

CETEM

**Centro de Tecnologia Mineral
Ministério da Ciência e Tecnologia**

Coordenação de Processos Mineraiis – COPM

Barragem de Rejeitos

Lindolfo Soares

**Rio de Janeiro
Agosto/2010**

CCL00410010

**Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 19 – pág. 831–896.
Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e
Silvia Cristina A. França.**

BARRAGEM DE REJEITOS

Lindolfo Soares

Geólogo pelo Instituto de Geociências da USP
Doutor em Engenharia Geotécnica pela USP-São Carlos
Professor do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP

INTRODUÇÃO

As atividades relacionadas à produção mineral geram um volume significativo de massa do minério que é rejeitada nos processos de lavra e beneficiamento. A disposição desses rejeitos, à semelhança daqueles resultantes de atividades industriais, urbanas ou de pesquisas nucleares, é, na atualidade, um contratempo à indústria mineral.

A crescente demanda mundial por bens minerais, aliada ao desenvolvimento econômico e tecnológico, condiciona, de forma sustentável e economicamente viável, o aproveitamento de minérios de baixo teor ou mesmo aqueles de difícil beneficiamento. Esta situação conduz a um aumento expressivo na quantidade de rejeitos produzidos, superando, em muito, aquela advinda dos próprios minérios. Na Figura 1, ilustram-se as quantidades médias de rejeitos e produtos gerados nos processos de beneficiamento.

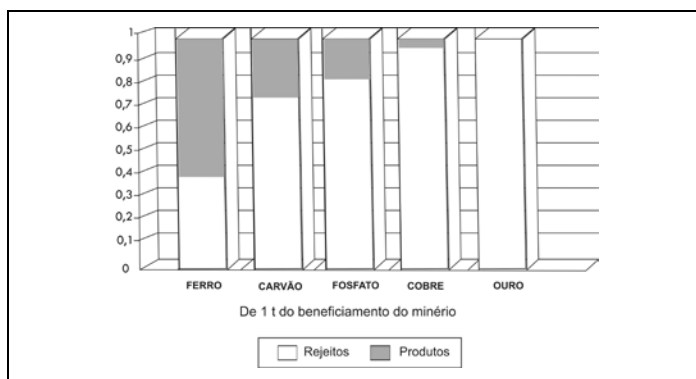


Figura 1 – Quantidade média de rejeitos gerada nos processos de beneficiamento.

No presente, a tecnologia utiliza métodos seguros de deposição de rejeitos, em especial, os lançamentos dos mesmos em barragens. A construção das barragens pode se dar por meio de processos tradicionais (de terra compactada, por exemplo), pela utilização do próprio material resultante do beneficiamento ou, ainda, com o estéril.

Tais estruturas devem atender às exigências de proteção ambiental e de segurança, além de inserir-se como parte integrante do processo produtivo, atendendo, por exemplo, as necessidades de recuperação e introdução da água nos circuito da mina e da usina de concentração. Deve-se também ter como horizonte a possibilidade de, no futuro, reaproveitar este rejeito como um bem mineral, pois o avanço tecnológico e a escassez de bens minerais poderão viabilizar este empreendimento.

É conclusivo que um projeto de barragem de rejeitos abrange diversas áreas do conhecimento com igual índice de importância. Neste trabalho, procurou-se discutir o assunto de forma abrangente, com linguagem simples e acessível a todos os especialistas da área, além de contribuir, de alguma forma, para o avanço da tecnologia mineral no Brasil.

CONCEPÇÃO DO PROJETO DE BARRAGEM DE REJEITOS

A crescente geração de rejeitos tem conduzido a um aumento significativo das estruturas armazenadoras, fazendo com que, atualmente, as barragens de rejeitos encontrem-se entre as importantes obras da mineração. Concomitantemente ao aumento das dimensões dessas barragens, os vários acidentes ocorridos com as mesmas despertam a atenção da comunidade técnico-científica e de autoridades governamentais para a questão de segurança destas obras. A facilidade de operação e a inserção segura da obra no meio ambiente, associada à sua viabilidade econômica, são requisitos básicos de um sistema de disposição de rejeitos em barragens.

A disposição controlada dos rejeitos parece causar um aumento do custo de produção sem trazer benefícios imediatos para a empresa mineradora. Ademais, a tecnologia aplicada ao projeto e construção de barragens não acompanha a evolução tecnológica dos projetos de mineração, inclusive a evolução dos projetos e construção de barragens convencionais. Como consequência, esta atividade tem sido negligenciada durante muito tempo na área de mineração.

O projeto de barragens de contenção de rejeitos constitui-se em uma especialização inserida no contexto da construção de barragens convencionais. Existem, contudo, algumas diferenças fundamentais entre as tecnologias aplicadas ao projeto e construção das barragens de terra convencionais e as barragens construídas com rejeitos.

Normalmente, os materiais de construção empregados em barragens de terra são mais adequados, melhor caracterizados e passam sempre por controle de compactação. Entretanto, os materiais usados no alteamento das barragens de rejeitos sempre contêm porcentagem mais elevada de água, e os contratempos causados pela liquefação ocorrem, quase sempre, em proporções mais graves.

A construção de barragens de rejeito deve ser um processo continuado, isto é, estendendo-se por praticamente todo o período da atividade mineira, possibilitando um acompanhamento dos resultados e possíveis modificações e aprimoramentos do projeto inicial. Desse modo, pode-se dispor, de forma segura, todos os rejeitos gerados no processamento, minimizando os riscos de acidentes.

No Quadro 1, constam alguns acidentes ocorridos em barragens de contenção de rejeitos, nos qual se observam os danos materiais ocasionados e associados à perda de vidas humanas.

Quadro 1 – Exemplos de rupturas de barragens de contenção de rejeitos.

Ano	Mina/Local	Causas da Ruptura	Danos Provocados
1965	El Cobre - Chile	Terremoto/liquefação	210 vítimas, soterramento do povoado.
1970	Mufaline Mine/África	Não definida	89 vítimas – 453.000 m ³ de rejeitos saturados.
1972	Buffalo Creek/West - Virginia	Não definida	110 mortos, 1.100 feridos, 1.500 casas destruídas – 595.000 m ³ de lama.
1974	Impala Platinum África do Sul	Entubamento (<i>piping</i>)	12 vítimas, 3 milhões m ³ de lama fluíram por 45 km, destruindo estradas, pontes e soterrando reservatório de água potável.
1985	Prealpi/Trento - Itália	Material de construção	Liberação de 200.000 m ³ de rejeitos. 268 vítimas.
1985	Cerro Negro/Chile	Sismo induzido e liquefação	Lama dos rejeitos fluiu até 85 km a jusante.
1985	Pico S.Luiz/Minas Gerais	Solapamento do pé do aterro e entubamento	Lama fluiu até 10 km a jusante. Pontes e estrada de ferro.
1986	Fernandinho/Itaminas - MG	Liquefação	4 vítimas. Destruição de laboratórios e equipamentos.
1996	Mina do Porco/Bolívia	Entubamento (<i>piping</i>)	3 vítimas – Fazendas, gado, flora e fauna; 300 km de rio contaminados.

Registra-se, ainda, que entre 1970 e 1998 ocorreram 25 grandes acidentes com barragens de contenção de rejeitos. A maioria resultou de condicionantes geológicos e geotécnicos (sismos, fundações, entubamento ou *piping*, liquefação e materiais de construção, entre outros). Na Tabela 1, consta a distribuição da frequência de acidentes, segundo suas causas.

Tabela 1 – Principais causas de acidentes em barragens de rejeitos.

Causas	Número de Acidentes	Frequência Relativa (%)
Liquefação	21	46,7
Entubamento	11	24,4
Não definida	13	28,9
TOTAL	45	100,0

Fonte: Arnez, 1999.

Diante das observações discutidas sobre as principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos, entende-se que a concepção do projeto de um sistema de disposição de rejeitos de mineração exige o conhecimento de todas as características dos materiais com os quais serão realizadas as obras. Além disso, outras considerações devem ser levadas a efeito: a dinâmica construtiva, o conjunto de operações da mina e também as características do meio físico no qual as obras estarão inseridas. Em resumo, trata-se de um projeto multidisciplinar.

Na elaboração do projeto de barragem, além dos dados disponíveis, devem ser considerados os riscos associados aos custos do projeto e as disponibilidades orçamentárias. O conjunto de operações ligadas ao projeto de implantação de barragem construída com o próprio rejeito compreende basicamente:

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| (i) espessamento; | (v) sistema de recuperação da água; |
| (ii) hidrociclonagem; | (vi) drenagem superficial e profunda; |
| (iii) transporte e descarga da polpa; | (vii) construção da barragem. |
| (iv) deposição dos rejeitos; | |

Espessamento

Normalmente, a construção de barragens com o próprio rejeito fundamenta-se, tecnicamente, em processos de lançamento de materiais, à semelhança de um aterro hidráulico.

Contudo, antes do lançamento dos rejeitos, procede-se ao desaguamento do mesmo como último estágio do beneficiamento. Nesta operação, não ocorre a secagem total do rejeito, mas uma remoção significativa da água contida na polpa, processo esse realizado por meio de espessamento.

Quase sempre o projeto de mineração prevê a recuperação da água para sua reutilização no processo. É comum, a utilização de espessadores (Figura 2) e hidrociclones (Figura 3). Nesta etapa do processo, os hidrociclones possuem baixa competitividade, em decorrência dos seus elevados custos operacionais e por não recuperarem diretamente a água de circulação.

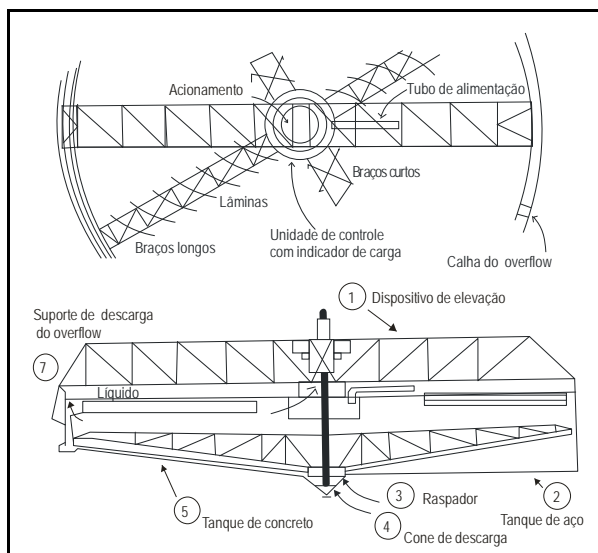


Figura 2 – Planta e seção esquemática de espessador.

Fonte: Cummins e Given, *apud* Vick, 1983.

O espessamento (desaguamento), caracterizado pelo adensamento da polpa, é o estágio final do processo de beneficiamento. Essa etapa influencia, de forma significativa, a produção e as características dos rejeitos. O emprego do espessador próximo à usina de concentração promove a recuperação da água a um custo relativamente baixo e propicia condições adequadas à obtenção de uma polpa com maior percentagem de sólidos, favorecendo o seu transporte até a barragem de rejeitos.

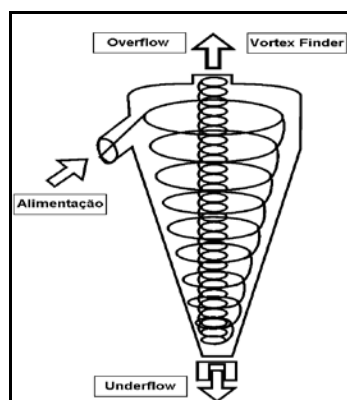


Figura 3 – Corte longitudinal de um hidrociclone.

Fonte: Warman Hero Equipamentos, 1998.

A fração mais grossa do hidrociclone, *underflow*, é empregada na construção do maciço da barragem, enquanto a fração mais fina, *overflow*, é lançada no reservatório resultante do barramento.

A água recuperada e os reagentes residuais podem ser recirculados e reaproveitados no processo de beneficiamento. Contudo, em alguns casos, o reaproveitamento não é possível por causa da existência de contaminantes que podem reduzir a eficiência do processo de beneficiamento do minério. Nestes casos, ocorrem implicações na disposição dos rejeitos (decantação, formação de praias, volume de águas armazenadas, dentre outros).

Transporte

Os rejeitos advindos do processo de beneficiamento após a etapa de espessamento são transportados na forma de polpa, aos locais de disposição em, praticamente, todas as minerações. Dentre os fatores determinantes da forma como se dará o transporte dessas polpas destacam-se:

- (i) topografia da área de manuseio dos rejeitos;
- (ii) volumes a serem depositados (tanto o volume gerado durante o período de produção como o volume total);
- (iii) distância entre o espessador e a área de deposição;
- (iv) consistência qualitativa do rejeito;
- (v) clima.

A polpa, geralmente, é muito abrasiva, com alta viscosidade e percentagem de sólidos que varia entre 15 e 55%. Em geral, o emprego de espessadores convencionais possibilita a obtenção de polpas com percentagens de sólidos na faixa entre 40 e 50%.

O transporte de polpa é feito com auxílio da gravidade, por meio de calhas abertas ou valetas e, mais comumente, por tubulação, com ou sem bombeamento. Este é determinado, basicamente, pela diferença de cota entre a usina de beneficiamento e a área onde se dará a disposição dos rejeitos e, ainda, pelo comprimento da tubulação e das perdas de carga resultantes. Este método permite o transporte do rejeito a grandes distâncias, por um custo operacional relativamente baixo.

O transporte da polpa em calhas de madeira ou de concreto é aplicado em locais de topografia descendente, no sentido usina/barragem. Estas calhas são intercaladas com caixas que promovem a dissipação de energia ou reduzem a turbulência da polpa e, ainda, permitem eventuais mudanças bruscas na direção de seu fluxo. No final dessas calhas, encontram-se, normalmente, caixas de recepção posicionadas a uma altura que atenda aos parâmetros hidráulicos direcionados ao lançamento da polpa. Destas caixas inicia-se o sistema de descarga, que consiste numa tubulação com inclinação pequena sobre a barragem em execução. Os rejeitos podem, ainda, ser transportados por caminhões de mina, geralmente fora de estradas, teleférico, correia transportadora ou uma combinação de qualquer dos métodos citados.

Em virtude da complexidade relacionada ao transporte de rejeitos por tubulação, recomenda-se um estudo criterioso, fundamentando-se nas características geotécnicas e hidráulicas, considerando os parâmetros inerentes à reologia da polpa transportada. Cabe ressaltar que a velocidade da polpa deve impossibilitar a sedimentação do material sólido, o que provocaria a obstrução da tubulação.

A velocidade mínima da polpa é peculiar a cada situação, porém, a maioria das tubulações opera com velocidades entre 1,5 a 3,0 m/s, dependendo da densidade da polpa, sua distribuição granulométrica e tamanho máximo das partículas. Ressalta-se que a operação com velocidades elevadas de polpa provoca excessivo desgaste nas tubulações, além de gerar perdas consideráveis de carga, provocando maior custo de bombeamento. Este desgaste pode ser minimizado pelo emprego de tubos revestidos internamente com borracha ou, ainda, tubos de polietileno de alta densidade, quando o transporte opera com bombeamento de baixas pressões. No projeto de transporte por duto, deve ainda ser prevista uma alternativa para o escoamento da polpa no duto, caso haja interrupção dos processos de bombeamento de rejeitos, evitando-se a obstrução da linha de transporte.

Descarga

O rejeito, na forma de polpa, é transportado, geralmente, até a área de disposição. Desse modo, as frações argilosas perdem totalmente a plasticidade e

coesão, por encontrarem-se acima de seu limite de liquidez, comportando-se como um fluido viscoso. Este rejeito pode ser lançado, na barragem, por métodos hidráulicos, em um só local ou em diversos pontos.

O processo mais empregado consiste no lançamento dos rejeitos a montante da superfície da água do lago de decantação, em praias anteriormente formadas e distribuídas ao longo do perímetro da barragem (descarga periférica). Todavia, esta forma de deposição torna-se, às vezes obrigatória, em função de razões estruturais.

Normalmente, das caixas de recepção da polpa inicia-se a tubulação de descarga (tubulação tronco) para o seu lançamento em área pré-selecionada. Em algumas circunstâncias, antes do lançamento da polpa na barragem, são empregados processos de hidrociclonagem para a separação das frações mais finas, *overflow*, das mais grossas, *underflow*. Desse modo, materiais mais grossos são utilizados na construção do corpo (maciço) da barragem, destinando a fração mais fina ao lago de decantação resultante do barramento. A hidrociclonagem possibilita a seleção e adequação dos materiais construtivos, portanto, tornou-se uma etapa muito importante na construção de uma barragem. Na ilustração da Figura 4, observa-se a localização do sistema de hidrociclonagem em relação ao dique inicial (aterro) da barragem.

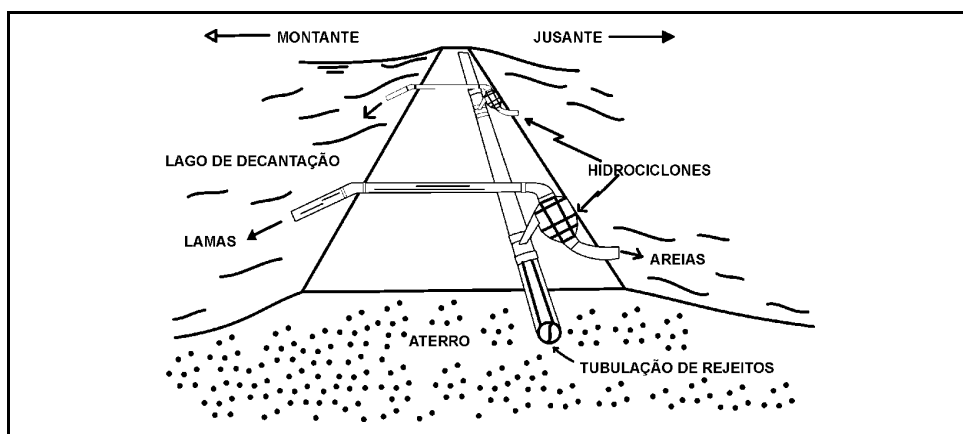


Figura 4 – Arranjo típico de hidrociclones ao longo da crista da barragem. Fonte: Department of Energy, Mines and Resources, 1972.

A descarga da polpa pode ocorrer por um ou vários pontos, segundo plugues (*spigots*) que controlam a descarga da polpa. No primeiro caso, as tubulações de transporte devem ser desconectadas e relocadas, de modo a possibilitar a formação sequencial de depósitos adjacentes (Figura 5A), enquanto os plugues realizam as mesmas funções, isto é, lançar os rejeitos em áreas contíguas. Os *spigots* ficam posicionados ao longo da tubulação, normalmente espaçados entre 15 e 45 m. O emprego desses dispositivos possibilita, ainda, o controle do lançamento dos rejeitos por válvulas individuais em cada um deles (Figura 5B).

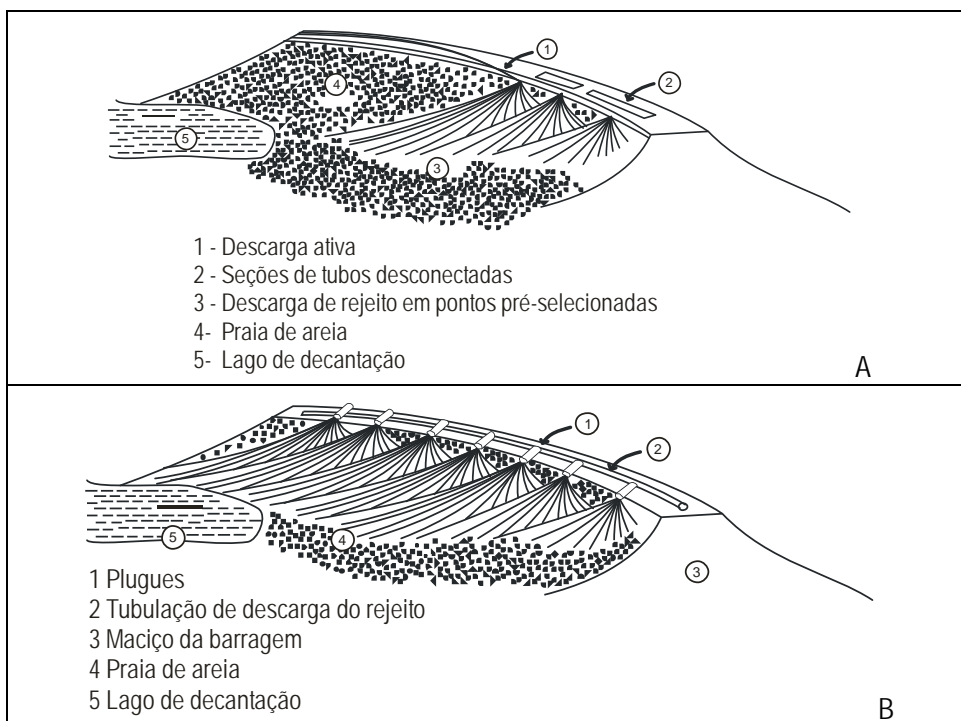


Figura 5 – Em A, método de descarga de polpa periférica por um único ponto e, em B, método de descarga periférica de polpa por *spigots*. Fonte: Vick, 1983.

Principais Características da Disposição dos Rejeitos

Em razão da grande diversidade dos rejeitos de mineração, as características dos materiais depositados podem conter variações significativas, quer em termos de diluição (o *overflow* dos hidrociclones chega ao máximo de 5%, enquanto o *underflow* dos espessadores frequentemente atingem 60%, ambos em peso), quer em termos de comportamento reológico, podendo os rejeitos depositados ser muito plásticos (argilas/lamas) ou não plásticos (areias/materiais grossos).

Com relação aos aspectos de disposição dos rejeitos, devem ser devidamente avaliados os processos de segregação do material, a inclinação dos depósitos formados pelo material (chamadas de praias), seu adensamento e a clarificação das águas.

A segregação do material lançado é um processo natural, segundo o qual a separação dos sedimentos contidos no rejeito se dá em função de sua densidade, granulometria e forma das partículas. Na Figura 6, consta a distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos em função da distância do ponto de lançamento.

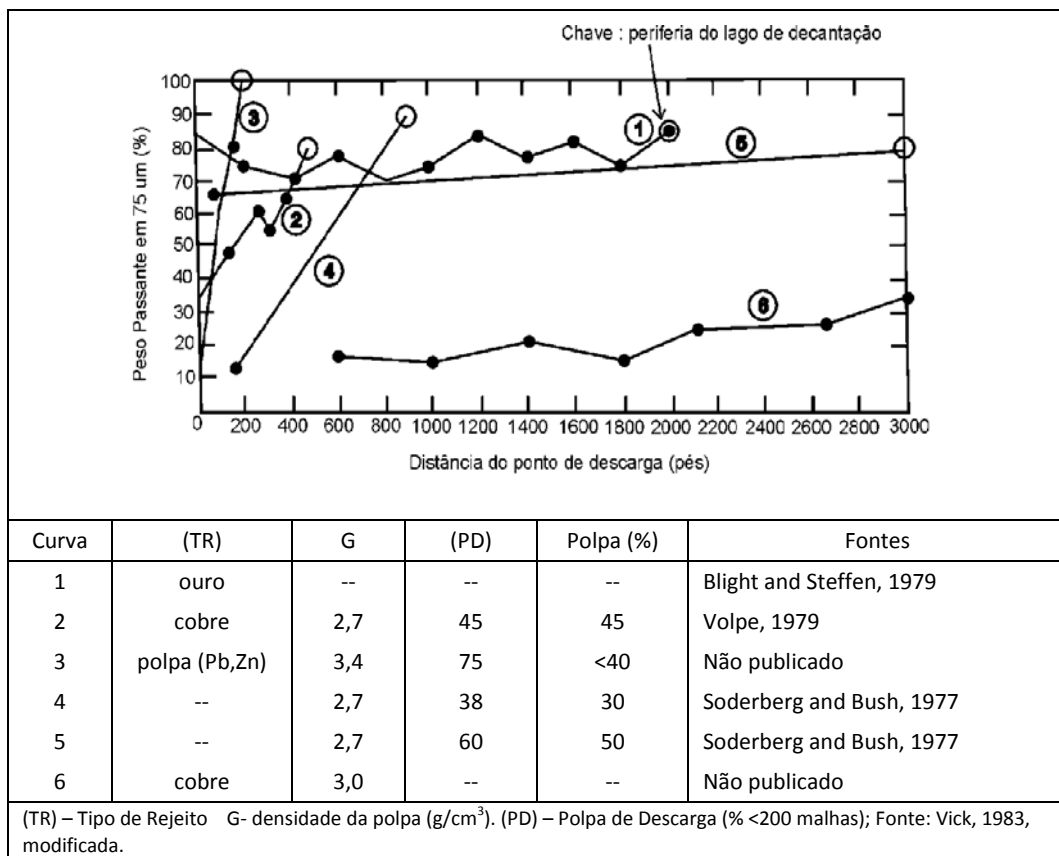


Figura 6 – Distribuição granulométrica ao longo de praias formadas por rejeitos.

Destaca-se que a granulometria do rejeito é uma característica importante e condiciona o comportamento da sua deposição. Esta é definida pela proporção entre resíduos grossos (areias) e finos (lamas), cujo limite granulométrico situa-se em torno de 74 µm (200 malhas).

Quando se procede ao lançamento dos rejeitos em um ponto qualquer do lago de decantação, a fração grossa tende a depositar-se no entorno desse ponto, enquanto os finos atingem distâncias crescentes, em função da diminuição de sua granulometria. Em termos reológicos, a permeabilidade e a resistência ao escoamento da polpa diminuem, conforme aumenta a distância do ponto de lançamento.

Vários rejeitos possuem quantidades consideráveis da fração argilosa, o que pode resultar em proporção muito alta do volume de vazio. Este fato exige o adensamento pelo processo de sedimentação, uma vez que tal situação irá indicar o volume do reservatório indispensável à armazenagem dos rejeitos.

Contudo, apenas a proporção de grossos e finos não conduz ao conhecimento completo dos sedimentos a serem depositados. São indispensáveis informações sobre o “coeficiente de uniformidade” das partículas, o que refletirá se o material depositado terá comportamento relativamente homogêneo ou se terá suas propriedades variando, consideravelmente, em função de sua distância do ponto de lançamento. Por exemplo, a sedimentação de partículas finas, quando não devidamente controlada, pode gerar níveis sem “coesão”, com elevado índice de vazios. Este fato pode resultar em um processo de liquefação, caso o depósito sofra súbito carregamento (estático ou dinâmico), com o conseqüente aumento das pressões neutras.

O processo de segregação resulta na formação de praias, cujo ângulo de deposição depende da porcentagem de sólidos contidos no rejeito. Quanto menor for a porcentagem de sólidos na polpa, menor seu ângulo de repouso. Este comportamento é importante para o cálculo de largura da praia a ser formada e, portanto, na definição da posição do sistema extravasor. A grande maioria dos diferentes tipos de rejeitos forma uma praia de deposição com inclinação entre 0,5 e 2,0% nos locais mais próximos do ponto de lançamento, todavia, podem atingir distâncias mais longas com inclinações que chegam a 0,1%.

Os processos de lançamento dos rejeitos formam depósitos muito heterogêneos, cujas camadas variam em espessura e distribuição granulométrica. Tais fatos são constatados pela seção vertical do depósito. A variação na direção horizontal da distribuição granulométrica destes materiais é também bastante significativa, com partículas arenosas avançando sobre praias argilosas e camadas de lama depositadas sobre essas praias, em função das oscilações do nível no lago de decantação. Normalmente, os ensaios laboratoriais de carregamento e sedimentação não refletem, com exatidão, as condições observadas em campo.

A Figura 7 ilustra a segregação das partículas de rejeitos graníticos e carbonáticos ao longo de praias de sedimentação.

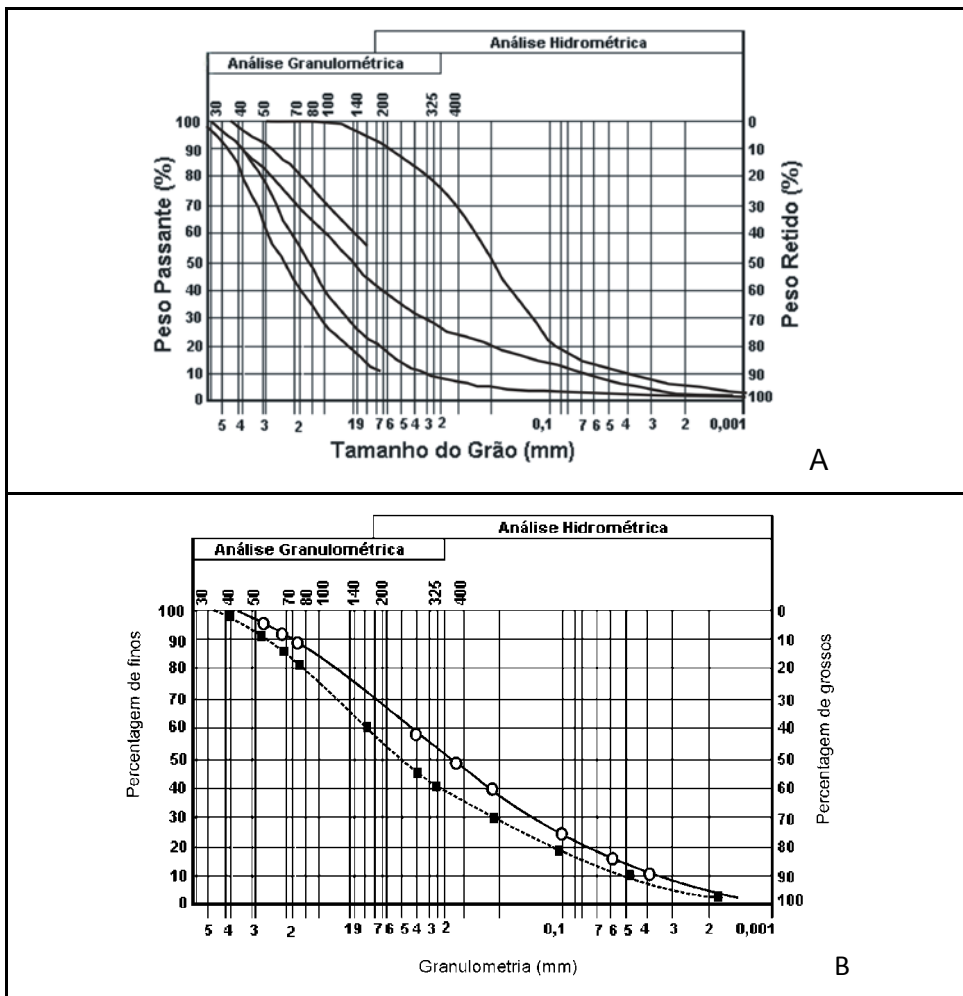


Figura 7 – Em A, segregação granulométrica de material granítico ao longo de praias formadas por rejeitos e, em B, segregação granulométrica de material calcáreo ao longo de praias formadas por rejeitos. Fonte: Soderberg e Bush, 1977.

No entanto, a deposição da fração argilosa contida nas lamelas do lago de decantação difere completamente dos processos de formação de praias, caracterizando a deposição das argilas quase que exclusivamente, por movimentação vertical. A taxa de sedimentação das lamelas influencia na definição do tamanho do lago de decantação, em função do volume de água que deverá ser reciclado ao processo de beneficiamento. A taxa de sedimentação pode ser determinada por ensaios laboratoriais com as polpas dos rejeitos e, após terminada a fase de sedimentação, pode-se determinar o índice de vazios inicial que as polpas terão nas condições de campo. No gráfico da Figura 8, observa-se o resultado de teste de sedimentação de polpas em laboratório.

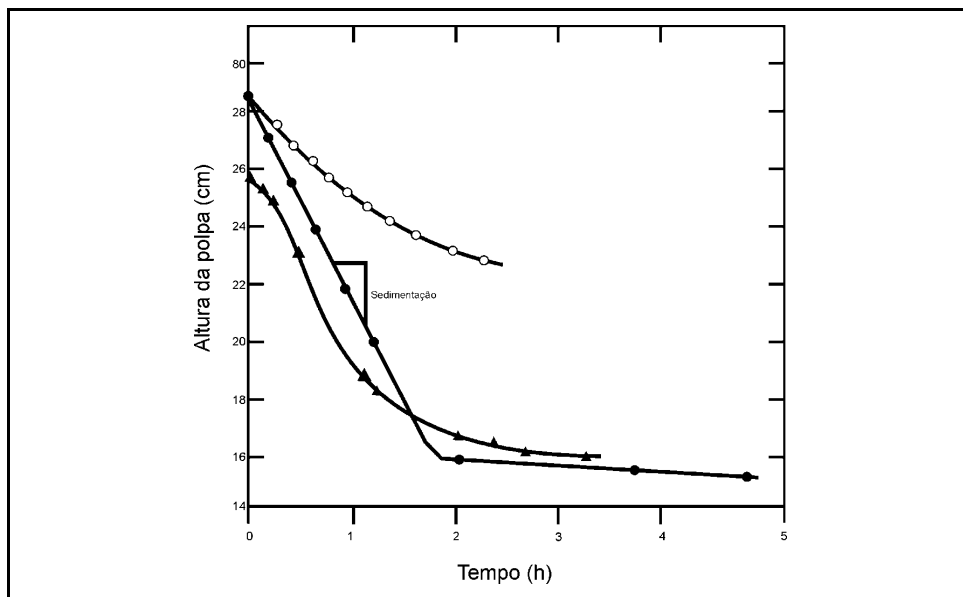


Figura 8 – Sedimentação de polpas de rejeitos de cobre. Fonte: Vick, 1983 *apud* Mittal & Morgenstern.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS REJEITOS

Os rejeitos são definidos como a fração do minério destituída de mineral útil ou de valor econômico, obtida por processo de beneficiamento mineral. Como neste processo a britagem e a moagem são etapas praticamente obrigatórias para a liberação dos minerais de interesse, as partículas geradas são angulosas, com bordas cortantes e superfícies rugosas exibindo fraturas frescas. Os rejeitos resultantes das diversas etapas do beneficiamento – lavagem, peneiramento, deslamagem, concentração gravítica e magnética, flotação, lixiviação, dentre outras – são constituídos em proporções variadas de gases, líquidos e sólidos.

Em função do tipo de minério processado e do método de beneficiamento adotado, os rejeitos, em geral, exibem características variáveis. Sob o aspecto granulométrico, esses são tidos como materiais finos, variando de colóides a areias. Assim, o projeto e construção de barragens utilizando rejeitos deve buscar informações capazes de definir os parâmetros de controle de qualidade desses rejeitos em substituição aos procedimentos empíricos comumente adotados.

O comportamento geotécnico dos rejeitos está ligado às características do material, à natureza do depósito e à forma como foi depositado. Estes depósitos resultam em duas classes distintas de material: areias lançadas por mecanismos hidráulicos e lamas depositadas por sedimentação. A granulometria é a característica mais importante e determina o comportamento dos rejeitos.

A determinação das características geotécnicas dos rejeitos é feita com base nos índices convencionais da Mecânica dos Solos, quais sejam: massa específica aparente, umidade, limites de liquidez e plasticidade, índice de plasticidade e granulometria.

As principais características geotécnicas dos rejeitos que devem ser conhecidas são: densidade *in situ*; limites de Atterberg; índice de vazios inicial; consolidação ou adensamento; compressibilidade; permeabilidade e resistência ao cisalhamento.

Densidade *In Situ*

A densidade é normalmente expressa em termos de densidade seca ou índice de vazios e depende dos seguintes fatores: gravidade específica, granulometria e conteúdo argiloso. A densidade dos grãos de um determinado rejeito pode variar entre amplos limites, influenciando, desta forma, no comportamento da massa do rejeito total.

A densidade *in situ* e a umidade do rejeito dependem do método de lançamento e de sua posição relativamente à barragem. A densidade aparente seca do material sedimentado nos reservatórios é bastante variável, situando-se na faixa entre 0,5 e 1,5 t/m³. Em geral, por causa da compressibilidade dos rejeitos depositados hidraulicamente, a densidade *in situ* aumenta com a profundidade. A variação da densidade aparente seca, em função da profundidade em que se encontra o rejeito, pode ser visualizada nas Figura 9.

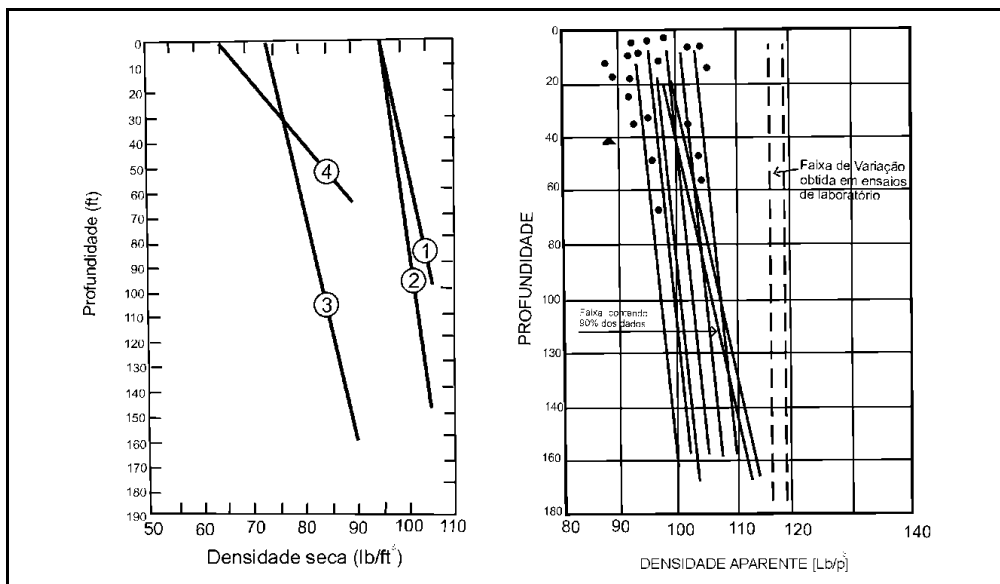


Figura 9 – À esquerda, aumento da densidade *in situ* dos rejeitos com a profundidade e, à direita, variação da densidade aparente seca com a profundidade. Fonte: Gregório Filho & Nieble, 1975; Vick, 1983; Gregório Filho & Nible, 1975.

Limites de Atterberg

A maior parte dos rejeitos resultantes dos processos de beneficiamento mineral não possui plasticidade. Os rejeitos dificilmente atingem índice de plasticidade acima de 25%.

Índice de Vazios Inicial

O índice de vazios inicial (e_i) é definido como a linha de fronteira entre a sedimentação e a consolidação. Neste caso, as partículas estão em contato, ocorrendo assim a transferência de esforços entre as mesmas. Em geral, não é simples definir quando ocorre o término da sedimentação e o início da consolidação, o que leva à adoção de um índice de vazios inicial, geralmente, arbitrário. Na prática, pequenas discrepâncias na seleção do e_i não influenciam, de forma significativa, na definição da capacidade de armazenamento do reservatório. Se o valor de e_i estiver pouco acima ou abaixo do valor verdadeiro, o tempo de consolidação pode estar errado em algumas semanas, valor este pouco expressivo em relação ao período de alguns anos, para que ocorra a consolidação total. O índice de vazios é expresso pela Equação 1.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad [1]$$

em que: e - índice de vazios; V_v - volume de vazios; V_s - volume de sólidos.

Na prática, pode-se assumir que o valor de e_i é aproximadamente igual ao índice de vazios correspondente ao limite de liquidez da amostra, multiplicado por 7.

Desta forma tem-se:

$$e_i = 7G \frac{(LL)}{100} = 0,07G(LL) \quad [2]$$

em que: G - peso específico dos sólidos secos; (LL) - limite de liquidez do material expresso em porcentagem.

Consolidação ou Adensamento

A consolidação das frações finas existentes nos rejeitos pode levar até dezenas de anos. Os materiais situados nas camadas mais profundas possuem baixos índices de vazios ou elevadas densidades secas, enquanto os mais próximos à superfície têm materiais com elevados índices de vazios.

Assim, a compacidade relativa (CR) de um material granular pode ser definida como:

$$CR = \frac{(e_{\max} - e)}{(e_{\max} - e_{\min})} \quad [3]$$

em que:

e_{\max} - índice de vazios máximo;

e_{\min} - índice de vazios mínimo;

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

Compressibilidade

O lançamento de rejeitos no reservatório por mecanismos hidráulicos possibilita a formação de camadas fofas, constituídas, geralmente, por grãos finos, alongados e angulosos, o que resulta em materiais de elevada compressibilidade. Quando estes materiais encontram-se em estado de saturação completa, associada aos baixos índices de permeabilidade, caso ocorra aplicação violenta de pressões externas, a fase líquida pode absorver parte ou a totalidade desta pressão. Neste caso, o rejeito poderá fluir como um líquido viscoso graças ao processo conhecido como liquefação. Nos solos grossos, este evento é bastante raro, sendo comum nos solos de granulometria arenosa mais fina.

Permeabilidade

Não é trivial a determinação ou avaliação do índice de permeabilidade, pois, o mesmo varia desde 10^{-2} cm/s, em areias grossas e limpas, até valores abaixo de 10^{-7} cm/s, em argilas consolidadas. Assim, a variação da permeabilidade pode ser caracterizada como função da dimensão dos grãos do rejeito, sua plasticidade, modo de lançamento e profundidade do material.

A segregação do material em função de sua granulometria influencia os valores da permeabilidade. Na Figura 10, observa-se a variação da permeabilidade e sua anisotropia ($V \times H$) em função da distância do ponto de descarga dos rejeitos no reservatório.

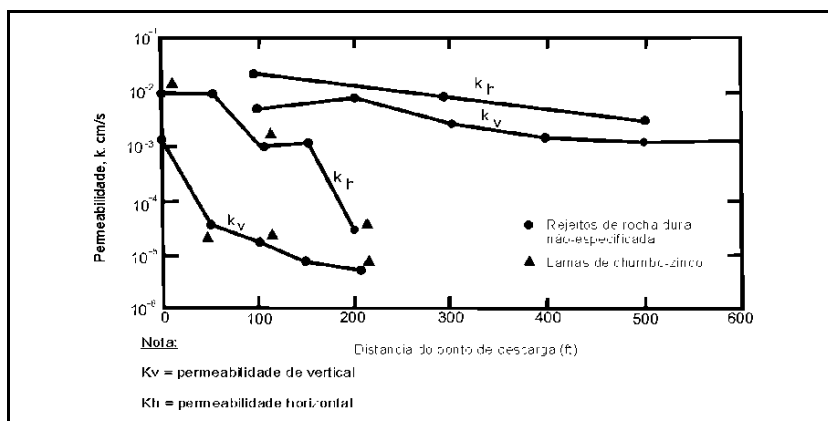


Figura 10 – Variação da permeabilidade e anisotropia em função da distância do local de descarga, para praias de rejeitos bem segregados.

Fonte: Soderberg & Bush, 1977.

Cabe assinalar que a influência do índice de vazios é bastante significativa na permeabilidade de rejeitos. Embora os valores do índice de permeabilidade variem com o índice de vazios, observa-se que a variação da permeabilidade com o decréscimo deste índice é bastante consistente para a maioria dos rejeitos arenosos e para aqueles de baixa plasticidade. O índice de vazios pode provocar variações na permeabilidade de até cinco vezes nos rejeitos grossos e, nas lamas, até dez vezes. Na Figura 11, os valores de permeabilidade média são plotados em função do índice de vazios de rejeitos.

Conforme os dados da Figura 11, os depósitos de rejeitos possuem variação da permeabilidade bastante significativa entre as direções horizontal (K_h) e vertical (K_v). Esta variação deve-se, basicamente, à natureza das camadas, e a razão entre a permeabilidade horizontal e vertical (K_h/K_v) situa-se, normalmente, entre 2 e 10, podendo esta relação, eventualmente, atingir valores em torno de 100, quando o lançamento dos rejeitos no reservatório não é bem controlado.

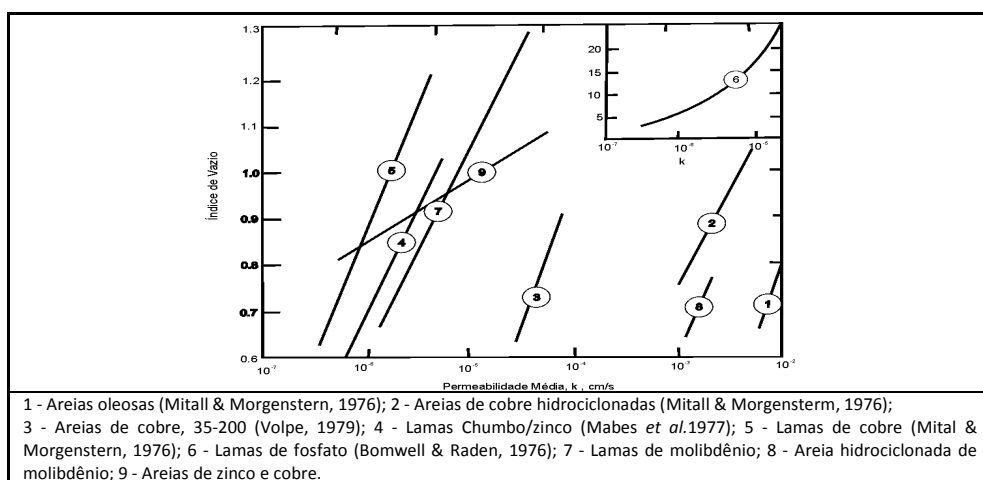


Figura 11 – Variação da permeabilidade média de rejeitos em função do índice de vazios. Fonte: Vick, 1983.

A segregação hidráulica está diretamente relacionada ao processo de deposição das partículas de tamanhos diferentes e a diferentes distâncias de lançamento. A concepção clássica da deposição hidráulica das partículas de rejeito e as permeabilidades esperadas estão exemplificadas na Figura 12, na qual se observam três zonas:

- (i) uma constituída por areias de alta permeabilidade, situada próxima ao ponto de descarga;
- (ii) outra constituída por lamas, de permeabilidade baixa, situada distante do ponto de lançamento;
- (iii) por último, aquela com permeabilidade intermediária situada entre estas duas primeiras.

A largura relativa de cada zona depende da proporção das areias e lamas, inclusive da posição do lago de decantação em relação ao ponto de descarga. Os valores relativos à permeabilidade mais frequentes de alguns rejeitos estão relacionados na Tabela 2.

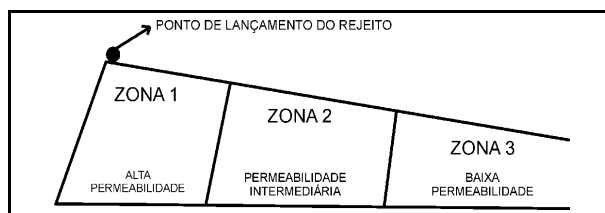


Figura 12 – Concepção da variação da permeabilidade num depósito de rejeitos.
Fonte: Kealy & Bush, 1971.

Tabela 2 – Valores relativos à permeabilidade para alguns rejeitos.

Tipo de Rejeito	Permeabilidade (k) (cm/s)
Ciclonado grosso, limpo, com menos de 15% abaixo de 74 μm .	10^{-2} a 10^{-3}
Espigotado, com até 30% abaixo de 74 μm .	10^{-3} a 5×10^{-4}
Lamas não plásticas ou de baixa plasticidade.	10^{-5} a 10^{-7}
Lamas de alta plasticidade.	10^{-4} a 10^{-8}

A estimativa da permeabilidade pode ser feita com base na sua granulometria. Segundo Hazen, a permeabilidade (K) pode ser estimada segundo o diâmetro efetivo d_{10} (diâmetro tal que o peso de todos os grãos menores constitua 10% do peso total da amostra).

$$K = 100 (d_{10})^2 \quad [4]$$

A expressão da Equação [4] deve ser usada apenas como ordem de grandeza e foi determinada empiricamente com grãos de areia uniforme, cujo diâmetro efetivo variava entre 0,01 e 0,3 cm.

A título de orientação, podem ser empregados os valores de permeabilidade relacionados na Tabela 3, elaborada segundo a experiência de campo e de técnicos que atuam no setor.

Tabela 3 – Valores estimados da permeabilidade em função da granulometria do solo.

K (cm/s)	10^2	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
Solo	Pedregulhos	Areia	AF	Argilas		

Fonte: ABGE, 1996. AF - Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos

Resistência ao Cisalhamento

A angulosidade das partículas dos rejeitos proporcionam um ângulo de atrito de 3 a 5°, maiores em relação àqueles dos materiais naturais de mesma densidade e ao mesmo nível de tensões. Os ângulos de atrito destes materiais decrescem com o nível de tensão aplicada, com valores na faixa de 35 a 40°, quando submetidos a tensões baixas, atingindo 28 a 33° para tensões mais elevadas. Cabe lembrar que os materiais constituintes dos rejeitos, com raras exceções, não são coesivos, isto é, são incapazes de conservar a estabilidade por ação de forças externas.

AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO

Um aspecto relevante e que condiciona o projeto e a construção de barragens com o próprio rejeito é a determinação da capacidade de armazenamento do reservatório. Este dimensionamento deve considerar, ainda, o volume de armazenamento de água, indispensável aos processos de beneficiamento, podendo resultar na construção de barragens de grande altura.

A capacidade de armazenamento do reservatório está diretamente ligada às condições de velocidade da polpa que o alimenta, condicionada por fatores topográficos, hidrológicos, clima, velocidade de deposição de rejeitos e extensão do eixo do barramento. A velocidade de sedimentação dos rejeitos grossos é muito elevada, o que o torna uma variável de pouca importância ao projeto. Para as lamas, contudo, a velocidade de sedimentação torna-se crítica para o dimensionamento do reservatório, definindo a espessura da zona de clarificação requerida, na qual ocorre a sedimentação/transição e adensamento dos materiais.

Como já visto, as lamas se depositam de maneira sub-horizontal, enquanto os grossos formam praias com ângulos de repouso variáveis, dependendo da percentagem de sólidos e da granulometria no lançamento, destacando a granulometria como fator determinante na construção de barragens, que é definida pela proporção de areia (rejeitos grossos) e pela proporção das lamas (rejeitos finos). Em qualquer caso, existe o processo de segregação, que pode ser interessante ou não, dependendo do projeto.

PRINCIPAIS MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS

O projeto de contenção de rejeitos, ou seja, de barragens construídas com o próprio rejeito, transformou-se em uma especialização na área de projetos de barragens convencionais, baseando-se em princípios semelhantes.

Barragens convencionais (terra compactada) são normalmente construídas em etapa única ou, eventualmente, em dois ou três alteamentos. Este procedimento é, quase sempre, executado por uma empresa construtora que opera a custo unitário ou preço fixo, seguindo especificações construtivas rígidas, operando com pessoal e equipamento próprios. A construção em duas ou mais etapas encarece o empreendimento, visto que implica em mobilização de pessoal e equipamento.

Nas minerações, as atividades seguem por longos períodos, com existência de canteiro de obras, oficinas, equipamentos e pessoal especializados. Além de economicamente atraente, o modo de construção da barragem por alteamentos sucessivos torna-se possível pelo próprio minerador. De mais a mais, possibilita ainda a adoção de grande flexibilidade construtiva, em função da variação de volumes de rejeitos a serem armazenados, ditada, por vezes, pelas flutuações de mercado. Outro aspecto de importância significativa é a existência de materiais de construção na própria mina, podendo ser empregados, além dos rejeitos, os materiais de decapeamento e estéreis da mina. Apesar de economicamente interessante, esse método exige uma perfeita integração das equipes da mineração e de projetistas durante todas as etapas da obra.

As barragens de contenção de rejeitos construídas por alteamentos sucessivos compreendem a execução inicial de uma barragem piloto, constituída por um dique de pequena altura (5 m) de terra compactada (dique inicial). Os alteamentos subsequentes acompanham o nível de rejeitos depositados no reservatório, até mesmo com uma borda livre que possibilita o armazenamento de água para reaproveitamento no processo de beneficiamento, além de minimizar os efeitos de inundações.

A ciclonação dos rejeitos tem sido prática comum na classificação dos sólidos grossos, que são empregados para construir (allear) a barragem, e dos sólidos finos que são lançados no reservatório da barragem (bacia de decantação).

Embora ocorram variações expressivas nos alteamento das barragens construídas com rejeitos, podem ser destacados três métodos mais comuns: de montante, de jusante de linha de centro. Estas denominações resultam do deslocamento que o eixo da barragem desenvolve durante seu alteamento. Deve-se assinalar que cada método deverá ser o mais adequado às combinações das variáveis condicionantes de cada projeto: topografia, hidrologia, geologia, tipos e propriedades do subsolo, granulometria e concentração dos rejeitos, velocidade de deposição, variação da capacidade de armazenamento do reservatório com o aumento da altura, disponibilidade de equipamentos de terraplanagem, compactação e equipes de controle. A seguir são discutidos os principais itens específicos a cada método de alteamento.

Método da Linha de Montante

Neste caso, o eixo da obra se desloca para montante e há o aproveitamento dos rejeitos depositados como parte da estrutura de contenção. Os rejeitos são lançados a montante desde a crista do dique inicial, formando uma praia, a qual servirá como fundação para a construção do novo alteamento. O procedimento sequenciado do alteamento neste método está esquematizado na Figura 13.

Durante o lançamento dos rejeitos, ocorre segregação granulométrica, ficando a fração mais grossa depositada próxima ao maciço. As frações mais finas (lamas) fluem em direção ao lago de decantação ou são lançadas no mesmo.

Para que o material lançado sirva de base para um novo alteamento, exige-se que os rejeitos contêmham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa, favorecendo a segregação granulométrica.

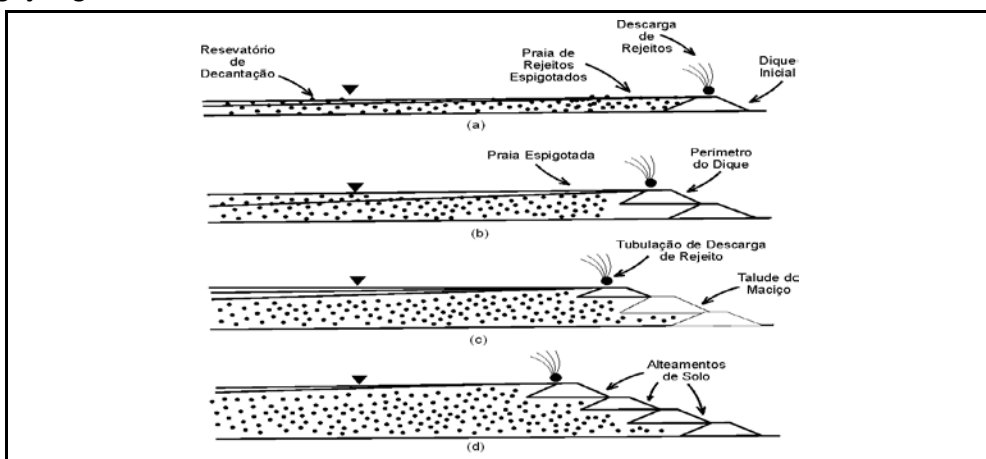


Figura 13 – Sequência de alteamento de barragens de rejeito pelo método de montante modificado. Fonte: Vick, 1983.

As vantagens e desvantagens deste método são destacadas a seguir.

Vantagens:

- (i) menor custo de construção;
- (ii) maior velocidade de alteamento;
- (iii) menores volumes na etapa de alteamento;
- (iv) pouco uso de equipamentos de terraplenagem.

Desvantagens:

- (i) menor coeficiente de segurança, em função da linha freática, em geral, situada muito próxima ao talude de jusante (Figura 14a);
- (ii) a superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados, porém não devidamente compactados (Figura 14b);
- (iii) há possibilidade de ocorrer entubamento, resultando no surgimento de água na superfície do talude de jusante, principalmente quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados (Figura 14c);
- (iv) há risco de ruptura provocado pela liquefação da massa de rejeitos, por efeito de sismos naturais ou vibrações causadas por explosões ou movimentação de equipamentos.

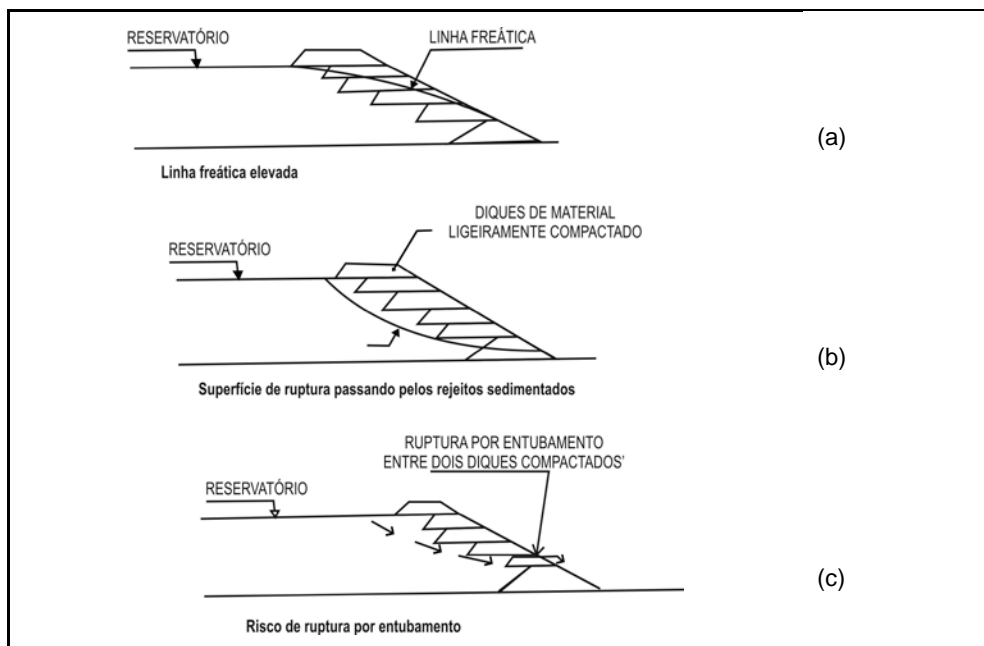


Figura 14 – Principais riscos de ruptura causados pelo alteamento segundo o método de montante. Fonte: Silveira & Reades, 1973.

Dentre os cuidados e aplicação de medidas relacionadas a este método com o propósito de melhorar a segurança e desempenho da obra, são normalmente recomendados os cuidados a seguir.

O lançamento dos rejeitos deve ser feito no perímetro do lago, imediatamente a montante do talude do dique inicial e dos alteamentos subsequentes.

Deve-se evitar retenções de água próximo à crista ou em áreas confinadas, por meio de um plano de lançamento de rejeitos e das manobras da tubulação de seu lançamento.

Os rejeitos devem ter fração arenosa, para favorecer a drenagem e serem lançados com uma concentração de sólidos que possibilite a segregação do material próximo à crista da barragem.

O nível de 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, sejam de origem tectônica (sismos naturais) ou provocadas por desmonte com explosivo 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 à velocidade de aumento das sobrecargas provocado pela velocidade de alteamento da barragem e pela velocidade de dissipação das pressões neutras.

A estabilidade destas obras é também ditada pelo avanço do lago de decantação, que pode elevar a superfície do nível freático no corpo da barragem, fazendo a água atingir as partes altas do talude de jusante da barragem, possibilitando o estabelecimento do processo de entubamento (Figura 15a).

Normalmente praias com baixa segregação dos rejeitos lançados, entubamento, baixa permeabilidade, ocasionam a elevação do nível freático no corpo da barragem, podendo, neste caso, também ocorrer entubamento causado pela surgência d'água no talude de jusante da barragem (Figura 15b);

O nível freático poderá também elevar-se caso as fundações da barragem sejam impermeáveis. Neste caso, a passagem da água ocorre apenas pelo corpo do barramento, podendo provocar o surgimento de água no talude de jusante, o que possibilita a formação de entubamento (Figura 15c).

Deve-se tratar o talude de jusante contra erosões provocadas pela ação de chuvas, à medida que a barragem vai sendo alteada. Este tratamento compreende a condução das águas por meio de canaletas e caixas de passagem. Por último, deve-se proceder à proteção superficial por cobertura vegetal.

O monitoramento da obra deve ser feito durante todo o período de alteamento, continuando na fase de desativação. Ou seja, trata-se de uma ação continuada.

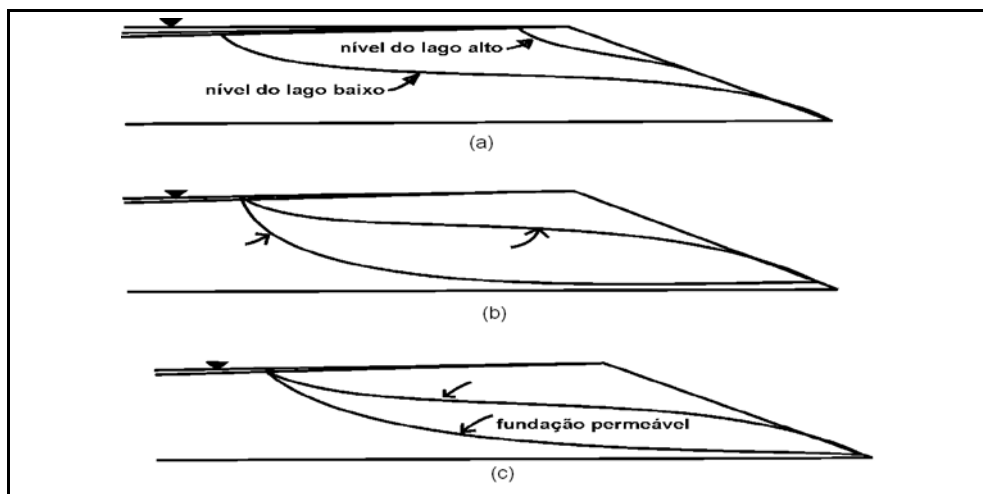


Figura 15 – Posicionamento do nível freático em função das características do projeto. Fonte: Nieble, 1986.

Método da Linha de Jusante

No método de jusante, a linha do centro (eixo da barragem), se desloca a jusante durante os processos de alteamentos. Também neste método se faz necessária a construção de um dique inicial, impermeável, empregando-se normalmente material argiloso compactado. Este dique inicial deve ser dotado de drenagem interna (filtro vertical e tapete drenante), além de ter seu talude de montante impermeabilizado com argila compactada ou mantas plásticas específicas para impermeabilização.

Neste método somente os rejeitos grossos são utilizados no alteamento, e a barragem pode ser projetada para grandes alturas, incorporando sempre, neste alteamento, o sistema de impermeabilização e drenagem. Os rejeitos são hidrociclados, e o *underflow* é lançado no talude de jusante sobre compactação e controle construtivo. Um diagrama esquemático com os principais elementos deste método de construção, além da sequência de alteamento, pode ser visualizado na Figura 16.

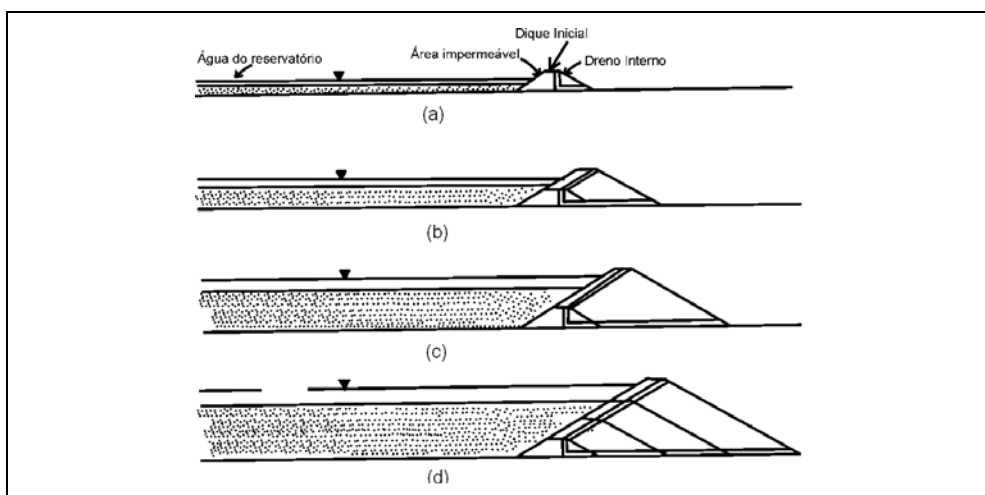


Figura 16 – Sequência de alteamento da barragem pelo método de jusante.

Fonte: Vick, 1983.

Como vantagens deste método podem ser assinaladas:

- (i) maior segurança por alteamento controlado;
- (ii) menor probabilidade de entubamento e de rupturas horizontais, em consequência da maior resistência ao cisalhamento;
- (iii) maior resistência a vibrações provocadas por sismos naturais e vibrações em razão do emprego de explosivos nas frentes de lavra;
- (iv) instalação de sistema de drenagem e impermeabilização, à medida que se processa o alteamento.

As principais desvantagens do método são:

- (i) custo mais elevado;
- (ii) maior volume de material a ser movimentado e compactado;
- (iii) menor velocidade de alteamento da barragem;
- (iv) não possibilita a proteção com cobertura vegetal e tampouco drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos no talude de jusante;
- (v) requer o emprego de hidrociclones e a construção de enrocamento de pé para conter o avanço do *underflow*;
- (vi) requer a construção de dique a jusante para contenção dos materiais do *underflow*.

Método da Linha de Centro

Trata-se de um método intermediário entre o método da linha de montante e o da linha de jusante, inclusive em termos de custo. O comportamento estrutural das barragens construídas por este método aproxima-se mais ao método de jusante.

Inicialmente é construído um dique de partida (dique inicial), e os rejeitos são lançados perifericamente a montante do mesmo, formando uma praia. O alteamento subsequente é realizado lançando-se os rejeitos sobre a praia anteriormente formada e sobre o talude de jusante do dique de partida. Neste processo, o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos sucessivos alteamentos são coincidentes. Na Figura 17, ilustra-se a sequência construtiva deste método.

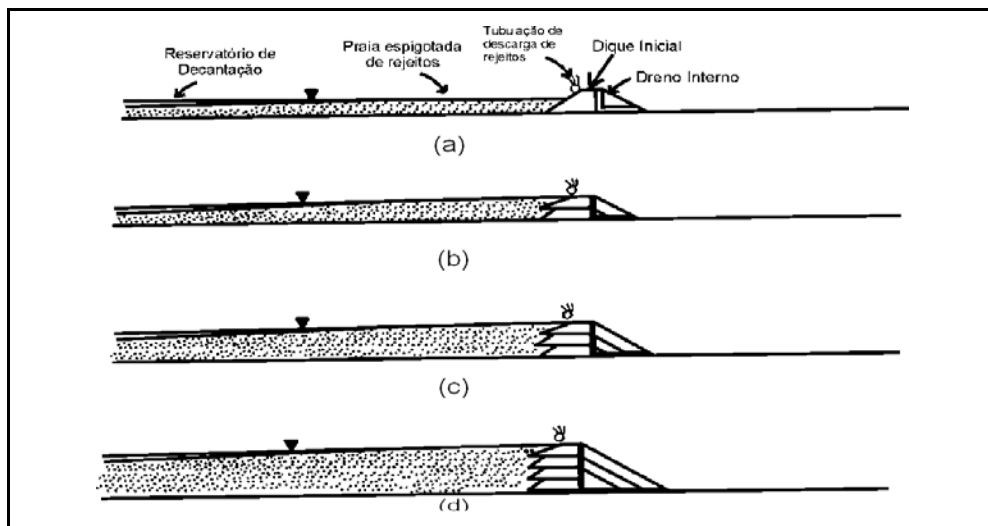


Figura 17 – Sequência de alteamento pelo método de linha de centro.

Fonte: Vick, 1983.

Na realidade, este método tanto insere as vantagens dos métodos anteriores, quanto minimiza suas desvantagens. Como principais vantagens destacam-se:

- (i) facilidade construtiva;
- (ii) o material para o alteamento pode vir de áreas de empréstimo, estéril ou do *underflow* dos hidrociclones;
- (iii) permite o controle da linha freática no talude de jusante.

As principais desvantagens são:

- (i) a área a montante é passível de escorregamentos;
- (ii) há necessidade do uso de hidrociclones;
- (iii) este método, além do dique inicial, requer um enrocamento de pé para conter o avanço do *underflow*;
- (iv) não permite tratamentos da superfície do talude de jusante.

No Quadro 2, sintetizam-se os métodos construtivos descritos, abordando suas características gerais, vantagens e desvantagens. No Quadro 3, estão sumarizadas as principais características e aspectos de segurança das obras construídas, segundo diferentes métodos, comparadas às barragens de terra compactada.

Quadro 2 – Métodos construtivos de barragens de contenção de rejeitos.

<p>Características Gerais</p> <p>Método de Montante – É o mais antigo e o mais empregado na atualidade. Lançamento a partir da crista por <i>spigots</i> (as frações grossas se depositam junto ao corpo da barragem). Também podem ser usados hidrociclones.</p> <p>Método de Jusante - Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante.</p> <p>Método de Linha de Centro - Variação do método de jusante.</p>
<p>Vantagens</p> <p>Método de Montante - Menor custo e maior velocidade de alteamento.</p> <p>Método de Jusante - Maior segurança. Compactação de todo o corpo da barragem.</p> <p>Método de Linha de Centro - Variação do volume de <i>underflow</i> em relação ao método a jusante.</p>
<p>Desvantagens</p> <p>Método de Montante - Maior probabilidade de instabilidade em virtude da existência de finos não adensados próximo ao corpo da barragem. Baixa compacidade do material. Possibilidade de liquefação.</p> <p>Método de Jusante - Necessidade de grandes quantidades de <i>underflow</i> (problemas nas primeiras etapas). Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).</p> <p>Método de Linha de Centro - Pode ser necessário estender os trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.</p>

Quadro 3 – Comparação entre as principais características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos.

	Convencional	Montante	Jusante	Linha de Centro
Tipo de Rejeito Recomendado	Qualquer tipo.	Mais de 40% de areia. Baixa densidade de polpa para promover segregação.	Qualquer tipo	Areias ou lamas de baixa plasticidade
Armazenamento d'Água	Boa	Não recomendado para grandes volumes.	Boa	Não recomendado para armazenamento permanente.
Resistência Sísmica	Boa	Pobre em áreas de alta sismicidade	Boa	Aceitável.
Restrições de Alçamento	De uma só vez, ou em poucas etapas.	Recomendável menos de 5 a 10m/ano	Nenhuma	Pouca
Requisitos de Alçamento	Materiais naturais e/ou estéril.	Solo natural. Rejeitos ou estéril.	Rejeitos ou estéril.	Rejeitos ou estéril.
Custo Relativo do Corpo do Aterro.	Alto ($3V_m$)	Baixo V_m^*	Alto ($3 V_m$)	Moderado ($2 V_m$)
* V_m = volume da barragem pelo método de montante. Fonte: Nieble, 1986 (modificado).				

SISTEMAS EXTRAVASORES DE BARRAGENS DE REJEITOS

As áreas onde o acesso à água natural (fontes, rios, encostas, coeficiente de escoamento superficial) é o mínimo possível são as mais indicadas para localização de barragens de rejeitos, evitando-se, desse modo, custos adicionais à construção dos vertedores. O dimensionamento das obras de descarga de águas deverá considerar a hidrologia local e regional, além de garantir a ausência de transbordamento ou galgamento (*overtopping*), situação esta que, fatalmente, provoca a destruição total do barramento. Uma ilustração esquemática das formas de entrada e saída d'água do reservatório estão sumarizadas na Figura 18.

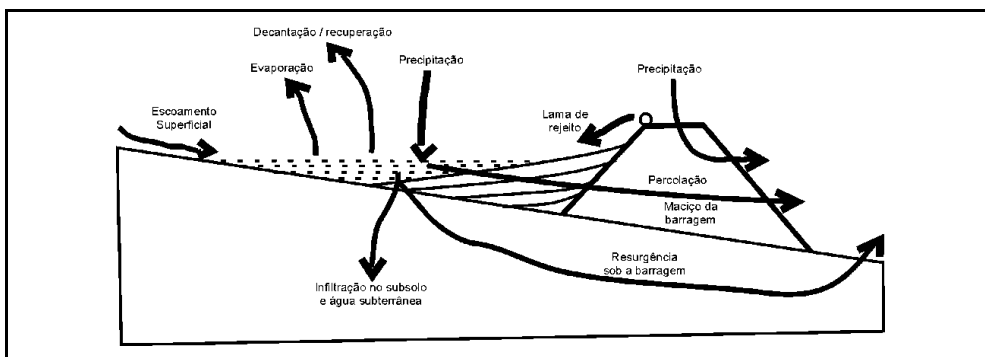


Figura 18 – Principais formas de entrada e saída d'água em reservatórios. Fonte: Down & Stocks, 1977.

As águas que alimentam o reservatório poderão ser removidas por um sistema extravasor, considerado o elemento de segurança que deve ser utilizado apenas em condições excepcionais. As obras que compõem o sistema extravasor são dispendiosas. Portanto, no seu arranjo estrutural e/ou projeto, deve-se considerar as dimensões da barragem e reservatório, as situações emergenciais, até mesmo os progressivos alteamentos durante a vida útil do barramento. Nesta etapa do projeto sugere-se uma análise dos quatro sistemas (tulipa, galeria de encosta, pontão, sifão) para descarregar a água excedente, mantendo-se o nível d'água desejado no reservatório.

Tulipa

Consiste em uma torre de concreto armado ou tubulação de metal construída dentro do futuro reservatório. Possui "janelas" que possibilitam controlar a altura do nível d'água na qual ocorre a sedimentação dos rejeitos argilosos. Esta torre conduz as águas a uma galeria de fundo que atravessa o maciço da barragem, conduzindo a água até a jusante. Portanto, a construção de um túnel escavado no maciço da ombreira da barragem favorece sobremaneira o transporte da água. É um dos sistemas mais utilizados em função da sua fácil construção, possibilidade de alteamentos, manutenção, limpeza e, finalmente, a ausência de equipamentos mecânicos de operação.

Nas barragens de grande porte, este método demanda maior investimento em relação às outras opções. O projeto civil da torre deve levar em consideração:

- (i) o empuxo dos rejeitos;
- (ii) cuidados especiais com as fundações da torre, sua junção à tubulação (recalques diferenciais);
- (iii) as juntas (união entre os tubos), pois sua abertura, provocada por recalques diferenciais da fundação, por exemplo, podem provocar erosão interna no maciço com a formação de entubamento, cuja ação, em consequência do seu surgimento, seria incontrolável.

No diagrama esquemático da Figura 19, consta um exemplo de extravasor constituído por torre (tulipa).

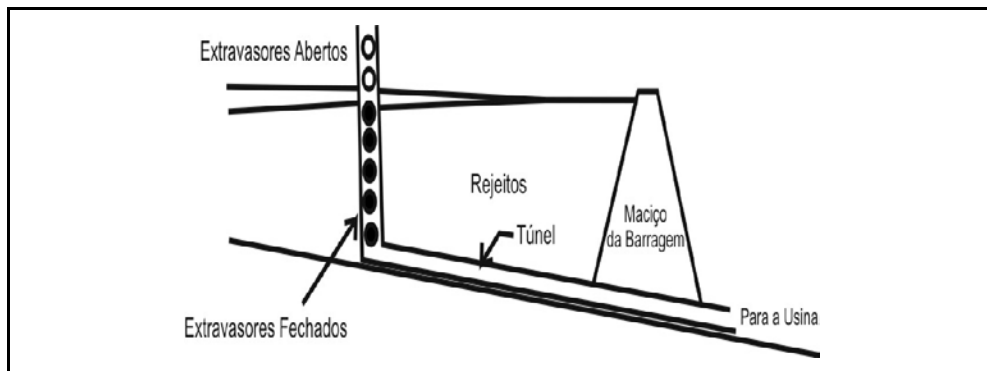


Figura 19 – Extravasor tipo tulipa interligada à galeria de fundo. Fonte Vick, 1983.

Galeria de Encosta

Consiste em uma galeria de concreto ou tubos metálicos inclinada, implantada sobre a encosta (Figura 20) que compõe a ombreira da barragem. Esta galeria está interligada à outra de fundo, que conduz as águas a jusante por sob o maciço da barragem ou a um túnel escavado na ombreira da mesma. A galeria inclinada pode estender-se, gradativamente, com a subida do nível d'água ou de rejeitos e possui "janelas" ao longo de toda sua extensão, que podem ser fechadas para reter os rejeitos ou o maior volume d'água. Neste caso, as "janelas" fechadas que vierem a ser cobertas por rejeitos não podem conter defeitos, pois, dependendo da profundidade em que se encontram e das dimensões da galeria, seria praticamente impossível a execução de reparos.

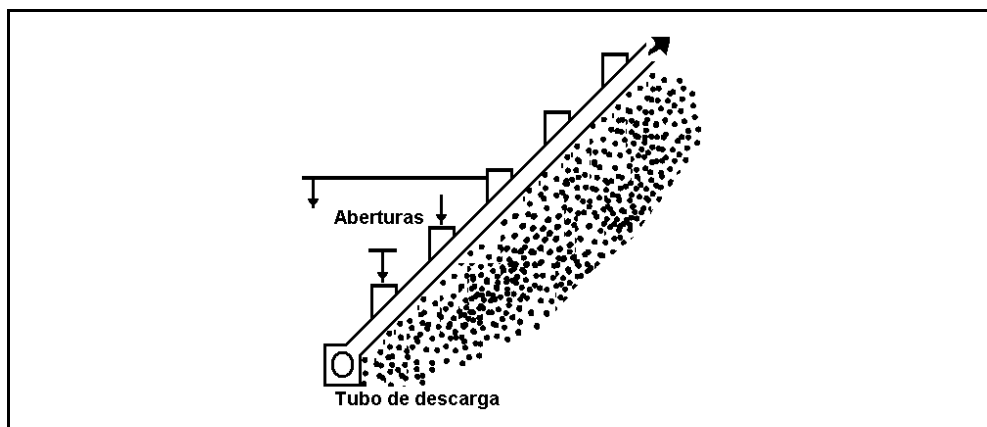


Figura 20 – Extravasor tipo galeria de encosta interligado à galeria de fundo. Fonte: Vick, 1983.

Pontão

Este sistema torna-se atrativo quando se busca recuperar água para sua reutilização na usina de beneficiamento. O retorno da água é feito com auxílio de um flutuante (balsa) sobre o qual são montadas bombas d'água. A vantagem deste sistema reside na possibilidade de deslocamento do pontão para locais do reservatório nos quais a água encontra-se mais limpa, evitando locais em que a sedimentação dos sólidos em suspensão ainda não se completou. Além disso, permite a fácil recirculação da água com baixo custo pela usina, pois o sistema mantém a água do reservatório a uma distância considerável do corpo da barragem (teoricamente mais permeável).

A maior desvantagem deste sistema reside na possibilidade de falhas no funcionamento das bombas e no alto custo de manutenção associado a esses equipamentos. O desenho do sistema que emprega pontão está esquematizado na Figura 21.

Sifão

O uso de sifões temporários ou permanentes, à semelhança do pontão, permite a passagem da água sobre a crista da barragem até o pé da jusante. Tal sistema, que opera com tubulação de aço, cimento-amianto, mangotes ou outros materiais, está limitado a áreas nas quais há águas limpas, para evitar sucção de materiais depositados ou o entupimento da tubulação. O sifonamento da água está sujeito a cavitação, quando as pressões são muito baixas, o que condiciona seu emprego em barragens, nas quais a diferença de nível entre montante (reservatório) e jusante não ultrapasse 6 m. O procedimento pode ainda causar erosão no dique próximo ao ponto de sucção. Este processo extravasor preconiza uma vigilância permanente, assegurando que o sistema de sifonamento trabalhe a contento. Na Figura 21, encontra-se um desenho esquemático deste tipo de extravasor. No Quadro 4, estão relacionados os principais sistemas extravasores com as características gerais do sistema, suas principais vantagens e desvantagens.

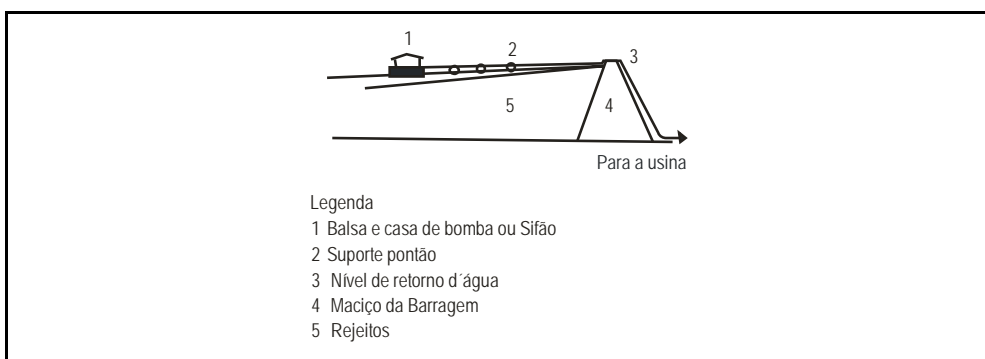


Figura 21 – Extravasores tipo pontão e sifão. Fonte: Vick, 1983.

Quadro 4 – Principais sistemas extravasores de barragens de rejeitos.

<p>Características Gerais</p> <p>Galeria de Fundo - Construída na fundação da barragem. Captação em torres ou galerias de encosta localizadas em pontos do reservatório nos quais a água sempre se encontra clarificada.</p> <p>Extravasador de Superfície - Canal escavado na ombreira da barragem.</p> <p>Túnel - Escavado na ombreira da barragem. Captação em torres ou galerias de encosta localizada em pontos do reservatório onde a água sempre se encontra clarificada.</p>
<p>Desvantagens</p> <p>Galeria de Fundos - Riscos de recalques das fundações, podendo comprometer o funcionamento da própria barragem. Em locais de alta declividade, a velocidade da água pode provocar cavitação nas galerias de encosta.</p> <p>Extravasador de Superfície - Necessária a sua reformulação (relocação), à medida que a barragem ganha altura.</p> <p>Túnel - Possibilidade de ocorrência de elevadas cargas no emboque do túnel.</p>
<p>Vantagens</p> <p>Galeria de Fundos - Estimativa de custo menor.</p> <p>Extravasador de Superfície - Riscos mínimos.</p> <p>Túnel - Boa estabilidade mecânica.</p>

No contexto de controle das águas em barragens de contenção de rejeitos, deve-se ter como propósito que este controle seja um fator determinante na sua estabilidade e na qualidade da água que sai da estrutura. Uma barragem de rejeitos com um sistema de controle de água adequadamente projetado resultará em melhor uso econômico dos recursos disponíveis e poderá, ainda, constituir-se em uma estrutura de proteção contra inundações nas áreas de jusante.

Nas áreas, em que a escassez de água é crítica, prevalece a ideia de reciclagem total da água, fazendo-a retornar às operações de beneficiamento do bem mineral, constituindo, assim, um sistema de circuito fechado. Por conseguinte, inserem-se no projeto os benefícios ambientais, além de minimizar as perdas de água. A Figura 22 ilustra os fluxos de água que alimentam e saem do reservatório, inclusive sua circulação nos processos de beneficiamento, transporte e disposição dos rejeitos.

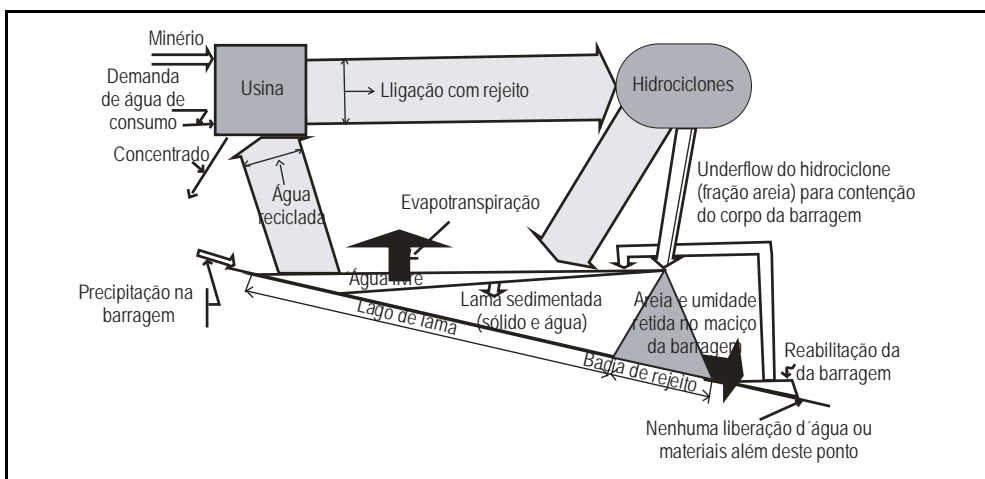


Figura 22 –Balanço de água de uma barragem de contenção de rejeitos do tipo “circuito fechado”. Fonte: Klohn, 1972.

PRINCIPAIS CONDICIONANTES DA ESCOLHA DO SÍTIO DE IMPLANTAÇÃO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS

Os principais critérios que condicionam a seleção do local de uma barragem de contenção de rejeitos são bastante diferentes daqueles utilizados na localização de uma barragem convencional, por exemplo, para barragens de hidrelétrica e irrigação, entre outras.

Para barragens de contenção de rejeitos são considerados, principalmente, os seguintes critérios de localização:

- (i) maior relação entre o volume de reservatório e o volume do aterro da barragem (menor custo/benefício);
- (ii) menor área da bacia de drenagem e aporte de sedimentos, objetivando a construção de vertedouro de menor porte ou mesmo sua eliminação;
- (iii) menor interferência do reservatório na comunidade local, promovendo redução de custos com relocações e desapropriações;
- (iv) menor distância possível da usina de beneficiamento, o que resulta em menor comprimento das linhas de condução dos rejeitos e de retorno da água;
- (v) menor distância possível da área de 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.

Assim, as barragens de rejeitos são normalmente construídas com aterro hidráulico ou hidrociclonado, geralmente posicionadas nas cabeceiras das bacias, o mais próximo possível da usina de beneficiamento.

Quando estas obras destinam-se à retenção de rejeitos cujo efluente possui componentes poluentes solúveis, deve-se considerar: a poluição do lençol freático por infiltrações e a poluição dos cursos d'água, em razão do lançamento das águas pelo seu vertedouro. Desse modo, justifica-se a implantação do reservatório nas cabeceiras de drenagem ou nas encostas, com o propósito de minimizar ou anular o volume d'água efluente. Nesta situação, é desejável a construção de canais de captação de águas no entorno do reservatório, com a finalidade de receber as águas de chuva provenientes das encostas e conduzi-las a jusante sem contato com os rejeitos.

Os estudos das áreas de interesse à implantação de uma barragem exigem levantamentos de dados básicos à caracterização adequada do local. O desenvolvimento das atividades de campo deve ser precedido de:

- (i) mapas e relatórios diversos;
- (ii) elementos topográficos;
- (iii) perfis dos rios;
- (iv) geologia e geotecnia.
- (v) trabalhos de planejamento e organização de rotinas;
- (vi) coleta de dados e informações nas instituições públicas de controle - DNPM, CPRM, ANA, IBAMA, Ministério da Agricultura, Serviço Geográfico do Exército, etc.;
- (vii) informações hidrológicas e hidrométricas;

Com estas informações procede-se ao desenvolvimento:

- (i) da consolidação dos dados coletados e programação de trabalhos de campo;
- (ii) do reconhecimento de campo, com indicação dos locais favoráveis ao barramento, indicando a altura máxima possível da barragem e volume armazenável; características geológicas e geotécnicas; pluviometria, fluviometria, etc.

Nestas atividades de campo desenvolvem-se ainda outras atividades, como:

- (i) localização e acessos nos quais deve-se inserir a redução do custo operacional, ao considerar a maior proximidade do sítio da barragem de rejeitos em relação às instalações da usina de beneficiamento.
- (ii) a topografia deve ser investigada com base em mapas topográficos, na escala adequada, com abrangência da área de implantação da obra, seu reservatório e os locais de possíveis áreas de empréstimo.

A topografia do terreno influi na capacidade de armazenamento e forma do reservatório, a altura e comprimento das barragens, além de determinar a área da bacia de captação e, portanto, o volume de influxo d'água ao reservatório por escoamento superficial. Como produto das atividades desta etapa devem ser geradas:

- (i) plantas com indicação da área da barragem e reservatório;
- (ii) seções transversais e longitudinais às principais estruturas - barragens, vertedores, extravasores, posição dos dutos de rejeitos, linha de retorno d'água etc.;
- (iii) detalhes das principais obras civis - barragens, galerias, posição dos extravasores, torres de tomada d'água etc.;
- (iv) localização de áreas de empréstimo.

As barragens que interceptam um curso natural de água, por exemplo, cortando um vale, devem ser capazes de armazenar o escoamento superficial de toda a área de captação ou, alternativamente, possuir obras de desvio do escoamento superficial, conduzindo as águas ao redor ou sob a barragem. Os aspectos hidrológicos e hidrométricos, em decorrência da sua importância na operacionalidade e segurança da barragem, devem ser investigados por especialistas desta área. Quando não existem dados fluviométricos da região, a título de conhecimento, podem ser feitas avaliações das vazões dos cursos d'água que interferirão na obra.

Uma linha de trabalho bastante empregada baseia-se na utilização do método racional, que se fundamenta na expressão da Equação [5].

$$Q_c = 0,278C_dIA_d \quad [5]$$

em que:

Q_c - descarga de cheia (m^3/s);

C_d - coeficiente de deflúvio superficial (Tabela 4);

I - intensidade de chuvas de projeto (mm/h);

A_d - área de drenagem (km^2).

Tabela 4 – Valores de coeficiente de deflúvio (Cd) para emprego na fórmula racional.

Tipo de Solo	Cobertura da Bacia		
	Cultivado	Pastagem	Mata
Com alta taxa de infiltração: geralmente arenoso ou encascalhado.	0,20	0,15	0,10
Com média taxa de infiltração: arenoso-argiloso.	0,40	0,35	0,30
Com baixa taxa de infiltração: pesadamente argiloso.	0,50	0,45	0,40

Fonte: Eletrobrás, 1983.

As vazões podem ser determinadas segundo as medidas de descarga líquida com flutuador empregando-se a expressão da Equação [6].

$$Q_v = \frac{0,8.L.A(m^3/s)}{t} \quad [6]$$

em que:

Q_v - descarga líquida (m^3/s);

L - comprimento do trecho medido entre as duas seções transversais (m);

A - média das áreas das seções transversais (m^2);

t - tempo de percurso do flutuador (s);

0,8 - coeficiente de correção da velocidade superficial das águas para a velocidade média da seção de medição.

Na Figura 23, está um arranjo esquemático para realização de medidas de vazões com flutuador.

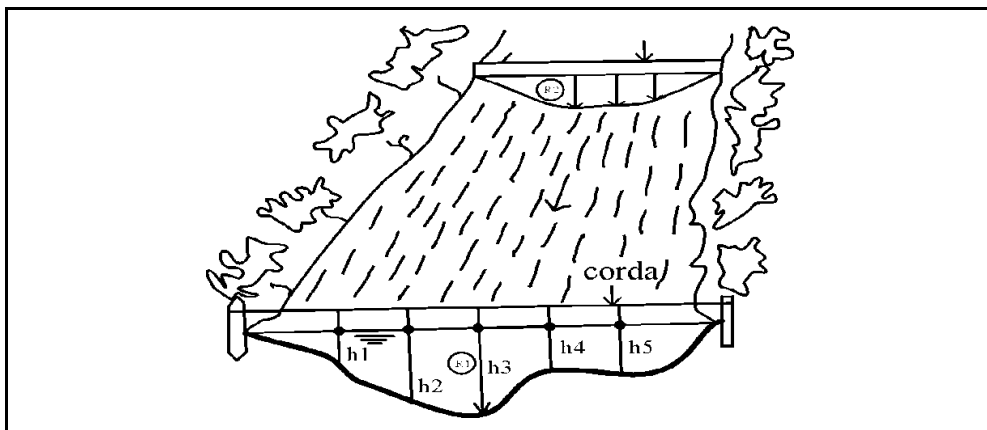


Figura 23 – Esquema para determinação de vazões com flutuador.

Fonte: Eletrobrás, 1983.

Medidas de Vazões com Emprego de Vertedouro Retangular.

Neste caso, as determinações das vazões produzem resultados mais precisos, e as descargas podem ser calculadas pela fórmula de Francis (Equação 7).

$$Q_v = 1,84 \cdot b \cdot h^{3/2} \quad [7]$$

em que:

Q_v - descarga (m^3/s);

b - largura do vertedouro (m);

h - altura do nível d'água (m) sobre a crista do vertedouro, medida a montante deste, no local onde foi cravada a estaca.

A instalação deste dispositivo e os locais de tomada de medidas estão esquematizados na Figura 24. Os valores de vazão para diferentes alturas do nível d'água, considerando-se vertedouro com largura de 1 m, estão registrados na Tabela 5.

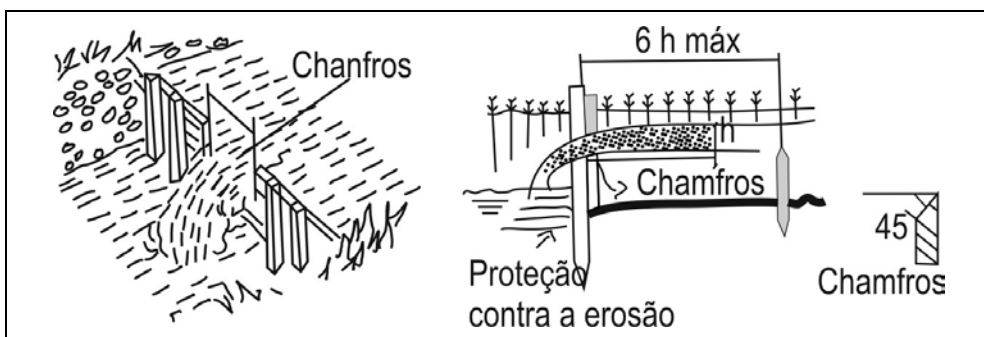


Figura 24 – Vertedouro retangular para determinação expedita da hidrometria.
Fonte: Eletrobrás, 1983.

Tabela 5 – Vazão de vertedores retangulares sem contração lateral (m³/s).

H (m)	Q _v (m ³ /s)	H (m)	Q _v (m ³ /s)	H (m)	Q _v (m ³ /s)
0,0100	0,00184	0,0350	0,1205	0,2000	0,16457
0,0110	0,00212	0,0375	0,01336	0,2250	0,19638
0,0120	0,00242	0,0400	0,01472	0,2500	0,2300
0,0130	0,00273	0,0450	0,01756	0,2750	0,26535
0,0140	0,00305	0,0500	0,02057	0,3000	0,30234
0,0150	0,00338	0,0550	0,02373	0,3500	0,38100
0,0160	0,00372	0,0600	0,02704	0,4000	0,46549
0,0170	0,00408	0,0650	0,03049	0,4500	0,55544
0,0180	0,00444	0,0700	0,03408	0,5000	0,65054
0,0190	0,00482	0,0750	0,03779	0,5500	0,75052
0,0200	0,00520	0,0800	0,04163	0,6000	0,85515
0,0220	0,00600	0,0850	0,04560	0,6500	0,96425
0,0240	0,00684	0,0900	0,04968	0,7000	1,07762
0,0260	0,00771	0,1000	0,058819	0,7500	1,19512
0,0280	0,00862	0,1250	0,08132	0,8000	1,31660
0,0300	0,00956	0,1500	0,10689	0,8500	1,44194
0,0325	0,01078	0,1750	0,13470	0,9000	1,57102

Obs: Tabela válida para b = 1 m Fonte: Eletrobrás, 1983.

Os estudos hidrológicos e hidrométricos definem a área de drenagem, precipitação anual para determinação do volume de água que adentrará no reservatório como escoamento superficial. Além disso, fornece elementos para dimensionamento dos vertedouros e da borda livre (*freeboard*) da barragem. Esta borda é a distância (medida na vertical) entre o topo do aterro e o nível d'água. Sua dimensão deve ser tal que impeça o transbordamento das águas armazenadas no reservatório da barragem.

Destaca-se que o transbordamento é responsável por cerca de 20% das rupturas ocorridas em barragens de terra, o que obriga que se dê uma atenção especial ao dimensionamento da borda livre.

A borda livre mínima é calculada pela expressão da Equação [8].

$$F = 0,75H + \frac{V^2}{2g} \quad [8]$$

em que:

H - altura da onda (m);

V - velocidade de propagação da onda (m/s);

g – aceleração da gravidade (m/s^2).

A velocidade da propagação da onda é dada pela Equação [9], conhecida como equação de Gaillard.

$$V = 1,5 + 2H \quad [9]$$

A análise de diversas fórmulas empíricas relacionando altura da onda, o *fetch* (comprimento do reservatório na direção perpendicular ao eixo da barragem) e a velocidade do vento permitiu registrar as informações da Tabela 6.

Tabela 6 – Altura das ondas em função do *fetch* e da velocidade do vento.

<i>Fetch</i> (milhas)	Altura da Onda (m)		
	Velocidade do vento (milhas/h)		
	50	75	100
1	0,81	0,90	-
2,5	0,96	1,08	1,17
5	1,11	1,29	1,44
10	1,35	1,62	1,83

Fonte: Esteves, 1964

O efeito das ondas, no paramento da barragem, depende do ângulo de ataque da onda, da inclinação do paramento e da textura da superfície do talude. Por exemplo, caso o talude de montante seja coberto por enrocamento lançado, a onda alcançará uma altura equivalente a 1,5 vez sua altura inicial. Por outro lado, se o paramento de montante for liso, esta subida poderá ser bastante maior, o que leva a recomendação de um aumento de 50% dos valores determinados para a borda livre.

É importante que o dimensionamento da borda livre considere as condições de grandes velocidades de vento (tempestades). Na ilustração da Figura 25, registra-se, de forma esquemática, a borda livre recomendada para diferentes alturas de barragem e períodos de ocorrência de tempestades. Deve-se assinalar que as curvas referem-se a uma barragem de contenção de rejeitos na Tasmânia, no qual a bacia de drenagem é relativamente pequena, e o excesso de água será retido no lago da barragem e removido pelo processo de decantação e aproveitamento.

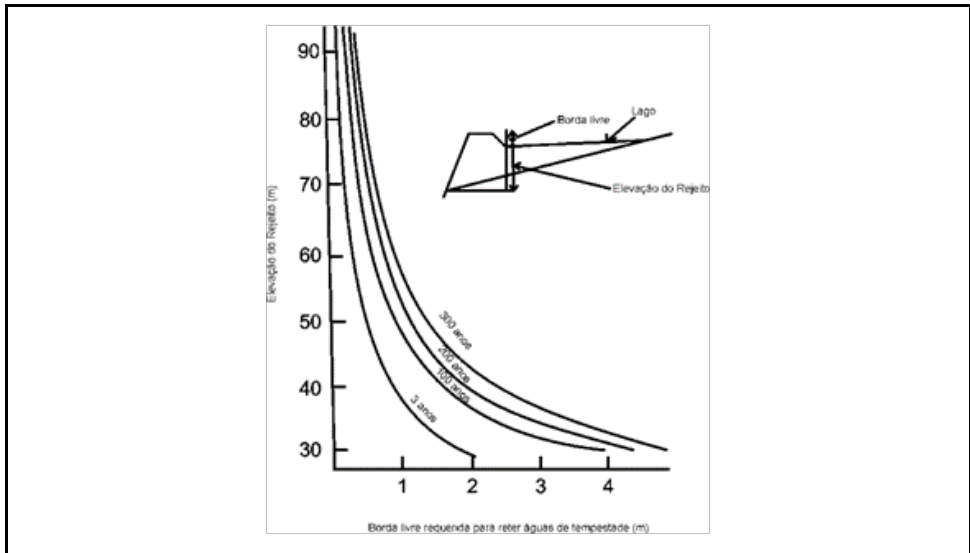


Figura 25 – Borda livre em função da recorrência de chuvas e altura do reservatório. Fonte: Aplin & Argall, 1972.

Geologia e geotecnia - a intensidade das investigações de campo e de laboratório irá depender do porte das obras e da complexidade do local em estudo.

Os trabalhos direcionados ao conhecimento da área de implantação das barragens podem ser iniciados, quando se justificar, por aerofotointerpretação, procedimento que possibilita um reconhecimento prévio dos tipos litológicos, solos, estruturas (falhas, fraturas, dobras), feições erosivas (boçorocas), materiais de empréstimo e feições indicativas de escorregamentos.

Geologia e geotecnia de superfície – deve-se indentificar os tipos litológicos e avaliar suas propriedades (resistência e permeabilidade), suas estruturas, fraturamento, evidências de escorregamentos anteriores, disponibilidade de materiais de construção, além de outros elementos que possam vir a interferir no desenvolvimento do projeto/obra. Estes dados deverão subsidiar os trabalhos subsequentes que tratem de investigações geológicas e geotécnicas de subsuperfície.

As investigações de subsuperfície têm como propósito definir as condições de fundação das obras e obter amostras para determinação das propriedades dos solos e rochas, além de definir o comportamento hidrogeotécnico do maciço. Nessas investigações, são empregados métodos de prospecção por meio de: trincheiras, galerias, poços de inspeção, sondagens a trado, percussão e rotativas. São utilizados, ainda, ensaios geofísicos que dependem das características do terreno e das informações que se pretende obter.

No caso de fundação em solos, o emprego de sondagens rotativas ou abertura de galerias é dispensável, sendo mais indicada a utilização de sondagens a percussão. Nestes casos são empregados ensaios SPT (*standard penetration test*), *vane test* (palheta), entre outros, com a finalidade de caracterizar os terrenos quanto a sua resistência mecânica e ensaios de infiltração de água, além de determinar a permeabilidade do maciço. Estes ensaios, padronizados pela Associação Brasileira de Geologia e Engenharia (ABGE), são amplamente divulgados e empregados na área de sondagem.

No caso de construção de barragens de terra compactada (ou rejeitos) assentadas sobre fundações rochosas, normalmente, não ocorrem contratempos com a resistência do maciço de fundação. Nestas situações, deve-se avaliar as possíveis percolações d'água através de fissuras e/ou porosidade da rocha. A determinação da permeabilidade dos terrenos rochosos é feita por ensaios de perda d'água, sob pressão, realizados em furos de sondagens rotativas. Este ensaio consiste em injetar água, sob pressão, em um trecho do furo durante um determinado tempo, obtendo-se a perda d'água específica PE em l/m/mim/kg/cm². O procedimento dos ensaios e os cálculos também estão normatizados e divulgados pelo Boletim nº 2 da ABGE - Ensaios de perda d'água sob pressão.

Sugere-se, ainda, que sejam realizadas sondagens adicionais no local da barragem e do reservatório, atingindo profundidades tais que assegurem a não existência de minérios sob estas estruturas.

Esta fase de investigações de subsuperfície preconiza ainda a coleta de amostras de solo e rocha para a realização de todos os ensaios em laboratório, a fim de atender as exigências do projeto. A amostragem de solos deve prever a coleta de amostras deformadas e não deformadas. Os ensaios mais comuns realizados em laboratórios são: resistência ao cisalhamento, determinação da tensão-deformação, compressibilidade, granulometria, permeabilidade, densidade, percentagem de umidade, limites de Attenberg, compactação, entre outros.

Nos furos de sondagem à percussão e rotativa, podem ser instalados instrumentos (piezômetros e medidores de nível d'água) para avaliação do comportamento do lençol freático.

As áreas indicadas como fornecedoras de materiais para construção da barragem deverão ser caracterizadas tecnologicamente. Para tanto, são realizados ensaios de laboratório por meio dos quais são definidos os volumes de materiais utilizáveis e as distâncias do local de aplicação.

TRATAMENTO DAS FUNDAÇÕES

As fundações são consideradas como um dos principais condicionantes ao desenvolvimento de acidentes em barragens, quer sejam essas construídas com rejeitos ou técnicas convencionais.

O local de assentamento da barragem deve proporcionar um suporte estável das estruturas sob condições de carregamento e saturação, sem sofrer deformações excessivas, o que resultaria no desenvolvimento de fraturas no corpo das barragens resultantes do assentamento diferencial (Figura 26).

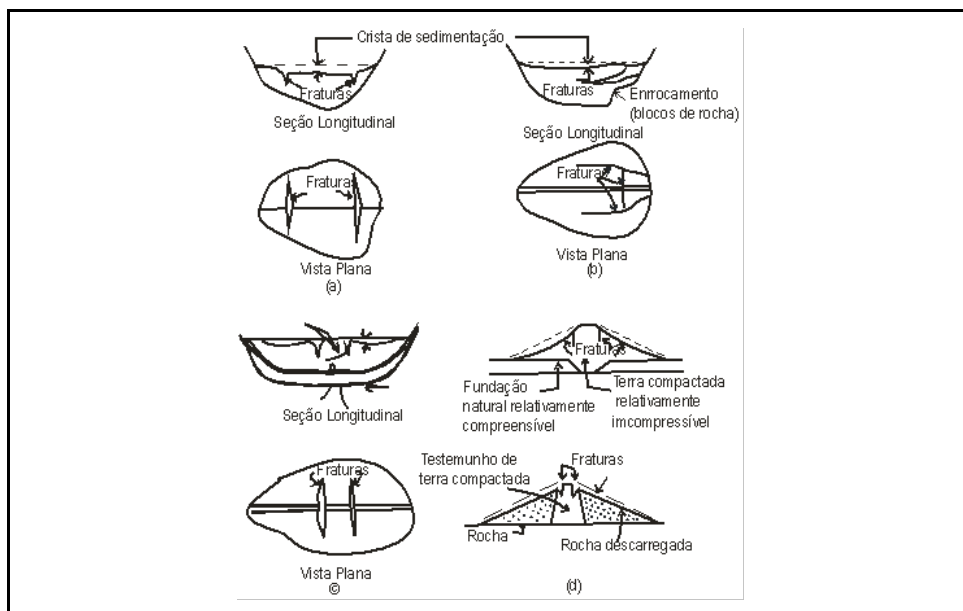


Figura 26 – Fraturamento em barragens de terra/rejeitos resultante do assentamento diferencial. Fonte: Aplin & Argall, 1972.

As fundações são, em geral, extremamente variáveis quanto às suas características geológicas, geotécnicas, hidrogeotécnicas, topográficas e de resistência mecânica. Portanto, se recomenda que antes do tratamento e construção da barragem, sejam feitos ensaios que possibilitem o conhecimento das principais características dos solos, com ênfase na resistência mecânica e nas variações da permeabilidade ao longo das várias camadas dos solos que constituem as fundações.

Uma vez determinadas as características dos terrenos de fundação, deve-se definir as necessidades e o tipo de tratamento que deverá ser realizado, com a finalidade de aumentar a resistência e/ou diminuir a permeabilidade destes terrenos ou mesmo controlar o fluxo d'água pelas fundações.

No caso de barragens de terra, os procedimentos mais empregados são:

- (i) limpeza, isto é, remoção do material superficial, matéria orgânica, solos fofos etc.;
- (ii) quando a vala corta-águas (*cutoff*) torna-se técnica e economicamente viável, as águas que percolam a fundação são barradas através de uma vala escavada longitudinalmente ao eixo da barragem, preenchidas com material impermeável e cuja profundidade pode ou não alcançar o maciço impermeável (*cutoff* total ou parcial, respectivamente).

Esta é a forma mais segura de evitar entubamento pela fundação e a forma mais eficaz de controlar a quantidade de água percolada. A Figura 27 esquematiza a interceptação de fluxo d'água segundo o *cutoff* total.

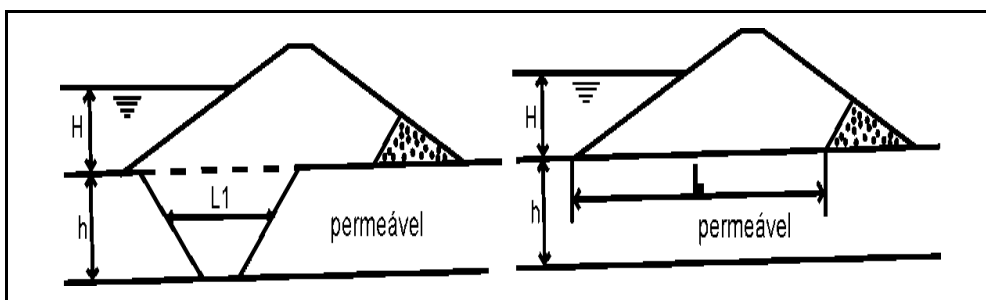


Figura 27 – Esquema de implantação de *cutoff* total em fundações de barragem de terra. Fonte: Esteves, 1964.

Não se dispondo de *cutoff*, a quantidade de água que passa pela fundação é dada por:

$$Q = K \frac{H}{L} A \quad [10]$$

em que:

K - coeficiente de permeabilidade do solo de fundação;

A - área onde ocorre a passagem d'água;

Por unidade de largura da fundação tem-se:

$$q = K \frac{H}{L} h \quad [11]$$

Dispondo-se de um *cutoff* de espessura média L_1 executado em solo de permeabilidade K_1 , o caudal escoado passará a ser:

$$q_1 = K_1 \frac{H}{L_1} h \quad [12]$$

Por vezes, proibitivo em termos econômicos, o aprofundamento do *cutoff* até o ponto no qual o terreno de fundação é impermeável, o que leva ao emprego de *cutoff* parcial. Na Figura 28, consta uma seção transversal de barragem de terra assentada em fundação permeável onde foi implantado *cutoff* parcial.

No caso de implantação de *cutoff* parcial, a redução dos volumes do caudal percolado não é diretamente proporcional à redução da área de escoamento, conforme ilustrado nas Figuras 28 e 29.

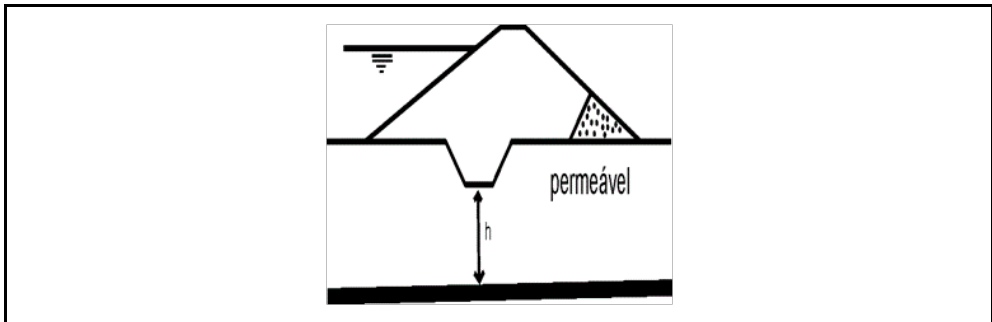


Figura 28 – *Cutoff* parcial em fundação permeável de barragem de terra. Fonte: Esteves, 1964.

Na Figura 29, estão registrados alguns resultados derivados das experiências de Creager e Turnbull, realizadas sobre fundações permeáveis, homogêneas e isotrópicas, evidenciando que este sistema, por si só, não é totalmente eficiente.

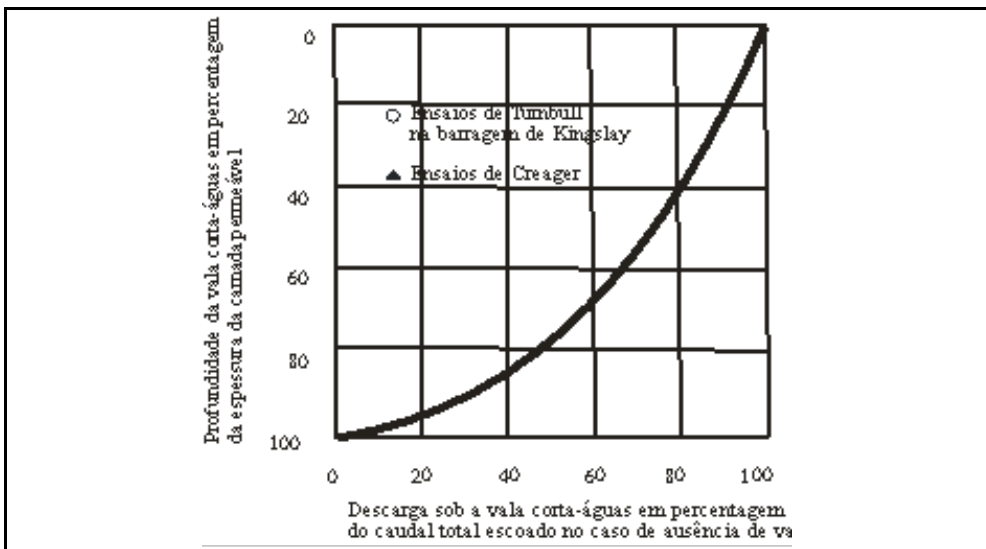


Figura 29 – Redução das vazões de percolação diante do *cutoff* parcial em fundação de barragem de terra. Fonte: Esteves, 1964.

Tapete impermeável a montante (banqueta de montante) - esta estrutura, que pode estar associada a um *cutoff* parcial, aplicada, geralmente, quando o maciço impermeável está à grande profundidade. O tapete aumenta o caminho de percolação, diminuindo o caudal escoado. A espessura do tapete constituído por argila compactada, para barragens de pequena altura, pode ser 1/10 da altura da barragem, e deve se estender a montante cerca de 2 vezes a altura do barramento. A disposição de um tapete impermeável em barragem com núcleo argiloso pode ser visualizada no diagrama da Figura 30.

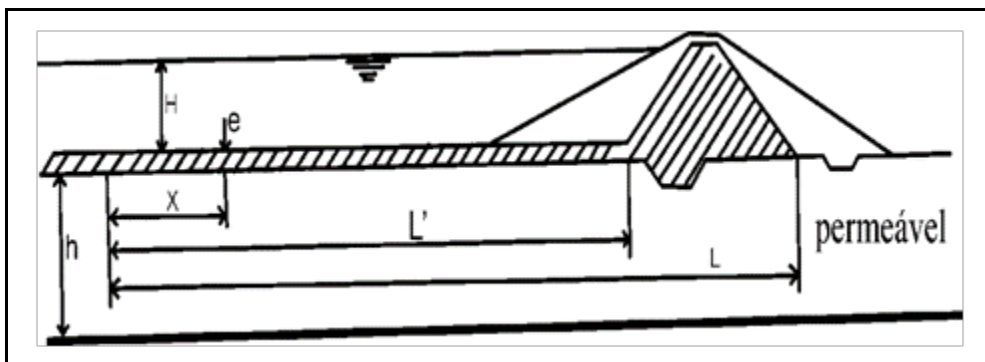


Figura 30 – Tapete impermeável em barragem de terra com núcleo argiloso e *cutoff* parcial. Fonte: Esteves, 1964.

O caudal escoado é dado pela Equação 13.

$$q = K \frac{H}{L - L'} h \quad [13]$$

O comprimento desejado para a banquetta será:

$$L = \frac{kxH - px(L - L')}{pxq} \quad [14]$$

em que:

k - coeficiente de permeabilidade da fundação permeável;

p - relação entre o caudal escoado na fundação sem a banquetta e aquele que se pretende considerar com a construção da banquetta.

A espessura da banquetta, considerando um valor nulo na extremidade de montante e um valor máximo em sua extremidade de jusante (junto ao núcleo impermeável da barragem), pode ser dada pela Equação 15.

$$e = \frac{k_1}{k} x \frac{L'}{h} \quad [15]$$

em que:

k_1 – corresponde ao coeficiente de permeabilidade do material de construção da banquetta.

O valor de e , em metros, pode ser pela expressão da Equação 16.

$$e \leq 0,60 + \frac{X}{100} \quad [16]$$

No tratamento das fundações de barragens construídas sobre terrenos permeáveis, devem ser considerados elementos como: cortinas de estacas e de injeções, tapetes drenantes e poços de alívio.

Cortinas - trata-se de estruturas impermeáveis construídas na fundação da barragem e que podem ser constituídas por estacas pranchas ou diafragmas, que poderão ou não atingir o topo da camada impermeável. Esquemas relativos às cortinas de estacas e de injeções utilizadas no tratamento de fundação de barragens podem ser visualizados na Figura 31.

Injeções - no tratamento das fundações de barragens de terra, podem ser empregadas injeções de solo cimento ou produtos químicos. Estes são injetados como líquidos e, como resultado das reações que ocorrem entre os produtos injetados, há formação de um gel insolúvel e impermeável (silicato de sódio mais cloreto de cálcio).

Tapetes drenantes - drenos de pé e valas drenantes têm a função de coletar quaisquer eventuais infiltrações, evitando rupturas internas ou empoçamento da água no pé do talude de jusante da barragem. Na Figura 32a, visualiza-se a drenagem da barragem de terra com o emprego de tapete drenante e de vala drenante, enquanto na Figura 32b, consta um diagrama esquemático relativo ao tratamento por drenos de pé. Observa-se, ainda, na mesma figura, o tratamento das fundações permeáveis feito pela adoção conjunta de diferentes métodos.

Poços de alívio - instalados a jusante da barragem, podem promover a drenagem da fundação, resultando na redução das subpressões. Geralmente são adotadas profundidades para os poços iguais à altura do nível d'água da barragem, e o espaçamento pode variar entre 5 e 30 m (Figura 32b).

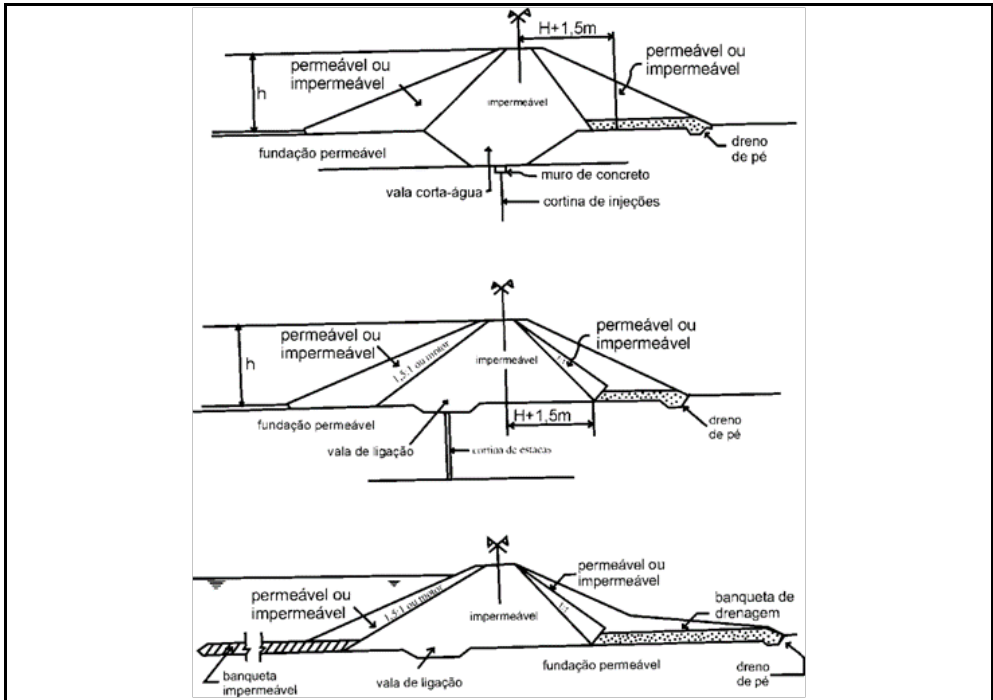


Figura 31 – Seções transversais de barragens de terra, enfatizando diferentes tipos de tratamento de fundações permeáveis. Fonte: Esteves, 1964.

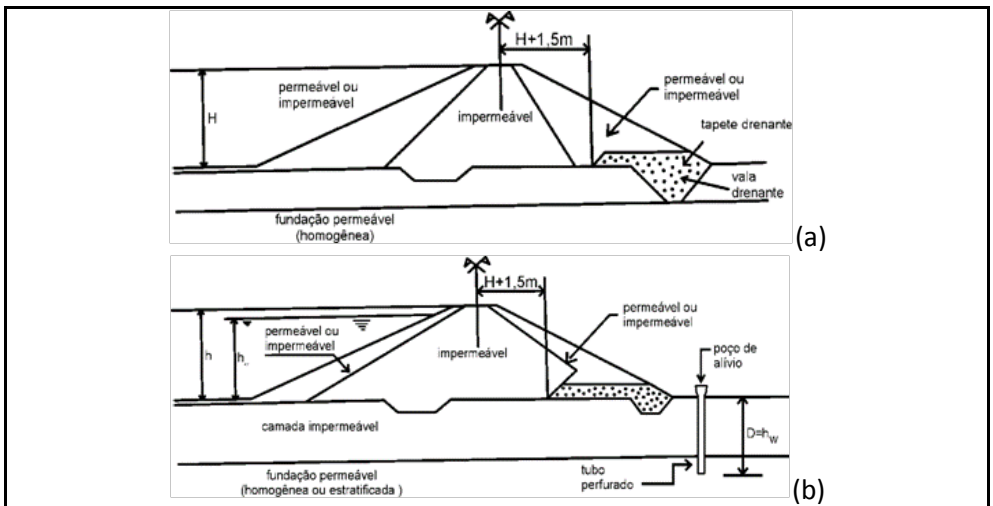


Figura 32 – Em (a), diagrama esquemático da seção transversal de barragem de terra, com ênfase nos tratamentos do pé de jusante da barragem e de sua fundação impermeável por meio de tapete e vala drenante. Em (b), seção transversal de barragem de terra, com ênfase no tratamento de fundação por dreno de pé e poço de alívio. Fonte: Esteves, 1964.

OPERAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS

O primeiro estágio de construção das barragens de contenção de rejeitos compreende a implantação de um dique inicial, que poderá servir para estocar a água necessária ao início das operações da mina. Conseqüentemente, a barragem inicial é projetada e construída de acordo com a prática tradicional de construção de barragens de terra para armazenamento d'água.

O segundo estágio caracteriza-se por compor-se do maior volume de construção e é executada pelos operadores da mina e, assim, prossegue durante toda a vida útil da mina, sendo a barragem elevada continuamente, para manter sua crista acima do nível d'água do reservatório.

A instrumentação básica para acompanhar a operação e a performance da barragem de rejeitos inclui:

- (i) piezômetros, para determinação dos níveis d'água no corpo da barragem e suas fundações;
- (ii) equipamentos para medir velocidade de assentamento dos finos no reservatório e dos materiais grossos no corpo da barragem;
- (iii) coletores de água para determinar as vazões que se processam pelo corpo da barragem.

As medidas devem ser executadas e registradas com frequência compatível com as variações observadas e servem de base para eventual tomada de ações corretivas. Deve-se manter também 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. Assim, promove a elaboração de gráficos para avaliações periódicas necessárias às tomadas de decisões de medidas corretivas.

A poluição a jusante, causada por percolação através do corpo da barragem, deve ser investigada. Para tanto, são essenciais estações de coleta de amostras de água tanto superficial, como subterrânea. Com o material coletado, deve-se investigar: as composições químicas dos solos em suspensão e da água, inclusive as medidas do seu pH e a existência de metais pesados. A investigação tem por fim obter dados comparativos relacionados à qualidade da água e suas variações. Por esse motivo, sugere-se que a coleta seja iniciada antes mesmo da operação da mina. A seguir estão relacionados alguns fatores que causam obstáculos na construção e na operação de barragens de rejeitos.

Balanço de água das operações de beneficiamento, evidenciando a variação do volume de água que alimenta o reservatório da barragem.

Variações na composição granulométrica do material beneficiado, o que produz alterações na quantidade de areias disponíveis para a construção da barragem.

Alterações no tamanho da jazida e/ou aumento da capacidade de operação do beneficiamento. Desse modo, pode haver produção de elevados volumes de rejeitos numa velocidade maior, sendo, portanto, essencial aumentar a velocidade de alteamento da barragem.

Imprevistos com os hidrociclones, por exemplo, elevada quantidade da fração argilosa nos rejeitos e baixa recuperação de areia no *underflow*, necessitando do uso de hidrociclonagem em duas etapas.

Fechamento inesperado e prolongado das operações de beneficiamento durante o qual o nível do reservatório continua a subir provocado pelo escoamento superficial.

Condições climáticas adversas.

No diagrama de blocos da Figura 33, visualizam-se os itens abordados e as principais atividades que devem ser conduzidas na concepção e no projeto de barragens de rejeitos.

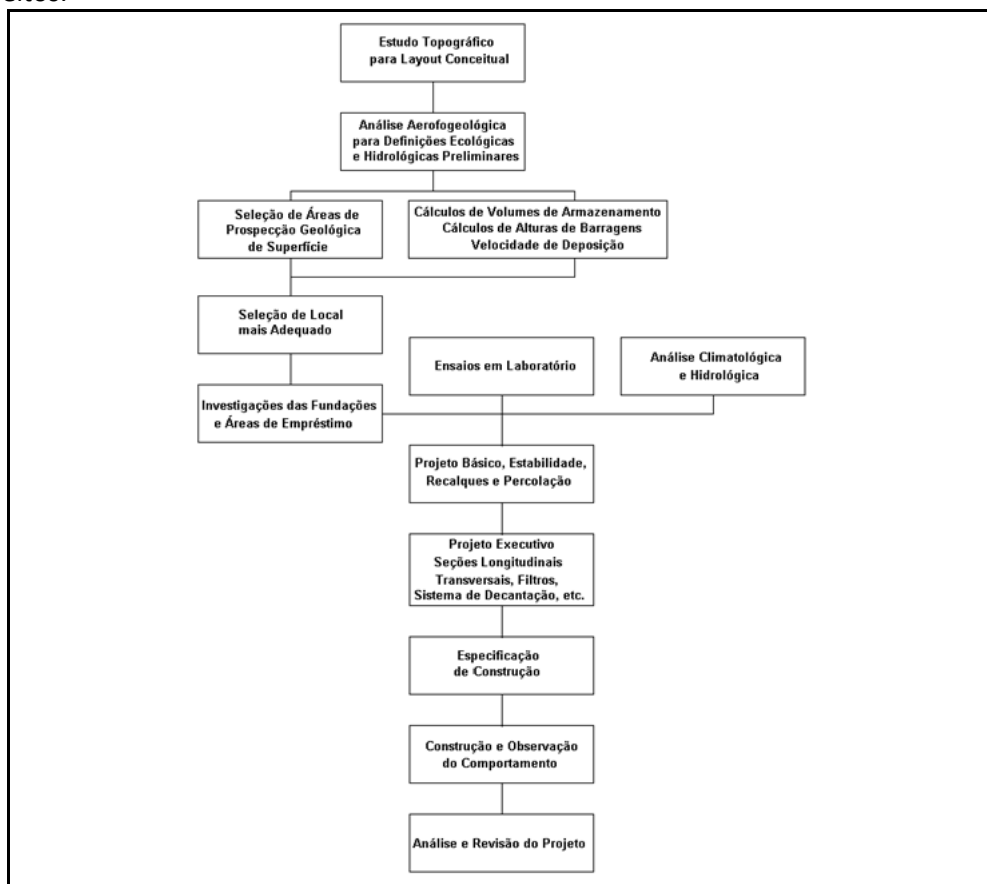


Figura 33 – Diagrama de blocos das atividades direcionadas à concepção e projeto de barragens de contenção de rejeitos. Fonte: Gregório Filho & Nieble, 1986.

Afora o local de implantação da obra e de todas as condições ambientais de seu entorno, tem-se como premissa, a construção de depósitos de rejeitos com máxima economia e segurança. Dentre os fatores econômicos destacam-se:

- (i) a localização da barragem deve ser o mais próximo possível da área de beneficiamento e em nível mais baixo que esta, de forma que as necessidades energéticas sejam mínimas;
- (ii) a barragem necessita do menor volume de material de construção possível;
- (iii) possibilidade de recuperação de água para reutilização de forma mais prática e econômica possível.

Os fatores de segurança mais relevantes são:

- (i) o lago de decantação no qual serão lançadas as lamas, deve localizar-se o mais longe possível da barragem;
- (ii) a água deve ser removida do reservatório para minimizar a saturação dos rejeitos, melhorando, assim, sua estabilidade;
- (iii) as fundações devem oferecer resistência, compressibilidade e permeabilidade condizentes com as boas técnicas construtivas;
- (iv) a barragem deve ser construída com materiais adequados, colocados em áreas adequadas;
- (v) os materiais menos resistentes e mais compressíveis devem ser mantidos o mais longe possível da barragem;
- (vi) os taludes da barragem devem ser os mais seguros possíveis, dentro das características de altura, do nível d'água e dos materiais disponíveis;
- (vii) não deve haver consequência séria, principalmente, ao ser humano, advinda da ocorrência de ruptura total ou parcial.

MANUTENÇÃO

Durante a fase de implantação ou de operação, os trabalhos de manutenção sistemática de barragens de contenção de rejeitos pode ser facilitado pela permanência de pessoal e equipamentos de terraplanagem ao longo de toda vida útil do empreendimento mineiro.

Embora o pessoal técnico esteja familiarizado com os processos de construção da barragem, é de fundamental importância que haja treinamento continuado de uma equipe para realizar os trabalhos de inspeção e a manutenção da obra. Estas atividades são conduzidas conforme instruções contidas em manuais elaborados pela projetista e/ou empresa de mineração. Os problemas que eventualmente venham a ocorrer podem, assim, ser corrigidos sem colocar a segurança da obra em risco.

Na fase de desativação, devem ser executadas todas as atividades relacionadas à segurança e à proteção definitiva da massa de rejeitos acumulada e do meio ambiente.

FASE DE DESATIVAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO

Durante muito tempo as barragens de rejeitos foram planejadas para solucionar as questões relativas ao descarte dos rejeitos e reutilização das águas. Todavia, as exigências das comunidades locais, entidades ambientalistas e outras mais rígidas, como as agências governamentais regulatórias, avaliaram esta questão e entenderam que a desativação de barragens não se trata de algo negligenciável. Os planos para a desativação destas obras deverão ser elaborados durante a fase de viabilidade do projeto e enviados ao DNPM, com o propósito de se obter o decreto da lavra. Entretanto, deve-se comprovar a viabilidade e a disponibilidade financeira para execução das obras, conforme estabelecido em lei.

Em relação aos aspectos estruturais da obra, nesta fase deve ser dada especial atenção às características de estabilidade do maciço da barragem e de sua bacia de acumulação de rejeitos. Neste contexto, deve-se buscar o conhecimento completo e detalhado das águas que alimentarão a barragem e as possíveis consequências de ocorrência de transbordamento. Geralmente, a principal consideração ambiental durante a operação e desativação é manter a qualidade das águas de superfície e subterrâneas, em particular quando os rejeitos produzem efluentes tóxicos, ácidos, alcalinos, metais pesados ou com outras características que impactam o meio ambiente. Em muitos casos, faz-se necessária a coleta e o tratamento dos efluentes.

Outras considerações ambientais incluem a contaminação do ar (particulados em suspensão, odores) e, em alguns casos, a estética visual. Os principais métodos de estabilização de rejeitos, na fase de desativação da barragem, estão divididos em três categorias:

Estabilização dos rejeitos por uma cobertura com solos ou outros materiais naturais ou sintéticos.

Emprego de produtos químicos para reagir com os rejeitos finos, favorecendo a formação de crostas estáveis.

Revegetação da área da barragem, com a recomposição do solo e o plantio de vegetais, com prioridade para aquelas pertencentes à flora local.

Há uma variedade de materiais utilizados na estabilização física dos rejeitos que evitam a poluição do ar. Além de água usada por aspersão, os materiais mais empregados são rochas e solos existentes nas circunvinhanças, dentre outros. Destacam-se: rejeitos de metalúrgicas, serragem, palha etc.

A estabilização química inclui a reação de produtos com os rejeitos para formar uma crosta resistente ao ar e à água. Os produtos químicos têm a desvantagem de não serem um meio de estabilização permanente, tal como a cobertura com solos e vegetais. Entretanto, os produtos químicos podem ser usados em locais inadequados ao crescimento de vegetação por causa de severas condições climáticas, ausência de solos, ou pela existência de elementos tóxicos à vegetação.

A estabilização química também é aplicável no controle de erosão de barragens ainda em operação. A estabilização por revegetação deve produzir uma cobertura capaz de se autoperpetuar, ou ainda, estimular a captura e germinação de sementes nativas que formarão uma comunidade autorregeneradora. Neste caso, se estabeleceria uma sucessão ecológica levando a uma cobertura vegetal em harmonia com o meio ambiente, cujos processos de irrigação ou cuidados especiais estariam dispensados.

Os rejeitos lançados em barragens podem também ser entendidos como uma disposição de maneira controlada e barata desses subprodutos, de forma a permitir sua retomada no futuro, em decorrência da variação mercadológica e técnicas de processamento. Alguns possíveis usos dos rejeitos são:

- (i) material de construção de estradas e pequenas barragens de terra;
- (ii) obtenção de concretos de baixa resistência pela mistura de cimento, água e rejeitos;
- (iii) blocos para emprego como suporte em minas subterrâneas, em substituição à madeira;
- (iv) exploração e beneficiamento para recuperação do minério de baixo teor;
- (v) aproveitamento de rejeito como agrominerais.

No diagrama de blocos da Figura 34, sugere-se uma linha de trabalhos com foco na construção e adequação de barragens de contenção de rejeitos ao meio ambiente, na fase de desativação. No Quadro 5, estão relacionados os principais efeitos ambientais resultantes da implantação, operação e desativação de barragens de contenção de rejeitos.

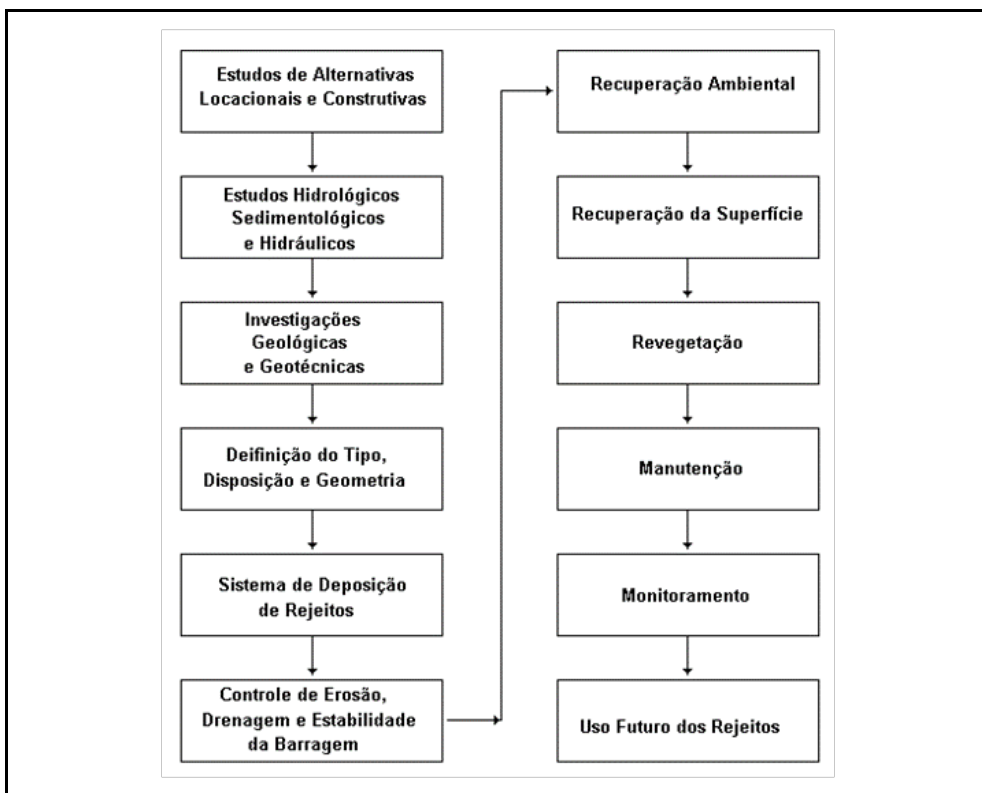


Figura 34 – Diagrama de blocos com as etapas de construção e recuperação ambiental de barragens de rejeitos.

Quadro 5 – Efeitos ambientais resultantes da implantação e desativação de barragens de rejeitos.

Efeitos	Fases			
	Implantação	Operação	Desativação	Abandono
Supressão da vegetação	●	●	●	●
Alteração das formas de uso da terra	●	●	●	●
Alteração da topografia	●	●	●	●
Aumento da erosão	●	●	●	●
Alteração da rede hidrográfica	●	●	●	●
Elevação do nível freático	●	●	●	●
Geração de ruído	●	●	●	●
Geração de poeira	●	●	●	●
Emissão de gases	●	●	●	●
Controle da poluição das águas	●	●	●	●
Estocagem de resíduos sólidos	●	●	●	●

INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação montada nos maciços das barragens de rejeitos e em suas fundações tem por fim a segurança estrutural e ambiental da barragem. A instrumentação associada ao controle da segurança ambiental é, basicamente, a mesma utilizada para o acompanhamento do comportamento das barragens convencionais de terra, considerando os aspectos peculiares dos projetos, dos métodos construtivos, dos materiais a serem utilizados no alteamento do maciço e aqueles lançados na bacia de acumulação dos rejeitos.

A instrumentação básica essencial à segurança ambiental está associada à avaliação das características das águas superficiais e daquelas que constituem o lençol freático. As linhas de trabalho normalmente utilizadas são:

- (i) medidas das variações dos níveis piezométricos, que indicam possíveis mudanças no regime das águas subterrâneas;
- (ii) avaliação da composição química das águas que expressam contaminações pelos produtos resultantes da dissolução durante as etapas de beneficiamento.

Neste trabalho, discute-se apenas a instrumentação implantada em barragens de rejeitos, com foco no conhecimento da segurança estrutural da obra. O uso da instrumentação para avaliar o comportamento de barragens de contenção de rejeitos deve ser norteado segundo as três fases principais destas obras: implantação, operação e desativação.

A instrumentação durante o período construtivo tem como premissa:

- (i) alertar sobre a ocorrência de eventuais anomalias no comportamento da barragem ou de situações que possam favorecer o surgimento de aspectos não compatíveis com o comportamento esperado do projeto;
- (ii) possibilitar revisões do projeto, adotando soluções menos conservadoras na fase construtiva, com economia ao projeto.

No período operacional, com o enchimento do reservatório, buscam-se, com a instrumentação, as informações essenciais à operação, tais como:

- (i) ocorrência de eventuais anomalias que possam colocar em risco as estruturas do barramento;
- (ii) avaliação do desempenho estrutural das obras, segundo comparações entre as medidas *in situ* e aquelas obtidas por meio de modelos matemáticos exclusivamente teóricos;
- (iii) verificar a conformidade dos critérios de projeto utilizados;

- (iv) avaliar o desempenho geral da barragem, conforme previsto no projeto da mesma;
- (v) caracterizar o comportamento dos materiais de fundação e da barragem com o desenvolvimento da obra, objetivando averiguar o tempo necessário para que ocorra a estabilização dos deslocamentos, tensões internas, estabilização das vazões etc.

Durante a fase de desativação, a instrumentação deverá avaliar a estabilidade do maciço resultante do lançamento dos rejeitos. Sugere-se atenção ao desempenho das estruturas, efetuando-se medidas para possibilitar a avaliação de tensões internas, variações das vazões, deslocamentos etc.

Principais Equipamentos Utilizados

Piezômetro pneumático - utilizado para a determinação de pressões neutras e subpressões em obras de engenharia civil.

Piezômetro elétrico - empregado na obtenção de medidas de pressões neutras e subpressões em taludes, maciços de terra e fundações.

Piezômetro de tubo aberto - largamente empregado. Direciona-se à determinação de pressões neutras em obras de engenharia civil, tais como: fundações, taludes, maciços rochosos e de terra (Figura 35).

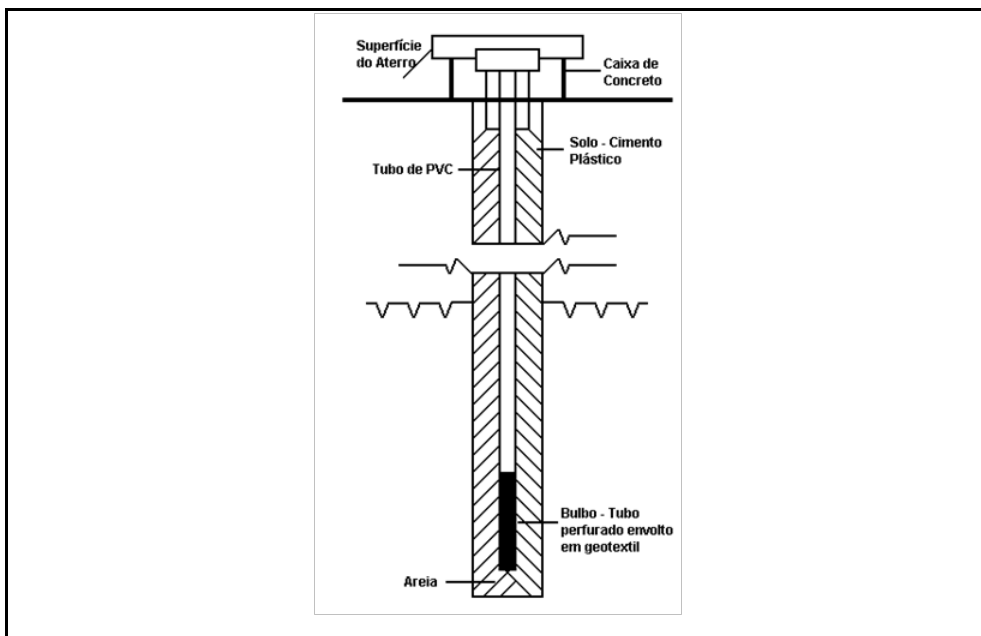


Figura 35 – Diagrama esquemático de um piezômetro de tubo aberto.

Piezômetro hidráulico – utilizado na determinação das pressões neutras e subpressões em obras de engenharia civil. Empregado em taludes, aterros e fundações.

Medidor de recalque tipo KM - equipamento utilizado para medidas de deslocamentos verticais possibilitando a determinação de deformações em até 12 pontos. Instrumento muito útil na etapa de alteamento de aterros (Figura 36).

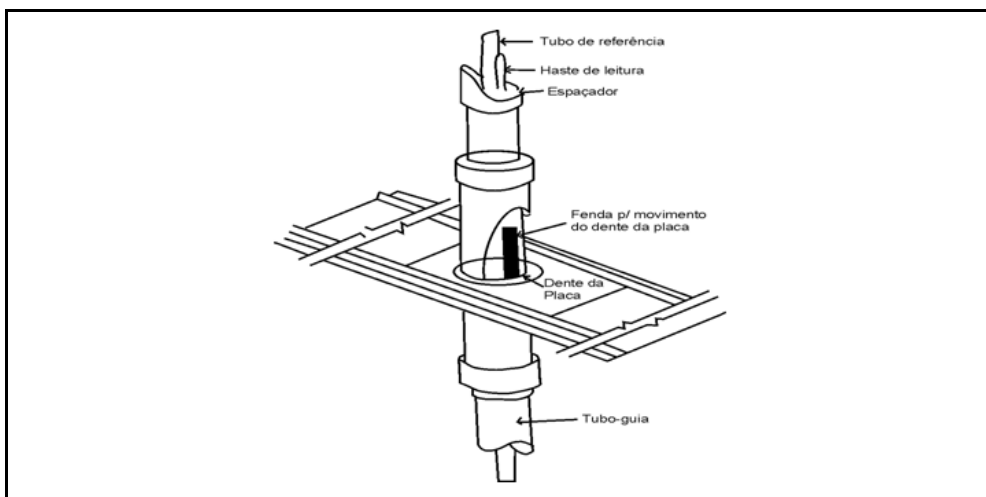


Figura 36 – Medidor de recalque tipo KM. Fonte: IPT – s/d.

Medidor de recalque telescópico tipo IPT - trata-se de um instrumento de medidas de recalques utilizado em alteamento de aterros, para a determinação de deformações verticais (Figura 37).

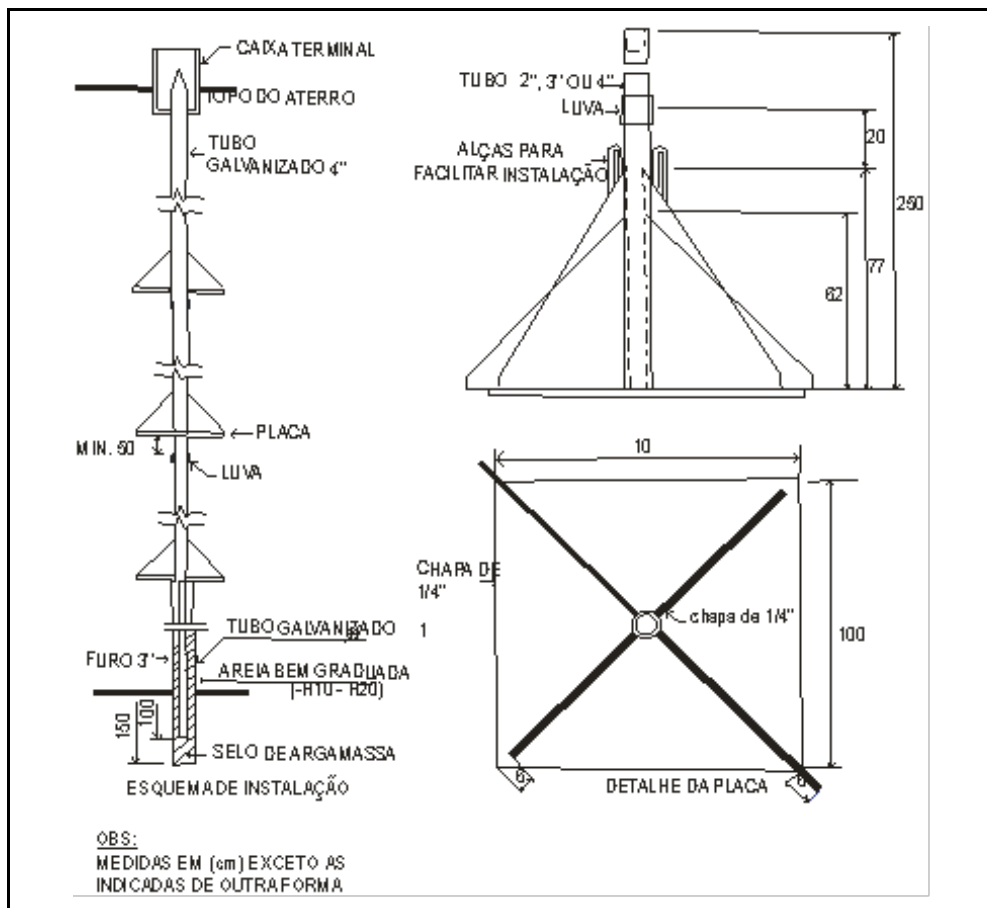


Figura 37 – Medidor de recalque telescópico tipo IPT.

Medidor de recalque tipo magnético - empregado para medidas de deslocamentos verticais do conjunto fundação/maciço de terra (Figura 38).

Medidor de recalque tipo USBR - equipamento utilizado para medidas de deslocamentos verticais do conjunto fundação/aterro compactado (Figura 38).

Principais Problemas Versus Instrumentação

Em barragens de terra e de contenção de rejeitos, os projetos devem incluir instrumentação que permita avaliar sua segurança em qualquer fase do projeto, da operação até a desativação. Isso advém do número de incertezas que geralmente existem nas investigações geológicas e geotécnicas, nas hipóteses simplificadoras normalmente adotadas nas análises de projetos, ao se determinar previamente os tipos e quantidades de instrumentos, tanto para a barragem como para suas fundações. As principais dificuldades que podem ocorrer no maciço de terra compactado, construído pelo lançamento de rejeitos (com ou sem compactação), e nas fundações de uma obra e, cujo conhecimento, torna-se fundamental para sua segurança podem ser assim resumidos a seguir.

Na fundação.

Descolamentos verticais.	Sólidos carreados.
Subpressões.	Infiltrações (vazões).
Deslocamentos cisalhantes horizontais (superfícies de escorregamentos).	

No maciço de terra compactado ou de rejeitos lançados.

Deslocamentos verticais.	Infiltrações (vazões).
Deslocamentos horizontais.	Sólidos carreados.
Pressões neutras.	Deslocamentos ao longo da crista e bermas.

Coleta, Processamento e Apresentação dos Dados da Instrumentação

O tratamento dos dados coletados no campo poderá ser feito manualmente ou por meio de recursos de informática, com a elaboração de gráficos e tabelas que possibilitem a avaliação do comportamento da estrutura.

Embora não existam normas que definam a frequência das leituras, recomenda-se que sejam feitas com regularidade semanal ou quinzenal, podendo ser espaçadas quando da fase de desativação. Recomendam-se leituras diárias, quando ocorrerem fatos que possam comprometer a segurança da obra (chuvas em excesso, alterações do balanço de água no processo de beneficiamento, aumento na produção de rejeitos, exigindo maior velocidade de alteamento etc.).

O processamento dos dados obtidos para análise deverão constar em gráficos e tabelas, até mesmo obedecer à seguinte sequência:

- (i) anotação, em ordem cronológica, das leituras efetuadas em um banco de dados específico;
- (ii) processamento das leituras;
- (iii) validação das leituras (técnicas determinísticas ou estatísticas);
- (iv) lançamento em gráfico dos resultados obtidos.

As tabelas deverão conter todos os valores das leituras, organizados de forma adequada para consultas ao longo do tempo, e a realização de comparações de resultados diante das variações de solicitações e de comportamento das obras.

Pelo exposto, afirma-se que todos os projetos de barragens de contenção de rejeitos devem prever algum tipo de instrumentação que permita avaliar permanentemente a sua segurança em qualquer estágio de desenvolvimento. Deve-se ainda alertar que a grande maioria das rupturas de barragens ocorrem naquelas de pequena dimensão, tornando-se fundamental o acompanhamento sistemático destas obras.

Não estão incluídas no texto as referências bibliográficas, porém todas as citações são fundamentadas na experiência do autor, técnicos, pesquisadores que atuam na área de disposição de rejeitos e disciplinas correlatas. Desse modo, está relacionada, a seguir, a listagem da bibliografia básica utilizada neste trabalho, até mesmo diversas outras que têm por objeto o estudo deste tema e que poderão constituir-se em fontes de consulta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, P.C. Deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Deposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais. Pp 333-349. Rio de Janeiro, 1987.
- ALMES, R.G. An overview of coal tailings disposal in the eastern U.S. In: Tailing Disposal Today – Simpósio Internacional de Rejeitos, 2, Denver, vol.2, pp 13-56. Miller Freeman Public, 1978.
- AMMAN, P.; RAMNHOLT, T.; WEISS, J. Geotechnical problems related to deposit of industrial waste. In: Congresso Europeu de Mecânica de Solos, XI. DFG, Bulletin 11, vol. 2, pp. 2.7-2.11, Copenhagen, Dinamarca, 1995.
- AMORIM, N.R. Barragem para contenção de rejeitos: avaliação do efeito da disposição dos rejeitos na percolação de água através do aterro e da fundação. São Carlos-SP, 96p. Dissertação de Mestrado. EESC-USP, 1983.
- APLIN, C.L.; ARGALL, Jr. G.O. Tailing disposal today. In: International Tailing Symposium, 1st. Proceedings. Tucson, Arizona. São Francisco. Miller Freeman Publication, 1973.
- ARNEZ, F.I.V. Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos causados pelos fatores geológicos e geotécnicos. São Paulo, SP. 83p + anexo. (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. In: Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, 3. REGEO' 95. Anais ABMS/ABGE/CBGB, vol. 2, pp 593-601. Ouro Preto, MG. 1995.

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE: Ensaios de Permeabilidade em Solos – Orientações para sua Execução no Campo – 3ª Edição, 1996, São Paulo.
- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE: Ensaios de Perda D'água sob Pressão – Diretrizes – Boletim 02, 1975, São Paulo.
- AZEVEDO, R.F.; SADO, J.S. Análise uni-dimensional do enchimento de reservatório de barragem de rejeito através de uma teoria de adensamento com grandes deformações. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 6, Salvador, Anais, São Paulo, ABGE/ABMS, vol.1, pp. 71-78, 1990.
- BERGSTROM, R.E. 1968. Disposal wastes: scientific and administrative considerations. Illinois State Geological Survey. Environmental Geology Notes n° 20, 12p.
- BLIGHT, G.E. et al., 1981. The flow of slurry from a breached tailings dam. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol.81, n° 1, pp.1-8.
- BOGNER, J.E. 1982. Prediction of extractable metals in retention pond sediments at surface coal mine. Environmental Geology, vol.4, pp 223-238.
- BORGES, A.L.; CONTE, A.E.; PAIVA, P.R.; GAIOTO, N. Barragem Morro do Ouro – Um exemplo de projeto otimizado das etapas de construção. In: Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais ABGE/CBGB/CERJ., pp. 47-54, Rio de Janeiro, 1991.
- BOTELHO, G.V. Análise da viabilidade de implantação de uma barragem de contenção de rejeitos utilizando ensaios de consolidômetros e modelagem digital. São Carlos, SP, 97p. Dissertação de Mestrado EESC-USP. 1994.
- BRAGA, A.P.G.; ROLIM, J.H.R.P.; ANDRADE, V.A. Estudos geológicos-geotécnicos para viabilização da construção da barragem de contenção de rejeitos da usina piloto da jazida de Itataia – CE. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia, Resumo e Breves Comunicações. Boletim 1, p. 75. SBG. Goiânia, 1986,
- BRAWNER, C.O.; CAMPBELL, D.B. Diseño empresas de relaves. In: Congresso Latino Americano de Mineralurgia, II. Anais ALAMI, 19p, il.Lima, Peru, 1972.
- BRAWNER, C.O.; DORLING IAN, P.F. Preparation plant refuse and waste disposal. In: Stability in coal mine (?), 1979.
- BRAWNER, C.O.; CAMPBELL, D.B. The tailing structure and its characteristics – A soil engineer's view point. Proceedings of First International Tailing Symposium pp.59-101 - Arizona, USA, 1972.
- BRITO, S.N.A. Condicionantes geológico-geotécnicos no projeto de barragens de rejeito. In: Seminário sobre Barragens de Contenção de Rejeitos, Anais. Pp.51-98, UFOP, Escola de Minas, Ouro Preto-MG, 1986.

- BROMWELL, L.G.; CARRIER III, W.D. Consolidation of fine grained mining wastes. In: Panamerican Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 6th, Proceedings, 1979, Lima, Peru, vol. 1, pp.293-304.
- BUSCH, R.G. Relato do Sub-tema Mineração e Meio Ambiente. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 4. Anais... Belo Horizonte, ABGE, vol.4, pp.97-112, 1984.
- BUSCH, R.G.; CASTRO, H.Z. Barragens Alteadas com Rejeitos Ciclonados na Arafertil. In: VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Anais, Porto Alegre-RS, 1986.
- BUSCH, R.G. et al., 1982. Construção de Barragens com Rejeitos pouco Permeáveis. Anais do VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Vol. VI, pp. 333-346.
- CALDWELL, J.A. 1983. The use of stage curves in the design and operation of tailings impoundments. The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin. Vol.76, n° 850, pp.43-50.
- CALIJURI, M.L.; MEIRA, A.D. A utilização de sistema de informação geográfica no planejamento da disposição de rejeitos e estéreis. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, 3. Ouro Preto, Anais, ABMS/ABGE/CBGB, vol.1, pp. 299-310. Ouro Preto-MG, 1995.
- CARDOSO, A.C. de M.; AMARAL, M.V.; BUARQUE, R. Sistema de contenção de rejeitos da Companhia Brasileira de Alumínio em Cataguases, Minas Gerais. Critérios de Projeto. In: Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais...ABGE/CBGB/CERJ. pp.15-28, Rio de Janeiro, 1991.
- CARDOSO, A.C.M. et al., Sistema de contenção de rejeitos da mina de São Bento, Critérios de Projeto. IN: II Simpósio sobre Instrumentação de Barragens, 2, Anais, vol.2, Belo Horizonte, 1996.
- CASAGRANDE, L.; MCLIVER, B.N. Design and construction of tailings dams. In: Brawner, C.O. Michigan, V. (ed.), 1971.
- CARGILL, K.W. Consolidation of soft layers by finite strain analysis. U.S. Army Engineer. Waterways Experimenty Station. Final Report, 1982.
- CARRIER III, W.D.; BECKMAN, F.F. de Melo.L.G. Optmization of mine waste disposal and reclamation in the Amazon region. In: International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils – Tropical's 85. Proceedings. ABMS. 1985. Brasília-DF.
- CARRIER, III W.D.; BROMWELL, L.G.; SOMAGYI, F. Design Capacity of Slurried Mineral Waste Ponds. Journal of Geotechnical Engineering. Vol.109, n° 5. 1983.

- CARRIER, III W.D.; de MELLO, L.G.; MOH, Z.C. Environmental impact in geotechnical engineering. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 12. Rio de Janeiro, 1989. Proceedings. Rio de Janeiro, ISSMFE, 1989. Vol.4, pp. 2121-2158.
- CARRIER, III W.D. et al., Design capacity of slurreid mineral wate ponds. In: Journal of Geotechnical Engineering. Vol.109, nº 5, pp.699-716. American Society of Civil Engineers. New York, 1983.
- CARVALHO, M.P.; SILVIO, E.; SOARES, L. Projeto de barragem para reserva de mistos de minerais pesados rejeitados pelo beneficiamento de cassiterita na Mina do Pitinga. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Minas. São Paulo, 1997.
- CEPPOLINA, M.; RUOPPOLO, L. Barragem de rejeito alteada através de diques de aterro compactado. In: Congresso de Geologia de Engenharia, 4, Anais...ABGE, vol.1, pp.277-287, Belo Horizonte, 1984.
- CHAVES, A.P.; FUJIMURA, F. Utilização de barragens de rejeitos na indústria minero-metalúrgica. In: Seminário sobre Recuperação de Rejeitos na Indústria Metalúrgica. Anais... ABM/COREME. Pp.153-172, São Paulo, 1991.
- 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.
- DEAN, K.C.; HAVENS, R. Comparative costs and methods for stabilization of tailings. In: Tailing Disposal Today. (ed. C.L. Aplin and G.O. Argall) Miller Freeman, San Francisco, pp.450-474, 1973.
- DOWN, C.G.; STOCKS, J. Environmental Problems of Tailing Disposal. Mining Magazine, vol.137, pp.25-33, julho, 1977.
- DOYLE, F.M. Ed. Mining and Mineral Processing Wastes. Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1990.
- DUELO, C. et al., The Utilization of Material Sedimented in Tailings Dams. Transactions of the 12th. International Congress on Large Dams. Vol.1, pp.153-157. 1976
- DUPAS, F.A. Características de percolação de barragens de rejeitos: estudo de caso da Barragem de Rejeito B6. São Carlos, SP. 130p. Dissertação de Mestrado EESC – USP. 1993.
- ESPÓSITO, J.T. Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise da Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação. São Paulo, 1995. 159p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

- ESTEVES, F.P. Barragens de Terra. Universidade da Paraíba. Escola Politécnica de Campina Grande, 1964.
- FAIR, A.E.; HANDFORD, G.T. Overview of the Tailings Dyke Instrumentation Program at Syncrude Canadá Ltd. In: International Symposium on Geotechnical Stability in Surface Mining. Calgary, Alberta, 1986. Proceedings...pp.245-253.
- FINN, W.D.L.; BYRNE, P.M. Liquefaction Potential of Mine Tailings Dams. Transactions of the 12th. International Congress on Large Dams. Vol.1, pp.839-849, 1976.
- FORNAZARI, F.N.; SAMPAIO, A.J.M.; OLIVEIRA, A.M.S.; LEITE, C.A.G.; PRANDINI, F.L.; NAKASU, L. Geologia Aplicada à Disposição de Rejeitos de Mineração: a Problemática e Contribuições à Diagnose e Solução. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 3. Anais....ABGE. Vol.3, pp.355-374. Itapema, SC.1981.
- FORRESTER, D.J.; WHITTAKER, P.M. Effects of Mining Subsidence on Colliery Spoil Heaps – I Mining Subsidence and Geotechnical Aspects of Spoil Heaps and Their Foundations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol. 13, n^o 4, pp.113-120. 1976a.
- FORRESTER, D.J.; WHITTAKER, P.M. Effects of Mining Subsidence on Colliery Spoil Heaps – I Mining Subsidence and Geotechnical aspects of Spoil Heaps and Their Foundations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol.13, n^o 4, pp. 121-133. 1976b.
- Fundação de Amparo e Tecnologia e Meio Ambiente. Estudos sobre o impacto Ecológico da Mineração e Beneficiamento do Carvão na Região Sul do Estado de Santa Catarina. Porto Alegre, FATMA/UFRGS, 1978, 337p. (Relatório Final Convênio FATMA-UFRGS).
- GIBSON, J. Useful Materials from Colliery Spoil. Mine and Quarry. Vol.4, n^o 8, pp.24-33., 1975.
- GIBSON, R.E.; England, G.L. Hussey, M.J.L. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers. Geotechnique, vol.3, pp.261-273, 1979.
- GOBARA, W. O Adensamento com Deformações Finitas e Obtenção de Parâmetros pelo Ensaio de Adensamento Hidráulico. São Paulo, 1991, 1v. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- GERGÓRIO, F.J.; NIEBLE, C.M. Barragens de Rejeito: Concepção e Projeto. In: Simpósio de Mineração, 5^o, Universidade Federal de Ouro Preto. Anais, vol.2. pp. 275-299. Ouro Preto, 1975.
- GUERRA, F. Characteristics of Tailings From Soil Engineer's View Point. Proceedings of the First International Tailing Symposium, Arizona, USA, 1972, pp.102-137.

- GUERIN, M.R. Reclamation Advances in the Midwest. Coal Mine & Processing. Vol.18, n° 2, p. 46-52. 1981.
- HIGHTER, W.H.; VALLE, R.P. The Liquefaction of Different Mine Tailings Under Stress-Controlled Loading. Engineering Geology. Vol.16, n° 1 e 2, pp.147-150. 1980.
- JONES, J.D.; JENKINS, R.G. Design and Construction of Tailings Ponds and Reclamation Facilities – Case Histories. The Canadian Mining and Metallurgical Journal. Vol.71, n° 798, pp.55-59. 1978.
- KEALY, C.D.; SODERBERG, R.L. Design of Dams for Mill Tailing. U.S. Dept. of the Interior Bureau of Mines. Information Circular, 49, p.il. Washington. 1969.
- KLOHN, E.J. Designs and Construction of Tailings Dams. The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin. Vol.65, n° 720, pp. 28-44. 1972.
- KLOHN, E.J. Tailing Dam Design. In: Seminar on Geotechnical Aspects of Mine Design and Tailings Containment, Edmonton, 1982, pp. 1-53. 1982.
- LAMBE, T.W.; WITHMAN, R.V. Soil Mechanics. John Willey & Sons Inc. 1969.
- LAMY, L.F.; BUSCH, R.G. Estudos Geológicos e Geotécnicos na Otimização dos Projetos de duas Barragens de Contenção de Rejeitos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 3. Anais... ABGE. Vol. 1, pp.247-262. Itapema-SC, 1981.
- LEITE, C.A.G. et al., Geologia Aplicada a Rejeitos de Mineração. Uma Resposta Metodológica. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXXI, Camburiú-SC. Anais. SBG, Camburiú-SC, 1981.
- MC WHORTER, D.B.; NELSON, J.D. Unsaturated Flow Beneath Tailings Impoundments. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, vol.105, n° GT11, pp.1317-1334. 1979.
- MC WHORTER, D.B.; NELSON, J.D. Seepage in Partially Saturated Zone Beneath Tailings Impoundments. Mining Engineering, vol.32, n° 4, pp.432-439. 1980.
- MELLO, F.M. Condicionantes Geotécnicas de Projeto de Barragem e Reservatório de Rejeitos de Mineração de Urânio. Seminário Nacional de Grandes Barragens, XIV. Recife, 1981.
- MELLO, L.G.F.S.; AMORIM, N.R.; MELLER, F.C.; QUARESMA, A.R.F. Desenvolvimento e Ensaio Iniciais em Consolidômetro de Lama em Condições de Deformação Controlada. In: Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais...ABGE/CBGB/CERJ. pp. 55-66. Rio de Janeiro, 1991.
- MELLO, L.G.F.S. Otimização da Deposição de Rejeitos. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. BT/PEF 9212. 1992, São Paulo.

- MELLO, L.G.F.S.; SILVEIRA, A.A. Leis de Compressibilidade e Permeabilidade de Alguns Rejeitos Brasileiros. In: Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais....ABGE/CBGB/CERJ. Rio de Janeiro, 1991, pp.67-76.
- MELLO, L.G.F.S. de; CARRIER III. W. D. ; DAVID LAPA, R.P. Comportamento de Reservatórios de Rejeitos Diluídos de Bauxita. In. Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais... ABGE/CBGB/CERJ. – Pp 99-108 – Rio de Janeiro, 1991.
- Ministério do Comércio e Indústria Internacional. Departamento de Localização de Poluição. Depósitos de Contenção de Escórias e Rejeitos – Padrões de Construção e Comentários. Tóquio, 1973.
- MITHAL, H.K.; MORGENSTERN, N.R. Parameters for the Design of Tailings Dams. 27th Canadian Geotechnical Conference, Reprints of Papers, vol.2, pp.79-95. 1974.
- MITHAL, H.K.; MORGENSTERN, N.R. Parameters for the Design of Tailings Dams. Canadian Geotechnical Journal, vol.12, pp.235-261. 1976.
- MITHAL, H.K.; MORGENSTERN, N.R. Seepage Control in Tailings Dams. Canadian Geotechnical Journal, vol.13, pp.277-293. 1976.
- MONTEZ, F.T. Utilização de Geotextil em Barragens de Rejeitos. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais....pp.333-349, Rio de Janeiro, 1987.
- NAKAO, J.; MORE, R.T.; OLIVEIRA, H.G. Canga, Itabirito e Solo Saprolítico de Filito na Barragem de Retenção de Rejeitos de Águas Claras. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 4. Belo Horizonte. Anais...São Paulo, ABGE, v. 1, pp.288-309, Belo Horizonte, MG, 1984.
- NEGRO Jr. A. Características Geotécnicas de Solos de Aterros Hidráulicos e a Experiência na Barragem do Guarapiranga. Revista Solos e Rochas, COPPE/UFRJ, vol.1, n^o 3, Rio de Janeiro, 1979.
- NIEBLE, C.M. Deposição de Rejeitos. Curso de Geotecnia Aplicada a Minas a Céu Aberto. Paulo Abib Engenharia S.A. Apostila, 28p. Il. Itabira, MG. 1986.
- NIEBLE, C.M.; ROCHA, R.S. Método Construtivo usa Rejeitos para Construir Barragem de Deposição. Revista Construção Pesada, ano 6, n^o 70, pp.90-96, il. São Paulo. 1976.
- NIEBLE, C.M.; ROCHA, R.S. O Método da Linha de Centro Modificado na Construção de Barragens de Rejeito. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XI. Anais...SNGB, 22p, il. Fortaleza, Ceará. 1974.

- PARRA, P.C.; ÁVILA, J.P. de MUSMAN, J. Características Específicas de Projetos de Barragem de Rejeitos de Mineração. In: Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais...ABGE/CBGB/CERJ. pp.1-14. Rio de Janeiro, 1991.
- PARRA, P.C.; RAMOS, V.J. Ruptura, Recuperação e Estabilização de Barragem de Rejeitos da Mina do Pico São Luiz. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, II. Anais, Rio de Janeiro, pp.445-462, Rio de Janeiro, 1987.
- PARRA, P.C.; LASMAR, N.T. Ruptura da Barragem de Rejeitos da Mina de Fernandinho. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, I. Anais... Rio de Janeiro, pp.423-443, Rio de Janeiro, 1987.
- PENTEADO, L.H. de B. Relatório das Atividades Desenvolvidas na Seção de Prospecção do Agrupamento de Geologia Aplicada a Barragens – DMGA. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT. 1985. São Paulo.
- RITCEY, G.M. Tailings Management. Problems and Solutions in the Mining Industry. Amsterdam, Elsevier, 1989.
- SADOWSKY, G.R.; MELLO, L.G.F.S; OLIVEIRA, F.J.P.; MARIUTTI, M.P. Considerações de Dimensionamento e Comportamento após Início de Operações de Barragem de Rejeitos de Mineração de Urânio na Mina de Cercado. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 15, Rio de Janeiro, Anais...CBGB, v.2, pp.497-524, Rio de Janeiro, 1983.
- SHIELDS, D.H. 1974. Innovations in Tailings Disposal. 27th . Canadian Geotechnical Conference, Reprints of Papers, vol.1, pp.67-70.
- SILVA, F.N.; MEDEIROS, C.C. Diques de Contenção de Rejeitos de Jarosita. In: Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais...ABGE/CBGB/CERJ. pp.109-121, Rio de Janeiro, 1991.
- SILVEIRA, E.B.da S.; READES, D.W. Barragens para Contenção de Rejeitos. In: IX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Anais...SNGB, tema 2, 35p. II. Rio de Janeiro, 1973.
- SILVIO, E. Ouro Preto tailing dam system in Pitinga – Amazon. International Conference on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, 3th, Perth, Austrália, 1994.
- TORRES, E.E.; MAIA, L.S.C.; AMARAL, M.V. Otimização da Capacidade de Acumulação do Lago de Rejeito da Mina de São Bento Mineração. In: Simpósio sobre Barragens de Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais...ABGE/CBGB/CERJ. pp.29-46, Rio de Janeiro, 1991.

- U.S. Department of the Interior – Bureau of Reclamation. Designs of Small Dams. USBR, Denver, 1987.
- VICK, S.G. Siting and Design of Tailings Impoundments. Mining Engineering, vol.33, n° 6, pp.653-657, 1981.
- VICK, S.G. Planning. Design and Analysis of Tailing Dams. John Wiley & Sons. New York. 1983.
- VOLPE, R.L. Geotechnical Engineering Aspects of Copper Tailings Dam. Meeting Preprint 2629. Denver, ASCE National Convention, 1975.
- WAHLER, W.A.; SCHLICK, D.P. Mine Refuse Impoundments in the United States. In: Icold – International Congress on Large Dams, 12. Anais.... México, 1976.
- WAHLER, W.A. & Associates. Analysis of Coal Refuse Dam Failure. Vol.1, texto; vol.2 apêndice. 1973.
- WAHLER, W.A. & Associates. Evaluation of Mill Tailings Disposal Practices and Potential Dam Stability Problems in Southwestern United States – General Report, dezembro, 1974.
- Warman Hero Equipamentos – Catálogo Warman – Hidrociclones Revestidos com Elastômeros – 1998 – São Paulo.
- WILLIAM, R.E. et al., Effects and Prevention of Leakage from mine Tailings Ponds. Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME, vol.254, n° 3, pp.212-216. 1973.
- WOLSKI, W. et al., Some Aspects of Designs of Mine Tailings Dams. Transactions of the 12th. International Congress of Large Dams, vol.1, pp.787-798. 1976.
- WULF, J.F.; PERRY, C. Efficient Methods of site Appraisal and Determination of Type of Dam – A Discussion of Basic Philosophy and Procedures in Project Planning and site Selection. Congress des Grands Barrages, 12. México, 1976.