LEANDRO VIDA PINHEIRO DE CASTRO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA EM
BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITO ALTEADA A MONTANTE

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2008

LEANDRO VIDA PINHEIRO DE CASTRO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA EM
BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITO ALTEADA A MONTANTE

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de julho de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Castro, Leandro Vida Pinheiro de
Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem
c de contenção de rejeito alteada a montante / L.V.P. de Castro. -
- ed.rev. -- São Paulo, 2008.
103 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo.

1.Barragens de rejeitos 2.Gerenciamento de águas sub-
terrâneas (Instrumentação; Controle) 3. Acidentes em mineração
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e educadores, Carlos e Aimée, pelo constante incentivo aos estudos e apoio integral em todos os momentos de minha vida acadêmica e aos meus irmãos, Flávia e André, pelo saudável convívio familiar.

Aos meus familiares por compreender minha ausência em algum encontro programado, em virtude do tempo restrito para elaboração desta dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies, por sua absoluta compreensão e atenção dispensada nos momentos mais difíceis decorridos ao longo deste período.

Ao Prof. Dr. Lindolfo Soares, pelas informações e esclarecimentos técnicos fornecidos dentro e fora de sala de aula, a respeito do tema da dissertação e demais assuntos correlatos de elevada importância em minha formação.

A Srta. Maria Cristina Martinez Bonésio, pelo apoio na revisão das referências e ao bibliotecário Elias por toda ajuda cedida.

A minha querida Lucila Bornia, pelo seu amor, apoio e incontestável colaboração na arte final deste trabalho.

Por fim, quero agradecer a Deus, por me proteger e iluminar o meu caminho.

RESUMO

Entre os principais métodos construtivos de barragens de contenção de rejeitos de mineração, o método da linha de montante é sem dúvida o mais vulnerável à ocorrência de acidentes originados por forças de percolação da água pelo barramento. Em um sistema barragem-reservatório constituído de solos finos e de baixa coesão, como as barragens de contenção de rejeitos, as forças de percolação da água favorecem a instalação de processos erosivos internos de *piping* e liquefação, maiores responsáveis pelos acidentes já registrados.

Para redução dos riscos de acidentes em barragens construídas pelo método da linha de montante, a avaliação do comportamento do nível d'água deve ser constante. Neste contexto, o trabalho apresenta um programa de instrumentação e monitoramento composto por medidas piezométricas, pluviométricas, de vazão, do nível d'água do reservatório e de deslocamento horizontal com marco topográfico, com vistas ao aumento do fator de segurança destas obras. A execução de um procedimento metodológico com base no programa de instrumentação e monitoramento acima citado, possibilita a avaliação do comportamento do nível d'água nestas barragens.

Por fim, são descritos os aspectos relevantes para correlação dos dados da instrumentação com os valores-limite definidos para o projeto, critério este determinante para o sucesso de um programa de instrumentação. O procedimento metodológico apresentado se mostrou eficiente na obtenção de parâmetros indispensáveis a uma correta avaliação do comportamento do nível d'água e as condições estruturais do barramento.

ABSTRACT

Among the main building methods of tailings dams, the upstream method is undoubtedly the most vulnerable to the occurrence of the failure originated by the power of seepage groundwater through the embankment. In a reservoir-dam system having low cohesion slimes, such as tailings dams, the power of seepage groundwater benefits the installation of internal erosive processes of piping and liquefaction, the most responsible for the failure already registered.

For reduction of failure risks in tailings dams built through upstream method, the assessment of water level behavior must be constant. In this context, the survey presents an instrumental and monitored program composed by piezometer, rainy, downstream outlet, reservoir level of water measures and benchmark providing the increase of safety in these works. The execution of a methodological procedure based on the instrumental and monitored program above mentioned makes possible the assessment of water level behavior in these dams.

At last, the relevant aspects for correlation of instrumental data with the limit-values defined for the project are described, meaningful criterion for the success of an instrumental program. The methodological procedure showed efficiency for the obtain of indispensable patterns for a right level of water behavior assessment and structure embankment conditions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Balanço de água de uma barragem de contenção de rejeitos do tipo “circuito fechado”.....	19
Figura 2 - Fluxograma típico de tratamento de minério.....	20
Figura 3 - As fases no solo; (a) no estado natural, (b) separada em volume e (c) em função do volume de sólidos.....	24
Figura 4 - Concepção da variação da permeabilidade num depósito de rejeitos.....	27
Figura 5 - Alteamento pelo método da linha de montante.....	29
Figura 6 - Seqüência de alteamento pelo método da linha de jusante.....	30
Figura 7 - Seqüência de alteamento pelo método da linha de centro.....	31
Figura 8 - Lançamento e deposição de rejeitos de mineração.....	34
Figura 9 - Alteamento de barragem de contenção de rejeitos pelo método da linha de montante.....	35
Figura 10 - Alteamento a montante de barragem de contenção de rejeitos por meio de spigot, com utilização de pranchas de madeira como suporte dos diques do talude de jusante.....	36
Figura 11 - Alteamento a montante de barragem de contenção de rejeito por meio de ciclones.....	36
Figura 12 - Comparação entre barragem de armazenamento de água convencional e de contenção de rejeitos construída pelo método da linha de montante.....	40
Figura 13 - Riscos de ruptura em barragens construídas à montante.....	46
Figura 14 - Rede de fluxo em barragens de contenção de rejeitos à montante.....	47
Figura 15 - Posicionamento do nível freático em função de características do projeto.....	49
Figura 16 - Fatores influenciadores na localização da superfície freática em barragens construídas pelo método de montante.....	50
Figura 17 - Fluxograma das atividades voltadas a concepção e projeto de barragens de contenção de rejeitos.....	52
Figura 18 - Principais formas de entrada e saída d'água em reservatórios.....	63
Figura 19 - Nível freático quando não há fluxo d'água subterrânea.....	65
Figura 20 - (A) Piezômetro simples; (B) Piezômetro multinível.....	66
Figura 21 - (A) Esquema de um piezômetro <i>standpipe</i> instalado em furo de sondagem; (B) Piezômetro <i>standpipe</i> com filtro poroso, conectado à tubulação em PVC.....	69
Figura 22 - Esquema de instalação de piezômetro <i>standpipe</i>	70
Figura 23 - Sensores (pio elétrico) utilizados para leitura do nível d'água.....	71

Figura 24 - Proteção e sinalização de piezômetro durante sua instalação.....	71
Figura 25 - Mecanismos de proteção de piezômetros após sua instalação.....	71
Figura 26 - Principais fontes da variação do período de tempo de resposta (<i>time lag</i>).....	74
Figura 27 - Principais fontes de erros em piezômetros de tubo aberto.....	75
Figura 28 - Fontes de erros causados por fluídos e bolhas.....	75
Figura 29 - Fontes de erros causados pela alteração do <i>time lag</i> hidrodinâmico.....	77
Figura 30 - Outras fontes de erros causados pela alteração do <i>time lag</i>	77
Figura 31 - Seção mostrando o ideal para a instrumentação e monitoramento do nível d'água.....	79
Figura 32 - Instalação de medidor de vazão em barragem de pequeno porte.....	80
Figura 33 - (A) Barragem com um septo impermeável e dois medidores de vazão; (B) Barragem com dois septos impermeáveis e dois medidores de vazão, com área alagada a jusante.....	81
Figura 34 - Ilustração esquemática e foto de medidor triangular.....	82
Figura 35 - Calha tipo Parshall e medidor de vazão ultra-som para calha Parshall com saída do sistema de drenagem em um único ponto.....	82
Figura 36 - Exemplo de apresentação dos dados pluviométricos e vazões sob a forma de gráfico.....	84
Figura 37 - Marcos superficiais instalados em barragens convencionais.....	86
Figura 38 - Esquema de instalação de uma estação topográfica: (A) em rocha; (B) em solo.....	86
Figura 39 - Gráfico com as variações dos níveis piezométricos em uma seção instrumentada.....	94
Figura 40 - Gráfico comparativo das variações das vazões de drenagem e do nível d'água do reservatório.....	94
Figura 41 - Gráfico hipotético do programa de instrumentação de uma barragem de retenção de rejeito alçada a montante.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características físicas dos rejeitos de mineração.....	22
Tabela 2 - Classificação quanto ao grau de permeabilidade.....	26
Tabela 3 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade.....	27
Tabela 4 - Características gerais dos métodos de construção e suas respectivas vantagens e desvantagens.....	32
Tabela 5 - Características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos.....	33
Tabela 6 - Características de barragens convencionais e de contenção de rejeitos.....	40
Tabela 7 - Distribuição de frequências segundo a causa do acidente.....	42
Tabela 8 - Causas e medidas corretivas para os erros de medição.....	73
Tabela 9 - Comportamento dos piezômetros de montante e jusante.....	78
Tabela 10 - Exemplo de atribuição de tarefas para um programa de monitoramento executado pelo proprietário.....	90

LISTA DE ABRAVIATURAS E SIGLAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NA	Nível d'água
PVC	Poli Cloreto de Vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

e	índice de vazios do material no estado natural
$e_{\max}$	índice de vazios na condição mais fofa
$e_{\min}$	índice de vazios na condição mais densa
F_p	força de percolação
i_c	gradiente hidráulico crítico
k	coeficiente de permeabilidade
K_h	permeabilidade na horizontal
K_v	permeabilidade na vertical
L	litro
m	metro
n	porosidade
p	densidade da polpa
P_a	peso da água
P_s	peso de sólidos
Q	vazão (L/min)
T	intervalo de tempo (minutos)
V	volume coletado (litros)
V_a	volume de água
V_s	volume de sólidos
V_v	volume de vazios
w	umidade
y	massa específica
γ_a	densidade da água
γ_{sat}	massa específica aparente do solo saturado
γ_s	peso específico dos sólidos (ou dos grãos)
z	carga de posição (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência) (m)
Δh	produto da perda de carga

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
3 JUSTIFICATIVAS.....	16
4 METODOLOGIA.....	17
5 BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS.....	18
5.1 PROPRIEDADES DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	21
5.1.1 Classificação dos tipos de rejeitos.....	22
5.1.2 Propriedades geotécnicas dos rejeitos.....	23
5.1.3 Permeabilidade dos rejeitos.....	25
5.1.4 Efeitos da anisotropia na deposição dos rejeitos.....	27
5.2 PRINCIPAIS MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....	28
5.3 O MÉTODO CONSTRUTIVO DA LINHA DE MONTANTE.....	33
5.3.1 Principais causas de acidentes.....	41
5.3.1.1 Liquefação.....	43
5.3.1.2 <i>Piping</i> (erosão interna regressiva).....	44
5.3.2 Características do nível freático.....	45
5.4 ASPECTOS TÉCNICOS NA CONCEPÇÃO DE UM PROJETO.....	50
5.4.1 Levantamento topográfico.....	53
5.4.2 Qualidade das fundações.....	54
5.4.3 Condicionantes geotécnicos.....	55
5.4.4 Possibilidade de eventos tectônicos.....	55
5.4.5 Condições climáticas.....	56
5.4.6 Considerações geoquímicas.....	56
5.4.7 Hidrogeologia e passivo ambiental.....	57
5.4.8 Critérios operacionais.....	59
5.4.9 Instrumentação e monitoramento.....	59
5.4.10 Aspectos legais e normas técnicas.....	60

6 PROPOSTA DE INSTRUMENTAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NO SISTEMA BARRAGEM-RESERVATÓRIO.....	63
6.1 PIEZOMETRIA.....	64
6.1.1 Piezômetro de tubo aberto (<i>standpipe</i>).....	67
6.1.1.1 Algumas fontes de erros em piezômetros de tubo aberto.....	72
6.1.2 Determinação da linha piezométrica em uma seção instrumentada.....	77
6.2 VAZÃO DE JUSANTE.....	79
6.3 PLUVIOMETRIA.....	83
6.4 NÍVEL D'ÁGUA DO RESERVATÓRIO.....	84
6.5 MARCO TOPOGRÁFICO SUPERFICIAL.....	85
7 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA A PARTIR DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO.....	88
7.1 O PROGRAMA DE MONITORAMENTO.....	89
7.1.1 Coleta, análise e apresentação das leituras.....	91
7.2 DEFINIÇÃO DE VALORES-LIMITE DO PROJETO.....	96
8 CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS.....	99
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	102

1 INTRODUÇÃO

A avaliação do comportamento do nível da água em barragens de contenção de rejeitos de mineração constitui-se num parâmetro de segurança estrutural e ambiental indispensável em qualquer estágio de desenvolvimento destes tipos de obras. Quando o método escolhido para construção da barragem de contenção de rejeitos é o método da linha de montante, o fator de segurança deste tipo específico de barragem, em relação aos demais métodos construtivos, necessita de atenção redobrada por parte do empreendedor. Liquefação e *piping* são as principais causas de acidentes, com frequência relativa em torno de 70% daqueles já registrados e muitos destes com danos irreversíveis ao meio ambiente.

A instrumentação da variação do nível d'água durante os ciclos hidrológicos certamente contribuirá na redução do número de acidentes relativos aos processos de liquefação e *piping*. Entretanto, certas empresas de mineração, principalmente as mais antigas e pequenas não operam em suas barragens de contenção de rejeitos qualquer programa de instrumentação e monitoramento hidrológico. Os conceitos atuais de segurança das barragens de rejeitos eram pouco aplicados em projetos no passado e hoje geram grandes dificuldades para se analisar e concluir a condição estrutural destas barragens e quais os riscos de impacto que oferecem ao meio ambiente. Porém, antigos barramentos, hoje em processo de reintegração ambiental, continuam desde sua desativação sem qualquer atenção para o impacto ao meio ambiente muitas vezes presente, porém desconhecidos.

Se toda empresa de mineração adotasse em suas barragens de rejeitos um programa de instrumentação para avaliação do comportamento das águas contidas neste sistema de armazenamento, corresponderia com o proposto nas recomendações de normas técnicas relativas a segurança e disposição de rejeitos de mineração. A atenção dispensada aos corretos procedimentos promoveria a possibilidade de prever seu comportamento e intervir eventualmente, com investigações geológico-geotécnicas complementares e medidas corretivas quando necessário.

Portanto, somente com a prática de investimentos em programas de instrumentação das barragens de contenção de rejeitos, principalmente nas construídas pelo método da linha de montante, os empreendedores mineiros fornecerão mecanismos satisfatórios de controle da segurança estrutural e ambiental destas obras. O fato se agrava neste método, em virtude da maior fragilidade frente às forças de percolação da água e instalação de processos erosivos, bem como na impossibilidade de proteção do talude de montante.

2 OBJETIVOS

Apresentar um procedimento metodológico de avaliação do comportamento do nível d'água em barragens de contenção de rejeitos de mineração, construídas pelo método da linha de montante.

Neste contexto, o trabalho abordará os principais parâmetros constantes em um programa de monitoramento das águas que adentram e saem destes tipos específicos de reservatórios, constando da apresentação de gráficos com as leituras obtidas pela instrumentação de campo e aspectos relevantes na interpretação dos resultados. Buscará avaliar o comportamento do nível d'água por meio de um programa de instrumentação compreendendo a medição do nível da água com piezometria, vazão a jusante da barragem, nível do reservatório, precipitação pluviométrica na bacia e instalação de marcos topográficos.

3 JUSTIFICATIVAS

O trabalho foi proposto a partir da avaliação de barragens de contenção de rejeitos construídas pelo método da linha de montante, em virtude de ser o método mais utilizado na indústria mineira, o mais econômico e, em contra partida, o mais inseguro do ponto de vista estrutural e ambiental. Entre os principais métodos construtivos de barragens de contenção de rejeitos é o que mais exige intensa avaliação do comportamento do nível d'água. Tal fato, de extrema importância, está relacionado aos muitos acidentes registrados neste tipo específico de barramento através de processos de liquefação e *piping*.

A implantação de um programa de monitoramento do nível da água contida no sistema barragem-reservatório com critérios e procedimentos definidos no projeto executivo serão indispensáveis para o controle e avaliação do comportamento da obra durante sua construção, operação e desativação. Quando bem dimensionado proporciona aquisição de dados importantes, possibilitando, a partir da análise das medidas da instrumentação, detectar se o barramento está sofrendo interferências como, deslocamentos verticais e horizontais, variação de subpressões na barragem, aumento da vazão a jusante e carreamento de materiais sólidos.

A dissertação do tema assume importância significativa, em razão da enorme necessidade de supervisionar a entrada e saída da água em barragens de contenção de rejeitos alteada pelo método de montante e prever seu comportamento. Destaca-se a elaboração de pesquisas detalhadas neste sentido, em decorrência da baixa quantidade de trabalhos publicados direcionados ao tema proposto, contribuindo com a ampliação da literatura específica existente e colaborando com a segurança e o meio ambiente.

4 METODOLOGIA

A elaboração da dissertação foi desenvolvida a partir de dados disponíveis em bibliografias específicas referentes ao tema. Concluída a revisão bibliográfica a dissertação se direcionou na descrição dos procedimentos metodológicos necessários para promover a instalação de um programa de monitoramento do nível da água, visando avaliar o comportamento de barragens de contenção de rejeitos construídas pelo método de montante. O trabalho apresenta também os procedimentos a serem mantidos ao longo da vida útil da obra e como o empreendedor e seus projetistas poderão adquirir condições de prever o seu comportamento pela comparação dos parâmetros de projeto com o real medido pela instrumentação.

A dissertação está estruturada em oito capítulos, os anteriormente citados e demais, assim distribuídos:

- Capítulo 5: Barragens de contenção de rejeitos;
- Capítulo 6: Proposta de instrumentação do nível da água no sistema barragem-reservatório, vazões e marcos topográficos;
- Capítulo 7: Avaliação do comportamento do nível d'água a partir dos dados da instrumentação;
- Capítulo 8: Conclusões;
- Por fim, as referências citadas no texto.

5 BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS

As barragens de contenção de rejeitos consistem em uma especialização dentro do campo de projetos de barragens convencionais, onde a contenção dos rejeitos é realizada através da implantação de barragens construídas com o próprio rejeito, podendo ser empregado também materiais de decapeamento, bota-fora e estéreis. Quanto aos métodos de alteamento das barragens construídas com rejeitos, podem ser destacados três tipos principais, denominados de método da linha de montante, da linha de jusante e da linha de centro, denominações estas resultantes do deslocamento que o eixo da barragem apresenta durante seu alteamento.

De uma maneira geral, qual seja o método construtivo escolhido, as barragens de contenção de rejeitos são alteadas sucessivamente com rejeitos de mineração, sendo a estrutura do barramento iniciada com uma barragem piloto ou dique de partida, constituído na maioria das vezes de solo argiloso compactado. Rochas (enrocamento) e estéril da mina são também utilizados em alguns projetos, tanto para proteção do barramento como para compor sua estrutura interna. Os alteamentos subseqüentes são programados para acompanhar o nível dos rejeitos depositados nos reservatórios. Soares (1998) cita que, estes métodos construtivos adotam alteamentos sucessivos e podem ser executados pelo próprio minerador, tornando-os interessantes economicamente, em virtude da possibilidade de grande flexibilidade construtiva, em função da variação de volumes de rejeitos gerados a serem armazenados.

Arnez (1999), cita alguns benefícios para o empreendedor na implantação de um projeto de barragem de contenção de rejeitos, pelo fato da construção ser executada por etapas. Segundo o autor, reduz o custo de capital inicial da obra, gerando melhor fluxo de caixa; possibilita carregamento progressivo das fundações; permite alívio das pressões neutras construtivas e incorpora revisões de projeto em função da variação das características dos rejeitos. Assim, a construção com alteamentos sucessivos dilui os custos do minerador e proporciona maior flexibilidade de operação, adaptando a construção da barragem às necessidades reais da mina, conforme as flutuações de valores no mercado de minérios.

Os projetos de barragens a serem construídas com rejeitos derivados do processamento mineral estendem-se por praticamente todo o período da atividade mineira, possibilitando o acompanhamento, fornecimento de resultados, permitindo modificações e aprimoramentos do projeto inicial na execução do alteamento. Segundo Chaves e Fujimura (1991) apud Arnez (1999), a barragem de contenção de rejeitos é uma boa alternativa para a disposição, de maneira controlada e barata, desses subprodutos, de forma a permitir a sua retomada no futuro, devido à variação mercadológica e técnicas de processamento. Desta forma, as barragens de contenção de rejeitos são imensos depósitos inteligentes e de custo relativamente baixo para acumulação de subprodutos do processo mineiro ou metalúrgico.

Outra vantagem que as barragens de contenção de rejeitos contemplam ao empreendedor é quanto ao sistema de construção e operação denominado “tipo circuito fechado” e mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Balanço de água de uma barragem de contenção de rejeitos do tipo “circuito fechado” (Espósito, 1995).

Este sistema de operação além de permitir a reciclagem da água do lago do reservatório e seu retorno ao processo de beneficiamento com qualidade satisfatória, melhora a qualidade da água que percola pela estrutura e sairá a jusante do barramento. A implantação deste sistema facilita o controle das águas que adentram

e saem do reservatório, aumentando o fator de segurança das barragens de contenção de rejeitos quanto à sua estabilidade estrutural.

Outro aspecto relevante em relação às barragens de contenção de rejeitos é quanto à planta de beneficiamento de minério da mina, onde o bem mineral será tratado com vistas a sua redução granulométrica e aumento da concentração relativa do minério presente. Na Figura 2 é apresentado um fluxograma típico de tratamento de minério em que se pode notar o retorno da água após o processo de espessamento (desaguamento) e acumulação da água no reservatório da barragem de rejeito para reuso no processo de beneficiamento mineral.

Figura 2 - Fluxograma típico de tratamento de minério (Machado, 2007).

O beneficiamento mineral de uma mina é de grande importância para a construção da barragem, pois o rejeito gerado após todas as etapas envolvidas no beneficiamento será o material utilizado para o alteamento da barragem. Neste contexto será fundamental a caracterização geotécnica do rejeito para execução do projeto, devido ao fato de um rejeito nunca ser igual ao outro. Qualquer mudança no processo de beneficiamento do minério poderá mudar as características e propriedades dos rejeitos gerados.

5.1 PROPRIEDADES DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO

Rejeitos são definidos como “fração do minério destituída de mineral útil ou valor econômico originada no processo de beneficiamento mineral”. Os rejeitos podem ser caracterizados por três fases distintas: sólida, líquida e gasosa, que na prática estão dispersas na massa, mas podem, para efeitos teóricos, serem separadas. Em geral, pode-se dizer que os rejeitos se classificam em rejeitos totais, *underflow* e lamas. Os rejeitos totais constituem o produto dos processos de britagem e moagem, enquanto que os termos *underflow* e lamas são utilizados para os rejeitos grossos e finos obtidos por concentrações posteriores (NIEBLE, 1986). As partículas constituintes dos rejeitos são angulosas, com bordas cortantes e em geral com granulometria abaixo de 10mesh (2mm), com exceção quando a rocha encaixante é composta por minerais alterados e/ou porções mais brandas e friáveis. Neste caso os depósitos minerais após o seu beneficiamento tendem a gerar rejeitos com maiores quantidades de finos, em particular os argilo-minerais.

Ressalta-se que o processo de beneficiamento mineral inclui as etapas de lavagem, peneiramento, deslamagem, separação gravimétrica e magnética, flotação e lixiviação. Deste modo, o rejeito do beneficiamento é o produto da eliminação de minerais sem interesse econômico, através das etapas citadas acima, na forma de partículas sólidas ou de polpa.

5.1.1 Classificação dos tipos de rejeitos

Segundo Vick (1983), grande parte do comportamento dos rejeitos é explicável a partir de sua origem geológica e de seu processamento. Porém, dentro de limites amplos, algumas generalizações podem mostrar um resumo útil das características físicas do rejeito. Deste modo, os rejeitos podem ser agrupados em quatro categorias gerais segundo a granulometria e plasticidade, conforme indicado na Tabela 1. Entretanto, é importante reconhecer que a classificação apresentada nesta tabela reflete apenas uma visão das características físicas e comportamentos de engenharia de diversos tipos de rejeitos.

Tabela 1 – Principais características físicas dos rejeitos de mineração (Vick, 1983, modificado).

Categoria	Principais características
Rejeito de rochas brandas: (carvão, potássio, argilas, xistos e folhelhos)	Contém areia e frações finas (menor que #200), porém a presença de lammas pode determinar as propriedades gerais devido a presença de argila.
Rejeitos de rochas duras (chumbo, cobre, ouro, prata, molibdênio e níquel).	Podem conter frações de areia e frações finas (menor que #200), sendo estes finos normalmente de baixa plasticidade e não plástico. As quantidades de areia no total, normalmente, controlam as propriedades dos propósitos de engenharia.
Rejeitos finos (argilas fosfáticas, finos vermelhos de bauxita, rejeitos finos de taconita, rejeitos de areia de alcatrão a partir de lammas).	A fração de areia é geralmente pequena ou ausente. O comportamento do material, particularmente as características de sedimentação-consolidação, é denominado pelas frações finas (menor que #200) ou as partículas de tamanho das argilas e pode causar problemas na disposição, devido a baixa velocidade de sedimentação.
Rejeitos grossos (alcatrão, urânio, taconita, gesso, siltes de fosfato).	Contém principalmente areias ou partículas não plásticas de tamanho silte, que exibem comportamento de areias e geralmente são de características de engenharia favoráveis.

Devido a grande diversidade dos rejeitos de mineração, as características dos rejeitos depositados podem apresentar variações significativas, quer em termos de

diluição (o *overflow* dos ciclones chega ao máximo de 5% em peso, enquanto que o *underflow* dos espessadores freqüentemente atinge 60% em peso), quer em termos de comportamento reológico, onde os rejeitos depositados podem ser muito plásticos (argilas/lamas) ou não plásticos (areias/grosseiros) (SOARES, 1998).

Os rejeitos em qualquer categoria de fração, terão quase as mesmas características físicas, os problemas de disposição são geralmente algo similares. Conseqüentemente, quando tem pouca informação disponível sobre o rejeito e a prática de sua disposição, a comparação com rejeitos de uma categoria geral pode auxiliar na orientação inicial. Em adição, de maneira particular, mudanças na trituração ou moagem, por exemplo, podem produzir consideráveis quantidades de materiais finos que podem mudar a categoria na qual o rejeito reside e introduzir novos e diferentes problemas na disposição (ARNEZ, 1999).

5.1.2 Propriedades geotécnicas dos rejeitos

A natureza do rejeito depende fundamentalmente do estado de alteração do material original, sendo resultantes das diversas etapas de beneficiamento, como a lavagem, peneiramento, deslamagem, separação gravimétrica e magnética, flotação e lixiviação, sendo constituídos em essência por proporções variadas de gases, líquidos e sólidos. Portanto, em função do tipo de minério processado e do método de beneficiamento adotado, os rejeitos exibirão características geotécnicas variáveis (SOARES, 1998). O rejeito é constituído, assim como o solo, por três fases: partículas sólidas, água e ar, conforme apresentado na Figura 3. Na polpa de rejeito, somente parte do volume total é ocupado pelas partículas sólidas, no qual se acomodam formando uma estrutura. O volume restante costuma ser chamado de vazios, embora esteja ocupado por água ou ar. O comportamento de um rejeito depende da quantidade relativa de cada uma dessas três fases, empregando-se diversas relações para expressar as proporções entre elas.

Figura 3 – As fases no solo; (a) no estado natural, (b) separada em volume, (c) em função do volume de sólidos (Souza Pinto, 2000).

Para identificar o estado do solo, utilizam-se índices que correlacionam os pesos e os volumes das três fases citadas anteriormente, sendo estes índices os seguintes (VICK, 1983):

Índice de vazios	$e = V_v / V_s$
Grau de Saturação	$s = V_a / V_v$
Porosidade	$n = V_v / V$
Umidade	$w = P_a / P_s$
Peso específico dos sólidos (ou dos grãos)	$\gamma_s = P_s / V_s$
Peso específico da água (valor adotado)	$= 10 \text{ kN} / \text{m}^3$
Densidade (sólidos)	$G = \gamma_s / \gamma_a$
Densidade da polpa	$p = P_s / P$
Densidade relativa	$= (e_{\max} - e / e_{\max} - e_{\min}) \times 100 (\%)$

onde;

Pa: peso da água;

Ps: peso dos sólidos;

P: peso da polpa;

Vs: volume de sólidos;

V: volume total;

Vw: volume de água;

Va: volume de vazios;

γ_s : densidade dos sólidos;

γ_a : densidade da água;

e_{max} : índice de vazios na condição mais fofa;

e_{min} : índice de vazios na condição mais densa;

e : índice de vazios do material no estado em que se encontra.

Deste modo, as características geotécnicas dos rejeitos são determinadas com base nos índices convencionais da Mecânica dos Solos, ressaltando que para análise e determinação do comportamento dos rejeitos a granulometria corresponde ao parâmetro geotécnico mais importante nestes estudos.

Para Fujimura e Soares (1996), os rejeitos são depositados hidraulicamente, o que resulta num depósito bastante heterogêneo no sentido horizontal e vertical. Em geral os taludes da praia mergulham para a lagoa em torno de 0,5 a 2%, e para distâncias maiores do ponto de lançamento, ficam ao redor de 0,1%. A segregação de finos pode atingir na direção vertical variação granulométrica significativa, podendo variar desde argilas até areias grossas. Estes fatores influem diretamente no comportamento geotécnico de rejeito depositado no reservatório.

5.1.3 Permeabilidade dos rejeitos

Para Soares (1998), a variação da permeabilidade pode ser caracterizada como função da dimensão dos grãos do rejeito, sua plasticidade, modo de lançamento e profundidade do material. O coeficiente de permeabilidade (k), representa a velocidade de percolação da água quando o gradiente hidráulico é igual a 1,0. Segundo Caputo (1983), permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade. Dependerá, principalmente, da porcentagem de finos e da curva granulométrica do material, que o colocará entre impermeável, semi-permeável e permeável.

Parâmetros geotécnicos como a granulometria e índice de vazios nos rejeitos apresentam influência determinante nos valores da permeabilidade, podendo ser

bastante significativa em alguns casos. Soares (1998), relata que para a maioria dos rejeitos arenosos e naqueles de baixa plasticidade ocorre variação bastante consistente da permeabilidade com o decréscimo do índice de vazios. O índice de vazios pode provocar variações na permeabilidade de até 5 vezes nos rejeitos grossos e até 10 vezes nas lamas. Alterações no coeficiente de permeabilidade estão ligados muitas vezes também à segregação do material na praia de deposição no reservatório.

A Tabela 2 apresenta valores do coeficiente de permeabilidade e as correspondentes classificações quanto à maior ou menor facilidade de percolação. Como requisito indispensável à segurança da obra é de extrema importância o conhecimento da permeabilidade pelo corpo da barragem, ombreiras e fundação com o devido controle técnico do material de empréstimo.

Tabela 2 - Classificação quanto ao grau de permeabilidade (Terzaghi e Peck, 1967).

Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)	Grau de Permeabilidade
$K < 10^{-7}$	Praticamente Impermeável
$10^{-7} < K < 10^{-5}$	Muito Baixo
$10^{-5} < K < 10^{-3}$	Baixo
$10^{-3} < K < 10^{-1}$	Médio
$k > 10^{-1}$	Alto

A segregação hidráulica esta diretamente ligada ao processo de deposição das partículas de tamanhos diferentes, à diferentes distâncias de lançamento. A concepção clássica da deposição hidráulica das partículas de rejeito e as permeabilidades esperadas estão representadas na Figura 4.

Figura 4 – Concepção da variação da permeabilidade num depósito de rejeitos (Soares, 1998).

Pode ser observada uma zona constituída por areias (zona 1), de alta permeabilidade, situada próxima ao ponto de descarga; uma outra zona (zona 3) constituída por lamas, de permeabilidade baixa, situada distante do ponto de lançamento, e uma zona de permeabilidade intermediária (zona 2) situada entre estas duas zonas. A largura relativa de cada zona depende da proporção das areias e lamas e também da posição da lagoa de decantação em relação ao ponto de descarga. A Tabela 3 mostra valores típicos do coeficiente de permeabilidade para diversos materiais.

Tabela 3 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade (Cruz, 1996).

Material	Coeficiente de Permeabilidade
Rochas Maciças	$< 10^{-9}$
Argilas Sedimentares	$10^{-7} - 10^{-8}$
Solos Compactados (Kv)	$10^{-6} - 10^{-7}$
Siltes	10^{-6}
Solos Compactados (Kh)	$10^{-4} - 10^{-6}$
Areis Finas	10^{-3}
Areias Grossas	10^{-2}
Brita	$> 10^{-1}$

5.1.4 Efeitos da anisotropia na deposição dos rejeitos

Solos sedimentares e de terra compactada são usualmente anisotrópicos, apresentando maior coeficiente de permeabilidade na direção horizontal do que na

vertical. Neste contexto Souza Pinto (2000) cita que, coeficientes de permeabilidade na direção horizontal podem atingir valores até 15 vezes maiores do que na vertical. No entanto, Cruz (1996) relata que, o mais comum é encontrar diferenças na ordem de 5 vezes. Esta razão de permeabilidade é de fundamental importância no estudo de fluxo através de barragens.

Em virtude da natureza do processo de geração do rejeito de mineração e seu lançamento com seguida deposição hidráulica, os depósitos de rejeitos mostrarão uma significativa diferença da permeabilidade nas direções horizontal e vertical. Segundo Souza Junior (2003), as medidas de anisotropia informadas na literatura são poucas, mas a relação entre o coeficiente de permeabilidade horizontal e vertical (k_h/k_v) está geralmente na faixa de 2 a 10 para praias de depósitos formados por areias suficientemente uniformes e zonas de lamas depositadas abaixo d'água. O autor ressalta ainda que praias do depósito formado com zonas de transição entre áreas de areias relativamente limpas e lamas, são prováveis de ter alta razão de anisotropia devido ao inter-relacionamento entre partículas finas e grossas. Para depósitos de rejeitos onde os processos de descarga não são bem controlados, resultando em extenso inter-relacionamento areia-lama, K_h/K_v , a anisotropia pode atingir 100 ou mais, uma vez que esta variação deve-se à natureza das camadas.

5.2 PRINCIPAIS MÉTODOS CONSTRUTIVOS

Entre os métodos de construção e alteamento de barragens de contenção de rejeitos, podem ser destacados três tipos principais, denominados de método da linha de montante, da linha de jusante e da linha de centro. As denominações são em virtude do deslocamento que o eixo da barragem apresenta durante as etapas de alteamento. Estes três principais tipos de métodos construtivos e de operação de barragens de contenção de rejeitos são os mais adotados pelas empresas de mineração em suas minas. Como o tema principal do presente trabalho se refere ao método de alteamento pela linha de montante é mostrada a seguir a seqüência de um alteamento de barragem por este método (Figura 5). Conforme ilustrado, o alteamento da barragem de contenção de rejeitos consiste no deslocamento da

linha central da crista para montante em alteamentos sucessivos, a partir de uma barragem inicial de solo argiloso compactado (dique ou barragem de partida). Após a construção deste dique de partida, o rejeito é lançado a montante da crista sobre os rejeitos depositados, formando uma praia, a qual será base do material de construção do próximo alteamento. Assim, no alteamento da barragem, o dique subsequente ficará apoiado no topo do dique anterior e na praia de rejeito. Tal condição quando não bem executada pode gerar problemas de subpressão no reservatório causada pela variação da percolação de água ali armazenada. Excesso de subpressão poderá afetar a fundação do barramento, causando mudanças das condições geológico-geotécnicas definidas para o referido projeto, quando houver um projeto desenvolvido e em operação para aquela barragem.

Figura 5 – Alteamento pelo método da linha de montante (Vick,1983, modificado).

As principais características construtivas e de operação de barragens de contenção de rejeitos pelo método da linha de montante, assim como, a avaliação do comportamento do nível d'água neste tipo específico de barragem será detalhada em tópicos adiante.

Apresenta-se a seguir os demais métodos construtivos utilizados na mineração. As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, estes métodos de alteamento, denominados de métodos da linha de jusante e da linha de centro. Em comparação ao método da linha de montante, estes dois métodos construtivos proporcionam um fator de segurança estrutural e ambiental maior para o barramento, porém exige maior custo de investimento, estando presente principalmente nas minas de médias e grandes empresas de mineração. No entanto, a escolha de qualquer destes métodos de alteamento possibilita ao empreendedor controlar a percolação da água pelo barramento, por meio da instalação de drenos internos. A barragem apresentará também maior resistência ao cisalhamento, devido a melhor compactação dos rejeitos grossos (*underflow*) durante o alteamento.

Figura 6 – Seqüência de alteamento pelo método da linha de jusante (Vick, 1983, modificado).

Em linhas gerais no método da linha de jusante (Figura 6) os rejeitos são lançados e depositados a jusante do dique de partida (dique inicial), em etapas sucessivas de alteamentos onde a crista e talude a jusante da etapa anterior constituirão a fundação da barragem recém alteada, normalmente são compactados. Entre os principais métodos executados é reconhecido como o mais seguro, em virtude da possibilidade de impermeabilização do talude de montante da barragem, instalação de filtros e tapetes drenantes e construção de núcleos impermeáveis. A possibilidade de instalação de tais mecanismos de proteção evita a ruptura da barragem por liquefação e *piping*.

Quanto à construção de barragens de contenção de rejeitos, pelo método da linha de centro (Figura 7), o alteamento é executado com o lançamento e deposição dos rejeitos tanto a montante como a jusante do dique de partida construído com solo argiloso compactado.

Figura 7 – Sequência de alteamento pelo método da linha de centro (Vick, 1983, modificado)

No método da linha de centro o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos sucessivos alteamentos mantém-se na mesma posição. O lançamento dos rejeitos oriundos do *overflow* (finos) será no sentido da face de montante e os rejeitos grosseiros (*underflow*) no sentido da face de jusante. A separação de grãos finos dos grossos é por meio da instalação de hidrociclones na linha central (eixo) da barragem. O material que deixa o ciclone pela porção superior (*overflow*) fica com água incorporada e apresenta granulometria fina compondo a lama, no qual é lançada na praia. O método de linha de centro, assim como o método da linha de jusante, permite a instalação de filtros no corpo da barragem. O alteamento por este método busca correlacionar as vantagens construtivas existentes nos outros métodos descritos e minimizar suas desvantagens, embora seu comportamento estrutural se aproxime do método de jusante.

As características gerais e as respectivas vantagens e desvantagens encontradas nos diferentes métodos de construção e alteamento de barragens de contenção de rejeitos são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características gerais dos métodos de construção e suas respectivas vantagens e desvantagens (Soares, 1998).

	Método da Linha de Montante	Método da Linha de Jusante	Método da Linha de Centro
Características Gerais	<p>Método mais antigo e empregado na atualidade.</p> <p>Lançamento a partir da crista por <i>spigots</i> (as frações grossas se depositam junto ao corpo da barragem).</p> <p>Também podem ser usados hidrociclones.</p>	<p>Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé.</p> <p>Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones.</p> <p>Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante.</p>	<p>Variação do método de jusante.</p> <p>Uso de ciclone.</p>
Vantagens	<p>Menor custo</p> <p>Maior velocidade de alteamento.</p>	<p>Maior segurança</p> <p>Compactação de todo o corpo da barragem.</p>	<p>Variação do volume de <i>undreflow</i> em relação ao método de jusante.</p>
Desvantagens	<p>Maior probabilidade de instabilidade devido à presença de finos junto ao corpo de barragem.</p> <p>Baixa compacidade do material; possibilidade de liquefação e pipping.</p>	<p>Necessidade de grandes quantidades de underflow (problemas nas 1^{as} etapas).</p> <p>Deslocamento do talude de jusantes (proteção superficial só no final da construção).</p>	<p>Poderá ser necessário estender os trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.</p>

Na Tabela 5 são apresentadas as principais características das barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos, sob aspectos referentes ao tipo de rejeito recomendado, armazenamento de água, resistência sísmica, restrições e requisitos de alteamento e por fim, o custo da construção do corpo de aterro (dique de partida).

Tabela 5 - Características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos (Soares, 1998).

	Método da Linha de Montante	Método da Linha de Jusante	Método da Linha de Centro
Tipos de rejeito recomendado	Mais de 40% de areia. Baixa densidade de polpa para promover segregação	Qualquer tipo	Areia ou lama de baixa plasticidade
Armazenamento de água	Não recomendado para grandes volumes	Boa	Não recomendado para armazenamento permanente
Resistência sísmica	Pobre em áreas de alta sismicidade	Boa	Aceitável
Restrições de Alçamento	Recomendável menos de 5 a 10 m/ano	Nenhuma	Pouca
Requisitos de alçamento	Solo natural Rejeitos ou estéreis	Rejeitos ou estéreis	Rejeitos ou estéril
Custos relativos ao corpo do aterro	Baixo (V_m^*)	Alto ($3V_m$)	Moderado ($2V_m$)

V_m^* = volume da barragem alteada pelo método de montante

5.3 O MÉTODO CONSTRUTIVO DA LINHA DE MONTANTE

O método construtivo de barragens de contenção de rejeitos pela linha de montante é um método muito antigo e bastante utilizado nas minerações até os dias atuais e com o menor custo construtivo em comparação com os demais. O método apresenta vantagens em relação a menor movimentação e despesas com equipamentos de terraplenagem aliado ao menor prazo de execução do alçamento da barragem e o menor volume de material para execução do alçamento. Entretanto, com certeza a grande desvantagem do método da linha de montante é o baixo grau de segurança que este apresenta, com muitos acidentes já registrados neste tipo de barramento.

Relevando porém, que os parâmetros básicos de segurança nestas barragens muitas vezes não são executados, nem mesmo foram projetados para uma possível

detecção de processos causadores de acidentes, principalmente os de natureza geológico-geotécnica, como a liquefação e o *piping*.

O lançamento dos rejeitos poderá ser por meio de um único ponto, como mostrado na Figura 8(A), devendo as tubulações de transporte (rejeitodutos) serem desconectadas e relocadas intermitentemente para descarga da polpa, com vistas à formação sequencial de depósitos adjacentes. A Figura 8(B) retrata o mesmo princípio, mas o controle do lançamento da polpa é através da implantação de válvulas individuais (*spigots*) ao longo da tubulação. Neste contexto, Austrália (1995) propõe para casos onde os rejeitos possuem grande quantidade de sedimentos finos a fixação de um *spray* defloculante junto aos *spigots*, condição que poderá garantir a uniformidade da praia da barragem em grandes áreas de deposição. A deposição por meio de *spigots* permite um melhor processo de secagem ou dissecação do rejeito, produzindo alta densidade seca, baixa compressibilidade e maior resistência.

Figura 8 – Lançamento e deposição de rejeitos de mineração (Espósito, 1995, modificada).

Segundo Vick (1983), para que o material lançado sirva de base para um novo alteamento, é necessário que os rejeitos conttenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa para que assim ocorra a segregação granulométrica. No lançamento dos rejeitos no reservatório o importante será sua segregação granulométrica, sendo necessário para o sucesso do projeto, que a fração grosseira

(areias) fique depositada próximo ao barramento e as frações finas (silte e argila) fluam em direção ou sejam lançadas diretamente no lago de decantação.

A Figura 9 mostra uma seção esquemática do processo de alteamento de uma barragem de contenção de rejeitos pelo método da linha de montante. Nota-se a formação de um contato irregular entre as areias (*underflow*) e os sedimentos finos (*overflow*) do rejeito proporcionados pela deposição e segregação granulométrica no reservatório, a partir da descarga da polpa de rejeito. Parte do rejeito arenoso spigotado poderá ser removido e utilizado no alteamento e reforço do dique com o rejeito grosseiro.

Figura 9 – Alteamento de barragem de contenção de rejeitos pelo método da linha de montante (Klohn, 1981).

Um outro meio de se processar o alteamento pelo método de montante com o uso de *spigot* é mostrado na seção esquemática da Figura 10. Neste, os tubos do rejeitoduto estão conectados ao *spigot* que se encontram no topo de uma torre construída com altura e inclinação suficiente para promover a correta deposição e a sua segregação granulométrica da polpa de rejeito.

Figura 10 – Alteamento a montante de barragem de contenção de rejeitos por meio de *spigot*, com utilização de pranchas de madeira como suporte dos diques do talude de jusante (Klohn, 1981).

A separação dos sedimentos finos (*overflow*) e grossos (*underflow*) poderá ainda ser por meio de ciclones ou hidrociclones, devidamente instalados durante o processo de alteamento da barragem. A Figura 11 ilustra a construção de barragens de contenção de rejeitos pelo método de montante, com o uso de ciclones. Notar a separação das areias e dos sedimentos finos promovidos pelo uso do ciclone, com o respectivo lançamento do *underflow* a jusante e da porção composta pelo *overflow* a montante.

Figura 11 – Alteamento a montante de barragem de contenção de rejeito por meio de ciclones (Klohn, 1981).

Com a definição dos métodos de descarga e lançamento da polpa de rejeito no reservatório, a segregação do rejeito se torna um assunto de relevância para o sucesso da obra. Após a deposição da polpa ao longo da praia de sedimentação

dentro do reservatório, Arnez (2004) ressalta ser, uma característica importante das barragens de rejeitos, onde o comportamento da polpa em relação ao processo de segregação, dependerá do tipo de fluido, tipo e quantidade de aditivos químicos presentes no fluido, características dos rejeitos, concentração da polpa, distribuição granulométrica e condições de fluxo. A segregação apresenta efeito direto na distribuição granulométrica da barragem de rejeitos; o fluxo da polpa sujeita a processos de segregação provoca a seleção de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo da trajetória do fluxo, gerando uma variabilidade estrutural, alterando significativamente os parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade. O mecanismo de transporte pode ser considerado de carga de fundo, onde as partículas tendem a mover-se por saltação, rolagem, deslizamento e colisão em função das particularidades dos grãos (granulometria, densidade, forma e angulosidade).

É citado ainda que, durante a descarga da polpa de rejeitos, esta se distribui como uma lâmina que flui ao longo da praia com uma relação de sedimentação das partículas sólidas em função de suas características, depositando-se inicialmente as areias, seguida dos siltes grossos, médios, e, somente os siltes finos e argilas são transportados para mais longe do reservatório, onde sedimentam e deixam a superfície do lago de decantação com água reutilizável, podendo conter reagentes químicos. A sedimentação dos finos produz uma massa com material de baixa densidade e com uma estrutura muito frouxa (solta). Junto com o decréscimo do tamanho da partícula a partir do talude de montante da barragem, ocorre também a diminuição da permeabilidade. Este resultado tem o efeito de alterar o nível freático da barragem, com relação ao que teria acontecido se o material fosse de uma permeabilidade homogênea. Este efeito melhora e ajuda a explicar a estabilidade de algumas barragens construídas pelo método de montante.

Em geral, durante o alteamento da barragem, os sólidos produzem um depósito estratificado. O material granular depositado sob diferentes condições de fluxo desenvolverá estruturas bastantes distintas e conseqüentemente apresentará características geotécnicas diferentes. Entretanto, pela análise de cada mecanismo de deposição é possível relacionar o tipo de estrutura sedimentar formada e avaliar o seu comportamento geotécnico. Portanto, para ter controle do processo de

deposição e ter maior densidade no maciço, deve ser considerado o estabelecimento das condições de descarga apropriadas para produzir um fluxo que forme uma camada resistente para cada tipo de material a ser depositado (ARNEZ, 2004).

Sintetizando, verifica-se que a variabilidade do depósito está associada a diferentes fatores:

- externos: relativos às características do processo de deposição, tais como a velocidade de descarga, a vazão e concentração da lama, a altura e inclinação do “*spigot*” de lançamento;
- internos: relativos à mistura da polpa e determinados pelas características dos grãos, densidade e viscosidade do fluido;
- aqueles relacionados à interação entre as camadas e o processo de intercâmbio de sedimentos na camada superior que está em contato com o líquido (rearranjo de rejeitos), caracterizados pela forma do leito, concentração da polpa, camada do leito e os grãos da camada superficial, rugosidade e espessura da camada de intercâmbio.

Segundo Vick (1983), um outro aspecto importante e que afeta diretamente a segurança da obra, diz respeito à velocidade com que a barragem é alteada, que está condicionada às propriedades do rejeito. Uma velocidade de alteamento elevada não permitirá um adensamento adequado do material que irá compor o corpo da barragem. Neste contexto, Nieble (1986) sugere gradientes de elevação das barragens da ordem de 5 a 10 metros/ano.

Muitas das rupturas ocorridas em barragens construídas por este método são atribuídas à separação inadequada entre o lago de decantação e a crista. Deste modo, (Nieble, 1986) não recomenda o seu uso para armazenamento de água, uma vez que se torna difícil o controle do avanço dela sobre o talude da barragem durante os períodos de chuvas intensas e duradouras, devido à baixa inclinação do talude típico da praia formada.

Dentre os cuidados e adoção de medidas relacionadas ao método da linha de montante, visando a melhor segurança e desempenho neste da obra, são normalmente recomendados (SOARES, 1998):

- o lançamento dos rejeitos deve se dar no perímetro do lago, imediatamente a montante do talude do dique inicial e dos alteamentos subseqüentes;
- evitar retenções de água próximo à crista ou em áreas confinadas, através de um planejamento de lançamento de rejeitos e das manobras da tubulação de seu lançamento;
- os rejeitos devem ter fração arenosa drenante e serem lançados em uma concentração de sólidos que possibilite a segregação do material junto à crista da barragem;
- o nível d'água do reservatório deve ficar afastado da crista da barragem, adotando-se sistemas para esgotamento das águas de chuvas, e aquelas liberadas pela polpa;
- em áreas que ocorram vibrações, seja de origem tectônica (sismos naturais) ou motivada por escavações na mina ou ainda por passagem de veículos (sismos induzidos), recomenda-se que o alteamento por este método seja descartado;
- as barragens não deverão ter grande altura e a velocidade de alteamento fica condicionada às propriedades dos rejeitos, visto que a segurança da barragem depende da resistência mobilizável dos rejeitos que é condicionada pelas pressões neutras. Estas pressões estão relacionadas a velocidade de aumento das sobrecargas, devido a velocidade de alteamento da barragem, e a velocidade de dissipação das pressões neutras.

Em síntese, as principais características do método construtivo de barragens de contenção pela linha de montante e sua comparação com as barragens convencionais de armazenamento de água são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características de barragens convencionais e de contenção de rejeitos (Soares, 1998, modificado).

	Método Convencional	Método da Linha de Montante
Armazenamento de água	Boa	Não recomendado para grandes volumes
Resistência sísmica	Boa	Pobre em áreas de alta sismicidade
Restrições de alteamento	De uma só vez, ou em poucas etapas	Recomendável menos de 5 a 10 m/ano
Requisitos de alteamento	Materiais naturais e/ou estéril	Solo natural Rejeitos ou estéreis
Custos relativos ao corpo do aterro	Alto	Baixo

Em complemento à Tabela 6, os métodos de construção de barragens convencionais e de contenção de rejeitos são comparados na forma de seções esquemáticas e apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Comparação entre barragem de armazenamento de água convencional e barragem de contenção de rejeitos construída pelo método da linha de montante (Klohn, 1981).

5.3.1 Principais causas de acidentes

Segundo Barron (1986) apud Arnez (1999), ruptura de fundação, *overtopping*, *piping* e problemas ligados à percolação da água se constituem em importantes causas de ruptura. As propriedades geomecânicas que mais afetam a estabilidade das barragens de rejeito são a granulometria, densidade/compactação, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e o teor de umidade. Há que se considerar também as propriedades mineralógicas dos rejeitos, pois as mesmas influenciam no potencial de riscos.

Os acidentes em barragens de contenção de rejeitos podem ocorrer principalmente pelas causas apresentadas a seguir e provocados por rupturas devido a (ARNEZ, 1999):

- problemas nas fundações (inadequabilidade do local investigado, resistência ao cisalhamento, percolação d'água, *piping*, preparação de superfície de fundação, tratamento para aumento de resistência, sistemas de impermeabilização, sistemas de drenagem e filtros, fechamento ou preenchimento de furos de sondagens usados nas investigações executadas anteriormente, etc.);
- forças imprevistas (pressões hidrostáticas excessivas e a proveniente de acúmulo de lama, subpressão, sismos naturais e induzidos, variação de temperatura externa, etc.);
- manutenção (ausência de inspeção periódica, ausência de controle das infiltrações, deterioração da instrumentação, etc.);
- deterioração no reservatório. Embora seja dada muita ênfase às questões referentes à geologia e topografia da bacia de inundação nas várias fases do projeto, se encontram cadastrados no meio técnico casos referentes à deterioração de reservatórios originados por escorregamentos das encostas marginais, queda de blocos de rocha, permeabilidade elevada, deposição de lama e desequilíbrio ecológico.

Ainda conforme Arnez (1999), a avaliação estatística apresentada em seu trabalho sobre acidentes de barragens de rejeitos ocasionados por fatores geológico-geotécnicos, mostra o valor acumulado de classes de acidentes (Tabela 7).

Tabela 7 - Distribuição de freqüências segundo a causa do acidente (Arnez, 1999).

Causa do acidente	Nº de acidentes	Frequência relativa (%)	Nº de acidentes (acumulado)
Liquefação	21	46,7	21
Não Definida	13	28,9	34
<i>Piping</i>	11	24,4	45
Total	45	100	

Portanto, a maior causa para a ruptura de barragens de contenção de rejeitos é a liquefação numa porcentagem de 46,7%, seguida da ruptura da barragem por causas não definidas com porcentagem de 28,9% e a ocorrência do processo de *piping* com 24,4%. Deste modo, os processos de liquefação e *piping*, originados pela presença de líquidos não controlados durante as fases construtivas, de operação e de abandono da barragem, respondem por uma freqüência relativa de 71,1 %.

A água que percola pelo corpo da barragem deve ser drenada com máxima eficiência, pois, caso contrário, a pressão neutra poderá sobrevir, afetando toda a estabilidade dos taludes da mesma. A posição do lençol freático exerce influência fundamental no comportamento do maciço, interferindo na estabilidade estática e dinâmica da barragem. Por esta razão, o controle do lençol freático é de suma importância no projeto da barragem (VICK, 1983).

As causas de acidentes pelos fenômenos de liquefação e *piping*, segundo Azevedo & Albuquerque Filho (1998), têm sua origem relacionada diretamente às forças de percolação sobre o solo ou rocha. A água não estando confinada e ocorrendo qualquer alteração nas condições de contorno do nível freático, mudanças nas cargas hidráulicas irão causar fluxo e o escoamento estará sujeito então ao atrito entre o fluido e o meio. Este atrito será transmitido como força de percolação, na direção do fluxo. A força de percolação (F_p) é igual ao produto da perda de carga (Δh) pela densidade da água (γ_a) e a área de aplicação de força (A), ou seja:

$$F_p = \Delta h \cdot \gamma_a \cdot A \quad (1)$$

Por unidade de volume, a força de percolação é expressa por:

$$F_p = i \gamma_a \quad (2)$$

onde:

i = gradiente hidráulico

Segundo Soares (1998), o tratamento do talude de jusante contra erosões provocadas pela ação de chuvas, à medida que a barragem vai sendo alteada, deverá compreender a condução das águas por meio de canaletas e caixas de passagem e ainda proteção superficial do talude com cobertura vegetal. O monitoramento da obra deve ser feito durante todo o período de alteamento, continuando na fase de desativação (reintegração ambiental).

5.3.1.1 Liquefação

Segundo Azevedo & Albuquerque Filho (1998), o processo de liquefação diz respeito à perda total ou parcial da resistência de um solo em virtude da perda de peso, devido às pressões geradas por um fluxo ascendente de água. Quando as forças de percolação, agindo verticalmente de baixo para cima, tornam-se iguais ao peso submerso do solo, as tensões efetivas no mesmo reduzem-se a zero. Como consequência ocorre a liquefação, perda de coesão do solo e sua capacidade de suporte são reduzidas a zero.

Ainda, segundo Azevedo & Albuquerque Filho (op.cit), o gradiente hidráulico crítico, para que ocorra a perda de resistência do solo, é expresso por:

$$i_c = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_a}{\gamma_a} \quad (3)$$

onde:

i_c : gradiente hidráulico crítico

γ_{sat} : massa específica aparente do solo saturado

γ_a : densidade da água

Tognon (1985), define a liquefação como sendo a repentina redução na resistência ao cisalhamento de um solo devido a um acréscimo rápido da pressão intersticial. Fenômeno geralmente ligado a solicitações dinâmicas em solos granulares, podendo ocorrer também em argilas muito sensíveis.

Outro aspecto colaborador no desencadeamento do fenômeno da liquefação se refere às vibrações por desmontes de minérios, movimentações de equipamentos, bem como tremores causados por abalos sísmicos. A barragem poderá sofrer adensamento ao ser vibrada, causando subpressão e, como consequência, uma reação vertical contribuirá para a redução das tensões de cisalhamento e o rejeito depositado poderá se liquefazer. Neste sentido, cabe ressaltar que durante o alteamento da barragem, conforme a velocidade na qual é processada, a liquefação poderá se desenvolver também, em virtude da interferência sobre o tempo mínimo necessário para a dissipação das pressões neutras contidas na polpa de rejeitos lançados e em processo de deposição.

5.3.1.2 *Piping* (erosão interna regressiva)

Em conformidade com Azevedo & Albuquerque Filho (1998), os fenômenos de erosão interna (*piping*) correspondem a um tipo de ruptura hidráulica da barragem causada pelas forças de percolação da água. Nos locais de descarga em que o gradiente atinge o valor crítico e condições semelhantes às da liquefação são atingidas, partículas do solo podem ser arrastadas. Desta forma permite a abertura de pequenos orifícios, pelos quais o fluxo passa a se concentrar, promovendo o carreamento do material, criando assim pequena cavidade. Esta pequena cavidade acaba concentrando ainda mais o fluxo subterrâneo e, por consequência, levando a um incremento no gradiente hidráulico, num processo cíclico de ação e reação.

Segundo Tognon (1985), *piping* é o movimento de partículas de uma massa de solo carregadas por percolação d'água, sendo que o fenômeno é iniciado sob condições de gradiente hidráulico crítico e provoca a abertura progressiva de canais dentro da massa de solo em sentido contrário ao do fluxo d'água; é a razão pela qual o

fenômeno é também conhecido pelo nome de erosão regressiva.

Segundo Vargas (1977) apud Arnes (1999), para prevenir a erosão regressiva subterrânea dos solos erodíveis, será necessário que eles sejam impedidos de ter superfícies de saída de água expostas ao ar, ou em contato com sólido poroso ou com aberturas que permitam a passagem dos seus grãos. Assim, qualquer superfície onde haja emergência d'água deverá ser recoberta com uma camada filtrante (na maioria dos casos de areia) ou tapete de drenagem que sirva a essa finalidade, deixando passar a água, porém, impedindo a passagem dos grãos do solo.

5.3.2 Características do nível freático

A avaliação constante do nível freático no método de alteamento da linha de montante é de extrema importância para o desenvolvimento e segurança da obra, pois é sabido que este método é o mais inseguro entre os métodos existentes. As variações do nível freático no reservatório e a percolação não disciplinada da água pelo barramento podem gerar risco de ruptura do talude de jusante da barragem, conforme apresentado na Figura 13 (A, B e C).

A Figura 13(A), ilustra o risco e o menor coeficiente de segurança que as barragens de contenção de rejeitos alteadas a montante apresentam, em virtude da linha freática geralmente se situar muito próximo ao talude de jusante. Na Figura 13(B) o barramento apresentará risco estrutural quando a superfície crítica de ruptura passar por um depósito de rejeitos não devidamente adensado e compactado. A Figura 13(C) mostra a possibilidade da instalação de processos erosivos no interior do corpo da barragem, com ocorrência de *piping*, devido ao surgimento de água na superfície do talude de jusante, principalmente quando ocorre concentração de fluxo de água entre dois diques compactados.

Figura 13 – Riscos de ruptura em barragens construídas à montante (Nieble, 1986 apud Soares, 1998).

Deste modo, os conceitos de rede de fluxo em barragens são determinantes para conservação das condições estruturais pré-estabelecidas para o projeto. As redes de fluxo são compostas pelas linhas de fluxo e linhas equipotenciais, indicadas na Figura 14. Segundo Estados Unidos (1994), o comportamento da rede de fluxo de uma barragem será determinante para a segurança da obra. Processos de erosão interna regressiva (*piping*) poderão se desenvolver por exemplo, quando a superfície freática estiver elevada e o nível do reservatório estiver muito próximo da crista da barragem. O processo poderá ser acelerado caso o ponto de descarga dos rejeitos da mineração por meio de *spigots* ou ciclones estejam mal dimensionados e distribuídos.

Figura 14 – Rede de fluxo em barragens de contenção de rejeitos à montante (Estados Unidos, 1994).

Quanto aos estudos de permeabilidade e redes de fluxo, Cruz (1996) ressalta que, em projetos de barragens o controle de fluxo pelo maciço, fundação e ombreiras constitui um dos requisitos fundamentais à segurança da obra. Analisando-se qualquer estatística de acidentes e rupturas de barragens a causa majoritária é em geral atribuída a falta de um sistema eficiente de controle de fluxo

Neste contexto, os problemas de fluxo constituir-se-ão por duas famílias de curvas ortogonais entre si, denominadas linhas de fluxo e linhas equipotenciais, onde o fluxo poderá ser definido em confinado ou não confinado. Quanto às condições de contorno em estudos de redes de fluxo, alguns princípios básicos são citados:

- superfície impermeável: quando há uma diferença significativa entre os valores de permeabilidade entre dois meios distintos, o meio menos permeável atuará como uma camada impermeável e o fluxo será estabelecido integralmente no meio mais permeável. Portanto, as linhas equipotenciais são perpendiculares à superfície impermeável;
- superfície em contato com o líquido: em todos os pontos a carga total é constante, portanto a superfície em contato com o líquido é uma equipotencial, logo, linhas de fluxo são perpendiculares a esta superfície;
- linha freática: é a fronteira superior da região de fluxo não confinado. Ao longo da linha freática a carga piezométrica é nula (somente atua a carga de elevação). Como a freática é uma linha de fluxo, as equipotenciais são perpendiculares a ela;

- superfície livre de fluxo: toda vez em que carga total variar linearmente com a altura não teremos uma equipotencial, por outro lado, estaremos definindo uma superfície livre de fluxo, ponto para o qual se dirigem os canais de fluxo;

Como consequência, as redes de fluxo influem diretamente no comportamento da barragem e alguns aspectos peculiares provenientes do alteamento de barragens a montante podem causar uma instabilização estrutural destas obras. A instabilização poderá ocorrer através da instalação de processos erosivos de *piping*, apresentado nas seções esquemáticas da Figura 15 (A, B e C).

Na Figura 15(A) a estabilidade destas obras será ditada pelo avanço do lago de decantação, pois este avanço poderá elevar a superfície do nível freático no corpo da barragem, fazendo com que surja água em partes altas no talude de jusante da barragem e possibilite o estabelecimento do processo de *piping*. A Figura 15(B), ilustra as praias com baixa segregação dos rejeitos lançados que apresentam normalmente baixa permeabilidade, ocasionando a elevação do nível freático no corpo da barragem, podendo neste caso, também ocorrer *piping*, devido a surgência d' água no talude de jusante da barragem. E por fim, há ainda a possibilidade da formação de *piping*, conforme mostrado na Figura 15(C), quando as fundações da barragem são impermeáveis, o que obriga a passagem da água apenas pelo corpo do barramento, causando a elevação do nível freático e podendo provocar o surgimento de água no talude de jusante por erosão interna.

Figura 15 - Posicionamento do nível freático em função de características do projeto (Nieble, 1986 apud Soares, 1998)

Outros fatores de influência na ruptura de barragens de contenção de rejeitos à montante, interligada ao processo de lançamento e segregação do rejeito na praia de deposição, são apresentados na Figura 16 (A, B e C), segundo Austrália (1995). Na Figura 16(A) ocorre uma boa segregação dos rejeitos na praia, porém com a diminuição da permeabilidade com a profundidade o nível da água próximo ao talude de jusante poderia influenciar no desencadeamento de processos erosivos. Já a Figura 16(B) ilustra o efeito da presença de camadas argilosas formadas pela deposição de rejeitos muito finos favorecendo a formação de superfícies piezométricas empoleiradas, alterando o padrão da rede de fluxo desejado ao projeto. Neste caso pode formar o *piping* a partir da surgência de água no talude de jusante nas camadas mais permeáveis. A Figura 16(C), mostra os efeitos produzidos na superfície freática com a instalação de drenos horizontais internos que disciplinam o fluxo de percolação em relação ao ponto de descarga, aumentando a segurança da obra ao preservar os parâmetros geotécnicos previstos no projeto do barramento e principalmente seu talude de jusante .

Figura 16 – Fatores influenciadores na localização da superfície freática em barragens construídas pelo método de montante (Austrália, 1995).

5.4 ASPECTOS TÉCNICOS NA CONCEPÇÃO DE UM PROJETO

Os fatores que irão determinar a escolha do local de implantação de uma barragem de contenção de rejeitos são bem diferentes daqueles que implicam na escolha do local de uma barragem convencional.

Conforme apresentado em Soares (1998), para projetos de barragens de contenção de rejeitos de mineração, são considerados principalmente os seguintes fatores:

- maior relação entre o volume de reservatório e o volume do aterro da barragem (menor custo/benefício);
- menor área da bacia de drenagem, tendo em vista que ocorre menor aporte de sedimentos e água, e ainda objetivando a construção de vertedouro de menor porte, ou mesmo sua eliminação;

- menor interferência do reservatório junto à comunidade local, obtendo-se assim menores custos com relocações e desapropriações;
- menor distância possível da planta de beneficiamento o que resulta em menor comprimento das linhas de condução dos rejeitos e de retomo d' água;
- menor distância possível da área da mina, ou de áreas de empréstimo, o que possibilita de forma mais econômica a utilização do estéril ou de materiais adequados à construção da barragem inicial.

Soares (1998) apresenta também alguns fatores que levam a problemas construtivos e operacionais nas barragens de contenção de rejeitos de mineração, conforme citados a seguir:

- mudanças de balanço de água das operações de beneficiamento, resultando em mais, ou menos água no reservatório;
- mudanças na composição granulométrica do material beneficiado, o que produz mudanças na quantidade de areias disponíveis para a construção da barragem;
- mudanças no tamanho da jazida e/ou aumento da capacidade de operação do beneficiamento. Tal fato irá resultar na produção de maiores volumes de rejeitos numa velocidade maior, sendo portanto necessário aumentar a velocidade de alteamento da barragem;
- problemas imprevistos com os ciclones, como alto teor da fração argilosa nos rejeitos e baixa recuperação de areia no *underflow* necessitando o uso de ciclones em duas etapas;
- fechamento inesperado e prolongado das operações de beneficiamento, durante o qual o nível do reservatório continua a subir devido ao escoamento superficial;
- condições climáticas adversas.

Um fluxograma sintético das principais atividades que devem ser conduzidas na concepção e projeto de barragens de contenção de rejeitos é apresentado a seguir (Figura 17).

Figura 17 – Fluxograma das atividades voltadas a concepção e projeto de barragens de contenção de rejeitos (Gregório Filho & Nieble, 1986 apud Soares, 1998).

É fundamental ter como premissa em um projeto que a construção de uma barragem de contenção de rejeitos deverá ser a mais econômica e segura possível, independente do local da implantação da obra e de todas as condições ambientais de seu entorno. Neste contexto, Soares (1998) apresenta alguns fatores econômicos e de segurança na concepção básica de um projeto deste tipo, conforme descritos abaixo:

a) Fatores econômicos:

- a barragem deverá se localizar o mais próximo possível da área de beneficiamento;

- sempre que possível a barragem deverá estar situada a um nível mais baixo da planta de beneficiamento, de forma que as necessidades energéticas sejam mínimas;
- que a barragem para contenção dos rejeitos necessite do menor volume de material de construção possível;
- que a água possa ser recuperada facilmente.

b) Fatores de segurança:

- que o lago de decantação onde serão lançadas as lamas esteja localizado o mais longe possível da barragem;
- que a água possa ser removida do reservatório, para minimizar a saturação dos rejeitos, melhorando assim sua estabilidade;
- que as fundações apresentem resistência, compressibilidade e permeabilidade condizentes com as boas técnicas construtivas;
- que a barragem seja construída com materiais adequados colocados em áreas adequadas;
- que os materiais menos resistentes e mais compressíveis sejam mantidos o mais longe possível da barragem;
- que os taludes da barragem sejam os mais seguros possíveis, dentro das características de altura, do nível d'água e dos materiais disponíveis;
- que não haja consequência séria, principalmente ao ser humano, devido a ocorrência de ruptura total ou parcial.

5.4.1 Levantamento topográfico

Toda a área de implantação da barragem de contenção de rejeitos de mineração

deverá ser levantada a partir de mapas topográficos em escala adequada, incluindo seu reservatório e os locais de possíveis áreas de empréstimo. A topografia do terreno condiciona a capacidade de armazenamento, forma do reservatório, altura e comprimento da barragem, bem como determina a área da bacia de captação e portanto o volume de influxo d'água ao reservatório por escoamento superficial. Como produto destas atividades, nesta etapa devem ser geradas (SOARES 1998):

- plantas com indicação da área da barragem e reservatório;
- seções transversais e longitudinais às principais estruturas: barragens, vertedores, extravasores, posição dos rejeitodutos, linhas de retorno d'água, etc.;
- detalhes das principais obras civis: barragens, galerias, posição dos extravasores, torres de tomada d'água, etc.;
- localização de áreas de empréstimo.

5.4.2 Qualidade das fundações

No que se refere à qualidade da fundação, as permeáveis e com resistência à deformação por esforços e/ou à liquefação, além da capacidade de suportar prováveis abalos sísmicos são preferidas. Sua real condição deverá ser comprovada por meio de investigações e ensaios geológico-geotécnicos do terreno no local da obra, em consonância com o projeto executivo. Nos locais onde as condições expostas pelas fundações podem leva-la a um movimento rápido (por exemplo, centímetros por dia ou mais rápido) sendo incapazes de amortecer pequenos esforços, a construção de uma barragem de contenção de rejeitos pelo método de linha de montante não é recomendado. Uma barragem de contenção de rejeitos alteada a montante, requer uma boa fundação, de preferência bem drenada e com um adequado padrão de comportamento.

5.4.3 Condicionantes geotécnicos

Coates e Yu (1977) apud Espósito (1995), citam alguns fatores que requerem investigação para a estabilidade das barragens de rejeitos:

- degradação do material do rejeito, resultando numa perda de resistência ao cisalhamento;
- efeito da drenagem na barragem;
- nível freático na barragem;
- material incompetente na fundação da barragem;
- densidade *in situ*.

Nas investigações, referentes a estes fatores e aos efeitos que os mesmos provocam na estabilidade da barragem, deve-se incluir:

- sondagens e amostragem;
- performance de rejeitos similares;
- ensaios de aceleração de degradação do rejeito;
- monitoramento contínuo da barragem, através de leituras piezométricas;
- medidas de deformação;
- medidas de densidade *in situ*;
- registros fotográficos em intervalos de tempo regulares para atestar quaisquer mudanças.

5.4.4 Possibilidade de eventos tectônicos

O estudo e conhecimento da geotectônica regional, com a possibilidade da ocorrência de atividades sísmicas no local definido para construção de uma barragem de contenção de rejeitos, é extremamente importante quando o método construtivo escolhido é o de linha de montante. Acidentes relacionados a atividades sísmicas são a causa de aproximadamente um quarto dos acidentes registrados, conforme apontam estudos (Tabela 7). Muitas vezes estes acidentes são

promovidos por atividades sísmicas que desencadeiam o processo de liquefação do corpo da barragem.

5.4.5 Condições climáticas

As barragens de contenção de rejeitos, construídas pelo método de montante, apresentarão melhores condições técnicas em locais de clima árido. Neste tipo de clima torna-se possível construir uma praia de deposição de rejeitos mais extensa, favorecendo a permanência do nível d'água mais distante em relação à crista da barragem, aumentando deste modo sua segurança estrutural e ambiental. Outro aspecto que favorece a construção deste tipo de obra, se deve ao fato do menor regime pluviométrico típico das regiões de clima árido. Com a variação do nível d'água menor dentro do reservatório será menor também a variação da poropressão. Como consequência, com a menor variação da pressão piezométrica no reservatório, as condições das fundações e da segurança estrutural apresentarão menor risco de serem comprometidas.

5.4.6 Considerações geoquímicas

Os aspectos geoquímicos são de extrema importância na seleção do tipo de barragem de contenção de rejeitos e para definição dos métodos e critérios de operação da barragem. Seu conhecimento proporciona impedir, ou até mesmo minimizar, o impacto à qualidade da água que sai a jusante do barramento. A percolação da água sobre o rejeito depositado pela mina poderá com o tempo interferir em sua qualidade, principalmente quando se encontram nestes rejeitos metais pesados e/ou minerais com sulfeto. Impactos poderão acontecer tanto por um acidente com a barragem, por meio de uma ruptura, como pela percolação da água pelo barramento carreando contaminantes em solução diretamente para a drenagem a jusante da barragem.

Neste contexto, podemos afirmar que a questão mais importante a ser analisada em projetos de barragem de contenção de rejeitos, principalmente pelo método de montante, é o rejeito conter potenciais contaminantes das águas. A questão relevante é como fazer que permaneçam dentro do reservatório. Assim, o projeto básico destas barragens poderá muitas vezes ser insatisfatório e deverá sofrer modificações em suas características originais. Portanto, a viabilidade do projeto sob o ponto de vista dos condicionantes geoquímicos será a instalação de um sistema permanente de captação e tratamento da água, localizado imediatamente a jusante da barragem.

Outro tema de importância relacionado aos condicionantes geoquímicos em barragens convencionais e de contenção de rejeitos de mineração está no controle de materiais sólidos carregados pelas águas de drenagem. Tal fato pode influenciar no desenvolvimento de erosão interna (*piping*). Para Silveira (2006), a determinação do teor de sólidos em suspensão nas águas de drenagem, particularmente nos locais onde ocorrem solos suscetíveis ao carregamento de partícula ou nos locais com altas infiltrações, tem por objetivo a avaliação do arraste de partículas sólidas do aterro pelas águas de drenagem e como o fenômeno evolui ao longo do tempo. Amostras de água devem ser coletadas para a determinação do teor de sólidos em suspensão e em dissolução (sólidos totais).

5.4.7 Hidrogeologia e passivo ambiental

Em relação às águas superficiais (SOARES, 1998) recomenda para barragens que interceptarão um curso natural de água, cortando um vale, deverão ser capazes de armazenar o escoamento superficial de toda a área de captação, ou alternativamente possuir obras de desvio do escoamento superficial para que as águas passem ao redor ou sob a barragem. Os aspectos hidrológicos e hidrométricos, face sua importância na operacionalidade e segurança da barragem deverão ser estudados por especialista desta área. Preliminarmente, quando não existirem dados fluviométricos da região, a título de conhecimento, poderão ser feitas avaliações das vazões dos cursos d' água que interferirão na obra.

Quando estas obras destinam-se a retenção de rejeitos cujo efluente possui componentes poluentes solúveis, dois novos fatores devem ser considerados: a poluição do lençol freático por infiltrações e a poluição dos cursos d'água devido a lançamento das águas através de seu vertedouro. Ambos os casos citados são sérios agentes geradores de um passivo ambiental nas águas e, conseqüentemente, nos solos em torno da obra onde o aquífero percola.

Para o caso de escoamento da água através do vertedouro e existindo a possibilidade de contaminação do curso d'água a jusante justifica-se a construção de canais de captação de águas no entorno da barragem de contenção de rejeito, com a finalidade de receber as águas de chuva proveniente das encostas e conduzi-las para jusante sem que entrem em contato com os rejeitos.

Quanto ao possível problema de poluição à jusante, causada por percolação pelo corpo da barragem deve ser investigado através de instalação de estações de coleta de amostras de água tanto superficial, como subterrânea. Este material deve ser analisado quanto ao pH, composição química e composição dos sólidos em suspensão. Para que se tenha o parâmetro de comparação da qualidade da água com suas respectivas variações sugere-se que a coleta seja iniciada antes mesmo da operação da mina. Com o tempo o impacto na qualidade da água poderá surgir devido a percolação da água sobre o rejeito depositado e com íons metálicos podendo ser carregados em solução, quando principalmente se encontram nestes rejeitos metais pesados e/ou minerais com sulfeto, como a pirita.

Para Parsons (1981), os estudos de hidrogeologia deverão incluir a definição de todos aquíferos e aquíclides presentes no local da obra e suas pressões piezométricas e condutividades hidráulicas. Deverá também determinar a profundidade do topo rochoso, a presença de camadas sedimentares não consolidadas e o sistema de fluxo da água subterrânea local e regional, além de ensaios *in situ* necessários para caracterizá-los.

5.4.8 Critérios operacionais

Para o sucesso de um projeto de barragem de contenção de rejeitos, construída pelo método de montante, será obrigatório por parte do empreendedor seguir os critérios operacionais definidos no projeto executivo. Desde a construção da barragem de partida, seus consecutivos alteamentos e por fim na fase de desativação, os critérios de operação estabelecidos para cada uma destas fases deverão ser cumpridos e executados integralmente pelo empreendedor mineiro.

Quando não ocorre uma satisfatória condução dos critérios de operação em um barramento de rejeitos, problemas estruturais poderão aparecer com o tempo e muitas vezes se tornarem irreversíveis. O empreendedor que estabelece critérios operacionais diferentes daquele definido no projeto geotécnico da obra ou, simplesmente ignora alguns princípios básicos de parte do projeto, visando facilitar certas operações do seu cotidiano, certamente terá problemas em sua barragem. Se tal atitude for adotada pelo empreendedor em sua barragem de contenção de rejeitos, principalmente nas alteadas pelo método da linha de montante, a mesma estará provida de grande chance de apresentar falhas e até se romper.

Portanto, os requisitos básicos de segurança estrutural exigido no projeto geotécnico e os critérios operacionais adotados na barragem deverão ser compatíveis e colocados em prática diariamente.

5.4.9 Instrumentação e monitoramento

A instrumentação básica para acompanhar a performance da barragem de rejeitos geralmente inclui: piezômetros, para determinação dos níveis d'água e poropressão no corpo da barragem e suas fundações; equipamentos para medir velocidade de assentamento dos finos no reservatório, e dos materiais grosseiros no corpo da barragem e coletores de água para determinar as vazões que se processam pelo corpo da barragem (SOARES, 1998).

Para Soares (1998), as medidas devem ser executadas e registradas com frequência compatível com as variações observadas e serem base para a eventual tomada de medidas corretivas. Deve-se realizar sistematicamente o registro de qualquer mudança nos procedimentos de construção ou nas características da disposição dos rejeitos que possam vir a afetar a estabilidade das estruturas construídas ou em construção. As medidas devem constituir-se em base para a elaboração de gráficos, devendo os resultados serem avaliados periodicamente, para que possam indicar a necessidade de eventuais medidas corretivas.

Mais do que em qualquer outro método construtivo de barragem de contenção de rejeitos, no método de montante o monitoramento constante por meio da instrumentação é extremamente importante. Além do monitoramento detalhado, necessita-se ainda uma constante avaliação do sistema e do programa de monitoramento, analisando sua performance e avaliando se as condições apresentadas estão sendo satisfatórias. Neste contexto, os projetos de construção de barragens de contenção de rejeitos devem ser criados também para facilitar o processo de monitoramento. Um projeto construtivo bem elaborado, servirá como o primeiro passo para o monitoramento da barragem, devendo fornecer condições suficientes para o projetista avaliar a eficiência da instrumentação instalada e ajustá-la quando necessário.

5.4.10 Aspectos legais e normas técnicas

Quanto aos aspectos legais e relativos a normas técnicas, a NBR 13028, ABNT (1993), tem como objetivo fixar as condições exigíveis para elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração, visando a atender as condições de segurança, higiene, operacionalidade, economia, abandono e minimização dos impactos ao meio ambiente, dentro dos padrões legais. Em seu item A-7, a Norma Brasileira NBR 13028 refere-se ao monitoramento das barragens de contenção de rejeitos, onde são apresentados o sistema de instrumentação previsto e o programa de

monitoramento a ser implementado durante a vida útil do barramento. Neste mesmo item, são descritas ainda algumas ações a serem tomadas quando do surgimento de eventuais situações que possam pôr em risco segurança ou operacionalidade do barramento.

Neste contexto a Norma Brasileira citada fixou condições ao sistema de instrumentação a ser apresentado no plano de monitoramento da obra, conforme descrito a seguir:

- devem ser assinalados os tipos, quantidade, periodicidade dos ensaios e leituras a serem realizados, assim como a metodologia de coleta de amostras;
- no caso dos instrumentos a serem instalados devem ser fornecidos os objetivos, informações e justificativas da escolha de cada um dos instrumentos;
- deve ser elaborado, periodicamente, laudo de inspeção do barramento, contendo os dados básicos, observações, gráficos de acompanhamento das leituras dos instrumentos, diagnósticos do comportamento e recomendações;
- no caso de ações de emergência, devem ser apresentados os métodos emergenciais de rebaixamento do nível d'água do reservatório, os mapas de inundação para condições catastróficas no caso de ruptura da barragem e os métodos para evitar ou minimizar a contaminação, por fluido tóxico, dos cursos d'água a jusante, devido a eventual falha dos dispositivos de neutralização e ou extravasamento de cheias extraordinárias.

A partir do texto publicado pelo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (1986), denominado “Segurança de Barragens – Recomendações para a Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos”, foram adaptadas as recomendações mais relevantes para segurança de barragens de contenção de rejeitos, no qual o aspecto da instrumentação está relacionado. As principais recomendações referentes à instrumentação para adequação do projeto são apresentadas a seguir (ARNEZ, 1999):

- verificar se na interpretação dos resultados de investigação e ensaios, tanto de campo quanto de laboratório, foi levado em consideração o fato de que estes

resultados sempre refletem as características específicas de um determinado lugar ou se referem apenas a amostras;

- verificar a origem, suficiência e qualidade dos dados disponíveis, dando ênfase às marcas, avaliações e compatibilidade das cheias ocorridas na bacia hidrográfica;
- verificar a compatibilidade entre a profundidade e extensão das investigações de campo, os ensaios de laboratório, o nível de análise dos dados, as características geológicas das fundações, as dimensões e a importância das estruturas, e o vulto e as características das escavações;
- verificar se o projeto trata adequadamente dos sistemas de detecção, de condução, de medição e de descarga das percolações através do maciço, das fundações e das ombreiras;
- certificar-se de que o esquema de instrumentação abranja os itens essenciais e os locais mais significativos, para observar o comportamento e a operação segura da barragem;
- certificar-se de que a leitura dos instrumentos essenciais para a segurança da barragem e o manuseio e processamento dos dados correspondentes sejam especificados como prioritários, em relação a quaisquer outros instrumentos de observação porventura instalados;
- verificar a possibilidade de instruções detalhadas de instalação e operação, e certificar-se de que o esquema de instrumentação e o programa de monitoramento sejam compatíveis com o grau de instrução, da capacidade e dos costumes do pessoal que operará o mesmo;
- verificar a possibilidade de consertar ou substituir instrumentos defeituosos. Além da acessibilidade dos locais de leitura dos instrumentos e a sua proteção contra intempéries, danos e o acesso de pessoas não autorizadas.

6 PROPOSTA DE INSTRUMENTAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA NO SISTEMA BARRAGEM-RESERVATÓRIO

A partir dos dados da instrumentação do nível da água para o monitoramento de sua percolação ao longo da barragem de contenção de rejeito, é possível a aquisição de informações confiáveis para avaliação do seu comportamento em todas as fases de operação e desativação. A correta instrumentação da poropressão atuante no reservatório das barragens de contenção de rejeitos constitui-se num parâmetro de segurança estrutural e ambiental indispensável em qualquer estágio de seu desenvolvimento. A monitoração do lençol freático, da vazão dos drenos a jusante, da precipitação pluviométrica na bacia, do nível d'água do reservatório e deslocamentos horizontais, quando bem executada, auxilia na previsão do comportamento da barragem de rejeito, podendo ser considerado como um método de monitoramento estrutural e ambiental eficaz e econômico.

A Figura 18, apresenta um esquema genérico das formas de entrada e saída d'água do reservatório.

Figura 18 - Principais formas de entrada e saída d'água em reservatórios (Soares,1998, adaptado).

Soares (1998) assinala que, as águas que alcançam o reservatório, sejam aquelas lançadas junto com os rejeitos, ou através de precipitação pluviométrica, ou ainda resultante do escoamento superficial, podem ser total ou parcialmente armazenadas no próprio reservatório, para utilização nos processos de beneficiamento, ou serem

retiradas de forma segura. Parte do volume das águas que adentra ao reservatório é perdido através da percolação pelo próprio corpo da barragem e/ou suas fundações, e ainda devido ao processo de evaporação. As águas que adentram ao reservatório poderão ser retiradas por um sistema extravasor considerado um elemento de segurança, devendo portanto ser utilizado apenas em condições excepcionais. Como as obras que compõem o sistema extravasor são caras, a escolha do sistema deve recair sobre aquele que se adapte às dimensões da barragem e reservatório, e às situações emergenciais, e em função dos progressivos alteamentos durante a vida útil do barramento.

As diferentes formas de entrada e saída da água no sistema barragem-reservatório influenciam na variação do nível estático da água dentro do sistema. A instrumentação do nível d'água requer a aplicação de uma metodologia que consiga adicionar um programa eficiente de monitoramento da variação do nível d'água, principalmente quando a barragem não possui drenagem interna. Uma proposta de instrumentação do sistema barragem-reservatório deverá incluir ao menos parâmetros básicos para avaliação do comportamento do nível d'água no sistema em conjunto com os eventuais registros de deslocamentos horizontais.

Portanto, os principais dados a serem adquiridos por instrumentação básica devem conter: piezometria, vazão de jusante, pluviometria, nível d'água do reservatório e marco topográfico superficial. Tais informações promoverão significativo aumento na segurança da obra, pois permitem a análise de seu comportamento e a adoção de medidas corretivas, a serem definidas pelo consultor do projeto, quando os valores estabelecidos no projeto executivo estiverem próximos do real obtido. Os parâmetros citados e suas principais características como dispositivos de medição são descritos adiante.

6.1 PIEZOMETRIA

A instrumentação piezométrica proposta contempla apenas o uso de piezômetros tradicionais, como o piezômetro de tubo aberto (*standpipe*), do tipo Casagrande e

medidores simples do nível estático da água. Antes da exposição dos referidos tipos de piezômetros, alguns conceitos acerca dos instrumentos e sua finalidade são apresentados. Silveira (1979), define o piezômetro como um instrumento para medição da pressão da água intersticial em maciços rochosos e de terra.

O nível da água subterrâneo (nível freático) é definido como a superfície superior de um lençol de água subterrânea, no qual a pressão reinante é a atmosférica. A segurança ambiental é controlada principalmente pelo monitoramento de variações da percolação da água subterrânea, portanto as medidas de variações das alturas piezométricas refletirão mudanças do regime da água subterrânea na barragem de contenção de rejeito.

Para a aplicação e avaliação da instrumentação piezométrica é importante esclarecer primeiramente a diferença entre poropressão e nível freático, no qual é mostrada na Figura 19.

Figura 19 - Nível freático quando não há fluxo d'água subterrânea (Dunnicliff, 1993).

Conforme mostrado na Figura 19, três tubos perfurados perto da base e instalados em um solo (no caso areia e argila), no qual não ocorre fluxo d'água subterrânea no terreno. Com tal condição de equilíbrio, o nível d'água dentro do tubo subirá até o nível freático, independente da localização da perfuração (SILVEIRA, 2006).

Quando se deseja medir a pressão intersticial da água em mais de uma elevação um conjunto de piezômetros do tipo multinível pode ser instalado, conforme esquema mostrado na Figura 20.

Figura 20 – (A) Piezômetro simples; (B) Piezômetro multinível (Parsons, 1981).

Hanna (1985), cita que, na seleção de um piezômetro é essencial que a permeabilidade do solo seja considerada se as poropressões daquele solo estão sendo registradas com um mínimo intervalo de tempo de resposta (*time lag*). A instalação de qualquer sistema de piezometria e do tipo de piezômetro, basicamente requer:

- (i) o registro da poropressão no terreno, se positiva ou negativa, na localização dos piezômetros. Os erros na leitura devem permanecer dentro dos limites conhecidos e tolerados.
- (ii) que não aconteça erro na leitura, independente do princípio de captação da pressão no terreno. Isto é particularmente importante em relação aos transdutores de pressão, cujo zero ou calibração pode mudar com o tempo.
- (iii) adoção de um tipo de piezômetro que cause o mínimo de interferência no solo natural a ser instalado.

(iv) que o piezômetro deva responder rapidamente a mudanças nas condições da água subterrânea.

(v) que o piezômetro seja resistente e confiável quanto à interferência no meio ambiente e permaneça estável por longo período de tempo. Suas partes não devem ser suscetíveis ao ataque químico.

(vi) que ele tenha capacidade de medição contínua ou intermitente, se requerido. O sistema de registro de dados não deve introduzir o erro na leitura.

(vii) confiabilidade quanto ao sistema completo, como o tipo de piezômetro adotado, o responsável técnico pelas leituras e o método de registro dos dados coletados.

(viii) avaliação do experimento para gerar uma correta calibração, instalação e manutenção. Este assunto é essencial para a educação e treinamento da equipe, chamando a atenção aos temas necessários, por meio de um manual de instrumentação bem elaborado e confiável, constando aspectos detalhados da sua montagem, instalação, leitura e processamento dos dados.

(ix) um piezômetro mais confiável possível e que possa ser calibrado *in situ*, em intervalos de tempo regulares.

6.1.1 Piezômetro de tubo aberto (*standpipe*)

Em português, este tipo de instrumento poderia ser designado de "piezômetro de tubo aberto", porém, por facilidade de expressão, utilizaremos aqui a sua designação em inglês, piezômetro *standpipe*, também consagrada na área técnica nacional. São instrumentos dos mais confiáveis e robustos, para a observação das subpressões ou poropressões, em barragens de terra, em função de sua simplicidade, baixo custo e ótimo desempenho em longo prazo, apresentando, geralmente, vida útil compatível com a da barragem.

Dentre as principais vantagens desse tipo de piezômetro, destacam-se:

- confiabilidade;
- durabilidade;
- sensibilidade;
- possibilidade de verificação de seu desempenho por meio de ensaios de recuperação do nível d'água (NA);
- estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo onde se encontra instalado o instrumento.

Dentre as principais desvantagens, destacam-se:

- interferência da praça de compactação durante a construção da barragem;
- inadequação, geralmente, para a medição das pressões neutras de período construtivo;
- certa dificuldade de acesso aos terminais de leitura;
- alto tempo de resposta (*time lag*), quando instalado em solos com baixa permeabilidade.

No piezômetro *standpipe* a água dos poros passa através do filtro do bulbo drenante do instrumento até atingir o equilíbrio com a poropressão na fundação. A poropressão corresponde, então, à altura da água acima do bulbo do instrumento. Geralmente, adota-se como referência para leitura a cota do ponto médio do bulbo. Os primeiros piezômetros *standpipe* utilizavam como elemento poroso uma vela de filtro, sendo conhecidos por piezômetros tipo Casagrande, uma vez que foi Arthur Casagrande quem os desenvolveu. Em uma segunda fase, passou-se a empregar, no bulbo do instrumento, um sistema mais robusto constituído por duas tubulações, com um filtro interno de areia. Mais recentemente, com o surgimento das mantas de poliéster, passou-se a empregá-las como filtro, aplicadas diretamente sobre o trecho perfurado no bulbo do piezômetro, geralmente com diâmetro de 3/4", com bons resultados, o que veio simplificar muito o manuseio desses instrumentos (SILVEIRA, 2006).

Na Figura 21 (A) é apresentado um esquema de um piezômetro *standpipe* instalado em furo de sondagem. A Figura 21 (B) ilustra um piezômetro *standpipe* em que o

elemento poroso é confeccionado em poliuretano hidrofílico de poros de alta densidade, com cerca de 38mm de diâmetro (parte branca, na porção inferior da figura).

Figura 21 – (A) Esquema de um piezômetro *standpipe* instalado em furo de sondagem; (B) Piezômetro *standpipe* com filtro poroso, conectado à tubulação em PVC (Silveira, 2006).

Os procedimentos para instalação dos piezômetros *standpipe* envolvem perfuração de furos de sondagem, na qual constam de operações de limpeza do furo, colocação de trecho de areia no bulbo do instrumento, saturação do tubo poroso, instalação do instrumento e preenchimento com areia em torno da ponteira drenante.

A Figura 22 ilustra a seqüência dos processos básicos aplicados na instalação de piezômetros, ressaltando a importância da retirada do revestimento da sondagem, a qual deve ser realizada concomitantemente com a instalação do piezômetro.

Figura 22 – Esquema de instalação de piezômetro *standpipe* (Silveira, 2006).

Segundo Silveira (2006), a tubulação dos piezômetros *standpipe* geralmente é confeccionada em PVC com conexões entre tubos normalmente rosqueadas, devendo-se assegurar a boa vedação das mesmas com veda rosca ou com colas adesivas apropriadas. Para uma boa vedação, acima do bulbo do instrumento, deve-se empregar uma camada de bentonita com pelo menos 0,50m, colocando-se a seguir uma mistura de solo-cimento, em que o solo seja constituído por uma fração bem argilosa e o cimento represente teor de 10% em peso. Deve-se tomar cuidado na execução do trecho de vedação e no preenchimento do restante do furo, para que a haste do piezômetro seja mantida em uma posição bem centrada no furo, e não em contato com as paredes da sondagem, o que poderá prejudicar ou impedir a boa vedação acima do bulbo do instrumento.

A pressão é obtida a partir da medida da coluna d'água, a qual é feita a partir da extremidade superior de um sensor denominado pio elétrico, que identifica a superfície da água, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Sensores (pio elétrico) utilizados para leitura do nível d'água.

Tendo em vista a proteção do piezômetro durante sua instalação e ao longo do seu período de operação, procedimentos como sinalização e construção de caixas de proteção devem ser providenciados. A Figura 24 ilustra a proteção de um piezômetro em sua instalação com grades metálicas, pintadas com tinta fluorescente para sinalização em operações noturnas. A Figura 25 ilustra a proteção dos piezômetros após sua instalação com caixa de concreto e tampas metálicas.

Figura 24 – Proteção e sinalização de piezômetro durante sua instalação (Silveira, 2006).

Figura 25 – Mecanismos de proteção de piezômetros após sua instalação (Silveira, 2006, modificado).

6.1.1.1 Algumas fontes de erros em piezômetros de tubo aberto

A ponteira de um piezômetro *standpipe* é instalada para a medição da poropressão, requerendo um isolamento das pressões da água na circunvizinhança. A ponteira consiste em um elemento poroso que permite a passagem d'água até o elemento sensível do instrumento. Todos os piezômetros requerem algum fluxo d'água para dentro ou para fora do instrumento, até que ocorra equilíbrio com a poropressão d'água no solo. Dessa forma, o tempo de resposta do piezômetro, para medir uma variação na poropressão, depende da quantidade de água requerida para sensibilizar o instrumento (SILVEIRA, 2006).

O referido autor cita também que os piezômetros instalados na fundação ou no aterro de uma barragem, após a construção, são geralmente instalados em furos de sondagem. O elemento poroso de um piezômetro é normalmente envolto por areia, sendo a célula de areia vedada no interior da sondagem, por um trecho de injeção, por exemplo, com bentonita. A célula de areia aumenta, portanto, a área de contribuição do elemento poroso e, assim, melhora o tempo de resposta (*time lag*). Alguns piezômetros podem ser cravados diretamente no solo, ou no fundo de um furo de sondagem, desde que o material não esteja excessivamente consolidado. A ocorrência de falha no sistema de vedação de um piezômetro poderá implicar leituras errôneas. O sucesso na medição das poropressões ou subpressões em uma barragem depende dos cuidados tomados na instalação e na manutenção subsequente, assim como na realização das leituras do instrumento.

A seleção do piezômetro mais adequado irá depender, inevitavelmente, não apenas de razões técnicas, mas também do orçamento disponível. O custo da instrumentação não decorre apenas dos instrumentos em si, mas deve incluir o custo das operações de instalação, leitura e análise dos dados. A utilização do piezômetro *standpipe* atende todos estes quesitos, estando entre os instrumentos mais confiáveis que existem, com custo atrativo.

Segundo Silveira (2006), erro constitui o desvio entre o valor medido e o real. Erros surgem em função de várias causas distintas. Os tipos de erros associados às respectivas causas da sua origem, bem como as medidas corretivas dos

instrumentos estão sintetizadas na Tabela 08, que engloba causas de erros relacionados aos piezômetros *standpipe*.

Tabela 8 – Causas e medidas corretivas para os erros de medição (Dunnicliff, 1993).

<i>Tipo de erro</i>	<i>Causas</i>	<i>Medidas corretivas dos instrumentos</i>
Erro grosseiro	Inexperiência Falha na leitura Falha no registro Erro computacional	Mais cuidado/atenção Treinamento Leituras duplicadas Dois observadores Comparação com as leituras prévias
Erro sistemático	Calibração imprópria Falta de calibração Histerese Não linearidade	Uso de calibração correta Recalibração Uso de padrões Uso de procedimentos de leitura consistentes
Erro de conformidade	Detalhes de instalação incorretos Limitações do instrumento de medição	Seleção de instrumento apropriado Modificação dos procedimentos de instalação Aprimoramento do projeto de instrumentação
Erro ambiental	Clima Temperatura Vibração Corrosão	Registrar as variações ambientais e introduzir correções Fazer escolha apropriada dos materiais dos instrumentos
Erro observacional	Variação entre observadores	Treinamento Uso de sistemas de aquisição automática de dados
Erro de amostragem	Variabilidade nos parâmetros medidos Técnicas incorretas de amostragem	Instalação de um número suficiente de instrumentos nos locais representativos
Erro randômico	Ruído Atrito Efeitos ambientais	Seleção correta dos instrumentos Eliminação temporária de ruídos Leituras múltiplas Análises estatísticas

Outras fontes de erros na leitura do nível d'água em piezômetros de tubo aberto foram resumidas por Hvorslev (1951) apud Hanna (1985), sendo descritas e representadas nas figuras abaixo: As Figuras 26 (1 e 2) destacam algumas fontes de erros relacionados ao período (intervalo) de tempo de resposta (*time lag*), parâmetro presente na instalação de um piezômetro, pois altera a pressão da água subterrânea. Dunnicliff (1993), descreve o *time lag* como sendo o tempo requerido para a água fluir para dentro ou fora do piezômetro para efeito de equalização no meio. Tal fenômeno depende primeiramente do tipo e dimensão do piezômetro a ser instalado bem como da permeabilidade do terreno.

Figura 26 – Principais fontes da variação do período de tempo de resposta (*time lag*) (Dunnicliff, 1993).

As Figuras 27 e 28 mostram alguns erros que afetam o valor de nível de água registrado durante a coleta com o sensor de leitura de nível d'água. Em relação à Figura 27, item (4), quanto ao nível d'água no tubo do piezômetro e possíveis fontes de erros de medidas, a coluna (A) ressalta um pequeno aumento da pressão no interior do piezômetro devido a presença de um nível d'água "empoleirado" com fluxo descendente. Quanto à coluna (B) ilustra uma situação que, em decorrência de percolação ascendente da água por artesianismo pode ocorrer diminuição a pressão hidrostática no piezômetro. Na Figura 28 observa-se que a presença de outros fluídos, que não sejam água, e/ou de bolhas no tubo do piezômetro *standpipe* podem comprometer a leitura do nível d'água, pela diferença de tensão provocada. Por vezes, bolhas podem ficar retidas no interior do tubo, influenciando na elevação do nível d'água e sua estabilização acima da cota do nível d'água estático.

Figura 27 – Principais fontes de erros em piezômetros de tubo aberto (Dunnicliff, 1993).

Figura 28 – Fontes de erros causados por fluidos e bolhas (Dunnicliff, 1993).

As Figuras 29 e 30 ilustram as possíveis fontes de alteração do *time lag* hidrodinâmico (intervalo de tempo de resposta para a estabilização do nível da água dentro do tubo do piezômetro), podendo gerar erros na leitura do nível d'água.

Figura 29 – Fontes de erros causados pela alteração do *time lag* hidrodinâmico (Dunnicliff, 1993).

Figura 30 – Outras fontes de erros causados pela alteração do *time lag* (Dunnicliff, 1993).

6.1.2 Determinação da linha piezométrica em uma seção instrumentada

Segundo França & Gomes (2006), as leituras de cada piezômetro indicam a cota do nível d'água no piezômetro, a cota do reservatório e a cota do ponto médio do elemento poroso (que é constante para cada piezômetro).

Com estes dados obtém-se a pressão hidrostática, de acordo com a equação 4.

$$P_1 = B - \frac{F}{10} \quad (4)$$

em que, P_1 : Pressão hidrostática (kgf/cm²);

B: Cota do nível piezométrico (m); e

F: Cota do ponto médio do elemento poroso (m).

Deste modo as cotas piezométricas de cada seção poderão ser obtidas a partir de:

A: Data da leitura;

B: Cota do nível d'água no reservatório (R);

C: Cota do nível piezométrico: medidas obtidas com pio elétrico;

D: Pressão hidrostática (P_1): obtida pela equação 4;

E: Peso específico da água (γ): 10Kgf/cm³;

F: Energia ou carga de pressão: $F = D/E$;

G: Cota piezométrica: $G = C+F$,

A partir do cálculo da cota de cada piezômetro os valores terão base de cálculo na equação 5.

$$H = z - \frac{P_1}{\gamma} \quad (5)$$

em que, H: Cota piezométrica (m);

z: Carga de posição (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência) (m);

P_1 : Pressão hidrostática (kgf/cm²);

γ : massa específica (kgf/cm³).

Em seguida, os valores obtidos de cotas piezométricas são transferidos para a Tabela 9, onde serão calculadas as diferenças das cotas de montante e jusante desta seção em porcentagem, a fim de saber o percentual com que estas estão decrescendo ou crescendo. Também nesta tabela será indicada em **negrito** a cota de jusante que for superior a de montante, isto para uma rápida visualização, caso estas estejam se comportando de maneira anômala.

Tabela 9 – Comportamento dos piezômetros (França & Gomes, 2006, modificado).

A	B	C	D	E
Data da leitura	Cota do reservatório (m)	Cota piezométrica do Pz de montante	Cota piezométrica do Pz de jusante	Diferença de cotas de montante para jusante (%)

Após a determinação das cotas dos piezômetros, os resultados são plotados na seção transversal relativa a cada furo, indicando-se o nível do reservatório a montante e a cota do rio (nível d'água) à jusante, a fim de se obter a linha piezométrica de cada seção. Para o melhor entendimento do conceito de cota piezométrica é necessário lembrar o conceito de linha piezométrica que é o lugar geométrico dos pontos cujas cotas são dadas pela soma da carga de posição (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência) mais a carga de pressão (França & Gomes, 2006).

Bourdeaux (1979) apud França & Gomes (2006) cita que, para a avaliação da eficiência de um dispositivo de vedação é necessário instalar piezômetros a montante e a jusante do mesmo, sendo que a diferença das grandezas medidas atestará a eficiência do sistema e a segurança da obra.

Neste contexto, a seção representada na Figura 31 demonstra um esquema de instrumentação para determinação da linha piezométrica, a partir da instalação de piezômetros *standpipe* (simples ou multinível). Projetos de barragens de contenção de rejeitos de maior porte, células de pressão piezométrica poderão contemplar o sistema de instrumentação do nível da água no reservatório.

Figura 31 – Seção mostrando o ideal para a instrumentação e monitoramento do nível d'água (Martin, 1999).

6.2 VAZÃO DE JUSANTE

A medição das vazões de drenagem e das infiltrações pelo corpo da barragem de contenção de rejeitos é essencial para assegurar sua segurança estrutural e deve ser uma das primeiras observações realizadas com o intuito de monitorar tais condições. Segundo Silveira (2006), a medição das vazões de drenagem constitui associada a medição dos deslocamentos superficiais por meio de métodos topográficos, uma das primeiras observações realizadas com o objetivo de supervisionar as condições de segurança de uma barragem. Em barragens de rejeitos de pequeno e médio porte alteadas a montante poderão ser adotados métodos expeditos de medição de vazões não havendo a necessidade de se instalar medidores de vazão mais elaborados. Sendo possível detectar algum mecanismo de ruptura se instalando na barragem em sua fase ainda inicial, o rebaixamento parcial do reservatório pode ser executado, assim como realizar novas investigações e implementar as medidas corretivas necessárias.

Métodos expeditos empregando-se um recipiente graduado para a coleta d' água, durante um intervalo de tempo medido e com auxílio de um cronômetro poderão ser adotados para medida das vazões. Pode-se, desta forma, proceder ao cálculo da vazão (Q) com a instalação, por exemplo, de drenos subhorizontais na face do talude

de jusante, através da expressão:

$$Q = V/T \quad (6)$$

onde,

V: volume coletado (litros)

T: intervalo de tempo (minutos)

Para vazões pequenas, recomenda-se o emprego de um recipiente com volume de 200 mL, e para vazões maiores, um recipiente com volume de 1,0 L. Esse recipiente deverá ser transparente e graduado na lateral, para permitir a medição do volume d' água, podendo ser de vidro ou de plástico. O plástico apresenta a vantagem de não ser tão frágil, sendo mais prático para sua utilização no campo; porém, tende a perder sua transparência com o tempo tornando-se mais opaco. O cronômetro deve permitir a medição de segundos e ser de fácil manuseio e flexibilidade, em termos de acionamento e desligamento, para a determinação precisa do tempo de início e final da coleta da amostra d' água.

Se ocorrer o aumento das vazões medidas com o tempo, em função da elevação do nível do reservatório, por exemplo, o recipiente de 1,0L ficará pequeno para a coleta da amostra d'água. Quando isso ocorrer, recomenda-se a substituição do medidor de vazão por outro do tipo triangular, visto que o emprego da técnica de recipiente e cronômetro deixará de ser a mais apropriada.

Para barragens de pequeno porte (entre 50 e 150m de comprimento) basta a instalação de um único medidor de vazão junto ao pé de jusante do aterro, a partir da instalação de um dreno subhorizontal em um único local, conforme ilustra a Figura 32 (SILVEIRA, 2006).

Figura 32 – Instalação de medidor de vazão em barragem de pequeno porte (Silveira, 2006)

Em alguns casos, o autor cita a possibilidade da instalação de dois medidores de vazão no pé do talude de jusante, conforme mostrado na Figura 33 (A e B). Neste contexto, a construção de septos impermeáveis possibilitará a instalação de dois medidores de vazão e a detecção de uma eventual falha na fundação e corpo da barragem provém da região da margem esquerda ou da direita, o que facilita as investigações e o correto diagnóstico do problema.

Figura 33 – (A) Barragem com um septo impermeável e dois medidores de vazão; (B) Barragem com dois septos impermeáveis e dois medidores de vazão, com área alagada a jusante (Silveira, 2006).

Portanto, com o aumento significativo das vazões e com a impossibilidade da medição desta vazão pelo método expedito, poderá ser adotado, conforme o caso em análise, o medidor triangular, retangular ou trapezoidal de vazão e até mesmo o emprego de calha tipo Parshall.

Em relação aos medidores triangulares de vazão, recomenda-se seu uso (SILVEIRA, 2006), para faixa de 0L/min a 600L/min, podendo atingir o máximo de 8.000L/min (130L/s) e quanto aos retangulares podem operar com vazão até 40.000L/min (670L/s). A Figura 34 mostra medidores triangulares para canal aberto.

Figura 34 – Ilustração esquemática e foto de medidor triangular (Silveira, 2006).

A Figura 35 ilustra a calha tipo Parshall e um medidor de vazão ultra-som que pode ser acoplado à calha. O medidor ultra-som é composto por unidade eletrônica e um sensor ultra-som que podem ficar distante um do outro até 20m. De simples operação, basta informar o tipo de calha ou vertedouro que o *software* automaticamente faz a conversão e já indica a vazão instantânea e a vazão totalizada.

Figura 35 - Calha tipo Parshall e medidor de vazão ultra-som para calha Parshall, com saída do sistema de drenagem em um único ponto (Silveira, 2006).

A partir da escolha do tipo de medidor de vazão a ser utilizado na barragem de contenção de rejeito, o mesmo será útil na observação da quantidade de materiais sólidos carregados. O dispositivo permite tanto a análise visual da cor da água como a coleta de amostras para análise laboratorial dos sólidos em solução. Teores de sólidos nestas águas, com valores superiores ou da mesma ordem de grandeza do reservatório, constitui um fato de extrema importância, pois indicaria um eventual mecanismo de erosão interna (*piping*) no barramento. Nesta condição uma investigação detalhada deveria ser programada para constatação se a erosão

interna está ocorrendo e como estaria evoluindo com o tempo, a ponto de necessitar de eventuais medidas corretivas.

6.3 PLUVIOMETRIA

As medições pluviométricas serão indispensáveis para avaliação do comportamento do nível d'água no corpo da barragem, pois com os dados pluviométricos de precipitação (mm) sob a forma de chuva, tal parâmetro, gerará maior confiabilidade para previsão do comportamento da barragem. A observação e avaliação das águas que adentram no reservatório ao ser conflitada com as medidas obtidas pelos piezômetros e pelas medidas de vazão à jusante da barragem, promoverão a diminuição de erros na interpretação dos dados, com uma avaliação mais consistente e embasada.

Segundo Machado (2007) as medidas pluviométricas permitem determinar as vazões de escoamento superficial, as taxas de infiltração, a necessidade de implantação e o dimensionamento dos dispositivos de drenagem superficial.

Para a medição da altura pluviométrica (mm) são escolhidos previamente pontos em torno da barragem de contenção de rejeitos para a instalação de aparelhos como o pluviômetro e pluviógrafo. Segundo Versiani (1986), o pluviômetro consiste em um simples receptáculo ou balde com tamanho padronizado, existindo anexa uma proveta graduada onde a leitura é feita diariamente e o pluviógrafo em um aparelho possuindo um mecanismo de relojoaria que permite o registro da chuva no decorrer do tempo, através de um gráfico. As grandezas características das medidas pluviométricas são: altura pluviométrica, intensidade da precipitação e duração.

Neste contexto, um gráfico contendo o hidrograma (representação gráfica da variação de vazão em função do tempo) e o ietograma correspondente (representação da precipitação média sobre a superfície em torno do reservatório em função do tempo, sob a forma de histograma), poderá ser elaborado. A Figura 36 mostra um exemplo de apresentação dos dados da pluviometria, concomitantemente com as vazões obtidas.

Figura 36 – Exemplo de apresentação dos dados pluviométricos e vazões sob a forma de gráfico (Versiani, 1986).

6.4 NÍVEL D'ÁGUA DO RESERVATÓRIO

A medição do nível d'água no reservatório em conjunto com as medidas do sistema de piezometria, de vazões de percolação e pluviometria, contribuirá também para uma avaliação mais consistente da segurança da barragem pelo projetista. As medidas poderão ser obtidas a partir da instalação de uma régua graduada dentro do reservatório. Esta régua com as respectivas elevações (cota) do reservatório promove maior praticidade na leitura e comumente é encontrada em barragens de contenção de rejeitos.

Os principais níveis do reservatório a serem monitorados nas barragens de contenção de rejeitos na visão de Buarque (1986), são:

NR: nível de rejeito;

NO: nível operacional;

NCB: nível da crista da barragem.

Ainda segundo o autor, a depender do tipo de lançamento e método construtivo da barragem, há também outros níveis de interesse à caracterização da segurança e desempenho hidrológico-hidráulico do sistema como:

- Nível (s) do (s) ponto (s) de lançamento do rejeito;
- Nível da cheia decenal;
- Nível de defesa ambiental.

Todos esses níveis deverão ser determinados para cada etapa de construção do sistema de contenção, cujo projeto é função do conjunto de seus valores. A definição do conjunto desses níveis é uma decorrência do dimensionamento das estruturas hidráulicas do sistema de contenção. O acompanhamento topográfico dos referidos níveis do reservatório, principalmente do seu nível d'água, deverá ser estabelecido nas fases de seu enchimento, período operacional e de alteamentos das barragens de contenção de rejeitos.

6.5 MARCO TOPOGRÁFICO SUPERFICIAL

Um dos métodos mais antigos e simples para a observação dos deslocamentos em barragens convencionais e, no entanto poderá ser utilizado em barragens de contenção rejeitos consiste na instalação de marcos superficiais ao longo das bermas e da crista. Sua instalação torna-se necessária no monitoramento de deslocamentos horizontais da estrutura pós-construção, durante a deposição do rejeito, nas etapas de alteamento e período operacional. São importantes na eventual constatação de indícios de instabilidade do talude de jusante, porém apresentam como desvantagem o fato de não permitirem a observação de

deslocamentos do talude de montante (SILVEIRA, 2006). A Figura 37 ilustra alguns tipos de marcos superficiais instalados em barragens convencionais.

Figura 37 – Marcos superficiais instalados em barragens convencionais (Silveira, 2006).

Para a medição dos deslocamentos dos marcos superficiais, faz-se necessária a instalação de estações topográficas de modo que se disponha de um referencial fixo. A locação e a densidade das estações de referência, para o controle dos marcos superficiais, estão geralmente condicionadas a geometria e dimensões da barragem, assim como as características de cada barragem em particular. Um esquema de instalação de uma estação topográfica é mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Esquema de instalação de uma estação topográfica: (A) em rocha; (B) em solo (Silveira, 2006).

A precisão das informações requeridas, assim como o tamanho e a forma da barragem, influenciam a seleção do sistema de monitoração a ser empregado. A precisão das medições deve ser consistente com a ordem de grandeza dos deslocamentos previstos. Em termos básicos, a precisão e a confiabilidade das medições de deslocamento empregando métodos de topografia dependem (SILVEIRA, 2006):

- do tipo de instrumentos empregados;
- da repetibilidade na centralização e no posicionamento dos instrumentos de medida nas estações topográficas de referência;
- da estabilidade (imobilidade) das estações de referência;
- da proteção dos pilares e outras referências contra acidentes e vandalismo;
- da experiência da equipe de topografia;
- da influência das condições meteorológicas;
- da extensão das distâncias de visada.

7 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA A PARTIR DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO

A avaliação do comportamento do nível d'água em barragens de contenção de rejeitos, construídas pelo método da linha de montante, poderá se proceder a partir dos dados fornecidos pela instrumentação apresentada no capítulo anterior (6). A proposta de instrumentação citada, com a aquisição de medidas piezométricas, vazão, pluviometria e nível d'água do reservatório, contemplam informações mínimas necessárias para Ao projetista avaliar o comportamento do nível d'água e das estruturas da barragem. A execução deste programa de instrumentação e aquisição das medidas descritas possibilita o projetista confrontá-los com os parâmetros previstos no projeto durante a vida útil da barragem de contenção de rejeitos. Principalmente quanto aos processos de *piping* e liquefação, a avaliação do comportamento do nível d'água refletirá fraquezas e áreas de sensibilidade do barramento.

Com este intuito, o projetista deve elaborar um plano de instrumentação da variação do nível d'água no sistema barragem-reservatório contendo no mínimo os parâmetros citados, bem como outras considerações de projeto como: o objetivo de cada medição, os valores previstos e os limites de comportamento aceitáveis. Deste modo, o projetista poderá traduzir expectativas em relação a um determinado parâmetro a ser monitorado e as leituras coletadas adquiram significado e utilidade na avaliação da segurança das estruturas. Assim, o planejamento sistemático para coleta e análise das medidas de campo deve ser respeitado para obtenção do constante sucesso do processo de avaliação do comportamento do nível d'água, parâmetro muito importante em barragens de contenção de rejeitos alteadas pelo método da linha de montante. O programa de monitoramento sistemático precisa estar em perfeita ordem de funcionamento, com vistas à detecção de qualquer suspeita de risco quanto à instalação de processos erosivos internos, pela percolação de água de maneira indisciplinada pelo corpo da barragem.

7.1 O PROGRAMA DE MONITORAMENTO

Um projeto de barragem de contenção de rejeitos deve incluir um programa de monitoramento constante de avaliação da estabilidade da estrutura da barragem. O programa de monitoramento deve determinar a frequência do monitoramento, parâmetros críticos adotados no projeto a que o monitoramento estará direcionado e a relevância destes parâmetros para a total estabilidade da obra e avaliação do impacto ambiental (AUSTRÁLIA, 1995). No contexto geral, Silveira (2006) cita que, o programa de monitoramento deve ser um processo lógico e compreensivo, que tem início com a definição de um objetivo e termina com o planejamento de como os parâmetros a serem medidos serão implementados.

Conforme assinalado por Dunnicliff (1993), o planejamento de um programa de monitoramento deve ser feito segundo os itens a seguir apresentados, e todas as etapas completadas, se possível, antes que os trabalhos de instrumentação sejam iniciados no campo.

- definição das condições do empreendimento;
- definição das questões geotécnicas e dos objetivos da instrumentação;
- seleção dos parâmetros a serem monitorados;
- previsão do campo de variação das medidas;
- planejamento de ações corretivas;
- atribuição de tarefas nas fases de projeto, construção e operação;
- seleção dos instrumentos de auscultação;
- localização dos instrumentos;
- registro dos fatores que podem influenciar os dados medidos;
- estabelecimento dos procedimentos para assegurar a precisão das leituras;
- preparo do orçamento;
- preparo das especificações e listas de materiais para aquisição;
- planejamento da instalação;
- manutenção periódica e eventual calibração;
- planejamento das etapas desde a aquisição até os relatórios;
- orçamento atualizado.

Com base nos princípios básicos citados por Dunnicliff (1993), adotados em programas de monitoramento de barragens convencionais de armazenamento de água, os mesmos poderão ser estabelecidos em um programa de monitoramento de barragens de rejeitos. Normalmente, porém, os investimentos com a instrumentação deste tipo de barragem são usualmente menores.

O autor ressalta também a importância da atribuição das tarefas em um programa de monitoramento. Neste contexto, a interpretação e a análise dos dados devem ser de responsabilidade direta do proprietário, do consultor do projeto ou do especialista em instrumentação, selecionada pelo proprietário. A Tabela 10 fornece um exemplo de atribuição de tarefas em um programa de monitoramento supervisionado pelo proprietário.

Tabela 10 – Exemplo de atribuição de tarefas para um programa de monitoramento executado pelo proprietário (Silveira, 2006).

<i>Tarefa</i>	<i>Parte responsável</i>			
	<i>Proprietário</i>	<i>Consultor do projeto</i>	<i>Especialista em instrumentação</i>	<i>Empresa construtora</i>
Concepção do plano de auscultação	•	•	•	
Aquisição dos instrumentos e calibração de fábrica		•	•	
Instalação dos instrumentos			•	•
Manutenção e calibração periódica dos instrumentos			•	•
Estabelecimento da programação de coleta de dados		•	•	
Aquisição dos dados			•	•
Processamento e apresentação dos dados			•	
Análise e elaboração de relatórios periódicos		•	•	
Decisão pela implementação das recomendações e das medidas corretivas	•	•		

A atribuição de tarefas deve incluir o planejamento dos canais de informação e integração. Atribuições devem indicar claramente quem assume toda a responsabilidade, assim como a autoridade contratual para implementar as recomendações ou medidas corretivas eventualmente necessárias.

7.1.1 Coleta, análise e apresentação das leituras

Os objetivos da coleta de dados podem ser os mais variados possíveis e vão desde a verificação de considerações de projeto e de parâmetros da construção até a avaliação e monitoramento de algum problema observado nas estruturas ou suas fundações. É importante que estes objetivos específicos sejam identificados, para que sejam selecionados os tipos de dados necessários para suportar os objetivos pretendidos.

O planejamento adequado do sistema de instrumentação é uma das etapas mais importantes no monitoramento de uma barragem. Mas a instrumentação de barragens não tem nenhum valor por si só. O melhor instrumento não aumenta a segurança se não estiver funcionando corretamente, se estiver no lugar errado ou se não estiver sendo lido em intervalos de tempo adequados. Da mesma forma, os dados também não têm valor por si só. As pessoas que coletam os dados devem ser capazes de dar rapidamente significado aos números e tomar decisões (DIVINO & FUSARO, 2006).

Tendo isto em mente, pode-se dizer que os elementos para um plano de instrumentação, monitoramento e controle da segurança e que devem estar explícitos no Manual da Instrumentação de uma barragem são:

- Objetivos específicos
- Descrição da instrumentação e sua locação precisa
- Programa de coleta das leituras que inclua responsabilidades e periodicidades
- Procedimentos para calibração e manutenção dos instrumentos
- Procedimentos de análise dos dados
- Procedimentos para identificação e resposta a mudanças críticas
- Revisão do plano

Ainda segundo Divino & Fusaro (2006), o programa de coleta dos dados deve indicar quais leituras serão executadas, quais os procedimentos para leitura e em qual periodicidade serão realizadas. A descrição dos procedimentos para leitura dos instrumentos é importante para detalhar as particularidades de cada instrumento e

para que o monitoramento subsequente ao período da obra seja realizado com os mesmos critérios da fase de projeto e construção e alteamento, reduzindo as margens de erro. A escolha da periodicidade de leituras é função do tipo de dado que está sendo coletado, da taxa de variação esperada para o valor lido e, atualmente, há de se considerar o método de leitura (manual versus automático).

A razão pela qual os dados estão sendo coletados será muitas vezes o requisito principal na determinação do intervalo entre leituras. Um problema de instabilidade potencial de uma barragem irá requerer leituras mais freqüentes do que em uma barragem que está sendo monitorada apenas para propósitos gerais. As leituras iniciais devem ser mais freqüentes durante o enchimento do reservatório e nos primeiros anos de operação da barragem. Na medida em que os dados sejam estáveis, e que correspondam às expectativas do projeto, estas leituras podem ter periodicidade maior. Isto é mais fácil de ser estabelecido para barragens onde o nível do reservatório seja estável, mas também pode ser aplicado em barragens com variações expressivas de nível desde que se tenha um período longo de observações.

Outro aspecto que irá determinar a freqüência das leituras é a velocidade das variações nos dados a serem coletados. Por exemplo, durante o enchimento do reservatório, espera-se que as pressões neutras dentro do maciço variem rapidamente. Dependendo da velocidade do enchimento, as pressões devem ser lidas em intervalos diários ou até mesmo a cada hora. Quando as pressões neutras estão sendo monitoradas em um maciço onde os níveis d'água de montante e de jusante são relativamente constantes, estes mesmos dados podem ser coletados em intervalos de tempo maiores, desde que não haja outras mudanças nas condições da barragem ou do ambiente.

Em relação aos procedimentos necessários para análise dos dados da instrumentação o aspecto básico e mais importante é a transmissão correta dos dados coletados e sua análise imediata. Este procedimento permite que a instrumentação cumpra com sua finalidade de diagnosticar precocemente eventuais problemas e possibilita ao projetista a implementação de medidas corretivas em tempo hábil. No entanto, esta análise "imediata", também chamada de "preliminar", só é possível quando são feitas previsões das magnitudes de variações nas leituras,

de forma que o pessoal responsável pelas leituras dos instrumentos possa distinguir, entre os valores coletados, aqueles que indiquem a necessidade de uma análise imediata.

Os dados da instrumentação devem ser analisados sob duas óticas: em função do tempo, para identificar mudanças de tendências, e dentro do contexto do comportamento esperado em relação ao projeto. São estes, portanto, os elementos principais a serem trabalhados quando do estabelecimento dos valores aceitáveis para as leituras, o que será detalhado no item 7.2 deste trabalho. No entanto, imediatamente após a entrada em operação, ainda não se dispõe de um histórico de dados dos instrumentos e toda a análise é baseada no confronto entre os valores lidos e aqueles previstos pelo projeto. Daí a importância que o manual de instrumentação contenha os valores previstos para a instrumentação de acordo com os modelos de comportamento estabelecidos pelo projetista.

Salienta-se que a avaliação da segurança da barragem não deva ser feita apenas com base nos resultados fornecidos pela instrumentação e modelos de comportamento, mas igualmente levando em conta o conjunto das características da barragem e suas fundações, as inspeções visuais, e apoiando-se sobre conhecimentos e experiências adquiridas em outros empreendimentos.

Quanto à apresentação das leituras medidas em campo a elaboração de gráficos é o melhor modo de apresentação e análise dos dados da instrumentação. A elaboração de gráficos deve buscar a relação dos parâmetros de monitoramento propostos neste trabalho (pressão piezométrica, nível d'água do reservatório, vazão de jusante e pluviometria) com o tempo (séries temporais) ou representar uma correlação do tipo carregamento x resposta, tais como:

- pressão piezométrica X nível d'água do reservatório;
- pressão piezométrica X precipitação pluviométrica;
- vazão de jusante X nível d'água do reservatório;
- vazão de jusante X precipitação pluviométrica;
- precipitação pluviométrica X nível d'água do reservatório.

Alguns exemplos de gráficos são mostrados a seguir (Figuras 39 e 40):

Figura 39 – Gráfico com as variações dos níveis piezométricos em uma seção instrumentada (Silveira, 2006).

Figura 40 – Gráfico comparativo das variações das vazões de drenagem e do nível d'água do reservatório (Silveira, 2006).

Porém, a elaboração de um único gráfico contendo todos parâmetros de avaliação do nível d'água citados na dissertação facilitará a visualização de eventuais problemas estruturais, equipamentos danificados ou erros de leituras no campo. A análise do gráfico em conjunto com as medidas de deslocamento superficial por meio de marcos topográficos fornece as condições exigidas para o monitoramento da barragem. A Figura 41, ilustra um modelo hipotético de apresentação dos dados da instrumentação. Notar o pico registrado no piezômetro 03 após um ano de operação da barragem, podendo ser reflexo de problemas de excesso de subpressão no corpo da barragem ou mesmo erro de leitura. Independentemente do motivo as causas deverão ser apuradas e as medidas corretivas determinadas.

Figura 41 – Gráfico hipotético do programa de instrumentação de uma barragem de contenção de rejeito alteada a montante.

7.2 DEFINIÇÃO DE VALORES-LIMITE DO PROJETO

Segundo Divino & Fusaro (2006), para que seja possível identificar comportamentos anômalos tanto das estruturas quanto dos próprios instrumentos, é importante que haja uma definição de faixas de valores aceitáveis para cada instrumento. Somente o estabelecimento destas faixas e a automação da verificação imediata dos dados após a leitura permitem o diagnóstico precoce de anomalias no comportamento de uma barragem. Para permitir esta análise preliminar automática dos dados, geralmente são estabelecidos valores-limite para as medidas, obtidos através de métodos determinísticos, estatísticos ou híbridos. A conjugação das informações obtidas através destes métodos pode levar ao estabelecimento de faixas de atenção e alerta úteis no monitoramento contínuo da segurança de barragens.

Limites de projeto podem ser definidos como valores que representem os limites aceitáveis para deslocamentos, pressões e vazões de percolação para um coeficiente de segurança desejado. Estes são estabelecidos originalmente durante o projeto da barragem, usualmente através de modelos determinísticos que constituem os critérios de segurança da barragem segundo normas técnicas e critérios de projeto usualmente aceitos. Os limites de projeto podem e devem ser calibrados, com base nas observações durante a vida útil da estrutura, mas os limites inicialmente propostos não devem ser perdidos de vista, pois retratam a visão do projetista quando a barragem foi concebida.

Limites de performance são valores determinados através de métodos estatísticos que antecipam a faixa de medidas esperada para um dado parâmetro monitorado, tendo em vista o seu histórico de leituras ao longo do tempo. São utilizados para chamar a atenção para dados que se desviam das tendências históricas e para prever valores futuros. Seu objetivo principal é checar se a leitura pode ser considerada correta e servir como uma análise preliminar dos dados. Nas situações onde ocorrem variações repentinas ou desvios dos valores previstos, servem para verificar a correção das leituras anteriores, a ocorrência de algum defeito na instrumentação ou problema estrutural.

Com base nestes dois valores-limite, podem ser estabelecidos quatro níveis de alerta, conforme descrito a seguir:

- Zona de normalidade: quando o valor lido encontra-se dentro da faixa pré-definida estatisticamente conforme histórico de leituras do instrumento e abaixo do limite de projeto. A leitura é considerada correta e não necessita de análise imediata complementar.
- Zona de anormalidade: quando o valor lido por um determinado instrumento está fora da faixa pré-definida pelos limites de performance estabelecidos, mas abaixo do limite de projeto. Neste caso, a leitura deve ser investigada quanto à sua correção, o funcionamento do instrumento deverá ser verificado e deverão ser estudadas as causas do comportamento anômalo.
- Zona de atenção: quando vários instrumentos de uma mesma seção ou região instrumentada apresentam valores fora dos limites de performance, mas ainda abaixo do limite de projeto. Isto indica um problema potencial no comportamento da barragem e este problema deverá ser investigado imediatamente e com a profundidade necessária.
- Zona de alerta: quando o valor lido encontra-se acima do limite estabelecido pelo projeto. Neste caso, ainda que não se configure uma situação de ruptura iminente, há necessidade de avaliação detalhada das condições de segurança da barragem e proposição de medidas corretivas, caso necessário.

Ainda que, inicialmente, não seja possível; o estabelecimento dos limites de performance, é fundamental que o manual de instrumentação da barragem contenha orientações sobre os níveis de alerta e possíveis combinações de resultados indesejados em determinada área ou seção instrumentada, para que a análise e tomada de decisões sejam realizadas de maneira satisfatória, em especial na fase inicial de operação.

8 CONCLUSÕES

Somente com uma constante avaliação do comportamento do nível d'água, em barragens de contenção de rejeitos construídas pelo método da linha de montante, o número de acidentes e danos ao meio ambiente poderão ser reduzidos. A execução de um programa de instrumentação e monitoramento da variação do nível da água no sistema barragem-reservatório, com vistas à avaliação do seu comportamento, gerará um significativo aumento na segurança da obra. Portanto, sua execução e operação, conforme procedimento metodológico descrito na dissertação, são imprescindíveis ao método construtivo da linha de montante.

A descrição do procedimento metodológico buscou corresponder às expectativas dos empreendedores mineiros por sua eficiência e por ser uma instrumentação básica, de simples operação, fácil manutenção e custos relativamente baixos. Quando bem dimensionado, executado e monitorado permite a adoção de medidas de controle ao ser detectada alguma variação anômala da água e poropressão no corpo da barragem e em seu reservatório.

Barragens de contenção de rejeitos já construídas, as quais não possuam um programa de monitoramento da variação do nível freático ou operem com programas insatisfatórios, a elaboração de projetos de reinstrumentação torna-se indispensável.

O trabalho almejou a contribuição com a literatura específica, relativa a segurança estrutural e ambiental de barragens de contenção de rejeitos de mineração.

REFERÊNCIAS

- ARNEZ, V.F.I. **Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos devido a fatores geológicos e geotécnicos**. 1999. 88p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- ARNEZ, V.F.I. **Avaliação de barragens de rejeitos através de modelos reduzidos**. 2004. 104p. Tese (Doutorado) – Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028**: coletânea de normas de mineração e meio ambiente – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. Rio de Janeiro. 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia. Instrumentação**. São Paulo, 1979.
- AUSTRÁLIA. Environment Protection Agency. **Tailing Containment. Best Practice Environmental Management in Mining**. Australian Federal Environment Department. Australian: Junho 1995 (ISBN 0 642 19423 8).
- AZEVEDO, A.A., ALBUQUERQUE FILHO, J.L. Águas subterrâneas. In: OLIVEIRA, A.M.S., BRITO, S.N.A. de. **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 111-130.
- BUARQUE, R. Estudos hidrológicos e hidráulicos aplicados aos sistemas de contenção de rejeitos. In: SEMINÁRIO SOBRE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS, 1986, Ouro Preto. **Coletânea...** Ouro Preto: DECIV/ EM /UFOP, 1986. p. 30-50.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1983. 5 ed. 2 vols.
- COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. **Segurança de barragens: recomendações para formulação e verificação de critérios e procedimentos**. Rio de Janeiro. 1986.

CRUZ, P.T.da. **100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto**. Oficina de Textos. São Paulo, 1996.

DIVINO, P.L.; FUSARO, T.C. Manual da instrumentação: o elo entre projeto e operação de barragens. In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 3., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CBDB, 2006. p. 337-345.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring fill performance**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

ESPÓSITO, J.T de. **Controle geotécnico da construção de barragens de rejeito - análise da estabilidade de taludes e estudos de percolação**. 1995. 159p. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ESTADOS UNIDOS. Environment Protection Agency. **Design and evaluation of tailings dams**. Office of Solid Waste. Washington: August 1994 (Technical Report EPA 530-R-94-038).

FRANÇA, M.E., GOMES, C.C. Análise da instrumentação piezométrica da barragem Castanhão. In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 3., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CBDB, 2006. p. 619-638.

FUJIMURA, F.; SOARES, L. **Sistemas de disposição de resíduos particulados em mineração**. São Paulo: Epusp, 1996. Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica. (notas do curso).

HANNA, T.H. **Field Instrumentation in geotechnical engineering**. Series on rock and soil mechanics. United States of America, 1985. 843p. v.10. (ISBN 0080-9004).

KLOHN, E.J. The development of current tailings dam design and construction methods. In: WILSON, D. **Design and construction of tailings dams**. Colorado: Colorado School of Mine Press, 1981. p. 02-52.

MACHADO, W.G.F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos de mineração**. 2007. 155p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MARTIN, T.E. Characterization of pore pressure conditions in upstream tailing dams. In: **Tailings and mine waste'99**. Rotterdam, 1999. p. 303-313. (ISBN 9058090256).

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

PARSONS, M.L. Groundwater aspects of tailings impoundments. In: WILSON. D. **Design and construction of tailings dams**. Colorado: Colorado School of Mine Press, 1981. p. 119-142.

SILVEIRA, J. F. A. **Glossário de instrumentação**. São Paulo: ABGE, 1979. (Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia).

SILVEIRA, J.F.A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. Oficina de Textos. São Paulo, 2006.

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

SOUZA JÚNIOR, G.R. **Ruptura de taludes em barragens de contenção de rejeitos devido ao desenvolvimento de subpressões**. 2003. 113p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SOUZA PINTO, C. de. **Curso básico de mecânica dos solos**. Oficina de Textos. São Paulo, 2000.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2 ed. New York, 1967.

TOGNON, A.A. **Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1985.

VERSIANI, B.R. Fundamentos teóricos aos estudos hidrológicos dos sistemas de contenção de rejeitos. In: SEMINÁRIO SOBRE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS, 1986, Ouro Preto. **Coletânea...** Ouro Preto: DECIV/ EM /UFOP, 1986. p. 01-29.

VICK, S.G. **Planing, design and analysis of tailing dams**. New York, John Wiley, 1983.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABRAÃO, P.C. **Sobre a disposição de rejeitos de Mineração do Brasil**. Simpósio sobre Barragens e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Rio de Janeiro. EDUSP. 1987.p.1-9.

AGUIAR, M.F.P.; SILVA, F.C.; ALMEIDA, M.S.S. **Análise de movimentos em encostas naturais através de monitoramento por instrumentação – Caso Coroa Grande**. Revista Tecnologia, v. 26, n.1. Rio de Janeiro. Junho de 2005.

BOURDEAUX, G.H.R.M. **Glossário de mecânica dos solos**. São Paulo: ABGE, 1976. (Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia).

BARRON, K. **Waste embankment**. Edmonton, University of Alberta. Mining Engineering Departament, 1986.

FELL, R.M.P.; STAPLEDON, D.B.G. **Geotechnical engineering of dams**. Leiden; New York: A.A. Balkema, 2005.

MASSAD, F. **Curso básico de obras de terra**. Oficina de Textos. São Paulo, 2003.

OSAKO, C.I. **A manutenção dos drenos nas fundações de barragens e o caso da usina hidrelétrica de Itaipu**. 2002. 114p. Dissertação (Mestrado) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 23., 1999, Belo Horizonte. **Guia básico de segurança de barragens**. São Paulo: Núcleo Regional de São Paulo/CBGB, 1999.

SHERARD, J.L.; WOODWARD, R.J.; GZIENSKI, S.F.; CLEVINGER, W.A. **Earth-Rock Dams. Engineering Problems of Design and Contruction**. United States of America. 1963.

SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, 1987, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/CBGB/DTG-CE, 1987.

STELLIN JR; A.; OKAGAWA, H; NOGUEIRA FILHO, J.V.; HENNIES, T.W.

Glossário de termos técnicos de mineração. Setor: Lavra de minas. São Paulo. Associação Paulista de Engenheiro de Minas – APEMI, 1987. (Cadernos Técnicos da APEMI, nº 01).

U.S. COMMITTEE ON LARGE DAMS. Instrumentation of embankment dams and levees. Washington, 1995. (Engineer Manual nº. 1110-2-1908) Disponível em: <http://www.usace.army.mil/publications/em-manuals/em1110-2-1908/basdoc.pdf>. Acesso: setembro/2007.