

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

**PRINCIPAIS FENÔMENOS CAUSADORES DE RUPTURAS EM BARRAGENS DE REJEITO
E MÉTODOS DE PREVENÇÃO**

Trabalho de Formatura
Breno Delfino Martins
Orientador: Professor Doutor Lindolfo Soares

**EPMI
TF-2009
M366p**

São Paulo
2009

TF-2009
M366p
Lynne 1825285

M2009a

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005913

PRINCIPAIS FENÔMENOS CAUSADORES DE RUPTURAS EM BARRAGENS DE REJEITO E MÉTODOS DE PREVENÇÃO

Breno D. Martins

E-mail: breno.delfino@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho trata do tema barragens de rejeito, que tem ganhado mais importância com o crescimento da preocupação com o meio ambiente. No trabalho podem ser encontradas informações referentes à importância e responsabilidades ao se construir uma barragem de rejeitos, aos métodos construtivos mais utilizados nesse tipo de barragem, bem como informações sobre os principais fenômenos causadores de ruptura, sistemas de segurança e prevenção de acidentes, controle e instrumentação das barragens de rejeitos.

O presente trabalho é de suma importância, visto que trata de um assunto muito delicado, que são as barragens de rejeitos, pois a imperícia ou a negligência em sua construção e controle de suas atividades pode gerar acidentes muito grandes, causando, em certos casos, a morte de muitas pessoas e danos irreparáveis ao ambiente em que vivemos.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, Rejeitos, Acidentes, Prevenção, Instrumentação.

ABSTRACT

This article deals with the issue of tailings dams, which has gained more importance with the growing concern about the environment. In this article is possible to find information that refer to the importance and responsibilities while projecting and constructing a tailing dam, the most common constructing methods, information about the main phenomena that cause the rupture of those structures, security and prevention systems used in tailings dams and instrumentation to control the critical parameters.

This article is very important, because it deals with a very delicate subject called tailings dams. The tailings dams are very important, because malpractice or negligence in its construction and control of their activities can generate very large accidents, causing in some cases, the death of many people and permanent damage to the environment in which we live.

KEY-WORDS: Tailings, Dams, Accidents, Prevention, Control, Instrumentation.

1. INTRODUÇÃO

Atividades relacionadas à mineração geram resíduos sólidos, líquidos ou gasosos. A quantidade desses resíduos é, na maioria dos casos, maior do que a quantidade de produtos comerciáveis, gerada a partir do processamento da matéria-prima, como pode ser demonstrado no gráfico da figura 1.

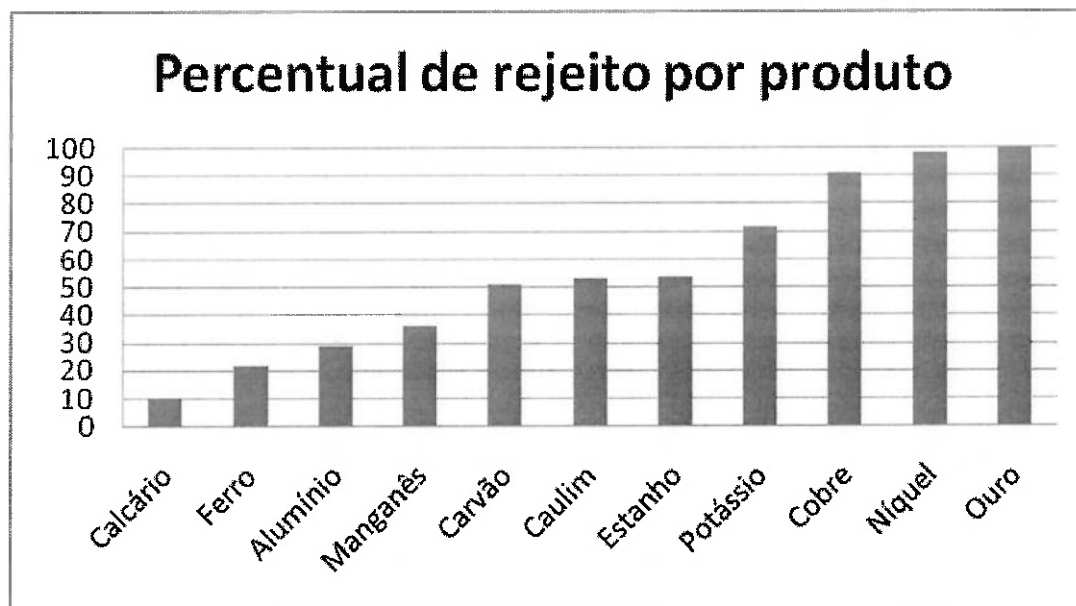


Figura 1 - Percentual estimado de rejeito de mineração (fonte: modificado de DNPM)

A crescente demanda de bens minerais nos mais diversos ramos da atividade industrial, assim como o aprimoramento de técnicas de processamento, que possibilitam o aproveitamento de minérios de baixo teor, geram um aumento expressivo na quantidade de rejeitos produzidos. Essa grande quantidade de rejeitos traz muita preocupação, pois, além de constituírem um volume muito grande, apresentam normalmente contaminantes e substâncias poluentes do meio ambiente, tendo, portanto que ser tratados ou lançados em áreas de contenção de rejeitos que evitem seu contato com solos, lençóis freáticos, rios e lagos.

Historicamente, a disposição dos rejeitos era feita visando-se ter o menor esforço e custo possíveis, porém, com o passar dos anos, a preocupação com o meio ambiente, assim como as leis e restrições ambientais foram crescendo. O Brasil iniciou sua restrição legislativa promulgando a Lei 6938, que estabelecia a Política Nacional de Meio Ambiente e posteriormente foram regulamentados fundamentos sobre a proteção ambiental através de decretos, normas, resoluções e portarias. Hoje o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) atua fortemente na regulamentação das atividades mineradoras usando a NRM-19 para regulamentar a disposição de estéril, rejeitos e produtos.

Atualmente o método mais utilizado para a deposição de rejeitos é a construção de bacias de rejeitos, que é um método que consegue evitar que os contaminantes entrem em contato com os solos, lençóis freáticos, rios e lagos e também mantém os rejeitos do processo confinados em um só lugar. Segundo Chaves e Fujimura (1991), a barragem de contenção de rejeitos é uma boa alternativa para a disposição, de maneira controlada e barata, desses subprodutos, de forma a permitir sua retomada no futuro, devido à variações mercadológicas e possíveis evoluções e aprimoramentos nas técnicas de processamento de minérios. Dessa forma, barragens de contenção de rejeitos são imensos depósitos inteligentes e de custo relativamente baixo para a acumulação de subprodutos do processo mineiro ou metalúrgico com vistas a uma futura possível utilização.

2. PRINCIPAIS MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITOS

A construção de uma barragem de rejeitos se dá mediante alteamentos sucessivos, que, além de diluir os custos envolvidos, dá ao minerador maior flexibilidade de operação, pois possibilita adaptar a construção da barragem às necessidades reais da mina. Esta flexibilidade é particularmente importante quando o minerador se vê obrigado a alterar suas taxas de produção, devido às flutuações do mercado de minérios, o que resulta conseqüentemente em variações dos volumes de rejeitos a serem armazenados.

Barragens construídas com alteamentos sucessivos têm sua estrutura iniciada com uma barragem piloto projetada para 2 a 5 anos de deposição dos rejeitos. Essas barragens são construídas com materiais provenientes de empréstimo, pedreiras e muitas vezes o estéril é utilizado. Concluída a etapa de construção do dique inicial, segue-se o subsequente alteamento da barragem acompanhando o nível de rejeitos depositados, bem como deixando uma borda livre, que age como uma margem de erro, evitando que uma variação no ciclo de chuvas, por exemplo, faça a barragem transbordar.

Quanto ao processo de deposição de rejeitos a ser utilizado para o alteamento da barragem, Baron (1986), cita o uso de ciclones. Os ciclones são colocados no topo da barragem ao longo de uma linha de alimentação ou agrupados numa estrutura em paralelo como um único ciclone que é deslocado num movimento vai e vem ao longo do eixo da barragem. Os ciclones funcionam da seguinte forma: os sólidos grossos são empregados para altear a barragem, enquanto que os sólidos finos são lançados na bacia de decantação da barragem.

É importante notar que, neste tipo de barragens, o alteamento é de responsabilidade do minerador, que pode usar seu próprio equipamento e técnicos, ou ainda utilizar os serviços de um empreiteiro.

Embora existam diversos métodos de alteamento de barragens de rejeitos, três deles são destacados como principais e sua utilização dependerá das mais diversas características individuais do empreendimento mineiro, como: topografia, hidrologia, geologia e propriedades do subsolo, granulometria e concentração dos rejeitos, velocidade de deposição, etc. Esses principais métodos de alteamento são: método de montante, método de jusante e método de linha de centro e recebem esses nomes devido ao sentido de deslocamento que o eixo da barragem apresenta durante seu alteamento.

2.1 Método da Linha de Montante

O método de montante recebe esse nome devido ao fato de o eixo da obra se deslocar para montante. Neste caso ocorre o aproveitamento dos rejeitos depositados como parte da estrutura de contenção. A construção da barragem por esse método inicia-se a partir de uma barragem piloto ou dique de partida, que será a base da barragem, servindo como fundação. Normalmente as barragens piloto são feitas de material argiloso ou enrocamento compactado, pois, como base, deve resistir a deslizamentos e ter uma capacidade de suporte adequada para prevenir recalques em excesso. Após o término do dique inicial, inicia-se a partir da crista, o processo de lançamento dos rejeitos. A sequência de alteamentos desse método é demonstrada através da figura 2 (a), (b) e (c).

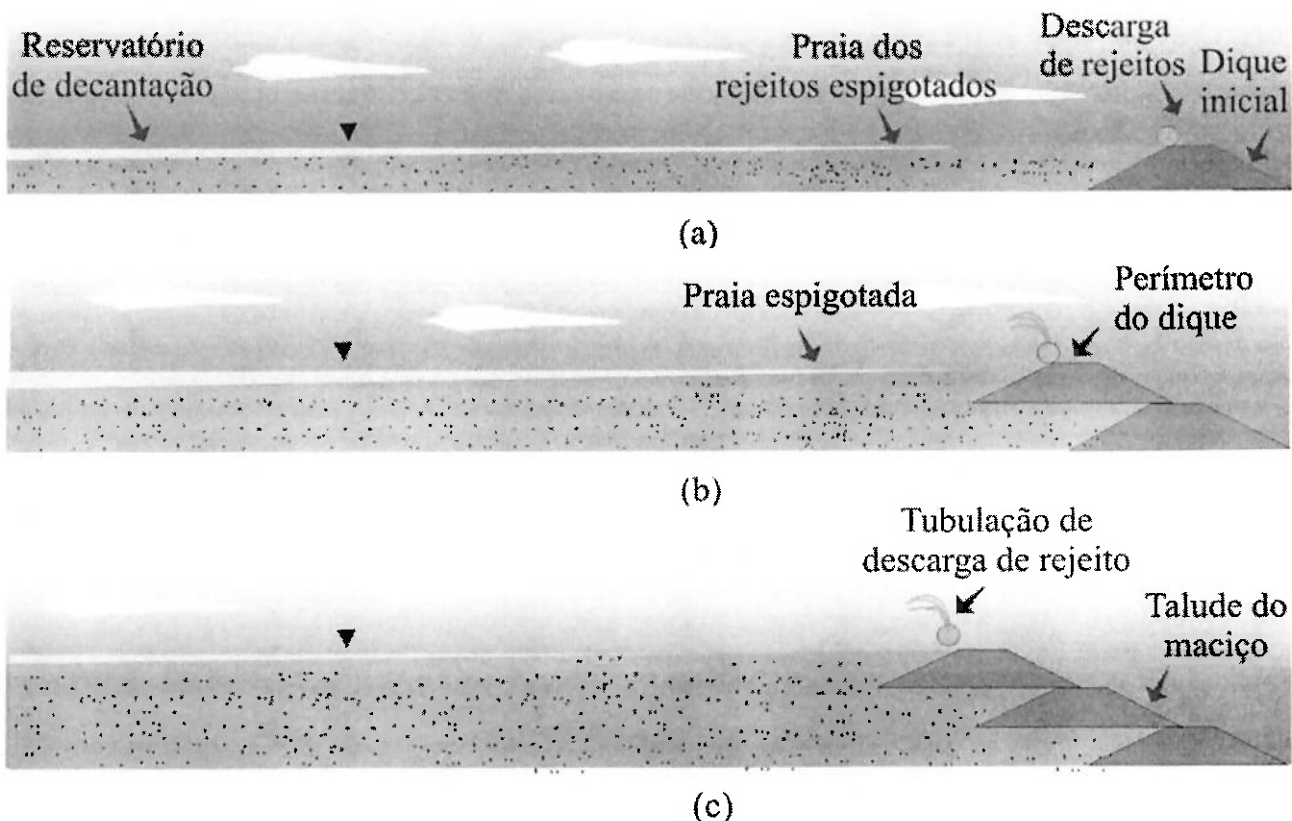


Figura 2 - Sequência de alteamento pelo método de montante (fonte: Maia Neto)

Durante o processo de lançamento, ocorrem segregações granulométricas do rejeito, ficando a fração mais grosseira depositada próxima ao maciço e as frações mais finas, também conhecidas como lamas, fluem ou são lançadas e depositadas no lago de decantação do barramento.

Segundo Soares e Fujimura (1998), para que o material lançado sirva como base para um novo alteamento, é necessário que os rejeitos contenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa para ocorrer a segregação granulométrica. A segregação é essencial para a diferenciação entre o material que formará o corpo da barragem do material que será depositado na bacia de decantação.

Vários são os trabalhos que apontam vantagens e desvantagens desse método. Dentre as vantagens, podem ser citadas:

- Menor custo de construção;
- Menores volumes de materiais envolvidos no alteamento;
- Uso de pequena quantidade de equipamentos de terraplenagem;
- Maior velocidade de alteamento;
- Possibilidade de proteção imediata dos taludes de jusante.

Como desvantagens, podem ser apontadas:

- Menor coeficiente de segurança em função de a linha freática estar geralmente situada muito próxima ao talude de jusante;
- Superfície crítica de ruptura passar pelos rejeitos sedimentados, porém não devidamente compactados;
- Possibilidade de ocorrência de “piping” devido ao surgimento de água na superfície do talude de jusante, principalmente quando ocorre concentração entre dois diques compactados;
- Risco de ruptura devido a liquefação da massa de rejeitos por efeito de sismos naturais ou vibrações causadas por explosões ou movimentação de equipamentos;
- Limitada altura de alteamentos; e dificuldades na implantação de drenagem interna devido ao fato de o eixo da barragem se movimentar a montante.

O método de montante é o mais econômico entre os métodos clássicos de construção de barragens, daí vem o fato de ser o mais utilizado. Contudo esse é o método que envolve os maiores riscos de ruptura, tendo em vista a dificuldade em se prever e controlar a compactação do maciço e a posição da linha freática na barragem e, portanto, cuidados devem ser tomados.

Dentre os cuidados que devem ser tomados para se ter um maior controle e segurança numa barragem construída pelo método de montante, podem ser citados:

- Evitar retenções de água próximo à crista;
- Os rejeitos devem ter fração arenosa drenante lançados na concentração de 40 a 60% de sólidos, que permite a segregação do material junto à barragem;
- Descartar a possibilidade de utilização desse método em regiões em que ocorram vibrações de origem tectônica ou motivadas por escavações, desmontes ou até mesmo movimentação de veículos;
- Evitar que o nível do reservatório fique próximo da crista da barragem criando sistemas extravasadores para lidar com possíveis variações no ciclo de chuvas, por exemplo, evitando overtopping;
- Controlar o nível do lago de decantação para evitar a elevação do nível freático no corpo da barragem;
- Tratamento do talude de jusante através de cobertura vegetal evitando erosões na barragem;
- Monitoramento da barragem em toda a sua vida e também na fase de abandono evitando catástrofes.

2.2 Método da Linha de Jusante

O método de jusante recebe este nome devido ao fato de o eixo da barragem se deslocar pra jusante durante o processo de alteamento. Novamente o processo se inicia com a construção de um dique inicial, porém, nesse caso, o dique inicial deve ter seu talude de montante impermeabilizado, normalmente sendo usada argila compactada ou mantas de geotextil, além de necessitar de uma drenagem interna, com a presença de um filtro vertical e um tapete drenante.

Finalizada a etapa de construção do dique inicial, o processo de alteamento da barragem pode ser iniciado, novamente com os ciclones postados na crista, porém, nesse caso, somente os rejeitos grossos, provenientes do “underflow” dos ciclones são utilizados para o alteamento. As barragens construídas pelo método de jusante podem ser projetadas para grandes alturas, incorporando-se sempre no processo de construção, o sistema de impermeabilização e de drenagem,

contando também com a compactação do rejeito depositado, assim como o controle construtivo, que garantem a segurança desse tipo de construção.

A figura 3 (a), (b) e (d) representa tanto a seqüência de alteamento de uma barragem pelo método de jusante, quanto os elementos componentes desse tipo de barragem.

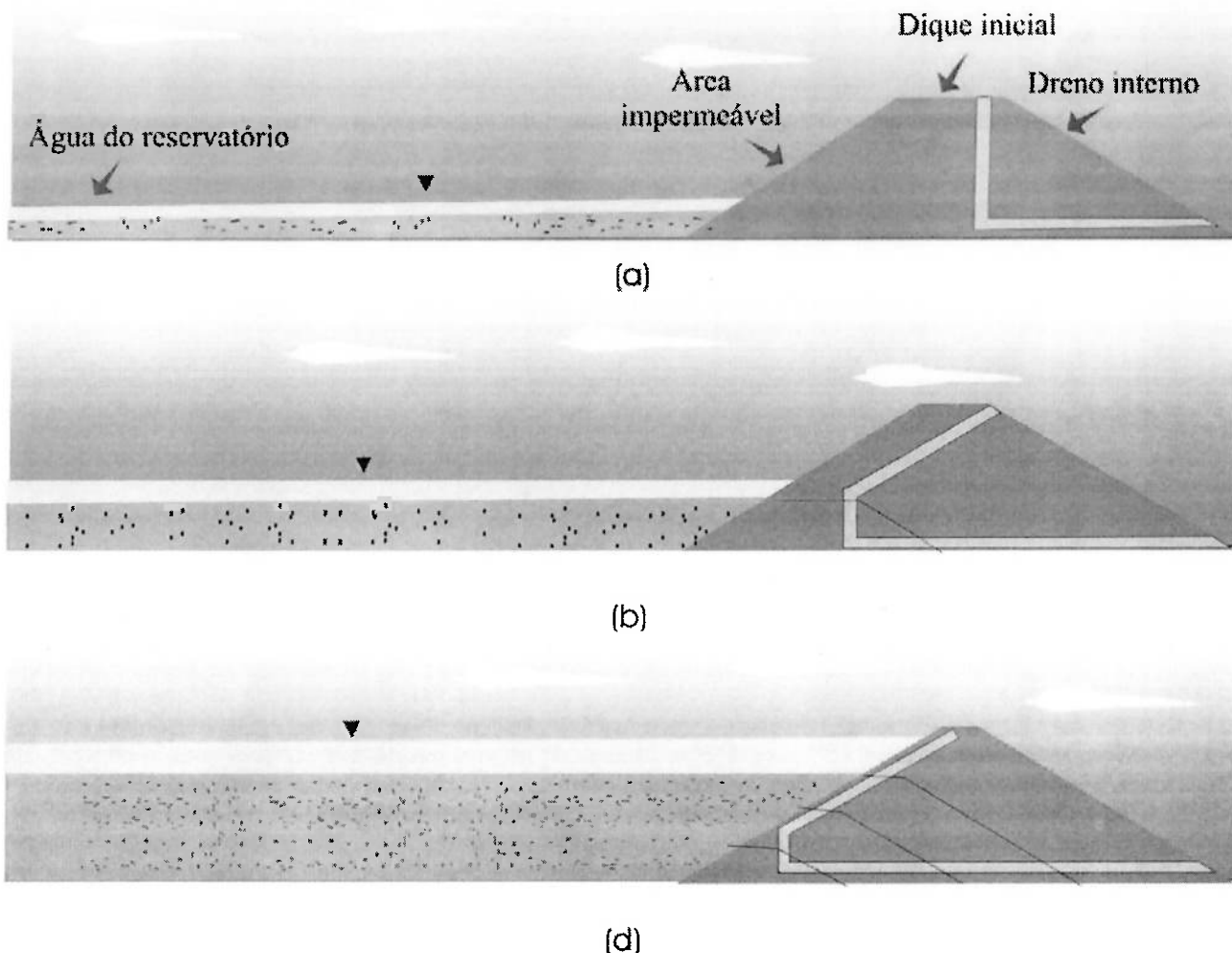


Figura 3 - Seqüência de alteamento pelo método de jusante (fonte: Maia Neto)

Assim como no método de montante, podem ser destacadas vantagens e desvantagens na utilização do método de jusante. Como vantagens desse método podem ser citadas:

- Maior segurança devido ao fato de utilizar um alteamento controlado, em que se encontram dispositivos de compactação, impermeabilização e controle;
- Menor probabilidade de “piping” e de rupturas horizontais, por possuírem impermeabilizantes no talude de montante, o que aumenta a resistência ao cisalhamento;
- Maior resistência a terremotos e vibrações provocadas pela movimentação de veículos ou desmontes por explosivos;
- Permite a instalação dos sistemas de drenagem, impermeabilização e controle durante o processo construtivo.

Entre as desvantagens do método de jusante, podem ser citadas:

- Custo elevado, por ser um tipo de construção mais sofisticada e com mais recursos comparativamente com o método de montante;
- Como somente o “underflow” é utilizado para o alteamento da barragem, a velocidade de alteamento é mais baixa;
- O volume de material a ser movimentado e compactado é maior nesse caso;

- A cobertura vegetal do talude de jusante não pode ser realizada nesse caso, devido ao fato de ser depositada sempre uma nova camada de material sobre esse talude durante o alteamento;
- Necessidade de construção de um enrocamento de pé para conter o avanço do “underflow” dos ciclones nos taludes de jusante.

O método de jusante é muito mais seguro do que o método de montante, porém, não é utilizado em larga escala devido ao fato de custar muito mais e gerar um trabalho muito maior no seu controle, impermeabilização e compactação, apesar de praticamente banir os riscos de “piping” e liquefação, caso seja bem construída.

2.3 Método da Linha de Centro

O método da linha de centro recebe este nome devido ao fato de o eixo da barragem permanecer sempre no mesmo eixo do dique inicial. Esse processo pode ser caracterizado como uma combinação dos métodos anteriores, sendo considerado um método intermediário inclusive em termos de custos. Seu comportamento estrutural aproxima-se mais do método de jusante, ou seja, mais seguro do que o método de montante.

Como citado, o processo inicia-se com a construção de um dique inicial, normalmente construído de argila compactada, preferencialmente impermeável. Finalizada essa etapa, os rejeitos passam a ser lançados a montante do dique inicial até a formação de uma praia de rejeitos e subsequente a esta etapa, inicia-se o alteamento da barragem, normalmente com o uso de hidrociclones que, neste caso, atuam classificando os rejeitos entre grossos e finos (lamas). Os grossos, por serem materiais que apresentam melhores características de resistência e permeabilidade, são encaminhados a jusante, enquanto que as lamas, por não serem materiais com boas características estruturais e por possuírem muita água em sua composição, são encaminhadas a montante da barragem, para a continuação da formação da praia de rejeitos e para o lago de decantação. A figura 4

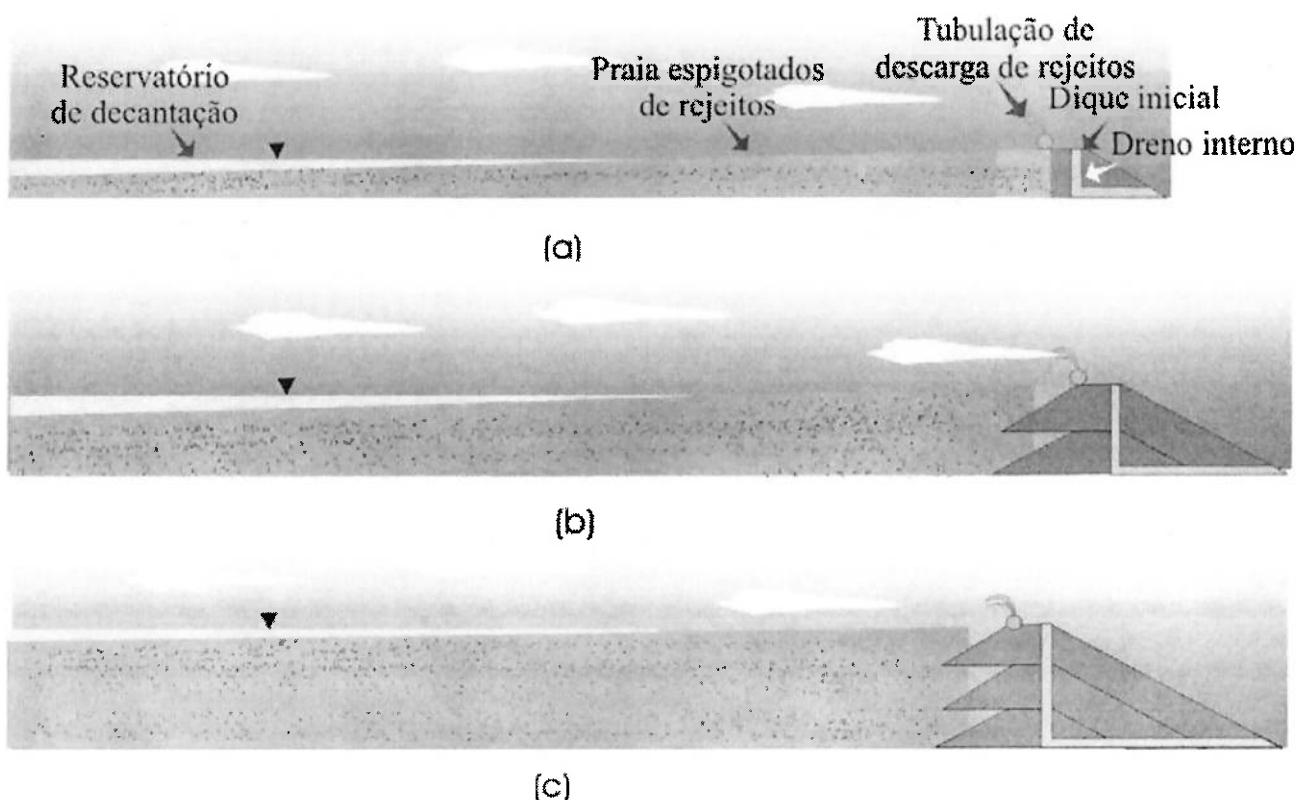


Figura 4 - Sequência de alteamento pelo método da linha de centro (fonte: Maia Neto)

Este método torna possível um controle da linha freática no talude de jusante do maciço, não sendo crítica a posição do nível de água no talude de montante. A figura 5 mostra um exemplo de linha freática elevada.

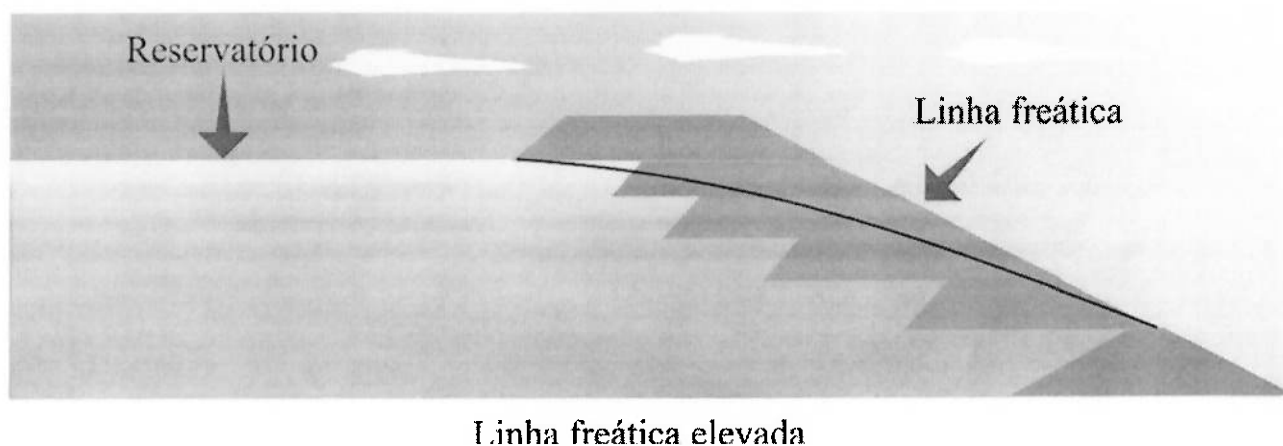


Figura 5 - Exemplo de linha freática elevada (fonte: Maia Neto)

Novamente, podem ser citadas vantagens e desvantagens desse método. Segundo Chammas (1986), algumas vantagens seriam:

- Facilidade construtiva;
- Posição constante do eixo da barragem, permitindo a fácil instalação de filtros;
- Permite o controle da linha freática no talude de jusante;
- O material para o alteamento pode vir de áreas de empréstimo, estéril ou "underflow" dos ciclones.

Como desvantagens deste método, podem ser citadas:

- A área de montante é passível de escorregamentos;
- Não permite o tratamento do talude de jusante, pois durante todo o processo de alteamento, é depositado rejeito sobre esse talude;
- Requer um enrocamento de pé para conter o avanço do "underflow".

Este método é o resultado de uma combinação dos outros dois métodos citados anteriormente e apresenta vantagens presentes em ambos, tentando minimizar suas desvantagens. Porém, alguns cuidados devem ser tomados para a viabilidade de utilização deste método:

- É muito importante que o rejeito não fique fofo e saturado de forma a comprometer a estabilidade de todo o maciço da barragem;
- O rejeito deve ser lançado perimetricamente, e imediatamente a montante do talude, tanto do dique de partida quanto dos alteamentos subsequentes;
- O rejeito deve ter características de suporte adequadas para os alteamentos, logo deve ter fração arenosa significativa, e o lançamento do material deve ser elaborado de modo a formar, por segregação, uma praia de material mais drenante imediatamente a montante da crista.

2.4 Comparação Entre os Métodos

Encontram-se descritas na tabela abaixo, características comparativas dos três métodos vistos anteriormente, de acordo com as classes características gerais, vantagens e desvantagens.

Tabela I – Comparação entre os métodos construtivos de barragens de rejeitos

	Método de Montante	Método de Jusante	Método da linha de centro
Características gerais	Método mais antigo e mais utilizado	Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé	Uso do "overflow" no talude de montante e do "underflow" no de jusante
	Lançamento dos rejeitos a montante	Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante	

	Sem dreno interno	Uso de hidrociclones	Uso de hidrociclones
Vantagens	Menor custo	Maior segurança	Custo intermediário
	Maior velocidade de alteamento	Compactação de todo o corpo da barragem	
	Menor volume movimentado	Maior resistência ao cisalhamento	Volume intermediário
	Proteção do talude de jusante	Controle da linha freática	
Desvantagens	Maior instabilidade dos taludes	Maior volume movimentado	Pode ser necessário estender os trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem
	Possibilidade de liquefação	Não se pode proteger o talude de jusante	
	Menor resistência ao cisalhamento	Maior custo	

2.5 Desenvolvimento do Projeto de Uma Barragem

A construção de uma barragem não é um projeto simples, deve ser realizado um longo estudo antes do início de um projeto como este, assim como a realização de um acompanhamento e monitoramento da mesma em sua fase de alteamento e também na fase de abandono. No início do projeto é formada uma equipe para cobrir todas as áreas necessárias para o sucesso do projeto, composta normalmente por profissionais especialistas na área de mineração, geologia de engenharia, geotecnia, hidrologia, hidrogeologia e gerenciamento de rejeitos. Essa equipe é responsável por encontrar um local ideal para a instalação da barragem, analisar e gerenciar os dados da região onde a barragem será construída, para que nada saia errado. Alguns dos dados utilizados no estudo de um projeto de uma barragem de rejeitos estão listados abaixo:

- Dados topográficos (altimetria e planimetria) da área em estudo;
- Dados climáticos da região;
- Dados hidrológicos: precipitação, pluviometria e precipitação média da bacia que possibilitem avaliação da bacia em estudo quanto para bacias à jusante;
- Medidas pluviométricas da região, que permitem a obtenção de dados como vazões de escoamento superficial, taxas de infiltração e a necessidade de dispositivos de drenagem superficial;
- Mapeamentos geológicos e interpretação geotécnica dos tipos de solo;
- Propriedades dos materiais que serão utilizados para a construção da barragem, principalmente dados como índices físicos, resistência ao cisalhamento, adensamento e expansibilidade, permeabilidade, compactação, susceptibilidade de ruptura e de erosão interna, pelo vento e pela água;
- Estimativas da quantidade de rejeito e estéril a serem lançados na bacia de rejeitos durante a vida útil do empreendimento mineiro;
- Estudos sobre a área da barragem em si, determinando o tempo de utilização da barragem, assim como a necessidade de utilização de sistemas extravasadores.

Para a construção de uma barragem de rejeitos otimizada, há premissas que não podem ser deixadas de lado no momento do projeto, como premissas econômicas:

- A barragem deverá se localizar o mais próximo possível da área de beneficiamento;
- Sempre que possível situado a um nível mais baixo, de forma 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.

E premissas 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.

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens do MIT, 2002, deve ser feita a revisão e reavaliação do projeto e a construção deve ser pormenorizada para verificar se todos os elementos componentes da barragem como dispositivos de descarga, taludes e reservatório satisfazem todos os requisitos de segurança atualmente aplicáveis, preocupando-se sempre com a estabilidade da barragem até mesmo após o término das operações da mina, evitando desmoronamentos e contaminações nos solos.

3. PRINCIPAIS FENÔMENOS CAUSADORES DE RUPTURA EM BARRAGENS DE REJEITOS

A ruptura de uma barragem de contenção de rejeitos pode envolver problemas localizados, sem muitos impactos econômicos, sociais e ao meio ambiente, restringindo-se apenas a uma pequena área, mas pode também envolver enormes alagamentos, com destruição de bens materiais, vidas humanas e causar um amplo prejuízo ao meio ambiente, além da interrupção do processo produtivo da mina.

Existem inúmeras publicações relativas a causas de acidentes em barragens convencionais que ajudam muito na prevenção de novos acidentes pelas mesmas circunstâncias, porém, no caso de barragens de rejeitos, muitas vezes essas causas não são conhecidas ou divulgadas junto ao meio técnico, aumentando a dificuldade em se ter um estudo de fatores que causam acidentes e métodos para evitá-los.

As barragens de rejeitos estão constantemente expostas e sujeitas a deslocamentos e deformações, devido ao seu processo de construção e a sua própria dimensão, além da ação de agentes internos e externos. As mudanças geométricas de uma barragem podem ser classificadas em deslocamento, quando as mudanças estruturais ocorrem na parte externa, ou deformação, quando as mudanças ocorrem na parte interna das estruturas.

As deformações podem ser identificadas por meio de diversas medidas realizadas nas barragens ou avaliações visuais e estruturais, como recalques excessivos, aumento da taxa de recalque, recalques localizados ou trincas nas cristas e taludes. Já no caso de um deslocamento, a geometria externa parece inalterada, não se notando uma mudança visual na forma da barragem, tratando-se apenas de um deslocamento vertical ou horizontal, bem como envolvendo uma translação ou rotação. Não necessariamente um deslocamento provocará uma deformação, porém, ocorrerá uma mudança na geometria interna, alterando-se a forma e ou tamanho da estrutura.

As deformações são consideradas os maiores problemas na vida de uma barragem de rejeitos. Elas surgem quando as barragens sofrem esforços solicitantes diferenciais, podendo surgir fissuras. Dentre os vários fatores que podem gerar fissuras, podem ser destacados:

- Formato, dimensões e propriedades mecânicas do material usado para a construção da barragem;
- Baixa resistência ao cisalhamento dos materiais da barragem;
- Altos valores de poropressão;
- Método de lançamento dos rejeitos, direção de movimento e grau de compactação obtido;
- Variação do nível d'água do reservatório;
- Movimentos ou abalos gerados em função de sismos, detonações na mineração ou decorrente de movimentação de veículos próximos às áreas da barragem;
- Declividade da superfície de fundação, ao longo do eixo longitudinal e seções transversais;
- Natureza da fundação, devendo possuir permeabilidade compatível com o objetivo de minimizar a percolação de água pelo corpo da barragem.

Segundo Baron (1986), os principais fenômenos causadores de queda de barragens de rejeito são: "overtopping", ruptura de fundação, "piping" e problemas ligados à percolação de água pelo corpo da barragem. As propriedades geomecânicas que mais afetam a estabilidade das barragens de rejeito são a granulometria, densidade/compactação, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e teor de umidade, devendo-se também considerar as propriedades mineralógicas dos rejeitos, pois as mesmas influenciam no potencial de riscos.

Apesar da escassez de informação relativa aos acidentes e muitas vezes até descaso por parte das empresas em apurar e demonstrar as causas de acidentes, estudos foram feitos para a obtenção de dados que possam ser úteis na prevenção desses acidentes. Arnez (1999) fez um levantamento dos acidentes gerados por fatores geológico-geotécnicos e os resultados de seu estudo, que considera 45 acidentes no total, são apresentados na tabela abaixo:

Tabela II – Frequência da causa de acidentes (fonte: Arnez modificado)

Causa do acidente	Número de acidentes	Frequência relativa (%)	Número de acidentes (acumulado)
Liquefação	21	46.7	21
Não definida	13	28.9	34
"Piping"	11	24.4	45
Total	45	100.0	45

No estudo de Arnez (1999), pode ser observado que a maior causa de rupturas de barragens de rejeito, é a Liquefação com uma porcentagem de 46,7%, seguida pela ruptura por causas não definidas com porcentagem de 28,9% e "piping" com 24,4%.

Avaliando-se o estudo de Arnez (1999), percebe-se que a liquefação e o "piping" correspondem juntos, a 71,1% dos acidentes em barragens de rejeitos causados por fatores geológico-geotécnicos, o que sugere uma análise mais aprofundada desses fenômenos. O principal fator que realmente gera esses dois fenômenos é a presença de líquidos que não são controlados durante as fases construtivas da barragem, no período de funcionamento ou na fase de abandono.

O problema da presença de líquidos é gerado pela percolação de água na barragem, ou pela posição do nível do lençol freático. Ambos os fatores são naturais em todas as barragens de rejeito, porém devem ser controlados para evitar desastres futuros.

No caso da percolação, se não controlada, podem ser gerados problemas como a perda de água excessiva e pressões neutras, que podem conduzir a ruptura da barragem, portanto, a mesma deve possuir um sistema de drenagem muito eficiente.

Analisando a posição do lençol freático, nota-se que a mesma exerce influência fundamental no comportamento da barragem, interferindo em sua estabilidade estática e dinâmica. Assim esse fator passa a ser muito importante, tendo que ser controlado por meio de drenos e utilizando-se materiais que sigam as especificações construtivas, a fim de evitar fluxos preferenciais de água pelo corpo da barragem e prevenir rupturas hidráulicas e "piping".

Como citado anteriormente, existem diversos fenômenos responsáveis por desastres em barragens de rejeitos, porém normalmente não há somente um fenômeno responsável pela ruptura, mas sim uma combinação de dois ou mais fenômenos. Para a simplificação, serão explicados abaixo os diferentes fenômenos analisados individualmente.

3.1 "Overtopping"

O "overtopping" é um fenômeno comum nos fatores de ruptura de barragens de rejeito, apesar de ser considerado como um fator evitável. Isso ocorre, pois o "overtopping" é um fenômeno normalmente decorrente de uma falha no projeto da barragem, em que o projetista não considera, ou subestima fatores como a variação no ciclo de chuvas da região, não deixando uma grande borda livre que suporte tais variações, assim como variações no nível d'água na barragem devido à queda de grandes porções de rocha, normalmente proveniente dos morros que cercam a barragem.

O fenômeno "overtopping" ocorre quando, por algum motivo, a quantidade de água na barragem ultrapassa a quantidade prevista no projeto, ocasionando a passagem dessa água por sobre a crista da barragem, que acaba não suportando tais esforços e o resultado é o rompimento dessa barragem.

Por ser um fenômeno amplamente responsável pelo rompimento de barragens de rejeito, merece uma atenção especial e um cuidado em excesso por parte do projetista da barragem, para evitar que o barramento seja rompido por um fenômeno que poderia ter sido evitado. Para evitar que ocorra o "overtopping" existem também, inúmeros dispositivos de segurança que podem ser incorporados a uma barragem de rejeitos a fim de escoar o excesso de água não previsto em projeto. Esses dispositivos são conhecidos como extravasadores, porém serão abordados na seção de métodos preventivos em barragens de rejeito.

3.2 "Piping"

O fenômeno denominado "piping" é caracterizado pelo movimento de partículas de uma massa de solo, de dentro do corpo da barragem, carregadas por percolação d'água. O fenômeno inicia-se sob condições de gradiente hidráulico crítico

e provoca a abertura de canais dentro da massa de solo em sentido contrário ao fluxo d'água, razão pela qual o "piping" é também conhecido pelo nome de erosão interna regressiva.

Segundo Vargas (1977), a ruptura por "piping" se dá nos casos em que há a erosão, que apesar de ser interna, não difere muito da erosão superficial causada pela chuva. Essa erosão interna inicia-se num ponto de emergência d'água e progride para trás carreando os grãos de solo em forma de filetes d'água, cujo gradiente é suficiente para arrastar os grãos. Como resultado dessa erosão, tem-se a formação de um tubo ao longo do filete d'água crítico, que cada vez mais aumenta seu fluxo e, conseqüentemente, o número de grãos carregados, gerando, portanto a ruptura da barragem de rejeitos que não resiste a esse carregamento.

Segundo Vick (1983), os problemas do "piping" são devido à ausência ou uso impróprio de filtros nas barragens de rejeito, onde são encontrados rejeitos grossos em contato direto com os rejeitos mais finos. Os pés dos taludes são as regiões mais críticas de uma barragem, pois a velocidade de percolação e a pressão de percolação correspondente são muito maiores nesse ponto do que na parte superior do talude, gerando mais problemas nas linhas de fluxo que se dirigem para o pé do talude. Conseqüentemente o pé do talude terá mais facilmente uma situação de desequilíbrio pelo arraste de partículas, que causará um colapso dessa região e acabará causando a ruptura da barragem, pois a parte superior também entrará em colapso por falta de apoio.

A tendência do arraste de partículas dá-se com maior incidência em solos desprovidos de, ou com baixa coesão. Como exemplos de solos críticos com relação aos fenômenos de erosão interna, podem ser citados os siltes grossos e areias finas, diferentemente das areias grossas e pedregulhos, que têm um maior volume de vazios e seus grãos são mais pesados e dificilmente arrastados por percolação, favorecendo, portanto, o fluxo d'água e reduzindo as chances de ruptura por "piping" nesse tipo de solo.

Para a prevenção do fenômeno "piping", são sugeridos diversos métodos. Entre os métodos que têm mais aplicação nas barragens atuais, podem ser citados a construção de filtros e tapetes drenantes nas barragens e a construção da barragem com solos que tenham em sua estrutura, uma graduação com relação ao tamanho dos grãos encontrados.

Com relação à presença de filtros e tapetes, eles têm a função de impedir que os grãos sejam carregados pela água, retendo os grãos e permitindo somente a passagem da água. Os filtros e tapetes de drenagem devem ser instalados em qualquer superfície onde haja emergência d'água.

Já no caso da construção de barragens com materiais que tenham uma graduação com relação ao tamanho dos grãos, o próprio material da barragem atuaria como um dispositivo de proteção para evitar o carregamento dos grãos, pois os mesmos, sendo de diversos tamanhos, encontrariam-se intertravados na estrutura da barragem de rejeitos. Dessa forma cada grão maior impediria o movimento dos grãos imediatamente menores, e assim sucessivamente até os mais finos.

3.3 Liquefação

Liquefação é o nome dado ao fenômeno da repentina redução da resistência ao cisalhamento devido a um acréscimo rápido da pressão intersticial. Esse fenômeno tem maior incidência em solos granulares e materiais não-coesivos, como areias finas de grãos arredondados e siltes grossos, quando estão saturados ou submersos.

O rápido acréscimo da pressão intersticial, juntamente com a água que percola o corpo da barragem de rejeito acarreta a transformação temporária da areia ou silte em uma solução muito concentrada. Essa solução se movimenta no corpo da barragem, reduzindo ainda mais sua resistência ao cisalhamento e podendo levar até a ruptura da barragem. Uma vez iniciado o movimento, o material corre como se fosse um líquido e não pára até que o ângulo de inclinação se torne muito abatido, causando uma instabilidade em todo o barramento.

Os principais agentes que causam a liquefação em barragens de rejeitos são os terremotos, impacto de ondas, tráfego de veículos pesados próximo à barragem, cravação de estacas, operação de máquinas pesadas e desmonte por explosivos próximos à área da barragem. Essas ações geram vibrações que são transmitidas ao substrato da barragem e causam a liquefação.

A liquefação é um fenômeno muito prejudicial à estrutura de uma barragem de rejeitos e é a causa de grande parte das rupturas. A liquefação não é um fenômeno que possa ser identificado a olho nu e não possui muitos métodos para seu controle, dessa forma, para sua prevenção, deve ser tomado um grande cuidado para evitar a realização das ações citadas anteriormente próximo às áreas da barragem, evitando-se assim a variação rápida das pressões intersticiais e tentando-se controlar a liquefação.

4. SISTEMAS DE SEGURANÇA EM BARRAGENS DE REJEITOS

As obras de barragens de rejeitos devem ser projetadas para áreas que evitem o acesso d'água natural, devendo a barragem, ser utilizada somente com o objetivo de conter os rejeitos da mineração e evitando que tenha que ser construído um barramento muito maior do que o necessário em função do acesso d'água natural, assim como evitando a construção de vertedouros que tornam o projeto mais caro.

Embora muitas vezes possa ser reduzido o volume de água natural no barramento, não se consegue evitar o acesso dessa água à barragem. Essa água, assim como a água disposta juntamente com os rejeitos, sai da barragem de diversas maneiras, como infiltração no subsolo, evaporação, recuperação para o processo de beneficiamento, percolação pela barragem e resurgência sob a barragem. Porém, em alguns casos, esses fenômenos não são suficientes para a retirada da água, então, por questões de segurança, devem ser instalados no reservatório sistemas extravasores, para evitar que uma variação no ciclo de chuvas, por exemplo, venha a causar a ruptura da barragem por "overtopping". A figura 5 mostra as diversas formas de entrada e saída de água numa barragem de rejeitos.

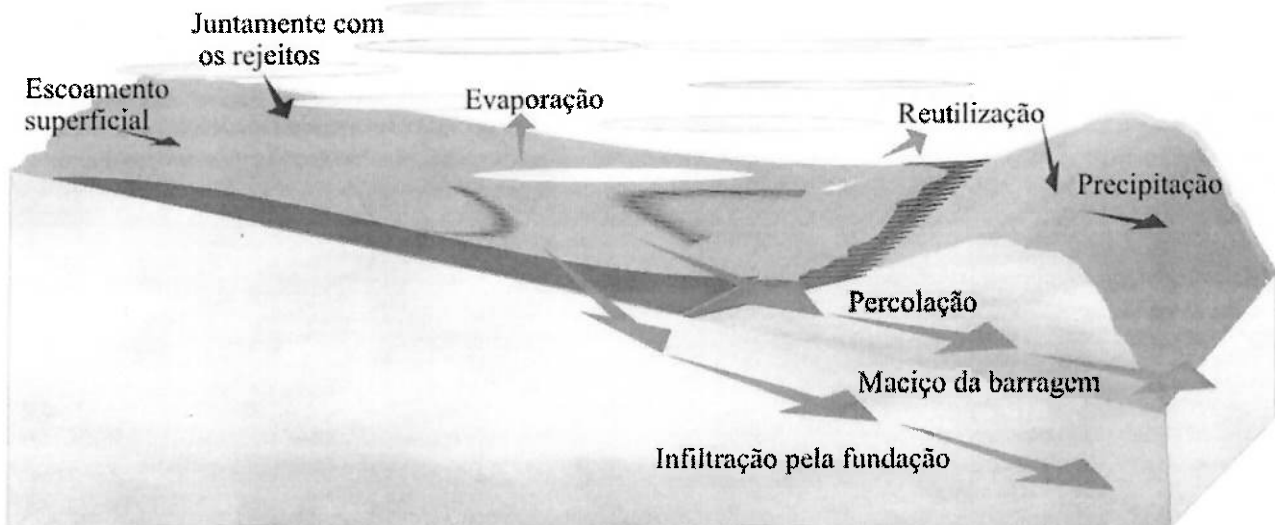


Figura 6 - Formas de entrada e saída de água no reservatório da barragem (fonte: Maia Neto)

Como as obras que compõem um sistema extravasor são caras, a escolha deve ser feita com base no sistema que melhor se encaixe às condições da obra, considerando-se as dimensões da barragem e reservatório e às situações emergenciais. Atualmente os sistemas extravasores que estão disponíveis para a descarga da água excedente com o objetivo de manter o nível d'água desejado são 4 e serão explicados na sequência.

4.1 Tulipa

O sistema extravasor tulipa consiste de uma torre de concreto armado ou tubulação de metal construída dentro do reservatório. Essa tubulação possui janelas, com as quais é possível controlar o nível d'água no reservatório. A torre é conectada a uma galeria de fundo, que transporta o material retirado pela torre a jusante, passando pela fundação da barragem por intermédio de um túnel. Muito cuidado deve ser tomado na construção desse tipo de extravasor, para que uma possível quantidade de rejeito arrastada juntamente com a água, não sedimente na galeria de fundo, causando entupimento e também devem ser tomados cuidados para que a construção do túnel pelo corpo da barragem não gere riscos de "piping".

O sistema tulipa é um dos sistemas mais utilizados atualmente, devido à sua facilidade construtiva, possibilidade de alteamentos, manutenção e limpeza. Outra vantagem muito importante desse sistema, é que ele não necessita da utilização de equipamentos mecânicos para a sua operação, tornando-a automática e necessitando apenas de manutenção caso o sistema esteja funcionando corretamente.

4.2 Galeria de Encosta

Esse sistema extravasor é composto de uma galeria de concreto ou tubos metálicos, inclinada sobre a encosta que constitui a ombreira da barragem. Essa galeria esco a água por intermédio de uma galeria de fundo que atravessa o corpo da barragem, descarregando a jusante da mesma. A galeria inclinada apresenta “janelas” que podem ser fechadas, podendo-se controlar o nível d’água que se deseja no reservatório. Essa galeria pode ser aumentada gradativamente junto com a barragem, porém deve-se tomar muito cuidado na construção das “janelas”, principalmente das mais profundas, para que não haja defeitos, visto que seu reparo torna-se muito difícil e em muitos casos até impossível.

Da mesma forma que o sistema tulipa, a galeria de encosta é um sistema extravasor que também não necessita de equipamentos mecânicos para sua operação.

4.3 Pontão

O sistema pontão é utilizado quando se deseja recuperar a água para sua reutilização na usina de beneficiamento. O sistema funciona da seguinte maneira: uma balsa montada com bombas d’água é colocada dentro do reservatório, para a captação da água e encaminhamento da mesma para o processo. A grande vantagem desse tipo de sistema é que a balsa pode ser movimentada para as regiões do reservatório que apresentam uma maior quantidade de água “limpa”, onde o processo de sedimentação já terminou. Dessa forma é possível manter o nível do reservatório longe do corpo da barragem a um custo considerado baixo. A principal desvantagem desse sistema reside na possibilidade de falha das bombas e ao alto custo de manutenção associado a elas.

O pontão é um sistema eficiente quando se deseja aproveitar a água do reservatório no processo de beneficiamento, considerado de certa forma barato, porém, como possui bombas d’água nesse processo, maiores cuidados na operação e manutenção devem ser tomados para que o sistema extravasor possa ter uma vida útil maior e sejam reduzidos gastos por imperícia ou falta de cuidado.

4.4 Sifão

O sistema sifão é um sistema extravasor semelhante ao sistema pontão, pois também trabalha somente retirando do reservatório a água “limpa”, que também é transportada por tubulação de aço, cimento-amianto, mangotes, ou outros materiais por sobre o corpo da barragem até jusante, só que nesse caso, ao invés de utilizar bombas, é utilizado um equipamento que realiza o transporte por meio da diferença de pressão entre o ponto de captação e o ponto de descarga. Um dos maiores problemas do método é que esse sifonamento está sujeito a cavitação quando as pressões são muito baixas, condicionando o uso desse sistema para barragens em que a diferença de nível entre montante e jusante não ultrapasse 6 metros.

Este processo preconiza uma vigilância constante para evitar que problemas, como o entupimento, sejam causados e garantir que o sistema funcione de forma satisfatória.

5. INSTRUMENTAÇÃO EM BARRAGENS DE REJEITO

Em alguns casos de obras de engenharia, principalmente as que envolvam algum nível de risco e estejam diretamente relacionadas com possíveis danos ao meio ambiente, perdas materiais significativas ou risco de vida, deve ser feito um monitoramento dessas obras durante toda a sua vida e mesmo após seu término com o objetivo de evitar que os possíveis danos possam se tornar realidade. Como as barragens de rejeitos se encaixam perfeitamente na descrição feita acima, devem ser usados equipamentos para o controle dessas obras.

As técnicas de auscultação do comportamento de barragens de rejeitos incluem a seleção do tipo e a determinação da quantidade de instrumentos a serem utilizados, sua localização e instalação, a aquisição de dados, análise e a interpretação dos resultados. Esse conjunto de técnicas constitui o que se chama de instrumentação geotécnica, e tem sido objeto de grande interesse e desenvolvimento nos últimos anos.

A instrumentação de uma barragem não é simplesmente a definição dos equipamentos de controle a serem utilizados, mas sim uma interação entre a escolha dos equipamentos, captação dos dados, interpretação rigorosa dos dados por pessoas capacitadas e definição das ações a serem tomadas de acordo com o resultado das leituras realizadas.

Dunnicliff (1988) classifica os instrumentos de medida em duas categorias, dependendo de sua finalidade. Essa classificação é:

- Instrumentos utilizados para determinar as propriedades de solos e rochas in situ: medem parâmetros geotécnicos como resistência, compressibilidade e permeabilidade. Estes instrumentos são normalmente utilizados durante a fase de projeto das obras e como exemplos desse tipo de instrumentos, podem ser citados o piezocone, palheta e pressômetro.
- Instrumentos utilizados para monitorar o comportamento da obra durante suas fases de construção e operação, podendo envolver medidas importantes, como medidas de pressão da água subterrânea, tensão total, deformação e/ou carregamento aplicado. Como exemplos desses instrumentos podem ser citados piezômetros, células de carga, extensômetros e inclinômetros.

Juntamente com a auscultação das barragens de rejeitos, devem ser feitas inspeções visuais através de vistorias periódicas a campo refletindo em um processo qualitativo. Somente com todas as informações, tanto das leituras dos instrumentos instalados na barragem, quanto das inspeções de campo é que se pode ter uma medida da segurança das barragens, pois em certos casos os problemas surgem em regiões não instrumentadas, onde apenas as inspeções de campo podem detectá-los.

O programa de auscultação de uma barragem de rejeitos deve contemplar a descrição de todos os instrumentos utilizados, suas leituras iniciais, limites de projeto, dados e requisitos para sua calibração, faixas normais de operação e níveis de alarme, valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária. Deve-se ter também uma programação para a leitura dos instrumentos e instruções bem claras para uma pronta avaliação dos dados, para que o tempo não seja desperdiçado na interpretação, tendo-se uma interpretação prévia e ações pré-determinadas para cada faixa de leitura, observando se as mesmas estão dentro dos limites previstos no projeto ou se são leituras atípicas e exigem a tomada de algumas ações.

As barragens de rejeitos necessitam do controle através da instrumentação para a segurança das mesmas, a fim de serem evitados acidentes que possam culminar em grandes prejuízos. As principais grandezas comumente monitoradas em barragens de rejeitos para sua análise de segurança são:

- Deslocamentos;
- Deformações e tensões;
- Níveis piezométricos em fundação;
- Pressões de água;
- Vazão.

É importante notar-se que os instrumentos instalados nas barragens devem ser confiáveis, sendo confeccionados por empresas especialistas, calibrados sob supervisão adequada e instalados por uma equipe credenciada e experiente. Se algum desses critérios falharem, o instrumento pode não ter efeito algum e não estar sendo utilizado de maneira correta, em nada adiantando sua instalação e leituras.

As medidas que mais trazem preocupações quando se trata de barragens de rejeitos, tendo, portanto que ser as mais controladas, são as medidas relativas ao fluxo d'água pelo corpo da barragem por percolação e as medidas de deslocamento. Com relação a essas medidas, os principais instrumentos de controle são os piezômetros, para medidas do nível d'água no corpo da barragem e os inclinômetros, para medidas do deslocamento.

6. CONCLUSÃO

As barragens de rejeitos são muito importantes na engenharia de minas por diversos motivos, como fonte de água para o processo de beneficiamento dos minerais e por ser um grande potencial de riscos com relação ao meio ambiente, prejuízos financeiro e riscos de vidas.

Por conta desses fatores, um grande cuidado no processo de projeto, construção, operação e abandono, devem ser tomados, para evitar qualquer tipo de prejuízo para a mineração, meio ambiente e vidas humanas. Para isso existem diversos sistemas de prevenção de acidentes e controle de barragens de rejeitos através da instrumentação, usando-se também, para cada caso, o tipo de método construtivo que mais se adéque às necessidades da região. Como demonstrado no presente trabalho, uma barragem que seja alteada por um método que tenha controle com presença de filtros e tapetes de drenagem, assim como a presença de instrumentos que controlem os fatores críticos com relação à estabilidade, consegue manter-se estável durante sua vida e fase de abandono.

Conclui-se, portanto que barragens de rejeitos são obras muito importantes e somente são notadas quando algum acidente ocorre com as mesmas, porém se controladas de maneira correta desde sua fase de concepção de projeto, problemas não serão encontrados e prejuízos não acontecerão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnez, F.I.V. Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos devido a fatores geológicos e geotécnicos. (Dissertação) – Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.
- Assis, A; Espósito, T. Construção de barragens de rejeitos sob uma visão geotécnica. Ouro Preto, MG. 1995.
- Chammas, R. Contribuição ao estudo dos rejeitos da mineração, e dos seus sistemas de contenção. In: Seminário sobre Barragens de Contenção e Rejeitos. UFOP, pp 101-127. 1986.
- Espósito, J.T. Controle geotécnico da construção de barragens de rejeito – análise da estabilidade de taludes e estudos de percolação. São Paulo, 1995. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- Nieble, C.M.; Rocha, R. dos S. O método da linha de centro modificado na construção de barragens de rejeito. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XI. Fortaleza, Ceará. 1974.
- Vick, S.G. Siting and design of tailings impoundments.
- Vick, S.G. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons. New York. 1983.
- Barron, K. Waste embankment. Edmonton, University of Alberta. Mining Engineering Department, 1986.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Coletânea de normas de mineração e meio ambiente. NBR 13028, Rio de Janeiro, 1993.
- Soares, L; Fujimura, F. Barragens de contenção de rejeitos: metodologia de implantação, operação e manutenção. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da USP, 1998. (Notas do curso).
- Kohn, E.J. Tailings dam design. In: SEMINAR ON GEOTECHNICAL ASPECTS OF MINE DESIGN AND TAILINGS CONTAINMENT, Edmonton, 1982.
- Análise Dinâmica de Rompimento em Barragem de Rejeitos, disponível em <<http://www.ibape.org.br/downloads/XIII-cobreap/18p.pdf>>, acessado em 23 de setembro de 2009.
- Site do Departamento Nacional de Produção Mineral, disponível em <www.dnrm.gov.br>, acessado em 23 de setembro de 2009.