

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Fernando Alves Cantini Cardozo**

**BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO:  
CONSIDERAÇÕES GERAIS E ASPECTOS GEOTÉCNICOS**

Porto Alegre  
Dezembro 2019

**FERNANDO ALVES CANTINI CARDOZO**

**BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO:  
CONSIDERAÇÕES GERAIS E ASPECTOS GEOTÉCNICOS**

Trabalho de Diplomação apresentado à Comissão do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia Civil

**Orientador: Prof. Dr. Cesar Alberto Ruver**

**Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Wai Ying Yuk Gehling**

Porto Alegre

Dezembro 2019

FERNANDO ALVES CANTINI CARDOZO

**BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO:  
CONSIDERAÇÕES GERAIS E ASPECTOS GEOTÉCNICOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador, Professora Coorientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 02 de dezembro de 2019

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

**Profa. Wai Ying Yuk Gehling (UFRGS)**

Dra. pela Universitat Politècnica de Catalunya  
Coorientadora

**Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)**

Ph.D. pelo Imperial College, University of London

**Eng. Civil Tennison Freire de Souza Junior (UFRGS)**

Me. pela Universidade Federal do Paraná

**Eng. Minas Nei Bongiorno Alff de Freitas (NewFields)**

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## AGRADECIMENTOS

Certamente não sou escritor que gostaria ser, mas tenho lá meus lampejos, muito inspirado nas experiências experimentadas. Quase todas estas experiências me levaram a este momento, poder agradecer e dedicar às pessoas que me foram caras para que este trabalho, que de modo algum é o fim da caminhada, fosse desenvolvido.

Sou grato, a diversas pessoas, a família, os amigos, colegas, a Universidade; mas a algumas pessoas o agradecimento deve ser mais acalorado, pelo apoio nesta breve (não tão breve assim) caminhada. A minha mãe Luci, por todo apoio, pelas cobranças veladas (que muito me impulsionaram), por dizer frases como, “conhecimento não pesa” e “a educação transforma” (antes desta ser um *slogan*). A Caroline, em primeiro lugar, por incentivar e acreditar nessa ideia de percorrer mais uma graduação, por ter dado apoio e incentivo vibrante ao iniciar esta caminhada. A Aline, pelos mesmo motivos, pelo carinho e por fazer ver coisas de formas diferentes. A Clarissa pelos mesmos motivos e pelas ajudas nas várias revisões, fostes deveras representativa na conclusão deste trabalho.

Agradeço aos professores que tive, desde meu ensino básico, que me fizeram acreditar ser possível chegar mais longe. Aos professores de Graduação, aos que me fizeram tomar gosto pela Geologia de Engenharia e Geotecnia, especialmente ao primeiro orientador, André “Zin”; aos professores que me mostraram o encanto pela mecânica estrutura (e consequentemente pela Engenharia Civil): Masuero e Rios, mostrando-me que a Engenharia Civil é mais que construir prédios. As instituições, não posso deixar de agradecer a UFRGS, a Escola de Engenharia, ao Departamento de Engenharia Civil, ao Departamento de Engenharia de Minas, e Laboratório de Mecânica de Rochas.

Quanto a este trabalho, devo agradecer, aos amigos que sempre deram valiosas sugestões, Eng. Diogo e Eng. Pimenta, e principalmente meu orientador Prof. Ruver, que abraçou a ideia mesmo sendo um tema amplo que se expande além da Engenharia Civil.

*“A menos que você se importe de montão, nada vai mudar, não vai não.”*

Dr. Seuss, in: O Lorax

## RESUMO

Este trabalho aborda o tema barragens de rejeito, estruturas comumente utilizadas para disposição e contenção de rejeitos da exploração mineral em todo mundo e ao longo da história. Por meio de revisão bibliográfica e análises em modelos conceituais de barramentos, via análise numérica por Método dos Elementos Finitos (MEF) e analítica Equilíbrio Limite, disserta-se sobre os aspectos geotécnicos destas estruturas, tendo como foco, o método de alteamento a montante. Comenta-se sobre os fenômenos de liquefação e *piping*, potenciais “gatilhos” para ruptura das estruturas, e sua relação com acúmulos de gradiente hidráulico. Verifica-se no estudo que um adequado design da drenagem interna, e manutenção da mesma, são ações de suma importância para a estabilidade da estrutura. Conclui-se, com base no estudo e modelos analisados, que barragens de rejeito são estruturas complexas que necessitam de adequada caracterização geotécnica de materiais e de parâmetros hídricos, e em condições conservadoras de projeto, mesmo barragens a montante, são opções seguras e adequadas para disposição de rejeitos.

Palavras-chave: Barragens de Rejeito. Engenharia Geotécnica.  
Métodos Construtivos. Análise de Estabilidade.

## **ABSTRACT**

This work addresses the theme of tailings dams, structures widely used for disposal and containment of tailings from mineral exploration throughout the world and throughout history. Through bibliographic review and analysis in conceptual models, through numerical analysis (MEF) and Equilibrium Limit, the geotechnical aspects of these structures are discussed, focusing on the upstream upheaval method. It is discussed the phenomena of liquefaction and piping, potential " trigger" for rupture of the structures, and its relation with accumulations of hydraulic gradient. It is verified in the study that an adequate design of the internal drainage, and maintenance of the same, are actions of paramount importance for the stability of the structure. Based on the study and models analyzed, tailings dams are complex structures that require adequate geotechnical characterization of materials and water parameters, and in conservative design conditions, even upstream dams, are safe and adequate options for waste disposal.

Keywords: Tailings Dams. Geotechnical Engineering.  
Constructive Methods. Stability Analysis.

## SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>08</b>
<b>1 ARTIGO I - CONSIDERAÇÕES SOBRE BARRAGENS DE REJEITO DA MINERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE MONTANTE .....</b>	<b>09</b>
<b>2 ARTIGO II - CONSIDERAÇÕES A RISCOS GEOTÉCNICOS EM BARRAGENS DE REJEITO.....</b>	<b>17</b>
<b>3 ARTIGO III - PROJETO CONCEITUAL DE BARRAGEM DE REJEITO E AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE .....</b>	<b>34</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>51</b>

## APRESENTAÇÃO

A presente Monografia visa abordar o tema barragens de rejeito de mineração, tema amplamente debatido nos últimos anos, vide números de tragédias, decorrentes de rupturas e de uma contínua busca por sustentabilidade no setor mineral. Optou-se por desenvolver o presente trabalho na forma de três artigos científicos, submetidos a eventos e periódicos. Os artigos foram desenvolvidos de forma progressiva de modo que se complementem, desde o estado de arte, a identificação de aspectos relevantes ao tema, a metodologia de análise de estabilidade e a exemplificação conceitual de um projeto. O primeiro artigo de título “CONSIDERAÇÕES SOBRE BARRAGENS DE REJEITO DA MINERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE MONTANTE”, apresenta a abordagem conceitual do tema, baseada em revisão bibliográfica, sobre o tema barragens de rejeito e suas nuances de engenharia geotécnica. O segundo artigo, de título “CONSIDERAÇÕES A RISCOS GEOTÉCNICOS EM BARRAGENS DE REJEITO” apresenta considerações quanto aos fatores de riscos que podem comprometer a estabilidade estrutural de um barramento pelo método de montante, sendo utilizadas análises por equilíbrio limite. O terceiro artigo, de título “PROJETO CONCEITUAL DE BARRAGEM DE REJEITO E AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE”, apresenta o projeto conceitual e a análise sobre um barramento hipotético. No conjunto do trabalho, visa-se, contribuir para o tema barragens de rejeito no âmbito do Brasil, na forma de geração e divulgação de conhecimento.

## 1. ARTIGO I

O Artigo de título “CONSIDERAÇÕES SOBRE BARRAGENS DE REJEITO DA MINERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE MONTANTE”, foi publicado nos Anais do X Simpósio de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, evento realizado nos dias 13 e 14 de Junho de 2019, na Cidade de Santa Maria/ RS.

Este artigo aborda conceitos básicos relativos a Barragens de Rejeito de Mineração, quanto aos métodos construtivos e principalmente aborda aspectos quanto aos alteamentos de montante. Ele se relaciona com os demais artigos pois introduz de forma didática alguns conceitos que são mostrados em maiores detalhes posteriormente.

Disponível em:

<http://docs.geors2019.com.br/?dir=aterros-fundacoes-barragens-taludes-e-contecoes>

&

[https://sabi.ufrgs.br/F/XVL29KBJLUPTPJB18SC8N8R3AQTYVU9GUYDDID3DN3GMF5CV4M-07508?func=full-set-set&set\\_number=005691&set\\_entry=000001&format=999](https://sabi.ufrgs.br/F/XVL29KBJLUPTPJB18SC8N8R3AQTYVU9GUYDDID3DN3GMF5CV4M-07508?func=full-set-set&set_number=005691&set_entry=000001&format=999)

## 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 ciclonagem, 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.

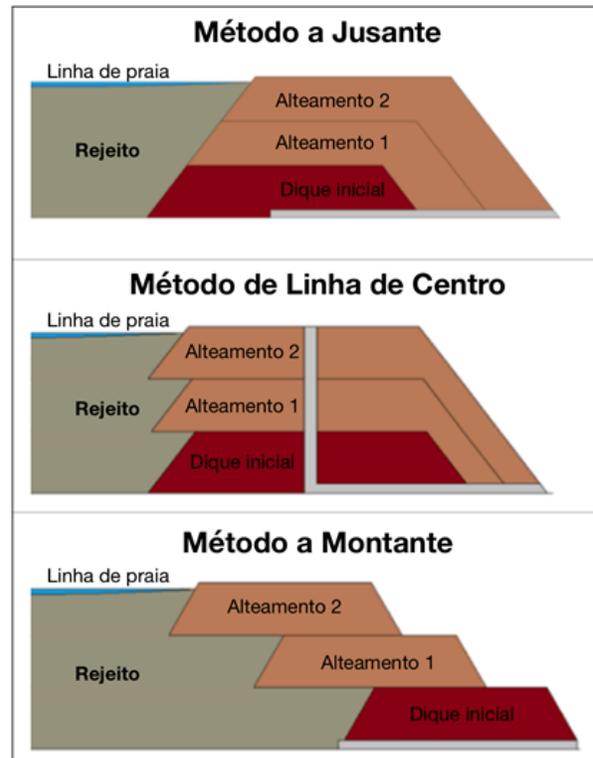


Figura 1 – Métodos construtivos de barragens de rejeito. (Autores)

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 desmorte 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 desmorte de rochas, é improvável efeitos danosos de sismos induzidos por desmorte, 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 desmorte 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.

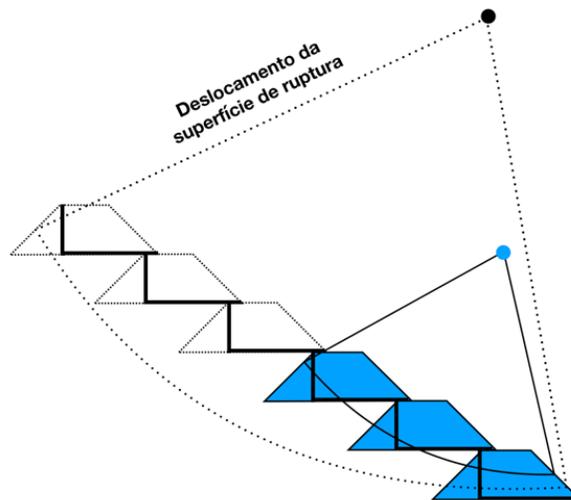


Figura 2 – Deslocamento da superfície crítica de ruptura ( $FS_{crítico}$ ) devido a execuções de alteamentos subsequentes. (Autores)

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.

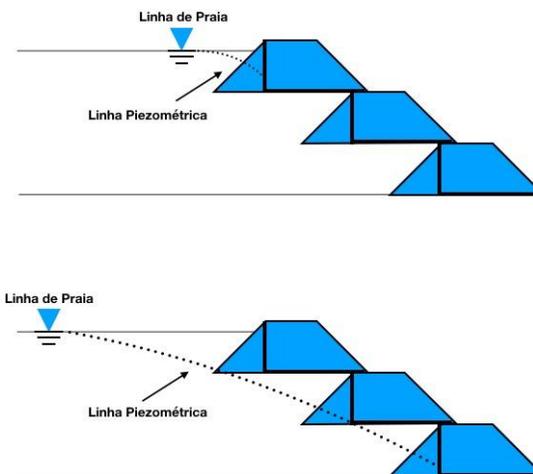


Figura 3 – Influência do afastamento da linha de praia na drenagem interna da barragem e exigência sob o sistema de drenos internos. (Autores)

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, Faiçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia.** Oficina de textos, 2010.
- MORGENSTERN, N. R. *et al.* Fundação Tailings Dam Review Panel Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundação

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.

## **2. ARTIGO II**

O Artigo de título “CONSIDERAÇÕES A RISCOS GEOTÉCNICOS EM BARRAGENS DE REJEITO”, foi submetido a revista Tecno-Lógica (ISBN 1415-6229), do Departamento de Química e Física, do Depto. De Engenharia, Arquitetura e Ciências Agrárias e do Mestrado em Tecnologia Ambiental, da Universidade de Santa Cruz do Sul. O periódico possui Qualis B5 nas áreas de Engenharia I e II.

Este artigo visa apresentar uma aplicação de como variáveis no projeto podem impactar a estabilidade de um barramento (no método de montante) e como estas variáveis podem ser consideradas.

Artigo submetido em 10/10/2019.

## CONSIDERAÇÕES A RISCOS GEOTÉCNICOS EM BARRAGENS DE REJEITO

Fernando Alves Cantini Cardozo<sup>1\*</sup>, Cesar Alberto Ruver<sup>1</sup>, Wai Ying Yuk Gehling<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, UFRGS/DECIV, 9085000, Porto Alegre, Brasil.

\*E-mail: [fernando.cantini3@hotmail.com](mailto:fernando.cantini3@hotmail.com)

Recebido em:

Aceito em:

---

### RESUMO

Este trabalho visa abordar os riscos associados a barragens de rejeito da mineração quanto à influência de variações de parâmetros de projeto frente a estabilidade da estrutura e possíveis alternativas de projeto que visem a minimização de Riscos. Para tanto foi realizada por meio da estruturação de modelos computacionais de barragens hipotéticas, com parâmetros de projeto baseados em dados reais de caracterização de materiais disponíveis em bibliografia, a verificação do comportamento das estruturas frente a variações de parâmetros geotécnicos e de projeto, onde se verificou a sensibilidade do método construtivo frente a tais variações. Verificou-se que o método de alteamento a montante possui sensibilidade a variações, principalmente a critérios relacionados com a drenagem (interna e externa). Avaliou-se também o uso de análise probabilística como ferramenta para melhor entendimento dos riscos associados a um barramento e quais os parâmetros de entrada tem maior relevância. Viu-se que tal ferramenta possui grande potencial de aplicação. Quanto a minimização de riscos é apresentada metodologias e premissas de projetos e de monitoramento que visam a gerência sobre os riscos associados a estrutura.

**Palavras-chave:** Engenharia Geotécnica. Barragens de Rejeito. Mineração. Análise de Risco.

---

### 1 Introdução

Barragens de Rejeito estão entre as maiores estruturas construídas pelo homem, juntamente com as pilhas de estéril [1]. Estas estruturas tem a função de acondicionar, de maneira estável e segura, todo o rejeito proveniente dos processos de beneficiamento mineral, especificamente, das etapas de concentração, sendo estas normalmente posteriores a etapas de moagem. Tipicamente as operações de moagem de minérios apresentam redução granulométrica do minério para faixas inferiores a 15 µm [2]. De modo geral, posteriormente a execução das operações unitárias de concentração gravíticas, hidrometalúrgicas e/ou físico químicas, seguintes as etapas de

cominuição, a disposição em barragem é o destino final mais comum dos rejeitos destes processos. Quanto aos materiais barrados, pode se dizer que são principalmente rejeitos dos processos de hidrometalurgia e físico-químicos, nos quais, cabe salientar, adquirem características reológicas.

Segundo Curi [1], a atividade de mineração é uma das mais antigas realizadas pela humanidade e tem papel fundamental na qualidade de vida da mesma, sendo assim imprescindível para a sociedade. Assim, tal atividade merece atenção quanto a sua execução e suas estruturas, onde em caso de falha apresentam grande potencial de ocorrência de danos sociais, ambientais e financeiros; caso das barragens de rejeito. Rupturas em barragens podem acarretar tipicamente na liberação de milhões de metros cúbicos de rejeito, os quais são de potencial risco a saúde humana

e a integridade de ecossistemas, como elenca Venâncio Aires *et al.* [3] e Burritt *et al.*[4]. Dada sua natureza e fatores construtivos, barragens de rejeito são estruturas que apresentam maior propensão a falhas se comparadas com barragens para reservação de água [5, 6, 7]. Enquanto barragens ditas civis tem a função geral de reservação de água e são executadas integralmente, as barragens para contenção de rejeitos são executadas concomitantemente à operação de lavra da mina, que gera os rejeitos. Assim tem-se uma peculiaridade, onde fatores como planejamento de lavra, pesquisa mineral e beneficiamento entram como critérios a serem levados em consideração no projeto e na execução de uma barragem de rejeito, uma vez que são responsáveis por parâmetros como taxa de disposição do rejeito, mineralogia e granulometria dos mesmos.

Assim como toda uma operação de mineração, a qual pode apresentar custo na ordem de milhões de dólares, a depender das dimensões e tipo de depósito mineral [1], as barragens de contenção de rejeito, por serem estruturas diretamente proporcionais a escala produtiva e vida útil da mina, podem ser estruturas que venham a apresentar altos custos de projeto e execução. Segundo Xin *et al.*[8], entre 5 e 10% de todo o custo com a operação mineira (pesquisa mineral, preparação do terreno, aquisição de equipamentos, estruturas auxiliares, entre outras), é despendido com o projeto, execução e gestão das barragens de rejeito. Outro fator que lança luz sobre a necessidade de adequados estudos e projetos de barramentos é sua temporalidade, pois mesmo após o termino da exploração mineral, a barragem de rejeito (salvo em situações de medidas alternativas) é uma estrutura com risco permanente de ruptura e de todos os danos oriundos da possível falha. Destaca-se neste ponto, que embora trata-se de estrutura artificial, assim como para estruturas geotécnicas naturais (encostas), a passagem do tempo se torna contraproducente à estabilidade da estrutura, uma vez que não executada a manutenção e monitoramento corretos, podemos ter situação análoga a encostas onde a passagem do tempo é agente destabilizante [9].

Deste modo fica implícita a importância do estudo acerca destas estruturas, bem como dos riscos que incorretas considerações nos projetos podem ter frente à estabilidade das mesmas. Assim, este trabalho se propõe a avaliar conceitos acerca de situações de riscos geotécnicos referentes a barragens de rejeito e como certos parâmetros considerados em projetos, influenciam na estabilidade de um barramento. Neste mesmo sentido são apresentadas medidas que visam a atenuação de riscos na disposição de rejeitos de mineração.

### 1.1 Métodos construtivos de barragens de rejeito

Os métodos construtivos usualmente empregado fazem referência a técnica de alteamento, sendo estes denominados em função da posição e direção de execução do alteamento, o qual pode ser executado com material proveniente de áreas de empréstimo ou com o próprio rejeito do beneficiamento, desde que tratado e que atenda especificações geotécnicas de projeto. Para tanto, este rejeito é passível de processos adicionais, como a ciclonagem, para deslamagem, passando a ser chamado de aterro hidráulico [10]. De Araújo [11] comenta que no uso de hidrociclones, em seu estudo de caso, o *underflow* (saída com material mais grosseiro) apresenta 78% de sólidos em peso e o *overflow* apresenta por sua vez 35%. Por ser a porção com menor umidade e tipicamente ser mais granular, o produto do *underflow* é destinado para uso como material construtivo dos alteamentos.

Na Figura 1, são apresentados os métodos construtivos empregados tipicamente em barragens de rejeito.

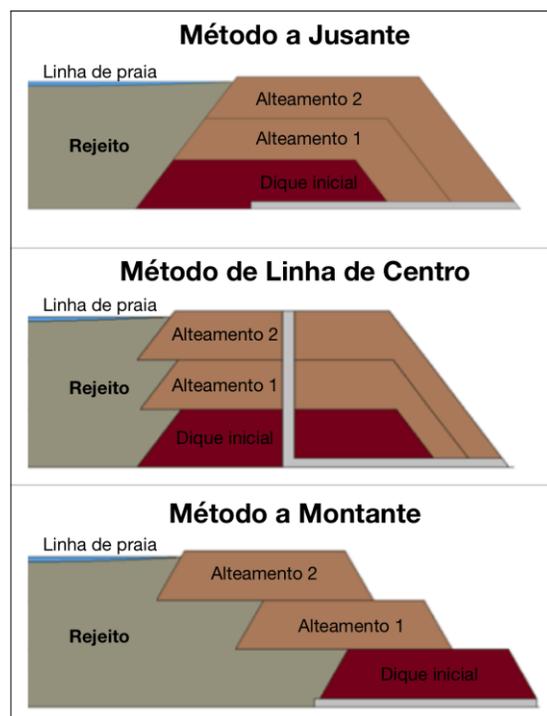


Figura 1 – Métodos construtivos de barragens de rejeito

Nota-se (conforme Figura 1) 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 o rejeito já disposto. Tal fator, embora gere significativa economia com movimentação de terra (apresentam menor volume de material destinado a execução do barramento), traz certa complexidade quanto ao controle construtivo do barramento e quanto a execução e controle de drenagem [12].

Embora a comparação entre os métodos construtivos de barragens de rejeito seja tema complexo, devido a critérios conceituais de projeto, como o sistema de drenagem, trabalhos como os de De Araújo [11]; Rout, Sahoo e Das [13]; Cardozo *et al.* [14]; e Santos *et al.* [15], apresentam tais comparações, concluindo pela maior complexidade e suscetibilidade à falha para o método de montante, de acordo com os parâmetros de projeto envolvidos. Sobretudo, destacam-se neste método as dificuldades com drenagem, controle tecnológico de matérias e do adensamento sob alteamentos (diferentes níveis de compactação do rejeito)

### 1.2 Riscos associados as fases de implementação e operação de Barragens de Rejeito

Leite e Gundim [16] comentam que desde que as atividades industriais se tornaram uma realidade da sociedade moderna, o conceito de risco foi naturalmente incorporado como algo inerente ao próprio trabalho, surgindo a necessidade de realizar o seu controle e gestão, com o intuito de reduzir a probabilidade de ocorrência e suas consequências a níveis, no mínimo, aceitáveis. Quanto a aplicação específica da gestão de riscos na mineração e barragens de rejeito, pode-se entender que como as demais aplicações, os riscos devem ser geridos nas diferentes fases de projeto (Figura 2) [8,16, e 17].

Tal gerenciamento inclui, primeiramente, a caracterização dos riscos e compreensão dos fenômenos associados e como afetarão a infraestrutura e o empreendimento. Assim, pode se dizer que uma análise de sensibilidade, onde se verifica a sensibilidade de um modelo a variações de parâmetros de projeto (ou de um modelo tomado como base), é parte constituinte de uma Análise de Risco. As situações de risco podem ser geradas nas fases de projeto, execução, operação e gestão.

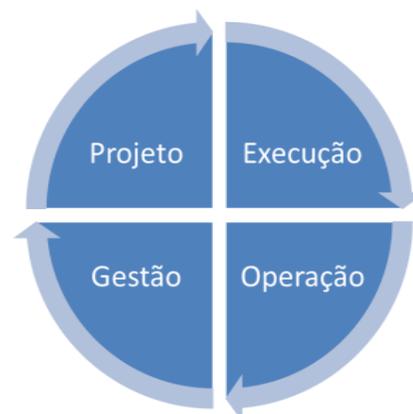


Figura 2 – Fases de potencial risco relacionadas às barragens de rejeito

Pode-se especificar, dentro das fases e etapas de projeto, implementação e operação de uma barragem de rejeito, subitens que podem vir a contribuir para a ocorrência de falhas, sendo potenciais geradores de risco:

**\*Projeto:**

- Incorretas investigações de campo e de fundação
- Caracterização inadequada do rejeito
- Falta de *expertise* no tema

**\*Execução:**

- Utilização de materiais inadequados
- Falha no controle de qualidade
- Propagação de falhas do projeto

**\*Operação:**

- Falta de *expertise* ao tema
- Drenagem inadequada
- Monitoramento insuficiente ou inadequado

**\*Gestão:**

- Falta de transparência na gestão
- Tomadas de decisão inadequadas
- Inadequada avaliação de riscos

Entendesse que para o caso de estruturas geotécnicas, onde se enquadram as barragens de rejeito, diversos destes aspectos de risco irão convergir para variações negativas na confiabilidade da estrutura, representando decréscimo no Fator de Segurança (F.S.) e aumento da probabilidade de falha da estrutura. Por sua vez, considerando a possível propagação de erros e dificuldades associadas a mitigação, a fase de projetos mostra-se como uma das mais problemáticas para o caso de barragens, normalmente devido a problemas de caracterização.

## 2 Análises de Riscos associados a Barragens de Rejeito

### 2.1. Metodologia

Para o presente trabalho se escolheu analisar a variação de estabilidade para barragens alteadas pelo método de montante, em função das hipóteses que deveriam ser avaliadas e atenuadas em análises de riscos, estas em termos da estabilidade da estrutura. Para tanto, com intuito a dar uniformidade ao estudo, se escolheu trabalhar com geometria e parâmetros geotécnicos de projeto, baseados em trabalhos disponíveis em bibliografia, como os de Araújo [11], Rafael e Romanel [18], Rout *et al.* [13], Palmeira *et al.* [19], entre outros. A Tabela 1 apresenta uma compilação dos estudos e seus parâmetros considerados como indicativos de propriedades geométricas, geotécnicas e hidráulicas dos materiais, a serem utilizadas em projetos de barramento de rejeitos de mineração.

Salienta-se que nenhum dos estudos elencados na Tabela 1 é explicitamente explicativo quanto aos sistemas de filtro e/ou drenagem empregados e seus dimensionamentos.

Observa-se também, que materiais (rejeitos) de minerações de mesmo minério, apresentam certa variabilidade de parâmetros geotécnicos, fato que vai ao encontro dos diferentes processos de beneficiamento, os quais são responsáveis por conferir aos materiais características geotécnicas e hidráulicas diversas, como demonstra o trabalho de Da Silva *et al.* [20].

Para determinação de parâmetros hidráulicos dos materiais a constituírem a estrutura (alteamentos e rejeitos), uma opção frente a ensaios de laboratório ou ensaios de campo, é a utilização de modelos matemáticos para determinação dos parâmetros ( $k_h$ ,  $k_v$  e/ou razão  $k_h/k_v$ ), como apresentam Shamsai *et al.* [23], Albuquerque Filho [21], entre outros.

Tabela 1 – Propriedades geotécnicas e geométricas para rejeitos de mineração e barramentos

Estudo	Material	Alteamento	Propriedades
Da Silva <i>et al.</i> [20]	Minério de Ferro	-	Rejeito: $K_h: 1,62 \cdot 10^{-3}$ m/s a $4,44 \cdot 10^{-7}$ m/s
Albuquerque Filho [21]	Minério de Ferro	Montante $i_{m\ e\ j}: 20^\circ$ h: 10m b: 3 m #aterro hidráulico	Rejeito: $\phi: 30-36^\circ$ (granular) e $26-28^\circ$ (siltoso) c': nula $K_h: 1,15 \cdot 10^{-5}$ m/s a $9,20 \cdot 10^{-7}$ m/s
Naeini e Akhtarpo ur [22]	Minério de Cobre	Linha de Centro $i_j: 14^\circ$ $i_m: 27^\circ$ $i_p: 0,5\%$ h: 10m b: - #aterro hidráulico	Rejeito: $\phi: 35^\circ$ $\gamma: 19,2$ c': nula $K_v: 1,4 \cdot 10^{-7}$ m/s $(k_h/k_v: 10)$ $k_b/k_v: 10$ E: 7000 (kPa) Rejeito ciclonado: $\phi: 42^\circ$ $\gamma: 19,4$ c': nula $K_v: 14,9 \cdot 10^{-6}$ m/s $(k_h/k_v: 1/0,8)$ E: 628 (kPa) Fundação: $\phi: 25^\circ$ $\gamma: 20,7$ c': 10 (kPa) $K_v: 6,0 \cdot 10^{-6}$ m/s $(k_h/k_v: 1)$
Rafael e Romanel [18]	Minério de Cobre	Montante $i_{m\ e\ j}: 34^\circ$ h: 10m b: 10 m #aterro hidráulico	Rejeito: $\phi: 32^\circ$ $\gamma: 24,0$ c': nula $K_v: 3,0 \cdot 10^{-5}$ m/s $(k_h/k_v: 10)$ E: 400 (kPa) Rejeito compactado: $\phi: 36^\circ$ $\gamma: 24,0$ c': nula $K_v: 3,47 \cdot 10^{-7}$ m/s $(k_h/k_v: 1/0,8)$ E: 1300 (kPa) Fundação: $\phi: 33^\circ$ $\gamma: 18,5$ c': 20 (kPa) $K_v: 9,03 \cdot 10^{-6}$ m/s $(k_h/k_v: 1)$
De Araújo [11]	Minério de Ferro	Linha de Centro $i_{m\ e\ j}: 18,5^\circ$ h: 5m b: 10 m #aterro hidráulico	Rejeito: $\phi: 25^\circ$ $\gamma: 20,0$ c': 10 $K_v: 10^{-6}$ m/s $(k_h/k_v: 4)$ E: 200 (kPa) Rejeito compactado: $\phi: 24^\circ$ $\gamma: 36,0$ c': nula $K_v: 10^{-6}$ m/s $(k_h/k_v: 10)$ E: 1300 (kPa) Fundação: $\phi: 30^\circ$ $\gamma: 20,0$ c': 20 (kPa) $K_v: 10^{-6}$ m/s $(k_h/k_v: 1)$
Rout, Sahoo e Das [13]	Minério de Alumínio	Montante Jusante Linha de Centro $i_{m\ e\ j} \approx 27^\circ$	Rejeito: $\phi: 25^\circ$ $\gamma: 18,37$ c': 25,3 $K_v: 4,6 \cdot 10^{-9}$ m/s $(k_h/k_v: 1)$ E: 1500 (kPa) Rejeito compactado: $\phi: 34^\circ$ $\gamma: 21,0$ c': 28,8 $K_v: 4,6 \cdot 10^{-9}$ m/s $(k_h/k_v: 1)$ E: 1771 (kPa) Barramento inicial: $\phi: 8^\circ$ $\gamma: 16,0$ c': 158,7 (kPa) $K_v: 10^{-10}$ m/s $(k_h/k_v: 1)$

Onde:  $\phi$ : ângulo de atrito efetivo; c': coesão;  $K_h$ : condutividade hidráulica horizontal;  $K_v$ : condutividade hidráulica vertical; E: modulo de Young;  $i_j$ : inclinação do barramento a jusante;  $i_m$ : inclinação do barramento a montante;  $i_p$ : inclinação da praia de rejeito; h: altura do por alteamento; b: largura de berma.

### 2.1.1 Modelos

Os modelos estudados foram inicialmente criados em CAD (*Computer Aided Design*), no *software* AutoCad, e posteriormente importados no *software* Slide, da empresa Rocscience. A linha piezométrica, os gradientes hidráulicos e a distribuição de porpressões foram determinados no mesmo software, por método numérico, e posteriormente utilizadas na análise analítica onde estes são influentes na determinação dos Fatores de Segurança (F.S.). Para todas as análises, foi utilizado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Para o cálculo de todos os fatores de segurança foi utilizado o Método de Bishop Simplificado, utilizando-se uma discretização por 50 lamelas. Referente a determinação dos parâmetros associados ao fluxo d'água, estes foram determinados considerando uma discretização por 4000 nós e elementos triangulares para todas as análises, sendo estes parâmetros determinados pelo *software* via Método dos Elementos Finitos (MEF).

Com base nos dados disponíveis em bibliografia (Tabela 1), se optou por considerar modelos de barragens sintéticas constituídas por cinco materiais (fundação, argila mole, aterro, rejeito disposto e rejeito adensado), com propriedades segundo a Figura 3, de modo que os parâmetros considerados não fugissem da realidade apresentada por materiais reais, embora por simplificação optou-se por considerar os materiais isotrópicos. Conforme o levantamento feito em bibliografia, os parâmetros considerados para rejeitos e aterro (considerado este constituído por aterro hidráulico, logo por rejeito ciclonado), são compatíveis com propriedades oriundas de minérios metálicos (como ferro ou cobre), vide as altas densidades.

Como método construtivo, devido a sua maior relevância, optou-se pelo método de alteamento a Montante. Utilizou-se um

modelo computacional com alteamentos de 10 (dez) metros intercalados por bermas de 10 (dez) metros, sendo os taludes considerados com inclinação de 25° (Figura 3). Considerou-se como Modelo Base um barramento com 6 alteamentos, totalizando um barramento global de 60 metros de altura. Para a configuração da praia de rejeito, foram utilizados os parâmetros de projeto conforme Silva [24] e De Araújo [11], que baseados em modelos empíricos e observacionais, consideraram em seus estudos a existência de duas fases distintas, onde a porção submersa apresenta uma maior inclinação em relação a porção emersa. Tal fenômeno é bem descrito em trabalhos como os de De Araújo [11] e Machado [1], que citam os estudos hoje clássicos de Vick<sup>1</sup> apud (De Araújo [11]).

Para o Modelo Base foi considerada uma praia de rejeito de 150 metros de extensão entre o ponto de pivotamento teórico do rejeito, no barramento, e a linha d'água sobre a qual o rejeito submerge, tipicamente com maior angulação, como salienta Silva [24]. Quanto as inclinações adotadas, se considerou uma inclinação (i) de 0,5% para o rejeito emerso e de 3,0% para o rejeito submerso.

Referente ao sistema de filtro/dreno, foi utilizado no modelo filtros de pé e meio de barramento, de forma a percorrer metade do pé e toda a extensão central do alteamento, assim possibilitando sua continuidade no decorrer dos alteamentos. Adotou-se a espessura de 1 metro, bem como, kh e kh/kv compatível com brita graduada como meio filtrante, ou seja, respectivamente, 10<sup>-3</sup> m/s e 1, valores estes condizentes com o estudo apresentado por Dias [25]. Como parâmetros geotécnicos para os drenos se considerou de forma simples, c': 0, γ: 20 kN/m<sup>3</sup> e φ: 37°, uma vez que estes são parâmetros compatíveis com material pétreo cominuído (brita graduada).

---

<sup>1</sup> VICK, S.G., 1983 – Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams, Wiley Interscience, New York

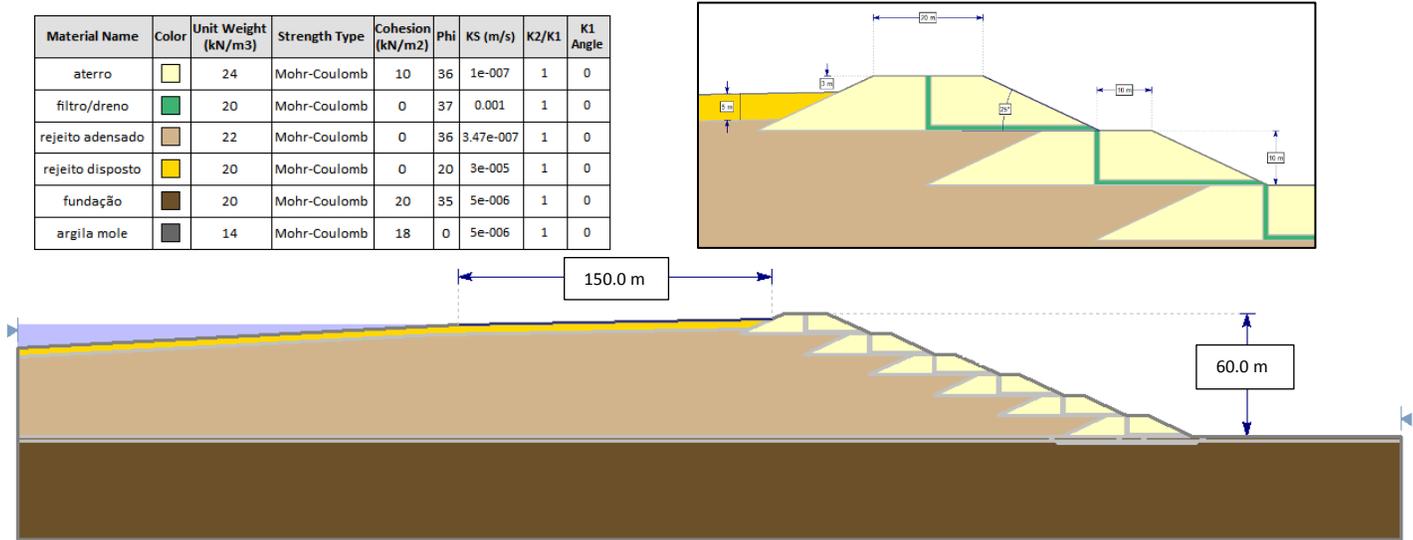


Figura 3 – Layout do modelo base de estudos e materiais de construção

A Figura 4, abaixo, apresenta o resultado obtido para o modelo base, considerando o efeito da poropressão gerado pelo fluxo d'água. A linha em cor azul representa a linha piezométrica gerada por método numérico (MEF). Observa-se um F.S. de 2.186.

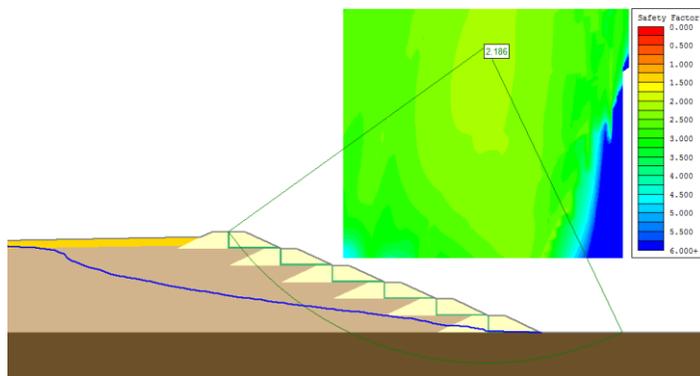


Figura 4 – Análise do F.S. para o Modelo Base e superfície de ruptura, considerando o sistema de drenagem, com F.S. calculado de 2.186.

As Figuras 5 e 6 representam, respectivamente, a distribuição de poropressão e o detalhe do gradiente hidráulico, ambas determinadas no *software* pelo método de elementos finitos. Observa-se que o modelo de filtro/dreno mostra-se

eficiente para o problema proposto, embora seja pouco exigido devido ao afastamento da linha freática dos barramentos superiores.

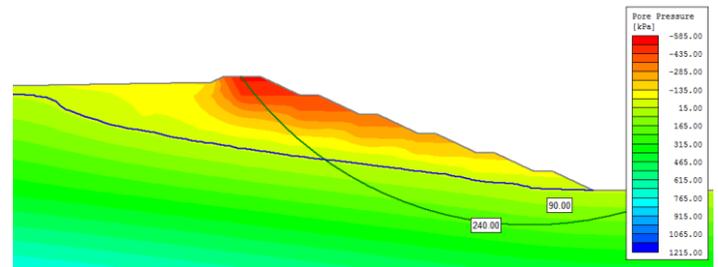


Figura 5 – Poropressão para o Modelo Base.

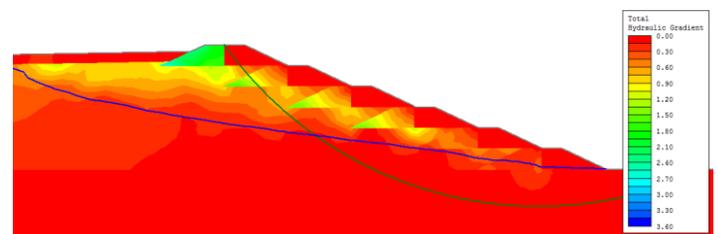


Figura 6 – Gradiente hidráulico para o Modelo Base.

Salienta-se, que todos os demais cenários estudados consideraram os efeitos de poropressão gerados pelo fluxo d'água como forças mobilizantes, ou seja, que contribuem no cálculo da estabilidade.

## 2.2 Variações de Parâmetros do Modelo Básico

Para o estudo da influência das variações dos parâmetros no modelo geotécnico, foram executadas mudanças geométricas e de *input* de parâmetros do modelo, de forma que estas representem alterações decorrentes de situações consideradas de riscos ou geradoras de situações de risco. Considerou-se as hipóteses de variações de propriedades geotécnicas dos materiais, de parâmetros hidráulico e geométricos do barramento hipotético (Modelo Base).

### 2.2.1. Fundação

Diversos autores comentam ser a fundação item de grande atenção, independente da finalidade do barramento, vide seu potencial de falha. São constantes as recomendações para desenvolvimentos de estudos, pesquisas e caracterizações geotécnicas adequadas, no intuito de minimizar o desconhecimento quanto as camadas sobre as quais o barramento será executado [9, 26].

Para avaliar o efeito das características do terreno de fundação (base) do barramento, se avaliou a influência de eventual ocorrência de camada de argila mole sob o material de fundação; posteriormente se avaliou a execução de uma substituição de tal camada sob o barramento inicial. Verifica-se que esta porção (fundação) tem grande influência sobre o F.S. do modelo, e principalmente quanto a posição da superfície de ruptura. No modelo hipotético de barragem sob argila mole, a camada considerada de solo de baixa resistência (ângulo de atrito nulo) consistia de uma espessura de 2 metros. Para o caso de tratamento da fundação considerou-se além da substituição da camada (argila mole) a escavação de 1 metro sob tal camada. É possível observar, a seguir, o modelo considerando a camada de argila mole sob o barramento (Figura 7) e conseqüente substituição total da mesma sob o barramento inicial (Figura 8).

Observa-se que para tal caso, a existência de um solo com baixa resistência ao cisalhamento, com ângulo de atrito nulo, faz com que a superfície de ruptura crítica passe por este material, causando uma queda abrupta do F.S. para 1,428 (no modelo

considerado). Considerando o tratamento da fundação passamos para um F.S. de 2,000.

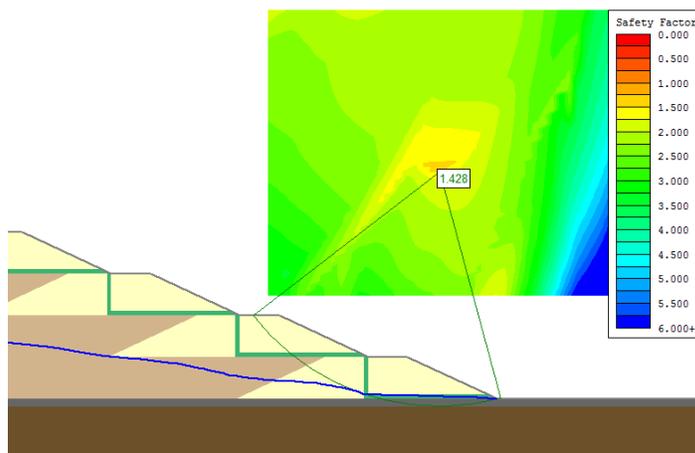


Figura 7 – Ruptura sob a camada de argila mole no barramento inicial, modelo sem tratamento de fundação, F.S. 1,428.

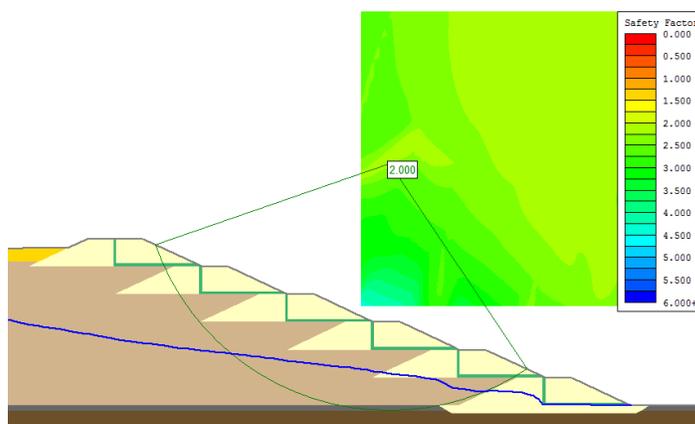


Figura 8 – Modelo com substituição da camada de argila mole, F.S. 2,00.

### 2.2.2 Variações de posição da linha de praia

Assim como em barramentos destinados a reservação de água, os parâmetros hidráulicos dos materiais e os níveis d'água, bem como sua variação, devem ser considerados desde os estudos conceituais de projeto. Quanto a barragens de rejeito este aspecto deve levar em consideração que trata-se uma polpa com fase sólida e líquida, em que podem vir a se alterar as razões entre ambas, assim como outros parâmetros de interesse como as

inclinações de praia (ângulo de repouso) e a posição da transição entre as fases (linha d'água). Sabidamente uma das melhores medidas para conferir confiabilidade e estabilidade a um barramento de rejeito é afastar a linha d'água do barramento, tal como o Modelo Base, onde tem-se uma distância de 150 m entre a linha d'água e o barramento. Pode -se observar, vide Figuras 7 e 8, supra apresentadas, que o tal afastamento afasta da superfície de ruptura da barragem a linha piezométrica diminuindo forças mobilizantes (poropressões positivas).

Como exemplificação, nas Figuras 9, 10 e 11; são apresentadas análises do barramento em estudo com o deslocamento da linha d'água para posições de 75 (Figura 9), 0 metros (Figura 10) do barramento e com linha d'água 1,5 metros acima do rejeito (ou seja, também coincidente com o último barramento). Nestes casos o F.S. passa para 2,148, a 75 metros do barramento; 2,130, coincidindo com o barramento (zero metros) e; 2,119, com a elevação de 1.5 metros do nível d'água. Nota-se pela variação dos F.S. que a proximidade da linha d'água com o barramento afeta negativamente o F.S., nota-se como justificativa deste fenômeno a posição linha piezométrica e diferença da distribuição de poropressões.

Demais variações em parâmetros hidráulicos dos materiais geotécnicos (rejeitos dispostos), também afetam a estabilidade do barramento, uma vez que ao se aumentar a fluxo, aumentam-se as forças mobilizantes, logo afeta-se negativamente também o F.S. da estrutura.

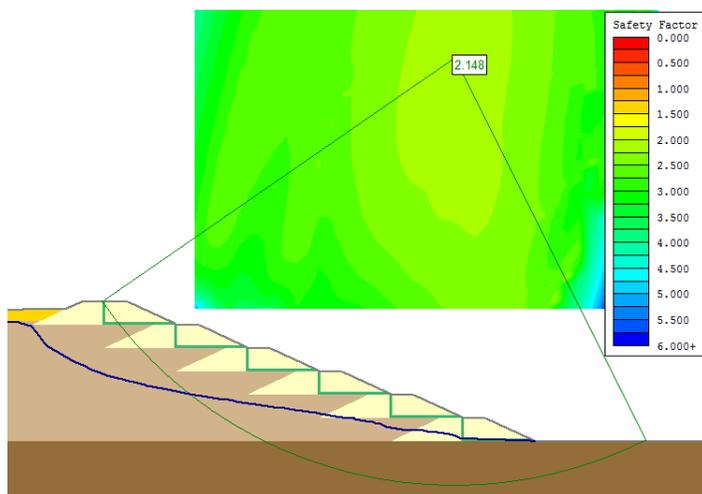


Figura 9 – Posição da linha piezométrica e queda do Fator de Segurança, com linha d'água a 75 metros do barramento, com F.S. de 2,148.

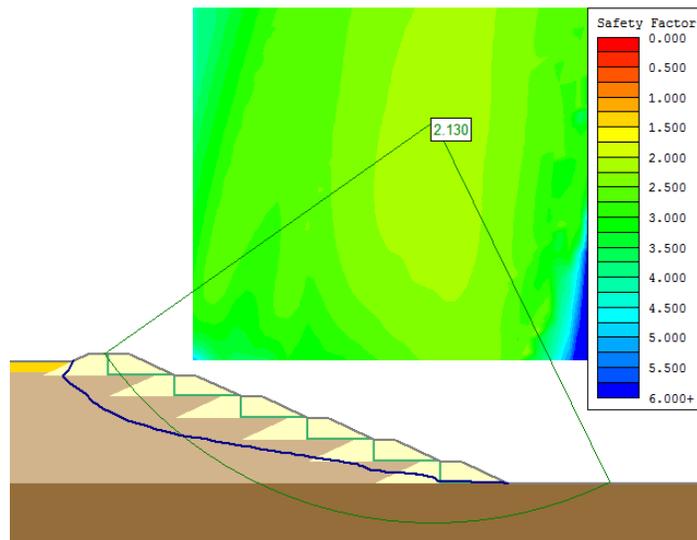


Figura 10 – Posição da linha piezométrica e queda do Fator de Segurança, com linha coincidente com o barramento, com F.S. de 2.130.

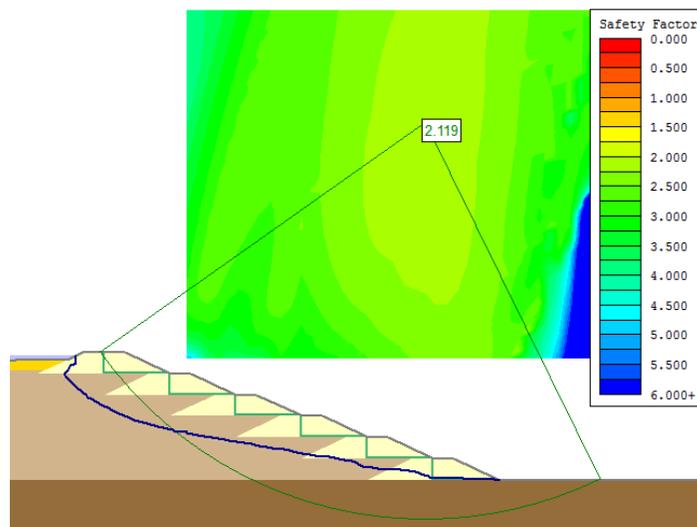


Figura 11 – Posição da linha piezométrica e queda do Fator de Segurança, com linha 1,5 metros acima do rejeito, com F.S. de 2.119.

Tal situação da variação da posição da linha d'água, ou mesmo elevação da linha d'água acima do rejeito, pode ser explicada em uma situação real por diferentes fatores, desde variação da posição de lançamento dos rejeitos, variação da porcentagem de líquido em polpa a precipitações intensas. Assim, percebe-se que um projeto de monitoramento adequado de barragens deve prever o monitoramento piezométrico das pressões

de água e consequentemente do comportamento do fluxo d'água no barramento.

### 2.2.3. Alterações na disposição de rejeito

A ocorrência de camadas, alternadas ou não, de rejeito com propriedades e espessuras diversas, é algo factível. Dado a dinâmica da mineração (anisotropia natural dos corpos de minérios) e do beneficiamento, bem como diferentes taxas de deposição do rejeito são fatores que podem levar a cenários não previstos inicialmente em estudos iniciais de um barramento.

A variabilidade de propriedades dos rejeitos pode ser observada em trabalhos de caracterização *in situ* como os de De Araújo [11], Albuquerque Filho [21], Pereira [27] e Rafael e Romanel [18]. Embora, seja compreensível que a previsão do comportamento das propriedades do rejeito seja algo de grande complexidade. Para ilustrar a influência de variações nas propriedades do rejeito os modelos das Figuras 12, 13, 14 e 15; apresentam hipóteses de uma maior espessura de rejeito disposto (17 metros), logo com resistência inferior ao adensado, com linha d'água a 150 metros do barramento (Figura 12) e; com linha d'água a 1,5 metros acima do rejeito (Figura 13). Na Figura 14, é apresentada a situação de uma camada de rejeito de 7 metros (por simplificação com mesmas propriedades do rejeito disposto) dentre a camada de rejeito adensado e na Figura 15, tem-se a mesma situação mas com linha d'água a 1,5 metros acima do rejeito. Em ambos os caso os menores F.S.'s foram nas situações com a nível d'água elevado, sendo 1,949 para maior espessura de rejeito disposto e 2,016 no caso com uma camada intercalada.

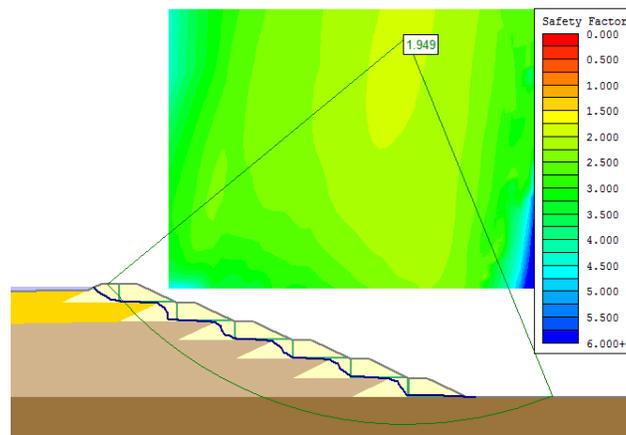


Figura 13 – Modelo com camada de rejeito disposto de maior espessura e linha d'água 1,5 metros acima do rejeito, com F.S. de 1,949.

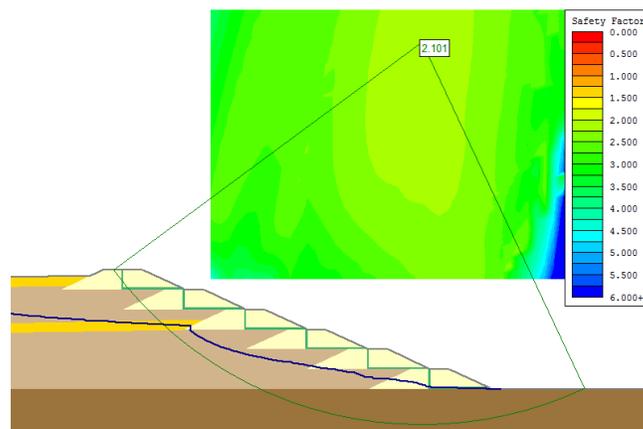


Figura 14 – Modelo com intercalação de camadas intercaladas de rejeito com diferentes propriedades, praia de rejeito a 150 metros, F.S. de 2,101.

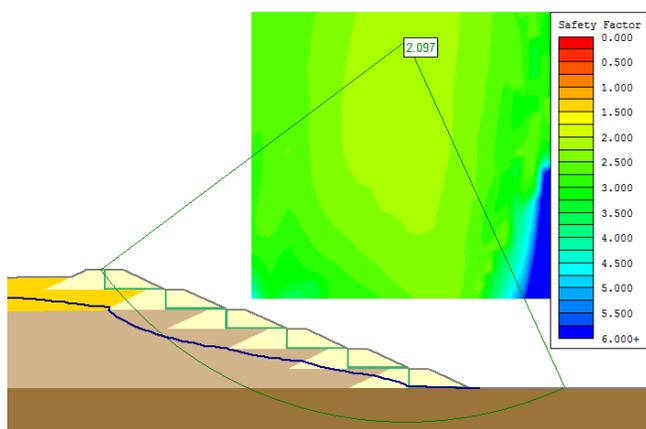


Figura 12 – Modelo com camada de rejeito disposto de maior espessura, com F.S. de 2,097.

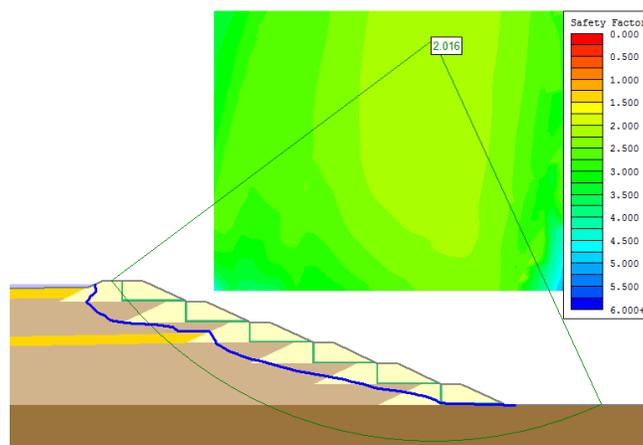


Figura 15 – Modelo com intercalação de camadas de rejeito com diferentes propriedades, nível d'água 1.5 metros acima do rejeito, F.S. de 2,016.

### 2.2.4. Variações de Parâmetros Geométricos

Ao fato de barragens de rejeito serem estruturas executadas em etapas que acompanham a vida útil de uma operação mineira, deve-se o grande tempo de execução da mesma, o que por vezes pode-se culminar em alteração de execução frente aos projetos iniciais, embora é prudente considerar que para tanto os projetos e análises devem ser refeitos e adaptados as novas realidades que podem vir a se apresentar. Exemplos típicos são alterações nas reservas minerais (as quais podem ser aumentadas no decorrer da operação, em função de novos dados de pesquisa), que levam a necessidade de alterações nos projetos de barramento, seja por novos alteamentos não previstos, seja por novas geometrias dos mesmos.

Podemos citar, inicialmente o simples projeto de alteamento, que deve levar em consideração a configuração final planejada do barramento, uma vez que está a priori seria a configuração mais desfavorável. Nas Figuras 16 e 17, que esboça o processo de suscetíveis alteamentos, vemos, entretanto o acréscimo do F.S. em função dos acréscimos de alteamento, onde verificam para dois, quatro e seis alteamentos (caso base); fatores de segurança respectivamente de 2,154; 2,170 e 2,187.

Como exemplo da alteração da geometria de um barramento e seus possíveis danos podemos citar o evento de ruptura das barragens em Mariana/MG, o qual por sua vez culminou em grandes impactos sócio ambientais [3 e 4]. Quanto as causas da falha uma das principais causas apontadas em laudo [8], seria a disposição acelerada de rejeito que levou a necessidade de execução de alteamento em ritmo acelerado e com mudança de posicionamento do alteamento.

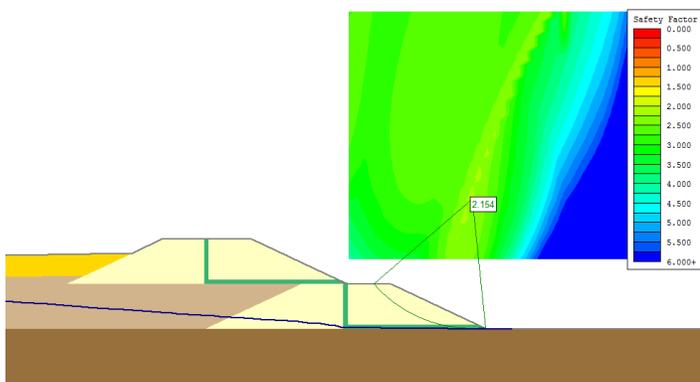


Figura 16 – Modelo com dois alteamentos, F.S. de 2,154

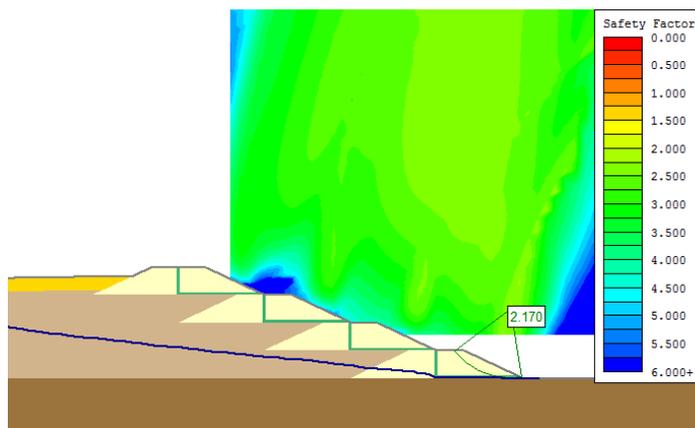


Figura 17 – Modelo com quatro alteamentos, F.S. de 2,170

As Figuras 18 e 19, apresentam situação hipotética, onde ocorre um deslocamento do barramento. Tal situação não incomum ao setor mineral, podendo ser decorrente de uma mudança repentina de planejamento, por exemplo, em função de alteração no ritmo de produção. Na Figura 19, é representada a hipótese combinada de deslocamento do barramento e elevação do nível d'água 1,5 metros acima do rejeito. Tem-se uma queda do F.S. de 2,279 para 2,178, do cenário com linha de praia a 150 metros para o cenário com nível d'água 1,5 metros acima do rejeito e coincidente com o barramento.

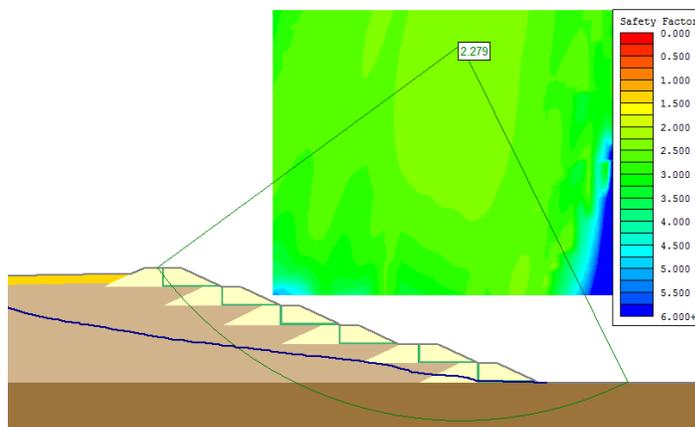


Figura 18 – Modelo com deslocamento do terceiro barramento, F.S. de 2,279.

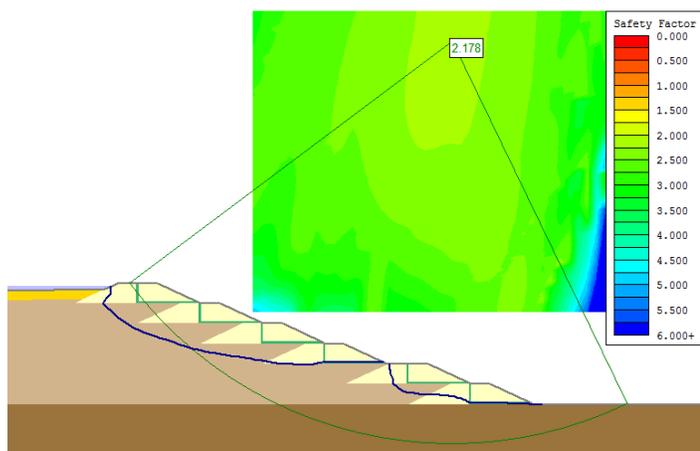


Figura 19 – Modelo com deslocamento do terceiro barramento e linha d'água 1.5 metros acima do rejeito, correspondendo a um F.S. de 2,178.

### 2.2.5 Variações de Parâmetros Geotécnicos

Como apresentado anteriormente variações de parâmetros geotécnicos podem ser consideradas com certa naturalidade para o caso de barragens de rejeito, uma vez que seria irreal considerar-se que no decorrer de toda a operação de uma barragem os materiais manter-se-iam com propriedades constantes. A isso pode-se atribuir desde variações no próprio minério (modelo geológico) a variações nos processos de beneficiamento desde os de cominuição aos processos de concentração.

Assim como em qualquer obra de engenharia, variações de parâmetros de resistência de materiais construtivos, quando apresentam-se menores do que os considerados do projeto, tem-se o risco de colapso da estrutura. Em tais casos depara-se com forças resistivas menores que planejadas, e/ou maiores forças mobilizantes (oriundas, por exemplo, de maiores densidades de materiais).

Para ilustrar a variabilidade imposta ao modelo devido a possíveis variações de propriedades geotécnicas ( $c'$ ,  $\gamma$  e  $\phi$ ) foi realizada uma Análise de Risco para estes parâmetros, considerando o Modelo Base, onde no *software* foi executada, juntamente, análise sensibilidade, a qual permite identificar os parâmetros críticos ao modelo, dado a influência de suas variações no F.S. Na Tabela 3, encontram-se os parâmetros variados, e os limites de variação, por simplificação optou-se por distribuição continua dos valores, dado o caráter ilustrativo da análise.

Tabela 3 – Parâmetros geotécnicos e limites de variação considerados para análises

Material	Parâmetro	Distribuição	Provável	Limite inferior	Limite superior
aterro	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Uniforme	10	0	28.8
aterro	$\phi'$ (°)	Uniforme	36	15	42
aterro	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Uniforme	24	16	33
rejeito adensado	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Uniforme	0	0	6
rejeito adensado	$\phi'$ (°)	Uniforme	36	24	42
rejeito adensado	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Uniforme	22	18	24
rejeito disposto	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Uniforme	0	0	20
rejeito disposto	$\phi'$ (°)	Uniforme	20	18	36
rejeito disposto	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Uniforme	20	0	24
fundação	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Uniforme	20	0	22
fundação	$\phi'$ (°)	Uniforme	35	0	42
fundação	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Uniforme	20	15	24

Foi definido para a análise a opção de busca global probabilística, a qual executa simulações de cenários não só na superfície considerada como crítica no caso determinístico (caso base, sem incorporação da variabilidade), mas em todo o quadrante de busca, assim, realizando simulações para todas as superfícies de busca. Devido a limitações de cálculo computacional foram limitadas a 500 simulações pelo método de Monte Carlo.

A Figura 20, abaixo apresenta a análise de sensibilidade, onde se observa e influência da variação das propriedades geotécnicas dos materiais dos modelos. Nesta análise vê-se que parâmetros, como ângulo de atrito do rejeito, tem grande influência no F.S do modelo. Em comparação parâmetros como coesão, para todos os materiais, e parâmetros do aterro, não apresentam influencia considerável no Modelo Base. Comparando-se os F.S.'s em função dos parâmetro geotécnicos individualmente (gráfico *scatter plot*), tem-se que a maior correlação (58.8%) se verifica para o ângulo de atrito do rejeito disposto (Figura 21), sendo que, de modo geral apenas para os ângulos de atrito (dos demais materiais) se verificou tendências, não sendo verificada correlações nos demais parâmetros (considerando o modelo estudado).

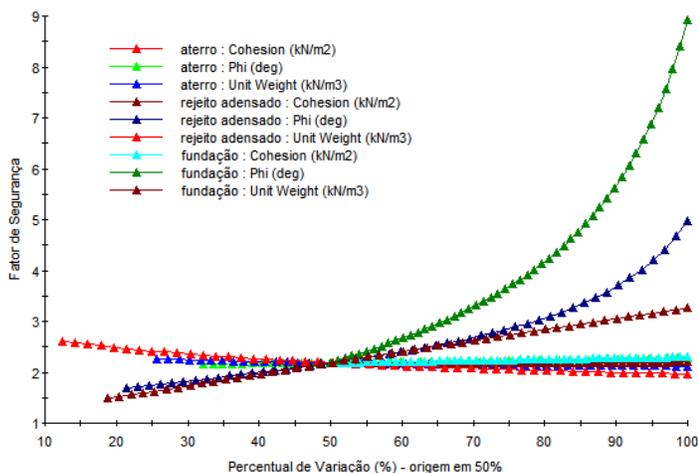


Figura 20 – Análise de Sensibilidade da variação das propriedades geotécnicas no Modelo Base

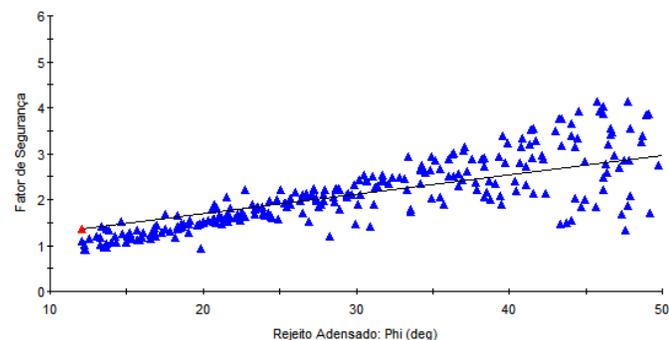


Figura 21 – Scatter plot do F.S. em função ao ângulo de atrito do rejeito adensado

A Figura 22, abaixo, apresenta o histograma dos resultados das simulações rodadas (Análise de Risco), destaca-se quanto a este, que o mesmo apresenta caráter ilustrativo quanto a variabilidade que o F.S. de um modelo pode assumir frente a variabilidade dos dados de entrada, no caso, as propriedades geotécnicas de projeto. Verifica-se que existe divergência entre o F.S. determinístico e os F.S.'s mais prováveis, para o caso em questão o F.S. mais provável fica acima do F.S. determinístico uma vez que a distribuição encontrada teve um F.S. médio de 2,776, embora isto se deva aos modelos de distribuição adotados e aos parâmetros considerados como variáveis, estes arbitrados de forma ilustrativa. Possivelmente ao se considerar outras distribuições de valores seria possível encontrar um F.S. médio com valor inferior ao F.S. determinístico.

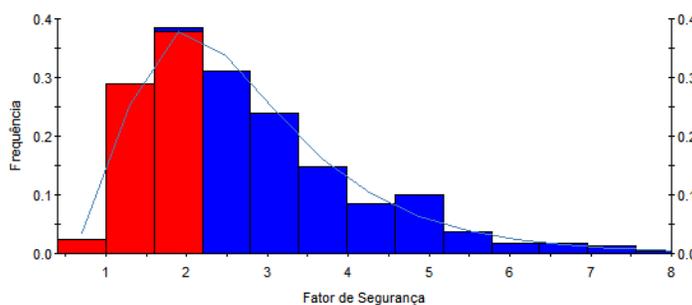


Figura 22 – Histograma da simulação de Fatores de Segurança

No exemplo da Figura 22, 41,2% (em vermelho no histograma) das simulações apresentaram F.S. abaixo do F.S. determinístico, bem como os resultados apresentaram uma distribuição próxima do modelo de distribuição lognormal, com média de 2,776; desvio padrão de 1,395; e mínimo e máximo de 0,9016 e 9,948; respectivamente. Cabe salientar que em comparação com o F.S. recomendado para barragens de rejeito (1,5), temos que 13,8% das simulações ficaram abaixo deste valor.

### 3 Abordagens para minimização e gerência sobre os riscos na disposição de rejeitos da mineração

Como debatido, diversos são os riscos associados a disposição de rejeitos em barramentos, entretanto, a de se considerar que por tratar-se de uma atividade econômica de grande representatividade e sendo responsável por insumos fundamentais ao desenvolvimento da sociedade, é plausível considerar que restrições ao desenvolvimento da atividade de mineração são em termos globais inviáveis, bem como tornam-se em diversas situações locais, antieconômicas. Deste modo, assim como a avaliação adequada dos riscos e sua minimização em termos estruturais, por meio de medidas estruturais e controle construtivo de matérias; outras ações como monitoramento, instrumentação e medidas de otimizações dos processos unitários, são passíveis de aplicação como medidas atenuantes dos riscos associados a barragens de rejeito.

#### 3.1 Monitoramento e Instrumentação

Basicamente como demandam as boas práticas de gerenciamento de qualquer obra geotécnica, a correta

instrumentação da obra em suas várias etapas executivas e de operação; é fator fundamental para a boa confiabilidade quanto a mesma, sua estabilidade ou predição de falha (de modo a minimizar danos e perdas).

Considera-se que a eficiente medição dos parâmetros desejados, segundo Bressani [29] está relacionada com as etapas de: (i) planejamento da instrumentação, (ii) definição da posição e tipo de instrumentação, (iii) definição do pessoal responsável e (iv) análise crítica dos dados, sendo qualquer uma destas etapas possíveis fontes de erros e falhas. Ainda segundo Bressani [29] são instrumentos de medição mais comuns: pluviômetros, piezômetros, inclinômetros, extensômetros células de carga, tensiômetros, entre outros.

Falhando-se nos procedimentos de instrumentação, etapas posteriores, assim, serão abastecidas com dados inverídicos, ou com variabilidade considerável, afetando-as. Sendo etapas posteriores, calibrações de modelos numéricos (entre outros), verificação do desempenho e apontamento de medidas de mitigação de falhas.

Hu e Liu [30], apontam que a utilização dos dados de monitoramento de forma automatizada, inteligente e conectada; constituem forma adequada de estruturação de um sistema de monitoramento de segurança de barragens de rejeitos.

### 3.2 Otimizações dos processos unitários

De maneira geral, otimização nos processos unitários (aumento da recuperação do minério) permitem reduzir os volumes de rejeitos dispostos e conseqüentemente reduzir riscos associados. Entretanto para a disposição de rejeitos o teor de sólidos em polpa (fase sólida + fase líquida) é parâmetro de suma importância, que em caso de otimização (aumento do teor) beneficia estruturalmente a disposição, por se reduzir os volumes de líquido no barramento.

Por sua vez, o aumento da porcentagem de sólido em polpa, acarreta na necessidade de tratamentos adicionais para o desague de todo o rejeito a ser disposto. Tais processos de separação sólido-líquido são normalmente feitos por operações como ciclonação, filtração e espessamento. Embora tais processos sejam usuais para o caso de caracterização como em disposição em pilha, estes ganham uma maior intensidade uma vez que é necessário um menor teor de água.

De forma análoga, onde o intuito é diminuir consideravelmente a quantidade de fluido na polpa de rejeito,

Martins e Vidal [31] e Caressato Junior *et al.* [32], apresentam o uso de tubos geotêxteis como uma interessante alternativa para desague e mesmo disposição final. Entretanto, considerando-se que tal técnica devido a custos apresenta maior compatibilização com minerações de menor escala (menores quantidades de rejeito), maiores potenciais de contaminação (logo que apresentam maiores custos de disposição e onde o custo de terreno (com desapropriação, aquisição, arrendamento, entre outros) se apresenta alto;

## 4 Conclusões

Este trabalho se propôs a analisar de forma analítica como variações em parâmetros de entrada em um modelo sintético de uma barragem de rejeito afetam a confiabilidade da estrutura, analisando-se a variação dos Fatores de Segurança (F.S.) e também nos fluxos d'água. Assim, procurou-se representar na forma de modelos computacionais situações que se apresentam como riscos a estrutura de um barramento. Após levantamento bibliográfico e estudo dos modelos desenvolvidos, podemos tecer as seguintes conclusões:

- Ao contrário do esperado, vê-se, conforme modelos desenvolvidos, que o acréscimo de alteamentos não afetou negativamente o Fator de Segurança da estrutura, embora observe-se que com tais acréscimos a superfície de ruptura tende a migrar do barramento (caso das etapas com dois e quatro alteamentos) para o rejeito (etapa final com seis alteamentos), passando as propriedades deste governar as forças resistivas. Tal situação, de acréscimo no F.S. no caso estudado, entendeu-se ser devido a influência do fluxo d'água, das poropressões geradas (negativas e positivas) e pelas propriedades mecânicas dos materiais considerados.

- Verificou-se que no método de alteamento a montante o afastamento de linha d'água da praia de rejeito, tem grande impacto na estabilidade da estrutura, uma vez que o devido afastamento (como no Modelo Base estudado, com 150 metros de afastamento) possibilita um afastamento da linha freática subterrânea do barramento e também da superfície de ruptura, assim diminuindo forças mobilizantes. Verifica-se que em tal cenário os drenos das porções inferiores são requeridos em detrimento de drenos locados nas porções superiores, embora como também salientado não deva ser descartada a hipótese de avanço da linha freática em proximidade ao barramento, cenário

este dentre os estudados, que apresentaram maior impacto no F.S. do barramento.

- Na hipótese de eventual existência de uma camada de “argila mole” de baixa capacidade de suporte para fundação, verificou-se que tal cenário também afeta drasticamente o F.S., uma vez que superfícies de ruptura passam a ser orientadas por tal camada, embora assim como descrito em bibliografia voltada a barragens em geral [26, 33], o tratamento da fundação, como no caso apresentado, com a substituição da camada existente é uma solução satisfatória. Nesta situação verificou-se acréscimo significativo no F.S.. Deste modo, salienta-se quanto a necessidade de uma correta caracterização dos materiais de fundação e eventual tratamento da mesma.

- Referente a influência das propriedades hidráulicas dos materiais e do sistema de drenagem, verifica-se com base nos modelos, que o sistema de drenagem possui influência sobre a estabilidade da estrutura, principalmente em cenários em que o nível d'água se aproxima do barramento, sendo esta proximidade responsável por significativos decréscimos no F.S. em relação ao Modelo Base, bem como uma maior exigência por parte dos filtros e sistema de drenagem.

- Referente a eventuais variações das propriedades geotécnicas dos materiais dos modelos, verifica-se que estas têm grande influência no F.S. e no posicionamento de eventual superfície de ruptura. Salienta-se que conforme revisão bibliográfica, tipicamente rejeitos de mineração, apresentam grande variabilidade de propriedades mesmo os rejeitos de um mesmo minério. Assim pode-se perceber como as propriedades geotécnicas se apresentam como critério crítico de projeto e devem ser constantemente avaliados ao decorrer da vida do barramento. No caso em questão, considerando a análise de sensibilidade realizada, verificou-se uma grande influência para o ângulo de atrito dos materiais em função de dado a proporção do barramento, ser este o parâmetro que predomina como força resistente. Já a densidade da fundação se mostrou relevante, no estudo em questão, devido a parcela resistiva no equilíbrio de forças se dar na fundação.

Por fim conclui-se que feitas as devidas considerações de projetos e se atentando para as situações elencadas o método construtivo de alteamento a Montante é altamente interessante, nas condições estudadas. Como trabalhos futuros aponta-se a viabilidade de expansão das análises feitas para modelos numéricos e tridimensionais, bem como o estudo da influência de outros fatores como a deformabilidade dos materiais e da influência de sismos. Já a análise estatística e probabilística das propriedades dos

materiais constituintes de modelos geotécnicos, se mostra como grande potencial de estudo, vide o potencial de variação entre F.S. determinístico.

## 5 Considerações Finais

Conforme o presente estudo, e com base na bibliografia disponível, vemos que embora aparentemente restrita a área de mineração, barragens de rejeitos tratam-se de estruturas que requerem para sua construção e gerência, um claro conhecimento multidisciplinar onde diversas áreas de conhecimento devem interagir desde as áreas de geociências, de engenharia e de planejamento. Assim como em demais obras de engenharia, o conhecimento prévio (de investigação e caracterização geotécnica de materiais) é fundamental para a eficiência do projeto, vide o grande número de variáveis que apresentam impacto sobre a estabilidade de um barramento.

De mesmo modo, a gerência sobre os dados de caracterização e monitoramento da estrutura são muito importantes para a redução de riscos. Por fim, quanto a métodos de redução da geração de rejeitos e métodos alternativos de disposição, vê-se uma grande gama de alternativas, que em utilização conjunta tendem a contribuir para a redução de riscos em caso de falhas. Destaca-se que, considerando escalas produtivas, tais metodologias nem sempre se mostram alternativas viáveis, ou como alternativa única, sendo também possível um *blende* entre disposição convencional e métodos de redução de rejeitos; por exemplo, utilizando-se conjuntamente processos de maior eficiência de deságue com a disposição por barramento tradicional. Como visto nos modelos desenvolvidos no presente trabalho e em outras obras [13, 14, 33], tem-se que um dos principais fatores a se observar nos projetos e na execução de barramentos de rejeitos é o fator hidráulico, logo medidas com a redução da fase líquida (menor quantidade de água) e afastamento da linha freática do barramento, tende-se em favor da segurança da estrutura.

Outros caminhos para a disposição de rejeitos de mineração, que podem substituir a utilização convencional de disposição de barragens, ou reduzi-la, são os métodos alternativos de disposição de rejeitos, como em cavas exauridas, pilhas, sem barramentos, ou ainda o reprocessamento de rejeitos [34-37]. Entretanto para o primeiro caso tem-se a limitação da dependência da existência de uma cava exaurida, já para disposições em pilha e sem barramento tem-se a necessidade de processos de deságue

com maior eficiência. Assim como para o reprocessamento que necessita de existência de um mercado consumidor e de tecnologias de reprocessamento compatíveis com os teores de minério contidos nos rejeitos gerados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos revisores, pelas sugestões e aos editores pela oportunidade de divulgação do presente trabalho.

---

## RISK CONSIDERATIONS IN TAILINGS DAMS

**ABSTRACT:** This work aims to address risks associated with mining reject dams as to the influence of variation of project parameters against the stability of the structure and possible alternatives project aimed at minimizing risks. For so much was accomplished through modeling of hypothetical dams, these with design parameters based on actual data of characterization of materials available in bibliography, the verification of the behavior of structures in the face of variations of Geotechnical and design parameters, where the sensitivity of the constructive methods was verified in the face of such variations. It was found that the upstream method of uploading has a greater sensitivity to variations, especially to criteria related to drainage, although this method presents greater economic performance. Regarding the minimization of risks are the presented methodologies and assumptions of projects and monitoring that vision manages it on the risk associated with the structure.

**Keywords:** Geotechnical engineering. Tailing dams. Risk analysis.

---

## Referências

[1] CURI, Adilson. Lavra de Minas. Oficina de Textos, 2017.

[2] CHAVES, Arthur Pinto. Teoria e prática do tratamento de minérios. Signus, 1996.

[3] AIRES, Uilson Ricardo Venâncio *et al.* Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. *Land Use Policy*, v. 70, p. 63-70, 2018.

[4] BURRITT, Roger L.; CHRIST, Katherine L. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. *Journal of Cleaner Production*, v. 178, p. 196-205, 2018.

[5] 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.

[6] KOSSOFF, David *et al.* Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, v. 51, p. 229-245, 2014.

[7] DAVIES, M. P. *et al.* Design of tailings dams and impoundments. Keynote address, Tailings and Mine Waste Practices SME, AGM Phoenix, p. 1-18, 2002.

[8] XIN, Zheng; XIAOHU, Xu; KAILI, Xu. Study on the risk assessment of the tailings dam break. *Procedia Engineering*, v. 26, p. 2261-2269, 2011.

[9] FIORI, Alberto Pio. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Oficina de Textos, 2016.

[10] 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, Belo Horizonte, MG. 2016.

[11] DE ARAÚJO, Cecília Bhering. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.

[12] 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.

[13] ROUT, Subrat; SAHOO, Tapaswini; DAS, Sarat. Design of tailing dam using red mud. *Open Engineering*, v. 3, n. 2, p. 316-328, 2013.

[14] CARDOZO, F. A. C.; PEÑA, F. P.; ZINGANO, A. C. Considerações e Comparações entre Métodos Construtivos de Barragens de Rejeito. In: IX Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea. Anais. Belo Horizonte, MG. 2018.

[15] SANTOS, D .A. M dos; CURI, A.; SILVA, J. M. da. Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro. In: VI Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea. Anais. Belo Horizonte, MG. 2010.

[16] LEITE, E.; GUNDIM, R. Identificação dos Riscos em uma Barragem de Mineração. In: IX Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea. Anais. Belo Horizonte, MG. 2018.

[17] GALO, D.; LEITE, E. O Dnmp-Ba e A Gestão da Segurança das Barragens de Rejeitos. In: IX Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea. Anais. Belo Horizonte, MG. 2018.

[18] RAFAEL, H. M. A. M.; ROMANEL, Celso. Potencial de Liquefação Estática no Alçamento de uma Barragem de Rejeito. In: XVI Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica. Anais. Goiânia, GO, Brasil. 2014.

- [19] PALMEIRA, Ennio M.; BEIRIGO, Elder A.; GARDONI, Maria G. Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 28, n. 2, p. 136-148, 2010.
- [20] DA SILVA, Leandro A.; MAZZINGHY, Douglas B.; VIANA, Paulo R. e CANDIA, Renan C. Avaliação do Adensamento de Rejeitos Finos de Minério de Ferro e sua Associação com a Mineralogia. In: IX Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea. Anais. Belo Horizonte, MG. 2018.
- [21] ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto 2004.
- [22] NAEINI, Mahdi; AKHTARPOUR, Ali. Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 107, p. 179-194, 2018.
- [23] SHAMSAI, Abolfazl *et al.* Geotechnical characteristics of copper mine tailings: a case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 25, n. 5, p. 591-602, 2007.
- [24] SILVA, M. V. de S. Desafios na simulação de cenários de deposição de rejeitos dispostos hidráulicamente. In: IX Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea. Anais. Belo Horizonte, MG. 2018.
- [25] DIAS, Francisco Miguel dos Santos Carreto. Filtros em barragens de aterro: caracterização da sua permeabilidade. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa. 2015.
- [26] MACIEL FILHO. Carlos L.; NUMMER, Andrea. V. Introdução à Geologia de Engenharia. Editora UFSM. 2014.
- [27] PEREIRA, Eleonardo Lucas. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 2005.
- [28] 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.
- [29] BRESSANI, L. A. Instrumentação em obras geotécnicas–taludes e escavações. In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas. Anais. São Paulo, SP. 2009.
- [30] HU, Jun; LIU, Xingzong. Design and implementation of tailings dam security monitoring system. *Procedia Engineering*, v. 26, p. 1914-1921, 2011.
- [31] MARTINS, P.; VIDAL, D. Tubos Geotêxteis para Acondicionamento e Desaguamento de Rejeitos de Mineração. In: XII Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA. Anais. São José dos Campos, SP. 2006.
- [32] CARESSATO JUNIOR, W.; PANTA, C. A. C.; URBAN, R. C. Desidratação dos Rejeitos Provenientes da Mineração através de Tubos Geotêxteis. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica. Anais. Belo Horizonte, MG 2016.
- [33] DA CRUZ, Paulo Teixeira. 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. Oficina de Textos, 1996.
- [34] FRANKS, Daniel M. *et al.* Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources policy*, v. 36, n. 2, p. 114-122, 2011.
- [35] FERREIRA, M. T. S. Aterros Experimentais dos Métodos Alternativos de Disposição de Rejeitos. Apresentação. In: IX Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea. Apresentação. Belo Horizonte, MG. 2018.
- [36] EDRAKI, Mansour *et al.* Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, v. 84, p. 411-420, 2014.
- [37] GUERRA, B. B., PIMENTEL, M. F. S., GOMES, A. C. Caracterização Tecnológica no Reprocessamento de Material Estocado em Barragem de Rejeito. In: IX Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea. Anais. Belo Horizonte, MG. 2018.

### 3. ARTIGO III

O Artigo de título “PROJETO CONCEITUAL DE BARRAGEM DE REJEITO E AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE”, foi publicado nos Anais do XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, GEOSUL 2019, evento realizado de 17 a 19 de Outubro de 2019, na Cidade de Joinville/SC.

Este artigo visa apresentar uma aplicação de conceitos de projeto e de avaliação de estabilidade de Barragens de Rejeito pelo Método de Alçamento a Montante.

Disponível em:

<https://conferencias.ufsc.br/index.php/geosul2019/2019geosul/paper/view/126>

&

[https://sabi.ufrgs.br/F/GXT7PN4EGU3XTFI9NEAKMQUI9N7HN4M5SLFSB77KVR9E5QDKH8-00999?func=full-set-set&set\\_number=022684&set\\_entry=000001&format=999](https://sabi.ufrgs.br/F/GXT7PN4EGU3XTFI9NEAKMQUI9N7HN4M5SLFSB77KVR9E5QDKH8-00999?func=full-set-set&set_number=022684&set_entry=000001&format=999)



## Projeto Conceitual de Barragem de Rejeito e Avaliação de Estabilidade

Fernando Alves Cantini Cardozo  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, fernando.cantini3@gmail.com

Cesar Alberto Ruver  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, cesar.ruver@gmail.com

**RESUMO:** Este trabalho visa apresentar e debater um projeto conceitual de barragem de rejeito de mineração, para tanto são visitados tópicos específicos a barragens de rejeito e revisada em literatura a caracterização de materiais constituintes de tais estrutura. Com base em parâmetros de projetos disponíveis em literatura, fora esquematizado um barramento hipotético e avaliada sua estabilidade via análise computacional (análise por equilíbrio limite e de fluxo d'água por elementos finitos). Avaliando-se eventuais mudanças de projeto (alçamento adicional da barragem) e situações hipotéticas (colapsos na drenagem interna), conclui-se que o projeto conceitual esquematizado se apresenta como viável e estável dada a geometria proposta e as propriedades de matérias consideradas, identificou-se também a importância do sistema de drenagem interna do barramento para a estabilidade da estrutura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragem de Rejeito, Projeto Conceitual, Análise de Estabilidade.

### 1 INTRODUÇÃO

Barragens de Rejeitos são consideradas algumas das maiores estruturas geotécnicas construídas pelo homem. Elas têm por finalidade a disposição de rejeitos oriundos da mineração. Kossoff *et al.* (2014) definem os rejeitos 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.

Tipicamente, se identificam três métodos construtivos básicos: montante, jusante ou linha de centro. Estes métodos fazem referência a técnica e direção de alçamento empregado. Nos métodos de alçamento da linha de centro e de montante, os alçamentos são executados parcialmente sobre rejeito já disposto. Tal fator embora gere significativa economia com movimentação de terra (apresentam menor volume de material destinado a execução do

barramento), traz certa complexidade quanto ao controle construtivo do barramento e quanto a execução e controle de drenagem.

Azam e Li (2010), apresentam um histórico mundial das falhas em barragens de mineração, onde segundo a revisão dos autores cerca de 1,2% das barragens de mineração apresentaram algum tipo de falhas, contra 0,01% das barragens civis, nos últimos cem anos. Visto o supracitado, fica implícita a necessidade da compreensão plena de todas as contornantes referentes as barragens de rejeitos e a correta conceituação do projeto a ser desenvolvido. Atualmente diversos autores tem atribuído as falhas em barragens de rejeito a problemas construtivos e de projetos, ocasionando a ruptura generalizada (KOSSOFF *et al.* 2014; RAFAEL e ROMANEL, 2014; RICO *et al.*, 2008; AZAM e LI 2010; MAFRA, 2016; ROUT, SAHOO e DAS, 2013).

Neste sentido, considerando a complexidade do tema e os últimos incidentes ocorridos, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a



segurança de uma barragem de rejeitos executada pelo método de alteamento à montante.

## 2 PROJETO CONCEITUAL

Tomou-se por base um estudo conceitual de uma mina de ouro (Bicca *et al.* 2013), onde é apresentado o desenvolvimento sistemáticos, desde o modelamento geológico, planejamento de lavra, beneficiamento e configuração final. Entretanto, não é abordada a disposição de rejeitos. Assim, partindo-se do estudo de Bicca *et al.* (2013), tem-se a necessidade de conceber tecnologia para a disposição dos rejeitos gerados tipicamente dispostos em barragem, de forma a minimizar a área impactada por essa disposição. Do estudo considerado, temos que devido ao tipo de minério e processo de beneficiamento (de ouro), praticamente toda a tonelagem de minério lavrado (que possui teor de ouro que viabiliza seu beneficiamento) é processada e por fim disposta na barragem de rejeito. Considerando que dado o teor médio de 2,1 ppm (ou gramas de ouro por tonelada de minério) tem-se que de cada tonelada beneficiada apenas 2,1 gramas em média serão produto e não serão destinados a barragem de rejeito. Sendo destinadas as rochas sem teor de ouro lavrável diretamente para pilha de estérreo, sem passar pelo beneficiamento.

Considerando o planejamento de lavra, que visa o melhor aproveitamento dos recursos minerais e otimização dos processos produtivos, incluído a otimização do beneficiamento; se visa uma produção uniforme ao longo da operação (vida da Mina) deste modo também visa-se o fornecimento de minério em taxa relativamente uniforme a planta de beneficiamento. Assim, excetuando situações anômalas (falhas produtivas, paralisações, entre outras), tem-se uma geração contínua anual de rejeito 1,45 Mton, com beneficiamento anual médio de 2,6 Mton, ao longo dos 13 anos de operação.

Observa-se que os processos de beneficiamento e concentração de minério de ouro, são majoritariamente de cominuição (britagem e moagem), físico-químico (flotação) e hidrometalurgia (lixiviação) e separação sólido líquido (espessamento). Sendo que a moagem é maior responsável diminuição granulométrica e demais processos pela adição de água, e por fim os processos de lixiviação e flotação (pela adição de reagentes) são também responsáveis por alterarem as propriedades físico-químicas dos rejeitos gerados.

### 2.1 Conceituação do Barramento

Na ausência de dados que permitam dimensionar adequadamente o alteamento do barramento, o qual deveria ser dimensionado em função da taxa de disposição e da elevação de cota em função da topografia do local escolhido para a disposição, de mesmo modo na ausência de caracterização dos materiais a constituírem o barramento; para o projeto conceitual foram adotados parâmetros baseados em literatura. De modo conceitual, na ausência de locação específica para o barramento, que em função da topografia permitiria determinar a altura do barramento em função da área ocupada. A Tabela 1 apresenta uma estimativa de área ocupada e altura de barramento, considerando hipoteticamente um barramento em terreno plano (o que aumenta consideravelmente a área ocupada pelo rejeito).

Tabela 1 – Relação entre área ocupada, inclinação média do terreno e altura do barramento.

área ocupada (ha)	altura do barramento (m)
60,57	30
45,43	40
36,34	50

Quanto a geometria e propriedades do barramento, é disponível em literatura, certa gama de estudos de caso, com caracterização de materiais (rejeitos de beneficiamento) e geometrias adotadas consultou-se os trabalhos



de Da Silva *et al.*(2018), Albuquerque Filho (2004), Naeini e Akhtarpour (2018), Rafael e Romanel (2014) e Rout, Sahoo e Das (2013). Tais trabalhos apresentam caracterizações de rejeitos de diferentes minérios (ferro, cobre e alumínio) e geometrias de barragens. Salienta-se que nenhum dos estudos acima elencados é explicativo quanto ao sistema de filtro e/ou drenagem empregados e seus dimensionamentos, entretanto diversos livros textos (MASSAD, 2010; GOLDIN, RASSKAZOV; 1992; entre outros) apresentam opções de configurações de designe de drenagem para barragens de terra (aplicáveis a barragens de rejeito) e dimensionamento dos filtros (referente a granulometrias).

Observa-se também que mesmos materiais (rejeitos), de minerações de mesmo minério, apresentam certa variabilidade de parâmetros geotécnicos, fato que vai de encontro aos diferentes processos de beneficiamento, os quais são responsáveis por conferir aos materiais características geotécnicas e hidráulicas diversas, como demonstra o trabalho de Da Silva *et al.* (2018). Isto devido as diferentes rotas de beneficiamento, as quais cominuem um minério em diferentes granulometrias e utilizam-se de diferentes reagentes nos processos físico-químicos de concentração.

Para determinação de parâmetros hidráulicos dos materiais a constituírem a estrutura (alteamentos e rejeitos), uma opção frente a ensaios de laboratório ou ensaios de campo, são a utilização de modelos matemáticos para determinação indireta dos parâmetros ( $k_h$ ,  $k_v$  e/ou razão  $k_h/k_v$ ) como apresentam Shamsai *et al.* (2007).

### 2.3 Parâmetros e premissas adotadas

Embora a maioria dos estudos elencados anteriormente, tratem de rejeitos de minérios metálicos, se optou por tomá-los como base para o desenvolvimento do projeto, sobre tudo

quanto a geometria e grandeza de escala para as propriedades geotécnicas dos materiais de projeto. Optou-se por adotar, de modo conservador, parâmetros geotécnicos com valores próximos aos menores valores verificados na bibliografia, visto que estes se referiam a rejeitos de minérios de ferro e cobre.

Para o projeto se optou considerar a barragens constituídas por cinco materiais (fundação, argila mole<sup>1</sup>, aterro, rejeito disposto e rejeito adensado) com propriedades segundo a Figura 1, de modo que os parâmetros considerados não fujam da realidade apresentada por materiais reais, embora por simplificação se optou por considerar os materiais isotrópicos.

Como método construtivo, devido a sua maior relevância (maior utilização para barragens de rejeito) e economia (construtiva, sendo necessária menor movimentação de terra), como anteriormente salientado, optou-se pelo método de alteamento a Montante. Utilizando-se alteamentos de 10 (dez) metros intercalados por bermas de 10 (dez) metros, sendo os taludes considerados com inclinação de 25°. Considerou-se como projeto preliminar um barramento com 4 alteamentos, totalizando um barramento global de 40 metros de altura. Para a configuração da praia de rejeito, foram utilizados os parâmetros de projeto conforme Silva (2018) e De Araújo(2006), que baseados em modelos empíricos e observacionais, consideraram em seus estudos a existência de duas fases distintas, onde a porção submersa apresenta uma maior inclinação em relação a porção emersa. Tal fenômeno é bem descrito em trabalhos como os de De Araújo (2006) e Machado (2007), onde estes citam Vick<sup>2</sup> apud De Araújo (2016).

Quanto a configuração da disposição do rejeito, foi considerada uma praia de rejeito de 150 metros de extensão entre o ponto de

<sup>1</sup> Com sua ocorrência vinculada a cenário hipotético a ser analisado.

<sup>2</sup> VICK, S.G., 1983 – Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams, Wiley Interscience, New York



pivotamento teórico do rejeito, no barramento, e a linha d'água sobre a qual o rejeito submerge, tipicamente com maior angulação como aborda Silva (2018). Quanto as inclinações adotadas, se considerou inclinação (i) de 0,5% para o rejeito emerso e de 3,0% para o rejeito submerso. Posteriormente se observou a hipótese de linha d'água sob o rejeito, ou seja situação de maior risco e maior exigência de sistema de filtro/drenagem.

Referente ao sistema de filtro/dreno, foram utilizados no projeto filtros de pé e meio de barramento, de forma a percorrer metade do pé e toda a extensão central do alteamento, assim possibilitando sua continuidade no decorrer dos alteamentos. Se analisou também a utilização de filtros de pé, e opção se sem filtro (hipotética, de colapso do sistema). A Figura 1 apresenta a configuração do barramento proposto e quadro com os materiais constituintes do modelo.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle
aterro		19	Mohr-Coulomb	10	36	1e-007	1	0
filtro/dreno		20	Mohr-Coulomb	0	37	0.001	1	0
rejeito adensado		18	Mohr-Coulomb	0	32	3.47e-006	1	0
rejeito disposto		18	Mohr-Coulomb	0	20	3e-005	1	0
fundação		20	Mohr-Coulomb	19	35	5e-006	1	0
argila mole		15	Mohr-Coulomb	18	0	5e-006	1	0

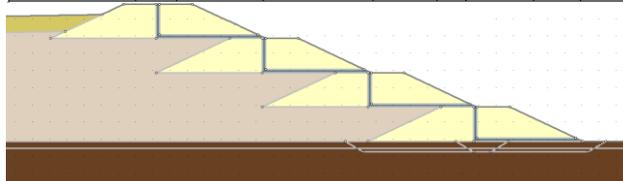


Figura 1 – Layout da barragem e materiais de construção (software Slide).

### 3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a análise de Estabilidade do Projeto de barramento, em questão, e das variações de projeto ponderadas, se optou por análises de equilíbrio limite, através do *software Slide* 5<sup>3</sup>. A linha piezométrica, gradientes hidráulicos e distribuição de poropressões foram determinadas no mesmo software, por método

numérico, e posteriormente utilizadas na análise analítica, onde estes são influentes na determinação dos Fatores de Segurança (FS). Para todas as análises, foi utilizado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Para o cálculo de todos os fatores de segurança foi utilizado método de Morgenstern-Price, utilizando-se uma discretização por 50 lamelas. Optou-se por tal método por ser este considerado um método rigoroso e que se adapta a diferentes superfícies de ruptura e a casos complexos com diferentes materiais.

Referente a determinação dos parâmetros associados ao fluxo d'água, estes foram determinados considerando uma discretização por 4000 nós e elementos triangulares, para todas as análises. Sendo estes parâmetros hidráulicos determinados pelo *software*.

#### 3.1 Opções de Projeto

Um projeto de barragem possuía diversas opções e soluções de geometria que podem vir de diferentes modos a alterar o desempenho do barramento, tipicamente o aspecto mais avaliado é o Fator de Segurança (F.S.), entretanto outros aspectos como a percolação de água pelo maciço (barramento), as tensões de poropressão e os gradientes hidráulicos, devem ser também avaliados e podem vir a ser de extremo interesse ao se avaliar os fenômenos de *piping* e liquefação.

Para o projeto em questão, optou-se por avaliar a variação da posição da linha d'água ou "praia de rejeito", e sua influência a estabilidade do barramento; bem como do sistema de drenagem interna do barramento, por sistema de dreno de pé e por sua falha hipotética. Foi avaliada também a hipótese de um alteamento adicional e da existência de camada de baixa resistência na fundação.

#### 3.2 Resultados das Análises

<sup>3</sup> Empresa RocScience



### 3.2.1 Condições ideais

Como modelo de referência foram consideradas as situações ditas como ideais, sem necessidade de tratamento de fundação, sistemas e dreno interno interligado de pé e meio de talude, e principalmente “praia de rejeito” afastada 150 metros do último talude. Em tal situação temos um F.S. de 2,246; na Figura 2A, vê-se a superfície de ruptura e linha piezométrica e na Figura 2B a distribuição de poropressão.

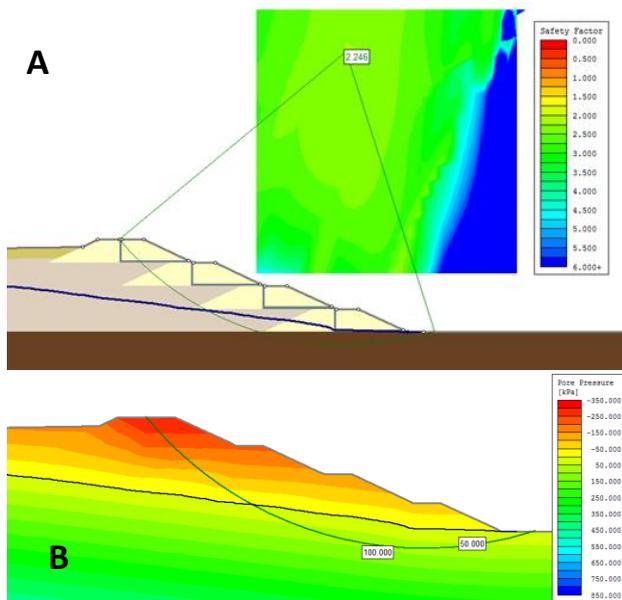


Figura 2 – (A) Superfície de ruptura no barramento em situação ideal e (B) correspondente distribuição de poropressão.

### 3.2.2 Cenário com linha d’água sob o rejeito

Para análise de situação limite, se avaliou a hipótese de eliminação da praia de rejeito e elevação do nível d’água no barramento a 1,5 metros sob o rejeito (Figura 3A). Tal hipótese como observa-se na Figura 3 desloca a linha piezométrica para o barramento. Figura 3A apresenta a superfície de ruptura, com F.S. de 2,054, e Figuras 3B e 3C apresentam distribuição de poropressão e gradiente hidráulico na base do barramento, respectivamente. Esta hipótese é mantida nas análises a seguir uma vez que representa um

cenário de risco em comparação com o adequado afastamento da “praia de rejeito” do barramento.

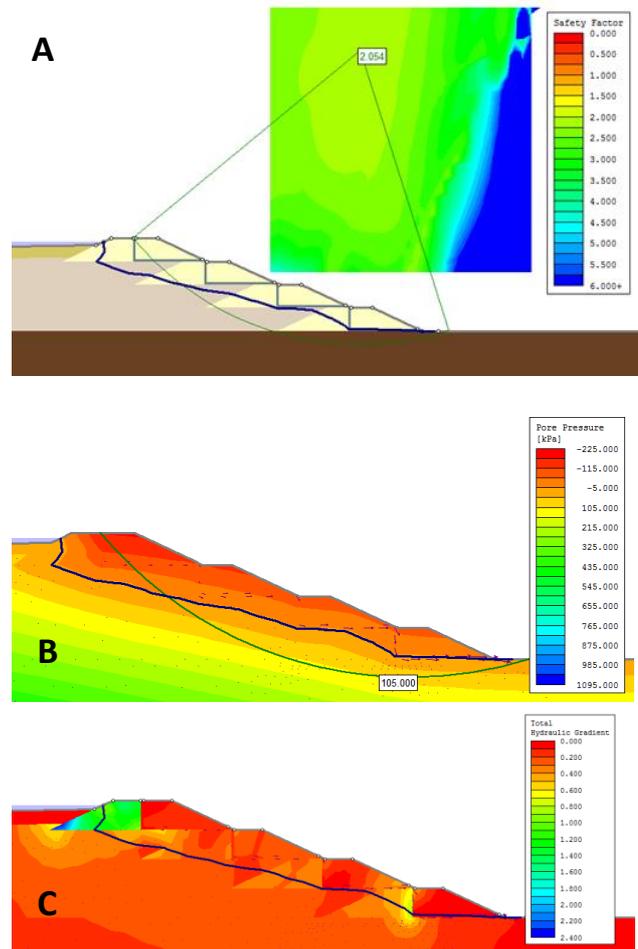


Figura 3 – (A) Superfície de ruptura na hipótese de nível d’água acima de 1,5 metros, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) gradiente hidráulico no primeiro barramento.

### 3.2.3 Cenário com linha d’água sob o rejeito e hipótese de colapso do sistema de drenagem/filtro

Complementarmente a situação anterior, considerou-se hipotético colapso dos drenos internos. Situação considerada limite. Temos que em tal situação se estima um F.S. de 1,767, conforme Figura 4A, entretanto tal configuração representa concentrações de gradiente hidráulico e fluxo ascensional de água, conforme Figura 4C, situações geradoras de *piping* e liquefação.



### 3.2.4 Cenário com fundação da barragem sob argila mole e posterior tratamento da fundação (por substituição parcial da camada)

Neste cenário foi considerado a hipótese de ocorrência de uma camada de “argila mole” (de baixa resistência) na fundação da barragem, dique e rejeito. A camada hipotética apresenta uma espessura de 2 metros, considerando-a na análise teríamos um F.S. de 1,332 e uma superfície de ruptura que passaria exatamente por ela (Figura 5A). Considerando-se um determinado tratamento da fundação, por remoção e substituição da camada sob o dique inicial avançando-se ainda 1 metro sob este, ou seja, transpassando a camada.

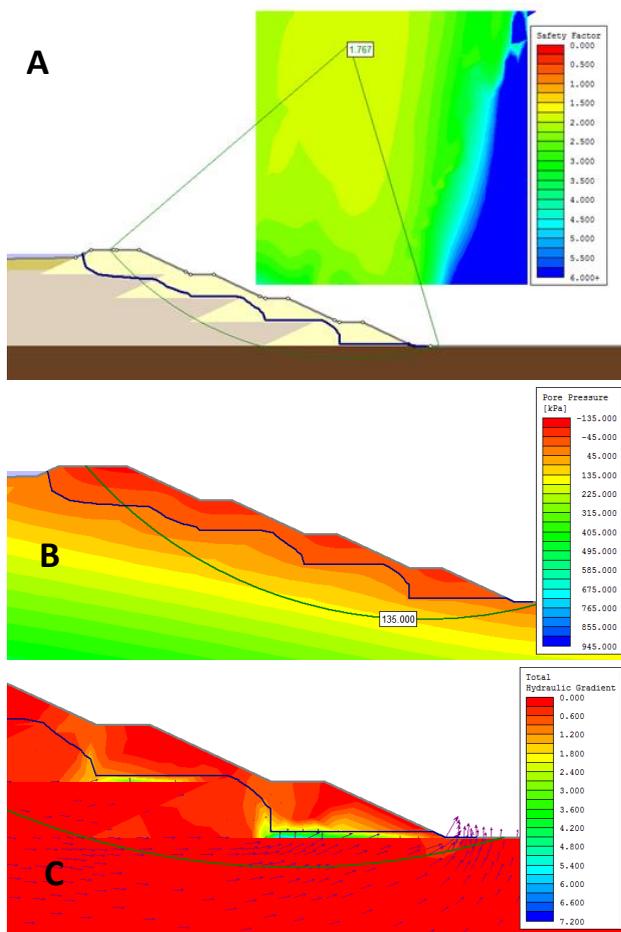


Figura 4 – (A) Superfície de ruptura na hipótese de colapso de sistema de drenagem interna e nível d’água acima do rejeito, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) acúmulos de gradiente hidráulico e fluxo interno d’água.

Na Figura 5B é apresentada a situação com o tratamento da fundação e respectivo F.S. de 1,721.

### 3.2.5 Sistema de dreno/filtro de pé com linha d’água sob o rejeito (1,5 metros acima do rejeito)

Neste cenário foi analisada uma configuração alternativa de sistema de dreno/filtro interno do barramento, com intuito de avaliar tanto como opção de projeto quanto hipótese de eventual comprometimento eventual da porção vertical do sistema dreno/filtro. Para tanto no modelo foi considerado apenas filtro/dreno do tipo “pé de barramento”. Manteve-se o hipótese de nível d’água acima do rejeito. Na Figura 6A é apresentada a superfície de ruptura e linha piezométrica da barragem, onde se calcula um F.S. de 1,994. Nas Figuras 6B e 6C, estão representadas as distribuições de poropressão e gradiente hidráulico no barramento.

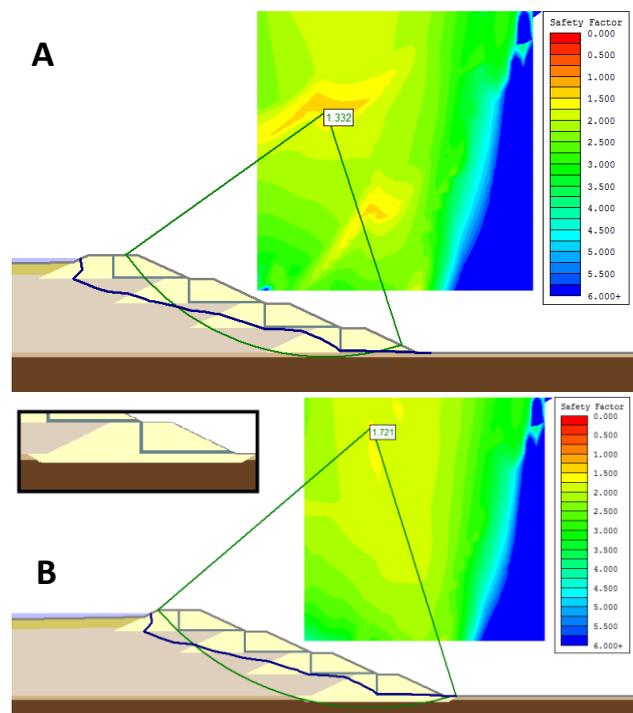


Figura 5 – (A) Superfície de ruptura e F.S. no cenário de ocorrência de camada de “argila mole” sob a barragem e (B) superfície de ruptura e F.S. após tratamento da fundação do dique inicial.



### 3.2.6 Sistema de dreno/filtro de pé apenas no dique inicial e com linha d'água sob o rejeito (1,5 metros acima do rejeito)

Neste cenário foi analisada a opção por dreno/filtro interno apenas no dique inicial do barramento. Mantendo-se o hipótese de nível d'água acima do rejeito. Na Figura 7A é apresentada a superfície de ruptura e linha piezométrica da barragem, onde se calcula um F.S. de 1,942. Nas Figura 7B e 7C, estão representadas as distribuições de poropressão e gradiente hidráulico no barramento.

### 3.2.7 Cenário de Projeto considerando alteamento adicional (5 alteamentos) e com linha d'água sob o rejeito (1,5 metros acima do rejeito)

Neste cenário foi analisada a hipótese de um alteamento adicional a barragem e seu impacto na estabilidade. Mantendo-se o hipótese de nível d'água acima do rejeito. Na Figura 8A é apresentada a superfície de ruptura e linha piezométrica da barragem, onde se calcula um F.S. de 1,899. Nas Figuras 8B e 8C, estão representadas as distribuições de poropressão e gradiente hidráulico no barramento.

### 3.2.8 Cenário de Projeto considerando alteamento adicional (5 alteamentos) e com linha d'água a 150 metros do barramento

Neste cenário foi analisada a hipótese de um alteamento adicional a barragem e seu impacto na estabilidade. Nesta análise a “praia de rejeito” foi locada a 150 metros do barramento.

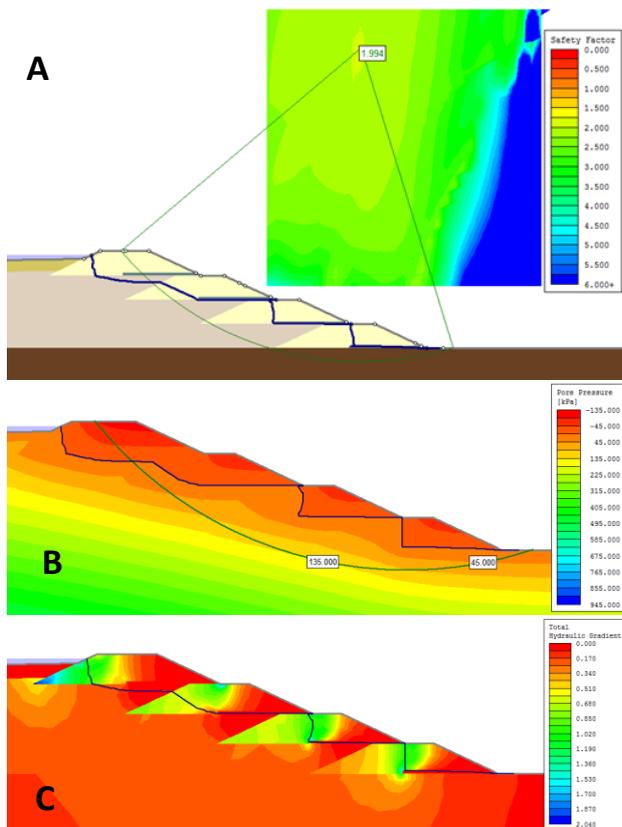


Figura 6 - (A) Superfície de ruptura na opção de dreno de pé de barramento como sistema de drenagem interna e nível d'água acima do rejeito, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) acúmulos de gradiente hidráulico

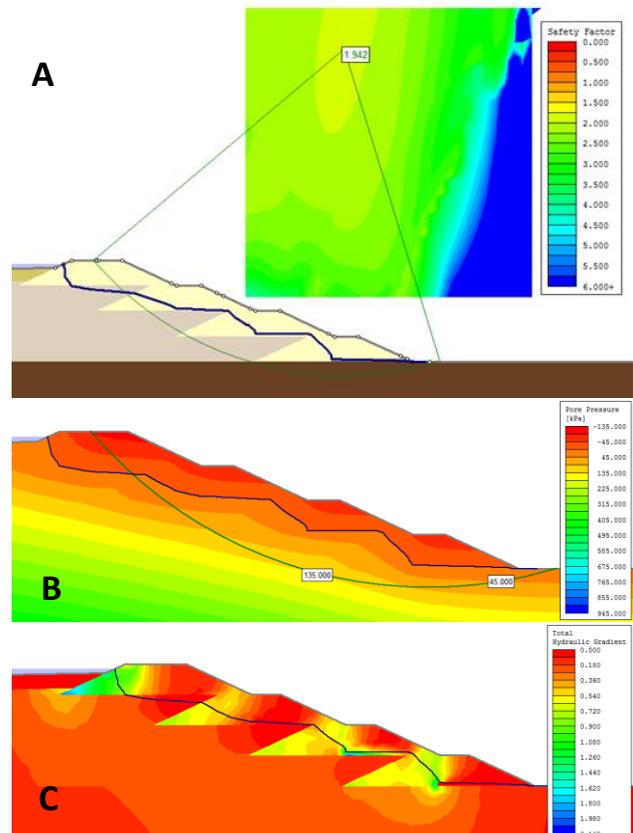


Figura 7 - (A) Superfície de ruptura na opção de dreno de pé apenas no dique inicial da barragem e nível d'água acima do rejeito, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) acúmulos de gradiente hidráulico



Na Figura 9A é apresentada a superfície de ruptura e linha piezométrica da barragem, onde se calcula um F.S. de 2,105. Nas Figuras 9B e 9C, estão representadas as distribuições de poropressão e gradiente hidráulico no barramento. Nota-se redução de poropressão em comparação com situação anterior.

### 3.2.9 Cenário de Projeto considerando alteamento adicional (5 alteamentos), com linha d'água a 150 metros do barramento e hipótese de colapso do sistema de drenagem/filtro

Nesta análise além do alteamento adicional e nível d'água acima do rejeito, considerou-se um hipotético colapso dos drenos internos. Situação considerada limite.

Temos que em tal situação se estima um F.S. de 1,635; conforme Figura 10A, entretanto tal configuração representa concentrações de gradiente hidráulico, conforme Figura 10C.

### 3.3 Análise dos resultados

O projeto de barragem de rejeitos sugerido atendeu aos requisitos de segurança pelos método analítico utilizado, Equilíbrio Limite. Sob condições ideais de funcionamento, linha da água a 150 m do barramento e drenos/filtros internos na configuração adequada, o projeto apresenta um Fator de Segurança (F.S.) de 2,2; enquanto sob condições adversas (colapso do sistema de drenagem interna e elevação do nível d'água) ainda apresenta um F.S. de 1,8.

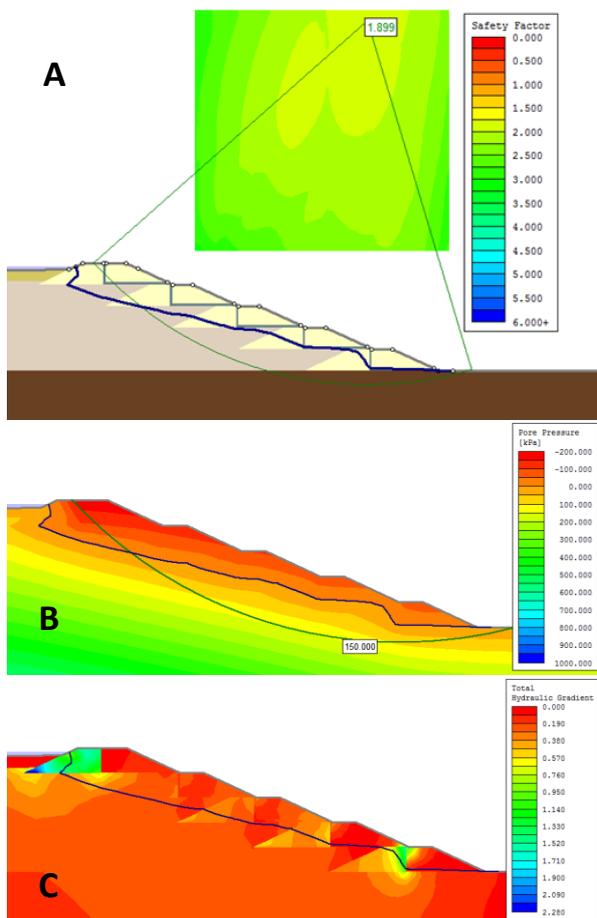


Figura 8 - (A) Superfície de ruptura na hipótese de alteamento adicional e nível d'água acima de 1,5 metros, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) gradiente hidráulico.

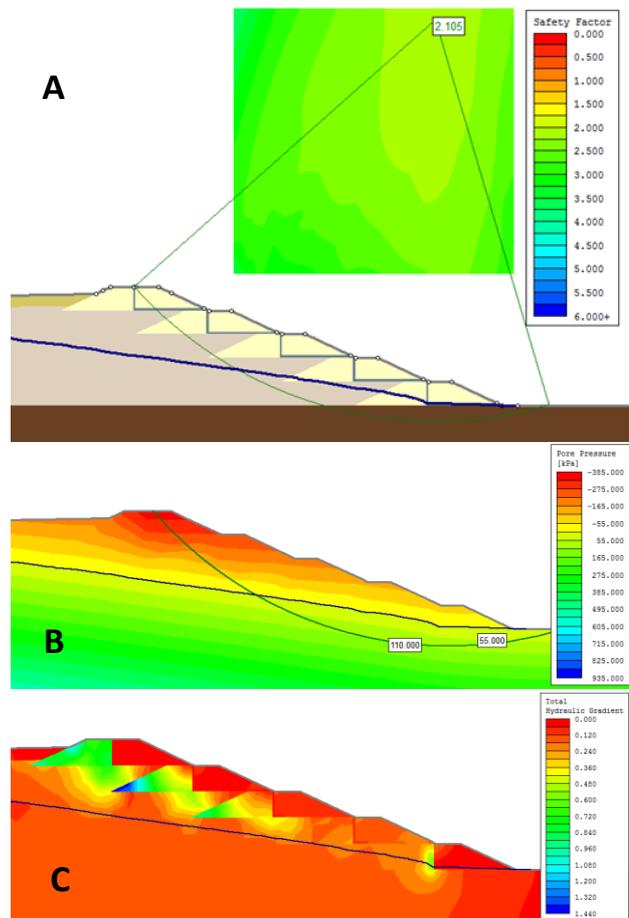


Figura 9 - (A) Superfície de ruptura na hipótese de alteamento adicional e linha d'água a 150 metros do barramento, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) gradiente hidráulico.

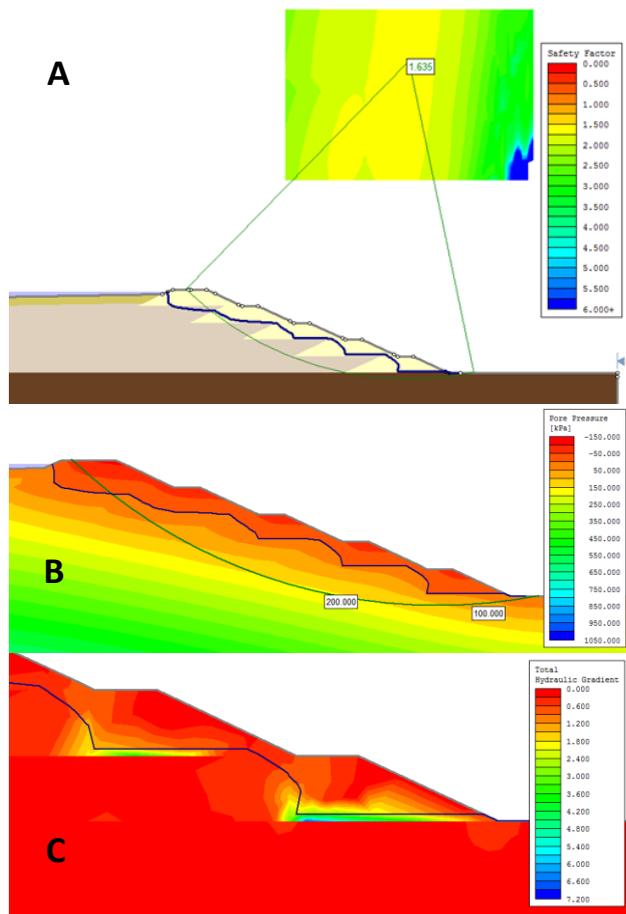


Figura 10 - (A) Superfície de ruptura na hipótese de colapso de sistema de drenagem interna e nível d'água acima do rejeito, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) acúmulos de gradiente hidráulico e fluxo interno d'água.

Embora considerando que os valores obtidos nos F.S.'s fiquem acima dos recomendados por norma (F.S. entre 1,2 e 1,5), e assim o projeto seja considerado aceitável outros fatores devem ser levados em consideração. Em primeiro ponto, por se tratar de um barramento hipotético, diversas variáveis (topografia, geologia, materiais, entre outros) são incertezas. No caso em questão todos os parâmetros foram estimados a partir de literatura, enquanto um projeto real de uma barragem de rejeito certamente terá dados de ensaios de laboratório para embasar as soluções propostas e acesso a maiores recursos para as análises.

Referente ao cenários analisados, se verificou, como esperado, impactos nos F.S.'s,

concentrações de gradientes hidráulicos e poropressões; com as variações de nível e posição d'água (praia de rejeito) e conforme a configuração da drenagem interna. Analisado um cenário com um alteamento adicional (para um total de cinco alteamentos) elevando a barragem à uma altura final relativa de 50 m. Nesse caso verifica-se um FS de 2,1 em situação ideal e um FS de 1,6 sob condições adversas, ainda dentro dos limites de segurança.

Referente aos gradientes hidráulicos e poropressões, verifica-se que estas foram sensíveis as alterações testadas. Sendo os barramentos inferiores e junto aos filtros internos as posições mais críticas. Quanto a poropressão vê-se que nos cenários propostos houve variação junto a superfície de ruptura crítica. Tais cenários poderiam (em se tratando de gradientes hidráulicos críticos) ocasionar gatilhos que levem a ruptura do barramento.

Baseando-se nas análises acima verifica-se que a melhor medida a ser tomada para garantir a segurança do projeto é o afastamento da linha d'água do barramento, o que não só acarreta em majoração dos fatores de segurança da barragem, como também reduz as poropressões e gradientes hidráulicos ocorrentes. Quanto aos sistemas de filtro/dreno internos, foram avaliadas três opções: um sistema de meio e pé, de pé e apenas no dique inicial. Segundo as análises feitas, o filtro de meio e pé não só garante o maior fator de segurança mais resulta nas menores poropressões dentro do talude da barragem, sendo portanto a opção mais recomendada.

A última análise a ser feita referir-se-ia a segurança devido a liquefações e *piping*, entretanto, considerando o projeto utilizando sistema de filtro/dreno de meio e pé em todos os alteamentos, e os respectivos gradientes hidráulicos (inferiores as demais opções), o que reduz o risco de ocorrência de liquefação do aterro; pode se considerar o barramento como estável a nível de projeto conceitual.



#### 4 CONCLUSÕES

O trabalho mostrou a concepção de uma barragem de rejeitos já ao final da operação da mina, considerando quatro alteamentos na condições ideias de operação (150 m de afastamento da praia de rejeitos e operação adequada dos filtros). Nesta condição, a barragem apresenta um FS de 2,25. Ao longo do trabalho, foi mostrado o efeito de diferentes variantes que podem ocorrer ao longo da operação da barragem, podendo-se elencar: (a) o avanço do nível de água até quase a crista da barragem, (b) problemas com mal funcionamento de filtros, (c) ocorrência de argila mole na fundação não detectada na fase de projeto, (d) execução de um nível de alteamento a mais que o projetado inicialmente. Todas as condicionantes analisadas, são responsáveis pela redução de FS, podendo inclusive chegar a valores inferiores aos estabelecidos pelas normas. Neste sentido, salienta-se que tais condicionantes devem ser levadas em consideração no projeto, bem como é fundamental garantir o adequado funcionamento de todos os dispositivos de uma barragem de rejeitos (por exemplo: filtros), aliados a uma adequada inspeção periódica (por exemplo: medição de níveis piezométricos).

#### REFERÊNCIAS

- AZAM, Shahid; LI, Qiren. (2010). Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50-54.
- ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. (2004) *Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- BICCA, Aline Teixeira et al. (2013). *Projeto de pré- viabilidade de um depósito de ouro*. Monografia de Conclusão de Curso. UFRGS.
- DA SILVA, Leandro A. et al. (2018). Avaliação Do Adensamento De Rejeitos Finos De Minério De Ferro E Sua Associação Com A Mineralogia. In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, Belo Horizonte, MG. Brasil.
- DAVIES, M. P. et al. (2002). Design of tailings dams and impoundments. Keynote address, *Tailings and Mine Waste Practices SME*, AGM Phoenix, p. 1-18.
- DE ARAUJO, Cecília Bhering. (2006). *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- GOLDIN A.L., RASSKAZOV L.N. (1992). *Design of earth dams*. Geotechnica 2, Ed. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- KOSSOFF, David et al. (2014). Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, v. 51, p. 229-245.
- MACHADO, William Gladstone de Freitas. (2007). *Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- MAFRA, J. M. Q. (2016). 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, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- MASSAD, F. (2010). *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. Oficina de textos.
- MORGENSTERN, N. R. et al. (2016). Fundão Tailings Dam Review Panel Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP, New York.
- NAEINI, Mahdi; AKHTARPOUR, Ali. (2018) Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 107, p. 179-194.
- RAFAEL, H. M. A. M.; ROMANEL, Celso. (2014). Potencial de Liquefação Estática no Alteamento de uma Barragem de Rejeito. In: Anais do Congresso brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, GO, Brasil.
- RICO, Mayte et al. (2008). Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, 152(2), 846-852.
- ROUT, Subrat; SAHOO, Tapaswini; DAS, Sarat. (2013). Design of tailing dam using red mud. *Open Engineering*, v. 3, n. 2, p. 316-328.
- SHAMSAI, Abolfazl et al. (2007). Geotechnical characteristics of copper mine tailings: a case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 25, n. 5, p. 591-602.
- SILVA, Marcos Vinícius de S. (2018). Desafios na simulação de cenários de deposição de rejeitos dispostos hidráulicamente. In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, Belo Horizonte, MG. Brasil.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho se objetivou lançar luz ao tema barragens de rejeito, dada a importância destas estruturas para a sociedade e os riscos relacionados a possíveis rupturas. Temos que do histórico de rupturas, milhares de metros cúbicos de rejeitos são bruscamente liberadas, ocasionando sérios danos socioambientais. Ainda assim estas estruturas são de grande valia para a sociedade uma vez que a atividade a que está intimamente ligada, a mineração, é fundamental para o suprimento de insumos a sociedade, e métodos de disposição alternativos ainda são altamente dispendiosos. Visto isto esse trabalho buscou avaliar aspectos técnicos destas estruturas, com foco no caso generalista, ou seja, o tipo de estrutura de maior utilização, o método de montante. Vemos que o método de alteamento de montante é sim um método de maior complexidade em comparação aos outros métodos, e que é associado mais facilmente a fenômenos complexos como liquefação e piping. Entretanto analisados casos sintéticos de barramentos, em termos de equilíbrio limite, vemos que alteamentos a montante, podem apresentar razoáveis a altos fatores de segurança. Vemos que utilizando projetos conservadores, mesmo o método de montante, inadequadamente tido como ultrapassado, apresenta Fatores de Segurança considerados altos. Dos estudos realizados se observou com maior relevância o fator drenagem interna. Nos estudos com modelos computacionais se verificou que os menores Fatores de Segurança e maiores concentrações de Gradiente Hidráulico e Poropressões, se deram, obviamente, nas condições mais desfavoráveis de drenagem interna. Temos então a relevância do projeto de drenagem externa (para diluir a carga hídrica retida) e interna para a estabilidade de um barramento. Para tanto se mostram relevantes também os estudos hidrológicos e hidrogeológicos, no intuito de mensurar o ciclo e vazões de águas (frequências e intensidades de chuvas).

Referente aos materiais construtivos, vemos com base na bibliografia consultada, tanto referente a projetos como na bibliografia conceitual, que os materiais que irão constituir uma barragem (tanto rejeito quanto barramento, considerando aterro hidráulico com utilização do próprio rejeito) apresentam grande variabilidade de parâmetros físicos, e tem grande tendência a apresentar variabilidade espacial e temporal no barramento. Objetivou-se, parcialmente, neste trabalho abordar o impacto da possível variabilidade nos parâmetros na análise de estabilidade de barramentos, análise probabilística. Vemos que, em uma análise probabilística, temos cenários em que existem probabilidades do fator de segurança assumir valores inadequados (abaixo do admissível) mesmo encontrando resultados determinísticos considerados

satisfatórios. Conclui-se que a análise probabilista é uma ferramenta adequada ao estudo da estabilidade de Barragens de Rejeito.

Entretanto, acerca disso vemos outra necessidade: a instrumentação e caracterização extensiva de tais estruturas e dos materiais que as compõe. Vemos a importância de ensaios de caracterização de materiais tanto de laboratório quanto de campo, para subsidiar tais análises probabilísticas; e tratamento estatísticos dos resultados. Como potencial de uso futuro podemos pensar no uso métodos de geoestatística para criação e análise de modelos (3D) mais fidedignos a realidade. Onde propriedades de materiais apresentem variação espacial (anisotropia) e probabilidades de ocorrência relacionada com sua posição espacial.

Por fim, podemos concluir, que consideradas medidas adequadamente conservadoras e, se assim tomadas, o projeto seguir economicamente viável, barragens de rejeito, mesmo alteadas a montante são estruturas e opções adequadas para a disposição de rejeitos de mineração.

## REFERÊNCIAS

- AIRES, Uilson Ricardo Venâncio *et al.* Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. **Land Use Policy**, v. 70, p. 63-70, 2018.
- ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). 2004. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. 2004.
- 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.
- BICCA, Aline Teixeira *et al.* (2013). **Projeto de pré-viabilidade de um depósito de ouro**. 2013. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2013.
- BURRITT, Roger L.; CHRIST, Katherine L. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 196-205, 2018.
- BRESSANI, Luis A. Instrumentação em obras geotécnicas–taludes e escavações. In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas. **Anais**. São Paulo, SP. 2009.
- 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; RUVEN, C. A. Considerações a Riscos em Barragens de Rejeito. **Não Publicado**. 2019.
- CARESSATO JUNIOR, Wladimir; PANTA, Carlos Antônio Centurión; URBAN, Rodrigo Custódio. **Desidratação dos Rejeitos Provenientes da Mineração através de Tubos Geotêxteis**. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS. 2016.
- CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. Oficina de Textos, 2017.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. Signus, 1996.

DA CRUZ, Paulo Teixeira. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. Oficina de Textos, 1996.

DA SILVA, Leandro A.; MAZZINGHY, Douglas B.; VIANA, Paulo R. e CANDIA, Renan C. Avaliação do Adensamento de Rejeitos Finos de Minério de Ferro e sua Associação com a Mineralogia. In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte:IBRAM, MG. 2018.

DAVIES, M. P. *et al.* **Design of tailings dams and impoundments**. Keynote address, Tailings and Mine Waste Practices SME, AGM Phoenix, p. 1-18, 2002.

DE ARAÚJO, Cecília Bhering. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.

DIAS, Francisco Miguel dos Santos Carreto. **Filtros em barragens de aterro: caracterização da sua permeabilidade**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal. 2015.

EDRAKI, Mansour *et al.* Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 411-420, 2014.

FERREIRA, Aterros Experimentais dos Métodos Alternativos de Disposição de Rejeitos. Apresentação. In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte: IBRAM, MG. 2018.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. Oficina de Textos, 2016.

FRANKS, Daniel M. *et al.* Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. **Resources policy**, v. 36, n. 2, p. 114-122, 2011.

GALO, D.; LEITE, E. O Dnpm-Ba e A Gestão da Segurança das Barragens de Rejeitos. In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte:IBRAM, MG. 2018.

GOLDIN A.L., RASSKAZOV L.N. **Design of earth dams**. Geotechnica 2, Ed. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands. 1992.

GUERRA, B.B., PIMENTEL, M. F. S., GOMES, A. C. Caracterização Tecnológica no Reprocessamento de Material Estocado em Barragem de Rejeito. In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte: IBRAM, MG. 2018.

HU, Jun; LIU, Xingzong. Design and implementation of tailings dam security monitoring system. **Procedia Engineering**, v. 26, p. 1914-1921, 2011.

KOSSOFF, David *et al.* Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, p. 229-245, 2014.

LEITE, E.; GUNDIM, R. Identificação dos Riscos em uma Barragem de Mineração. In: 9º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte:IBRAM, MG. 2018.

MACIEL FILHO. C.L.; NUMMER, A.V. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 2014.

MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2007.

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, Faïçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Oficina de textos, 2010.

MARTINS, Paula; VIDAL, Delma; CASTRO, Nathalia. **Técnica de Deságüamento de Rejeitos de Mineração Utilizando Tubos Geotêxteis**.

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.

NAEINI, Mahdi; AKHTARPOUR, Ali. Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 107, p. 179-194, 2018.

PALMEIRA, Ennio M.; BEIRIGO, Elder A.; GARDONI, Maria G. Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 2, p. 136-148, 2010.

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 Alçamento 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.

ROUT, Subrat; SAHOO, Tapaswini; DAS, Sarat. Design of tailing dam using red mud. **Open Engineering**, v. 3, n. 2, p. 316-328, 2013.

SANTOS, D .A. M dos; CURI, A.; SILVA, J. M. da. Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro. In: 6° Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2010, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte:IBRAM, MG. 2010.

SHAMSAI, Abolfazl *et al.* Geotechnical characteristics of copper mine tailings: a case study. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 25, n. 5, p. 591-602, 2007.

SILVA, Marcos Vinícius de S. Desafios na simulação de cenários de deposição de rejeitos dispostos hidráulicamente. In: 9° Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & Subterrânea, 2018, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte:IBRAM, MG. 2018.

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.

XIN, Zheng; XIAOHU, Xu; KAILI, Xu. Study on the risk assessment of the tailings dam break. **Procedia Engineering**, v. 26, p. 2261-2269, 2011.

## **ANEXO – Ficha dos Artigos Publicados e Comprovante de Submissão**

Para uma experiência de busca mais amigável,  
com mais conteúdo e adaptada para tablets e smartphones, acesse:



Encerrar sessão  
Catálogo atual: Identificação  
Catálogo UFRGS Empréstimos/Renovações  
Débitos  
Minha pasta  
Ajuda

[Nova pesquisa](#)
[Última pesquisa](#)
[Pesquisas anteriores](#)
[Catálogos](#)
[Agendamentos](#)
[Fale conosco](#)
[A+ a-](#)
[Ad. Minha pasta](#)
[Salvar / E-mail](#)
[Imprimir pág.](#)
[Voltar](#)

Escolher formato: [Completo](#) [Resumido](#) [Campos MARC](#)

Registro 2 de 11

[Anterior](#)
[Próximo](#)
[Clique aqui para ver os itens](#)

**Loc. eletrônica** [Acessar](#) [Texto completo](#)

**N. de sistema** 001096520

**Tipo de produção** Trab.evento no pais

**Autor principal** [Cardozo, Fernando Alves Cantini](#)

**Título** [Considerações sobre barragens de rejeito da mineração e utilização do método de montante \[recurso eletrônico\]](#)

**Obra no todo** Seminário de Engenharia Geotécnica do estado do Rio Grade do Sul (10. : 2019 : Santa Maria, RS) Anais. Santa Maria : UFSM, 2019

**Descrição física** [10] p.

**Nota** Evento também conhecido como GEORS 2019..

**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.

**Assunto geral** [Engenharia civil](#)

**Assunto** [Barragem de rejeitos](#)

[Geotecnia](#)

**Sec. - Aut Pess** [Cordova, Diogo Peixoto](#)

[Ruver, Cesar Alberto](#)

**Sec. - Evento** [Seminário de Engenharia Geotécnica do estado do Rio Grade do Sul \( 10. : 2019. : Santa Maria, RS\)](#)

**Biblioteca** [ENG](#)

**Itens** [Todos os itens](#)

Clique nos conteúdos sublinhado s para realizar nova pesquisa.

[Anterior](#)
[Próximo](#)

[Encerrar sessão](#) - [Nova pesquisa](#) - [Última pesquisa](#) - [Pesquisas anteriores](#) - [Catálogos](#) - [Fale Conosco](#) - [Ajuda](#)

© 2014 Ex Libris

## [Tecnolog] Agradecimento pela Submissão

Dra. Liane M. Kipper e Dra. Rosana Schneider <tecnologica@unisc.br>

Qui, 10/10/2019 22:20

Para: Sr Fernando Alves Cantini Cardozo <fernando.cantini3@hotmail.com>

Sr Fernando Alves Cantini Cardozo,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "CONSIDERAÇÕES A RISCOS GEOTÉCNICOS EM BARRAGENS DE REJEITO" para Tecno-Lógica. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/author/submission/14284>

Login: fernandocantini

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este email. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Dra. Liane M. Kipper e Dra. Rosana Schneider  
Tecno-Lógica

---

Tecno-Lógica

<http://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica>

Para uma experiência de busca mais amigável,  
com mais conteúdo e adaptada para tablets e smartphones, acesse:



Encerrar sessão  
Catálogo atual: Identificação  
Catálogo UFRGS Empréstimos/Renovações  
Débitos  
Minha pasta  
Ajuda

[Nova pesquisa](#)
[Última pesquisa](#)
[Pesquisas anteriores](#)
[Catálogos](#)
[Agendamentos](#)
[Fale conosco](#)
[A+ a-](#)
[Ad. Minha pasta](#)
[Salvar / E-mail](#)
[Imprimir pág.](#)
[Voltar](#)

Escolher formato: [Completo](#) [Resumido](#) [Campos MARC](#)

Registro 1 de 11

[Anterior](#)
[Próximo](#)
[Clique aqui para ver os itens](#)

Loc. eletrônica [Acessar](#) [Texto completo](#)

N. de sistema 001105562

Tipo de produção [Trab.evento no pais](#)

Autor principal [Cardozo, Fernando Alves Cantini](#)

Título [Projeto conceitual de barragem de rejeito e avaliação de estabilidade \[recurso eletrônico\]](#)

Obra no todo [Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul \(12. : 2019 : Joinville, SC\) Anais. Florianópolis: UFSC, 2019](#)

Descrição física [10] p. : il.

Nota Evento também conhecido como GEOSUL 2019.

Resumo Este trabalho visa apresentar e debater um projeto conceitual de barragem de rejeito de mineração, para tanto são visitados tópicos específicos a barragens de rejeito e revisada em literatura a caracterização de materiais constituintes de tais estrutura. Com base em parâmetros de projetos disponíveis em literatura, fora esquematizado um barramento hipotético e avaliada sua estabilidade via análise computacional (análise por equilíbrio limite e de fluxo d'água por elementos finitos). Avaliando-se eventuais mudanças de projeto (alçamento adicional da barragem) e situações hipotéticas (colapsos na drenagem interna), conclui-se que o projeto conceitual esquematizado se apresenta como viável e estável dada a geometria proposta e as propriedades de matérias consideradas, identificou-se também a importância do sistema de drenagem interna do barramento para a estabilidade da estrutura.

Assunto geral [Geologia](#)

[Engenharia civil](#)

Assunto [Barragem de rejeitos](#)

[Projeto conceitual](#)

[Análise de estabilidade](#)

Sec. - Aut Pess [Ruver, Cesar Alberto](#)

Sec. - Evento [Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul \(12. : 2019. : Joinville, SC\)](#)

Clique nos conteúdos sublinhado s para realizar nova pesquisa.

[Anterior](#)
[Próximo](#)

[Encerrar sessão](#) - [Nova pesquisa](#) - [Última pesquisa](#) - [Pesquisas anteriores](#) - [Catálogos](#) - [Fale Conosco](#) - [Ajuda](#)

© 2014 Ex Libris