

CONSIDERAÇÕES SOBRE BARRAGENS DE REJEITO DA MINERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE MONTANTE

Fernando Alves Cantini Cardozo

Pesquisador do curso de Engenharia de Minas e Acadêmico do curso de Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
fernando.cantini3@gmail.com

Diogo Peixoto Cordova

Professor/Pesquisador do curso Superior de Tecnologia em Mineração
Universidade Federal do Pampa
diogocordova@me.com

Cesar Alberto Ruver

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
cesar.ruver@gmail.com

Resumo. *Este artigo visa debater sobre o assunto barragem de rejeito, apresentando considerações quanto a seu uso, critérios técnicos de projeto e métodos construtivos. O assunto é apresentado de modo simples, de maneira a ser facilmente compreendido, embora sem desconsiderar a menção a importantes nuances da engenharia geotécnica, as quais tornam estas estruturas tão particulares dentro das obras de terra e barragens. Referente ao método de construção a montante, de maior utilização, são comentados como os fatores de projeto, número de alteamentos, drenagem interna e afastamento da praia de rejeitos podem afetar a estabilidade do barramento.*

Palavras-chave: *Barragem de Rejeito. Métodos construtivos. Geotecnia.*

1. INTRODUÇÃO

Considerando o interesse coletivo ao tema barragens de rejeito, devido às recentes e trágicas rupturas das barragens nas localidades de Mariana/MG, Brumadinho/MG e Machadinho D'Oeste/RO, este artigo tem por objetivo apresentar algumas considerações

quanto aos métodos construtivos das barragens de rejeito da mineração, sobre tudo ao método mais utilizado, o método de montante.

Barragens de rejeitos têm por finalidade a disposição de rejeitos oriundos da mineração. Kossoff *et al.* (2014), definem os rejeitos destinados a barragens como a mistura de rocha cominuída e os fluidos do processo de beneficiamento; então apresentando como característica física, granulometria fina e forma angular; e composição química dependente da composição da rocha de origem e dos reagentes utilizados no processo. Ao passarem pelos processos de beneficiamento, os minérios, especificamente nas operações de moagem, são cominuído a granulometrias em geral na faixa de silte. Assim normalmente, nesta faixa, se apresentam os rejeitos de mineração.

Outra característica que deve ser destacada é que diferente das barragens para represamento de água, as barragens de rejeito têm sua execução e operação concomitantes a operação de um complexo mineiro (mina e planta de beneficiamento). Assim sendo, são necessários alteamentos do barramento durante a vida útil da barragem, processo que pode perdurar por diversos anos, dependendo

de fatores como porte da jazida, tipo de minério e viabilidade econômica da exploração.

Um histórico de falhas de barragens analisado entre 1910-2010, apresentado por Azam e Li (2010), mostra que 1,2% das barragens de mineração apresentaram algum tipo de falhas, contra 0,01% das barragens civis. Tal dado nos dá uma dimensão da complexidade de barragens de rejeito em comparação as demais barragens para uso civil. Embora deva-se destacar que por muito tempo se considerou aceitável uma confiabilidade menor em barragens de rejeito em comparação a barragens civis.

2. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITO

Tipicamente para Barragens de Rejeito, se identificam três métodos construtivos básicos (Figura 1), considerando ainda ser usual a combinação entre dois ou entre os três métodos. Estes métodos fazem referência a técnica e direção de alteamento empregado, seguindo em direção Montante, Jusante ou acompanhando uma Linha de Centro. Tais barramentos podem ser executados com material proveniente de áreas de empréstimo, estéril ou com o próprio rejeito do beneficiamento (opção mais comum), desde que tratado e que atenda especificações geotécnicas de projeto. Para tanto, este rejeito é passível de processos adicionais como a ciclonação, para deslamagem, passando a ser chamado de aterro hidráulico (MAFRA, 2016).

Nota-se que diferente do método de alteamento a Jusante, nos métodos de alteamento da Linha de Centro e de Montante, os alteamentos são executados parcialmente sobre rejeito já disposto. Dessa forma, embora tenham significativa economia com movimentação de terra (apresentam menor volume de material destinado a execução do

barramento), trazem certa complexidade quanto ao controle construtivo do barramento e quanto a execução e controle de sistemas de drenos e filtros, aspectos fundamentais para a estabilidade da estrutura. Cabe salientar que em todos os métodos são possíveis de empregar diversas soluções para os sistemas de drenos e filtros.

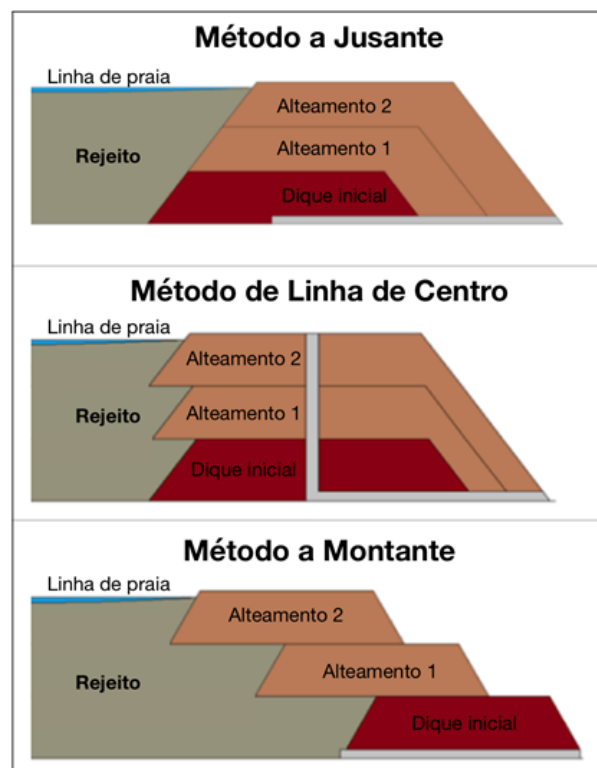


Figura 1 – Métodos construtivos de barragens de rejeito. (Autores)

Segundo Rico *et al.* (2008), 66% das falhas mundiais ocorridas em barragens de rejeito (com 147 casos analisados) foram em barragens que utilizavam o método de montante. A Tabela 1, a seguir, apresenta um resumo comparativo entre os principais métodos construtivos de barragens de rejeitos, destacando suas vantagens, desvantagens, características, propriedades, entre outros. Com base neste levantamento temos que, de modo geral, os métodos de Jusante e Linha de centro apresentam vantagens nos quesitos elencados, com exceção do critério custo.

Tabela 1: Resumo comparativo dos principais métodos construtivos de barragens de rejeito

	Montante	Jusante	Linha de centro
Tipo de rejeito	Baixa densidade para que ocorra segregação	Qualquer tipo	Areias de lamas de baixa plasticidade
Descarga de rejeitos	Periférica	Independente	Periférica
Armazenamento de água	Não recomendável para grandes volumes	Bom	Aceitável
Resistência a abalos sísmicos	Baixa	Boa	Aceitável
Alteamentos	Ideal menos 10 m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Vantagens	Menor custo, utilizado onde há restrição de área	Maior segurança	Flexibilidade construtiva
Desvantagens	Baixa segurança, suscetibilidade à liquefação e <i>piping</i>	Grande quantidade de material requerido, proteção do talude a jusante apenas na configuração final	Necessidade de eficiente sistema de drenagem

Fonte: Cardozo, Pimenta e Zingano (2016)

2.1 Considerações quanto ao Tipo de Alteamento e Fatores Influentes

Embora haja atualmente grande pressão contra a utilização da técnica de alteamento a montante, a exemplo da proibição já imposta em países como Canadá, Chile e a própria tramitação de proibição no Brasil; alguns pontos devem ser destacados.

Do ponto de vista da engenharia, o Método de Montante apresenta uma significativa economia de recursos e menor área impactada em sua construção, obviamente desde que a estabilidade seja garantida, sendo indicado para barragens de pequeno porte com alteamentos de 10m/ano. Especificamente aos menores impactos podemos citar: (i) menor área ocupada pelo barramento (em comparação com os outros métodos de alteamento), (ii) menor área ocupada pelo rejeito (em comparação com a

opção de disposição sem barramento), (iii) menores custos e consumo de energia (em comparação com as opções de deposição a seco do rejeito, que incluem secagem/filtragem), entre outras.

Segundo Barrera, Valenzuela e Campaña (2011), no Chile o método a montante foi proibido em decreto de 1970, após eventos de rupturas de barragens (os principais ocorridos em 1928, mina El Teniente e em 1965, mina El Cobre). Essas rupturas foram decorrentes de sismos da ordem de 7,6 a 8 graus de magnitude que atingiram o país. Neste mesmo decreto foram ainda estabelecidos, o controle rígido do lago de rejeitos (linha de praia) longe da barragem, controles piezométricos e adoção de um fator de segurança mínimo de 1,2 para análise pseudo-estática, que considera um coeficiente sísmico determinado com base na população a jusante do represamento e dentro da chamada distância de risco.

Quanto aos efeitos dos sismos, Silva (2010), aborda que tais eventos induzem nos barramentos tensões cisalhantes (tensão cisalhante sísmica), as quais são proporcionais a aceleração máxima imposta no sismo, e deve ser somada as tensões cisalhantes estáticas, nos casos de análise de liquefação (“gatilho” para ruptura do barramento). Considerando os últimos eventos de ruptura no Brasil, muito se veiculou em mídia a possível relação de ruptura com o desmonte de rocha com uso de explosivos (prática típica e rotineira da mineração). Entretanto, pondera-se que para profissionais da área, e considerando boas práticas no desmonte de rochas, é improvável efeitos danosos de sismos induzidos por desmontes, devido a atenuações em função das distancias (entre detonações e barramentos) e das mudanças de meio (maciço rochoso, fraturas do maciço e solo). Como referência no assunto, podemos citar Barros (2008), onde em seu trabalho apresenta o equacionamento relacionado ao desmonte de rochas e suas atenuações (relações entre velocidades de partícula, aceleração, frequência, carga de explosivo, distancia da detonação, tipo de meio, entre outras), bem como normatizações sobre o assunto.

Estudos com modelos analíticos e numéricos (CARDOZO, PEÑA e ZINGANO, 2018; e CARDOZO e RUVÉR, 2019) apontam que o Método de Montante é adequado e estável (em termos de projeto) desde que respeitada geometria adequada (conservadora) dos alteamentos e principalmente garantida a eficiência do sistema de filtro/dreno, impedindo acúmulos excessivos de poropressão e gradiente hidráulico. Parâmetros típicos de projetos disponíveis em bibliografia apontam para alteamentos de no máximo 10 metros, inclinações de alteamentos inferiores a 35° e utilização de bermas de até 10 metros entre os alteamentos.

Outra medida que se mostra efetiva no controle do fluxo hídrico interno das barragens é o afastamento da praia de rejeito (transição entre fase sólida e líquida do rejeito) ou lâmina d'água do barramento. Ao afastar tal transição, conseqüentemente se aumenta a percurso que a fase líquida deve percorrer (no rejeito e barramento) para “aflorar”, ou seja se diminui o gradiente hidráulico e conseqüentemente o risco de liquefação e *piping*. Além de se diminuir a vazão de percolação pela barragem. Massad (2010), comenta que a redução do gradiente hidráulico e da vazão na “saída”, ou a jusante, do barramento, é medida que deve ser tomada para redução do risco de ocorrência de liquefação e *piping*.

2.2 Utilização e Estabilidade do Método de Montante

Dado sua dinâmica de alteamento, o método de Montante é tipicamente associado a uma maior complexidade e muitas vezes associado como causa de rupturas, caso dos últimos eventos envolvendo a ruptura de barragens no Brasil, onde diversos profissionais vincularam na mídia a relação da ruptura com o método construtivo. Embora, em primeiro lugar cabe destacar que raras são as barragens que ao longo de sua execução adotaram um único método de alteamento. O que vemos comumente na realidade brasileira, para barragens em operação, é a utilização de combinações de alteamentos, inclusive nos últimos caso de maior relevância, Mariana e Brumadinho, onde os perfis das barragens indicam a utilização inicial de alteamento por Linha de Centro (SILVA, 2010).

Podemos citar de modo geral como o principal problema relacionado a falhas em barragens de rejeito, principalmente de montante, o comprometimento dos sistemas de drenagem internos, inclusos filtros. Uma vez que estes ao estarem comprometidos,

podem vir a ocasionar cenário de saturação de rejeitos e diques e de excesso de pressões internas.

Morgenstern *et al.* (2016) destacam também, o aumento da área da bacia de contribuição (referente ao balanço hídrico), devido os alteamentos, como uma potencial causa de sobrecarga sobre sistema de drenagem. Nestes casos, o planejamento prévio quanto a execução de alteamentos e balanços hidrológicos precisos se mostram de extrema relevância. Embora se destaque que um projeto adequado de barramento deva considerar condições extremas, como, picos no regime hidrológico.

Outro fenômeno que deve ser observado quanto ao método de alteamento a montante é a posição da superfície crítica de ruptura (com menor Fator de Segurança). Em comparação, temos que nos alteamentos a jusante a superfície crítica de ruptura fica, de modo geral, locada sobre o dique alteado. Já em barragens a montante temos, em função de sua geometria e altura, o deslocamento da superfície crítica de ruptura para o rejeito contido no barramento (Figura 2), em função dos próprios alteamentos sob o rejeito. Tal efeito pode ser observado nos modelos computacionais em Cardozo e Ruver (2019), onde demonstram que ao se acrescentar alteamentos a uma barragem a superfície de ruptura migra do alteamento para o rejeito. Entretanto a de se comentar que a posição da linha piezométrica, disposição e eficiência do sistema de drenagem interno e externo tem papel de grande influência uma vez da geração de poropressões positivas e negativas.

O deslocamento da superfície de ruptura pode vir a representar grande diminuição no fator de segurança, uma vez que além de aumentar forças mobilizantes (peso do próprio barramento e rejeito) se diminuem as forças resistivas, na hipótese de parâmetros resistivos (coesão e ângulo de atrito) do rejeito disposto

(ou adensado) serem menores que os parâmetros dos diques de alteamento.

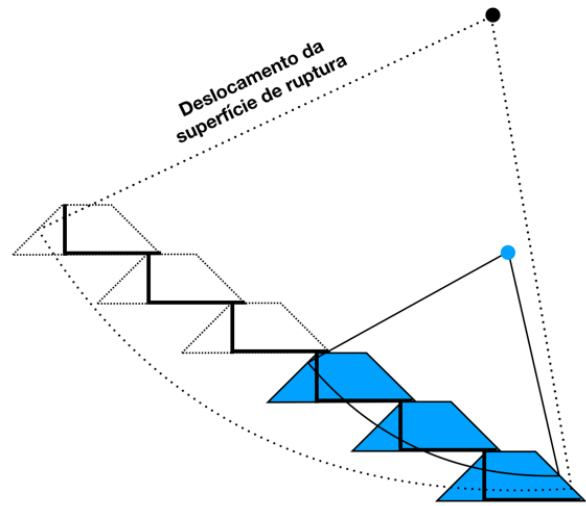


Figura 2 – Deslocamento da superfície crítica de ruptura ($FS_{crítico}$) devido a execuções de alteamentos subsequentes. (Autores)

Outro ponto importante a ser verificado é quanto o afastamento da praia de rejeitos do barramento (Figura 3). Com o afastamento adequado se diminui a carga de exigência quanto drenagem interna de grande parte do barramento, entretanto salientando a exigência quanto ao sistema de drenagem interno dos primeiros alteamentos.

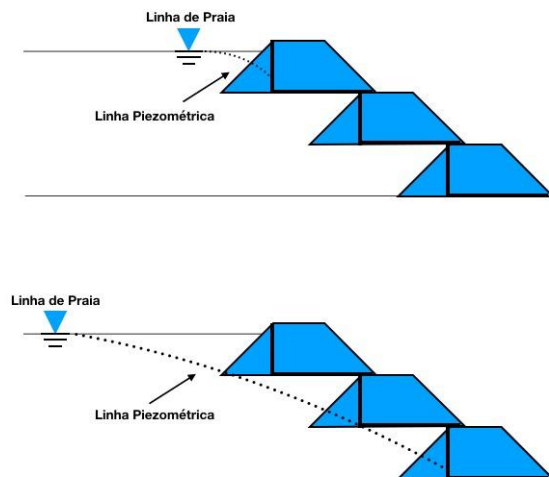


Figura 3 – Influência do afastamento da linha de praia na drenagem interna da barragem e exigência sob o sistema de drenos internos. (Autores)

Relacionada ao sistema de drenagem interna, temos as hipóteses de ocorrência de liquefação e *piping*, apontadas por diversos profissionais do meio geotécnico, como grandes riscos em barragens de rejeito. Nestes dois fenômenos, as barragens alteadas a montante se encontram em situação desfavorável em comparação com os outros métodos de alteamentos. No método a montante, a água teria um menor percurso a percorrer no maciço, conseqüentemente teria uma menor perda de carga hidráulica, em comparação com os demais métodos. Considerando que nos métodos de linha de centro e jusante, seus processos de alteamento requerem maiores volumes de material, em comparação com o método de montante.

Considerando que o método de montante pode vir a apresentar concentrações elevadas de gradiente hidráulico, estas podem levar a liquefação, dada diretamente em função do gradiente hidráulico (entre outros); e *piping* dado também em função do gradiente hidráulico, uma vez que este parâmetro é relacionado as vazões de percolação pelo barramento, variável utilizada nas formulações empíricas de critério de *piping*. Embora deva-se salientar que estes dois ainda são fenômenos que geram grandes debates no meio acadêmico, dadas suas hipóteses e ordens de ocorrências e formulações empíricas. Cabe destacar que ambos os fenômenos são desencadeadores de ruptura, uma vez que geram planos de fraqueza no barramento. No caso específico da liquefação ocorre a total perda de resistência efetiva do solo (PEREIRA, 2005).

No caso da liquefação, deve se destacar, além de sua possível ocorrência por excessos de gradiente hidráulico, a ocorrência devido a sismos e sobrecargas estáticas. Ambos os casos são bem conhecidos como “gatilhos” de ruptura de barramentos, no caso de sismos em zonas e ambientes geotectônicos que gerem abalos em intensidades consideráveis, e para

as liquefações “estáticas” quando temos carregamentos rápidos que impeçam a dispersão de poropressões (condição não drenada).

Silva (2010), comenta que em virtude do adensamento do rejeito, barragens mais antigas tem menores suscetibilidades a liquefações. De mesmo modo pode se entender que uma taxa de deposição de rejeitos que permita um adequado adensamento é uma medida importante a ser tomada. Por este motivo se considera que a taxa de disposição e de alteamentos deva ser alvo de atenção.

Dentre os diversos trabalhos que abordam o tema liquefação em barragens de rejeitos, podemos citar os de: Silva (2010), Pereira (2005), Rafael e Romanel (2014), entre outros. Referente ao tema *piping*, a barragens de terra de modo geram, podemos citar o livro de Da Cruz (1996) e de Massad (2010), entre outros.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de alteamento a montante não é em si um método inadequado em comparação com os demais métodos construtivos de barragens de rejeito. Entretanto este é um método que apresenta maior complexidade e necessidade de controle construtivo e gerencial (monitoramento, instrumentação, medidas corretivas e gestão de risco).

Embora seja coerente a ideia defendida por muitos profissionais da área, que deve-se mudar a filosofia atual de disposição de rejeitos de mineração, minimizando uso de barragens, investindo em medidas alternativas e repensando o uso de barragens de montante (com grandes alturas); devemos considerar que a disposição em barramentos se executada de forma adequada e segura é uma opção que otimiza o aproveitamento de recursos e em sentido amplo minimiza impactos. Considerando-se o custo energético (logo econômico e ambiental) de processos

adicionais como a secagem do rejeito, por métodos como a filtragem, os quais são indiscutivelmente maiores que a disposição em barragens, temos um contrassenso com os atuais objetivos da otimização industrial e sustentabilidade.

Ao invés de um abandono geral da disposição em barragens, outras medidas poderiam ser levadas a debates mais aprofundados, como a limitação de altura dos barramentos, a utilização de geometrias mais conservadoras (nas barragens de montante), afastamentos mínimos das praias de rejeito, requisitos mínimos quanto drenagem interna e externa, entre outros. Já nas áreas de gestão de barragens, a exigência de monitoramento constante e especializado deve ser aprimorada, com maiores investimentos tanto do setor público quanto privado. Em capital humano e tecnológico. Temos que num cenário de ruptura (exemplo das recentes tragédias brasileiras) são gerados imensuráveis prejuízos (sociais, ambientais e financeiros) muitas vezes mais elevados que os custos de medidas e alternativas como as elencadas.

2. REFERÊNCIAS

- AZAM, Shahid; LI, Qiren. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. **Geotechnical News**, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.
- BARRERA, S.; VALENZUELA, L.; CAMPAÑA, J. Sand Tailings Dams: Design, Construction and Operation. In: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TAILINGS AND MINE WASTE, 15., 2011, Vancouver. **Proceedings...** Tailings and Mine Waste. Vancouver: Institute Of Mining Engineering. p. 1 – 6. 2011.
- BARROS, Márcio Luiz de Siqueira Campos. **Modelo de aferição da velocidade de partículas através de parâmetro energético**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. 2008.
- CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. Métodos Construtivos de Barragens de Rejeitos de Mineração—Uma Revisão. **HOLOS**, v. 8, p. 77-85, 2016.
- CARDOZO, F. A. C.; PEÑA, F. P.; ZINGANO, A. C. Considerações e Comparações entre Métodos Construtivos de Barragens de Rejeito. In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: IBRAM, MG. 2018.
- CARDOZO, F. A. C.; RUVÉR, C. A. Considerações a Riscos em Barragens de Rejeito. **Não Publicado**. 2019.
- DA CRUZ, Paulo Teixeira. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. Oficina de Textos, 1996.
- KOSSOFF, David *et al.* Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, p. 229-245, 2014.
- MAFRA, J. M. Q. Barragem construída com rejeito ciclonado: uma possível solução para disposição de rejeitos no Brasil?. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS. 2016.
- MASSAD, Faíçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Oficina de textos, 2010.
- MORGENSTERN, N. R. *et al.* Fundão Tailings Dam Review Panel Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão

Dam. Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP, New York, 2016.

PEREIRA, Eleonardo Lucas. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia): Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2005.

RAFAEL, H. M. A. M.; ROMANEL, Celso. Potencial de Liquefação Estática no Alteamento de uma Barragem de Rejeito. In: XVI Congresso brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2014, Goiânia, **Anais...** Goiânia: ABMS, GO, 2014.

RICO, M. *et al.* Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 846-852, 2008.

SILVA, Washington Pirete da. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia): Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2010.