

Dimensionamento de Barragem para Deposição de Resíduos de Beneficiamento de
Rochas Ornamentais

Marta FleichmanPrellwitz
Paola Machado Barreto Manhães

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF
Campos dos Goytacazes – RJ
Março– 2013

Dimensionamento de Barragem para Deposição de Resíduos de Beneficiamento de
Rochas Ornamentais

Marta FleichmanPrellwitz
Paola Machado Barreto Manhães

“Projeto Final em Engenharia Civil
apresentado ao Laboratório de
Engenharia Civil da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências
para obtenção do título de Engenheiro
Civil.”

Orientador: Prof.: Paulo César de Almeida Maia

Co-orientador: Prof.: Sergio Tibana

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF

Campos dos Goytacazes – RJ

Março– 2013

(FICHA CARTOGRÀFICA)

Dimensionamento de Barragem para Deposição de Resíduos de Beneficiamento de
Rochas Ornamentais

Marta FleichmanPrellwitz
Paola Machado Barreto Manhães

“Projeto Final em Engenharia Civil
apresentado ao Laboratório de
Engenharia Civil da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro, como parte das exigências
para obtenção do título de Engenheiro
Civil.”

Aprovada em 27 de Março de 2013.

Comissão Examinadora

Prof.: Paulo César de Almeida Maia (Orientador, D.Sc, Geotecnia) - UENF

Prof.: Sergio Tibana (Co-Orientador, D.Sc , Geotecia) - UENF

Prof.: Aldo DurandFarfan (D.Sc, Geotecnia) – UENF

Eng. Paulo Antônio Siso de Oliveira (MSc., Geotecnia) - UFPA

DEDICATÓRIA

Dedico este projeto ao Bernardo que, com muito carinho e apoio, não mediu esforço para me ajudar a chegar nesta etapa da minha vida, por compreender a minha dedicação ao estudo, por acima de tudo ser amigo e companheiro. Aos meus pais, irmãos e familiares, pela paciência ao me ouvirem contar cada passo que dei e tudo que aprendi durante esta jornada, pela compreensão da minha ausência em vários momentos e pela mão que me deram em cada dificuldade, me ensinando sempre a crescer cada vez mais. Dedico a Elma, pela nossa amizade, pela força e felicidade que sempre me transmitia ao acompanhar esta jornada ao meu lado.

Aos meninos da turma, obrigada pela paciência, pelo aprendizado, por cada momento de diversão que passei ao lado de vocês, a união e o apoio que sempre estiveram ao nosso lado fortalecendo a nossa amizade. Aos professores do LECIV que foram indispensáveis na minha vida acadêmica e na conclusão deste projeto final.

Agradeço ao Milton pela amizade, pelo apoio, pelo aprendizado e pelos capuchinos, voltarei sempre para tomar! Dedico esta conquista a pessoa que dividiu cada momento dela comigo, Paola.

E o que dizer a você Paulo? Mais do que indispensável, dedico este projeto ao orientador, pela sua paciência na orientação, pelo incentivo que nos deu ao longo do curso, por todos os ensinamentos e pela amizade. Passaram-se quatro anos e eu não precisei pintar meu cabelo de preto, viu?

Por fim, meu eterno agradecimento a todos que deixaram suas marcas na minha trajetória acadêmica, profissional e para que este trabalho fosse realizado.

Com muito carinho,
Marta FleichmanPrellwitz.

Dedico todo meu esforço a meu pai que é meu maior mestre, tanto na minha vida pessoal quanto na profissional e é um exemplo de honestidade e a minha mãe que é um exemplo de paciência e doação às pessoas à sua volta. Ao meu marido Felipe Paes, companheiro de vida por me dar força, me apoiar nos momentos de dificuldade e me compreender nos momentos em que a dedicação aos estudos foi exclusiva.

A todos os amigos, que estiveram do meu lado em vários momentos da minha vida e principalmente aos que caminharam junto comigo nesses 4 anos, em especial para Aline Faial, minha companheira de estudos, noites viradas, alegrias e tristezas, a Markssuel Marvilla, pela sua humildade e enorme disposição de ajudar a todos, a Marta, que, principalmente durante estes últimos meses em que no aproximamos mais, foi uma amiga confidente, paciente com problemas e esquecimentos e a Clovis Jr., por me ensinar a crescer pessoalmente e profissionalmente. A meu orientador, Paulo Maia, por ser um ótimo orientador acadêmico e pessoal, que consegue fazer com que percebamos e sejamos melhores do que pensamos ser.

Meus agradecimentos aos professores Aldo Durand, por ter sido quem me apresentou a vida acadêmica, Jonas Alexandre, por sempre ter palavras de força, Saboya, por ter sido um amigão que trata o aluno como igual e Milton, por todos os papos divertidos e grandes conhecimentos transmitidos. Por fim, meu eterno agradecimento aos meus amigos, familiares e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse realizado.

Com carinho, Paola Manhães.

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais, irmãos e namorados por compreenderem os momentos de ausência em que a dedicação à universidade foi exclusiva, por se disporem a nos transportar quando tínhamos que carregar livros e mais livros, notebook e todo tipo de material de estudo, por nos prepararem o que comer quando precisávamos ficar horas e horas na frente do computador, enfim, por serem os pilares que nos ajudam a suportar toda a carga que recebemos.

A todo corpo acadêmico do LECIV, que foi tão importante na nossa vida acadêmica, em especial ao nosso orientador Paulo Maia pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta monografia.

A nossa turma da UENF, que sempre unida, nos ajudamos uns aos outros nos momentos mais desesperadores durante a vida acadêmica.

Aos membros do corpo de avaliadores Aldo Duránd, Paulo Siso e Sérgio Tibana por nos enriquecerem com os conhecimentos que serão transmitidos para nós a partir de suas críticas construtivas sobre o presente trabalho.

Por fim agradecemos a todos que tenham contribuído direta ou indiretamente com a conquista desse resultado.

SUMÁRIO

RESUMO	xi
LISTA DE FIGURA	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS, SIMBOLOS, SINAIS E UNIDADES	xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações iniciais.....	1
1.2 – Apresentação do projeto.....	5
CAPÍTULO II – ESTUDO GEOTÉCNICO	10
2.1 - Ensaio de caracterização do solo.....	10
2.2 - Ensaio SPT	13
2.3 –Ensaio de compactação.....	16
2.4 - Compressão simples.....	16
2.5 - Cisalhamento direto.....	17
CAPÍTULO III – ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	19
3.1 – Considerações iniciais.....	19
3.2 - Apresentação do perfil analisado.	19
3.3 - Determinação dos parâmetros utilizados na análise.....	20
3.4 –Detalhamento das Fases	20
3.5 – Estabilidade do corte para empréstimo de solo	26
CAPÍTULO IV – ESTIMATIVA DE RECALQUE.....	27
CAPITULO V – SISTEMA DE DRENAGEM.....	29
5.1 - Considerações iniciais	29
5.2 – Sistema de drenagem superficial	29
5.2.1 – Determinação da intensidade de precipitação	30
5.2.2 - Sarjeta de Corte – pé do primeiro dique.....	32
5.2.3 - Sarjeta de Aterro – Plataforma de acesso do primeiro, do segundo e do terceiro dique .	38
5.2.4 - Sarjeta de Aterro – Plataforma de acesso do quarto dique.....	42
5.2.5 - Descida d’água	44
5.2.6 - Saída d’água	46
5.2.7 - Valeta de Proteção de Corte	48
5.3 – Sistema de drenagem subterrânea	51
5.3.1 - Geocomposto.....	52
5.3.2 - Dreno de pé.....	56

CAPÍTULO VI - INSTRUMENTAÇÃO.....	59
6.1 – Considerações iniciais.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	66

RESUMO

O Estado do Espírito Santo é o estado brasileiro mais representativo na produção de rochas ornamentais. Abriga também todas as atividades extrativistas, beneficiamento primário e secundário. Especialmente durante o processo de beneficiamento, um significativo volume de resíduos sólidos são gerados. Devido à questões de ordem ambiental, as empresas do ramo vêm investindo em processos de deposição controlada ou de reuso desse resíduo. A forma mais comum de deposição é através de Barragem de Rejeito. Deste modo, este projeto final de engenharia tem por objetivo elaborar os projeto de engenharia de uma Barragem de rejeito para contenção de resíduos sólidos provenientes do beneficiamento de rocha ornamental no Estado do Espírito Santo.

Para isso foi determinado o local onde será implantada a barragem, o método construtivo e o material que seria utilizado no corpo da barragem de forma a aproveitar o rejeito como material de construção da barragem. Foi preciso determinar a melhor porcentagem de mistura (rejeito mais solo) de forma a manter ou aumentar a resistência do material da barragem. Foi realizada também a análise da estabilidade dos taludes da barragem de forma a evitar a ocorrência de rupturas.

No projeto faz-se ainda o dimensionamento do sistema de drenagem superficial e subterrâneo.

Fato relevante é a atenção que se deve dar em obras deste tipo com relação à possibilidade de catástrofes ambientais e perdas significativas para o empreendedor caso ocorram rupturas. Por isso fez-se a especificação de um sistema de monitoramento. A finalidade deste sistema é acompanhar das deformações e as pressões d'água da barragem na fase de execução e de operação.

Como produto final são apresentadas as plantas...., além da memória de cálculo e revisão bibliográfica dos aspectos teóricos envolvidos.

PALAVRA CHAVE: Barragem, resíduo, estabilidade, dimensionamento, drenagem, instrumentação

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Método Construtivo de Montante (FONTE: ALBUQUERQUE FILHO, 2004 por ARAUJO, 20006).....	4
Figura 2 - Método Construtivo de Jusante (FONTE: ALBUQUERQUE FILHO, 2004 por ARAUJO, 2006).....	4
Figura 3 - Método Construtivo de Linha de Centro (FONTE: ALBUQUERQUE FILHO, 2004 por ARAUJO, 2006).....	5
Figura 4–Vista em 3D da locação da Barragem.....	6
Figura 5 - Geometria inicial da Barragem.....	7
Figura 6 - Curvas Granulométricas do Ensaio de Caracterização.	13
Figura 7–Metodologia analisada.....	16
Figura 8 - Corte 00 indicando a localização dos alteamentos, do depósito de rejeito e o perfil do terreno.	19
Figura 9 - Fator de segurança para a Fase 1.	21
Figura 10 - Fator de segurança para a Fase 2.....	21
Figura 11 - Fator de segurança para a Fase 3.....	22
Figura 12 - Fator de segurança para a Fase 4.....	23
Figura 13 - Fator de Segurança para a Fase 5.....	23
Figura 14 - Fator de segurança para a Fase 6.....	24
Figura 15 - Fator de segurança para a Fase 7.....	24
Figura 16 - Fator de segurança para a Fase 8.....	25
Figura 17 - Fator de segurança do talude natural com inclinação 1:1,5.	26
Figura 18 - Fator de segurança do talude natural com inclinação 1:1.....	27
Figura 19 - Análise do recalque através do Sigma.	28
Figura 20 - Detalhe do recalque total mostrando a variação do deslocamento.....	28
Figura 21 - Localização da Cidade de Cachoeiro de Itapemirim e das Cidades próximas que possuem equações matemáticas de chuva.....	31
Figura 22 - Demonstração do cálculo da área de contribuição. (FONTE: DNIT, 2006).	34
Figura 23 - Demonstração dos valores atribuídos para o cálculo da área de contribuição. ..	34
Figura 24 - Variáveis para o dimensionamento da sarjeta.	36
Figura 25 - Área de contribuição da sarjeta.....	39
Figura 26 - Área de contribuição da sarjeta do quarto dique.....	42
Figura 27- Variáveis para o dimensionamento da descida d'água.....	45
Figura 28 - Elementos da saída d'água (FONTE: DNIT, 2006).	46
Figura 29 - Valeta de proteção de corte de seção trapezoidal (FONTE: DNIT, 2006).....	49
Figura 30 - Variáveis para o dimensionamento da valeta de proteção.	50
Figura 31 - Geocomposto utilizado no sistema de drenagem horizontal da barragem.....	52
Figura 32 - Rede de fluxo através do SEEP/W.....	53
Figura 33 - Elementos necessários para a determinação do gradiente hidráulico.....	54
Figura 34 - Projeção da vazão para a tesão deste projeto.....	55
Figura 35- Esquema ilustrativo de piping (FONTE: AZEVEDO, 2005).....	56
Figura 36 - Detalhe do dreno de pé.....	58
Figura 37 - Localização do plano de ruptura e das áreas mais críticas.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização.....	10
Tabela 2 - Resultados do Ensaio de Compressão Simples	17
Tabela 3 - Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto	18
Tabela 4 - Resumo das considerações de cada Fase que será analisada	25
Tabela 5 – Resumo das intensidades de precipitação calculada para cada cidade	32
Tabela 6 - Coeficiente de escoamento superficial (FONTE: DNIT, 2006).	33
Tabela 7 - Dimensões da Sarjeta do pé do primeiro dique.	36
Tabela 8 - Coeficiente de rugosidade (FONTE: DNIT, 2006).	37
Tabela 9 - Resumo da sarjeta do pé do primeiro dique.	37
Tabela 10 - Dimensões da sarjeta da banquetta do primeiro, segundo e terceiro dique.	40
Tabela 11 - Resumo da sarjeta da banquetta do primeiro, segundo e terceiro dique.	41
Tabela 12 - Dimensões da sarjeta da banquetta do quarto dique.....	43
Tabela 13 - Resumo da sarjeta da banquetta do quarto dique.....	43
Tabela 14 - Resumo da descida d'água considerando o fluxo do quarto, terceiro, segundo e primeiro dique.	45
Tabela 15 - Resumo da saída d'água do primeiro dique.	47
Tabela 16 - Resumo da saída d'água do segundo dique.	47
Tabela 17 - Resumo da saída d'água do terceiro dique.	48
Tabela 18 - Resumo da saída d'água do quarto dique.	48
Tabela 19 - Dimensões da valeta de proteção do talude natural.	50
Tabela 20 - Verificação do Geocomposto.	56
Tabela 21 - Grandezas necessárias para monitoramento da segurança estrutural e ambiental	61
Tabela 22 - Relação dos instrumentos e das grandezas medidas.....	62
Tabela 23 - Frequência usuais de leitura (FONTE: CRUZ, 1996).....	65

LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS, SIMBOLOS, SINAIS E UNIDADES

c'	Parâmetro de coesão
ϕ'	Ângulo de atrito
SU	Resistencia não drenada
E	Módulo de Deformabilidade
FS	Fator de Segurança
i	Precipitação pluviométrica
T	Tempo de recorrência
t	Tempo de duração de chuva
Q	Descarga de projeto
C	Coeficiente de Escoamento Superficial
A	Área
V	Velocidade de Escoamento
n	Coeficiente de rugosidade
r	Raio hidráulico
I	Inclinação
e	Espessura da sarjeta/valeta
H	Altura total
h	Altura desconsiderando a borda livre
B	Dimensão sarjeta, valeta, descida d'água.
b	Dimensão sarjeta valeta
L	Comprimento sarjeta, valeta, descida d'água
K	Coeficiente em função da declividade
Y	Altura do fluxo
g	Aceleração da gravidade
X	Espaçamento entre sarjeta e saída d'água
R	Raio de curvatura
i_{AB}	gradiente do ponto A ao ponto B
σ	Tensão efetiva
γ	Peso específico do solo
Q_{adm}	Capacidade de vazão admissível
FR_{IN}	Fator de redução intrusão no solo
FR_{CR}	Fator de redução da fluência
FR_{CC}	Fator de redução da colmatação química

FR_{BC} Fator de redução da colmatação biológica
k Coeficiente de permeabilidade

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais

A Engenharia Civil emprega diferentes tipos de materiais de construção. Com o avanço da construção civil estão sendo utilizados com mais frequência materiais de construção provenientes de rochas ornamentais. Empregadas como elemento estrutural de monumentos, na fabricação de concreto e na construção civil, o uso das rochas ornamentais teve seu início quando o homem utilizava as cavernas para abrigo e proteção.

O Brasil está entre os cinco maiores produtores mundiais de rochas ornamentais, sendo o Espírito Santo o mais representativo estado produtor de rochas ornamentais no país, responsável por 65% das exportações em 2006. A maior cidade da região sul do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, é conhecida nacionalmente pela produção de rochas ornamentais, destacando-se pelo pioneirismo no setor.

Apesar de tradicionalmente concentrada na região de Cachoeiro de Itapemirim, hoje a produção de rochas encontra-se disseminada por todo o estado, sobretudo nas regiões sul, que possui grande concentração de empresas de beneficiamento, e norte, com forte concentração da atividade extrativa. O estado abriga todas as atividades da cadeia produtiva principal: jazidas e pedreiras dos mais diferentes tipos de mármore e granitos, e empresas para beneficiamento primário (serragem) e secundário (polimento e obtenção de produtos acabados). O beneficiamento primário consiste no desdobramento dos blocos extraído das rochas em céu aberto, ou seja, ocorre a transformação dos blocos em chapas que podem ter várias espessuras. Os principais métodos de obtenção das chapas são por corte com laminas, disco diamantado ou fio diamantado. Já o beneficiamento secundário consiste na transformação dessas placas em produtos finais como na criação de peças isoladas, como esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e em edificações (revestimentos de interiores e exteriores). O processo de beneficiamento primário a serragem nos teares é auxiliado por uma polpa de água, cal e gralha, despejada continuamente sobre a rocha, para otimização do corte e resfriamento das lâminas. Neste processo de corte, 25% a 30% do bloco acabam se tornando resíduo.

Durante o processo de serragem nos teares é formada uma espécie de lama devido ao auxílio da polpa de água, cal e granalha despejada durante o corte e fragmentos da rocha ornamental que restaram do beneficiamento. Essa lama denominada de rejeito é um resíduo resultante do processo de beneficiamento que não possui valor econômico direto e quando o descarte desse rejeito é feito sem nenhum planejamento causa muito impactos ao meio ambiente, ressaltando que a quantidade de rejeito gerada é muito elevada.

Historicamente esses rejeitos eram dispostos diretamente nos cursos d'água, porém atualmente a legislação e custos de recuperação inviabilizam esse método, apesar de ainda ser praticado em algumas partes do mundo. Muitas indústrias tem feito um investimento de forma considerável na recuperação ambiental e despoluição da etapa final do processo de beneficiamento. Para o tratamento e ocultação de resíduos é necessário investir em tecnologias específicas, como por exemplo: barragens de decantação, tratamentos físicos e químicos para separação de elementos tóxicos (quando existentes), construção de aterros sanitários, entre outros.

Sendo a ocultação uma boa solução para o destino desse rejeito, o objetivo principal deste projeto será dimensionar uma barragem de rejeito proveniente de rochas ornamentais, especificamente mármore e granito, de forma a aproveitar parcialmente esse material que será depositado. Nesse trabalho, o material barrado será reutilizado, parcialmente, de uma maneira sustentável e contribuirá para que o rejeito não seja disposto de forma errada e prejudicial ao meio ambiente.

As barragens de rejeito são estruturas construídas a fim de conter os materiais resultantes do beneficiamento de rochas ornamentais, sendo executada em estágios, na medida em que os rejeitos são gerados. Apesar da legislação, conhecimento e tecnologia disponíveis, as barragens de contenção de rejeitos continuam rompendo e causando prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Uma razão comum para as falhas é que as barragens não são operadas de acordo com critérios adequados para projeto, construção e operação. Algumas falhas ocorridas em barragens de contenção de rejeitos custaram vidas e causaram danos ambientais consideráveis. Acidentes graves resultaram em grandes volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente. Sendo assim é válido ressaltar a grande importância dos estudos deste assunto e de um dimensionamento de maneira correta de forma que não ocorram falhas.

Existem diversas maneiras de classificar barragens, em geral, são classificadas como rígidas ou deformáveis.

As barragens rígidas podem ser divididas em barragens de alvenaria, em arco ou em contraforte e as deformáveis são as constituídas por materiais plásticos, que são as de terra ou por blocos com movimentos independentes dentro do conjunto, que são as mistas ou de enrocamento.

As barragens de terra ainda podem se classificar por barragens homogêneas, zoneadas ou mistas. Nas homogêneas o perfil é constituído por um único material, nas zoneadas o perfil é constituído por mais de um tipo de solo e nas mistas há o emprego do solo no perfil e de outro material mais denso como enrocamento ou face de concreto, por exemplo.

De acordo com Passos (2009) que citou Victorino (2007), as barragens de rejeito podem ser construídas com terras ou de enrocamento, compactadas com material de empréstimo ou com o próprio rejeito da usina de beneficiamento. Normalmente é construído um dique inicial, o qual deve ter uma capacidade de retenção de rejeitos para dois ou três anos de operação, e posteriormente, servirá como embasamento para os alteamentos sucessivos.

Ainda segundo Passos (2009) o alteamento de barragem de rejeito consiste em um método construtivo, geralmente empregado após o enchimento do reservatório, com o objetivo de aumentar sua vida útil. Podem-se assumir diferentes métodos construtivos, sendo os principais os três citados abaixo:

a) Método de Montante: é o mais antigo, simples e econômico. Ainda é bastante utilizado devido a maior facilidade construtiva, por ser o mais econômico e o que exige menos espaço físico. Este método é iniciado a partir de uma barragem ou dique piloto normalmente de solo ou enrocamento e o rejeito é então lançado à montante deste dique inicial ao longo do seu perímetro (Figura 1). O processo de alteamento é feito ao longo de todo perímetro e é repetido até a elevação total da barragem determinada em projeto, deslocando o eixo da crista sempre para montante.

Apesar de ser o mais utilizado, esse método construtivo apresenta um baixo controle construtivo tornando-se crítico principalmente em relação à segurança. O agravante neste caso está diretamente relacionado ao fato de os alteamentos serem realizados em cima de matérias em estado de compactação fofa, previamente depositados e não consolidados. Este método permite uma

susceptibilidade à liquefação e possibilidade de ocorrência de piping entre dois diques (erosão interna).



Figura 1 - Método Construtivo de Montante (FONTE: ALBUQUERQUE FILHO, 2004 por ARAUJO, 20006).

b) Método de Jusante: Este método também é iniciado a partir de uma barragem ou dique piloto normalmente de solo ou enrocamento, em seguida os alteamentos são realizados para a jusante do dique de partida. O eixo da crista vai se movendo a jusante conforme a construção de novos diques (Figura 2). Continuando este processo também até a elevação total da barragem determinada pelo projeto. As vantagens deste método consistem no controle do lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção, apresentar resistência aos efeitos dinâmicos, possuir baixa susceptibilidade de liquefação e drenagem facilitada. Nenhuma parte da barragem é construída sobre o rejeito, logo as desvantagens deste método são que na sua construção necessita-se de maiores volumes de material para construção apresentando maiores custos devido à necessidade de empréstimo de material e necessita-se de uma área muito maior do que pelo método de montante.

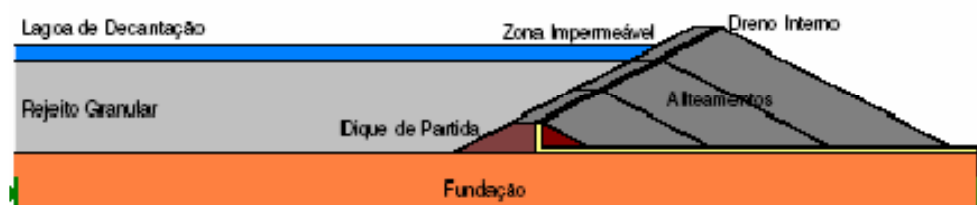


Figura 2 - Método Construtivo de Jusante (FONTE: ALBUQUERQUE FILHO, 2004 por ARAUJO, 2006).

c) Método de Linha de Centro: Segundo Passos (2009) seu comportamento estrutural se assemelha com ao do método de jusante. O deslocamento do eixo da barragem ocorre no mesmo alinhamento vertical, nunca movendo o eixo da crista do dique de partida (Figura 3). Este método é um método intermediário que tenta minimizar as desvantagens apresentadas pelo método à montante e à jusante.

Neste método, torna-se possível a utilização de zonas de drenagem interna em todas as fases de alteamento, o que possibilita o controle da linha de saturação e promove uma dissipação de poropressões, tornando o método apropriado para utilização inclusive em áreas de altas sismicidade.



Figura 3 - Método Construtivo de Linha de Centro (FONTE: ALBUQUERQUE FILHO, 2004 por ARAUJO, 2006).

Segundo Araujo (2006) relata que a escolha do método construtivo irá depender de fatores como: tipo de processo industrial, características geotécnicas e nível de produção de rejeito, necessidade de reservar água, necessidade de controle de água percolada, topografia, hidrologia e custos envolvidos. Porém as empresas mineradoras tem preferido cada vez mais altear as barragens pelo método de montante devido a sua facilidade construtiva e por ser mais economicamente viável.

1.2 – Apresentação do projeto

Inicialmente foi definida a localização da construção da barragem, pois esta deve ser o mais próximo possível do sistema de beneficiamento e em locais com maciço de fundação de baixa permeabilidade. Sendo assim, através da planta topográfica foi escolhida uma região de formação barreiras, de forma que tenha um aproveitamento dos taludes para o barramento do rejeito conforme pode ser apresentado na Figura 4.

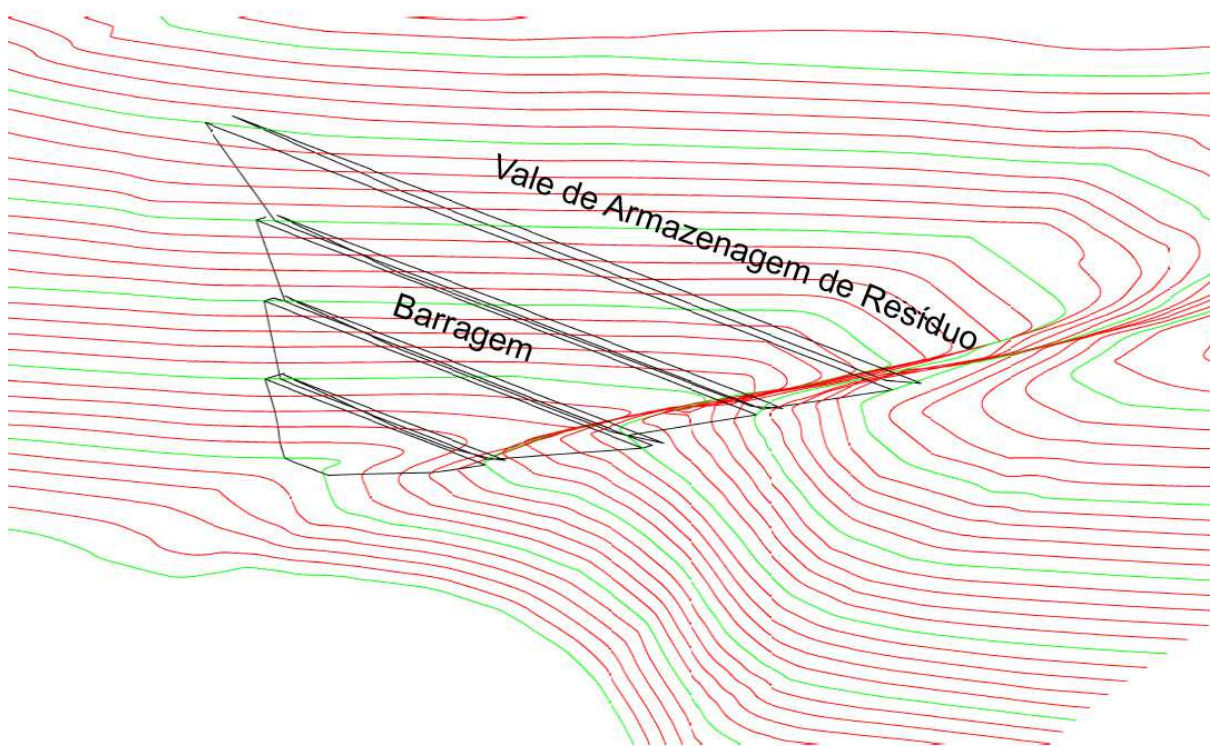


Figura 4—Vista em 3D da locação da Barragem.

Após as definições geométricas possíveis de se definir a partir da planta topográfica, como comprimento, limitações do corpo da barragem de forma a aproveitar melhor a topografia do terreno, entre outras definições, foi definido o método construtivo. O método escolhido foi à montante, com quatro alteamentos no total sendo cada alteamento com altura de 10m (Figura 5). Assim pode-se determinar a altura da barragem, pois ela apresentará uma altura final de 40m.

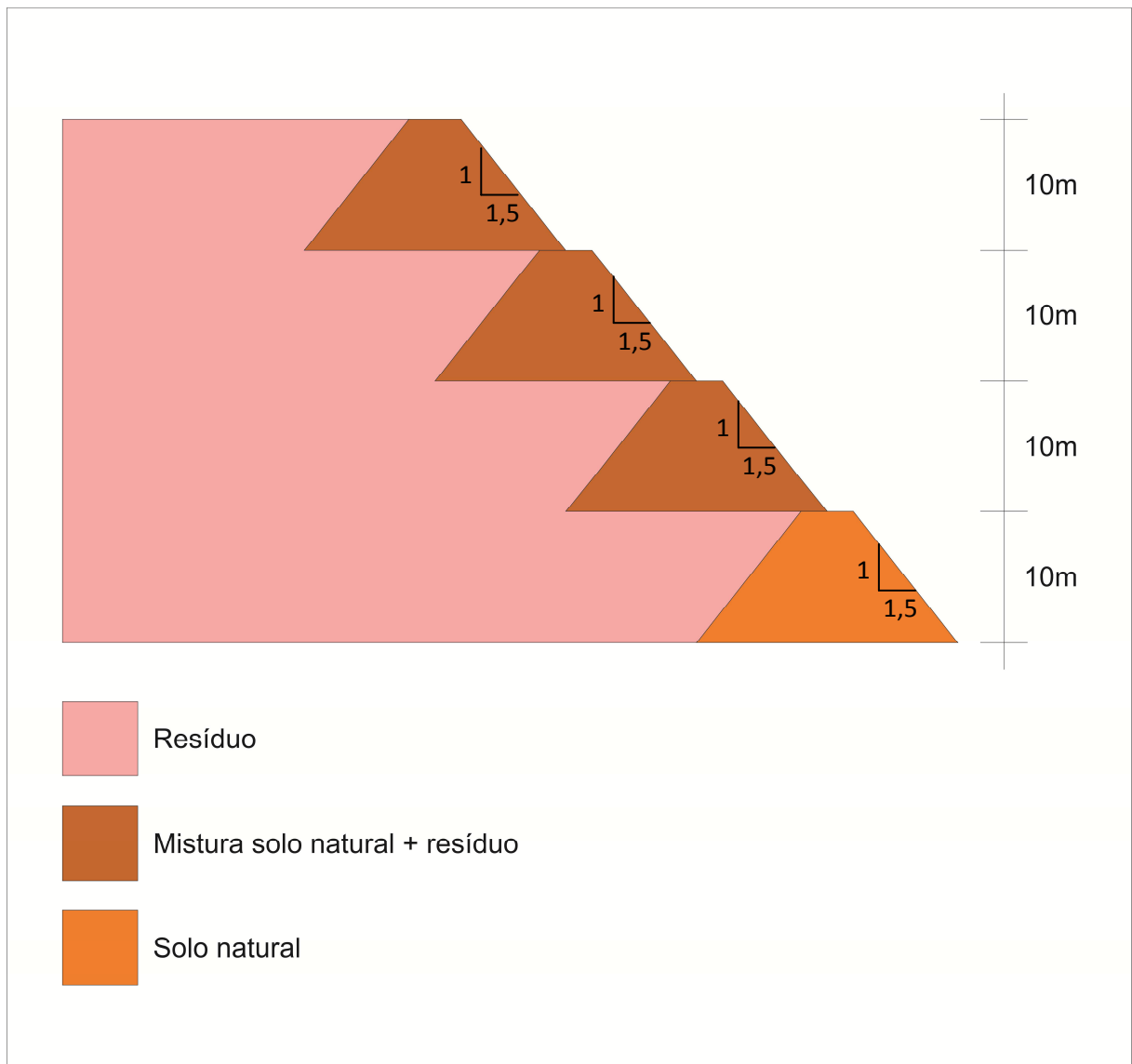


Figura 5 - Geometria inicial da Barragem.

Posteriormente foi feito um estudo geotécnico dos materiais que compõem a barragem para que pudéssemos definir a melhor inclinação através da análise de estabilidade do talude de forma a completar a definição geométrica da barragem. Neste estudo geotécnico foi preciso definir a granulometria do rejeito e do solo do dique inicial. Com a granulometria podemos conhecer a composição destes materiais.

Para o dique inicial foi necessário executar o ensaio de Compactação Proctor Normal que tem como objetivo conseguir uma densidade específica seca para uma proporção ótima de água, de forma a garantir as propriedades mecânicas necessárias para o solo. Definida a umidade ótima e o grau de compactação ótimo, deve-se executar os ensaios de cisalhamento direto e o ensaio de compressão

simples que definirão respectivamente, as resistências drenada e não drenada para este mesmo material da primeira camada.

Nas seguintes camadas da barragem, que serão compostas de uma mistura do material do dique inicial e do rejeito barrado, serão executados ensaios de compressão simples para obter a resistência não drenada da mistura. Para efeito comparativo será realizado este ensaio para o solo do local, que será utilizado no dique inicial sem a mistura, e para misturas com as porcentagens de 5%, 10% e 20% de rejeito. Com os resultados destes ensaios poderá ser definida a mistura que apresenta a melhor resistência não drenada, e então ela será utilizada na construção dos próximos alteamentos. Também serão executados os ensaios de cisalhamento direto para definir a resistência drenada.

Para o material que será barrado deve-se avaliar apenas a resistência drenada, já que o rejeito sofrerá os esforços gerados pela outra camada da barragem apenas muito tempo depois de depositado. Serão realizados os ensaios de compactação para definir, entre outras propriedades, o volume que será utilizado no ensaio de cisalhamento direto.

Conhecendo os parâmetros iniciais de entrada c' e ϕ' definidos no ensaio de cisalhamento direto e SU (resistência não drenada) definido no ensaio de compressão simples, foi utilizado o programa GeoSlope para análise de estabilidade da condição de ruptura do talude da barragem através do método de Bishop. A partir desta ferramenta poderemos conhecer inclinações estáveis de forma a definir a inclinação mais econômica.

A maioria dos problemas em obras deste porte está relacionada a um sistema de drenagem não tão eficiente, desestabilizando assim a estrutura. Para evitar-se o evento catástrofes deve-se executar um projeto de drenagem de forma a drenar toda a água existente para fora do corpo da barragem. Em projetos de barragem o sistema de drenagem pode ser dividido em drenagem do corpo da barragem, drenagem da área de depósito de material rejeitado e drenagem da água dos taludes que formam a área de depósito.

No sistema de drenagem do corpo da barragem foi escolhido o emprego do dreno de pé, pois este sistema de drenagem é eficaz no combate ao evento de piping que consiste na erosão causada devido ao carreamento de solo no pé da barragem desprotegida.

Na área de depósito de material rejeitado será utilizado o sistema de drenagem através de um geocomposto filtrante e impermeabilizante, para garantir a condução desta água para um depósito de forma e permitir que não contamine o lençol freático. Na fundação da barragem será utilizado o mesmo geocomposto para garantir que a água da fundação que tentar percolar ao encontro do outro geocomposto seja conduzida para fora do corpo da barragem da mesma forma e não provoque danos na superfície de contato do geocomposto com a fundação.

A água de chuva que cair sobre o corpo da barragem e seus taludes deverá ser drenada com intuito de que não provoque erosão na superfície dos taludes e ocorram problemas graves, para este sistema de drenagem será necessário de sarjetas e descidas d'água para conduzir de forma segura.

Finalmente a drenagem da água dos taludes que formam a área de depósito consiste em um sistema de calhas que drenam a água da chuva para fora da área da barragem de forma que esta água não se misture com o material rejeitado, para isto serão utilizadas valetas de proteção.

Como parâmetros de análise para o dimensionamento do sistema de drenagem deve-se fazer um estudo hidrológico do local de implementação da barragem e a porcentagem de água constituinte na lama que será lançada.

Outro fator muito importante para garantir a estabilidade da obra são as instrumentações, estas auxiliaram no monitoramento do comportamento da barragem. O monitoramento é feito durante a fase de construção e a fase de operação da barragem.

CAPÍTULO II – ESTUDO GEOTÉCNICO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no programa experimental do presente projeto.

Para determinar os parâmetros geotécnicos do material presente na fundação da barragem, do material de empréstimo para a construção do primeiro alteamento e da mistura (resíduo e solo) utilizada na construção dos seguintes alteamentos, foi definido o seguinte programa de ensaios:

- Caracterização completa;
- SPT;
- Compactação;
- Adensamento;
- Compressão simples;
- Cisalhamento direto;

2.1 - Ensaios de caracterização do solo

Os ensaios de caracterização dos solos foram realizados seguindo os procedimentos apresentados pelas normas NBR 7181 (Análise granulométrica); NBR 6508 (Densidade real dos grãos); NBR 6459 (Limite de liquidez); NBR 7180 (Limite de plasticidade).

A Tabela apresenta um resumo dos principais resultados obtidos nos ensaios de caracterização do solo natural, da mistura (75% solo natural e 25% de resíduo) e do resíduo.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de caracterização

Propriedades dos Materiais					
	Densidade Real dos Grãos (g/cm ³)	Umidade Hidroscópica (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo Natural	2,67	1,00	41,40	26,10	15,30
Mistura (75% solo natural + 25% resíduo)	2,73	3,07	-	NP	NP
Resíduo	2,84	0,74	-	NP	NP

A Figura 6 apresenta as curvas granulométricas do solo natural, da mistura e do resíduo, respectivamente. A partir delas podemos observar que o solo natural é classificado como CL, a mistura e o rejeito são classificados como SM.

Características Granulométricas

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	3,7	3,2	14,6	21,2	9,8	12,0	35,4	CL

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₆₀	D ₈₅	C _c	C _u
0,0004	0,0006	0,0012	0,0937	0,2421	0,0	626,9



Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,67 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = - %
Umidade Higroscópica = 1,0 %

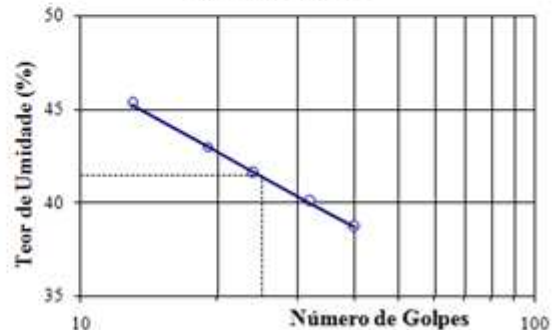
Índices de Atterberg:

Limite de Liquidez = 41,4 %
Limite de Plasticidade = 26,1 %
Índice de Plasticidade = 15,3 %
Índice de Consistência = - %

Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 0,43 (inativa)

Limite de Liquidez



a) Solo natural

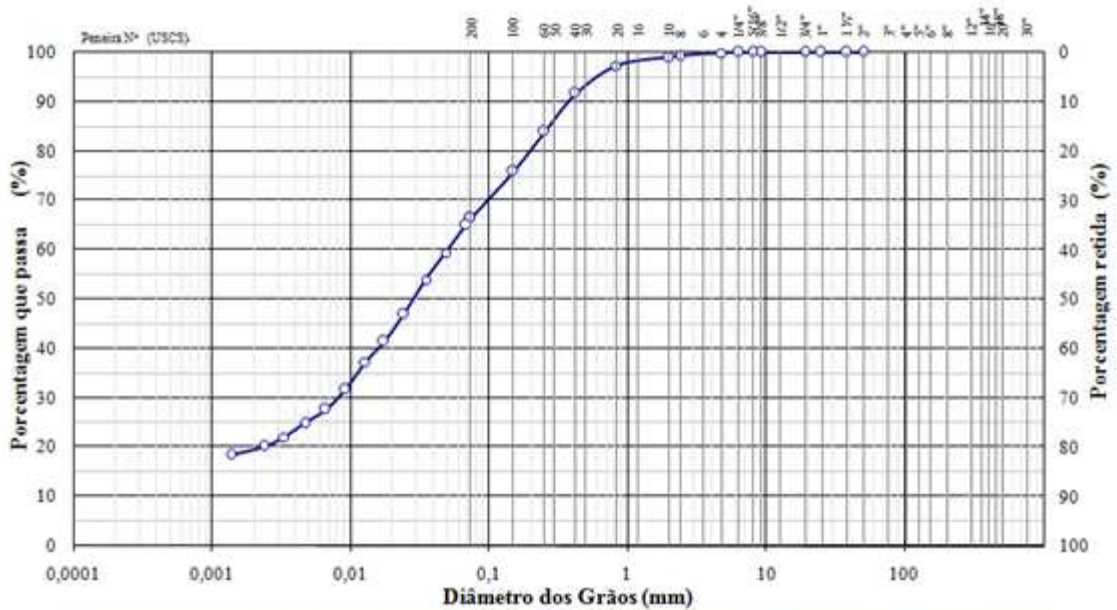
Características Granulométricas Similares

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	1,0	4,8	14,2	17,3	43,2	19,5	SM

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	C _c	C _u
0,0007	0,0011	0,0081	0,0290	0,0506	0,2725	1,7	68,0



ABNT	Argila		Silte			Areia			Pedregulho			Pedra	Maução
	fin	grossa	fin	média	grossa	fin	média	grossa					
USCS	Argila		Silte			Areia			Pedregulho				
NET	Argila		Silte			Areia			Pedregulho				

b) Mistura

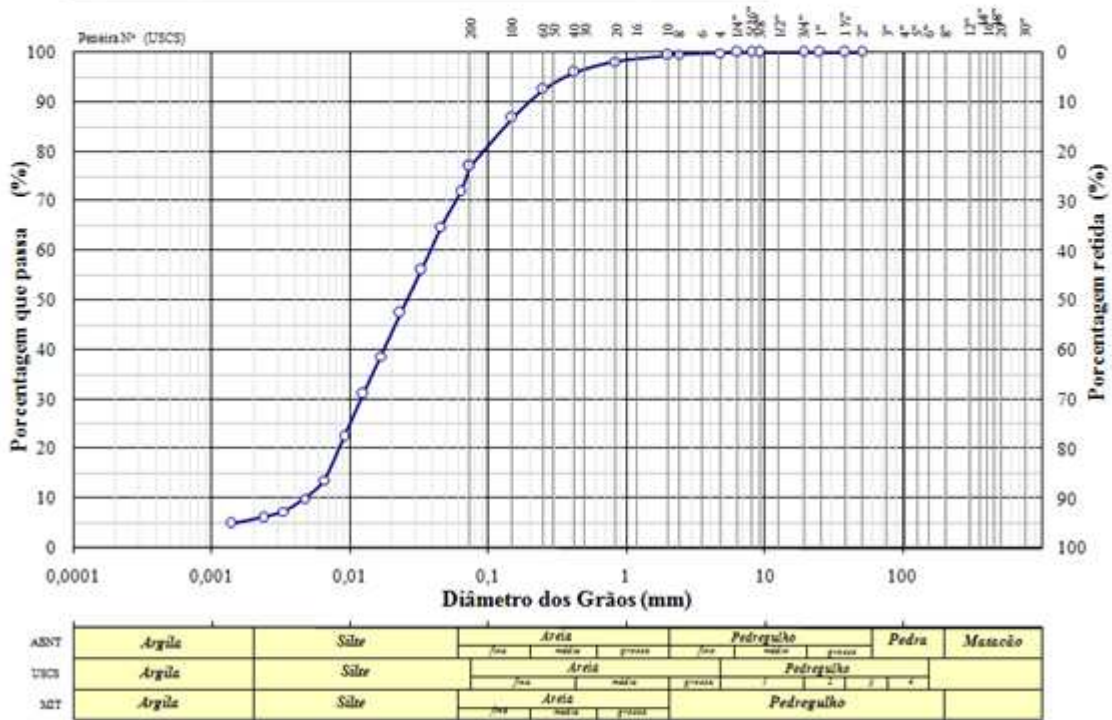
Características Granulométricas Similares

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	0,5	2,5	7,2	19,1	64,9	5,7	SM

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	Cc	Cu
0,0047	0,0070	-	-	-	-	8,2	8,2



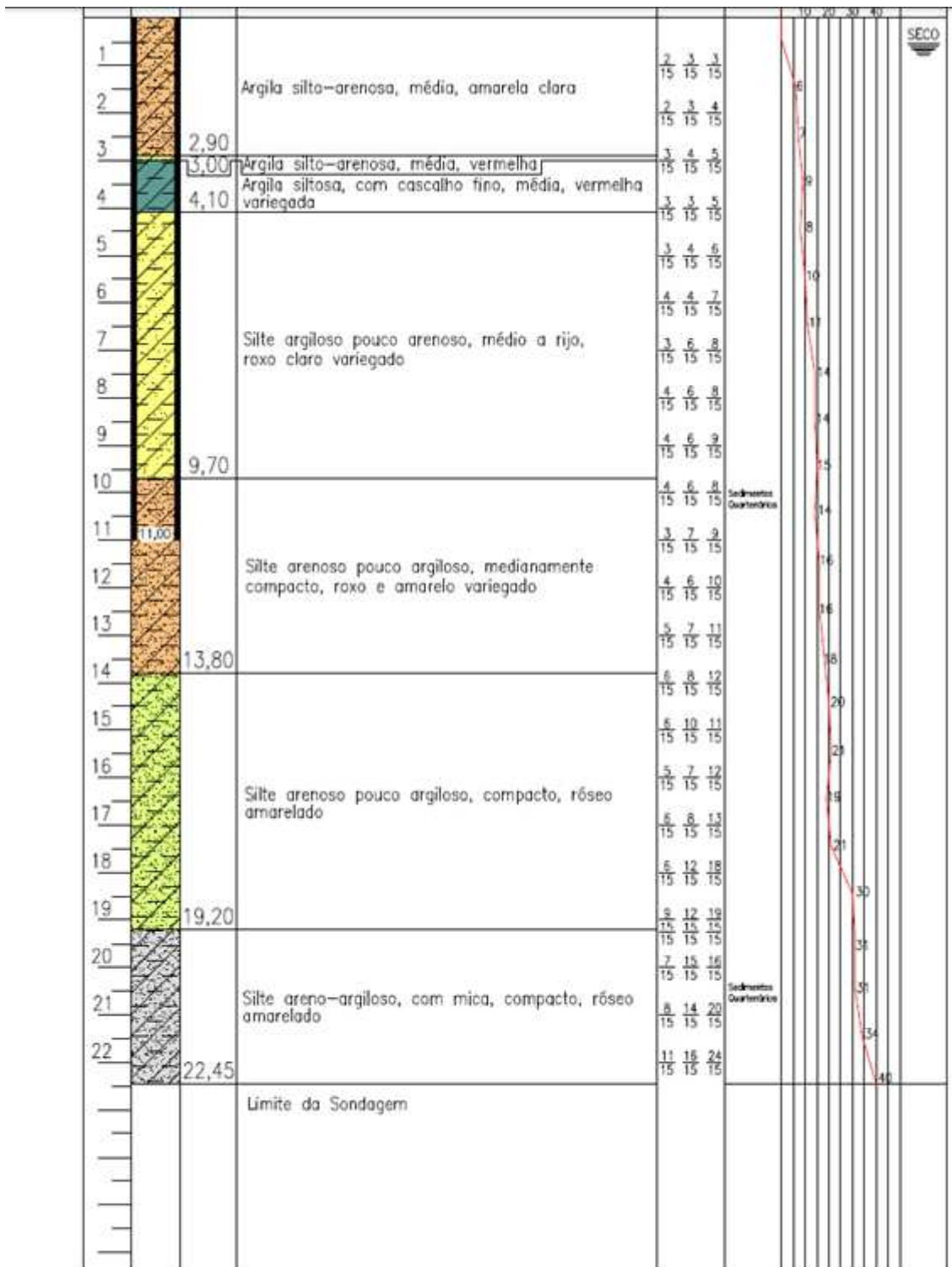
c) Resíduo

Figura 6 - Curvas Granulométricas do Ensaio de Caracterização.

2.2 - Ensaio SPT

Para a determinação do Ângulo de Atrito (ϕ') e do Módulo de Deformabilidade (E) do solo da fundação utilizou-se o Ensaio SPT.

Os Parâmetros ϕ' e E foram determinados segundo Bowles (1996) através do método empírico determinado na literatura. A Figura 7 apresenta o perfil analisado e a tabela de cálculo da metodologia utilizada.



a) Furo de sondagem

Dados do SPT						
Profundidade (m)				SPT		
camada	início	final	média	66%	60%	70%
1	0	3	1,5	6	6,6	5,7
2	3	4,1	3,55	9	9,9	8,5
3	4,1	9,7	6,9	12	13,2	11,3
4	9,7	13,8	11,75	16	17,6	15,1

Densidade Relativa							
camada	Peso específico (kN/m ³) Bowles (1996)	Tensão geostática média (kPa)	Norma	Gibbs e Holtz (1957)	Skempton (1986)	Yoshida et al. (1988)	média
1	15,5	23,25	0,21	0,56	0,44	0,41	0,40
2	17,5	62,125	0,27	0,57	0,47	0,44	0,44
3	17,8	122,82	0,36	0,55	0,46	0,46	0,46
4	20	235	0,48	0,50	0,44	0,49	0,48

Ângulo de atrito (graus)											
Bowles (1996)					Shioi e Fukui (1982)						
camada	Como areia fina	Como areia média	Mello (1971)	Bolton (1986)	para estradas	para construções	para uso geral	Meyerhof (1959)	Peck et al. (1974)	Michell et al. (1978)	Média
1	29,3	30,7	33,3	40,1	25,1	29,0	22,5	34,1	28,5	35,0	30,5
2	30,5	32,0	34,1	39,4	27,4	30,1	23,8	34,6	29,5	36,5	31,5
3	32,5	33,3	34,6	38,7	29,3	31,1	25,1	34,8	31,0	35,0	32,4
4	33,7	35,3	35,1	38,1	31,5	32,4	26,8	35,1	33,0	25,0	33,5

Módulo de Deformabilidade (MPa)		
camada	Clayton (1986)	Bowles (1996)
1	11,22	16,94
2	19,8	30,36
3	31,02	47,784
4	49,28	75,328

b) Tabelas utilizadas no cálculo.

Description	Very loose	Loose	Medium	Dense	Very dense
Relative density D_r	0	0.15	0.35	0.65	0.85
SPT N'_{70} : fine	1-2	3-6	7-15	16-30	?
medium	2-3	4-7	8-20	21-40	> 40
coarse	3-6	5-9	10-25	26-45	> 45
ϕ : fine	26-28	28-30	30-34	33-38	
medium	27-28	30-32	32-36	36-42	< 50
coarse	28-30	30-34	33-40	40-50	
γ_{wet} , kN/m ³	11-16*	14-18	17-20	17-22	20-23

* Excavated soil or material dumped from a truck has a unit weight of 11 to 14 kN/m³ and must be quite dense to weigh much over 21 kN/m³. No existing soil has a $D_r = 0.00$ nor a value of 1.00. Common ranges are from 0.3 to 0.7.

c) Tabela para determinação do peso específico (FONTE: BOWLES, 1996).

Figura 7–Metodologia analisada.

2.3 –Ensaio de compactação

Através do ensaio de compactação foi determinada a umidade ótima para moldagem dos corpos de prova de compressão simples e cisalhamento direto. A umidade ótima encontrada foi igual a 17,2%.

2.4 - Compressão simples

O ensaio de compressão simples foi utilizado para a determinação da melhor mistura, através da análise do comportamento não drenado do solo.

Com a umidade ótima determinada através do ensaio de compactação, foram preparados vários corpos de prova, variando a porcentagem do resíduo. As porcentagens determinadas para os corpos de prova foram 0%, 12,5%, 25% e 50% de resíduo. Foram moldados 2 corpos de prova de cada porcentagem determinada, com o auxílio de um molde cilíndrico e uma prensa hidráulica manual.

O ensaio foi executado em prensa hidráulica automática e os resultados estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do Ensaio de Compressão Simples

Resumo dos Resultados		
	Resistência (kPa)	SU (kPa)
0%	121,45	60,73
12,5%	310,23	155,11
25%	351,13	175,57
50%	362,02	181,01

Através dos resultados encontrados podemos perceber que a resistência não drenada aumenta proporcionalmente com o aumento da porcentagem de resíduo incorporado à mistura, apesar disso foi empregue na análise a porcentagem de 25% de resíduo na mistura e a justificativa encontra-se no próximo tópico que fala do ensaio de cisalhamento direto realizado nas amostras de 25% e 50% para análise comparativa.

Sendo assim, o c' do solo natural e da mistura (75% de solo natural e 25% de resíduo) empregado nas análises de estabilidade são, respectivamente, 60,73 kPa e 175,57 kPa.

2.5 - Cisalhamento direto

Para comparar os efeitos do aumento da porcentagem de rejeito na mistura não só na resistência não drenada, foi feito o ensaio de cisalhamento direto na mistura com 25% e de 50% de resíduo, já que a partir da porcentagem de 20% a resistência não drenada praticamente se estabiliza.

Como resultado, obtivemos como valores de ϕ' 41,2° para a mistura de 25% de resíduo e 32,5° para 50% de resíduo, comprovando que a mistura de 25% atende melhor os parâmetros de resistência drenada.

Para determinação dos parâmetros de resistência para a análise de estabilidade foram realizados ensaios de cisalhamento direto no solo natural, na mistura e no resíduo. Os ensaios foram executados segundo a ASTM D3080 (2013). Através desse ensaio determinou-se a envoltória da resistência drenada (c' e ϕ'), e o Módulo de Deformabilidade (E) do solo de cada alteamento para análise de estabilidade.

A Tabela 3 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 3 - Resultados do Ensaio de Cisalhamento Direto

Parâmetros Geotécnicos			
	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (kPa)
Solo Natural	15,10	34,60	1495,00
Mistura (75% solo natural + 25% reído)	20,30	41,20	1785
Resíduo	3,20	39,50	1621

CAPÍTULO III – ANÁLISE DE ESTABILIDADE

3.1 – Considerações iniciais

Durante e após a construção de uma barragem, e após o enchimento do reservatório, a barragem de terra é submetida a um conjunto de solicitações que variam com o tempo, sendo necessário verificar se os fatores de segurança de cada etapa quanto à ruptura por cisalhamento satisfaz as exigências prefixadas pela NBR 11682 (2006).

O presente capítulo apresenta os parâmetros de cada camada de solo necessários para a análise de estabilidade, apresentação de cada fase de construção, fator de segurança e linha de ruptura de cada fase de construção obtidas através da análise de estabilidade feita no programa GEOSLOPE 2007.

3.2 - Apresentação do perfil analisado.

O perfil em que foi feita a análise de estabilidade foi o Corte 00 mostrado na Figura 8.

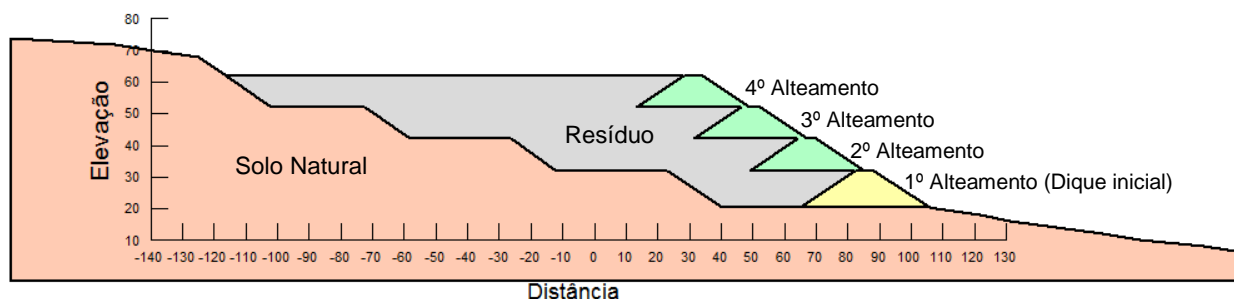


Figura 8 - Corte 00 indicando a localização dos alateamentos, do depósito de rejeito e o perfil do terreno.

A análise de estabilidade foi dividida em 8 fases, que serão detalhadas no item 3.4, sendo elas: Imediatamente após a construção do primeiro alateamento constituído de 100% de solo emprestado do próprio local (Fase 8), após o enchimento do reservatório de rejeito no nível do primeiro alateamento (Fase 7), imediatamente após a construção do segundo alateamento constituído de 75% de solo emprestado e 25% de rejeito (Fase 6), após o enchimento do reservatório de rejeito no nível do segundo alateamento (Fase 5), imediatamente após a construção

do terceiro alteamento constituído de 75% de solo emprestado e 25% de rejeito (Fase 4), após o enchimento do reservatório de rejeito no nível do terceiro alteamento (Fase 3), imediatamente após a construção do quarto alteamento constituído de 75% de solo emprestado e 25% de rejeito (Fase 2), após o enchimento do reservatório de rejeito no nível do quarto alteamento (Fase 1).

Vale ressaltar que a análise foi feita da fase mais crítica (Fase 1) até a fase menos crítica (Fase 8), já que na Fase 1 ocorre o maior estágio de sobrecarga.

3.3 - Determinação dos parâmetros utilizados na análise.

Foram determinados parâmetros não drenados e drenados para os alteamentos. Os parâmetros não drenados são utilizados quando a análise é logo após a construção do determinado alteamento, pois considera-se que nesse instante as poropressões ainda não foram dissipadas. Por outro lado os parâmetros drenados são empregados quando considera-se que as poropressões já foram dissipadas.

Os parâmetros do rejeito empregados na análise serão sempre drenados, pois a deposição do rejeito é lenta o suficiente para dissipar a poropressão.

Os parâmetros do solo de fundação foram determinados indiretamente através de resultados de sondagem. Correlações empíricas da bibliografia.

3.4 – Detalhamento das Fases

Fase 1 – Análise após o enchimento do reservatório de rejeito no nível do quarto alteamento.

Na presente fase de construção, onde os quatro alteamentos tem parâmetros drenados, foi encontrado um FS satisfatório de valor 1,345 (Figura 9).

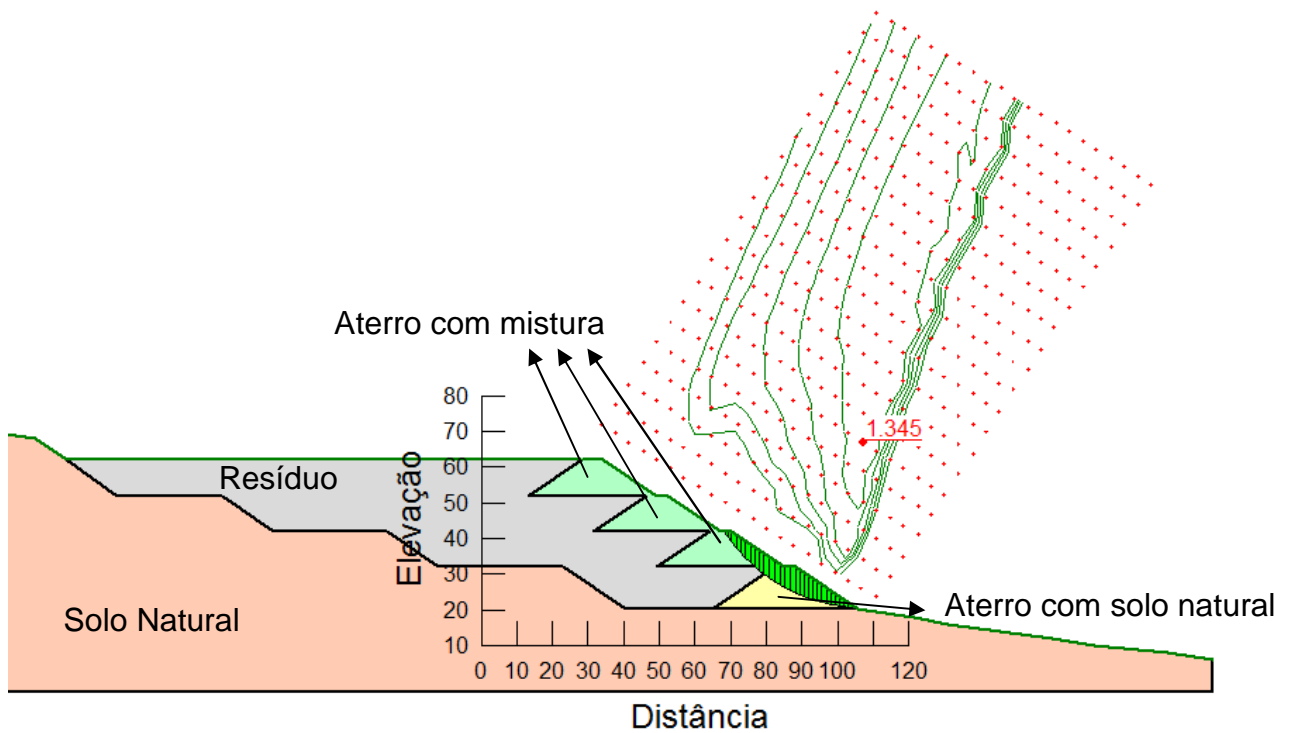


Figura 9 - Fator de segurança para a Fase 1.

Fase 2 – Análise imediatamente após a construção do quarto alteamento.

Na presente fase de construção, onde os três primeiros alteamentos tem parâmetros drenados e o quarto tem parâmetros não drenados, foi encontrado um FS satisfatório de valor 1,348 (Figura 10).

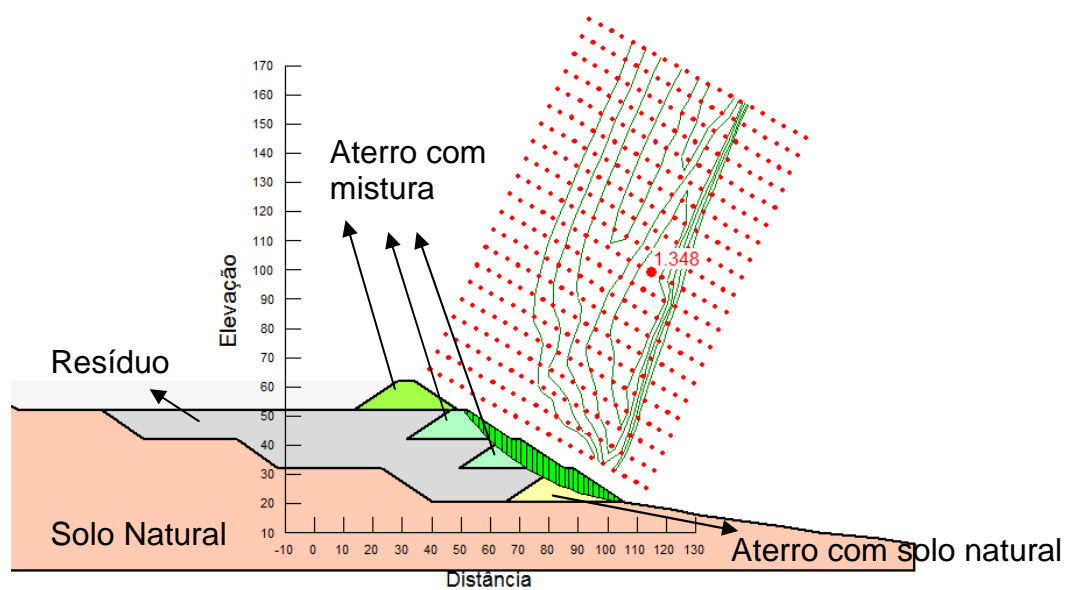


Figura 10 - Fator de segurança para a Fase 2.

Fase 3 – Análise após o enchimento do reservatório de rejeito no nível do terceiro alteamento.

Na presente fase de construção, onde os três primeiros alteamentos tem parâmetros drenados, foi encontrado um FS satisfatório de valor 1,338 (Figura 11).

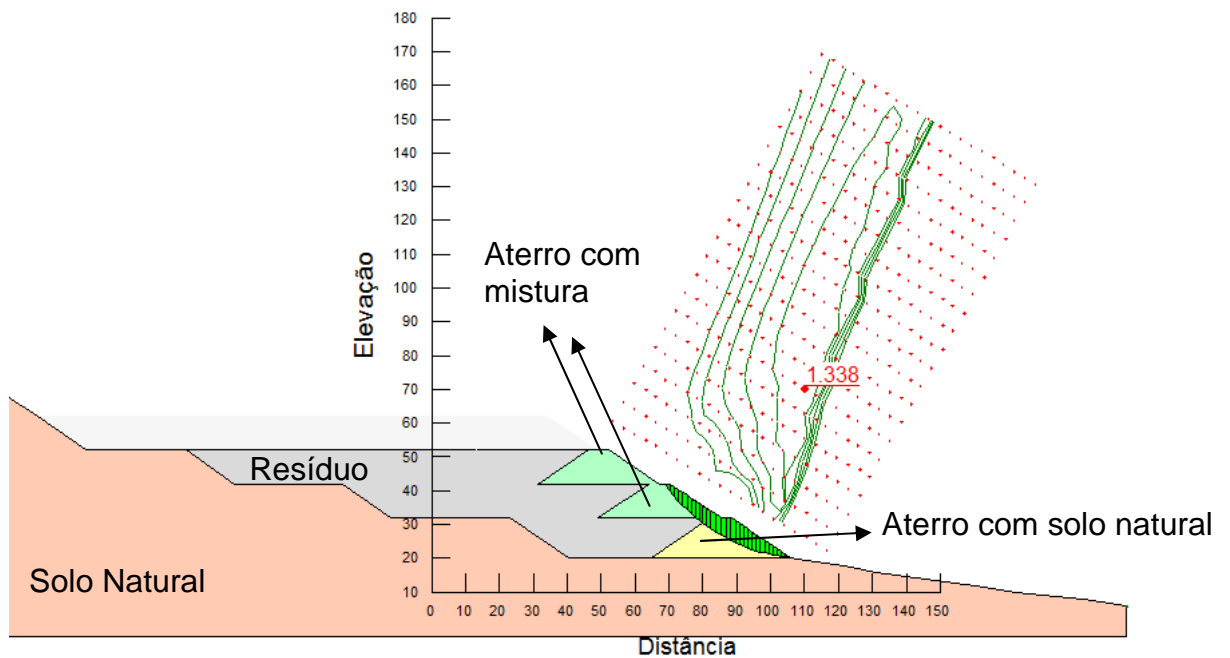


Figura 11 - Fator de segurança para a Fase 3.

Fase 4 – Análise imediatamente após a construção do terceiro alteamento.

Na presente fase de construção, onde os dois primeiros alteamentos tem parâmetros drenados e o terceiro tem parâmetros não drenados, foi encontrado um FS satisfatório de valor 1,329 (Figura 12).

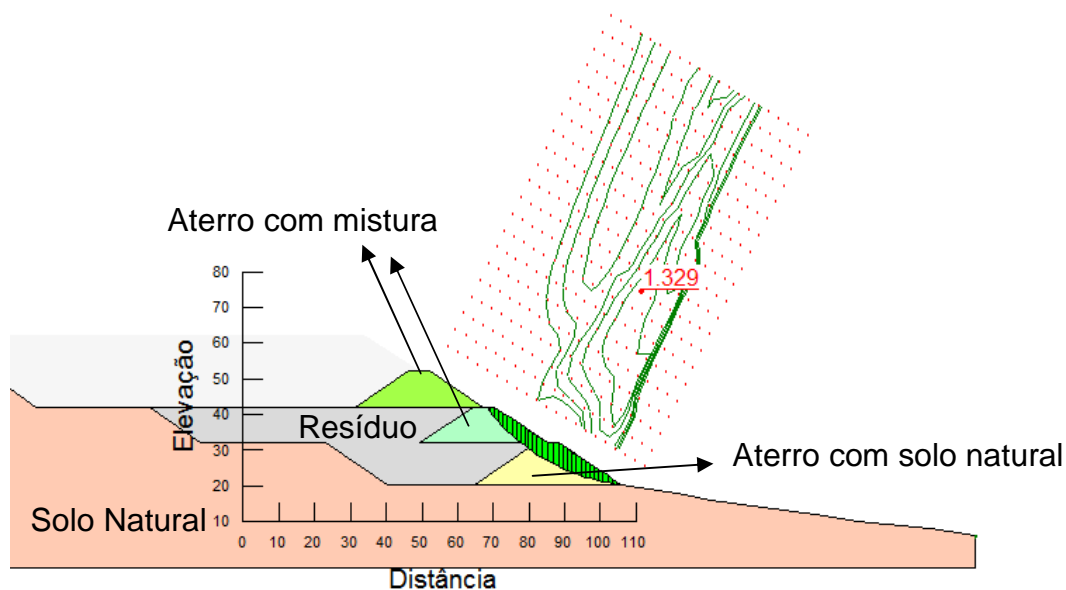


Figura 12 - Fator de segurança para a Fase 4.

Fase 5 – Análise após o enchimento do reservatório de rejeito no nível do segundo alteamento.

Na presente fase de construção, onde os dois primeiros alteamentos tem parâmetros drenados, foi encontrado um FS satisfatório de valor 1,333 (Figura 13).

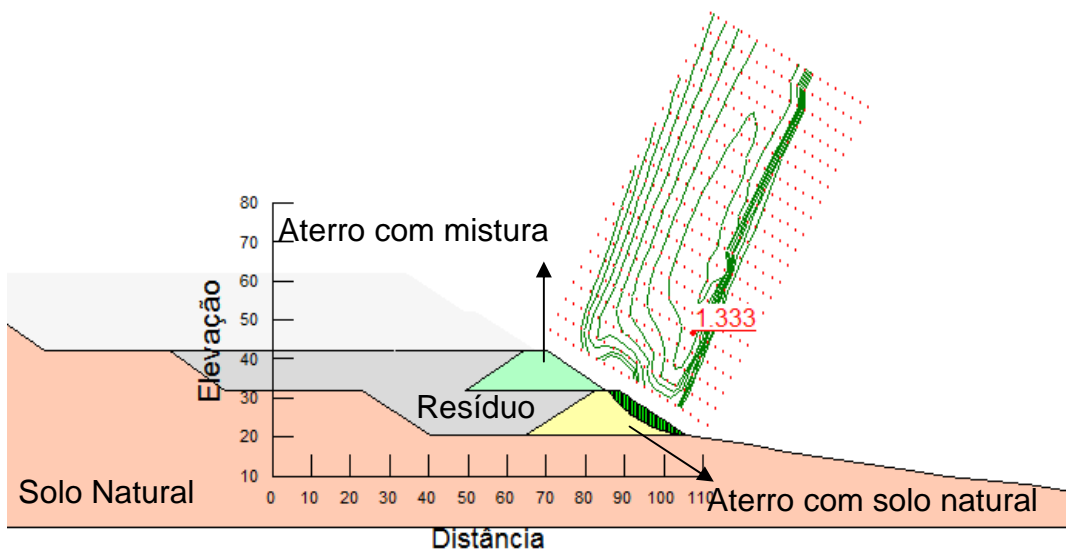


Figura 13 - Fator de Segurança para a Fase 5.

Fase 6 – Análise imediatamente após a construção do segundo alteamento.

Na presente fase de construção, onde o primeiro alteamento tem parâmetros drenados e o segundo tem parâmetros não drenados, foi encontrado um FS satisfatório de valor 1,341 (Figura 14).

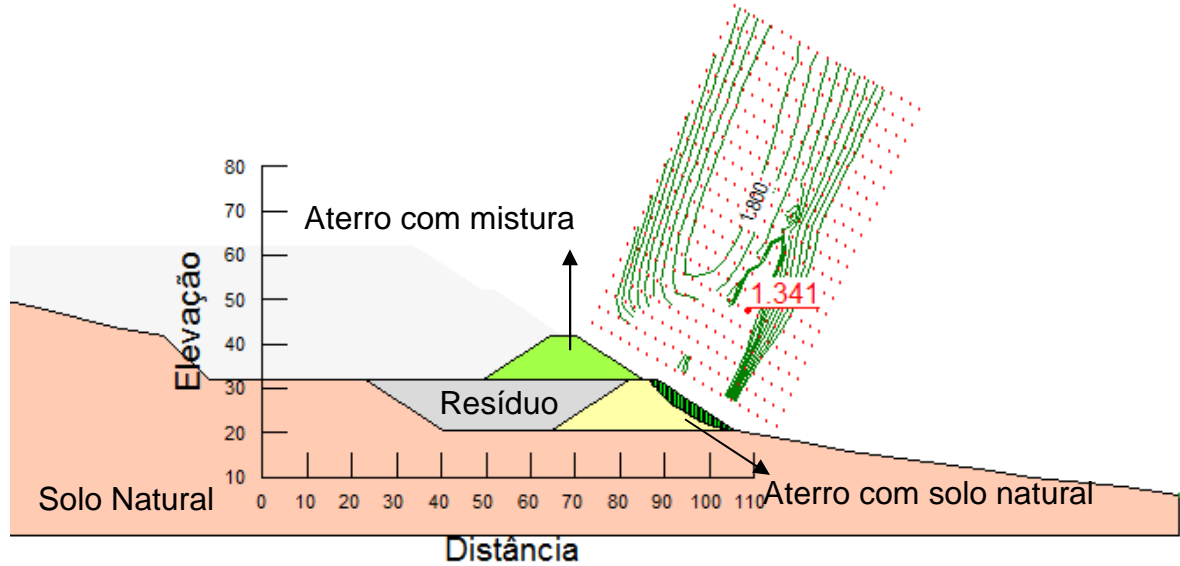


Figura 14 - Fator de segurança para a Fase 6.

Fase 7 – Análise após o enchimento do reservatório de rejeito no nível do primeiro alteamento.

Na presente fase de construção, onde o primeiro alteamento tem parâmetros drenados, foi encontrado um FS satisfatório de valor 1,334 (Figura 15).

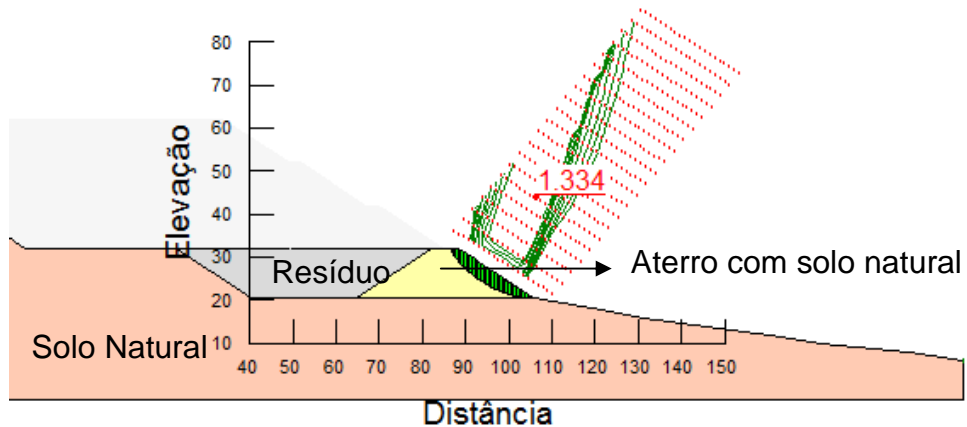


Figura 15 - Fator de segurança para a Fase 7.

Fase 8 – Análise imediatamente após a construção do primeiro alteamento.

Na presente fase de construção, onde o primeiro alteamento tem parâmetros não drenados, foi encontrado um FS insatisfatório de valor 1,346 (Figura 16).

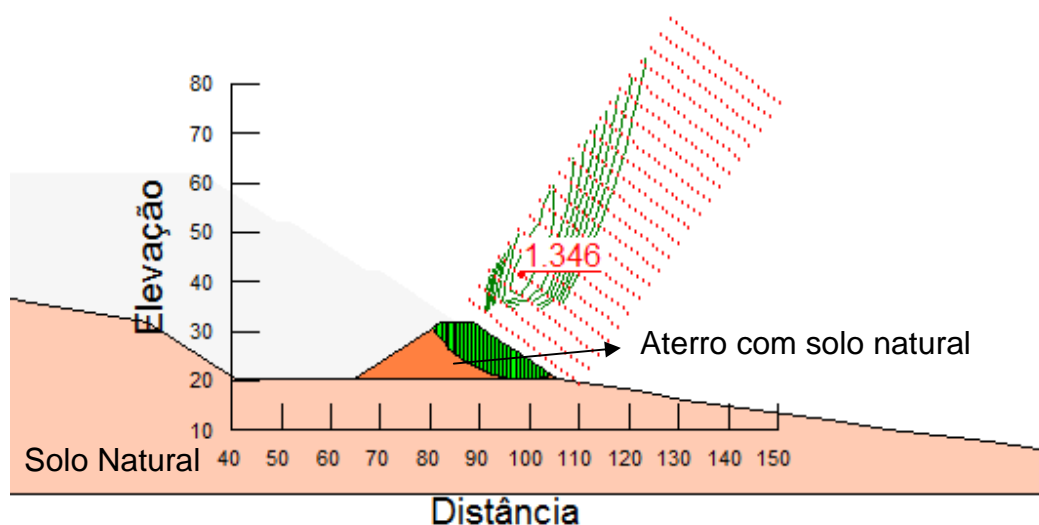


Figura 16 - Fator de segurança para a Fase 8.

A Tabela 4 apresenta um resumo de cada Fase que foi analisada, detalhando as características dos parâmetros utilizados (se será drenado ou não drenado).

Tabela 4 - Resumo das considerações de cada Fase que será analisada

Fases de análise	Parâmetros utilizados na análise				Nível do rejeito
	Alteamento 1 (Dique Inicial)	Alteamento 2	Alteamento 3	Alteamento 4	
1	Drenados	Drenados	Drenados	Drenados	Cota máxima do 4º alteamento
2	Drenados	Drenados	Drenados	Não drenados	Cota máxima do 3º alteamento
3	Drenados	Drenados	Drenados	-	Cota máxima do 3º alteamento
4	Drenados	Drenados	Não drenados	-	Cota máxima do 2º alteamento
5	Drenados	Drenados	-	-	Cota máxima do 2º alteamento
6	Drenados	Não drenados	-	-	Cota máxima do 1º alteamento
7	Drenados	-	-	-	Cota máxima do 1º alteamento
8	Não drenados	-	-	-	Reservatório vazio

3.5 – Estabilidade do corte para empréstimo de solo

Os volumes de corte para empréstimo de material para construção dos alteamentos serão retirados da bacia com a inclinação mínima do talude de 1:1.

Foi realizado o estudo de estabilidade do talude natural inicialmente com a inclinação 1:1,5 e verificou-se um fator de segurança de 1,804, como mostrado na Figura 17, que se mostra muito acima do necessário para taludes desta natureza. Então foi feita uma nova análise de estabilidade com inclinação de 1:1 que apresentou um fator de segurança satisfatório igual a 1,541, conforme Figura 18.

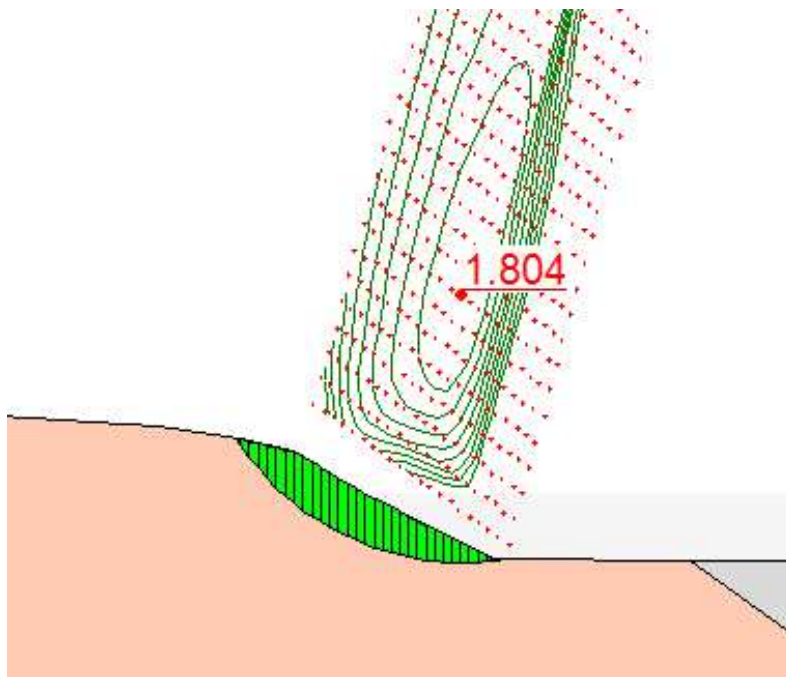


Figura 17 - Fator de segurança do talude natural com inclinação 1:1,5.

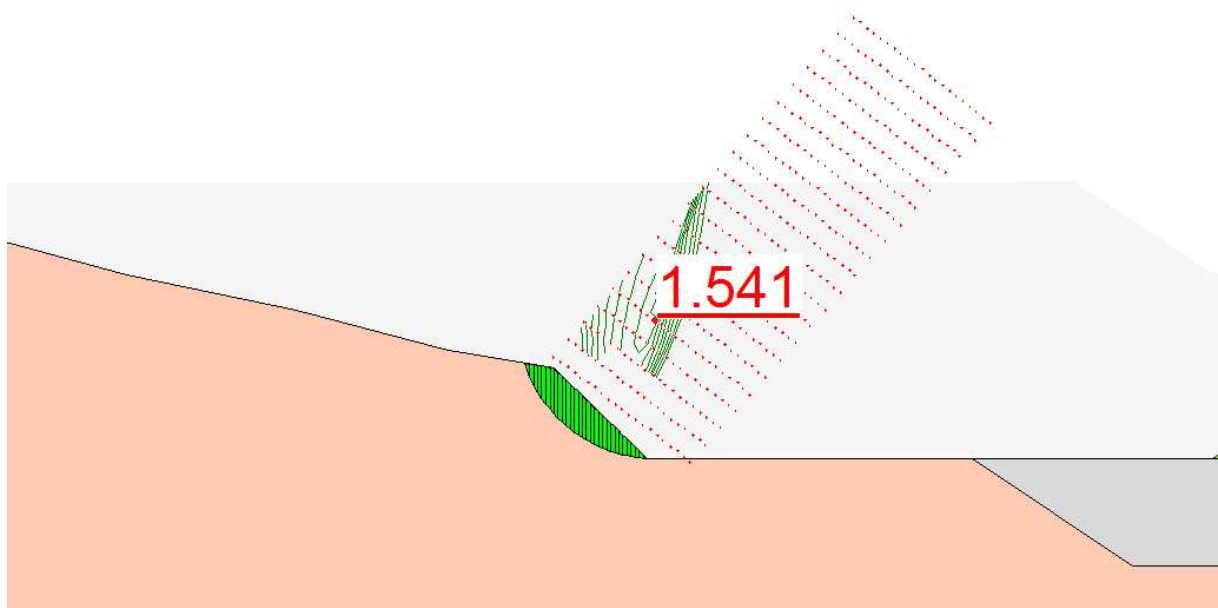


Figura 18 - Fator de segurança do talude natural com inclinação 1:1.

CAPÍTULO IV – ESTIMATIVA DE RECALQUE

Para uma análise geral dos recalques que acontecerão ao longo do tempo, foi realizada uma análise numérica no Sigma, como apresentado na Figura 19.

Como parâmetro de entrada, considerou-se o coeficiente de Poisson que foi 0,3, o Módulo de Deformabilidade, que é determinado através dos parâmetros drenados, pois a análise foi dos recalques totais e o peso específico. Os parâmetros drenados, o peso específico e o Módulo de Deformabilidade foram especificados no Capítulo II do presente trabalho.

Nessa análise foram determinados os recalques totais que foram de aproximadamente 2m (Figura 20).

Vale ressaltar que parte dos recalques serão corrigidos durante a construção.

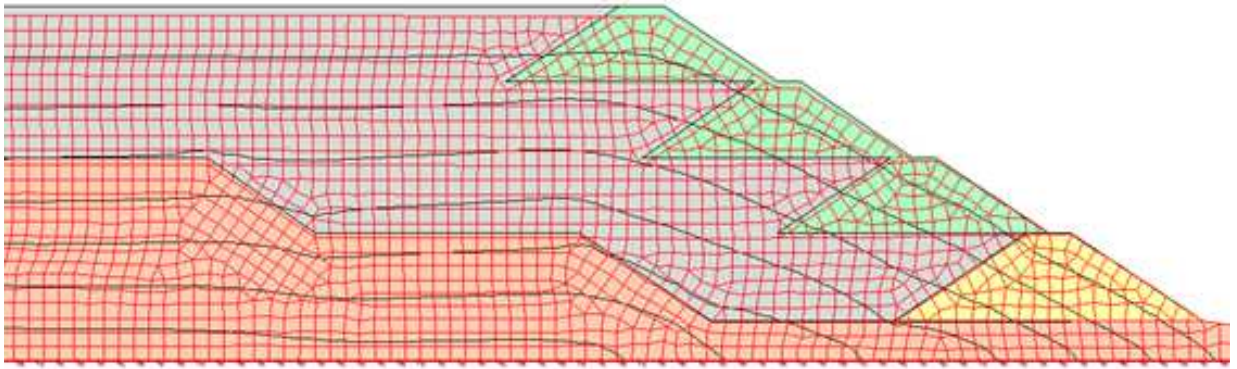


Figura 19 - Análise do recalque através do Sigma.

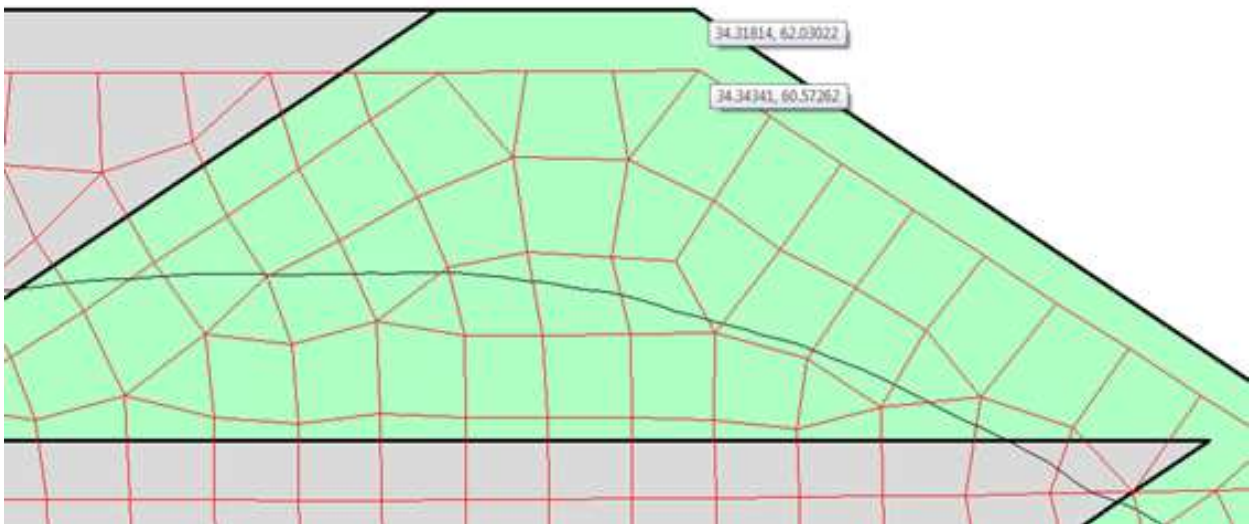


Figura 20 - Detalhe do recalque total mostrando a variação do deslocamento.

CAPITULO V – SISTEMA DE DRENAGEM

5.1 - Considerações iniciais

O princípio fundamental da drenagem é conduzir a água por caminhos mais fáceis seguindo seu curso sem maiores complicações. Pois um sistema de drenagem eficiente evita uma série de problemas.

A drenagem pode ser dividida em superficial e drenagem subterrânea.

Por mais compactado que esteja a estrutura de uma barragem, sempre haverá fluxo pelo maciço e este fluxo (vazão e rede de fluxo) deve ser conhecido para o dimensionamento do sistema de drenagem e para o direcionamento do fluxo de forma a não ocasionar problemas. O sistema de drenagem tanto superficial quanto o subterrâneo irá captar e conduzir estas águas para que no talude de jusante não haja fluxos ocasionando piping e erosão de forma que não desestabilize a estrutura.

5.2 – Sistema de drenagem superficial

O principal objetivo do sistema de drenagem superficial é evitar que a água precipitada sobre as plataformas dos diques e sobre os taludes provoquem erosões, para isso é preciso captá-las e conduzi-las ao local de desagüe seguro, resguardando assim a segurança e estabilidade da obra.

Existem diversos dispositivos de drenagem com diferentes objetivos, para que o sistema de drenagem seja eficiente é preciso conhecer e escolher o mais eficaz para o seu projeto.

Em projetos de barragem de terra os solos que compõem os diques estão sujeitos a erosão e, portanto, dentro dos diversos dispositivos do sistema de drenagem, foi preciso de um dimensionamento de sarjetas, revestidas com concreto, no pé do talude do primeiro dique e nas banquetas dos diques seguintes.

É importante mencionar que quando as sarjetas atingem seu comprimento crítico faz-se necessário uma descida d'água, ou seja, quando o comprimento de sarjeta calculado que suporta a descarga de contribuição é menor que o comprimento longitudinal necessário de sarjeta necessita-se de uma descida d'água para diminuir a descarga de contribuição que a sarjeta suportará e assim a sarjeta conseguirá conduzir a água sem riscos.

5.2.1 – Determinação da intensidade de precipitação

Para um dimensionamento adequado e eficaz do sistema de drenagem de um projeto, é preciso conhecer o comportamento de eventos de chuvas da região e obter a vazão correspondente da região. Uma das grandes dificuldades em projetos que necessitam de um sistema de drenagem é a determinação da precipitação máxima utilizada no dimensionamento.

Para a determinação da chuva máxima devem ser considerados o tempo de recorrência da chuva (período, em anos, em que a vazão será igualada ou superada) e a duração da chuva de projeto (tempo necessário para que toda a bacia contribua com o escoamento superficial).

Segundo Silva et al. (2003) a expressão mais utilizada para expressar a relação intensidade/duração/frequência da precipitação segundo Schwab et al. (1966) e Vilela e Mattos (1975) é (Equação 1):

$$i = \frac{kT^a}{(t+b)^c} \quad (1)$$

Onde:

i = intensidade máxima média das chuvas (mm/h)

T = Período de retorno (anos)

t = tempo de duração da chuva (min)

k, a, b, c = coeficientes de ajustamento específicos para cada localidade.

A partir desta equação geral, outros autores ajustaram equações matemáticas para algumas localidades com base em dados das estações pluviográficas das regiões.

Para o caso específico deste projeto, a Cidade de Cachoeiro de Itapemirim não possui uma equação matemática própria, então foi realizado um cálculo com base na equação de 3 regiões próximas e consideramos este valor para o dimensionamento do sistema de drenagem. A Figura 21 representa a cidade onde será projetada a barragem e as cidades mais próximas que possuem uma equação para o cálculo da precipitação média máxima. Foram utilizadas as equações das cidades de Alegre, Vitória e Venda Nova.



Figura 21 - Localização da Cidade de Cachoeiro de Itapemirim e das Cidades próximas que possuem equações matemáticas de chuva.

Segundo Festi a Equação 2 representa a equação elaborada para a Cidade de Alegre.

$$i_{max} = \frac{1497,781T^{0,258}}{(t+19,294)^{0,855}} \quad (2)$$

Adotando o período de retorno e o tempo de duração da chuva como T= 50 anos e t = 5 min, pode-se obter uma intensidade máxima média das chuvas igual a 268,647mm/h. Alguns autores recomendam para projetos em áreas urbanas ou de maior importância econômica utilizar o tempo de recorrência igual a 50 anos, como foi escolhido para o nosso caso estudado.

A Equação 3 foi elaborada para a Cidade de Vitória e apresenta outros coeficientes de ajustamento.

$$i_{max} = \frac{4003,611T^{0,203}}{(t+49,997)^{0,931}} \quad (3)$$

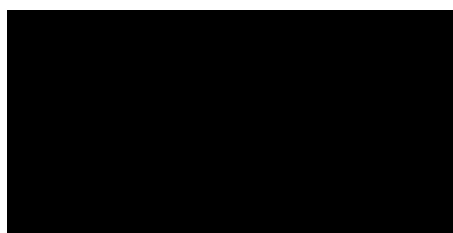
O período de retorno e o tempo de duração foram o mesmo utilizado na equação de Alegre sendo assim a intensidade máxima média das chuvas para Vitória foi igual a 212,364mm/h.

Por fim, A Equação 4 representa a equação utilizada para a Cidade de Venda Nova.

$$i_{max} = \frac{4147,062T^{0,20}}{(t+33,842)^{1,0}} \quad (4)$$

Assim a intensidade máxima média obtida para Venda Nova foi igual a 238,082mm/h.

Tabela 5 – Resumo das intensidades de precipitação calculada para cada cidade.



A Tabela5 apresenta a intensidade das chuvas obtida para cada cidade e uma média dos três valores. Esta média representa um valor aproximado para a intensidade de chuva destas regiões e suas proximidades.

Com a intensidade de precipitação calculada, a solução se concentrou no dimensionamento das estruturas hidráulicas com a finalidade de controlar e conduzir o fluxo de água de forma a eliminar problemas e os efeitos de erosão.

5.2.2 - Sarjeta de Corte – pé do primeiro dique

O dimensionamento hidráulico de uma sarjeta consiste na determinação de uma seção transversal de forma a suportar uma descarga de projeto.

Seguindo a metodologia de cálculo do Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006), primeiramente calcula-se a contribuição por metro linear da barragem pela aplicação da formula racional. Este método racional apresenta limites de aplicabilidade, porem é o mais simples e o mais utilizado para pequenas áreas

(<1000 ha). Como a bacia de deposição do rejeito dimensionada neste projeto apresenta uma área de 4,23 ha pode ser aplicada esta fórmula racional.

A fórmula básica deste método é (Equação 5):

$$Q = \frac{C.i.A}{36.10^4} \quad (5)$$

Onde:

Q= descarga de projeto por metro linear (m³/s/m)

C = Coeficiente de escoamento superficial

i = intensidade de precipitação (cm/h)

A = área de contribuição por metro linear da sarjeta (m²/m)

O coeficiente de escoamento superficial foi retirado da Tabela6 onde a característica da superfície da barragem é taludes gramados, considerando então o coeficiente de escoamento superficial igual 0,6.

Tabela 6 - Coeficiente de escoamento superficial (FONTE: DNIT, 2006).

Características da superfície	Coeficiente de escoamento
Revestimento de concreto de cimento portland	0,70 – 0,90
Revestimento betuminoso	0,80 – 0,95
Revestimento primário	0,40 – 0,60
Solos sem revestimento com baixa permeabilidade	0,40 – 0,65
Solos sem revestimento com permeabilidade moderada	0,10 – 0,30
Taludes gramados	0,50 – 0,70
Prados e campinas	0,10 – 0,40
Áreas florestais	0,10 – 0,25
Terrenos cultivados em zonas altas	0,15 – 0,40
Terrenos cultivados em vales	0,10 – 0,30

A Figura 22 retirada do Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006) mostra como deve ser considerado o calculo da área de contribuição, que é composta pela seção da plataforma contribuinte (L1) e da projeção horizontal equivalente do talude de corte (L2).

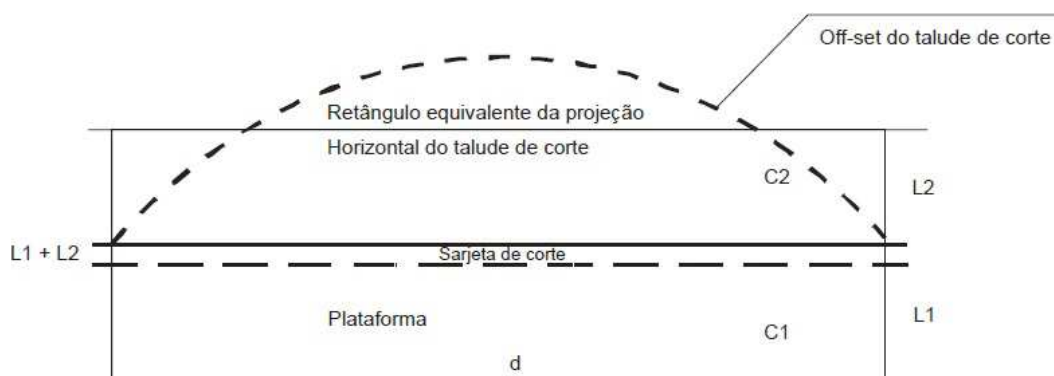


Figura 22 - Demonstração do cálculo da área de contribuição. (FONTE: DNIT, 2006).

Vale ressaltar que para esta sarjeta será considerado apenas um lado de contribuição (o talude do primeiro dique, ($L2 = 22,10$) já que o outro lado a topografia do terreno favorece uma drenagem no sentido contrário da sarjeta, como se pode observar na Figura 23 onde apresentamos um esquema da área de contribuição considerada para esta sarjeta.

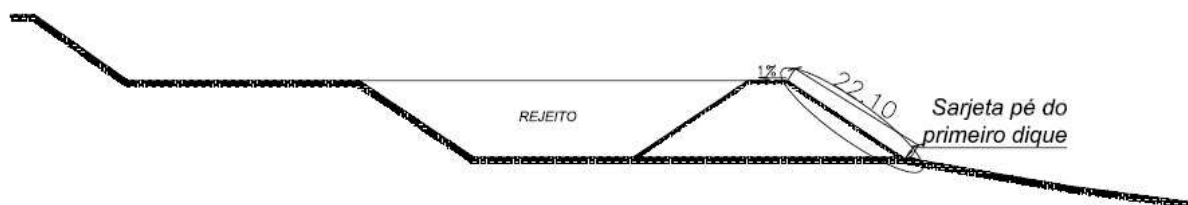


Figura 23 - Demonstração dos valores atribuídos para o cálculo da área de contribuição.

Como na fórmula a área de contribuição é considerada por metro linear da sarjeta dividimos o valor da área pelo comprimento total do pé do talude, obtendo assim uma área de contribuição por metro (m^2/m).

Com isso pode-se obter uma descarga de $0,00088 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Em seguida determinou-se a capacidade hidráulica máxima da sarjeta pela associação das equações de Manning (Equação 6) e da continuidade (Equação 7) conforme apresentadas pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT,2006).

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (6)$$

Onde:

V = velocidade do escoamento (m/s)

n = coeficiente de rugosidade

R = raio hidráulico (m)

I = declividade da sarjeta (m/m)

$$Q = V \cdot A \quad (7)$$

Onde:

V = velocidade do escoamento (m/s)

A = área molhada da sarjeta (m²)

Q = vazão máxima admissível (m³/s)

Para o cálculo da velocidade do escoamento precisou-se determinar alguns parâmetros como a seção típica da sarjeta e o material que será constituída para a determinação do coeficiente de rugosidade, raio hidráulico, área molhada e perímetro molhado.

Existem diversos tipos de seção de sarjeta, variando assim na determinação dos parâmetros retirados da sua seção típica, e estas dependem da capacidade de vazão necessária.

Conforme foi sugerido pelo Manual de Drenagem de rodovias (DNIT,2006) a seção típica escolhida inicialmente para a sarjeta do nosso problema foi a de seção triangular, caso na determinação geométrica as dimensões ultrapassem as exigidas será preciso trocar a seção de forma a atender as necessidades do projeto.

Escolhida a seção da sarjeta, o próximo passo foi dimensionar de forma a suportar a descarga de projeto calculada. As dimensões da sarjeta foram determinadas a partir das declividades impostas pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT,2006). A Figura 24 apresenta os elementos necessários para o dimensionamento.

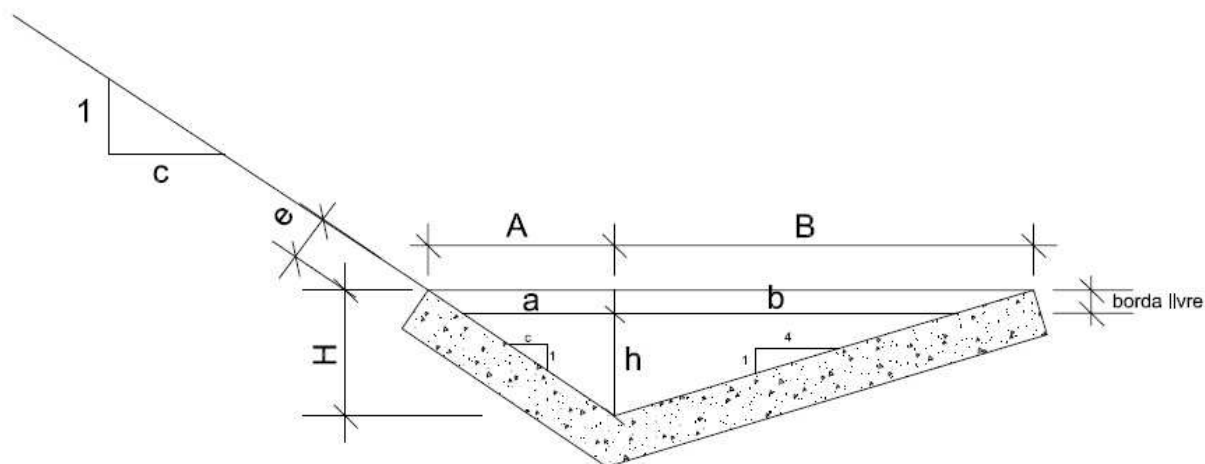


Figura 24 - Variáveis para o dimensionamento da sarjeta.

Primeiramente, as inclinações foram determinadas, sendo que uma acompanha a inclinação do talude e a outra apresenta uma inclinação de 1:4, determinada pelo Manual de Drenagem de Rodovia (DNIT,2006). A inclinação do talude foi determinada através de uma análise de estabilidade, como foi visto no Capítulo III, o que resultou em uma inclinação de 1:1,5. Uma das incógnitas da sarjeta, **B**, foi determinada como o parâmetro de entrada, e a partir dela e das inclinações conhecidas pode-se determinar todos os outros parâmetros através de semelhança de triângulos e relações.

Assim as definições geométricas resultantes da sarjeta do pé do primeiro dique podem ser observadas na Tabela7.

Tabela 7 - Dimensões da Sarjeta do pé do primeiro dique.

Dimensões da Sarjeta		
borda livre	0,05	m
a	0,73	m
b	0,28	m
a + b	1,01	m
h	0,18	m
l1	0,76	m
l2	0,33	m
H	0,23	m
A	0,73	m
B	0,35	m

A partir destes valores podem-se determinar os valores da área molhada, perímetro molhado e do raio hidráulico (área molhada dividida pelo perímetro molhado).

Neste caso foi determinado que o revestimento fosse de concreto com superfície de acabamento a desempenadeira, sendo assim o coeficiente de rugosidade retirado da Tabela 8, apresentando um valor de 0,014.

Tabela 8 - Coeficiente de rugosidade (FONTE: DNIT, 2006).

Canais abertos revestidos		
Concreto, com superfície de:		
Acabamento a colher	0,011	0,012
Acabamento a desempenadeira	0,013	0,015
Acabamento com cascalhos no fundo	0,015	0,017
Sem acabamento	0,014	0,017
Sobre escavação em rocha boa	0,017	0,020
Sobre escavação em rocha irregular	0,022	0,027

Com estes parâmetros definidos concentrou-se na determinação da capacidade hidráulica máxima da sarjeta através da Equação 7. Tendo a vazão máxima admissível da sarjeta e a descarga de projeto, pode-se calcular o comprimento crítico dividindo uma pela outra. Este comprimento crítico não deve ser maior do que o comprimento do pé do primeiro dique. Quando isto acontece, é necessário de um sistema de drenagem capaz de desviar a água da sarjeta para que ela não ultrapasse o seu limite de capacidade e transborde, um sistema bastante utilizado são as descidas d'água.

A Tabela 99 é um resumo dos valores obtidos no dimensionamento e uma breve conclusão da necessidade ou não de descidas d'água.

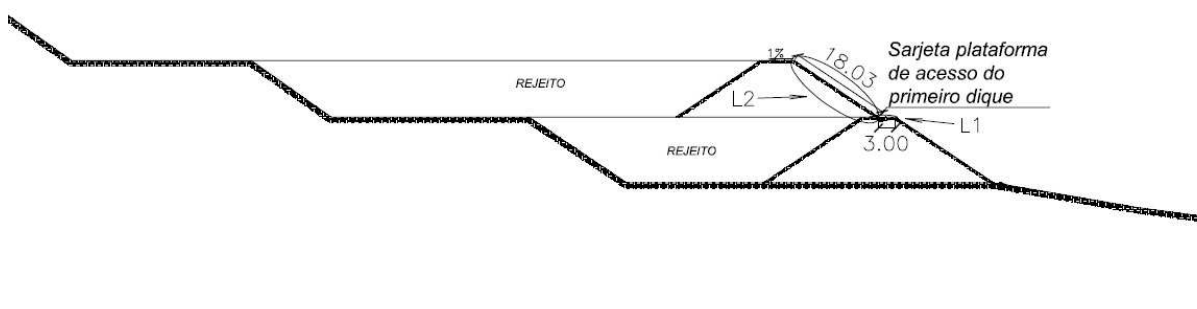
Tabela 9 - Resumo da sarjeta do pé do primeiro dique.

Sarjeta do pé do primeiro dique - Verificação do comprimento crítico		
Q (descarga de projeto) =	0,00088	m ³ /s/m
Q (vazão máxima admissível da sarjeta) =	0,064	m ³ /s
comprimento crítico =	72,33	m
comprimento pé do talude =	8,55	m
Descida d'água	NÃO	

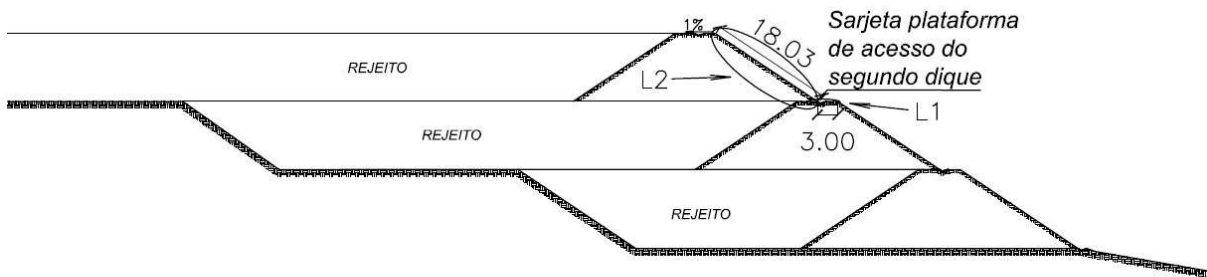
Vale ressaltar que alguns parâmetros são definidos pelo próprio projetista, como o tamanho da borda livre e a espessura da sarjeta. Neste caso o tamanho escolhido para a borda livre de todas as sarjetas foi de 0,05m e uma espessura de 0,1m.

5.2.3 - Sarjeta de Aterro – Plataforma de acesso do primeiro, do segundo e do terceiro dique

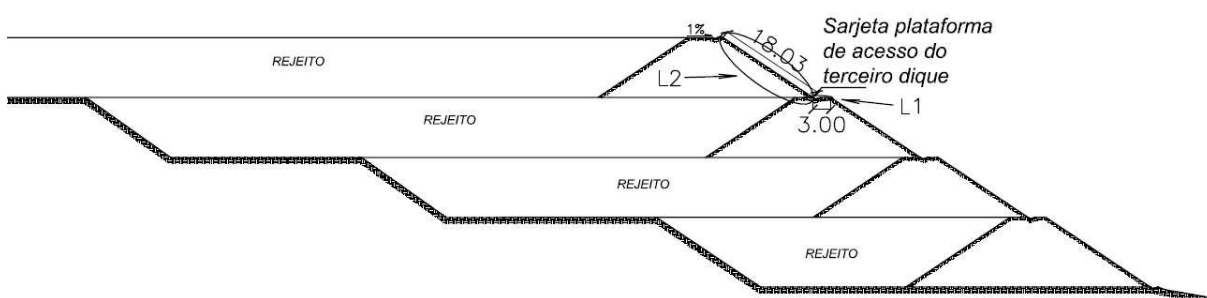
A metodologia para o dimensionamento das outras sarjetas foi o mesmo da sarjeta inicial, seguido pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006). Os parâmetros foram os mesmo, exceto a área de contribuição da sarjeta. Para o caso da sarjeta da banquetta de acesso do primeiro dique, a área será metade da plataforma de acesso do primeiro dique ($L1 = 3\text{ m}$) mais o comprimento do talude do segundo dique ($L2 = 18,03\text{ m}$), já que a sarjeta será executada no meio da plataforma e ao pé do talude do segundo dique. É importante lembrar que as plataformas de acesso possuem uma inclinação de 1% favorável a drenagem. No caso da sarjeta da plataforma de acesso do segundo dique, a área de contribuição será igual $L1 = 3\text{ m}$, referente à metade da plataforma de acesso do segundo dique e $L2 = 18,03\text{ m}$, referente ao talude do terceiro dique. E a sarjeta da plataforma de acesso do terceiro dique também será igual a estas duas. A Figura 25 apresenta os três casos ditos anteriormente.



a) Banqueta do primeiro dique.



b) Banqueta do segundo dique.



c) Banqueta do terceiro dique.

Figura 25 - Área de contribuição da sarjeta

Vale ressaltar que esta situação imposta para a área de contribuição é considerada a situação mais crítica, pois antes de se construir o segundo dique a área de contribuição pode ser considerada apenas 3 m para um lado e 3 m para o outro. Porém o cálculo baseado na situação mais crítica também será favorável para a situação menos crítica.

Com isso a área de contribuição definida, pode-se calcular a descarga de projeto referente a estas sarjetas. O valor obtido através da Equação 5 foi de $0,00084 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ para as duas. Para o próximo passo, calcular a capacidade hidráulica da sarjeta foi preciso determinar as dimensões através das inclinações e semelhanças de triângulo conforme feito para a sarjeta inicial. Os valores obtidos foram os mesmo, pois as inclinações eram as mesmas e devido a maior facilidade de execução. Assim a Tabela 10 apresenta as dimensões das sarjetas.

Tabela 10 - Dimensões da sarjeta da banquetta do primeiro, segundo e terceiro dique.

Dimensões da Sarjeta		
borda livre	0,05	m
a	0,87	m
b	0,33	m
a + b	1,19	m
h	0,22	m
l1	0,89	m
l2	0,39	m
H	0,27	m
A	0,87	m
B	0,40	m

Em seguida, através das Equações 6 e 7 pode-se obter a vazão máxima admissível das sarjetas, o comprimento crítico e uma análise da necessidade ou não de uma descida d'água. A Tabela 11 mostra o resumo de todos os resultados obtidos para estas sarjetas.

Tabela 11 - Resumo da sarjeta da banquetta do primeiro, segundo e terceiro dique.

Sarjeta da plataforma de acesso do primeiro dique - Verificação do comprimento crítico		
Q (descarga de projeto) =	0,00084	m ³ /s/m
Q (vazão máxima admissível da sarjeta) =	0,100	m ³ /s
comprimento crítico =	118,66	m
comprimento plataforma de acesso do primeiro dique =	80,15	m
Descida d'água	NÃO	
Metade do comp. da plataforma de acesso do primeiro dique (com. até a descida d'água) =	40,08	m
Sarjeta da plataforma de acesso do segundo dique - Verificação do comprimento crítico		
Q (descarga de projeto) =	0,00084	m ³ /s/m
Q (vazão máxima admissível da sarjeta) =	0,100	m ³ /s
comprimento crítico =	118,66	m
comprimento plataforma de acesso do primeiro dique =	133,37	m
Descida d'água	SIM	
Metade do comp. da plataforma de acesso do primeiro dique (comp. até a descida d'água) =	66,69	m
Sarjeta da plataforma de acesso do terceiro dique - Verificação do comprimento crítico		
Q (descarga de projeto) =	0,00084	m ³ /s/m
Q (vazão máxima admissível da sarjeta) =	0,100	m ³ /s
comprimento crítico =	118,66	m
comprimento plataforma de acesso do primeiro dique =	187,70	m
Descida d'água	SIM	
Metade do comp. da plataforma de acesso do primeiro dique (comp. até a descida d'água) =	93,85	m

Como se pode observar a única diferença nos três dimensionamentos é o comprimento crítico. O comprimento dos três diques foi igual a 118,66 m. Porém, na plataforma de acesso do segundo e do terceiro dique o comprimento crítico da sarjeta foi menor do que o comprimento total do dique respectivo, ou seja, a sarjeta com estas dimensões não suportará aquela descarga de projeto. Ao invés de mudar as dimensões, optou-se pela solução de uma saída d'água já que de qualquer maneira seria preciso de um sistema de drenagem diferente para conduzir esta água de forma segura até um depósito ou até o encontro do próprio terreno natural.

Com a existência da descida d'água, o comprimento necessário passa a ser a metade do comprimento total da plataforma de acesso da barragem. A partir deste

novo comprimento, verificou se ele continuava maior do que o comprimento crítico, pois assim seria preciso mais de uma descida d'água e assim sucessivamente. É importante ressaltar que neste caso o fluxo d'água das sarjetas será em dois sentidos.

5.2.4 - Sarjeta de Aterro – Plataforma de acesso do quarto dique

Já no quarto dique, apesar da metodologia de cálculo continuar a mesma, esta sarjeta apresentou uma pequena diferença em relação às anteriores, pois na sua área de contribuição foi considerado a lamina d'água proveniente da chuva que escoará pela camada superficial que será colocada ao final da deposição do rejeito. Esta camada superficial será um recobrimento vegetal, nos últimos 40 cm de altura do ultimo dique, que finalizará o isolamento do rejeito. Neste caso então terá apenas um lado de contribuição, $L1 = 150,49$ m, referente à plataforma de acesso do terceiro dique (6m) mais a maior extensão de depósito de rejeito do último dique (144,49 m), conforme se pode observar na Figura 26.

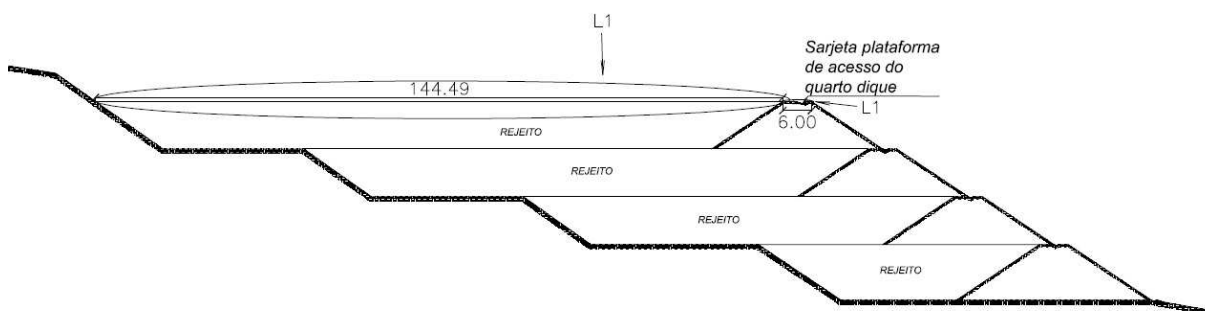


Figura 26 - Área de contribuição da sarjeta do quarto dique.

Com a área de contribuição definida, pode-se calcular a descarga de projeto através da Equação 5, e com isso se obteve uma vazão de $0,006 \text{ m}^2/\text{s}/\text{m}$. Para o cálculo da capacidade hidráulica da sarjeta utilizou-se os mesmos parâmetros das sarjetas anteriores e para o seu dimensionamento utilizou-se a mesma metodologia porém os valores foram maiores devido a grande área de contribuição que se terá neste caso. A sarjeta com estas dimensões não suportará a descarga de projeto calculada e a água captada por esta sarjeta precisa ser conduzida de forma segura para o mesmo destino que as águas captadas pelas outras sarjetas. Então se deu

continuidade a descida d'água ate o quarto dique. Com necessidade de uma descida d'água no quarto dique o comprimento da plataforma de acesso necessário passou a ser a metade. Então o comprimento crítico ficou maior que este comprimento necessário, resultando em uma sarjeta com capacidade hidráulica para suportar a descarga de projeto. Na Tabela 12 apresentam-se as dimensões da sarjeta e na Tabela 13 é mostrado o valor da vazão calculada e um resumo da conclusão desta sarjeta.

Tabela 12 - Dimensões da sarjeta da banquetta do quarto dique.

Dimensões da Sarjeta		
borda livre	0,05	m
a	1,93	m
b	0,73	m
a + b	2,66	m
h	0,48	m
l1	1,99	m
l2	0,87	m
H	0,53	m
A	1,93	m
B	0,80	m

Tabela 13 - Resumo da sarjeta da banquetta do quarto dique.

Sarjeta da plataforma de acesso do quarto dique - Verificação do comprimento crítico		
Q (descarga de projeto) =	0,0060	m ³ /s/m
Q (vazão máxima admissível da sarjeta) =	0,85	m ³ /s
comprimento crítico =	140,89	m
comprimento plataforma de acesso do primeiro dique =	259,60	m
Descida d'água	SIM	
Metade do comp. da plataforma de acesso do primeiro dique (comp. até a descida d'água) =	129,80	m

Vale ressaltar que no dimensionamento da sarjeta do pé do talude do primeiro dique e da plataforma de acesso do primeiro dique não precisou de uma descida d'água, porém foi preciso o dimensionamento já que toda a água captada pelas sarjetas precisava ser conduzida para um depósito. Sendo assim dimensionou-se uma descida d'água para conduzir a água captada desde o último dique.

5.2.5 - Descida d'água

De acordo com o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT,2006), a descida d'água tem como objetivo conduzir as águas captadas por outros dispositivos de drenagem quando estes atingem seu comprimento crítico ou quando é necessário conduzir a água para um local seguro, para que ela não escoe para o terreno natural por motivos de contaminação, como é o caso das sarjetas de corte e aterro vistas anteriormente.

As descidas d'água são posicionadas sobre os taludes de corte ou aterro seguindo as suas declividades. Neste caso elas serão posicionadas sobre os taludes dos diques (taludes de aterro) e conduzirão a água para reservatório.

A metodologia para o cálculo das dimensões indicada pelo Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT,2006) consiste em um dimensionamento hidráulico que se possa conduzir a vazão a ela destinada de forma segura. O dimensionamento foi feito utilizando a expressão empírica (Equação 8), onde fixamos um valor para B e determinamos então o valor de H.

$$Q = 2,07 \cdot B^{0,9} \cdot H^{1,6} \quad (8)$$

Onde:

Q = descarga de projeto a ser conduzida pela descida d' água (m³/s)

B = Largura da descida d' água (m)

H = Altura média das paredes laterais da descida d' água (m)

Como através da Equação 8 obtemos apenas a altura média das paredes laterais e não conseguimos obter as dimensões completas da descida, foi realizado um cálculo com relações trigonométricas onde estipulamos a altura e a profundidade da descida d'água, vista em corte, e obtemos como resultado a altura média das paredes laterais (Figura 27). Sendo assim alterou-se o valor da largura que se utilizou na Equação 8 para encontrar uma altura média próxima a calculada, pois assim a descida d'água conduzirá o deságue de forma segura.

Vale ressaltar que a vazão utilizada na Equação 8 corresponde ao somatório da descarga de projeto calculada para cada etapa da construção.

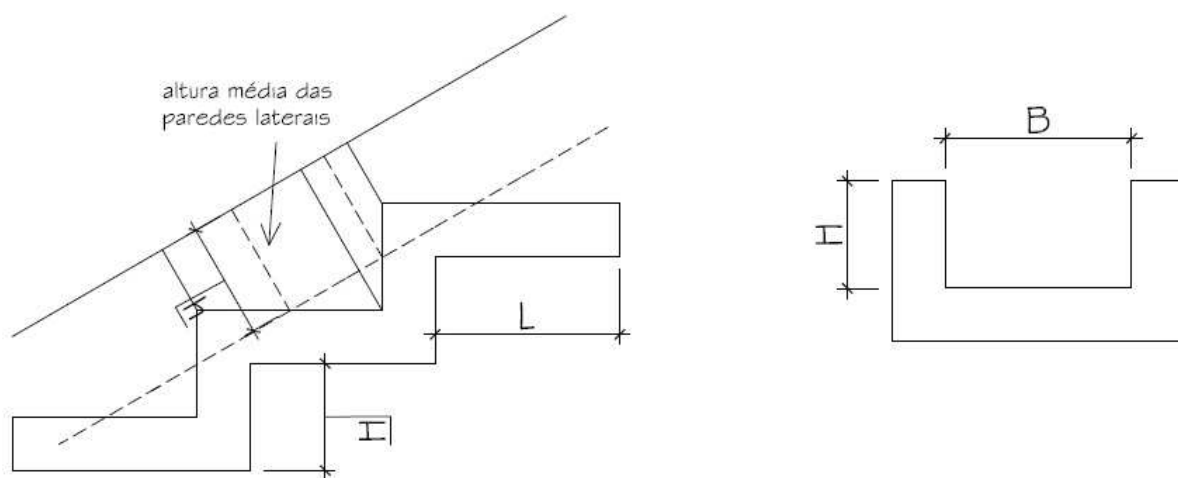


Figura 27- Variáveis para o dimensionamento da descida d'água.

Como a variação da largura foi pequena dentre todos os diques, por questão construtiva utilizou-se o mesmo para todos, sendo assim utilizou-se os valores da descida d'água calculada para o primeiro dique. A Tabela 14 apresenta os valores da geometria da descida d'água calculada para o primeiro dique e que será considerada para todos os diques, destacando que o valor da altura média encontrada tanto pela Equação 08 como pelas relações trigonométricas foi a mesmo.

Tabela 14 - Resumo da descida d'água considerando o fluxo do quarto, terceiro, segundo e primeiro dique.

Descida d'água - contribuição da sarjeta do primeiro, segundo, terceiro e quarto dique		
Q (descarga de projeto) =	1,90	m ³ /s
B (largura) =	2,1	m
H (altura média das paredes laterais obtida pela expressão empirica) =	0,62	m
h (altura das paredes laterais) =	1,00	m
L (profundidade da descida) =	1,50	m
H (altura média das paredes laterais obtida pelas relações trigonométricas) =	0,62	m

5.2.6 - Saída d'água

As saídas d' água são dispositivos destinados a coletar e conduzir as águas das sarjetas, nos extremos do comprimento crítico, lançando-as na descida d'água sem quebrar a continuidade do fluxo d'água.

A metodologia de cálculo do dimensionamento hidráulico da saída d'água foi de acordo com o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT,2006) e consiste em determinar a largura da entrada de forma a conduzir toda a água proveniente das sarjetas ate a descida d'água sem turbulência. Para isso será determinada a largura da saída (abertura da sarjeta) a partir da Equação 9.

$$L = \frac{Q}{K.Y.\sqrt{g.Y}} \quad (9)$$

Onde:

L = comprimento da abertura na sarjeta ou largura da saída d'água, de modo a interceptar todo o seu fluxo (m)

Q = descarga afluyente pela sarjeta (m³/s)

K = coeficiente, função da declividade, tomado igual a 0,20 para declividades da sarjeta entre 2% e 5%.

Y = altura do fluxo da sarjeta (m)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

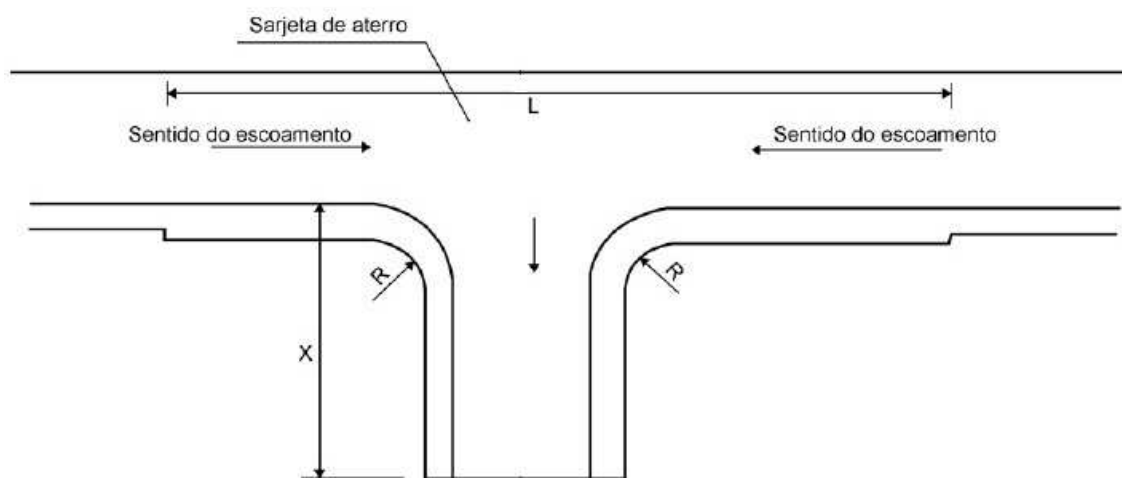


Figura 28 - Elementos da saída d'água (FONTE: DNIT, 2006).

De acordo com Figura 28, retirada do Manual de Drenagem (DNIT,2006) é necessário determinar os demais elementos constituintes da saída d'água, como X (espaçamento entre o alinhamento da sarjeta e o início da descida) e R (raio da curva da concordância entre a saída d'água e a descida d'água).

Para isso o Manual determina que X deve ser igual a 2,5 vezes o valor da largura da descida d'água, B. E o valor de R deve ser igual a altura h da descida d'água.

Vale ressaltar que para o dimensionamento da saída d'água é preciso verificar o valor mínimo recomendado para a largura da saída, 7 vezes a largura da descida d'água, caso o valor calculado seja menor que o valor mínimo será utilizado no projeto o valor mínimo.

Nas Tabelas 15, 16, 17e 18 estão apresentados os valores de cada elemento da saída d'água e a verificação da largura mínima da saída d'água referente a cada dique.

Tabela 15 - Resumo da saída d'água do primeiro dique.

Saída d'água - referente a descida d'água do primeiro dique		
L (comprimento da abertura na sarjeta) =	0,03	m
Q (descarga afluyente pela sarjeta) =	0,0017	m ³ /s
k =	0,20	
Y (altura do fluxo na sarjeta) =	0,22	m
g (aceleração da gravidade) =	9,80	m/s ²
X (espaçamento entre sarjeta e descida d'água) =	4,20	m
R (raio de curvatura) =	1,00	m
L _{mínimo} (abertura da sarjeta) =	14,70	m
Verificação do L a ser usado =	usar Lmínimo !!!	

Tabela 16 - Resumo da saída d'água do segundo dique.

Saída d'água - referente a descida d'água do segundo dique		
L (comprimento da abertura na sarjeta) =	1,77	m
Q (descarga afluyente pela sarjeta) =	0,1120	m ³ /s
k =	0,20	
Y (altura do fluxo na sarjeta) =	0,22	m
g (aceleração da gravidade) =	9,80	m/s ²
X (espaçamento entre sarjeta e descida d'água) =	4,00	m
R (raio de curvatura) =	1,00	m
L _{mínimo} (abertura da sarjeta) =	14,00	m
Verificação do L a ser usado =	usar Lmínimo !!!	

Tabela 17 - Resumo da saída d'água do terceiro dique.

Saída d'água - referente a descida d'água do terceiro dique		
L (comprimento da abertura na sarjeta) =	2,50	m
Q (descarga afluyente pela sarjeta) =	0,1577	m ³ /s
k =	0,20	
Y (altura do fluxo na sarjeta) =	0,22	m
g (aceleração da gravidade) =	9,80	m/s ²
K (espaçamento entre sarjeta e descida d'água) =	3,70	m
R (raio de curvatura) =	1,00	m
L _{mínimo} (abertura da sarjeta) =	12,95	m
Verificação do L a ser usado =	usar Lmínimo !!!	

Tabela 18 - Resumo da saída d'água do quarto dique.

Saída d'água - referente a descida d'água do quarto dique		
L (comprimento da abertura na sarjeta) =	7,42	m
Q (descarga afluyente pela sarjeta) =	1,56	m ³ /s
k =	0,20	
Y (altura do fluxo na sarjeta) =	0,48	m
g (aceleração da gravidade) =	9,80	m/s ²
X (espaçamento entre sarjeta e descida d'água) =	3,30	m
R (raio de curvatura) =	1,00	m
L _{mínimo} (abertura da sarjeta) =	11,55	m
Verificação do L a ser usado =	usar Lmínimo !!!	

5.2.7 - Valeta de Proteção de Corte

A valeta de proteção é outro dispositivo de drenagem e neste caso tem como objetivo interceptar as águas que escorrem pelos taludes do terreno natural, em torno de onde o rejeito será depositado, de forma que esta água não entre em contato com o rejeito.

As valetas de proteção de corte podem ser trapezoidais, retangulares ou triangulares. Seguindo esta recomendação do Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT,2006) a seção escolhida foi a trapezoidal (Figura 29).

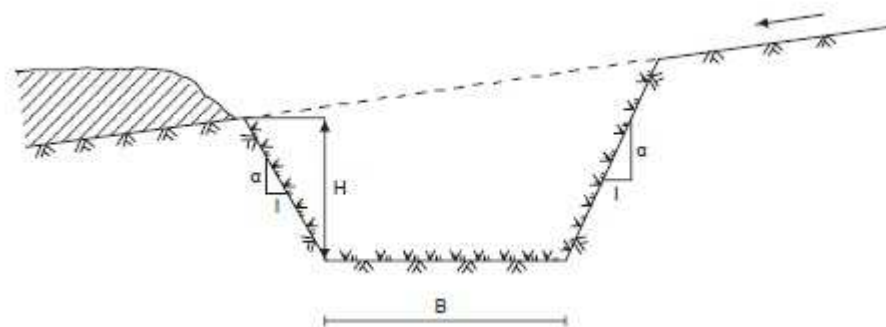


Figura 29 - Valeta de proteção de corte de seção trapezoidal (FONTE: DNIT, 2006).

A partir da definição da seção típica da valeta pode-se dimensionar este sistema de drenagem. Para proceder este dimensionamento há necessidade de se estimar a vazão de contribuição utilizando a mesma metodologia de cálculo das sarjetas, através do método racional (Equação 5). Neste cálculo o coeficiente de escoamento superficial foi considerado o mesmo, igual a 0,6 referente a taludes gramados, este coeficiente foi retirado da Tabela 6. A intensidade de precipitação de chuva também foi considerada a mesma, portanto a área de contribuição foi calculada a partir da declividade do terreno. Após uma análise da topografia pode-se observar através das curvas de nível o caimento do terreno e localizar a área de contribuição para a valeta, sendo que os limites da área de contribuição foram o topo do talude e uma distância de 8m do rejeito depositado pelo quartodique. Sendo assim apresentou-se uma descarga de projeto igual a $1,21\text{m}^3/\text{s}$. Para verificação da capacidade hidráulica da valeta foi preciso definir a geometria, as incógnitas são apresentadas na Figura 30.

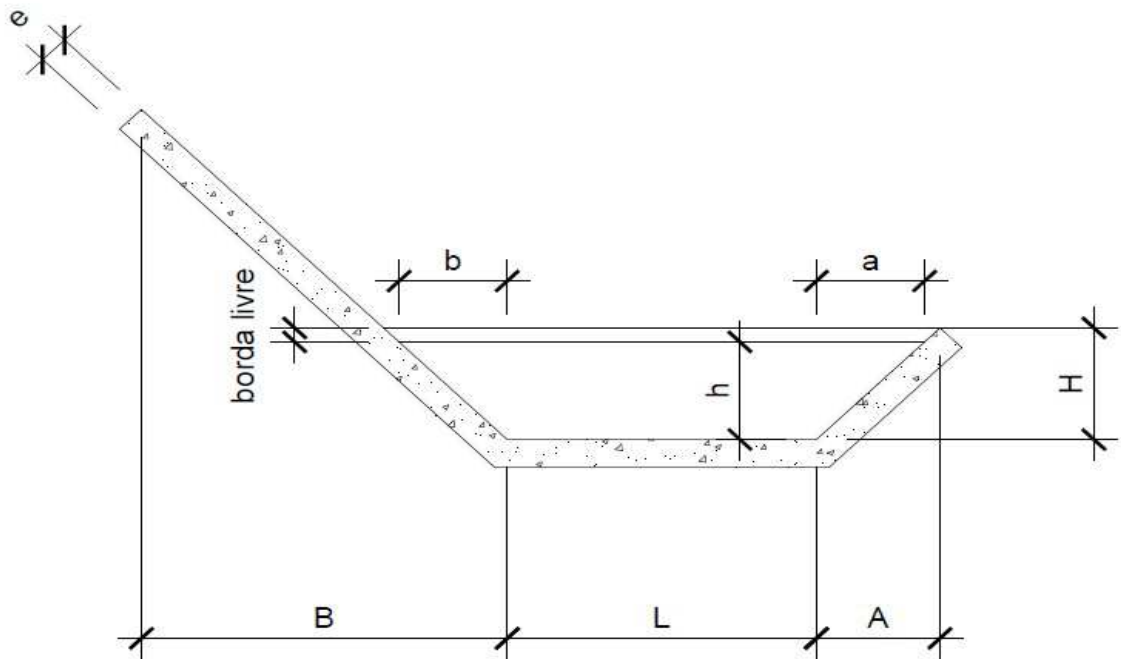


Figura 30 - Variáveis para o dimensionamento da valeta de proteção.

Fixou-se o valor das inclinações e da base da valeta, L , para as inclinações foi considerada uma inclinação de 1:1, para o valor de L foi arbitrado um valor inicial e então foi alterando-o até o momento em que a valeta suporta-se a vazão de projeto determinada. A Tabela 19 apresenta os valores obtidos para cada incógnita da valeta.

Tabela 19 - Dimensões da valeta de proteção do talude natural.

Dimensões da Valeta		
borda livre	0,05	m
a	0,35	m
b	0,35	m
a + b + L	1,70	m
h	0,35	m
l1	0,49	m
l2	0,49	m
H	0,40	m
A	0,4	m
B	0,40	m
L	1	m

A partir destas definições pode-se determinar a área molhada, o perímetro molhado e então o raio hidráulico. Vale ressaltar que a vazão admissível da sarjeta

foi calculada através das Equações 6 e 7. Para a determinação do coeficiente de rugosidade da valeta foi definido que o material do seu revestimento seria o mesmo utilizado para as sarjetas, concreto com superfície de acabamento a desempenadeira, e o seu respectivo valor foi retirado da Tabela 8. Por fim para a declividade da sarjeta foi considerado um valor mais elevado para acelerar o seu escoamento, assim foi considerado uma declividade de 1% (0,01m/m).

Com isso pode-se determinar então a capacidade hidráulica admissível da sarjeta, onde se obteve um valor de 1,29m³/s. A partir desta vazão comparou-se com a vazão de projeto e pode-se observar que a capacidade hidráulica da valeta suporta a descarga de projeto obtida.

A planta contendo a localização da valeta se encontra na Prancha 9, em Anexo.

É importante lembrar, que o material proveniente da escavação da valeta deve ser colocado entre ela e a crista do talude a apiloado manualmente.

5.3 – Sistema de drenagem subterrânea

A água da chuva que cairá sobre a barragem tem dois destinos: parte escorre sobre a superfície do solo e será drenado pelas sarjetas e valetas e a outra parte se infiltra pelo rejeito podendo alcançar o lençol freático. Esta água também deve ser conduzida de alguma forma para fora da barragem, pois o rejeito não foi analisado quimicamente e não pode se afirmar se ele é capaz de contaminar a água do lençol freático. Uma parcela da água que infiltra pelo rejeito percola para o corpo da barragem, portanto a drenagem desta água deve ser feita com bastante cuidado, um sistema de drenagem do corpo da barragem sub dimensionado pode ocasionar problemas de ordem geotécnica, como o piping. A outra parcela que infiltra pelo rejeito percolará pela própria bacia de próprio rejeito, por isso será preciso também de um sistema de drenagem de forma que conduza esta água para fora e não permita a passagem desta água para a fundação ou lençol freático. Para este projeto então foi necessário o dimensionamento de um dreno de pé e a verificação da vazão admissível de uma malha de geocomposto que será utilizada para filtrar e conduzir a água, que infiltra pelo rejeito, para fora da barragem.

É importante lembrar que toda esta água que percolará pelo rejeito e será captada pelos drenos será direcionada a um sistema de tratamento.

5.3.1 - Geocomposto

O Geocomposto com função de drenagem é um produto industrializado formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si, ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar uma função específica, neste caso um apresenta função drenante e o outro apresenta função impermeabilizante.

Para o dimensionamento do dreno necessário foi consultado o catálogo de diversas empresas a procura de um geocomposto que atendesse a necessidade do projeto, já que a pressão submetida pelo dreno seria muito elevada. O material escolhido foi o MacDrain[®] FP 2L 20.1 da Maccaferri (Figura 31).



Figura 31 - Geocomposto utilizado no sistema de drenagem horizontal da barragem.

Para concluir a escolha deste material foi preciso verificar se a vazão deste geocomposto, indicada pela Maccaferri, suporta a vazão de água que infiltrará pelo rejeito. Através da especificação técnica do material, a capacidade de vazão do material era determinada através da relação do gradiente hidráulico e da tensão efetiva que o dreno suportará.

Para a determinação do gradiente hidráulico foi preciso determinar a rede de fluxo da barragem e isto foi realizado baseado no programa SEEP/W, conforme é apresentado na Figura 32.

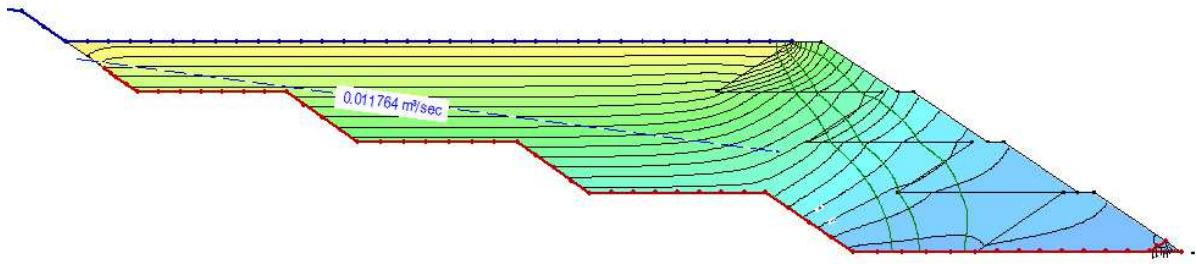


Figura 32 - Rede de fluxo através do SEEP/W.

Conforme Montes (2003), para a determinação do gradiente hidráulico entre dois pontos de uma rede de fluxo é dado pela Equação 10.

$$i_{AB} = \frac{h_{tb} - h_{ta}}{L_{AB}} \quad (10)$$

Onde:

i_{AB} = gradiente hidráulico entre o ponto A e o ponto B.

h_{tb} = potencial total da equipotencial pertencente ao ponto B.

h_{ta} = potencial total da equipotencial pertencente ao ponto A.

L_{ab} = distancia entre ponto A e ponto B

A Figura 33 apresenta os valores necessários para a determinação do gradiente, através disto pode-se definir o gradiente hidráulico igual a 0,5.

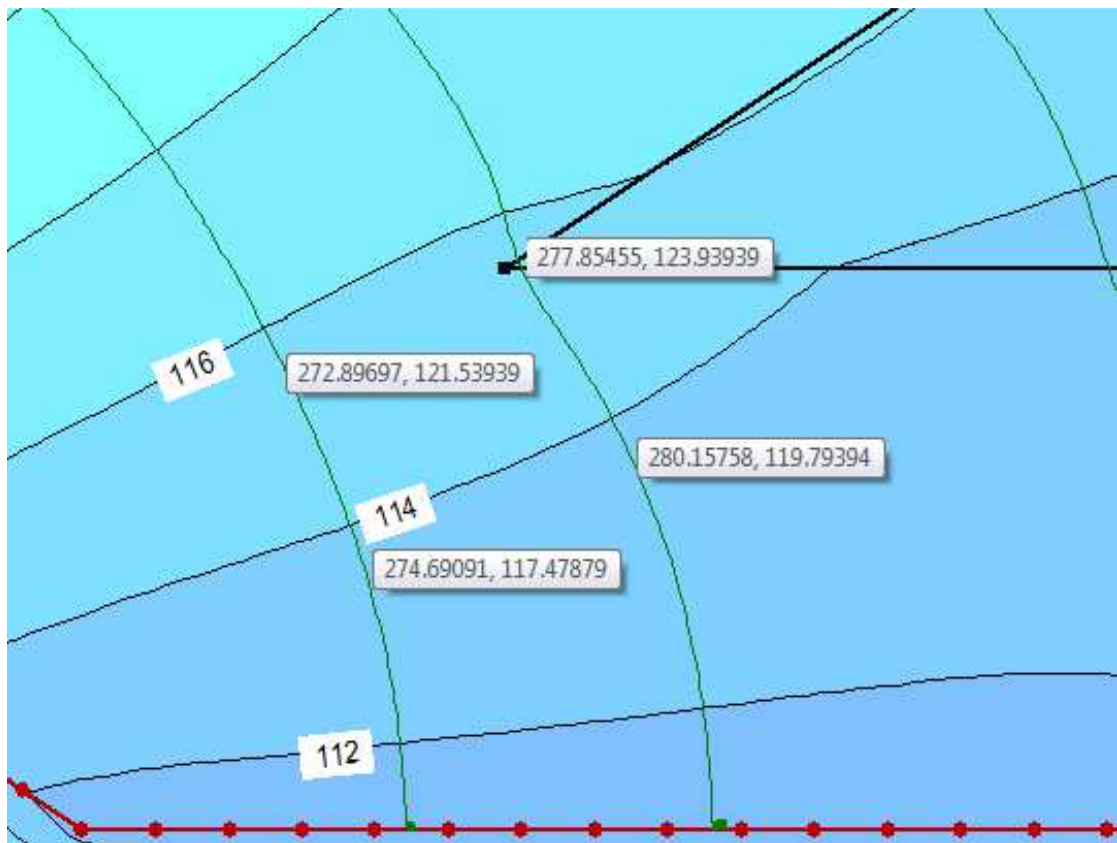


Figura 33 - Elementos necessários para a determinação do gradiente hidráulico

A pressão efetiva que o material sofrerá foi calculada através da multiplicação do peso específico do solo pela altura da estrutura, conforme Equação 11.

$$\sigma = \gamma \times h \quad (11)$$

Onde:

σ = tensão efetiva (kPa)

γ = peso específico do solo (kN/m³)

h = altura (m)

Com a tensão calculada, 712 kPa, e o gradiente calculado, foi preciso fazer uma extrapolação com as vazões determinadas pela especificação técnica do material, pois na tabela apresentada pela Maccaferri não havia a tensão calculada para este projeto. A extrapolação foi feita para analisar a tendência da vazão com o aumento da pressão, através da Figura 34 podemos perceber que a capacidade de vazão continua diminuindo, porém para 712 kPa pode-se obter uma capacidade de 0,102 L/s/m. A especificação recomenda pela norma aplicar fatores de redução

neste vazão para determina-se a capacidade de vazão admissível deste dreno (Equação 12).

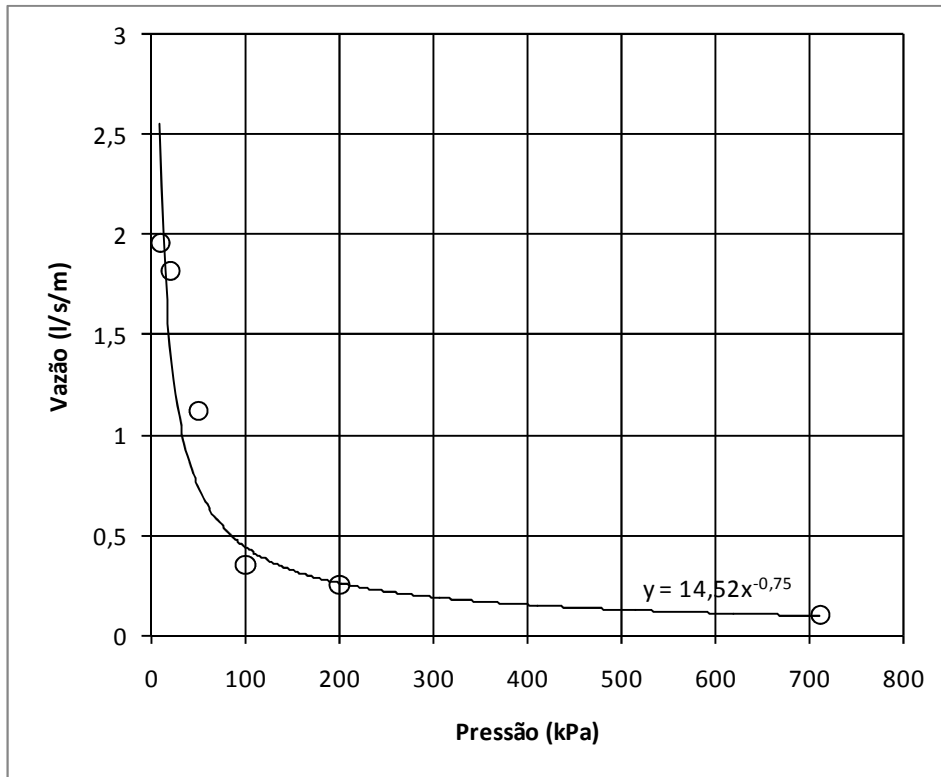


Figura 34 - Projeção da vazão para a tesão deste projeto.

$$Q_{adm} = \frac{Q}{FR_{IN} \cdot FR_{CR} \cdot FR_{CC} \cdot FR_{BC}} \quad (12)$$

Onde:

Q_{adm} = capacidade de vazão admissível (l/s/m)

Q = vazão determinada (l/s/m)

FR_{IN} = 1,10 (Intrusão do solo)

FR_{CR} = 1,2 (Fluência)

FR_{CC} = 1,2 (Colmatação Química)

FR_{BC} = 1,15 (Colmatação Biológica)

Obtendo assim uma capacidade de vazão admissível igual a 0,056 l/s/m.

Determinada a capacidade de vazão o dimensionamento se concentrou na verificação desta vazão. Para isso utilizou-se a rede de fluxo determinada pelo SEEP/W e uma propriedade do programa para determinar a vazão em uma

determinada seção. A Figura 32 mostra a vazão ao longo de todo o corpo da barragem, e por esta figura podemos perceber também que o valor obtido foi igual a $0,0117\text{m}^3/\text{s}$. A Tabela 20 apresenta os valores das vazões e a conclusão da verificação da capacidade.

Tabela 20 - Verificação do Geocomposto.

Verificação da Vazão do Geocomposto		
Vazão do SEEP/W	11,7	l/s
Comprimento dreno	226,31	m
Vazão por metro	0,052	l/s/m
Vazão Admissível	0,056	l/s/m
Verificação	Sim!	

5.3.2 - Dreno de pé

O Piping é um fenômeno de erosão interna caracterizado pela perda de partículas finas do solo e criando condições de ruptura que pode ocasionar desestabilidade na barragem. Segundo Azevedo (2005), Piping é um erosão regressiva, seu avanço é no sentido contrário do fluxo acontecendo no interior do maciço da barragem (Figura 35).

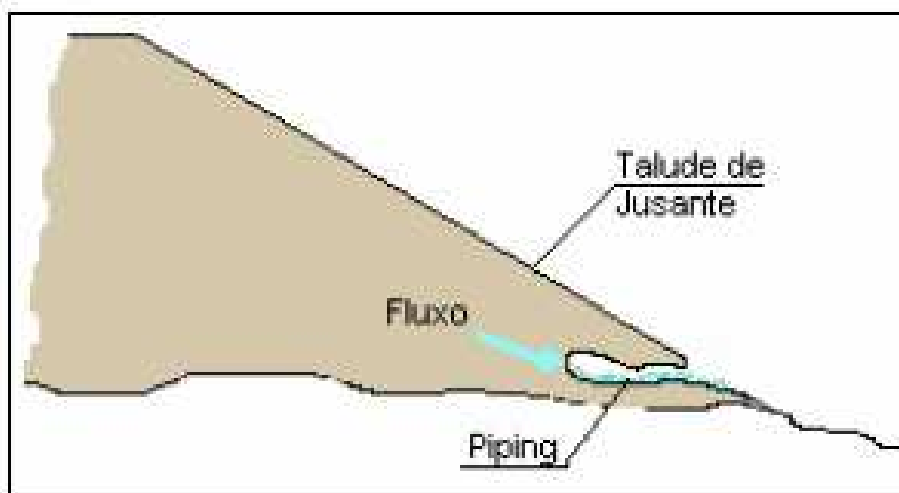


Figura 35- Esquema ilustrativo de piping (FONTE: AZEVEDO, 2005).

Segundo Cruz (1996) o dreno de saída além da função de drenagem do sistema como um todo, tem a função de contenção dos materiais granulares do dreno horizontal e devem ser dimensionadas para tal e também o dreno de pé ajuda

na estabilidade do sistema já que ele é um material drenante. Para o dimensionamento do dreno de pé, o autor recomenda uma altura, no mínimo, igual a duas vezes a espessura do dreno horizontal e largura de crista mínima de 4 m. Como neste caso o dreno horizontal foi substituído pelo geocomposto, fez-se um breve dimensionamento do dreno horizontal para se ter um idéia das dimensões do dreno de saída.

Portanto, inicialmente precisou-se calcular a vazão de água que infiltrará pelo rejeito e precisará ser drenada pelo dreno horizontal. Esta vazão é a mesma vazão de descarga calculada para a verificação do geocomposto. Como foi visto anteriormente, a vazão de infiltração foi igual a 0,0057m³/s/m.

Segundo a Lei de Darcy (Equação 13), lei que rege o movimento da água em um meio terroso, pode-se obter a altura da camada de dreno horizontal para então obtermos a altura do dreno de pé.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (13)$$

Onde

Q = vazão de água (m³/s)

k = coeficiente de permeabilidade (m/s)

i = gradiente hidráulico

A = área do dreno horizontal em 1m.

Considerando que o dreno horizontal seria de areia, segundo Braja (2006), o coeficiente de permeabilidade da areia apresenta uma ordem de grandeza de 10⁻² a 10⁻⁴ m/s. Conhecido também o gradiente hidráulico através do SEEP/W ($i=0,5$), conforme mencionado anteriormente faltou determinar a área do dreno horizontal. Como a fórmula considera o comprimento de 1m, a única incógnita da Equação 13 foi a altura. Portanto a espessura obtida foi de 1,0m.

Dessa forma, segundo Cruz (1996) o dreno de pé deverá ter uma altura de 2 vezes a espessura do dreno horizontal, ou seja deverá ter uma altura de 2m.

Para a escolha do material utilizado no dreno de pé, de acordo com Massad (2003) deve-se tomar bastante cuidado com a passagem do fluxo de um meio (solo da barragem) para outro com o solo mais grosso (dreno de pé), para isso será preciso de um elemento de transição com partículas do dreno suficientemente pequenas para impedir a passagem de partículas de solo, porem não pode ser muito fino a fim de impedir a passagem da água. De tal forma optou-se pela utilização de

um geossintético como meio filtrante da água e que impedisse a passagem do solo, que tivesse as mesmas funções que o filtro granulométrico e filtros de transição.

Após uma pesquisa entre os diversos produtos oferecidos atualmente, optou-se pela utilização de Mantas Bidim como filtro de transição entre o solo natural e a brita utilizada no dreno de pé, esta manta permitirá a passagem da água e bloqueará a passagem de partículas maiores de solo garantindo a proteção contra a ocorrência de piping.

A Figura 36 a seguir apresenta um detalhe do dreno de pé e do filtro de transição, Bidim.

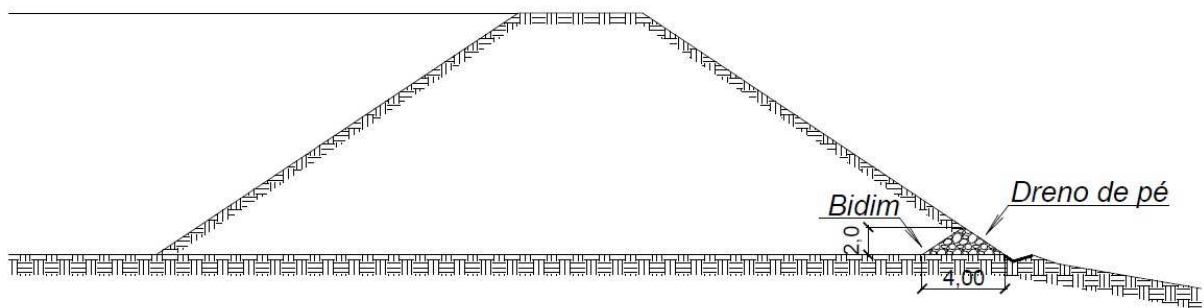


Figura 36 - Detalhe do dreno de pé.

CAPÍTULO VI - INSTRUMENTAÇÃO

6.1 – Considerações iniciais

Devido aos diversos acidentes ocorridos em barragens de rejeito, que trazem como consequência acidentes ambientais e perdas significativas para o empreendedor, surgiu-se a grande necessidade de um monitoramento planejado através de um bom projeto de instrumentação com a finalidade de controlar a segurança da barragem na fase de execução e de operação.

Inicialmente neste capítulo será apresentado os processos de monitoramento, que são: inspeção visual, topografia e instrumentação.

Inspeção visual: é o método mais simples, porém exige que o observador tenha experiência para detectar indícios de anormalidades que possam denotar o início de um problema significativo no futuro. Os exemplos de anormalidade são: trincas no corpo da barragem, abatimentos localizados, surgência d'água, deslocamentos no rip-rap, deslizamentos localizados no espaldar de jusante.

Topografia: embora a topografia utilize instrumentos de medição como níveis, teodolitos, estação de GPS, extensômetros moveis, etc., não foi incluída na modalidade de instrumentação por não ter nenhum de seus instrumentos instalados no local da obra. A topografia garante maiores precisões que as observações visuais. A principal forma de monitoramento por este método é: monitoramento dos deslocamentos no corpo da barragem, no sentido horizontal ou vertical, através de pinos metálicos instalados e fixados em marcos de concreto ao longo da crista da barragem e em alguns pontos do espaldar de jusante.

Instrumentação: diversos tipos de instrumentos são instalados concomitantemente com a construção da obra, seja nas fundações ou no corpo da própria barragem. Estes instrumentos permitem verificar as hipóteses, os critérios e os parâmetros adotados no projeto, adequando-os aos métodos construtivos de forma a assegurar sempre condições mais econômicas sem comprometer a segurança da obra. As principais grandezas que se deseja medir no monitoramento são: nível d'água, pressão neutra, tensão total, deslocamentos, vazão e aceleração sísmológica.

Segundo Machado (2007) as barragens de rejeito são estruturas com grande responsabilidade e necessitam de monitoramento constante do seu desempenho

operacional ao longo da vida útil da obra, a instrumentação atua no acompanhamento das condições de segurança da estrutura e dos materiais, em todas as etapas de construção, operação e encerramento ou desmobilização.

Apesar do grande destaque do valor da instrumentação em obras de Engenharia Civil, é importante mencionar que ela está sujeita a diversas limitações. A instalação do instrumento deve ser feita com bastante cuidado, pode ser conduzida de tal modo que altere significativamente as condições no local, obtendo assim um valor falso. Muitas vezes quando estes instrumentos são instalados não se sabe ao certo se o funcionamento dele está correto, sendo assim quando os resultados são apresentados se apresentam um resultado inesperado corre-se o risco de assumir como defeituoso e de descartar as informações ou por outro lado existe a possibilidade de assumir erradamente o comportamento apresentado pelo instrumento.

É importante ressaltar que a instrumentação constitui um método de observação e monitoramento muito importante, mais não aumenta interiormente a segurança da obra. Esta depende fundamentalmente do projeto e da construção.

Em projeto de grandes obras deve-se sempre buscar o instrumento ideal e segundo Cruz (1996) este deve apresentar as seguintes características:

- confiabilidade;
- alta durabilidade;
- não provocar, durante ou após a instalação, alterações no valor da grandeza que pretende medir;
- robustez;
- alta precisão;
- alta sensibilidade;
- não ser influenciável por outras grandezas, que não a de interesse;
- instalação simples;
- baixo custo;
- não causar interferência na praça de trabalho;

Portanto, ainda segundo Cruz (1996) ao ser elaborado este programa de monitoramento, todos os tipos de sistema devem ser avaliados criteriosamente, considerando os recursos humanos e financeiros disponíveis.

As técnicas de auscultação do comportamento de barragens incluem a escolha do tipo de instrumento, a quantidade, sua localização e instalação, a aquisição de dados, análise e interpretação dos resultados. Este conjunto de técnicas e informações constitui o que se chama de instrumentação geotécnica, e tem sido objeto de grande interesse e desenvolvimento no Brasil nos últimos anos.

Segundo Machado (2007) que cita o Simpósio sobre instrumentação de barragem (1996), a instrumentação instalada em barragens de rejeito deve visar dois aspectos de segurança: a segurança estrutural e a segurança ambiental. Para isso os instrumentos selecionados devem ser capazes de medir as grandezas apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Grandezas necessárias para monitoramento da segurança estrutural e ambiental

Segurança Estrutural		Segurança Ambiental
Fundação	Maciço	Altura piezométrica do regime de água subterrânea
Deslocamentos verticais	Deslocamentos verticais	Composição química da água subterrânea
Deslocamentos cisalhantes horizontais	Deslocamentos horizontais	
Subpressão	Pressões intersticiais (ou neutra)	
Vazão de infiltração	Pressão da terra	
Medida de materiais sólidos carreados	Vazão de infiltração	
	Medidas dos materiais sólidos carreados	
	Medida de alongamento ao longo da crista e berma	

6.2 – Instrumentação necessária

A partir de recomendações e bibliografias de Cruz (1996) e de Duarte (2012) pode-se observar os instrumentos necessários para cada grandeza mencionada na Tabela 21. Assim a Tabela 22 mostra a relação entre os diferentes tipos de instrumentação para a auscultação da barragem e as grandezas que podem ser observadas por eles. Isto auxiliou na determinação do plano de auscultação, já que este deve ser bem programado através das instalações dos instrumentos

suficiente, com os resultados lidos e interpretados adequadamente, com frequência apropriada.

Tabela 22 - Relação dos instrumentos e das grandezas medidas

Instrumentação	Grandeza
MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA	Definir a posição da linha freática seja no corpo da barragem ou na fundação.
MEDIDOR DE PRESSÃO NEUTRA	
Piezômetro de tubo aberto	Determinar pressões neutras (excesso de pressão hidrostática) nos maciços de terra ou na rocha, ou subpressão em contatos com estruturas de concreto.
Piezômetro hidráulico	Indicado para medidas de pressões neutras, tanto na fase construtiva quanto na de enchimento e de operação do reservatório.
Piezômetro Pneumático	Determinar pressões intersticiais (ou neutra), é um dos tipos mais frequentemente utilizados.
Piezômetro Elétrico	Determinar pressões neutras (excesso de pressão hidrostática).
Piezômetro de Corda Vibrante	
MEDIDOR DE DESLOCAMENTO (VERTICAL E HORIZONTAL)	
Medidor de recalque (vertical)	
Marcos Superficiais	Medir os deslocamentos verticais absolutos (recalque), quer da fundação, quer do maciço compactado.
Tubos Telescópicos	
Tipo USBR	
Tipo KM	
Tipo Magnético	
Tipo Caixa Sueca	
Medidor de deslocamento horizontal	
Inclinômetro	Medir deslocamentos normais ao eixo de um tubo inserido pelo furo da sondagem.
MEDIDOR DE VAZÃO	
Vertedores triangulares e retangulares	Determinar vazões individuais de drenos ou somatórios ao longo do trecho ou da totalidade da estrutura, e determinar vazões de percolação por
Vertedores Parshall	
MONITORAMENTO SISMOLOGICO	
Acelerógrafos, acelerômetros e telemetria	Determinação dos parâmetros sismológicos os respectivos mecanismos focais.

O projeto de instrumentação deve ser cuidadoso e realizado por profissionais experientes, inovações e soluções avançadas exigem estudos aprofundados e complexos.

Ligocki (2003) cita comentários de Dunnycliff (1988) sobre fases construção de uma barragem e as instrumentações necessárias. Após uma leitura aprofundada sobre este assunto se fez uma correlação para o caso de uma barragem de rejeito.

Dunnicliff (1998) relata segundo Ligocki (2003) que na fase de construção quando a barragem possui condição especial de fundação deve-se instrumentar para analisar as condições de projeto e se o comportamento está como o esperado. Como estes casos são muito específicos os projetistas sabem quais são os pontos mais críticos, para desta maneira indicar o melhor tipo de instrumento inclusive o melhor posicionamento para a análise esperada.

Durante os enchimentos da barragem deve ser observada a condição da estrutura inteira através de uma inspeção visual, que permitam a observação de trincas no corpo da barragem devido a má compactação dos diques, surgencia de água, deslocamentos localizados no espaldar de jusante ente outras coisas; outras observações podem ser analisadas em relação ao fluxo, podem ser medidos poropressão no maciço da barragem, a vazão da sarjeta para verificar se as dimensões suportarão a vazão determinada pelo projeto. Para estas análises será preciso de piezômetros de tubo aberto localizados a jusante do dique, será posicionado de acordo com a análise de estabilidade do maciço onde a esta apresenta o plano de ruptura, já que pode ser considerado um local de grande risco e probabilidade de instabilidade. Haverá necessidade também de um piezômetro para a fundação, para isso será instalado com uma profundidade que alcance a fundação. A Figura 37 mostra a área do plano de ruptura, as localizações dos piezômetros estão apresentadas na Prancha 11, em anexo. Será preciso também de medidores de vazão na saída de cada dreno, dreno do rejeito e dreno da fundação. Um monitoramento muito importante é o medidor de deslocamento vertical (recalque), para isso será utilizado o instrumento mais simples que são os marcos superficiais, que será baseado em levantamentos topográficos, estes serão instalados em cada patamar dos diques de forma a monitorar cada dique.

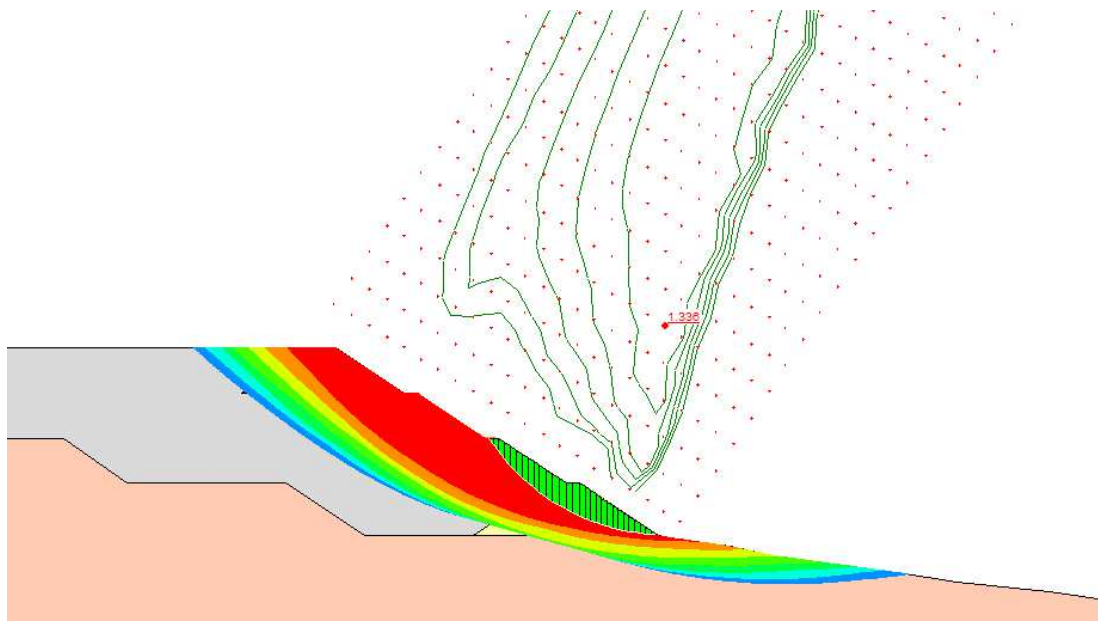


Figura 37 - Localização do plano de ruptura e das áreas mais críticas.

Vale ressaltar a instalação dos piezômetros começa no início da obra e vai crescendo de acordo com a profundidade necessária. Assim como a instalação dos marcos superficiais a medida que cada dique é construído é feita a instalação do mesmo.

Durante o período de decantação do rejeito, após a construção de todos os diques, considera-se que o fluxo que percola pelo maciço está em regime permanente, logo a instrumentação tem como principal objetivo monitorar o estado de conservação do corpo da barragem e a fundação. Portanto nesta fase os piezômetros são mais importantes que os medidores de deslocamento.

Segundo o Curso de Segurança de barragem a quantidade de instrumentos a ser instalado em uma barragem esta condicionado principalmente aos seguintes aspectos: comprimento da barragem, altura máxima, características geológicas da fundação, características dos materiais utilizado no corpo da barragem e as etapas construtivas.

Definido os tipos de instrumentos que serão necessários para o monitoramento da barragem, faz-se necessário definir valores teóricos que possam servir como referencia para a análise dos resultados obtidos. Estes valores teóricos podem ser obtidos com base em estudos, modelos matemáticos e modelos físicos.

Vários autores fazem diversas recomendações diferentes quanto a frequência de leitura para os diversos tipos de instrumentos. A Tabela 23 apresenta as

recomendações de Cruz (1996) para frequência de leituras em condições de normalidade. Ele ainda ressalta que esta não é uma padronização, apenas frequências usualmente utilizadas.

Tabela 23 - Frequência usuais de leitura (FONTE: CRUZ, 1996)

Frequencia de acompanhamento						
Instrumento	Construção	Enchimento + 3 meses	4° ao 6° mês	7° ao 12° mês	13° ao 36° mês	37° mês em diante
Medidor de Nivel d'água	Semanal	2/semana	2/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal
Medidores de Vazões	Semana	3/semana	3/semana	2/semana	Semana	Quinzenal
Piezômetros de Fundação	Semana	2/semana	2/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal
Piezômetro de Maciço	Semana	1/semana	Semana	Semanal	Quinzenal	Quinzenal
Medidores de Recalques	Semanal	2/semana	Semanal	Quinzenal	Mensal	Bimestral
Inclinômetros	Quinzenal	Semanal	Quinzenal	Quinzenal	Mensal	Trimestral
Célula de Tensão total	Semanal	2/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal	Quinzenal
Extensômetro de hastes	Semanal	3/semana	3/semana	Semanal	Quinzenal	Quinzenal

BIBLIOGRAFIA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Estabilidade de Encostas, 2009. NBR 11682.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, 1984. NBR 6508.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Solo – Análise Granulométrica, 1988. NBR 7181.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Solo – Determinação do Limite de Liquidez, 1984. NBR 6459.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade, 1984. NBR 7180.

ASTM - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, 2011. D3080

Albuquerque Filho, L.H. **Análise do Comportamento Geotécnico de Barragens de Minério de Ferro através de ensaios de piezocone.** Tese de Mestrado – Departamentos de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

Araujo, C.B – **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro. Dissertação de Mestrado** – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

Azevedo, M.P.N. – **Barragem de Terra – Sistemas de Drenagem Interna.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Anhembí Morumbi, 2005.

Braja, M. Das. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

Browles, J.E. – **Foundation analysis and desing.** 1996

Costa, W.D. **Geologia de Barragens.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

Cruz, P.T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto.** São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

Festi, A.V. – **Coletânea das Equações de Chuva do Brasil**–

Informe Técnico – Sistema de Drenagem Horizontal com o Geocomposto MacDrain, 2009.

Ligocki, L.P. – **Comportamento Geotécnico da Barragem de Curuá-Uma, Pará.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, 2003.

Machado, W.G.F – **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração. Dissertação de Mestrado** – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, 2007.

Manual de Drenagem de Rodovia, 2006

Massad, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

Montes, C.C. – **Estudo Piezométrico e análise de estabilidade de taludes da Barragem Bico da Pedra.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.

Passos, N.C.S.T. **Barragem de Rejeito: Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos de Rejeito de Minério de Ferro utilizando Ensaio de Campos – Um Estudo de Caso.** Trabalho de Conclusão de curso – Departamento de Construção Civil, do setor de Tecnologia, da Universidade do Pará, 2009.