



## 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

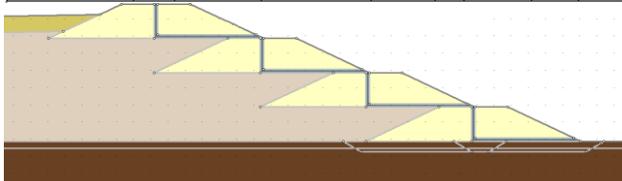


Figura 1 – Layout da barragem e materiais de construção (software Slide).

### 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 referencia 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.

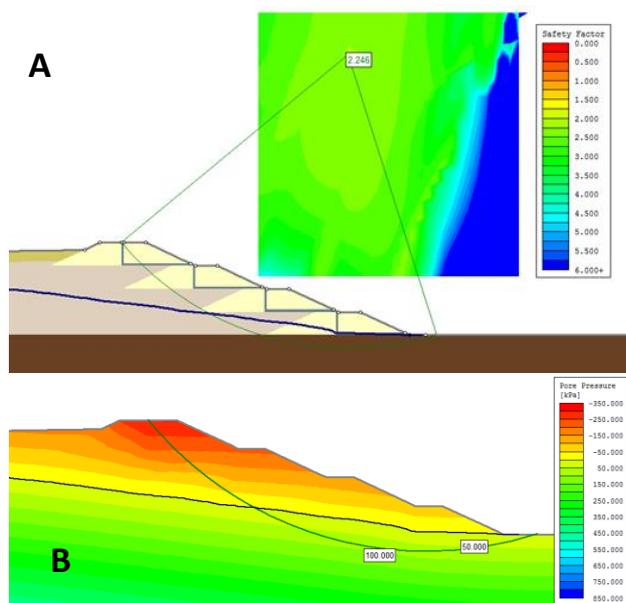


Figura 2 – (A) Superfície de ruptura no barramento em situação ideal e (B) correspondente distribuição de poropressão.

### 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.

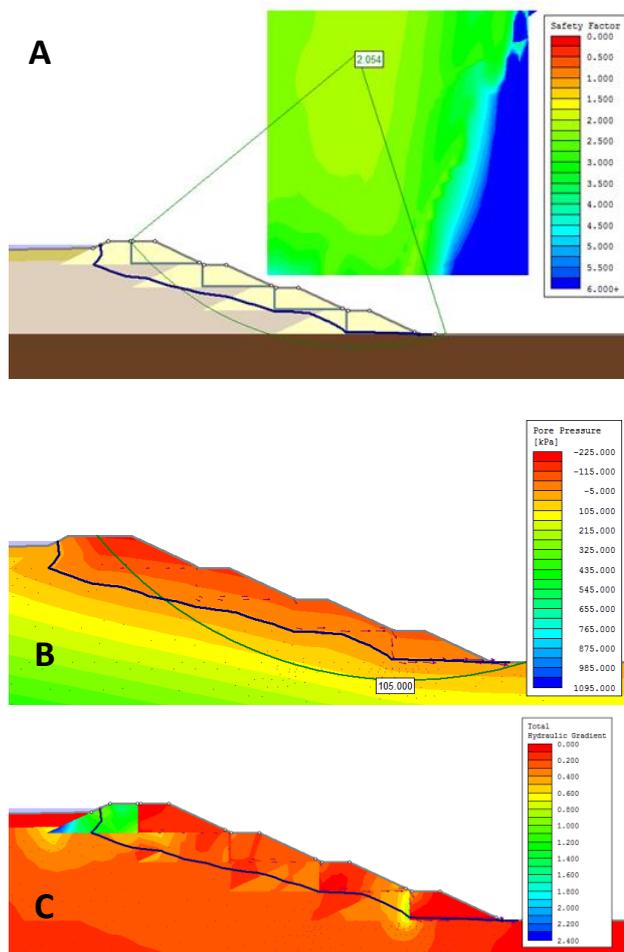


Figura 3 – (A) Superfície de ruptura na hipótese de nível d’água acima de 1,5 metros, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) gradiente hidráulico no primeiro barramento.

### 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.

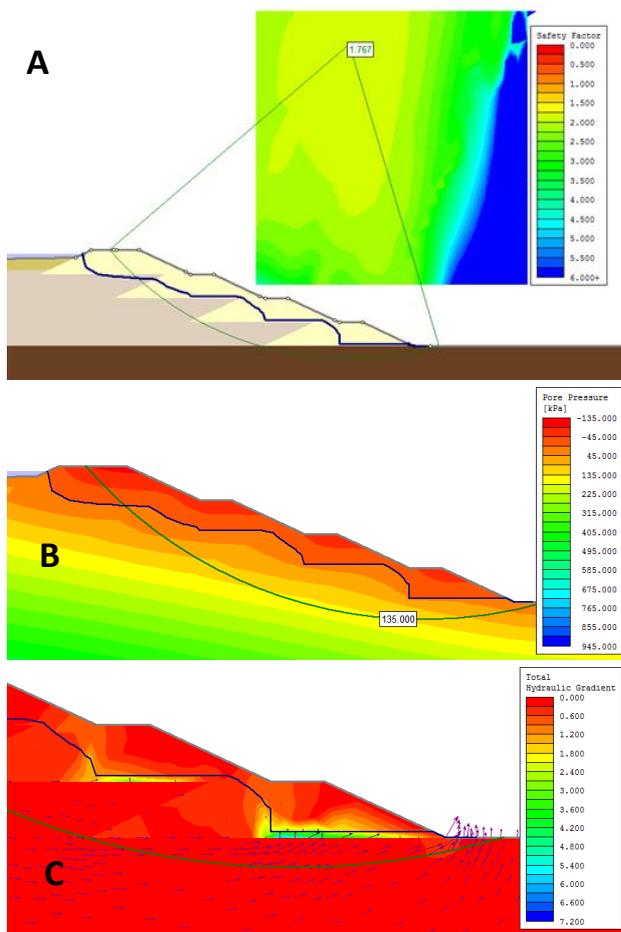


Figura 4 – (A) Superfície de ruptura na hipótese de colapso de sistema de drenagem interna e nível d’água acima do rejeito, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) acúmulos de gradiente hidráulico e fluxo interno d’água.

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.

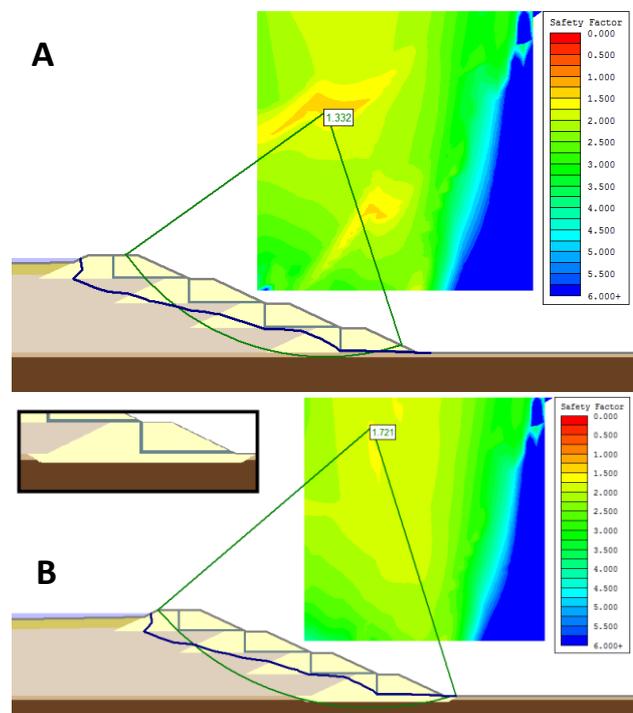


Figura 5 – (A) Superfície de ruptura e F.S. no cenário de ocorrência de camada de “argila mole” sob a barragem e (B) superfície de ruptura e F.S. após tratamento da fundação do dique inicial.



### 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. Manteve-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 Figuras 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.

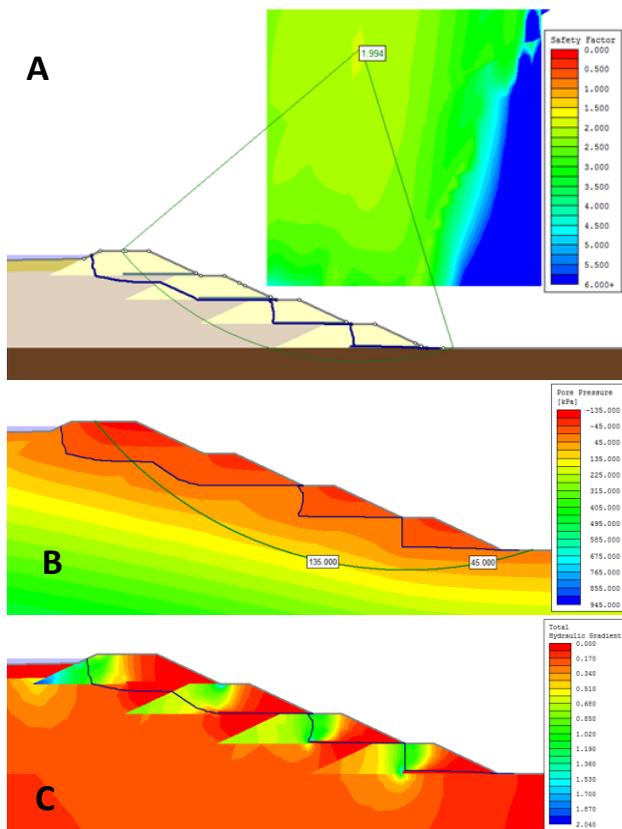


Figura 6 - (A) Superfície de ruptura na opção de dreno de pé de barramento como sistema de drenagem interna e nível d'água acima do rejeito, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) acúmulos de gradiente hidráulico

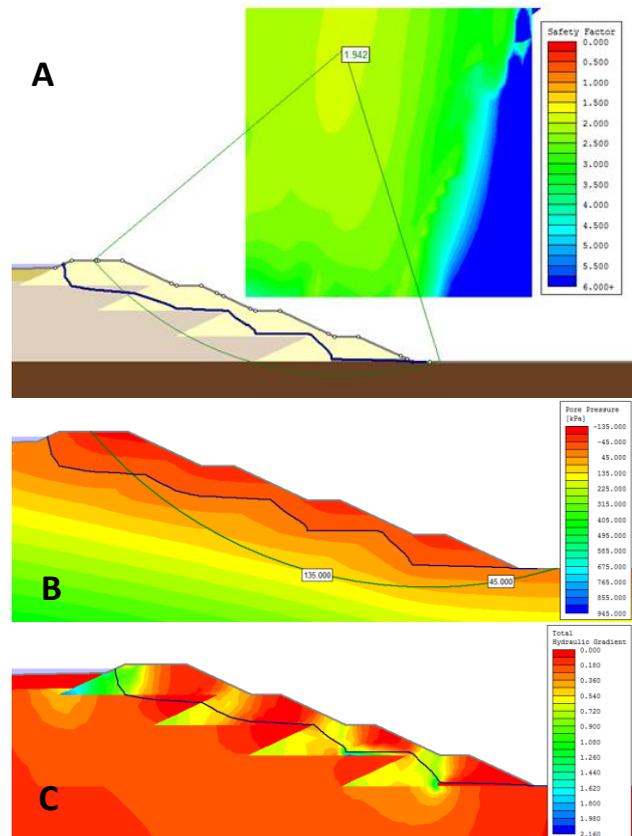


Figura 7 - (A) Superfície de ruptura na opção de dreno de pé apenas no dique inicial da barragem e nível d'água acima do rejeito, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) acúmulos de gradiente hidráulico



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.

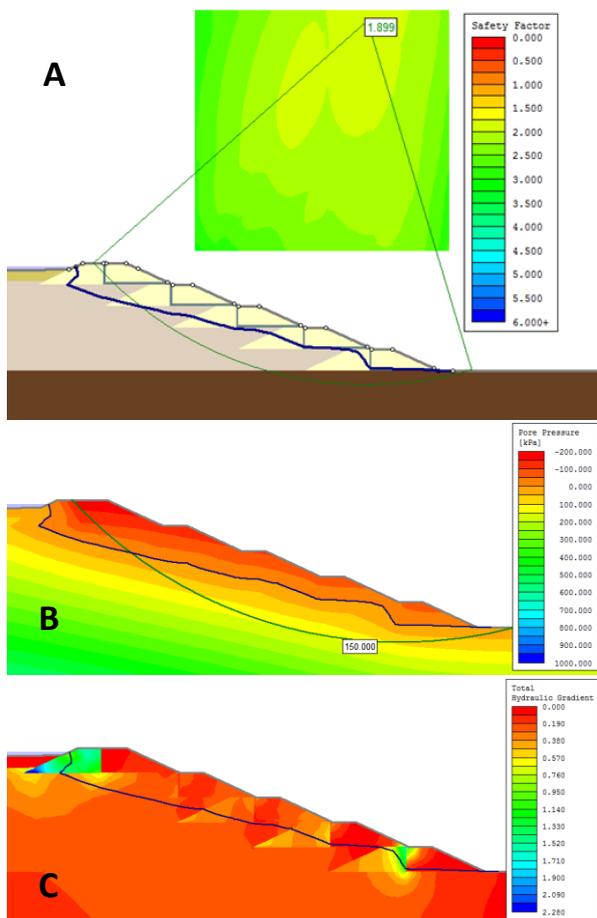


Figura 8 - (A) Superfície de ruptura na hipótese de alteamento adicional e nível d'água acima de 1,5 metros, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) gradiente hidráulico.

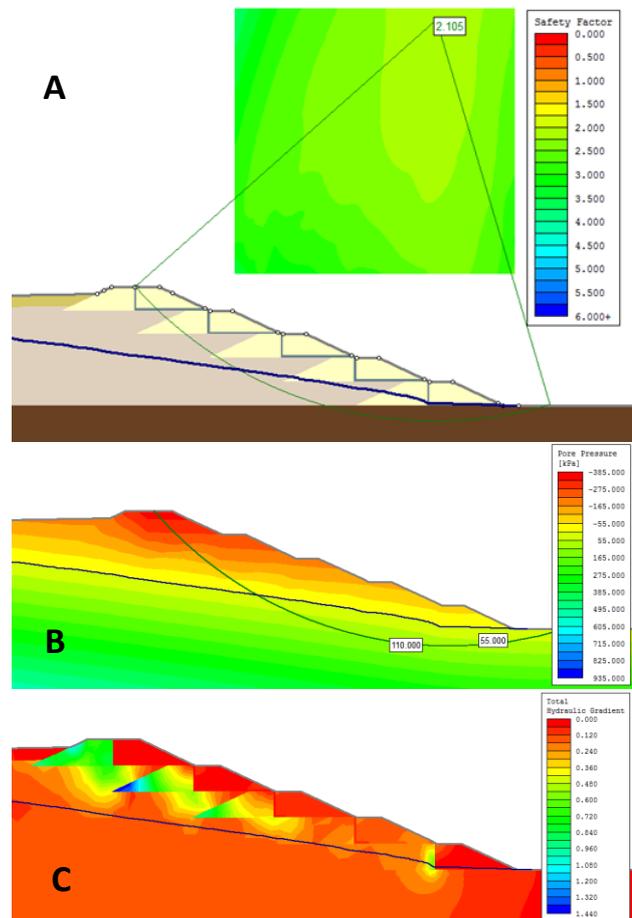


Figura 9 - (A) Superfície de ruptura na hipótese de alteamento adicional e linha d'água a 150 metros do barramento, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) gradiente hidráulico.

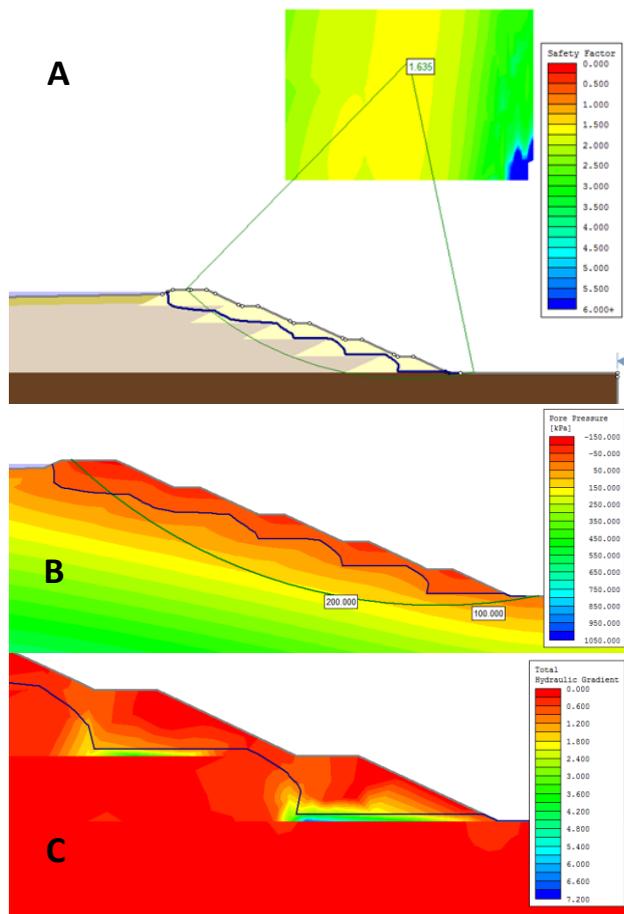


Figura 10 - (A) Superfície de ruptura na hipótese de colapso de sistema de drenagem interna e nível d'água acima do rejeito, (B) respectiva distribuição de poropressão e (C) acúmulos de gradiente hidráulico e fluxo interno d'água.

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.