivo apresenta solução adequando os dois métodos apresentados anteriormente, ou seja, uma solução intermediária, embora seu comportamento estrutural se aproxime do método de jusante. A barragem inicia-se com o dique de partida sendo os alteamentos executados mantendo-se inalterado o eixo da barragem (MACHADO, 2007).

Figura 2.9 - Método da linha de centro.



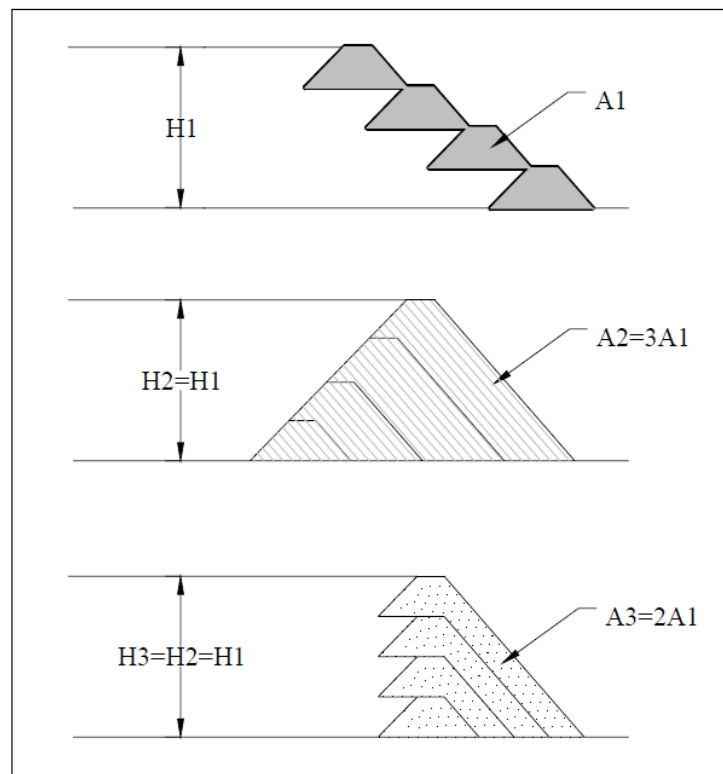
Fonte: Nible (1976 apud Lozano, 2006).

Segundo Espósito(1995), após a construção do dique inicial, o rejeito é lançado perifericamente a montante do mesmo, formando uma praia. O alteamento subsequente é construído lançando aterro sobre o limite da praia e no talude de jusante do maciço de partida, o material usado neste processo pode ser de empréstimo, decape da mina, estéril, ou “underflow” de ciclones. Este método torna possível o controle da linha freática do talude de jusante do maciço, não sendo crítica a localização do nível de água de montante como no método de montante.

#### 2.4.4 Comparativo das Técnicas de Alteamento

O estudo comparativo entre as técnicas de alteamento se faz necessário, já que através dele se tem uma noção de que tipo de barragem deve ter usada em uma determinada situação. Por exemplo, na Figura 2.10 tem-se uma comparação entre os três métodos de alteamentos para uma mesma altura de barragem. Nela pode-se observar que o método de jusante é o que ocupa maior área, portanto utiliza mais material para executar e consequentemente é anti econômico se comparado ao método de montante que usa três vezes menos a quantidade de material.

Figura 2.10 - Comparação de volumes de para as três técnicas de alteamento: (a) Método de montante. (b) Método de Jusante. (c) Método da linha de centro.



Fonte: Vick (1983, apud Lozano, 2006).

A Tabela 2.4 faz a comparação dos três métodos construtivos de barragens de rejeito, usando como parâmetro o tipo de rejeito recomendado, requerimento de descarga dos rejeitos, armazenamento d'água, resistência sísmica, restrições de alteamento, requisitos de alteamento e custo relativo do corpo do aterro.

A Tabela 2.5 apresenta algumas características do método de montante, método de jusante e método de linha de centro juntamente com suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.4 - Comparação entre as características das barragens de rejeito.

	<b>Montante</b>	<b>Jusante</b>	<b>Linha de Centro</b>
<b>Tipo de rejeito recomendado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Mais de 40 % de areia</li> <li>•Baixa densidade de polpa para promover segregação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Qualquer tipo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Areias ou lamas de baixa plasticidade</li> </ul>
<b>Requerimentos de descarga dos rejeitos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Descarga periférica e bom controle de água livre acumulada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•De acordo com o projeto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Descarga periférica, conservando o eixo da barragem</li> </ul>
<b>Armazenamento d'água</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Não recomenda para grandes volumes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Boa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Não recomendado para armazenamento permanente</li> </ul>
<b>Resistência Sísmica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Fraca em áreas de alta sismicidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Boa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Aceitável</li> </ul>
<b>Restrições de alteamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Recomendável menos de 5 a 10 anos m/ano, perigoso mais alto que 15m/ano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Nenhuma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Pouca</li> </ul>
<b>Requisitos de alteamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Solo natural</li> <li>•Rejeitos ou estéril</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Rejeitos ou estéril</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Rejeitos ou estéril</li> </ul>
<b>Custo relativo do corpo do aterro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Baixo Vm *</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Alto (3 Vm)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Moderado (2 Vm)</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Vick (1983 apud Lozano, 2006).

Tabela 2.5 - Vantagens e desvantagens dos três métodos de alteamento.

	<b>Método de Montante</b>	<b>Método de Jusante</b>	<b>Método da Linha de Centro</b>
<b>Método Construtivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Método mais antigo e o mais empregado</li> <li>•Construção do dique inicial e os diques de alteamento periférico com material de empréstimo, estéreis da lavra ou com "underflow" de ciclonação.</li> <li>•Lançamento a partir da crista por ciclonação ou "spigots"</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé</li> <li>•Separação dos rejeitos na crista por meio de hidrociclones.</li> <li>•Dreno interno e impermeabilização a montante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Variação do método de jusante</li> </ul>

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Menor custo</li> <li>•Maior velocidade de alteamento</li> <li>•Utilizado em lugares onde há limitante de área</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Maior segurança</li> <li>•Compactação de todo o corpo da barragem</li> <li>•Pode-se misturar os estéreis da lavra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Variação do volume de “underflow” necessário com relação ao método de jusante</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Baixa segurança devido à linha freática próxima ao talude de jusante, susceptibilidade de liquefação, possibilidade de “piping”.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Necessidades de grandes quantidades de “underflow” (problema nas 1ª etapas).</li> <li>•Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante</li> </ul>

Fonte: Soares (2004 apud Lozano, 2006).

## 2.5 Histórico de Ruptura de Barragens de Rejeito

As barragens de rejeito são responsáveis pelo armazenamento seguro de rejeito de mineração, uma vez ocorrendo a sua ruptura, irá causar danos à sociedade, podendo ocorrer mortes, destruição de vegetação, assoreamento e poluição de rios. Portanto, deve-se ficar atento para que desastres não ocorram, por isso é importante conhecer os principais modos de ruptura de barragens de rejeito que são citadas por Boscov (2008):

1. Capacidade de suporte da fundação insuficiente: quando o solo ou rocha subjacente não tem resistência suficiente, a ruptura ocorre em um plano sob a barragem;
2. Elevação excessiva do nível d'água: pode ocorrer em virtude da precipitação intensa, com conseqüente aumento umidade do material no reservatório, ou por causa do gerenciamento inadequado do ciclone.
3. Galgamento: o nível d'água ultrapassa a crista da barragem, erodindo a crista e o talude de jusante;
4. Piping: a ocorrência de erosão interna tubular no corpo da barragem geralmente a leva à ruptura geral;
5. Velocidade de construção muito elevada: a construção mais rápida do que a projetada pode acarretar no aumento excessivo de pressões neutras no corpo da barragem;
6. Uso de máquinas pesadas acima da pilha e perto da sua borda: a vibração das máquinas pesadas também podem causar liquefação em material granulares fofos e saturados;
7. Escavações no pé do talude; e
8. Liquefação durante sismo: pode ocorrer na fundação de barragens alteadas para montante ou no próprio corpo da barragem construída com rejeitos, por causa da

conjunção de material granular muito poroso e saturado com vibrações intensas que não permitem drenagem.

Tais modos de ruptura citados, servem como base para analisar os históricos de rupturas de barragens de rejeitos citados. A seguir, serão mostrados alguns casos de rupturas no Brasil e no mundo.

- Barahone (Chile): em 1928 um dique com cerca de 60 m de altura rompeu durante um terremoto, matando 54 pessoas e causando prejuízo às propriedades vizinhas. (Barron 1986, apud Espósito, 1995).
- El Cabro (Chile): em 1965 dez barragens de rejeito sofreram liquefação como resultado de terremotos e trezentas pessoas foram mortas quando o rejeito fluiu cerca de 11km vale abaixo (ESPÓSITO, 1995).
- Tesaro (Itália): em 1985 duzentas e cinquenta pessoas morreram quando a barragem de rejeitos rompeu lançando 3 km de lama, água e débris vale abaixo, arrastando a vila de Strava e parte da cidade de Tesaro. É importante ressaltar que este fato ocorreu em questão de minutos (ESPÓSITO, 1995).
- Ruptura da Barragem de Rejeito da Mina do Pico São Luiz: a barragem foi construída com o objetivo de contenção de rejeitos provenientes da Mina do Pico São Luiz, situada imediatamente a montante do ramal Alegria – Fábrica EFMV. Em 1986 a barragem rompeu na região do vertedouro, permanecendo intacto o restante do maciço. Com a ruptura ocorreu a saída brusca e rápida de material da cunha deslizante, já inteiramente fluido, provocando uma série de danos à jusante. A lama do rejeito que desceu a encosta se espalhou por um distância superior a 10 km, interditando a linha da estrada de ferro que passa a jusante da barragem e que teve seu lastro arrastado pela enxurrada de lama, provocando a paralisação do transporte de minério da CRDV por um período significativo. Foi destruída uma pequena ponte de concreto situada 4 km a jusante do local (Parra & Ramos 1991, apud Espósito, 1995).
- Ruptura da Barragem de Rejeitos da Mina de Fernandinho: acidente ocorrido em 1986 na Mina de Fernandinho de propriedade da Itaminas Comércio de Minério S/A, situada no município de Itabrito – MG – Brasil. Tratava-se de uma barragem com cerca de 40 m de altura, que vinha sendo alteada, estando à época do acidente com seu topo cerca de 2 m acima do rejeito contido no reservatório.

Segundo relatos, a ruptura teria ocorrido em duas etapas, sendo a primeira lenta, próxima à ombreira direita, levando máquinas e trabalhadores; a seguir, teria ocorrido um colapso total, dando origem a uma onda de lama (Parra & Lasmar 1991, apud Espósito, 1995).

- Ruptura da Barragem de Fundão: Em 2015 ocorreu o rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão localizado em Mariana-MG. Foi vazado cerca de 60 milhões de metros cúbicos de lama, causando 17 mortes e 2 pessoas consideradas desaparecidas, deixando cerca de 600 desabrigadas. Segundo o engenheiro Geotécnico Norbert Morgenstern o rompimento ocorreu devido a um recuo da ombreira esquerda ser construído de sobre uma mistura de areia e lama e a não apenas areia, além disso ele afirma que ocorreu problemas de drenagem, liquefação, acúmulo de lama onde deveria ter rejeito arenoso e 3 abalos sísmicos registrados horas antes do rompimento (FERREIRA, [s.d]).

Os principais fatores que acarretam a ruptura de barragens de rejeitos são:

Tabela 2.6 - Principais fatores que acarretam rupturas de barragens de rejeito.

<b>Modo de Ruptura</b>	<b>Característica</b>	<b>Consequências no Barramento</b>
Percolação	Passagem da água pelo maciço e fundação	Perda de resistência na fundação do barramento
Piping	Erosão interna proveniente do nível do lençol freático estar muito próximo do talude da jusante da barragem	A água que se movimenta através da barragem, ou de suas fundações, pode resultar na formação de uma brecha, a mesma inicia como um poro em um ponto qualquer da barragem e este poro cresce, por erosão, para todos os lados, até ocorrer o colapso
Fenômenos Naturais	Terremotos e chuvas torrenciais	A estrutura não suporta a carga excessiva e/ou impacto causado na base da estrutura
Galgamento	Nível e volume d'água ultrapassam o limite operacional da barragem	Transbordamento e colapso da estrutura
Liquefação	Diretamente relacionado ao comportamento cisalhante de solos granulares	Quando os solos estão saturados e submetidos a carregamentos não drenados, podem apresentar grande redução da resistência ao cisalhamento devido ao acréscimo das poropressões
Defeitos na Fundação	As fundações devem ter estabilidade sendo capazes de resistir as condições de carregamentos normais de projeto, bem como carregamentos extremos.	Fundações com resistência não satisfatória a tensões ou que apresentem ligações compostas de materiais como argila, por exemplo, são vulneráveis ao deslizamento. A utilização de materiais impermeáveis em juntas de ligação pode também contribuir no deslizamento, se a infiltração por meio desses materiais não for monitorada para controle.
Falha Estrutural	São falhas de projeto, construção ou operação	Danos estruturais

Fonte: Carvalho [s.d].

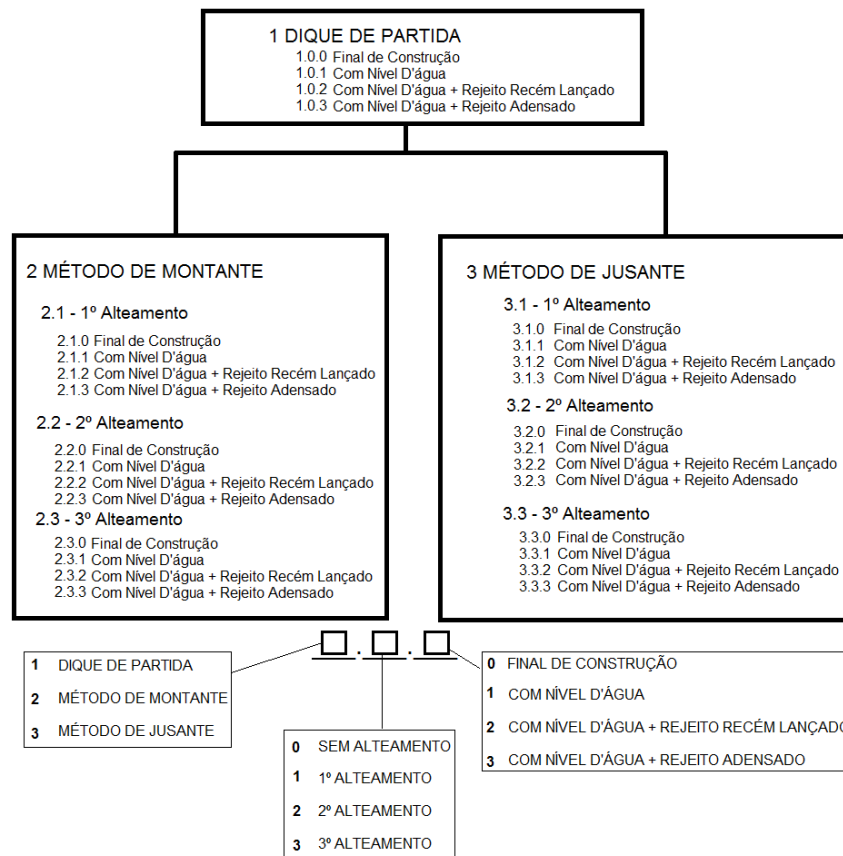
### 3 MATERIAS E MÉTODOS

Para simular os processos de alteamento pelo método de montante e jusante, e realizar as análises de percolação, estabilidade de talude e tensão deformação, foi usado o pacote Geostudio 2012. O Geostudio contém um pacote de aplicativos, os quais tem um grande poder de manipulação de dados que permitem realizar simulações e modelagens geotécnicas muito próximas das condições de campo. O seu pacote possui 8 módulos, porém foram utilizados três, os quais são citados a seguir:

- SEEP – Para análise de percolação pelo método dos elementos finitos;
- SLOPE – Para análise de estabilidade de talude pelo método do equilíbrio limite;
- SIGMA – Para análise de tensão deformação pelo método dos elementos finitos.

Para esse trabalho, foi analisado e comparado dois métodos de alteamento, montante e jusante, sendo feito três alteamentos para cada método. Com o objetivo de analisar detalhadamente cada etapa, desde o dique de partida com nível d'água até o terceiro alteamento de cada método, o processo foi dividido em 28 fases, as quais estão indicadas na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Divisão das 28 etapas analisadas



Como mostrado na Figura 3.1 acima, cada uma das 28 etapas foi numeradas com 3 dígitos. O primeiro indica se é dique de partida, método de montante ou método de jusante. O segundo, se é sem alteamento, 1º, 2º ou 3º alteamento, e o terceiro dígito indica se a análise foi feita no final da construção, com nível d'água, com nível d'água + rejeito recém lançado ou com nível d'água + rejeito adensado.

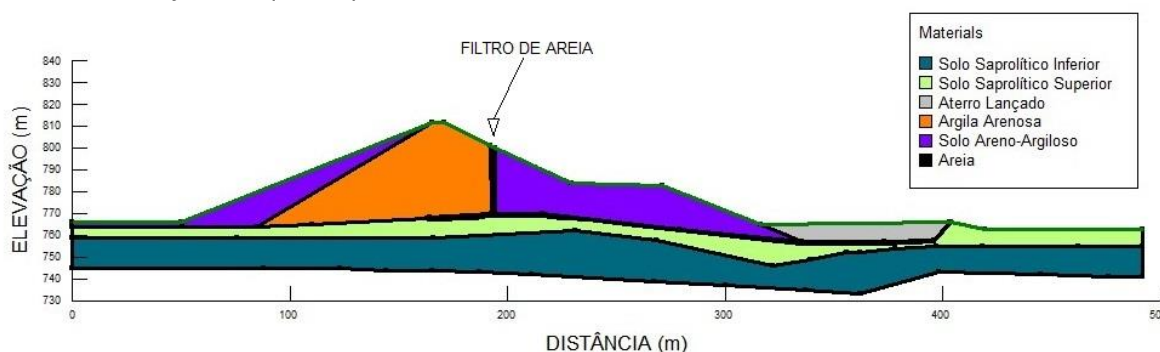
Para análise de estabilidade de taludes e análise de tensão-deformação foram feitas para as 28 etapas, já as análises de percolação não foram realizadas para as fases de final de construção.

A partir do dique de partida, representado pela etapa 1 da Figura 3.1, foram realizados os alteamentos, os quais foram feitos pelo método de montante (análise 2) e jusante (análise 3).

### 3.1 Arranjo das Barragens Estudadas

O objetivo do estudo em questão é comparar os métodos de alteamento por montante e jusante sob o ponto de vista geotécnico, portanto optou-se por realizar os procedimentos com um arranjo de barragem já conhecido. O arranjo do dique de partida selecionado para realizar os alteamentos foi retirado de Costa (2009) e está representado na Figura 3.2.

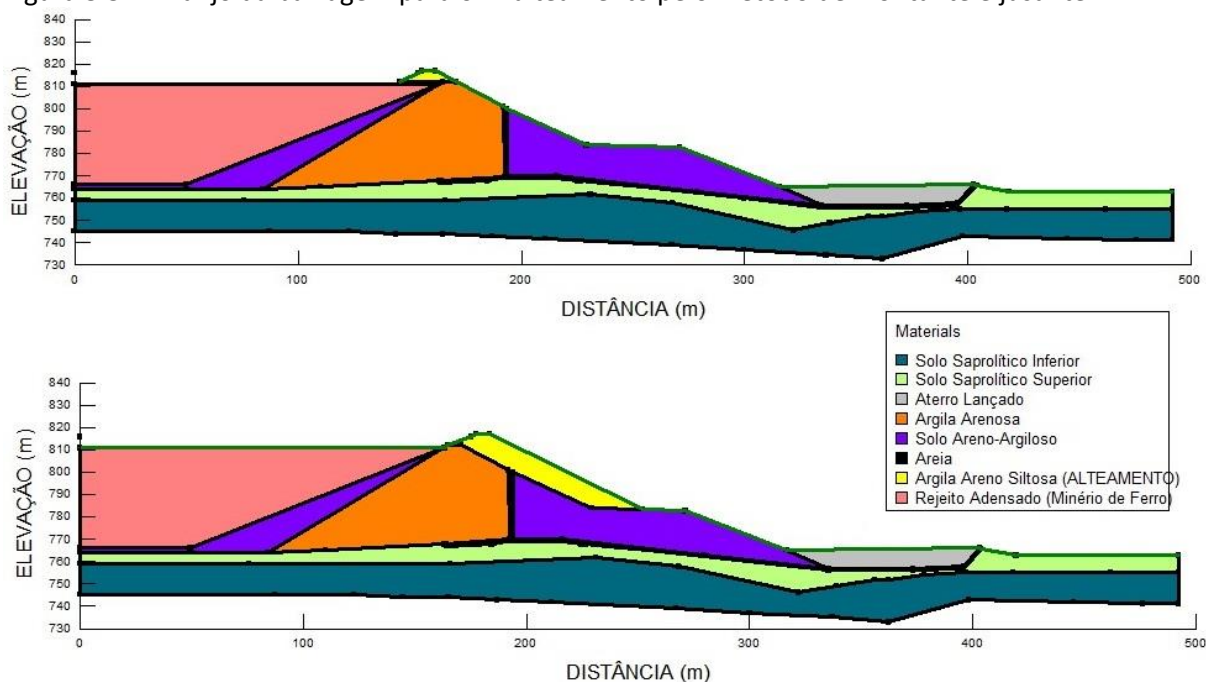
Figura 3.2 - Arranjo do dique de partida



Fonte: Adaptado de Costa (2009).

Foram realizados 3 alteamentos para cada método, sendo que cada alteamento foi realizado com uma elevação 5 metros em ambos os casos, sendo assim um procedimento coerente para realizar a comparação, pois a cota para os dois métodos é a mesma a cada final de alteamento. A Figura 3.3 representa o arranjo da barragem após realizar 1 alteamento para cada método, ambos na cota de 817m.

Figura 3.3 - Arranjo da barragem para o 1º alteamento pelo método de montante e jusante



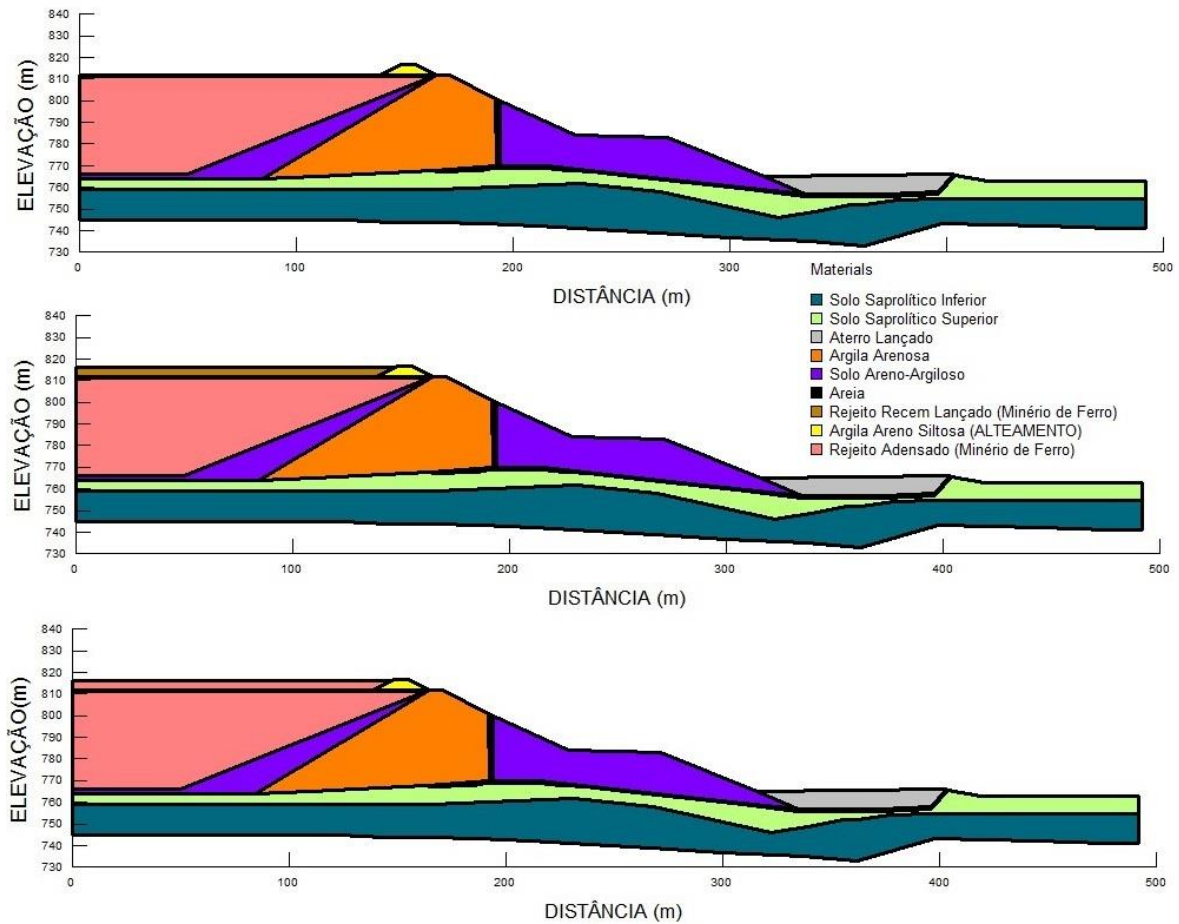
Considerando a altura da camada de cada alteamento no valor de 5 metros, as cotas de elevação para cada fase de alteamento estão estabelecidas na Tabela 3.1, sendo o nível d'água máximo adotado com 80 cm a menos da altura máxima da barragem.

Tabela 3.1 - Cota de elevação e nível d'água de cada fase de alteamento

	Elevação (m)	Altura da Camada de Alteamento (m)	Nível D'água Máximo (m)
Dique de Partida	812	-	811,2
1º alteamento	817	5	816,2
2º alteamento	822	5	821,2
3º alteamento	827	5	826,2

Os rejeitos foram lançado até o nível d'água máximo de cada etapa de alteamento, na Figura 3.4 mostra um exemplo dos os arranjos das barragens nas condições "Com Nível D'água", "Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado" e "Com Nível D'água + Rejeito Adensado" para o primeiro alteamento pelo método de montante, ou seja, as análises 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3 descritas na Figura 3.1.

Figura 3.4 - Arranjo das etapas analisadas para o primeiro alteamento pelo método de montante



### 3.2 Parâmetros Geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos dos materiais usados na barragem são especificados neste tópico, onde:

$kh$  = Coeficiente de permeabilidade horizontal (m/s);

$kv$  = Coeficiente de permeabilidade vertical (m/s);

$kv/kh$  = anisotropia;

$\gamma_n$  = Peso específico natural ( $Kn/m^3$ );

$\nu$  = Coeficiente de poisson;

$c'$  = Coesão efetiva (kpa);

$\phi$  = ângulo de atrito ( $^\circ$ );

$n$  = porosidade;

$e$  = índice de vazios.

Tendo como base Costa (2009), para a fundação da barragem foram usados 3 tipos de materiais, o aterro, solo saprolítico inferior e solo saprolítico superior, os parâmetros geotécnicos deles são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros geotécnicos dos materiais da fundação.

Solo	Região	Kh (m/s)	Kv/Kh	$\gamma_n$ (Kn/m <sup>3</sup> )	E (kpa)	v	c' (kpa)	$\phi$ (°)	n
Solo Saprolítico Inferior	Fundação	1E-08	1	17,36	55676	0,25	13,54	29,46	0,4
Solo Saprolítico Superior	Fundação	1E-07	1	16,27	31550	0,32	18,33	21,78	0,45
Aterro Lançado	Fundação	1E-06	1	19	3900	0,3	10	27,3	0,5

Fonte: Costa (2009).

Já para na região do núcleo original foi usado uma argila arenosa e nos espaldares um solo silte areno-argiloso, com seus parâmetros citados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Parâmetros geotécnicos do maciço e espaldares.

Solo	Região	Kh (m/s)	Kv/Kh	$\gamma_n$ (Kn/m <sup>3</sup> )	E (kpa)	v	c' (kpa)	$\phi$ (°)	n
Argila Arenosa	Núcleo Original	1E-07	0,5	19,85	37200	0,25	30	31	0,46
Silte Areno-Argiloso	Espaldares	1E-06	0,5	19,01	7800	0,32	6	31,83	0,5

Fonte: Costa (2009).

Para o sistema de drenagem da barragem, foi usado um filtro feito com areia, com seus parâmetros geotécnicos mostrados na tabela a seguir.

Tabela 3.4 - Parâmetros geotécnicos do filtro.

Solo	Região	Kh (m/s)	Kv/Kh	$\gamma_n$ (Kn/m <sup>3</sup> )	E (kpa)	v	c' (kpa)	$\phi$ (°)	n
Areia	Filtros	0,00019	1	20	6000	0,33	0	30	0,38

Fonte: Costa (2009).

O material usado para todos os alteamentos foi o mesmo do terceiro alteamento da Barragem de Itabiruçu, citada por Costa (2009), sendo este material uma argila areno siltosa, onde seus parâmetros geotécnicos são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetros geotécnicos do material usado nos alteamentos.

Solo	Região	Kh (m/s)	Kv/Kh	$\gamma_n$ (Kn/m <sup>3</sup> )	E (kpa)	v	c' (kpa)	$\phi$ (°)	n
Argila Areno Siltosa	Alteamento	8,1E-09	0,5	18,8	3750	0,3	18	33,2	0,48

Fonte: Costa (2009).

A barragem em questão é destinada à contenção de rejeitos provenientes do minério de ferro, portanto as características geotécnicas usadas nesse estudo são dos rejeitos de minério de ferro. Como os rejeitos mudam suas características geotécnicas de acordo com que vai se adensando, logo foi considerado por aproximação dois tipos diferentes de parâmetros geotécnicos do rejeito, um quando ele é recém lançado e outro adensado, como mostra a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Parâmetros geotécnicos do rejeito.

	Kh (m/s)	Kv/Kh	$\gamma_n$ Kn/m <sup>3</sup>	E (kpa)	v	c' (kpa)	$\phi$ (°)	n	e
Recém Lançado	3,30E-05	0,3	34	22120	0,3	5	29,5	0,8611	6,2
Adensado	1,90E-08		39	57050			36	0,5	1
Fonte	Boscov (2008)	Rezende (2013)	Boscov (2008)	Rezende (2013)	Rezende (2013)	Rezende (2013)	Hernandez (2002)	Boscov (2008)	Boscov (2008)

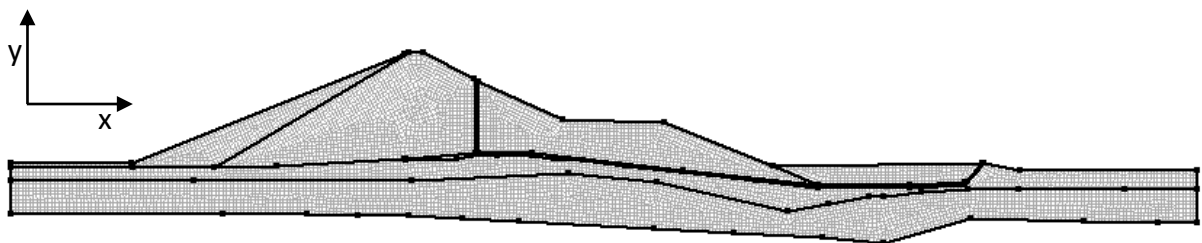
Nas etapas analisadas, os rejeitos foram lançados até a cota do nível d'água, mostradas na Tabela 3.1.

### 3.3 Metodologia para Análises de Percolação

Para a análise de percolação foi usado o módulo SEEP/W do Geostudio 2012, nele foi utilizado um modelo somente saturado, onde é informado a anisotropia e a condutividade hidráulica de cada material usado na barragem e foi considerada a análise do tipo “curso estável”, onde as pressões e taxas de fluxo de água quando atingem um valor estável, permanecerão nesse estado para sempre.

A malha usada nas análises de fluxo e de tensões por Costa (2009), foi de 1642 nós e 2896 elementos, com intuito de obter resultados mais precisos, a malha de elementos finitos usada neste trabalho nas análises de percolação e de tensão-deformação, foi refinada em relação à de Costa (2009), resultando numa malha com 8179 nós e 7909 elementos de 1,5 m. Ressaltando que o arranjo do dique de partida e a fundação escolhido para este trabalho foi o mesmo de Costa (2009).

Figura 3.5 - Malha de elementos finitos



O nível d'água é lançado criando uma condição de fronteira, informando as cotas do reservatório estabelecidas na Tabela 3.1. Com isso o módulo SEEP é capaz de gerar os valores de poropressões, gradientes e vazões para cada situação analisada, tais valores permitem realizar comparações entre os métodos de alteamento de acordo com cada etapa de alteamento realizada.

O estudo de percolação é utilizado como base para todas as análises de tensão-deformação e estabilidade de taludes, bem como na realização das análises de rebaixamento rápido acoplado com análises de estabilidade de taludes.

Na condição de rebaixamento rápido do reservatório usou análise do tipo “passageiro”, na qual optou-se por um período de 30 dias para que o reservatório rebaixasse totalmente.

Sendo que o nível d'água é adicionado nas condições de contorno de acordo as cotas estabelecidas na Tabela 3.1.

### 3.4 Metodologia para Análises de Tensão-Deformação

Nas análises de tensão-deformação, o módulo SIGMA do Geostudio 2012 foi usado, nele as análises escolhidas no programa foram do tipo tensão/deformação, parâmetros de tensão total e modelo de comportamento do material do tipo elasto-plástico, tal modelo exige os seguintes parâmetros de cada material usado na barragem: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coesão efetiva de pico, peso específico do solo e ângulo de atrito efetivo de pico.

O Geostudio 2012 permite fazer análises acopladas, ou seja, permite clonar uma análise, alterar os dados da cópia e acoplá-la a outra (parent). Essa ferramenta foi usada nesse trabalho, sendo que a análise clonada foi a de análise de percolação e ela foi acoplada a outras, entre elas a análise de tensão deformação.

Assim como na análise de percolação, a análise de tensão deformação também foi realizada com uma malha de elementos finitos de 8179 nós e 7909 elementos, com o intuito de obter resultados mais exatos possíveis. Foi fixado em X e Y na borda inferior da barragem e apenas em X nas bordas laterais conforme a Figura 3.6.

Para as situações "com nível d'água" (Figura 3.6), é adicionado uma carga hidrostática através de uma condição de contorno. Já nas demais, não há essa necessidade de adicionar, já que o nível d'água está na mesma cota do rejeito (Figura 3.7).

Figura 3.6 - Exemplo de situação do tipo "com nível d'água" com a carga hidrostática inserida

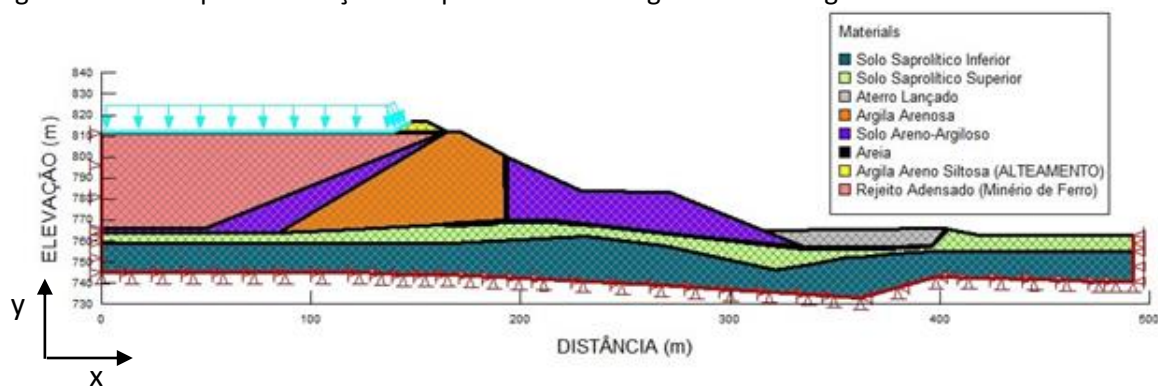
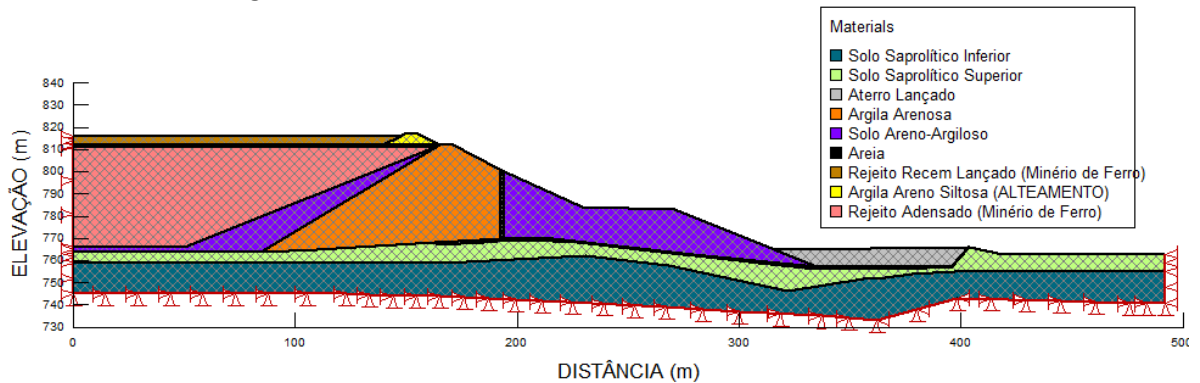


Figura 3.7 - Exemplo de situação do tipo “com nível d’água + rejeito recém lançado” na mesma cota do nível d’água



Inserindo tais informações, o SIGMA/W consegue informar valores de recalques diferenciais e totais para cada situação analisada, permitindo assim, fazer comparações entre os métodos construtivos de barragens de rejeito.

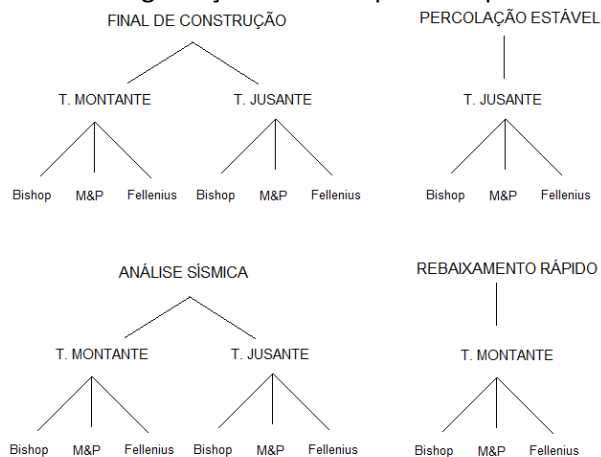
### 3.5 Metodologia para Análises de Estabilidade de Taludes

Nas análises de estabilidade de taludes, os parâmetros geotécnicos dos materiais foram os mesmos, ou seja, não foram realizados outros tipos de ensaios para a obtenção de novos parâmetros para os casos em que se tenha ruptura não drenada ou não consolidado.

Para realizar as análises de estabilidade de taludes foi usado o módulo SLOPE/W do Geostudio 2012, para isso o modelo dos materiais usados foi o Mohr-Coulomb, onde é informado o peso específico, ângulo de atrito e coesão de cada material.

Foi calculado o fator de segurança dos taludes, para 4 situações diferentes e por 3 tipos de métodos, Fellenius, Bishop e Mongenstern &Prince, como o fluxograma abaixo.

Figura 3.8 - Fluxograma do fatores de segurança calculados para os tipos de situações



Os taludes escolhidos para calcular o fator de segurança, assim como os valores mínimos permitidos do fator de segurança, foi de acordo com Eletrobrás (2003), conforme a Tabela 2.2.

O fator de segurança para rebaixamento rápido foi calculado apenas para as etapas do tipo “com nível d’água”, que são elas: 1.0.1, 2.1.1, 2.2.1, 2.3.1, 3.1.1, 3.2.1, 3.3.1, as quais tem o nível d’água acima da cota dos materiais. Nas demais etapas não foi calculado pois o nível d’água se encontra na mesma cota dos rejeitos.

Para calcular o fator de segurança para análise sísmica foi adicionado uma carga sísmica, onde é informado um coeficiente na horizontal e vertical, onde foi usado 0,05 e 0,03 respectivamente, conforme estabelecido em Eletrobrás (2003).

Em todas as análises de estabilidade de talude, foram feitas tomando como base a análise de percolação feita no SEEP, exceto o FS para final de construção, já que o mesmo é analisado no momento em que o aterro já foi concluído, porém o reservatório ainda não está cheio.

O fator de segurança para a percolação estável, é feito na condição de operação normal da barragem, então as condições de fronteira para esta análise são feitas com base nos resultados da análise de percolação da barragem feita no SEEP/W.

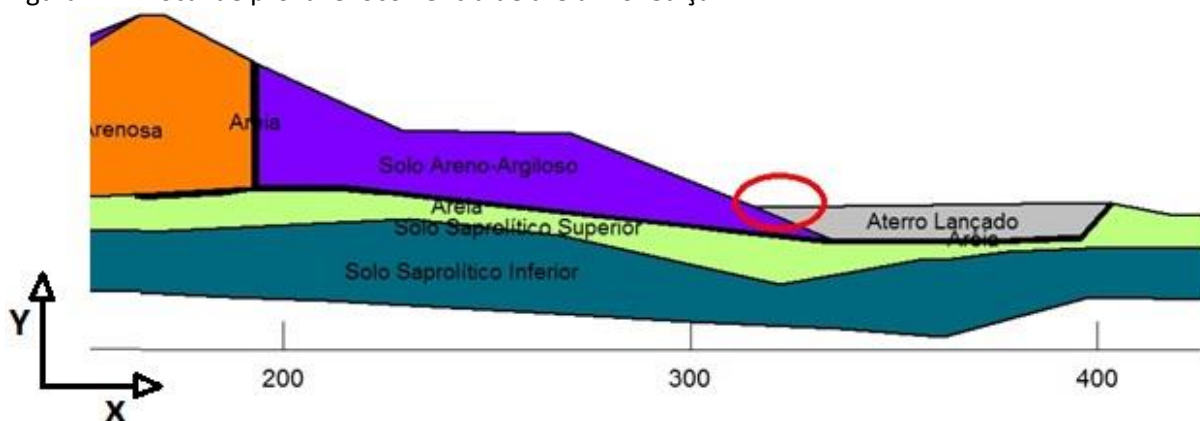
## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Análises de Percolação**

Nas barragens um dos problemas que podem ocorrer na percolação é o piping e a areia movediça. Como os gradientes hidráulicos são os causadores desses dois fenômenos, então foram obtidos seus valores para analisar possíveis ocorrências de areia movediça e piping no corpo da barragem.

O fenômeno de areia movediça é causado por gradientes hidráulicos na direção Y, com fluxo ascendente, ou seja, de baixo para cima. Portanto foram extraídos os valores dos gradientes máximos na direção Y para analisar a possível ocorrência desse fenômeno, os quais são mostrados na Tabela 4.1. A região que está circulada em vermelho na Figura 4.1, é o local mais favorável para a ocorrência de areia movediça, pois é no pé do talude e como nele há um filtro de areia próximo, o fluxo d’água nessa região é alto e caso ele seja direcionado de baixo para cima pode resultar em um estado de areia movediça.

Figura 4.1 - Local de provável ocorrência de areia movediça.



Os gradientes na direção X, expostos na

Tabela 4.1, foram obtidos para analisar a possível ocorrência de piping no corpo da barragem. Porém para gradiente na direção X foram extraídos dois resultados, o gradiente máximo e o valor do gradiente localizado próximo ao filtro de areia, pois é uma região favorável à ocorrência de piping. Esse local está circulado na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Local próximo ao filtro, onde foi retirado os valores dos gradientes em X

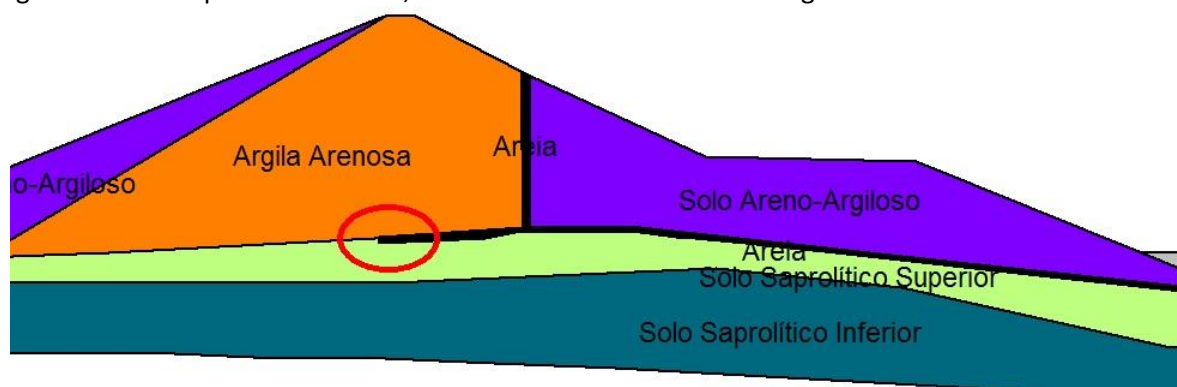


Tabela 4.1 - Resultados das análises de percolação

**Gradiente Crítico = 0,9**

DIQUE DE PARTIDA							
Número da Etapa	Gradiente Y	Gradiente X		Vx (m/s)	Q (m³/s)		
		MAX	Filtro				MAX
1.0.1	1,0864	2	2,2388	8,67E-07	4,75E-06		
1.0.2	1,0852	2,2	2,2365	8,66E-07	4,74E-06		
1.0.3	0,7276	1,4	2,4983	6,27E-07	3,47E-06		
3º ALTEAMENTO							
Número da Etapa	Método de Alçamento	Gradiente Y	Gradiente X		Vx (m/s)	Q (m³/s)	
			MAX	Filtro			
COM NÍVEL D'ÁGUA							
2.1.1	Montante	0,55629	1	4,5637	4,04E-07	2,18E-06	
3.1.1	Jusante	0,7612	1,5	4,8075	6,65E-07	3,71E-06	
COM NÍVEL D'ÁGUA + REJEITO RECÉM LANÇADO							

2.1.2	Montante	0,55628	1	3,8708	4,04E-07	2,18E-06
3.1.2	Jusante	0,76066	1,5	3,6069	6,64E-07	3,70E-06
<b>COM NÍVEL D'ÁGUA + REJEITO ADENSADO</b>						
2.1.3	Montante	0,53011	1	4,4096	3,82E-07	2,06E-06
3.1.3	Jusante	0,59773	1	5,0346	4,76E-07	2,62E-06
<b>2º ALTEAMENTO</b>						
Número da Etapa	Método de Alçamento	Gradiente Y	Gradiente X		Vx (m/s)	Q (m³/s)
		MAX	Filtro	MAX		
<b>COM NÍVEL D'ÁGUA</b>						
2.2.1	Montante	0,5521	1	3,1714	3,92E-07	2,11E-06
3.2.1	Jusante	0,64977	1	4,2539	5,33E-07	2,97E-06
<b>COM NÍVEL D'ÁGUA + REJEITO RECÉM LANÇADO</b>						
2.2.2	Montante	0,55209	1	2,7028	3,92E-07	2,11E-06
3.2.2	Jusante	0,64974	1	3,5556	5,33E-07	2,97E-06
<b>COM NÍVEL D'ÁGUA + REJEITO ADENSADO</b>						
2.2.3	Montante	0,53866	1	3,2514	3,81E-07	2,05E-06
3.2.3	Jusante	0,60871	1	4,1026	4,87E-07	2,71E-06
<b>3º ALTEAMENTO</b>						
Número da Etapa	Método de Alçamento	Gradiente Y	Gradiente X		Vx (m/s)	Q (m³/s)
		MAX	Filtro	MAX		
<b>COM NÍVEL D'ÁGUA</b>						
2.3.1	Montante	0,5686	1	2,5988	3,99E-07	2,15E-06
3.3.1	Jusante	0,65455	1	4,2765	5,32E-07	3,01E-06
<b>COM NÍVEL D'ÁGUA + REJEITO RECÉM LANÇADO</b>						
2.3.2	Montante	0,56859	1	2,2165	3,99E-07	2,15E-06
3.3.2	Jusante	0,65453	1	4,2771	5,32E-07	3,01E-06
<b>COM NÍVEL D'ÁGUA + REJEITO ADENSADO</b>						
2.3.3	Montante	0,56031	1	2,7287	4,01E-07	2,11E-06
3.3.3	Jusante	0,62937	1	5,1709	5,02E-07	2,83E-06

Os valores de vazão e velocidade na direção X, mostrados na Tabela 4.1, também foram para cada situação analisada. Seus resultados mostram que do método de montante para o de jusante, não se teve uma diferença grande entre seus valores. Portanto para as vazões e as velocidades na direção X, nenhum método de alçamento sobressaiu ao outro.

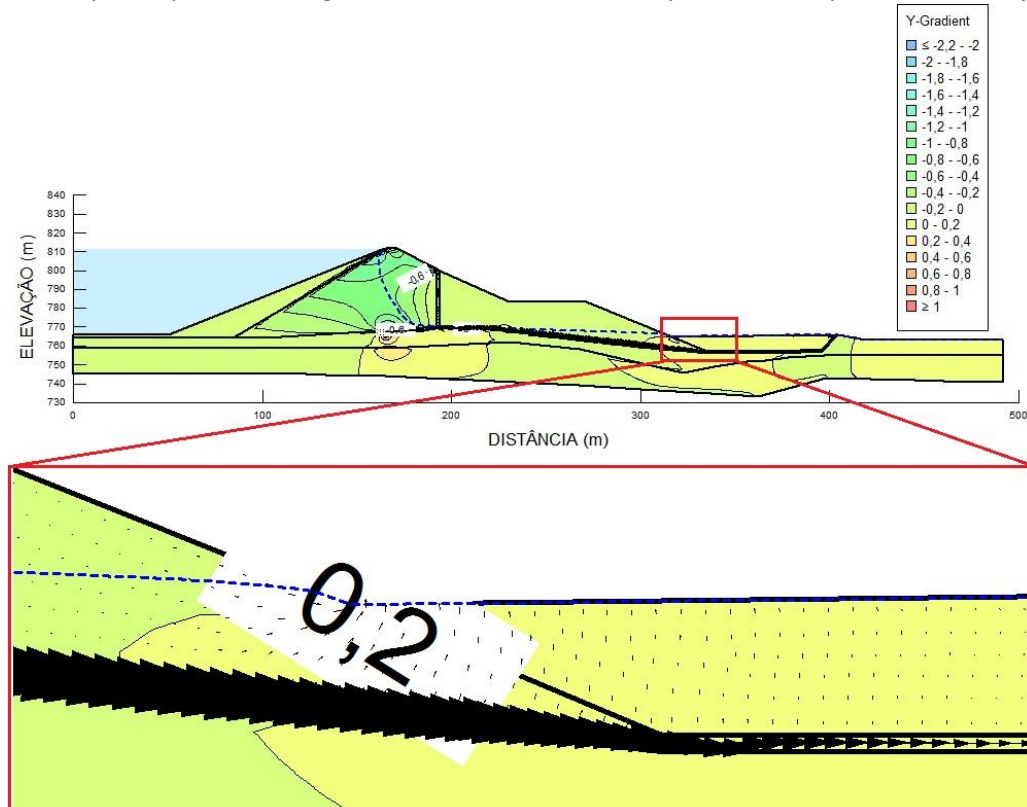
O valor do gradiente crítico apresentado na Tabela 4.1, foi calculado para os materiais próximos ao local da possível ocorrência de areia movediça que são o aterro lançado e solo areno-argiloso, como eles possuem peso específico praticamente iguais (Tabela 3.2 e Tabela 3.3), logo o valor do gradiente crítico, calculados com a equação 1, deram iguais e por isso foi considerado o valor de 0,9 para todas as situações.

Sabe-se que para ocorrer o fenômeno de areia movediça, o gradientes em  $y$  devem ter valores iguais ou superiores ao gradiente crítico, ao observar seus valores na Tabela 4.1, percebe-se que todos os gradientes para método de montante e jusante dão inferiores ao crítico, portanto, em nenhum dos métodos de alteamento ocorrem o fenômeno de areia movediça.

O estado de areia movediça é típico de areias finas as quais tem coeficiente de permeabilidade de  $10^{-5} m/s$  (Tabela 2.1). O local que pode ocorrer o estado de areia movediça é no aterro lançado ou no solo areno argiloso (Figura 4.1), que de acordo a Tabela 3.2 e Tabela 3.3, Tabela 3.2 - Parâmetros geotécnicos dos materiais da fundação. seus coeficientes de permeabilidade são iguais e com valor de  $10^{-6} m/s$ , logo eles não são uma areia fina, porém é um material com coeficiente de permeabilidade próximo de uma areia fina, portanto caso os gradientes, neste local, resultem em valores iguais ou maiores ao do gradiente crítico, há possibilidade de ocorrência de areia movediça.

De acordo com a Tabela 4.1, no dique de partida os gradientes máximos em  $y$  estão dando valores maiores que o gradiente crítico na situação “com nível d’água” e “com nível d’água + rejeito adensado”, porém este valor máximo não é no local onde pode ocorrer o estado de areia movediça, nele o gradiente é em torno de 0,2 como mostra a Figura 4.3.

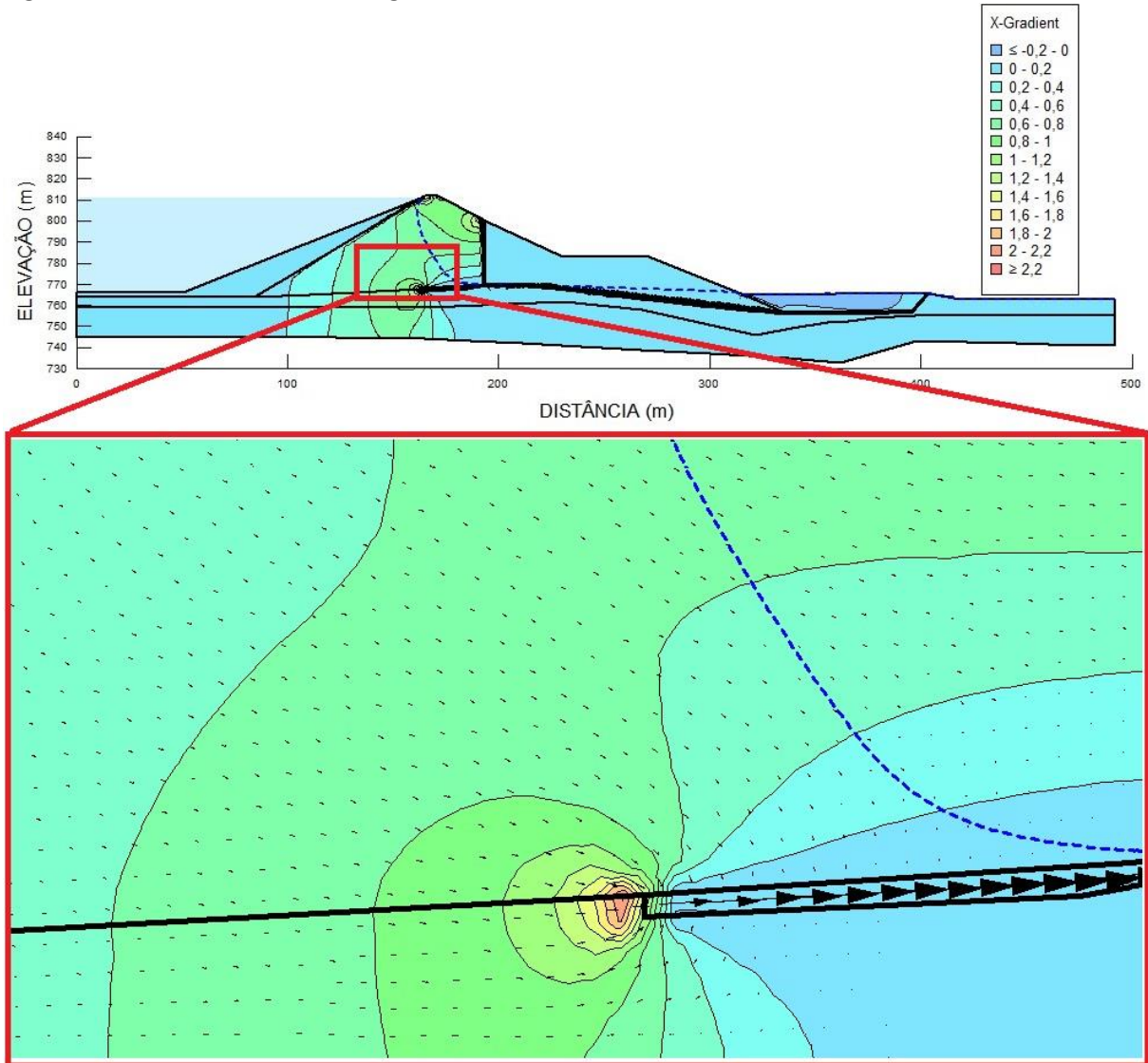
Figura 4.3 - Dique de partida com gradientes atuando de baixo para cima no pé do talude de jusante



A Figura 4.3 mostra que a direção do fluxo é favorável a ocorrência de areia movediça, já que ele é ascendente, porém o valor do gradiente de 0,2 é inferior ao crítico, portanto também não resulta em estado de areia movediça no dique de partida.

A região circulada na Figura 4.2 é favorável para a ocorrência de piping pois o fluxo está direcionado para ela (Figura 4.4) já que ali onde começa o filtro de areia.

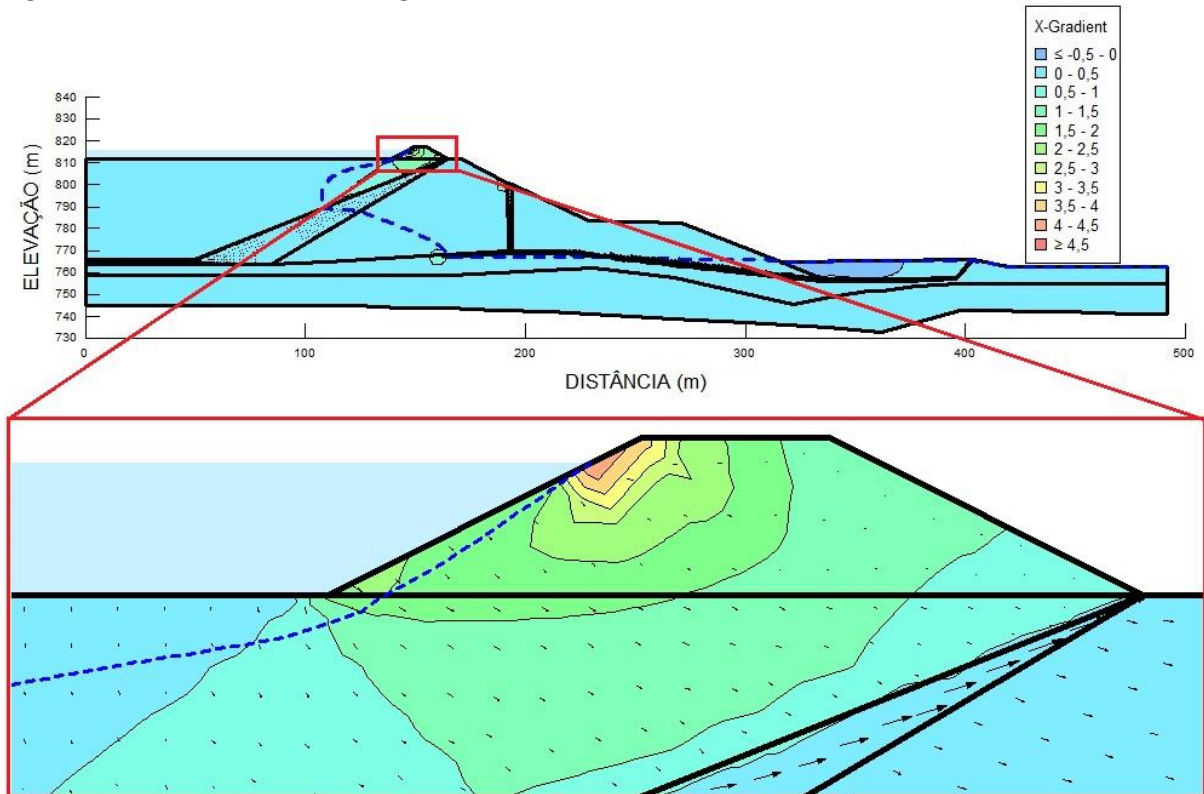
Figura 4.4 - Fluxo direcionado a região do filtro



De acordo com a Figura 4.4 o gradiente aumenta de acordo com que vai se aproximando do filtro de areia, podendo ocasionar uma perda de resistência nessa região ocorrendo erosão no local, o que provoca ainda maior concentração de fluxo para a região, surgindo maior erosão e assim progressivamente. Com erosão progressiva, também chamada de piping, pode ocorrer o arrastes dos dois materiais que estão ao redor do filtro para o seu interior, entupindo-o e perdendo a sua função que é a passagem de água e controle de percolação na barragem.

Os valores de gradientes máximos na direção x mostrados na Tabela 4.1, estão sempre localizados no topo do talude de montante conforme a Figura 4.5.

Figura 4.5 - Local onde ocorre os gradientes máximos em X.



Os gradientes máximos deram entre 2 e 5, esses valores altos, assim como no filtro de areia, podem ocasionar em erosão progressiva no local demonstrado na Figura 4.5.

A situação da Figura 4.4, ocorre em todos os itens da Tabela 4.1, mudando apenas o valor do gradiente, sendo que em situações com maiores gradientes tem maior chance de ocorrer piping, logo onde se tem maior chance é no dique de partida que apresenta valores de gradientes no filtro de até 2,2 conforme Tabela 4.1.

Como visto na Tabela 4.1, os valores de gradientes, vazões e velocidades foram semelhantes para o método de montante e jusante, então para esses parâmetros de análise de percolação, os métodos de alteamento tiveram resultados próximos. No entanto a ocorrência de piping é provável que ocorra na região do filtro e no topo do talude de montante em todas as situações da Tabela 4.1, tanto no método de montante quanto no de jusante, pois os gradientes na região do filtro deram entre 1 e 2,2 e fluxo está sendo direcionado a ela e no topo do talude de montante deram os gradientes máximos.

## 4.2 Análises de Tensão-Deformação

Para realizar as análises dos resultados de cada etapa, foi criada uma tabela com os recalques máximos, que são os deslocamentos verticais máximos sofridos em todo o corpo da barragem. Na Tabela 4.2, tem uma linha que mostra os recalques totais e outra que mostra sua variação. A variação representa o tanto que recalcou de um alteamento para o outro, já os recalques totais, mostram o recalque acumulado, ou seja, a soma dos recalques.

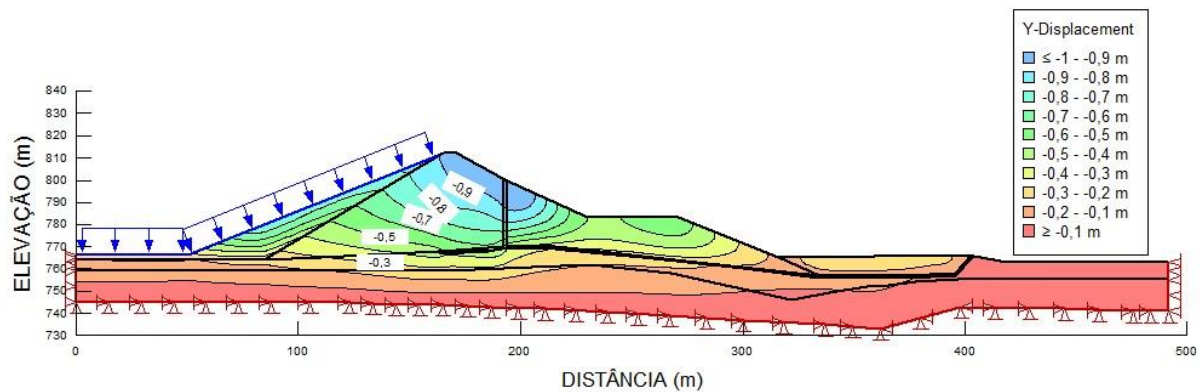
Nas linhas da Tabela 4.2 foi colocado o método de montante ao lado do de jusante, com intuito de comparar os métodos construtivos, e nas colunas suas respectivas etapas. Sendo que o primeiro item, dique de partida, é uma etapa feita tanto para o método de montante quanto para o de jusante.

Tabela 4.2 - Recalques máximos em cada etapa

<b>DIQUE DE PARTIDA</b>					
Recalque Máximo (m)					
		Final de Construção	Com Nível D'água	Nível D'água + Rejeito Recém Lançado	Nível D'água + Rejeito Adensado
DIQUE DE PARTIDA		1,0364	0,99	3,23	2,65
<b>1º Alteamento</b>					
Recalque Máximo (m)					
		Final de Construção	Com Nível D'água	Nível D'água + Rejeito Recém Lançado	Nível D'água + Rejeito Adensado
Mét. de Montante	TOTAL	2,7214	2,8181	3,0708	3,1254
	Variação	1,685	1,8281	-0,1592	0,4754
Mét. de Jusante	TOTAL	5,4751	5,4373	5,429	5,4502
	Variação	4,4387	4,4473	2,199	2,8002
<b>2º Alteamento</b>					
Recalque Máximo (m)					
		Final de Construção	Com Nível D'água	Nível D'água + Rejeito Recém Lançado	Nível D'água + Rejeito Adensado
Mét. de Montante	TOTAL	3,2041	3,3184	3,6635	3,7409
	Variação	0,4827	0,5003	0,5927	0,6155
Mét. de Jusante	TOTAL	18,82	18,577	17,919	17,1862
	Variação	13,3449	13,1397	12,49	11,736
<b>3º Alteamento</b>					
Recalque Máximo (m)					
		Final de Construção	Com Nível D'água	Nível D'água + Rejeito Recém Lançado	Nível D'água + Rejeito Adensado
Mét. de Montante	TOTAL	3,7776	3,9971	4,6524	4,7671
	Variação	0,5735	0,6787	0,9889	1,0262
Mét. de Jusante	TOTAL	34,335	33,935	32,982	32,908
	Variação	15,515	15,358	15,063	15,7218

Nas análises de tensão-deformação, a diferença entre a situação de final de construção para a com nível d'água é que nesta última é adicionado um carregamento na barragem que representa força a água exerce na barragem. Portanto esse carregamento provocado pelo levantamento do nível d'água faz com que aumentem as tensões sobre a barragem, resultando em recalques iguais ou maiores que no final da construção como mostra os valores de recalques máximos da Tabela 4.2. A Figura 4.6 mostra o valor e localização dos recalques na análise 1.0.1 (dique de partida com nível d'água).

Figura 4.6 - Valores e localizações dos recalques no dique de partida com nível d'água



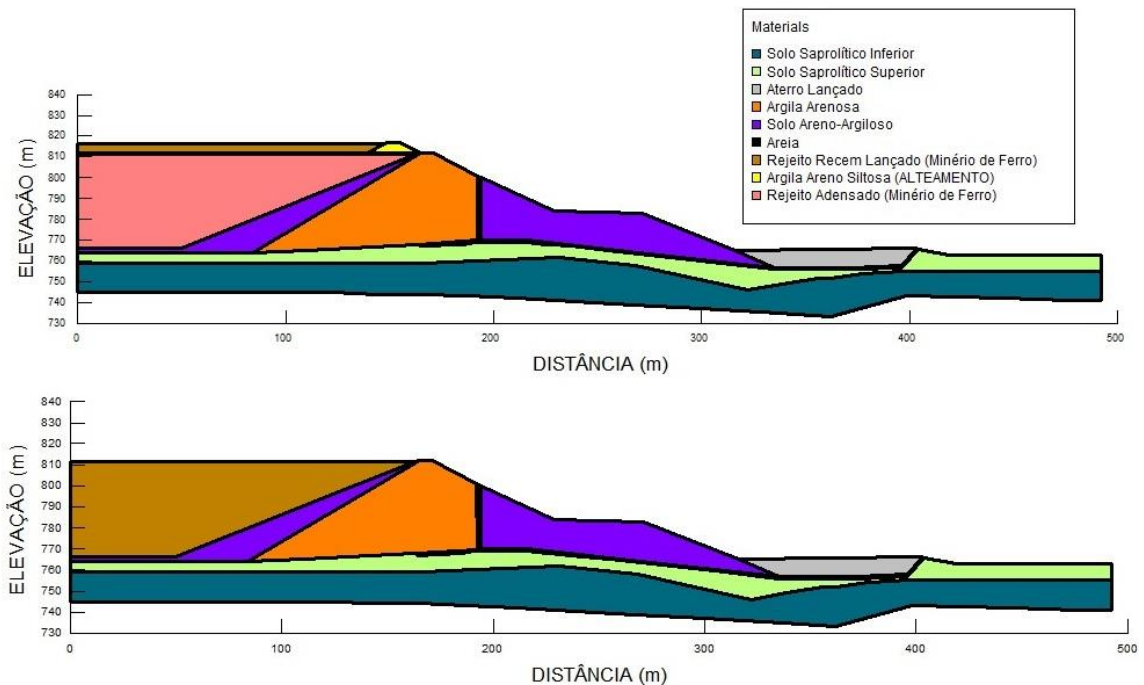
Logo no dique de partida, percebe-se que os recalques máximos do final da construção para a etapa com nível d'água permanecem praticamente iguais, porém ao ser adicionado o rejeito recém lançado, o recalque máximo passa de 0,99 para 3,23 metros, isso se deve ao fato de que o rejeito recém lançado, conforme seus parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 3.6, é um material com índices de vazios alto, além disso, possui um módulo de elasticidade baixo de 22120 kPa, essas características fazem com que o material se deforme, aumentando assim o recalque ao ser adicionado esse rejeito poroso.

O valor do recalque no dique de partida para a situação de “rejeito adensado” é de 2,65m já no de “rejeito recém lançado” é de 3,23m, o valor é menor no rejeito adensado pois ele apresenta um módulo de elasticidade maior do que o rejeito recém lançado e índices de vazios menores, portanto esse material irá ter mais dificuldade em sofrer deslocamentos verticais, resultando assim em um valor de recalque máximo menor.

Diferente do dique de partida, para os 3 alteamentos do método de montante, os recalques máximos na situação de rejeito adensado deram maiores do que no recém lançado. Isso ocorre pois, por mais de o rejeito adensado seja menos poroso que o rejeito recém lançado, o seu peso específico é maior (Tabela 3.6), logo a tensão efetiva é também superior, resultando num recalque total máximo maior na região do rejeito. O contrário ocorreu no

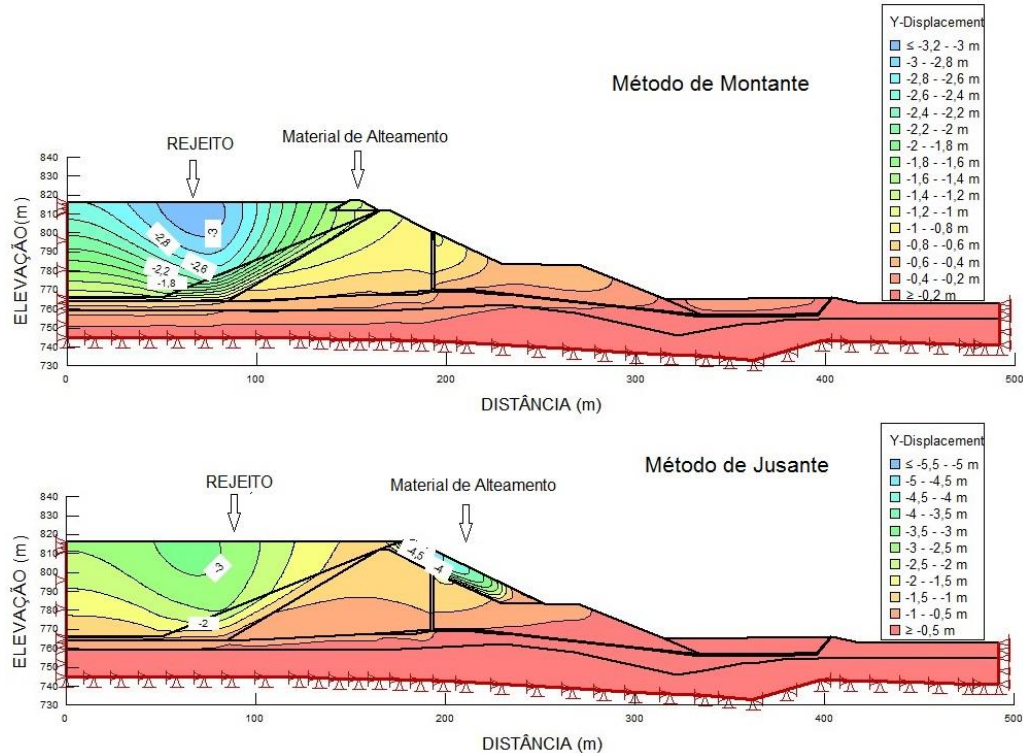
dique de partida, porque a quantidade de rejeito lançado no dique de partida é muito superior ao lançado nos alteamentos do método de montante, ou seja, para quantidades altas de rejeito lançados, os recalques para a situação de “rejeito recém lançado” resultam em recalques maiores do que as de “rejeito adensado” para o método de montante. Já nos alteamentos onde a quantidade de rejeitos adicionados são menores, os recalques para situação de rejeito adensado é maior. A Figura 4.7 mostra justamente essa diferença entre as quantidades de rejeito adicionado, representado pela cor marrom, no método de montante e no dique de partida.

Figura 4.7 - Diferença entre as quantidades de rejeitos adicionados no método de montante e no dique de partida



Já no primeiro alteamento, percebe-se que os recalques máximos para as 4 situações do método de jusante é maior do que as 4 de montante. Porém como mostra a Figura 4.8, os recalques máximos se concentram em locais diferentes.

Figura 4.8 - Localização de recalques máximos no 1º alteamento para a situação de rejeito adensado



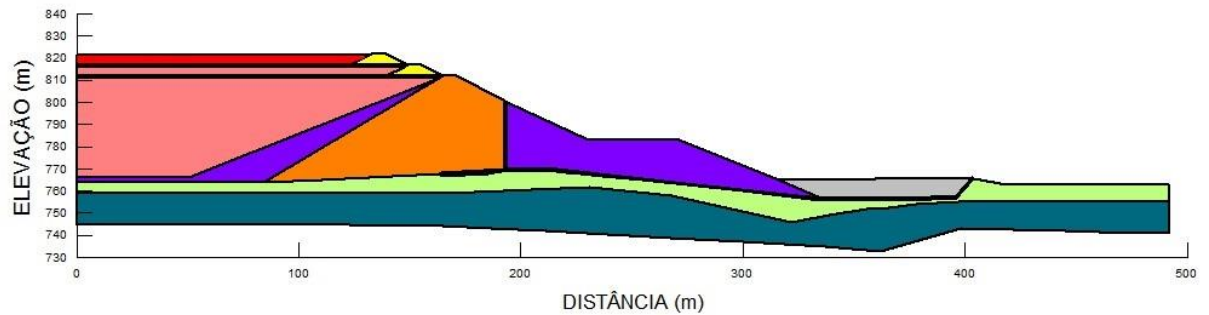
No método de montante o recalque máximo fica localizado na região do rejeito, já no método de jusante ele fica localizado no material de alteamento (argila areno siltosa), isso acontece devido às propriedades geotécnicas do material usado no alteamento. De acordo com a Tabela 3.5, a argila areno siltosa apresenta um módulo de elasticidade de 3750 kPa, esse valor é baixo comparado aos dos rejeitos, tanto o recém lançado quanto o adensado, por isso o recalque máximo no método de jusante se concentra no material do alteamento. Mas já no método de montante ele fica concentrado na região do rejeito, isso acontece porque no método de montante a quantidade de material usado para alçar a barragem é inferior ao método de jusante, conseqüentemente, sua quantidade de argila areno siltosa não é o suficiente para recalcar mais do que na região do rejeito.

De acordo com a Tabela 4.2, do primeiro para o segundo alteamento no método de jusante recalcou cerca de 13 metros, já no de montante menos de 1 metro. Como citado anteriormente, a quantidade de argila areno siltosa adicionada a cada alteamento ao método de jusante é maior que o de montante, então esse seria o primeiro motivo para os que os recalques do método de jusante do primeiro pro segundo alteamento tenha dado valores tão superiores ao de montante.

Assim como no primeiro alteamento, no segundo os recalques máximos permaneceram localizados nas mesmas regiões, no método de montante da região dos rejeitos e no de

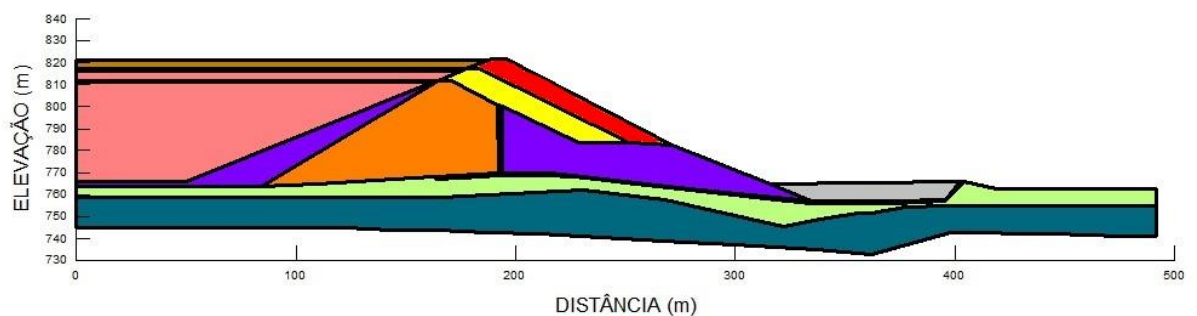
jusante na região do material de alteamento. A Figura 4.9 mostra, em vermelho, a quantidade de material adicionado no segundo alteamento na região em que ocorre maiores recalques no método de montante, neste caso é o rejeito.

Figura 4.9 - Quantidade de material adicionado na região onde ocorre maiores recalques no método de montante



Já a Figura 4.10 mostra em vermelho a quantidade de material adicionado na região em que ocorre maiores recalques no método de jusante, que neste caso é na região do material de alteamento.

Figura 4.10 - Quantidade de material adicionado na região onde ocorre maiores recalques no método de jusante



De acordo com as regiões em vermelho da Figura 4.9 e Figura 4.10, percebe-se que a quantidade de material adicionado na região onde ocorre maiores recalques no método de jusante é superior à adicionada ao método de montante. Além disso o material em vermelho do método de jusante tem módulo de elasticidade inferior ao do método de montante. Isso faz com que os recalques máximos do método de jusante deem valores tão superiores ao método montante.

Do segundo para o terceiro alteamento praticamente ocorre o que aconteceu do primeiro para o segundo, ou seja, os recalques máximos no método de jusante deram maiores que os de montante. Enquanto os de montante recalcam até 1 metro, o de jusante recalcou 15 metros. Pelo mesmo motivo de que aconteceu no segundo alteamento, a quantidade de material de alteamento usado no de método de jusante é superior ao de montante e como o

material de alteamento tem módulo de elasticidade baixo, os recalques mais altos no método de jusante se concentram nele, já no de montante se são mais altos na região dos rejeitos. A Figura 4.11 e Figura 4.12 mostram justamente isso.

Figura 4.11 - Recalques totais no terceiro alteamento com rejeito adensado para o método de montante

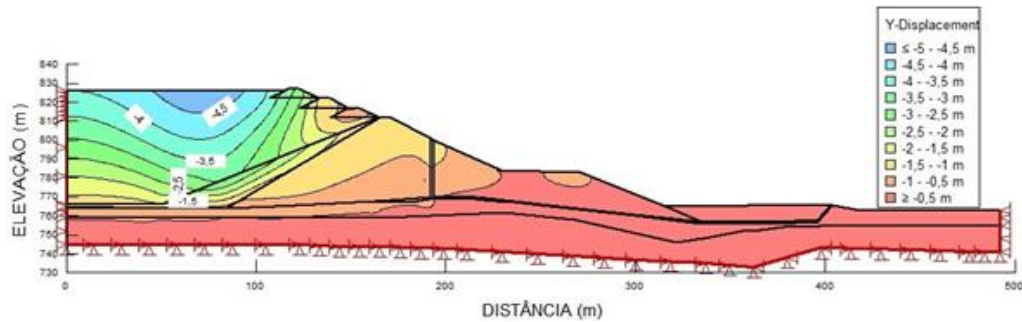
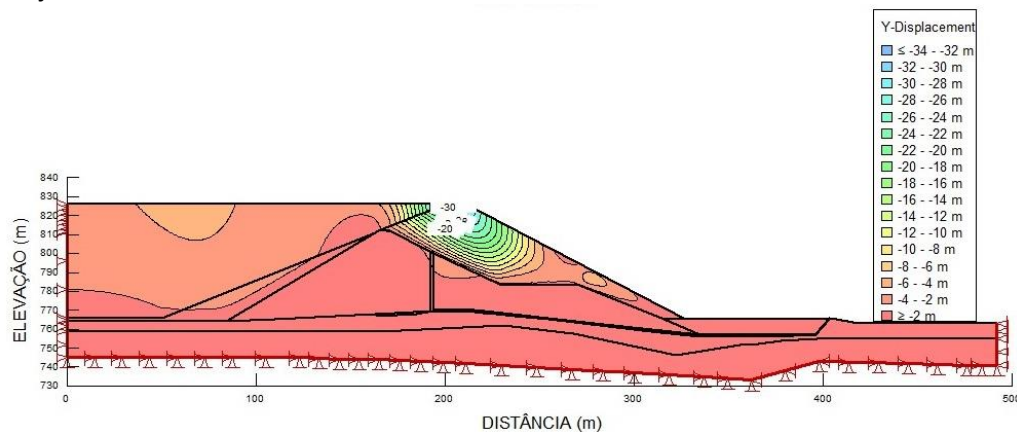


Figura 4.12 - Recalques totais no terceiro alteamento com rejeito adensado para o método de jusante



Provavelmente, se o material de alteamento possuísse um módulo de elasticidade maior que o do rejeito, o método de jusante não iria ter recalques tão altos e também não seriam concentrados na região dos alteamentos, logo a diferença entre os métodos de alteamento de barragens de rejeitos não iriam ter recalques máximos tão diferentes. Na Figura 4.12 pode ser observado que na região dos rejeitos os recalques entre os métodos são parecidos, na faixa de 4 a 5 metros, porém o material de alteamento fez com que o método de jusante resultasse em recalques máximos maiores, dando cerca 32 metros de recalques totais e o montante em torno de 4 metros.

Portanto de uma forma geral, usando um material de alteamento com módulo de elasticidade baixo e menor que os do rejeitos recém lançado e adensado, o método de jusante se mostrou pior que o de montante em termos de deslocamentos máximos sofridos.

### 4.3 Análises de Estabilidade de Talude

Antes de realizar os processos de alteamento foi analisado a estabilidade de taludes do dique de partida, o qual representa a etapa que precede tanto o método construtivo de jusante quanto o de montante. Os fatores de segurança de cada situação para o dique de partida são expressos na Tabela 4.3, os valores que estão em vermelho indicam que estão abaixo do mínimo estabelecido por Eletrobrás (2003) na Tabela 2.2 Tabela 2.2 - Coeficientes de segurança para cada caso de carregamento..Sendo que cada etapa foi calculada por três métodos de cálculo de fator de segurança diferentes e a última linha de cada situação expressa o menor valor do FS entre os 3 métodos de cálculo de FS (Morgenstern-Prince, Bishop e Fellenius).

Tabela 4.3 - Fatores de segurança para o dique de partida.

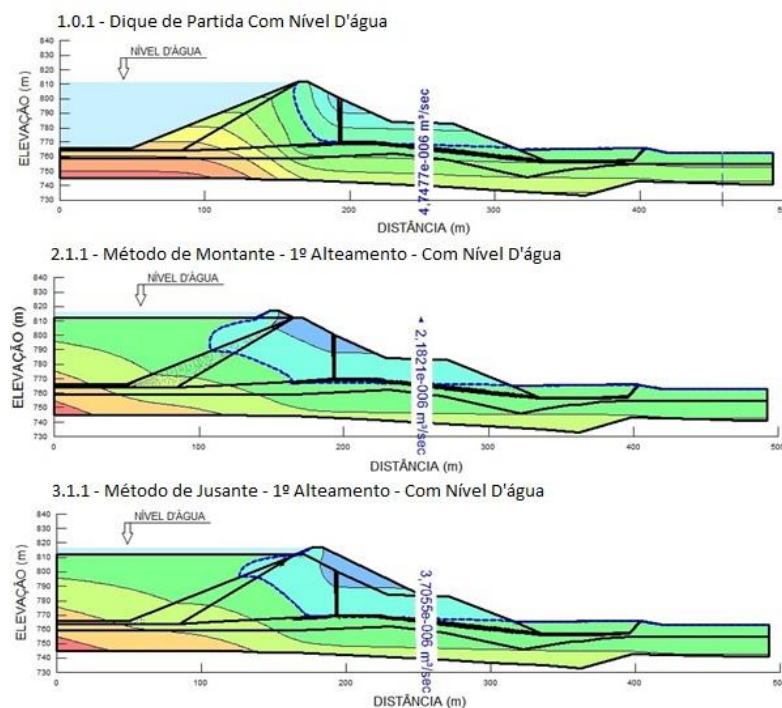
<b>1 DIQUE DE PARTIDA</b>					
<b>1.0 Sem Alteamento</b>					
<b>1.0.0 Final de Construção</b>					
	Método de Cálculo Usado	Final de Construção			
		T.Montante	T. Jusante		
	Morgenstern-Prince	1,74	1,782		
	Bishop	1,761	1,783		
	Fellenius	1,615	1,699		
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,615</b>	<b>1,699</b>		
<b>1.0.1 Com Nível D'água</b>					
	Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
		T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
	Morgenstern-Prince	1,658	1,587	1,453	1,66
	Bishop	1,659	1,585	1,442	1,687
	Fellenius	<b>1,381</b>	1,743	1,177	1,542
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,381</b>	<b>1,585</b>	<b>1,177</b>	<b>1,542</b>
<b>1.0.2 Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado</b>					
	Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
		T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
	Morgenstern-Prince	1,66	9,141	1,453	
	Bishop	1,661	9,14	1,442	
	Fellenius	<b>1,421</b>	8,948	1,177	
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,421</b>	<b>8,948</b>	<b>1,177</b>	
<b>1.0.3 Com Nível D'água + Rejeito Adensado</b>					
	Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
		T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
	Morgenstern-Prince	1,684	14,942	1,475	
	Bishop	1,682	14,939	1,466	
	Fellenius	<b>1,432</b>	14,164	1,194	
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,432</b>	<b>14,164</b>	<b>1,194</b>	

De acordo com os valores de FS da Tabela 4.3, observa-se que para a situação de percolação estável, o fator de segurança pelo método de Fellenius deu abaixo do mínimo

permitido, já pelos outros 2 métodos de cálculo, tais valores deram acima do mínimo. Apesar do método de Fellenius ter resultado em valores mais conservadores, sabe-se que o método de Morgenstern-Prince resulta em valores mais realísticos. Portanto tais resultados mostram que o método de Fellenius é restritivo, trás resultados de FS baixos, porém, segundo Whitman(1967, apud Massad, 2010), o de Morgentern-Prince é maior rigoroso. Então para realizar a comparação entre os métodos construtivos de barragens de rejeito, foi comparado os fatores de segurança calculados pelo método de Morgentern-Prince, os quais deram valores praticamente iguais aos de Bishop. Todos os valores de fatores de segurança obtidos estão apresentados no Anexo I.

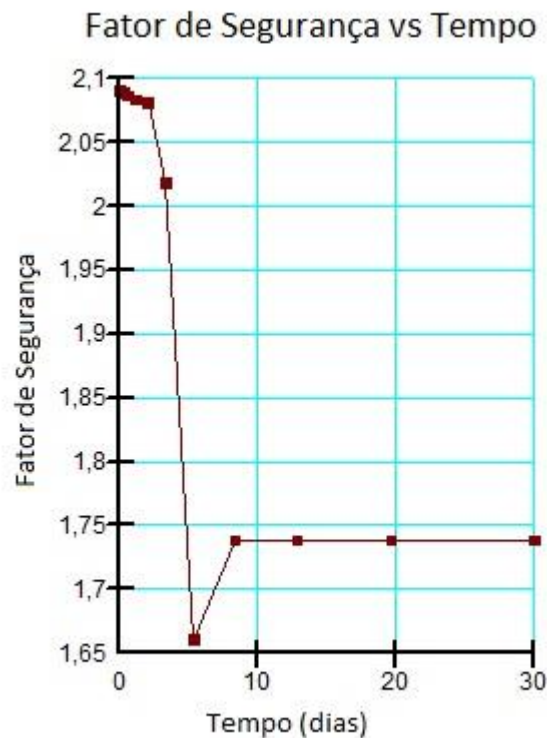
A análise mais crítica de rebaixamento rápido que se teve nesse trabalho foi a feita para o dique de partida (item 1.0.1 da Figura 3.1). Ela foi a única que o FS variou nos 30 dias de rebaixamento e a que o FS deu menor em relação às feitas pelo método de montante e jusante. Isso ocorre pois, conforme a Figura 4.13, devido ao lançamento do rejeito, a coluna d'água para o dique de partida (45,2m) é superior às demais situações do método de montante e jusante as quais tem cerca de 0,8m coluna de água livre de rejeito. Logo o rebaixamento ocorre de maneira mais brusca e intensa acarretando numa variação e num menor valor do fator de segurança.

Figura 4.13 - Coluna d'água do dique de partida, 1º alteamento do método de montante e 1º alteamento pelo método de jusante.



A Figura 4.14 mostra a variação do fator de segurança no rebaixamento rápido do nível d'água no dique de partida e o Anexo II mostra as imagens do nível d'água da barragem e a da provável superfície de ruptura no decorrer dos dias. Pode-se perceber que o fator de segurança mínimo encontrado ocorreu aproximadamente no quinto dia e a partir do oitavo se manteve constante.

Figura 4.14 - Variação do FS para o rebaixamento rápido do dique de partida



Antes do rejeito ser lançado (Tabela 4.3, item 1.0.0 e 1.0.1) os fatores de segurança para o talude de montante tem valores bem inferiores em relação à depois de ser lançado (Tabela 4.3, item 1.0.2 e 1.0.3). Isso se deve ao fato de que ao lançar o rejeito, ele faz uma espécie de contenção no talude de montante da barragem, fazendo com que melhore a sua estabilidade resultando assim num FS maior. Portanto depois de ser lançado o rejeito, (Tabela 4.3, item 1.0.2), em todas as situações posteriores a ela, os taludes de montante sempre terão seus FS superiores aos taludes de jusante, dando inclusive valores altos (maior que 4).

Foi observado também que todos os fatores de segurança para todas situações de rejeito adensado são superiores às de rejeito recém lançado, isso ocorre devido às propriedades geotécnicas do rejeito adensado serem melhores no quesito de estabilidade, já que o rejeito adensado tem maior ângulo de atrito.

Com intuito de resumir a comparação entre o método construtivo de barragens de rejeito, que são os métodos de montante e jusante, foi criada tabelas que expressam o método construtivo com melhor fator de segurança de cada etapa analisada. Sendo que o melhor fator de segurança é aquele que tem valor maior.

Conforme a Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6, todos os taludes de montante deram fatores de segurança maiores que 4, independentemente do método construtivo ou da situação analisada, esses valores maiores que 4 mostram que os taludes de jusante têm boa estabilidade. Já os taludes de jusante deram valores entre 1 e 2. Portanto as discussões e análises dos resultados aqui feitas, terão mais foco nos taludes de jusante por apresentarem maiores riscos de rupturas, já que neles os valores de fator segurança foram baixos em relação aos do talude de montante.

Tabela 4.4 - Comparação dos métodos construtivos de barragem de rejeito para o 1º alteamento com base no fator de segurança.

<b>1º Alteamento</b>				
Final de Construção				
	Final de Construção			
Método Construtivo	T.Montante	T. Jusante		
Método de Montante	4,634	1,788		
Método de Jusante	4,782	1,684		
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>MONTANTE</b>		
Com Nível D'água				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
Método de Montante	1,717	6,457	1,502	8,398
Método de Jusante	1,666	6,348	1,463	4,807
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>MONTANTE</b>
Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Método de Montante	1,717	8,401	1,495	
Método de Jusante	1,666	9,816	1,463	
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	
Com Nível D'água + Rejeito Adensado				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Método de Montante	1,72	15,397	1,504	
Método de Jusante	1,666	13,62	1,485	
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	

No primeiro alteamento, das 12 situações, o método construtivo de montante foi melhor em 10 e o de jusante em 2, porém a diferença máxima entre seus fatores de segurança é pequena, cerca de 0,1, o que quer dizer que apesar de o método de montante no 1º alteamento ter dado valores de FS superiores ao de jusante, não quer dizer que ele seja o melhor método já que a diferença entre seus fatores de segurança é pequena.

Figura 4.15 - Região de provável ruptura do talude de jusante para situação de percolação estável usando o método construtivo de montante no seu primeiro alteamento

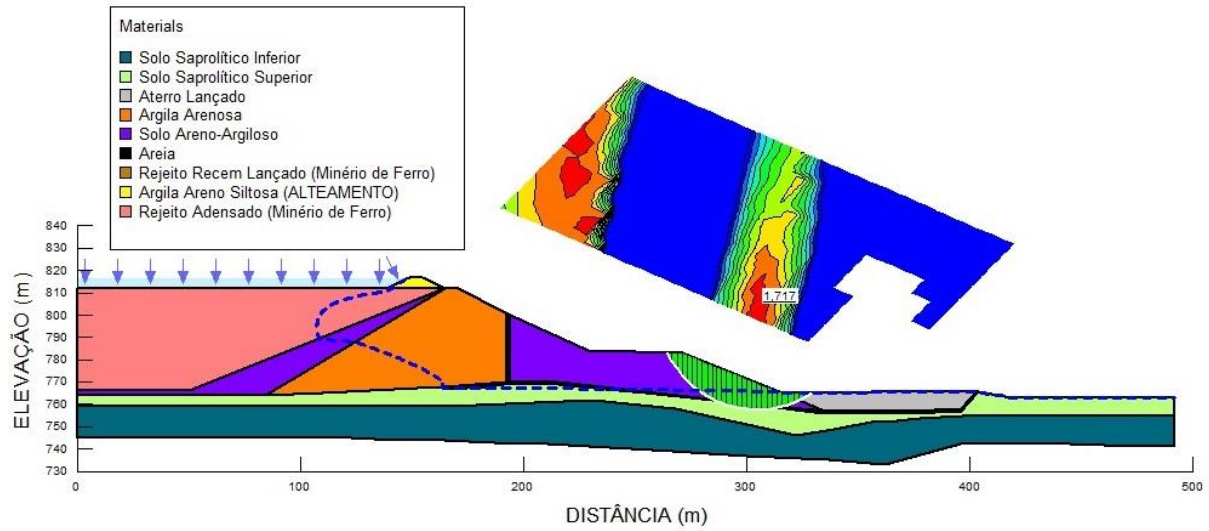
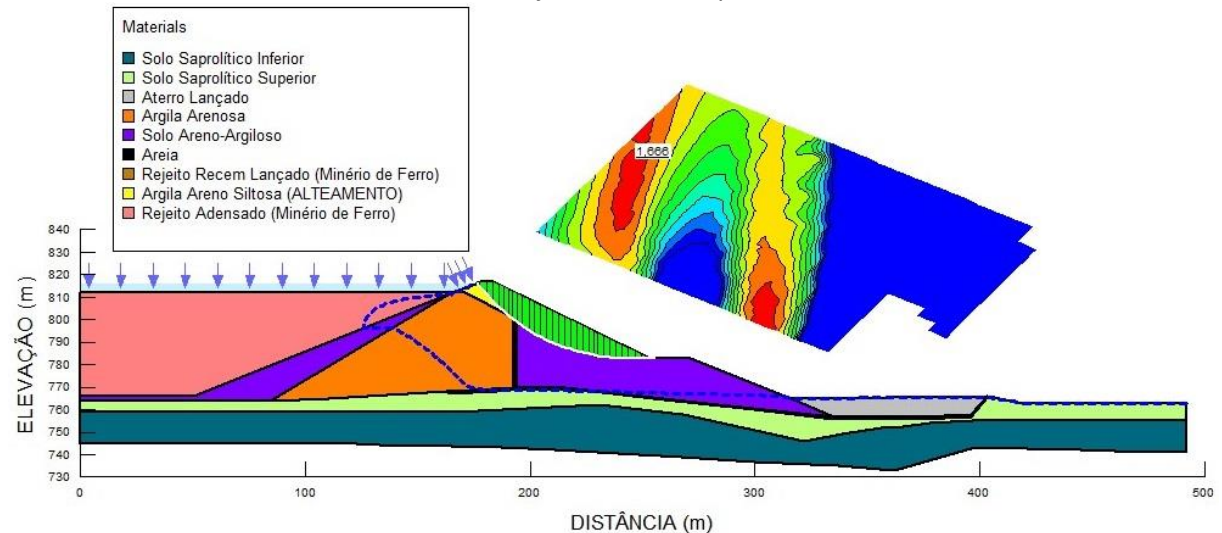


Figura 4.16 - Região de provável ruptura do talude de jusante para situação de percolação estável usando o método construtivo de jusante no seu primeiro alteamento



Observa-se na Figura 4.16 que no método de jusante a provável ruptura ocorre no material de alteamento (argila areno siltosa) e, como mostra a Figura 4.15, a provável ruptura do método de montante ocorre no pé do talude, no solo areno argiloso. Conforme a Tabela 3.3 e Tabela 3.5, o material de alteamento tem propriedades geotécnicas melhores, no quesito de estabilidade, ao do solo areno argiloso, pois ele tem valores superiores de ângulo

de atrito e coesão. Apesar de ter propriedades geotécnicas melhores, o fator de segurança no método de jusante deu menor do que o método de montante, 1,666 e 1,717 respectivamente, isso acontece pois a geometria do talude no método de jusante piora ao ser feito o alteamento, já no de montante ela permanece inalterada.

Tabela 4.5 - Comparação dos métodos construtivos de barragem de rejeito para o 2º alteamento com base no fator de segurança.

<b>2º Alteamento</b>				
Final de Construção				
	Final de Construção			
Método Construtivo	T. Montante	T. Jusante		
Método de Montante	4,781	1,785		
Método de Jusante	5,353	1,579		
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>MONTANTE</b>		
Com Nível D'água				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
Método de Montante	1,729	6,659	1,506	6,993
Método de Jusante	<b>1,485</b>	6,63	1,182	9,736
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>
Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Método de Montante	1,729	8,407	1,506	
Método de Jusante	<b>1,465</b>	9,728	1,182	
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	
Com Nível D'água + Rejeito Adensado				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Método de Montante	1,73	14,752	1,507	
Método de Jusante	<b>1,468</b>	16,04	1,184	
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	

Comparando a Tabela 4.4 e Tabela 4.5, percebe-se que os valores do FS do método de montante nos taludes de jusante são semelhantes, isso acontece pois como os seus alteamentos ocorrem a montante, não há material de alteamento adicionado no talude de jusante portanto os materiais do talude de jusante serão sempre os mesmos nos próximos alteamentos (Figura 4.15 e Figura 4.17).

Diferente do primeiro alteamento, no segundo, as diferenças máximas entre os fatores de segurança dos métodos construtivos chegaram a 0,32 nos taludes de jusante. Sendo que nas situações de percolação estável o FS deu abaixo do mínimo exigido no método de jusante.

A diferença dos valores do FS entre os métodos construtivos aumentou porque no método construtivo de jusante o FS diminuiu. Tal diminuição pode ser explicada com base na Figura 4.17 e Figura 4.18.

Figura 4.17 - Região de provável ruptura do talude de jusante para situação de percolação estável usando o método construtivo de montante no seu segundo alteamento

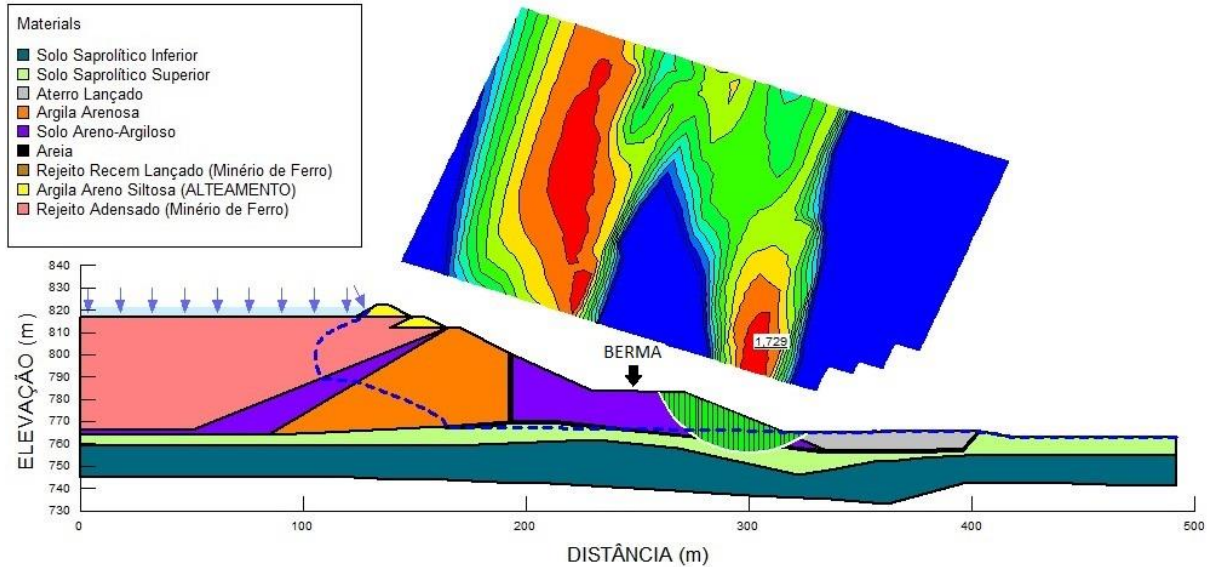
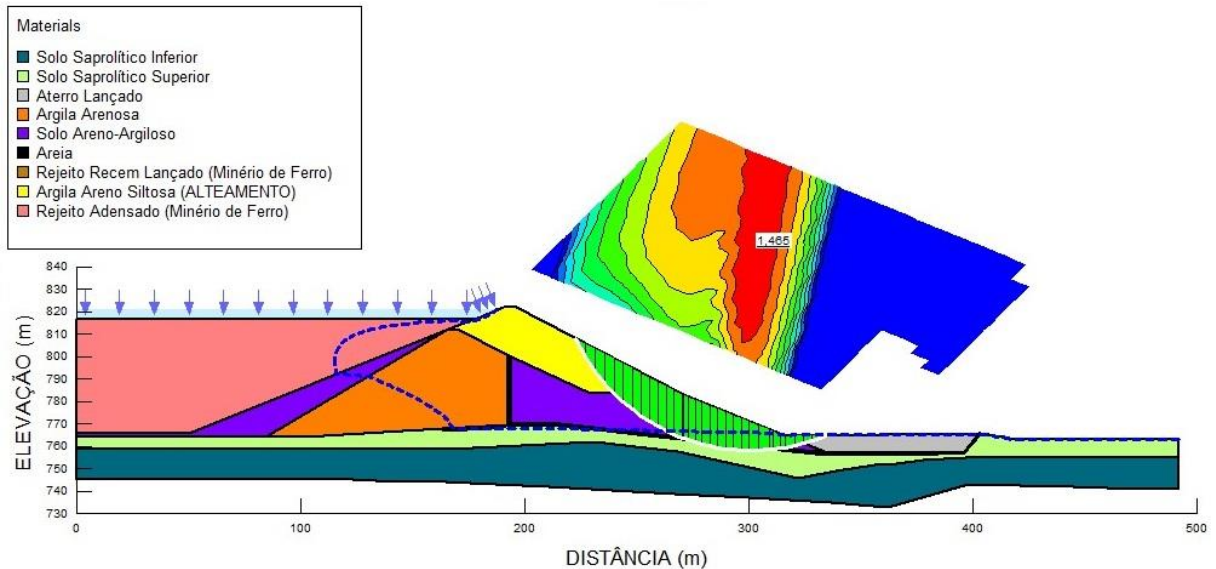


Figura 4.18 - Região de provável ruptura do talude de jusante para situação de percolação estável usando o método construtivo de jusante no seu segundo alteamento



A berma, mostrada na Figura 4.17 exerce um papel de contenção no talude de jusante dando mais estabilidade a ele. Como ocorreu o segundo alteamento, a quantidade do material de alteamento aumentou e essa função de contenção foi comprometida refletindo na diminuição do fator de segurança no talude jusante em relação ao primeiro alteamento. Já no método de montante o valor do FS praticamente não se alterou, já que não foi adicionado material no talude de jusante.

Tabela 4.6 - Comparação dos métodos construtivos de barragem de rejeito para o 3º alteamento com base no fator de segurança.

<b>3º Alteamento</b>				
Final de Construção				
	Final de Construção			
Método Construtivo	T. Montante	T. Jusante		
Método de Montante	4,76	1,787		
Método de Jusante	4,573	1,495		
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>MONTANTE</b>		
Com Nível D'água				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
Método de Montante	1,765	5,582	1,52	4,53
Método de Jusante	<b>1,402</b>	6,35	1,222	8,746
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>
Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Método de Montante	1,765	8,401	1,502	
Método de Jusante	<b>1,402</b>	9,765	1,222	
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	
Com Nível D'água + Rejeito Adensado				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		
Método Construtivo	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Método de Montante	1,766	15,057	1,521	
Método de Jusante	<b>1,404</b>	16,222	1,224	
<b>MÉTODO COM MELHOR FS</b>	<b>MONTANTE</b>	<b>JUSANTE</b>	<b>MONTANTE</b>	

Por fim, o terceiro alteamento mostra novamente como a quantidade de material de alteamento adicionada no talude de jusante no método de construtivo de jusante, acarreta numa mudança de geometria do talude, comprometendo sua estabilidade, e diminuindo o valor do seu fator de segurança. Resultando em valores de FS menores do que os do método de montante.

A Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6, mostram que o valor de fator de segurança dos taludes de jusante no método de jusante vai diminuindo de acordo com que ocorre os alteamentos. Essa diminuição vai ocorrendo pois ao ser adicionado o material de alteamento a geometria do talude vai se alterando e a função de contenção que a berma fazia, vai sendo comprometida, piorando a estabilidade do talude. Portanto o método de montante acaba dando fator de segurança maiores, já que no seu talude de jusante não é adicionado materiais.

Conforme a Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6, em cada alteamento feito, o talude de jusante é analisado em 7 situações e o talude de montante em 5. No final do terceiro alteamento, 21 análises no talude de montante foram feitas e 15 no de jusante. Dessas 15, 9 deram fatores de segurança maiores no método construtivo de jusante e 6 no de montante. Apesar dos valores terem sido melhores no método de jusante, nos dois métodos os fatores de segurança não só deram maiores do que o mínimo permitido como também deram valores altos, entre 4 e 16. Esses resultados com valores altos foi devido ao rejeito adicionado que fizeram uma espécie de contenção no talude de montante melhorando a sua estabilidade. Portanto os taludes de montante analisados mostrou-se com boa estabilidade em ambos métodos construtivos.

Das 21 análises feitas no talude de jusante, o método construtivo de montante teve valores de fator de segurança maiores que o método de jusante em todas elas. Porém nas 7 do primeiro alteamento, a diferença entre os métodos foi irrisória, dentre essas 7, na análise mais crítica o método de montante teve FS 6,1% maior em relação ao valor do FS do método de jusante. Já no segundo e terceiro alteamento essa porcentagem aumentou, o método de montante teve FS 27,41% e 25,89% maior em relação ao de jusante, respectivamente.

Apesar de nas 21 análises do talude de jusante o método de montante ter dado valores de FS maiores que os do método de jusante, em ambos os métodos seus valores deram maiores que o mínimo exigido, exceto o método de jusante nas situações de percolação estável a partir do segundo alteamento (valores em vermelho na Tabela 4.5 e Tabela 4.6).

Os resultados das análises de estabilidade de taludes mostraram que no talude de montante, o método construtivo de jusante teve os valores de fatores de segurança maiores que o método de montante, mas nos dois métodos construtivos esses valores foram altos, resultando assim em taludes com boa estabilidade em ambos os métodos. Já no talude de jusante ocorreu o contrário, o método de montante teve fatores de segurança maiores que o de jusante, sendo que o principal motivo deste resultado, foi a adição de material de alteamento no método de jusante que acabou alterando a geometria do talude e piorando a sua estabilidade. Logo, nos taludes de jusante, o método de montante apresentou taludes com melhor estabilidade do que o método construtivo de jusante.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os três módulos do Geostudio 2012 usados nesse trabalho foram fundamentais para realizar as simulações da barragem de rejeito, sem eles não seria possível obter os resultados deste trabalho. Portanto o GeoStudio 2012 se mostrou eficiente e prático para a realização das análises de percolação, tensão-deformação e de estabilidade de taludes.

Os métodos construtivos de barragem de rejeito analisados nesse trabalho, método de montante e método de jusante, mostraram resultados semelhantes nas análises de percolação, porém ambos apresentaram situações favoráveis à ocorrência de piping, sobretudo na região do filtro. O estado de areia movediça não apresentou riscos à barragem em nenhum método, pois, por mais que o fluxo seja ascendente no pé do talude, os valores dos gradientes nesta região foram inferiores ao crítico.

Nas análises de tensão-deformação, o método de jusante apresentou recalques máximos totais superiores ao de montante. Porém, foi observado que os recalques aconteceram em locais distintos. No método de montante os recalques se concentraram na região do rejeito, já no de jusante no material de alteamento. Isso ocorreu, pois, o material de alteamento possui módulo de elasticidade inferior ao do rejeito e quantidade de material usado para altear a barragem no método de jusante é superior ao de montante.

Nas análises de estabilidade de taludes, concluiu-se que as análises feitas no talude de montante, o método construtivo de jusante teve os valores de fatores de segurança melhores que o método de montante, mas nos dois métodos construtivos esses valores foram altos, resultando assim em taludes com boa estabilidade em ambos os métodos. Já nas análises do talude de jusante ocorreu o contrário, o método de montante teve fatores de segurança maiores que o de jusante, sendo que o principal motivo para ter ocorrido isso, foi a adição de material de alteamento no método de jusante que acabou alterando a geometria do talude e piorando a sua estabilidade. Logo, nos taludes de jusante, o método de montante apresentou taludes com melhor estabilidade do que o método construtivo de jusante.

O estudo realizado nesse trabalho mostra como é importante a determinação precisa dos parâmetros geotécnicos utilizados nas análises, sejam por ensaios de campo ou ensaios de laboratório. Uma vez que, apesar de nas literaturas o método de jusante ser considerado o mais estável, os resultados aqui fornecidos mostraram resultados mais críticos no método construtivo de jusante.

Portanto o estudo feito neste trabalho, mostrou que ao realizar alteamentos numa barragem de rejeito, deve-se escolher um material para alteamento com propriedades geotécnicas adequadas, para que as deformações sofridas nas regiões de alteamento sejam mínimas. Além disso, deve-se procurar uma barragem com geometria estável, principalmente na região do talude de jusante, para que ao ser realizados os alteamentos não comprometa a sua estabilidade.

Para pesquisas futuras, propõe-se usar um dique de partida com geometria diferente, sobretudo com inclinação do talude de jusante diferente da usada neste trabalho e realizar alteamentos para o método de montante e jusante com um material de alteamento com propriedades geotécnicas diferentes das usadas neste trabalho, fazendo uma comparação com os resultados obtidos no mesmo. Sugere-se também que sejam feitos mais alteamentos de modo a se obter uma altura mais expressiva e uma diferenciação maior dos dois métodos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOSCOV, M.E.G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- CARVALHO, T.B.O. **Histórico de Ruptura de Barragens de Rejeito**. S.d.
- COSTA, Aluisio Marcondes. **Estudos de Tensão Deformação Para o 3º Alçamento da Barragem do Itabiruçu**. 2009.
- D'AGOSTINHO, L.F. **Praias de Barragens de Rejeitos de Mineração: Características e Análise da Sedimentação**. Tese (Doutorado em Engenharia). São Paulo: Universidade de São Paulo, USP, 2008.
- DAS, BRAJA. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Ed. Thompson Pioneira, 6. ed., 2007.
- DYMINSKI, A.S, 1996, **Notas de Aula- Estabilidade de Taludes**, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.
- ELETROBRÁS. **Crítérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), 2003.
- ESPÓSITO, T. de J, **Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise de Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Brasília: Universidade de Brasília, UNB,1995.
- FERREIRA, V. M. **ANÁLISE REFERENTE AO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITO DE FUNDÃO-MARIANA-MG**. ARQUITETURA E URBANISMO ENGENHARIA CIVIL ENGENHARIA ELÉTRICA GASTRONOMIA MODA, p. 175.
- FREITAS, M. A. C. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia**. 2012.
- GEO-SLOPE INTERNATIONAL (2012) – Geostudio 2012 (Version 8.15) Copyright © 1991-2015 – Calgary, Alberta, Canadá.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.
- GERSCOVICH, D.M.S, 2008, **Notas de Aula - Estabilidade de Taludes**, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- HERNANDEZ, H.M. **Caracterização Geomecânica de Rejeitos aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Brasília: Universidade de Brasília, UNB, 2002.
- IBRAM. Programa Especial de Barragens de Rejeitos, sd.
- LIMA, M.J.C.P.A. **Introdução ao Estudo das Barragens de Terra**. Curso de Construção, Instituto Militar de Engenharia, s.d.

- LOZANO, F.A.E. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Paulo: Universidade de São Paulo, USP, 2006.
- MACHADO, W.G.F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Paulo: Universidade de São Paulo, USP, 2007.
- MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos com Exercícios Resolvidos**. 3.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.
- REMÉDIO, F. H. **Análise De Estabilidade De Taludes De Aterro De Resíduos Urbanos Utilizando Parâmetros Geotécnicos De Propostas Bibliográficas E Correlações Com  $N_{spt}$** . Dissertação, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2014.
- REZENDE, D. A. **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes em Barragens de Rejeito**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- REZENDE, V. A. **Estudo do Comportamento de Barragem de Rejeito Arenoso Alteada por Montante**. 2013.

## 7 ANEXOS

### ANEXO I

<b>1 DIQUE DE PARTIDA</b>					
<b>1.0 Sem Alçamento</b>					
<b>1.0.0 Final de Construção</b>					
	Método de Cálculo Usado	Final de Construção			
		T.Montante	T. Jusante		
	Morgenstern-Prince	1,74	1,782		
	Bishop	1,761	1,783		
	Fellenius	1,615	1,699		
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,615</b>	<b>1,699</b>		
<b>1.0.1 Com Nível D'água</b>					
	Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
		T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
	Morgenstern-Prince	1,658	1,587	1,453	1,66
	Bishop	1,659	1,585	1,442	1,687
	Fellenius	<b>1,381</b>	1,743	1,177	1,542
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,381</b>	<b>1,585</b>	<b>1,177</b>	<b>1,542</b>
<b>1.0.2 Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado</b>					
	Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
		T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
	Morgenstern-Prince	1,66	9,141	1,453	
	Bishop	1,661	9,14	1,442	
	Fellenius	<b>1,421</b>	8,948	1,177	
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,421</b>	<b>8,948</b>	<b>1,177</b>	
<b>1.0.3 Com Nível D'água + Rejeito Adensado</b>					
	Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
		T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
	Morgenstern-Prince	1,684	14,942	1,475	
	Bishop	1,682	14,939	1,466	
	Fellenius	<b>1,432</b>	14,164	1,194	
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,432</b>	<b>14,164</b>	<b>1,194</b>	
<b>2 MÉTODO DE MONTANTE</b>					
<b>2.1 1º Alçamento</b>					
<b>2.1.0 Final de Construção</b>					
	Método de Cálculo Usado	Final de Construção			
		T.Montante	T. Jusante		
	Morgenstern-Prince	4,634	1,788		
	Bishop	4,635	1,788		
	Fellenius	4,619	1,727		
	<b>Menor Valor</b>	<b>4,619</b>	<b>1,727</b>		
<b>2.1.1 Com Nível D'água</b>					
	Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
		T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
	Morgenstern-Prince	1,717	6,457	1,502	8,398
	Bishop	1,72	6,456	1,495	8,4
	Fellenius	1,5	6,344	1,213	8,249
	<b>Menor Valor</b>	<b>1,5</b>	<b>6,344</b>	<b>1,213</b>	<b>8,249</b>
<b>2.1.2 Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado</b>					

Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Morgenstern-Prince	1,717	8,401	1,495	
Bishop	1,72	8,401	1,495	
Fellenius	1,5	8,397	1,213	
<b>Menor Valor</b>	<b>1,5</b>	<b>8,397</b>	<b>1,213</b>	
<b>2.1.3 Com Nível D'água + Rejeito Adensado</b>				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Morgenstern-Prince	1,72	15,397	1,504	
Bishop	1,723	15,395	1,497	
Fellenius	1,502	14,747	1,215	
<b>Menor Valor</b>	<b>1,502</b>	<b>14,747</b>	<b>1,215</b>	
<b>2.2 2º Alçamento</b>				
<b>2.2.0 Final de Construção</b>				
Método de Cálculo Usado	Final de Construção			
	T.Montante	T. Jusante		
Morgenstern-Prince	4,781	1,785		
Bishop	4,781	1,784		
Fellenius	4,773	1,699		
<b>Menor Valor</b>	<b>4,773</b>	<b>1,699</b>		
<b>2.2.1 Com Nível D'água</b>				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
Morgenstern-Prince	1,729	6,659	1,506	6,993
Bishop	1,729	6,66	1,497	6,99
Fellenius	<b>1,45</b>	6,631	1,223	6,731
<b>Menor Valor</b>	<b>1,45</b>	<b>6,631</b>	<b>1,223</b>	<b>6,731</b>
<b>2.2.2 Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado</b>				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Morgenstern-Prince	1,729	8,407	1,506	
Bishop	1,729	8,407	1,497	
Fellenius	<b>1,45</b>	8,4	1,223	
<b>Menor Valor</b>	<b>1,45</b>	<b>8,4</b>	<b>1,223</b>	
<b>2.2.3 Com Nível D'água + Rejeito Adensado</b>				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Morgenstern-Prince	1,73	14,752	1,507	
Bishop	1,73	14,75	1,499	
Fellenius	<b>1,451</b>	14,31	1,224	
<b>Menor Valor</b>	<b>1,451</b>	<b>14,31</b>	<b>1,224</b>	
<b>2.3 3º Alçamento</b>				
<b>2.3.0 Final de Construção</b>				
Método de Cálculo Usado	Final de Construção			
	T.Montante	T. Jusante		
Morgenstern-Prince	4,76	1,787		
Bishop	4,761	1,786		
Fellenius	4,744	1,689		
<b>Menor Valor</b>	<b>4,744</b>	<b>1,689</b>		
<b>2.3.1 Com Nível D'água</b>				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido

Método de Cálculo Usado	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
Morgenstern-Prince	1,765	5,582	1,52	4,53
Bishop	1,768	5,577	1,51	4,531
Fellenius	<b>1,498</b>	5,347	1,22	4,506
<b>Menor Valor</b>	<b>1,498</b>	<b>5,347</b>	<b>1,22</b>	<b>4,506</b>

2.3.2 Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado

Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica	
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante
Morgenstern-Prince	1,765	8,401	1,502
Bishop	1,768	8,401	1,51
Fellenius	<b>1,498</b>	8,396	1,22
<b>Menor Valor</b>	<b>1,498</b>	<b>8,396</b>	<b>1,22</b>

2.3.3 Com Nível D'água + Rejeito Adensado

Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica	
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante
Morgenstern-Prince	1,766	15,057	1,521
Bishop	1,769	15,055	1,51
Fellenius	<b>1,499</b>	14,427	1,221
<b>Menor Valor</b>	<b>1,499</b>	<b>14,427</b>	<b>1,221</b>

### 3 MÉTODO DE JUSANTE

3.1 1º Alçamento

3.1.0 Final de Construção

Método de Cálculo Usado	Final de Construção	
	T.Montante	T. Jusante
Morgenstern-Prince	4,782	1,684
Bishop	4,795	1,686
Fellenius	4,381	1,575
<b>Menor Valor</b>	<b>4,381</b>	<b>1,575</b>

3.1.1 Com Nível D'água

Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
Morgenstern-Prince	1,666	6,348	1,463	4,807
Bishop	1,668	6,355	1,453	4,807
Fellenius	<b>1,423</b>	5,977	1,19	4,739
<b>Menor Valor</b>	<b>1,423</b>	<b>5,977</b>	<b>1,19</b>	<b>4,739</b>

3.1.2 Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado

Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica	
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante
Morgenstern-Prince	1,666	9,816	1,463
Bishop	1,668	9,815	1,453
Fellenius	<b>1,423</b>	9,676	1,19
<b>Menor Valor</b>	<b>1,423</b>	<b>9,676</b>	<b>1,19</b>

3.1.3 Com Nível D'água + Rejeito Adensado

Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica	
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante
Morgenstern-Prince	1,666	13,62	1,485
Bishop	1,668	13,619	1,475
Fellenius	<b>1,442</b>	13,485	1,205
<b>Menor Valor</b>	<b>1,442</b>	<b>13,485</b>	<b>1,205</b>

3.2 2º Alçamento

3.2.0 Final de Construção				
Método de Cálculo Usado	Final de Construção			
	T.Montante	T. Jusante		
Morgenstern-Prince	5,353	1,579		
Bishop	5,352	1,582		
Fellenius	5,308	1,517		
<b>Menor Valor</b>	<b>5,308</b>	<b>1,517</b>		
3.2.1 Com Nível D'água				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
Morgenstern-Prince	<b>1,485</b>	6,63	1,182	9,736
Bishop	<b>1,476</b>	6,632	1,189	9,763
Fellenius	<b>1,322</b>	6,492	1,055	9,043
<b>Menor Valor</b>	<b>1,322</b>	<b>6,492</b>	<b>1,055</b>	<b>9,043</b>
3.2.2 Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Morgenstern-Prince	<b>1,465</b>	9,728	1,182	
Bishop	<b>1,476</b>	9,727	1,189	
Fellenius	<b>1,322</b>	9,602	1,055	
<b>Menor Valor</b>	<b>1,322</b>	<b>9,602</b>	<b>1,055</b>	
3.2.3 Com Nível D'água + Rejeito Adensado				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Morgenstern-Prince	<b>1,468</b>	16,04	1,184	
Bishop	<b>1,48</b>	16,037	1,191	
Fellenius	<b>1,325</b>	15,024	1,057	
<b>Menor Valor</b>	<b>1,325</b>	<b>15,024</b>	<b>1,057</b>	
3.3. 3º Alçamento				
3.3.0 Final de Construção				
Método de Cálculo Usado	Final de Construção			
	T.Montante	T. Jusante		
Morgenstern-Prince	4,573	1,495		
Bishop	4,575	1,497		
Fellenius	4,388	1,428		
<b>Menor Valor</b>	<b>4,388</b>	<b>1,428</b>		
3.3.1 Com Nível D'água				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		Rebaixamento Rápido
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	T. Montante
Morgenstern-Prince	<b>1,402</b>	6,35	1,222	8,746
Bishop	<b>1,412</b>	6,253	1,227	8,748
Fellenius	<b>1,204</b>	6,233	1,053	8,659
<b>Menor Valor</b>	<b>1,204</b>	<b>6,233</b>	<b>1,053</b>	<b>8,659</b>
3.3.2 Com Nível D'água + Rejeito Recém Lançado				
Método de Cálculo Usado	Percolação Estável	Análise Sísmica		
	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante	
Morgenstern-Prince	<b>1,402</b>	9,765	1,222	
Bishop	<b>1,412</b>	9,765	1,227	
Fellenius	<b>1,204</b>	9,636	1,053	
<b>Menor Valor</b>	<b>1,204</b>	<b>9,636</b>	<b>1,053</b>	
3.3.3 Com Nível D'água + Rejeito Adensado				
	Percolação Estável	Análise Sísmica		

Método de Cálculo Usado	T. Jusante	T. Montante	T. Jusante
Morgenstern-Prince	<b>1,404</b>	16,222	1,224
Bishop	<b>1,414</b>	16,221	1,229
Fellenius	<b>1,206</b>	15,435	1,055
<b>Menor Valor</b>	<b>1,206</b>	<b>15,435</b>	<b>1,055</b>

## ANEXO II

