

2 Barragem de Rejeito

2.1. Introdução

Uma barragem de rejeito é uma estrutura de terra construída para armazenar resíduos de mineração, os quais são definidos como a fração estéril produzida pelo beneficiamento de minérios, em um processo mecânico e/ou químico que divide o mineral bruto em concentrado e rejeito. O rejeito é um material que não possui maior valor econômico, mas para salvaguardas ambientais deve ser devidamente armazenado.

As características dos rejeitos variam de acordo com o tipo de mineral e de seu tratamento em planta (beneficiamento). Podem ser finos, compostos de siltes e argilas, depositados sob forma de lama, ou formados por materiais não plásticos, (areias) que apresentam granulometria mais grossa e são denominados rejeitos granulares (Espósito, 2000). Os rejeitos granulares são altamente permeáveis e contam com uma boa resistência ao cisalhamento, enquanto os rejeitos de granulometria fina, abaixo de 0.074mm (lamas), apresentam alta plasticidade, alta compressibilidade e são de difícil sedimentação.

De acordo com Chammas (1989) o rejeito em forma de polpa passa por três etapas de comportamento:

- Comportamento de lâmina líquida, com flocculação das partículas de menor tamanho.
- Em processo de sedimentação, apresentando comportamento semi-líquido e semi-viscoso.
- Em processo de adensamento, comportando-se como um solo. É importante mencionar que o rejeito não é propriamente um solo, mas para fins geotécnicos seu comportamento é considerado equivalente a de um solo com características de baixa resistência ao cisalhamento.

2.2. Transporte e Descarga de Rejeitos

Os rejeitos são transportados em forma de polpa, sendo algumas vezes por gravidade através de canais ou por meio de tubulações, com ou sem sistemas de bombeamento, dependendo das elevações relativas entre a planta de beneficiamento e o local onde será descartado. O sistema de tubulação é dimensionado com base na velocidade mínima de fluxo necessária para evitar que as partículas no estado sólido do rejeito se sedimentem e obstruam a tubulação. Esta velocidade depende tanto da densidade da polpa, como do tamanho das partículas, variando aproximadamente entre 1.5 a 3.0 m/s. Atualmente, se usam tubulações de polietileno de alta densidade (HDPE).

A polpa de rejeitos é usualmente abrasiva e de alta viscosidade, sua densidade é definida como a razão entre o peso de sólidos pelo correspondente peso da polpa, variando no intervalo entre 0.15 a 0.55.

A disposição dos resíduos em uma praia de rejeitos pode ser efetuada em um ou em vários pontos de descarga (*spigotting*) como se mostra na figura 2.1. Normalmente o lançamento dos rejeitos é realizado com a utilização de hidrociclones ou canhões. No caso de canhões o processo de separação granulométrica ocorre na própria praia em função da velocidade de descarga, da concentração e das características mineralógicas do rejeito, enquanto que no caso de hidrociclones uma primeira classificação granulométrica é feita antes do lançamento (Ribeiro et al, 2003).

2.3. Comportamento de Rejeitos

O rejeito passa por uma série de transformações físicas ao longo do tempo durante sua disposição, conforme apresentado na tabela 2.1.

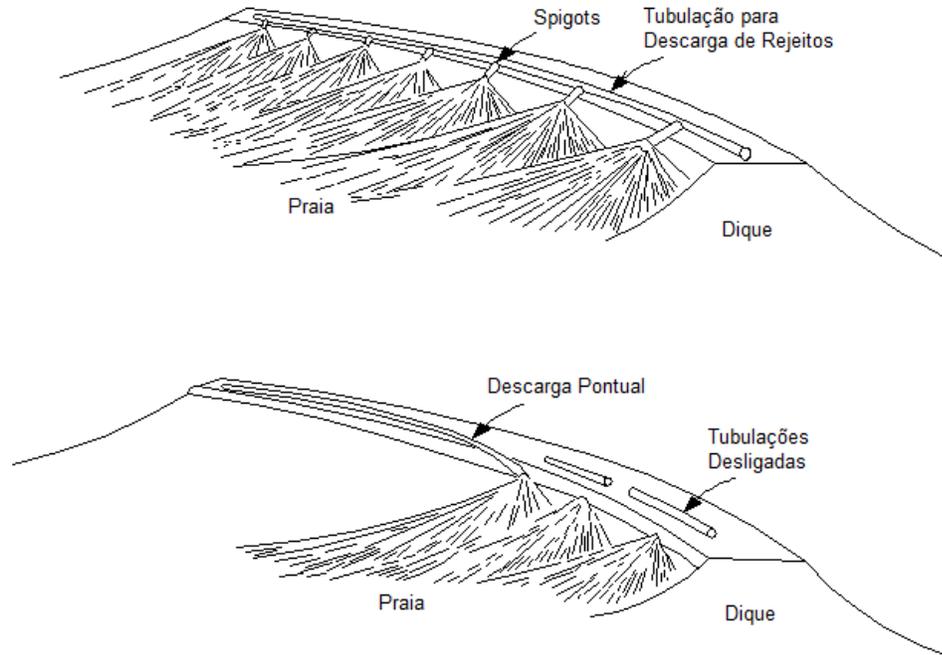


Figura 2.1 – Métodos de descarga perimetral a) pontos múltiplos (*spigotting*); b) descarga pontual.

Tabela 2.1 – Importância do fenômeno durante o ciclo de operabilidade (adotado do Lopes de Oliveira e Zyl, 2006)

| Estado | Fenômeno | Rejeitos | | |
|--|---------------------|-----------|-----------|------------|
| | | Finos | Médios | Granulares |
| Durante o tempo de construção | Sedimentação | / | / | x |
| | Adensamento | * | / | x |
| | Compressão Imediata | x | / | * |
| | Filtração | NA | NA | / |
| Após terminados os trabalhos de disposição de rejeitos | Adensamento | * | / | NA |
| | Filtração | x | / | * |
| Comportamento ao longo do tempo | Dessecação | * | / | NA |
| | Desaturação | x | / | * |

| Simbologia | Significado |
|------------|------------------------------|
| / | Influi no processo |
| * | Predominante no processo |
| x | Pouca influência no processo |
| NA | Não aplicável |

Segregação hidráulica

A segregação hidráulica é um processo de disposição onde partículas de diferentes tamanhos são dispostas a distâncias específicas em relação ao ponto de lançamento. A segregação hidráulica apresenta um efeito direto na distribuição granulométrica e nas condições de fluxo ao longo da praia (Bhering, 2006).

De acordo com Vick (1983), durante o processo de disposição hidráulica se espera uma zona de alta permeabilidade nas áreas próximas ao ponto de descarga (rejeitos granulares), assim como uma zona de baixa permeabilidade situada mais distante do ponto de lançamento (rejeitos finos) com uma zona de permeabilidade intermediária entre as mesmas (figura 2.8). A disposição hidráulica cria também características estruturais típicas como estratificação, acamamentos, microestruturas, etc.

Segundo Blight (1994) em rejeitos arenosos a segregação granulométrica ocorrida na praia gera o arraste das partículas finas para locais mais distantes do ponto de lançamento dos rejeitos, com redução da condutividade hidráulica em função da distância do ponto de lançamento, conforme figura 2.9. A condutividade hidráulica média k foi estimada por aquele autor em função da distribuição granulométrica e a equação de Sherard (1984):

$$k = 0.35(d_{15})^2$$

onde k representa a condutividade hidráulica em (cm/s) e d_{15} o diâmetro efetivo em milímetros.

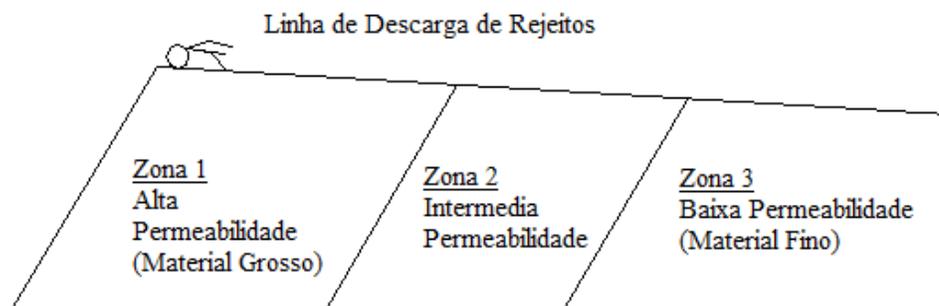


Figura 2.2 – Zonas de diferentes permeabilidades causadas por segregação hidráulica.

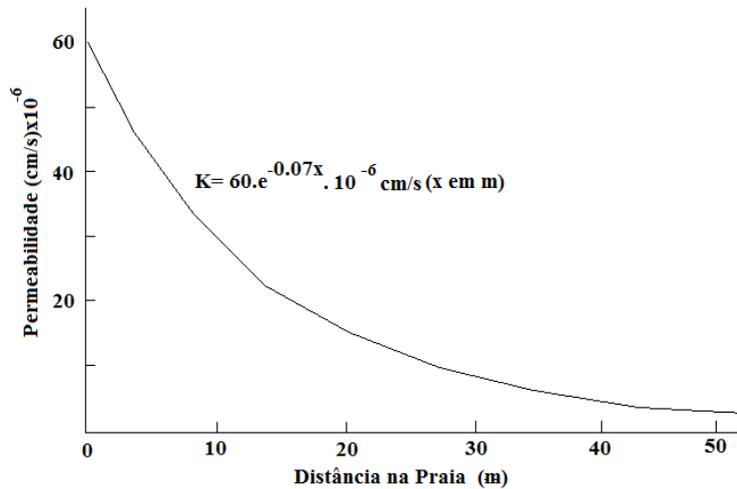


Figura 2.3 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função da distância do ponto de lançamento na Praia (Blight, 1994).

Evaporação

No processo de disposição de rejeitos, normalmente o intervalo de tempo entre o lançamento de camadas consecutivas é suficiente para permitir o ressecamento da camada anterior lançada (figura 2.10). À medida que o grau de saturação diminui, a sucção desenvolvida pode ser suficientemente alta para aumentar a resistência do material, formando um perfil geotécnico com características de pré-adensamento, o que contribui na minimização de recalques após o final da disposição (Fahey et al, 2002).



Figura 2.4 – Ressecamento da superfície do reservatório de rejeito (Bhering, 2006).

Sedimentação

No momento da disposição dos rejeitos, algumas regiões da camada tornam-se mais densas que outras, dependendo do tipo de disposição. Disposições turbulentas tenderiam a provocar maiores índices de vazios nas camadas.

Adensamento

Adensamento é o processo que envolve a ocorrência de deformações e aumento da tensão efetiva no material, com o conseqüente aumento de sua resistência, devido à dissipação dos excessos de poropressão ao longo do tempo. A polpa depositada no reservatório possui considerável quantidade de água no momento de sua disposição, sendo fundamental a existência de um sistema de drenagem eficiente para garantir a ocorrência do adensamento.

A permeabilidade dos rejeitos diminui significativamente à medida que o adensamento avança, as camadas inferiores tornando-se menos permeáveis com o tempo e o sistema de drenagem nessas camadas deixando de ser eficazes (Bhering, 2006).

No momento de lançamento de resíduos de densidades muito baixas no reservatório, existe a ocorrência de sedimentação e adensamento simultaneamente. No comportamento da mistura líquido-sólido, a diferença entre sedimentação e adensamento é feita usualmente em termos da ocorrência ou não das tensões efetivas. Quando não há contato entre grãos, o comportamento da camada de resíduos é governado pela teoria da sedimentação (McRoberts & Nixon, 1976), enquanto a teoria do adensamento seria aplicável quando tensões efetivas entre partículas sólidas fossem desenvolvidas. As propriedades de deformabilidade e permeabilidade variam significativamente ao longo do tempo, necessitando-se de uma teoria do adensamento a grandes deformações para um tratamento rigoroso do assunto.

Adicionalmente, os recalques gerados nos rejeitos não são somente provocados pelo adensamento, mas também pelo ressecamento, com a formação de uma crosta superficial com características de material pré-adensado.

2.4. Características Geotécnicas do Comportamento do Rejeito

Fahey et al. (2002) consideram que a mineralogia da fração argilosa pode ter uma importante influência no comportamento de rejeitos. Por exemplo, uma pequena porcentagem de montmorilonita afeta significativamente a taxa de sedimentação, compressibilidade e permeabilidade das camadas.

Os processos de beneficiamento do mineral aos quais a rocha é submetida afetam a distribuição granulométrica e a forma das partículas no rejeito assim gerado (Troncoso, 1997).

De acordo com Gumieri et al. (1998) os rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de ferro normalmente pertencem ao grupo com granulometria de areias finas e médias, possuindo alta permeabilidade e baixa compressibilidade, com ocorrência de sedimentação e adensamento em tempos relativamente curtos o que, sob ponto de vista geotécnico, os classificaria como materiais favoráveis. Por outro lado, segundo os mesmos autores, rejeitos com granulometria de silte, produzidos no beneficiamento de ouro e alumínio, possuem elevada plasticidade e apresentam maior dificuldade de sedimentação e adensamento.

Espera-se que o coeficiente de permeabilidade de rejeitos varie entre os valores 10^{-4} m/s, para rejeitos arenosos, até 10^{-11} m/s, para rejeitos argilosos finos e bem consolidados (Bhering, 2006). Devido à natureza estratificada da deposição de rejeitos em camadas, há considerável variação entre os valores do coeficiente de permeabilidade nas direções vertical k_v e horizontal k_h , geralmente com a relação k_h / k_v variando no intervalo entre 2 a 10 para depósitos de rejeitos arenosos razoavelmente uniformes.

Tanto os rejeitos arenosos ou lamas são mais compressíveis que a maioria dos solos naturais de tipo similar. A compressibilidade é determinada pelo ensaio de compressão confinada (ensaio de adensamento), comumente usado na mecânica dos solos para avaliar a compressibilidade de argilas. Para rejeitos arenosos o valor do índice de compressibilidade C_c varia geralmente entre 0.05 a 0.1, enquanto para a maioria de lamas de baixa plasticidade C_c se situa entre 0.2 a 0.3. O coeficiente de adensamento c_v para depósitos de rejeitos arenosos

geralmente varia entre $0.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ a $100 \text{ cm}^2/\text{s}$, enquanto que para lamas varia entre $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ a $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Rejeitos granulares constituídos por partículas esféricas e arredondadas têm ângulos de atrito sensivelmente menores que os de partículas angulares. Para valores de tensões confinantes elevadas, o ângulo de atrito dos rejeitos granulares compactos pode ser da mesma ordem de grandeza que os valores correspondentes aos rejeitos granulares fofos. A resistência ao cisalhamento dos rejeitos granulares compactos, depois de atingir um valor máximo (resistência de pico), decresce até se estabilizar em torno de um valor definido como resistência a volume constante (resistência residual). A resistência a volume constante é da mesma ordem de grandeza da resistência dos rejeitos granulares no estado fofo (Cavacalte et al., 2003).

Para o caso da análise da estabilidade do talude de jusante de uma barragem, a determinação da posição da linha freática torna-se um elemento crítico. Este posicionamento está condicionado aos seguintes três fatores (figura 2.11): a) à localização do lago de decantação em relação à crista da barragem; b) o efeito da variação da permeabilidade no reservatório devido à segregação hidráulica; c) o efeito das condições de permeabilidade da fundação da barragem.

Notamos que o comprimento da praia vai depender da localização da linha freática. Com fins de estabilidade é recomendável ter um comprimento considerável da praia, isso vai se conseguir com uma distribuição eficiente do sistema de drenagem.

2.5. Métodos Construtivos de Alteamento

Muitas vezes em uma mineração é necessário aumentar a capacidade de armazenamento de uma barragem de rejeito existente, através da construção de alteamentos de acordo com os seguintes métodos construtivos: a) método à montante; b) método à jusante; c) método da linha de centro.

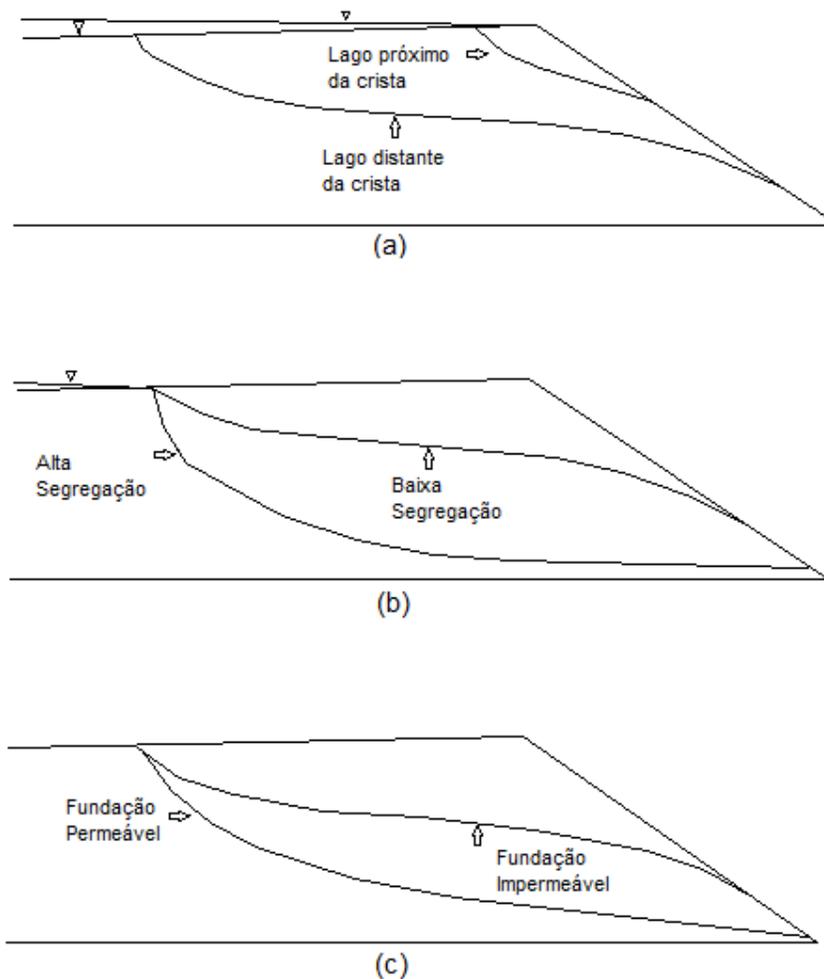


Figura 2.5 – Fatores que influenciam a posição da linha freática em barragens de rejeito (adaptado de Vick, 1983).

2.5.1. Método à montante

O método à montante em sua etapa inicial consiste na construção de um dique de partida, formado geralmente de materiais argilosos ou enrocamento compactado. Após esta etapa, os rejeitos são depositados hidraulicamente da crista do dique de partida, formando uma praia de rejeito que, com o tempo, adensará e servirá de fundação para futuros diques de alteamento, estes executados com o próprio material de rejeito. O processo é repetido até atingir à cota de ampliação prevista (figura 2.12).

Se, por um lado, o método à montante apresenta como vantagens a simplicidade e o baixo custo de construção, por outro está associado à maioria das

rupturas em barragens de rejeitos em todo o mundo (Engels & Dixon-Hardy, 2008). Rupturas por percolação e erosão (*piping*) também são possíveis quando a distância entre o lago de decantação e o talude de jusante da barragem não for suficientemente grande, propiciando a ocorrência de gradientes hidráulicos elevados.

A melhor forma de diminuir este risco é ter uma vasta praia entre a crista da barragem e o reservatório (Gomes, 2010), além de contar com um sistema de drenagem interno eficiente para abatimento da superfície freática (Icold & Unep, 2001; Gomes, 2010). Excessos na velocidade do alteamento pode também induzir o mecanismo de liquefação estática.

Para zonas de alta atividade sísmica, não é recomendado o alteamento de barragem de rejeito pelo método à montante pois aumenta significativamente a probabilidade de liquefação dinâmica induzida por terremotos.

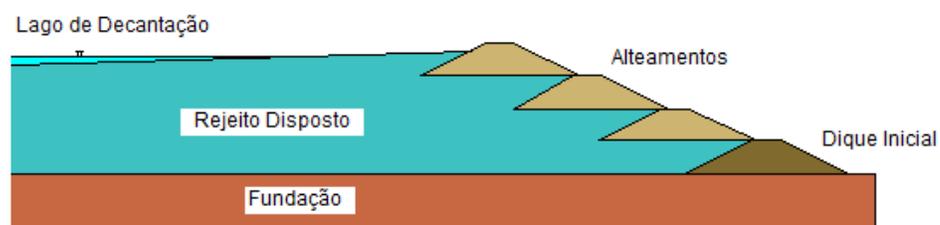


Figura 2.6 – Método de alteamento à montante.

2.5.2. Método à jusante

É um método mais conservador do que o método à montante, desenvolvido para reduzir os riscos de liquefação em zonas de atividade sísmica. Depois da construção do dique de partida, os alteamentos subsequentes são realizados à jusante do mesmo, até atingir a cota de projeto (figura 2.13).

Neste processo construtivo, cada alteamento é estruturalmente independente da disposição do rejeito, melhorando assim a estabilidade da estrutura. Todo o alteamento da barragem pode ser construído com o mesmo material do dique de partida, assim como os sistemas de drenagem internos podem ser também instalados durante o alteamento, permitindo um melhor controle da superfície freática.

A principal desvantagem deste método é o custo de sua implantação, devido ao grande volume de aterro que necessita e a grande área que sua construção ocupa.

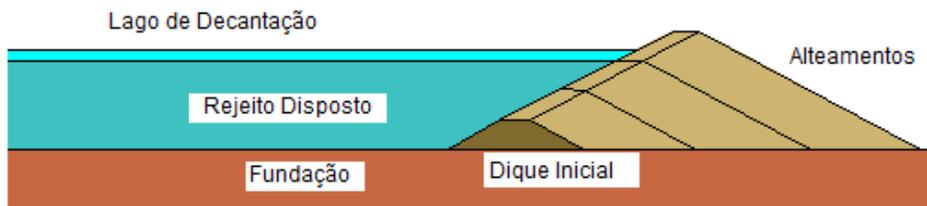


Figura 2.7 – Método construtivo à jusante.

2.5.3. Método da linha de centro

Este método é uma solução intermediária entre os dois métodos apresentados anteriormente, possuindo uma estabilidade maior que a barragem alteada somente com o método à montante, porém não requerendo um volume de materiais tão significativo como no alteamento somente com o método à jusante.

O sistema de disposição é similar ao método à montante, com rejeitos lançados a partir da crista do dique de partida. A construção prossegue de modo similar, com alteamentos com diques sucessivos, porém permanecendo o eixo de simetria da barragem constante (figura 2.14).

Se a parte superior do talude perder eventualmente o confinamento, podem aparecer fissuras, causando problemas de erosão, e aumentos de poropressões. (Troncoso, 1997).

A tabela 2.2 lista e compara as principais vantagens entre estes métodos de alteamento de barragens de rejeito.

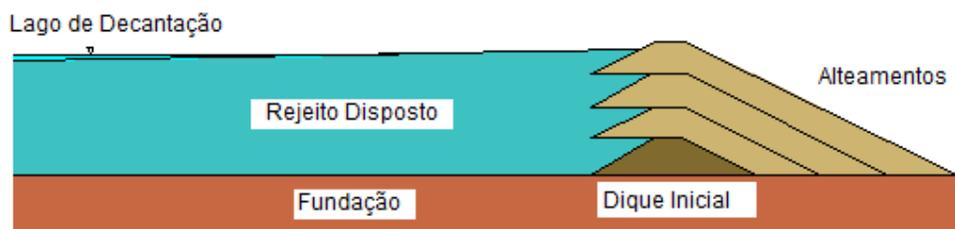


Figura 2.8 – Método de alteamento da linha de centro.

Tabela 2.2 – Comparação dos métodos de alteamento (adaptado de Campos, 1986).

| Método | Vantagens | Desvantagens | Observações |
|------------------------|---|--|---|
| Jusante | <ul style="list-style-type: none"> . Menor probabilidade de ruptura interna. . Superfície provável de ruptura passando sempre ao longo de material resistente e compactado. . Abatimento da linha freática, uma vez que se impõe um sistema de drenagem. | <ul style="list-style-type: none"> . Custo mais elevado. . Menor aproveitamento da área disponível. . Maior volume de material compactado. | <ul style="list-style-type: none"> . O alteamento pode ser realizado com o próprio rejeito. No entanto, é mais comum o uso de materiais provenientes de áreas de empréstimo. |
| Montante | <ul style="list-style-type: none"> . Menor custo. . Maior velocidade de construção. . Melhor aproveitamento da área. . Menor vazão V_{areia} / V_{lama}. . Não existe erosão eólica e hidráulica nos taludes. | <ul style="list-style-type: none"> . Superfície freática elevada. . Maior risco de ruptura por <i>piping</i>. . Superfície provável de ruptura passando pelo material de baixa resistência ao cisalhamento. . Dificuldade de implementação de sistema de drenagem eficiente. | <ul style="list-style-type: none"> . Aterro hidráulico com o próprio rejeito bombeado. . Diques geralmente construídos com o rejeito escavado na periferia do lago. |
| Linha de centro | <ul style="list-style-type: none"> . Economia de espaço físico. . Menor volume de material compactado. . Drenagem interna eficiente. | <ul style="list-style-type: none"> . Possibilidade de ocorrência de fissuras no corpo da barragem. . Maior risco de ruptura por <i>piping</i>. . Dificuldade de implementação de sistema de drenagem eficiente. | <ul style="list-style-type: none"> . Caso particular do método à jusante. |