

# **Avaliação da Barragem de Rejeitos, do Uso de Cianeto e do Consumo de Água no Projeto de Ouro Volta Grande Proposto, Pará, Norte do Brasil**

Steven H. Emerman, Ph.D., Malach Consulting, LLC, 785 N 200 W, Spanish Fork, Utah 84660, EUA,  
Tel: 1-801-921-1228, E-mail: SHEmerman@gmail.com

Relatório elaborado a pedido da Amazon Watch, apresentado em 1 de junho de 2020

## **RESUMO BREVE**

O Projeto de Ouro Volta Grande proposto inclui uma barragem de rejeitos ao longo das margens do rio Xingu, um importante afluente do rio Amazonas no Pará, norte do Brasil. A reciclagem do lixiviado de cianeto entre o reservatório de rejeitos e a planta de processamento de minério tem o potencial de enriquecer a água de rejeitos em antimônio, arsênico e mercúrio. A barragem não foi desenhada com nenhum critério de segurança sísmica e sem estudo de sismicidade local ou regional. No provável cenário de falha, o fluxo inicial de rejeitos cobriria 41 quilômetros com impacto significativo na terra indígena Arara de Volta Grande do Xingu.

## **RESUMO**

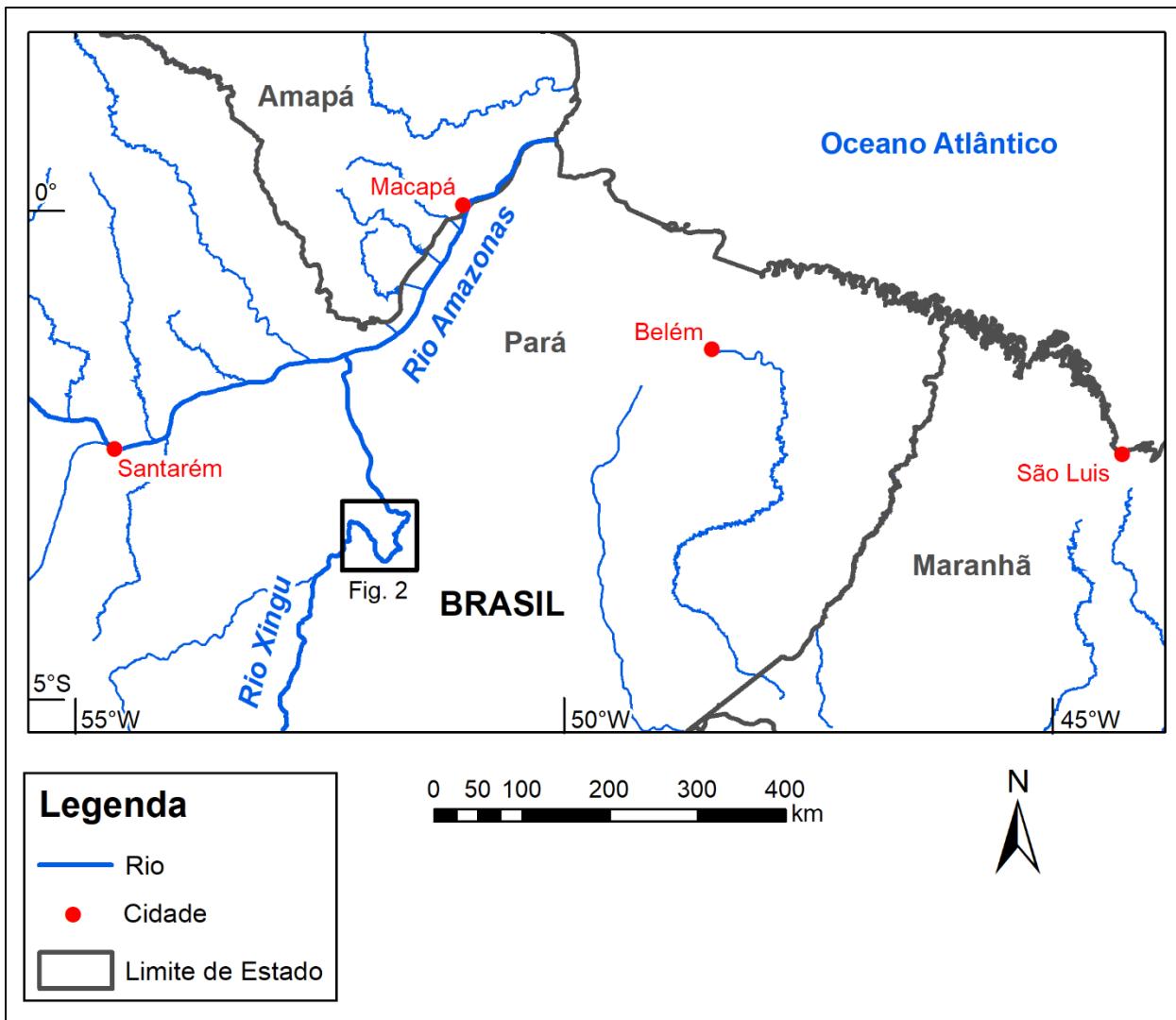
A empresa canadense Belo Sun Mining propôs o Projeto Ouro Volta Grande, que incluiria o armazenamento permanente de 35,43 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minas e água atrás de uma barragem de rejeitos de 44 metros de altura ao longo das margens do rio Xingu, um importante afluente de rio Amazonas no Pará, norte do Brasil. O consumo de água previsto é consistente com as tendências da mineração de ouro e teria pouco impacto na vazão do rio Xingu. A economia da água seria alcançada usando o reservatório de rejeitos para capturar o escoamento superficial, para que todos os rejeitos ficassem saturados e com sete metros de água livre acima da superfície dos rejeitos sólidos. A captura do escoamento superficial é contrária à tendência do setor de mineração de reduzir a água armazenada nos reservatórios de rejeitos, a fim de reduzir a probabilidade e as consequências da falha da barragem. A barragem não foi desenhada para nenhum critério de segurança sísmica, violando os regulamentos brasileiros das barragens de rejeitos. Não houve estudo da sismicidade local ou regional, embora falhas geológicas tenham sido mapeadas no local da barragem de rejeitos. O ouro seria extraído com cianeto e o lixiviado de cianeto seria exportado para o reservatório de rejeitos. Não haveria descarga a jusante do reservatório de rejeitos e a água livre seria reciclada para a planta de processamento de minério sem tratamento de água. Essa reciclagem de lixiviado de cianeto pode resultar em água de rejeitos altamente enriquecida em antimônio, arsênico e mercúrio. No provável cenário de falha de barragem (liberação de 28% dos rejeitos armazenados), o fluxo inicial de rejeitos cobriria 41 quilômetros ao longo do rio Xingu, com impacto significativo na terra indígena Arara de Volta Grande do Xingu. No pior cenário (liberação de 100% dos rejeitos armazenados), o fluxo inicial cobriria 98 quilômetros ao longo do rio Xingu. Após o evento inicial, processos fluviais normais transportariam os rejeitos para o rio Amazonas e o Oceano Atlântico. Não há planos para o fechamento seguro da barragem de rejeitos, exceto a drenagem da água livre para um lago de contenção de água. Embora algumas comunicações corporativas tenham indicado planos para buscar a tecnologia de rejeitos filtrados (reduzindo o teor de água para <25% antes do armazenamento), essa tecnologia ainda apresenta consideráveis desafios técnicos em áreas de alta precipitação.

## ÍNDICE

<b>RESUMO BREVE</b>	1
<b>RESUMO</b>	1
<b>VISÃO GERAL</b>	2
<b>REVISÃO DE REJEITOS E BARRAGENS DE REJEITOS</b>	6
<i>Barragens de Rejeitos e Barragens de Retenção de Água</i>	6
<i>Métodos de Construção de Barragens de Rejeitos</i>	8
<i>Causas de Falha de Barragens de Rejeitos</i>	10
<i>Redução do Teor de Água dos Rejeitos Armazenados</i>	13
<i>Terremotos de Desenho</i>	15
<b>REVISÃO DO USO DO CIANETO PARA BENEFICIAÇÃO DE MINÉRIO DE OURO</b>	17
<b>DESENHO DO PROJETO DE OURO VOLTA GRANDE</b>	18
<b>METODOLOGIA</b>	19
<b>RESULTADOS</b>	21
<i>Adequação da Previsão do Consumo de Água</i>	21
<i>Adequação da Redução do Teor de Água dos Rejeitos Armazenados</i>	24
<i>Adequação da Análise Sísmica e Desenho Sísmico</i>	27
<i>Adequação da Proteção Ambiental dos Efeitos do Cianeto</i>	29
<i>Adequação da Análise das Consequências da Falha da Barragem</i>	31
<i>Adequação do Plano de Fechamento Seguro da Barragem de Rejeitos</i>	32
<b>DISCUSSÃO</b>	33
<i>Probabilidade Anual de Falha da Barragem de Rejeitos</i>	33
<i>Desafios Técnicos de Rejeitos Filtrados</i>	35
<b>CONCLUSÕES</b>	37
<b>RECOMENDAÇÕES</b>	38
<b>RECONHECIMENTOS</b>	38
<b>SOBRE O AUTOR</b>	38
<b>REFERÊNCIAS</b>	38

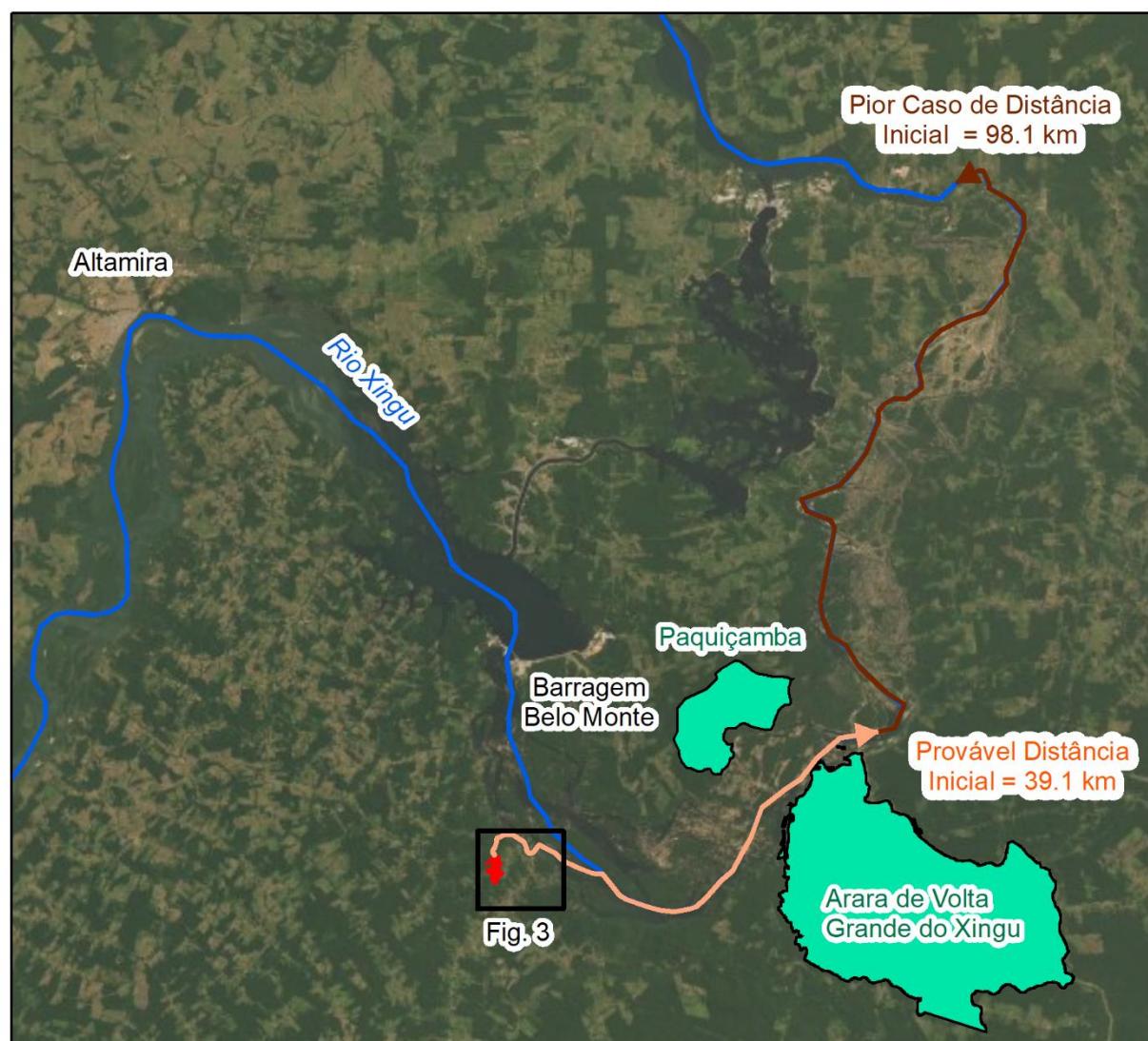
## VISÃO GERAL

A Belo Sun Mineração, subsidiária integral da empresa canadense Belo Sun Mining, propôs a construção do Projeto de Ouro Volta Grande ao longo das margens do rio Xingu, um importante afluente do rio Amazonas no estado do Pará, no norte do Brasil (ver Figs. 1-2). A mina de ouro proposta operaria por 12 anos e usaria cianeto para extrair ouro de 3,5 milhões de toneladas de minério por ano, com um grau médio de 1,47 gramas de ouro por tonelada de minério (Brandt Meio Ambiente, 2016a). A mina estaria localizada a cerca de 15 quilômetros ao sul da barragem Belo Monte (ver Fig. 2) que foi concluída em novembro de 2019 e que desvia 80% do fluxo do rio Xingu para geração de energia hidrelétrica (Higgins, 2020). O local para a mina proposta estaria localizado a cerca de 12 km a sudoeste e a cerca de 16 km a oeste das terras indígenas Paquiçamba e Arara de Volta Grande do Xingu, respectivamente (ver Fig. 2). O minério de ouro seria extraído de duas cavas, Grotas Seca e Ouro Verde (ver Fig. 3), cada qual com cerca de 220 metros de profundidade. A operação de mineração não levaria água diretamente do rio Xingu, mas capturaria água da precipitação, do escoamento superficial e dos afluentes do rio Xingu em dois lagos de contenção de água, Leste e Oeste, e no reservatório de rejeitos (ver Fig. 3; Brandt Meio Ambiente, 2016a).



**Figura 1.** A Belo Sun Mineração, subsidiária integral da empresa canadense Belo Sun Mining, propôs o Projeto de Ouro Volta Grande, no estado do Pará, no norte do Brasil. A mina de ouro estaria localizada às margens do rio Xingu, que é um dos importantes afluentes do rio Amazonas

Um aspecto ambiental principal de qualquer projeto de mineração é o meio de disposição dos resíduos da mina. Para o Projeto Volta Grande, a maior categoria de resíduo seria as estériles de mina, ou as rochas que devem ser removidas para atingir o corpo do minério. As estériles de mina da cava Grotinha Seca seriam armazenadas em uma pilha com 115 metros de altura e conteria 39,56 milhões de metros cúbicos de rocha ao final do projeto. As estériles de mina da cava Ouro Verde seriam armazenadas em uma pilha com 140 metros de altura e conteria 20,08 milhões de metros cúbicos de rocha ao final do projeto. Os rejeitos são as partículas de rocha trituradas que permanecem após a extração do ouro do minério. Os rejeitos seriam exportados para um reservatório de rejeitos que seria confinado por uma barragem de rejeitos de 44 metros de altura e que armazenaria 35,43 milhões de metros cúbicos de rejeitos e água ao final do projeto. O reservatório de rejeitos também armazenaria o lixiviado de cianeto gasto (solução de cianeto restante após a extração do ouro) após a destruição do cianeto (conversão do cianeto em compostos biologicamente inofensivos de carbono e nitrogênio) (Brandt Meio Ambiente, 2016a).



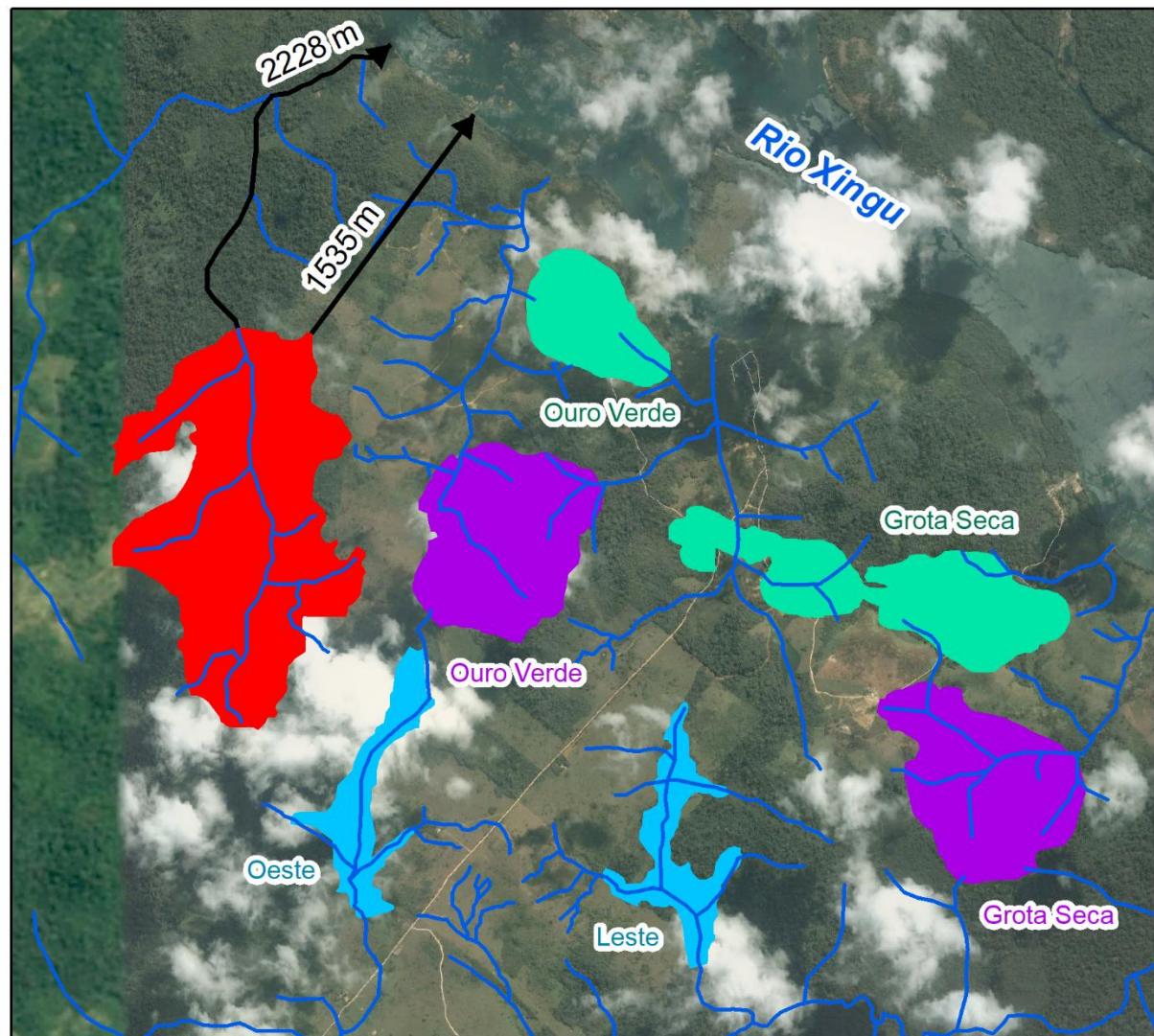
### Legenda

- █ Reservatório de Rejeitos
- Provável Inundação Inicial de Rejeitos
- Pior Caso de Inundação Inicial de Rejeitos
- Rio
- █ Terra Indígena

0 5 10 20 30 40 km



**Figura 2.** O Projeto de Ouro Volta Grande proposto seria localizado a 15 quilômetros ao sul da barragem Belo Monte, que foi concluída em novembro de 2019. Uma falha na barragem de rejeitos da mina de ouro resultaria em um fluxo inicial de inundação de rejeitos de 41,4 quilômetros no provável cenário, com impacto significativo na terra indígena Arara de Volta Grande do Xingu. No pior cenário, o fluxo inicial seria de 98,1 quilômetros ao longo do rio Xingu. Após o fluxo inicial, processos fluviais normais transportariam os rejeitos para o rio Amazonas e o Oceano Atlântico (ver Fig. 1). Cenários prováveis e piores, com base em Larrauri e Lall (2018).



### Legenda

- |                                    |                              |                                      |                   |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| <span style="color:red">■</span>   | Reservatório de Rejeitos     | <span style="color:green">■</span>   | Cava              |
| <span style="color:black">→</span> | Via de Inundação de Rejeitos | <span style="color:magenta">■</span> | Pilha de Estéril  |
| <span style="color:blue">—</span>  | Córregos                     | <span style="color:blue">■</span>    | Lago de Contenção |

0      0.5      1      1.5      2  
km



**Figura 3.** A infraestrutura do Projeto Volta Grande incluiria duas cavas, dois lagos de contenção de água, duas pilhas de estériles e um reservatório de rejeitos. Embora o reservatório de rejeitos esteja a 1535 metros do rio Xingu, uma falha na barragem de rejeitos provavelmente resultaria no deslocamento de rejeitos ao longo de um canal de 2228 metros até o rio Xingu. Com base na velocidade mínima observada de inundação de rejeitos de 20 quilômetros por hora, os rejeitos alcançariam o rio Xingu em menos de 7 minutos. Em contrapartida, Brandt Meio Ambiente (2016a) estimou que a inundação de rejeitos chegaria ao rio Xingu em 97 minutos (correspondendo a uma velocidade de inundação de rejeitos de 1,41 quilômetros por hora). Infraestrutura de minas e córregos traçados a partir de Brandt Meio Ambiente (2016a, 2016c).

O objetivo deste relatório é abordar a seguinte pergunta: O Estudo de Impacto Ambiental e os documentos técnicos relacionados ao Projeto de Ouro Volta Grande fornecem proteção adequada para as pessoas e o meio ambiente? Esta pergunta pode ser subdividida em três perguntas:

- 1) O consumo de água do Projeto Volta Grande teria um impacto significativo na vazão do rio Xingu?
- 2) A proposta inclui salvaguardas suficientes para evitar impactos ambientais negativos do uso de cianeto?
- 3) Qual seria o risco de falha da barragem de rejeitos?

Em termos da última pergunta, o risco de falha é entendido como a combinação (ou como o produto) da probabilidade de falha e das consequências de falha. Antes de discutir a metodologia para abordar essas perguntas, primeiro revisarei os assuntos de rejeitos de minas, barragens de rejeitos e o uso de cianeto na extração de ouro. À luz dessas análises, revisarei mais detalhes do Projeto Volta Grande.

## **REVISÃO DE REJEITOS E BARRAGENS DE REJEITOS**

### ***Barragens de Rejeitos e Barragens de Retenção de Água***

Embora barragens de rejeitos e barragens de retenção de água sejam construídas com a finalidade de restringir o fluxo de material, elas são tipos fundamentalmente diferentes de estruturas de engenharia civil. Esse ponto importante foi enfatizado no livro-padrão sobre barragens de rejeitos de Vick (1990), “*A recurring theme throughout the book is that there are significant differences between tailings embankment and water-retention dams... Unlike dams constructed by government agencies for water-retention purposes, tailings dams are subject to rigid economic constraints defined in the context of the mining project as a whole. While water-retention dams produce economic benefits that presumably outweigh their cost, tailings dams are economic liabilities to the mining operation from start to finish. As a result, it is not often economically feasible to go to the lengths sometimes taken to obtain fill for conventional water dams*

completamente desde o início, antes que seu reservatório seja preenchido com água, enquanto uma barragem de rejeitos é construída em estágios, à medida que mais rejeitos são produzidos que requerem armazenamento e à medida que material da operação de mineração (como estériles de mina) fica disponível para construção. Finalmente, no final de sua vida útil, ou quando não é mais possível inspecionar e manter a barragem, uma barragem de retenção de água é completamente desmontada. Por outro lado, espera-se que uma barragem de rejeitos confine os rejeitos tóxicos em perpetuidade, embora normalmente a inspeção e manutenção da barragem parem após o término do projeto de mineração.

As consequências das muitas diferentes construções de barragens de rejeitos e barragens de retenção de água são os registros de segurança muito diferentes dos dois tipos de estruturas. De acordo com um artigo amplamente citado por Davies (2002), “*It can be concluded that for the past 30 years, there have been approximately 2 to 5 ‘major’ tailings dam failure incidents per year... If one assumes a worldwide inventory of 3500 tailings dams, then 2 to 5 failures per year equates to an annual probability somewhere between 1 in 700 to 1 in 1750. This rate of failure does not offer a favorable comparison with the less than 1 in 10,000 that appears representative for conventional dams. The comparison is even more unfavorable if less ‘spectacular’ tailings dam failures are considered. Furthermore, these failure statistics are for physical failures alone. Tailings impoundments can have environmental ‘failure’ while maintaining sufficient structural integrity (e.g. impacts to surface and ground waters)*” [Pode-se concluir que, nos últimos 30 anos, ocorreram aproximadamente 2 a 5 ‘grandes’ incidentes de falha de barragens de rejeitos por ano... Se se assume um inventário mundial de 3500 barragens de rejeitos, então 2 a 5 falhas por ano equivalem a uma probabilidade anual entre 1 em 700 e 1 em 1750. Essa taxa de falha não oferece uma comparação favorável com menos de 1 em 10.000 que parece representativo para barragens convencionais. A comparação é ainda mais desfavorável se forem consideradas falhas menos ‘espetaculares’ nas barragens de rejeitos. Além disso, essas estatísticas de falha são apenas para falhas físicas. Os represamentos de rejeitos podem ter uma ‘falha’ ambiental, mantendo uma integridade estrutural suficiente (por exemplo, impactos nas águas superficiais e subterrâneas). Tanto o número total de barragens de rejeitos quanto o número de falhas de barragens de rejeitos citados por Davies (2002) são provavelmente muito baixos. No entanto, Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel [Painel de Revisão e Investigação Engenharia de Peritos Independentes] (2015) encontraram uma taxa de falha semelhante em barragens de rejeitos de 1 em 600 por ano durante o período 1969-2015 na Colúmbia Britânica.

É mais relevante que o Brasil tenha experimentado 15 falhas de barragens de rejeitos de 1986 a 2019 (ver Tabela 1; Fig. 4). Com base em 769 barragens de rejeitos no Brasil em fevereiro de 2019 (Agência Nacional de Mineração, 2019a), a taxa anual de falhas foi de 0,06%. A taxa de falha calculada deve ser subestimada, porque nem todas as barragens de rejeitos atuais existem desde 1986. A taxa anual de falhas de barragens de rejeitos no Brasil é comparável à taxa anual global de falhas de 0,06-0,14% (Davies, 2002) e à taxa anual de falhas na Colúmbia Britânica de 0,17% (Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel, 2015), mas é significativamente maior que a taxa anual global de falhas de 0,01% para barragens de retenção de água (Davies, 2002). É alarmante que o registro de segurança das barragens de rejeitos no Brasil não esteja melhorando, mas piorando. De fato, a taxa de falha de barragens de rejeitos no Brasil tem aumentado exponencialmente, com três falhas ocorrendo apenas em 2019 (ver Tabela 1 e Fig. 4).

**Tabela 1. Falhas em barragens de rejeitos no Brasil, 1986-2019**

Ano	Companhia de Mineração	Município, Estado
2019 <sup>1</sup>	VM Mineração e Construção	Nossa Senhora do Livramento, Mato Grosso
2019 <sup>1</sup>	Metalmig Mineração Indústria	Machadinho d'Oeste, Rodônia
2019 <sup>1</sup>	Vale SA	Brumadinho, Minas Gerais
2018 <sup>1</sup>	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA	Bacarena, Pará
2015 <sup>1</sup>	Samarco Mineração SA	Mariana, Minas Gerais
2014 <sup>1</sup>	Herculano Mineração	Itabirito, Minas Gerais
2012 <sup>2</sup>	AngloGold Ashanti	Crixás, Goiá
2009 <sup>1</sup>	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA	Bacarena, Pará
2007 <sup>1</sup>	Mineração Rio Pomba Cataguases	Miraí, Minas Gerais
2006 <sup>2</sup>	Mineração Rio Pomba Cataguases	Miraí, Minas Gerais
2003 <sup>2</sup>	Mineração Rio Pomba Cataguases	Miraí, Minas Gerais
2001 <sup>1</sup>	Mineração Rio Verde	Nova Lima, Minas Gerais
1994 <sup>3</sup>	AngloGold Ashanti	Crixás, Goiá
1986 <sup>1</sup>	Itaminos Comercio de Minérios	Itabirito, Minas Gerais
1986 <sup>3</sup>	Pico de São Luis	Rio Acima, Minas Gerais

<sup>1</sup>WISE Uranium Project (2020)

<sup>2</sup>World Mine Tailings Failures (2019)

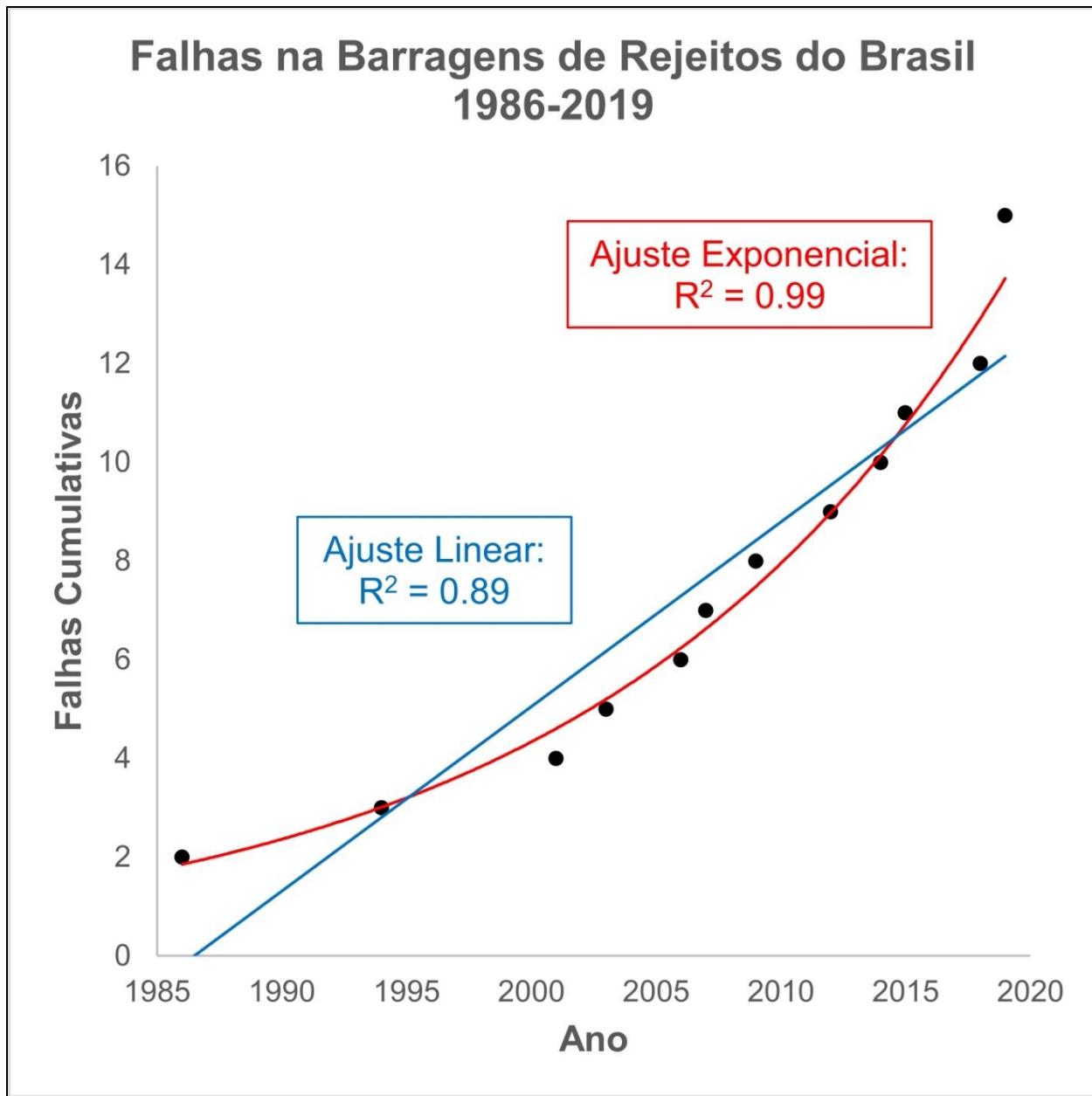
<sup>3</sup>ICOLD e UNEP (2001)

### ***Métodos de Construção de Barragens de Rejeitos***

Todos os métodos de construção de barragens de rejeitos são meios de tirar proveito das propriedades físicas muito diferentes dos dois tamanhos de rejeitos, que são as areias (maiores que 0,075 mm) e os limos (menores que 0,075 mm). Esses dois tamanhos são separados por gravidade nas instalações de gerenciamento de rejeitos. Normalmente, uma mistura de rejeitos e água é descarregada na lagoa de rejeitos da crista da barragem através de torneiras que se conectam a um tubo que sai da planta de processamento de minério (ver Fig. 5). As areias maiores se assentam mais perto da barragem para formar uma praia. Os limos menores e a água viajam mais longe da barragem para formar uma lagoa de decantação, onde os limos lentamente se assentam da suspensão. Deve-se notar que a praia é essencial para impedir que a lagoa atinja a crista da barragem.

Cada um dos três métodos comuns de construção de barragens de rejeitos (a montante, a jusante e a linha de centro) começa com um dique inicial, construído a partir de solo natural, preenchimento de rocha, estériles de mina ou rejeitos de um episódio anterior de processamento de minério (ver Figs. 6a-c). No método de construção a montante, diques sucessivos são construídos na direção a montante, à medida que o nível de rejeitos armazenados aumenta. Como mencionado anteriormente, é mais comum construir diques sucessivos a partir de estériles de mina ou da fração mais grossa de rejeitos (com compactação apropriada). A vantagem do método é seu baixo custo, porque é necessário muito pouco material para a construção da barragem (ver Fig. 6a). O método de construção a jusante é o mais caro, pois requer o mais material de construção (comparar Figs. 6a e 6b). Neste método, diques sucessivos são construídos na direção a jusante, à medida que o nível de rejeitos armazenados aumenta. O método de construção da linha de centro é um equilíbrio entre as vantagens e desvantagens dos métodos de construção a jusante e a montante (comparar Figs. 6a-c). Neste método, diques sucessivos são construídos colocando material de construção na praia e na encosta a jusante do

dique anterior. As linhas de centro dos alteamentos coincidem à medida que a barragem é construída para cima (ver Fig. 6c). As vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de construção em termos de sua capacidade de resistir a falhas catastróficas serão discutidas após a revisão das causas comuns de falha de barragens de rejeitos.



**Figura 4.** O Brasil sofreu 15 falhas em barragens de rejeitos de 1986 a 2019 (ver Tabela 1). Com base em 769 barragens de rejeitos no Brasil em fevereiro de 2019 (Agência Nacional de Mineração, 2019a), a taxa anual de falhas foi de 0,06%. A taxa de falha calculada deve ser uma subestimação, porque nem todas as barragens de rejeitos atuais existem desde 1986. A taxa anual de falhas de barragens de rejeitos no Brasil é comparável à taxa anual global de falhas de 0,06-0,14% (Davies, 2002) e à taxa anual de falhas na Colúmbia Britânica de 0,17% (Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel, 2015), mas é significativamente maior que a taxa anual global de falhas de 0,01% para barragens de retenção de água (Davies, 2002). A taxa de falha de barragens de rejeitos no Brasil tem aumentado exponencialmente, com três falhas ocorrendo apenas em 2019 (ver Tabela 1).



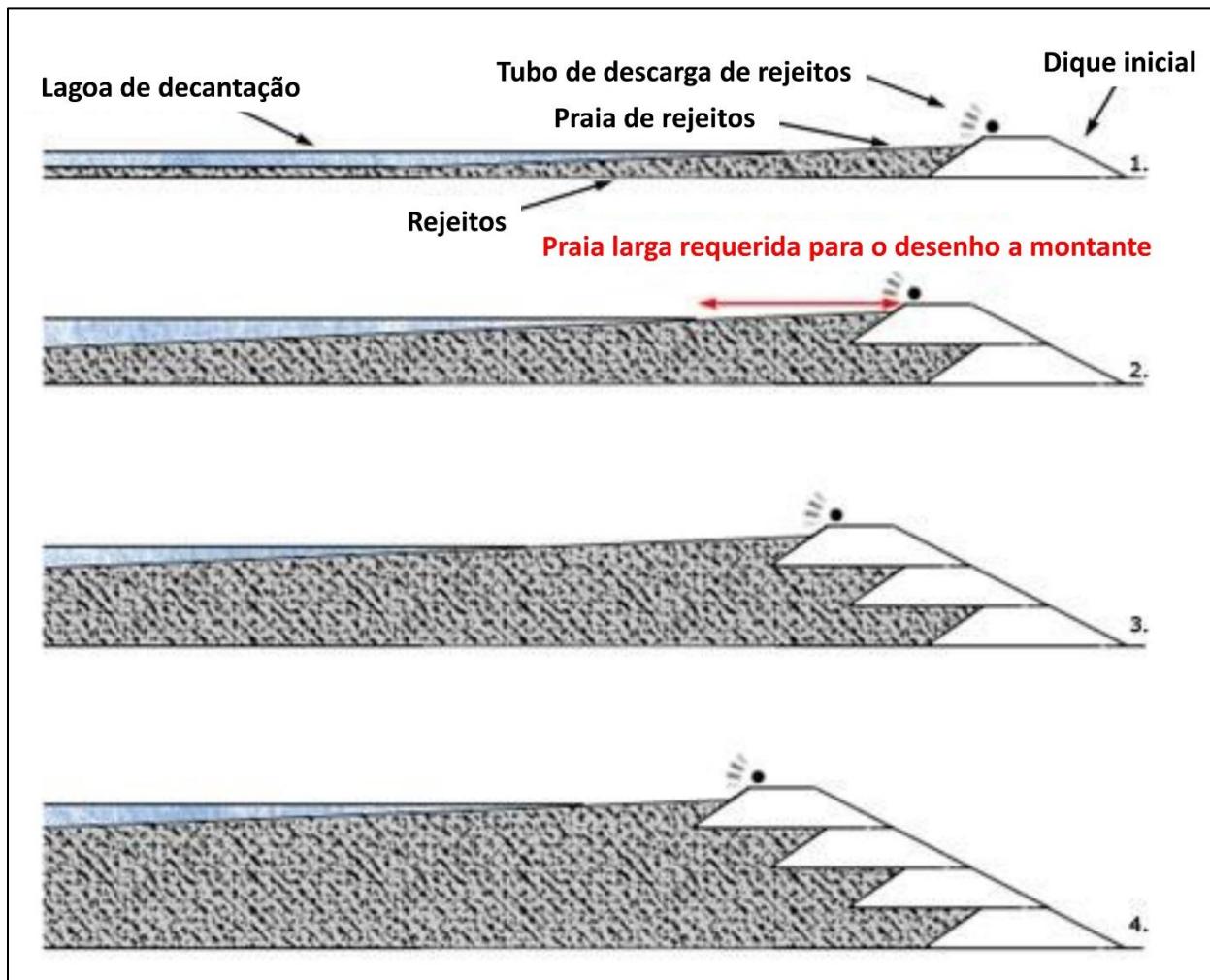
**Figura 5.** Na instalação de armazenamento de rejeitos da mina Highland Valley Copper, na Colúmbia Britânica, os rejeitos úmidos são descarregados na direção a montante de um tubo e torneiras ao longo da crista da barragem. Partículas maiores (areias) são depositadas perto da barragem para formar uma praia. Partículas menores (limos) são transportadas para mais longe da barragem para formar uma lagoa de decantação. A precipitação de cobre no reservatório de rejeitos indica a extração incompleta de cobre do minério. Foto tirada pelo autor em 27 de setembro de 2018.

### *Causas de Falha de Barragens de Rejeitos*

As causas mais comuns de falhas nas barragens de rejeitos são as inundações, a erosão interna, a falha de fundação, a liquefação sísmica e a liquefação estática. Qualquer fluxo de água sobre uma barragem de terra tende a erodir o aterro externo, resultando em uma brecha do aterro ou em seu desaparecimento total. Em termos de barragens de rejeitos, isso enfatiza a importância de manter uma praia adequada para manter a água afastada da barragem e manter o nível da água abaixo do nível da crista da barragem. Por exemplo, no caso da barragem de rejeitos na mina Highland Valley Copper (ver Fig. 5), a praia estreita (especialmente no lado mais distante da foto, onde a praia é quase inexistente) torna a barragem suscetível a falhas por inundações. Essa praia estreita é resultado de uma escassez de areias na descarga de rejeitos.

A erosão interna ocorre quando a infiltração através de uma barragem de terra lava as partículas sólidas da barragem, de modo que a barragem perde sua integridade estrutural. O aparecimento de lama na infiltração através da face de uma barragem é geralmente considerado como o início da erosão interna. A erosão interna é causada por um gradiente hidráulico

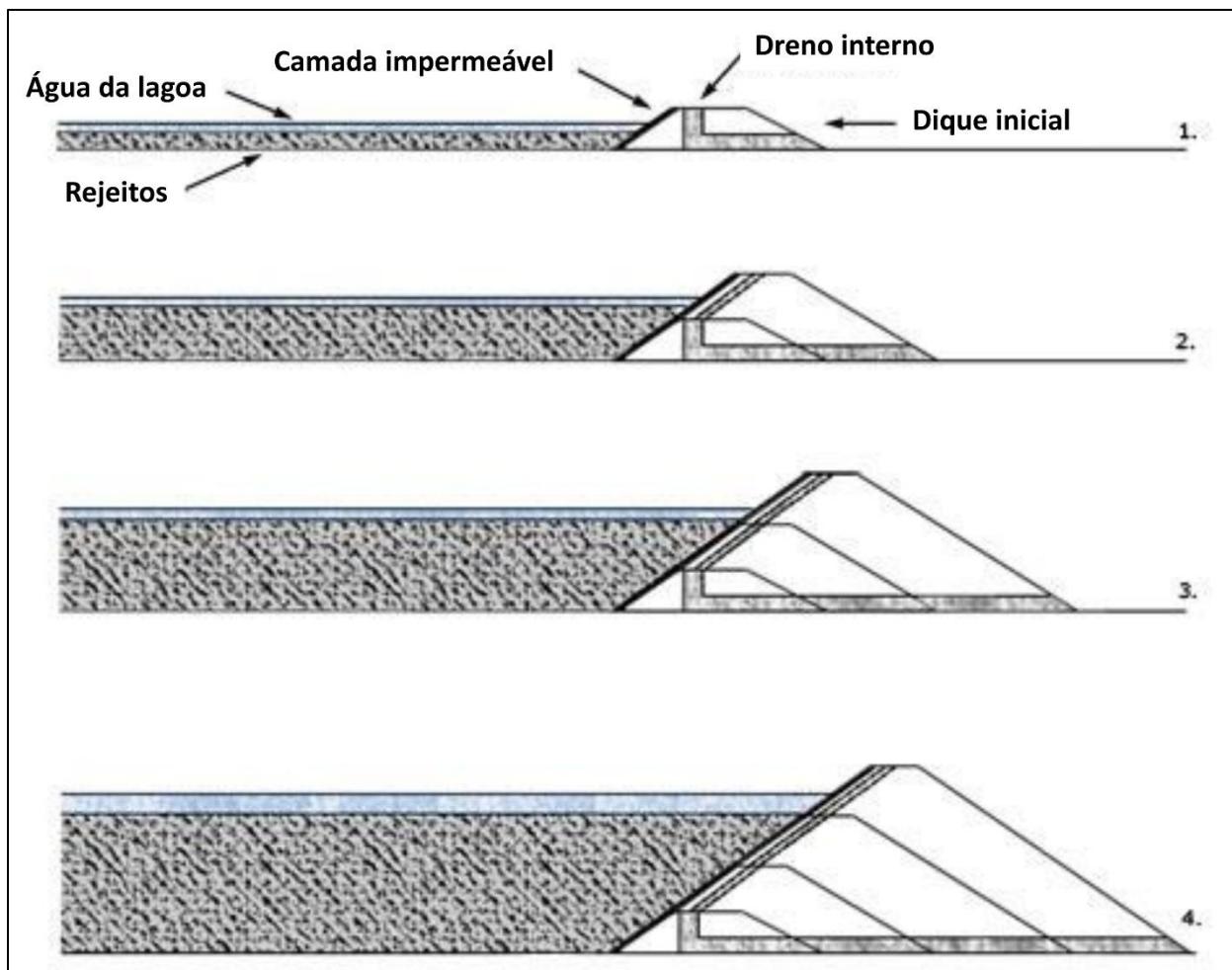
excessivo que força a água a fluir através da barragem com rapidez suficiente para transportar partículas sólidas. A erosão interna é evitada pela redução do teor de água dos rejeitos, pelo alongamento dos trajetos do fluxo hidráulico (por exemplo, pela diminuição das inclinações dos aterros) e forçando a água a sair na base das barragens e não ao longo da face (por exemplo, por instalação de drenos apropriados). A instalação de filtros é geralmente considerada essencial para prender quaisquer partículas sólidas que seriam desalojadas pelo fluxo de água através da barragem.



**Figura 6a.** No método de construção a montante, diques sucessivos são construídos na direção a montante, à medida que o nível de rejeitos armazenados aumenta. Os diques podem ser construídos com estériles de mina, solo natural, preenchimento de rocha natural ou a fração mais grossa de rejeitos (com compactação adequada). A vantagem do método é seu baixo custo, porque é necessário muito pouco material para a construção da barragem. A desvantagem é que a barragem é suscetível a falhas devido à liquefação sísmica ou estática porque os rejeitos úmidos não compactados estão abaixo da barragem. Por esse motivo, o método de construção a montante é ilegal no Brasil, Chile, Equador e Peru. As barragens construídas por esse método também são suscetíveis a falhas de inundação quando a praia é muito estreita devido a uma quantidade insuficiente de areia nos rejeitos descarregados ou água em excesso na lagoa de decantação. Figura do TailPro Consulting (2020) com sobreposição de etiquetas portuguesas.

A liquefação é o fenômeno em que um meio poroso (geralmente areias) perde toda a força e se comporta como se fosse um líquido. No lado esquerdo da Fig. 7, embora as partículas

sólidas estejam fracamente empacotadas e os poros estejam saturados, as partículas se tocam, de modo que a carga é suportada pelas partículas (e parcialmente pela água). No lado direito da Fig. 7, após um aumento na carga ou uma perturbação (como um terremoto), os sólidos poderiam se consolidar repentinamente para um estado mais densamente empacotado. Se a água não puder escapar (devido à baixa permeabilidade ou à velocidade da perturbação), a água é comprimida e a pressão da água aumenta, de modo que as partículas não se tocam mais. Nesse caso, a água suporta toda a carga, de modo que a massa de partículas e água se comporta como um líquido. Esse fenômeno de liquefação é promovido por poros saturados e partículas fracamente empacotadas.



**Figura 6b.** No método de construção a jusante, diques sucessivos são construídos na direção a jusante, à medida que o nível de rejeitos armazenados aumenta. Os diques podem ser construídos com estériles de mina, solo natural, preenchimento de rocha natural ou a fração mais grossa de rejeitos (com compactação adequada). A resistência à liquefação sísmica e estática é alta porque não há rejeitos não compactados abaixo da barragem. A desvantagem do método é seu alto custo devido à quantidade de material necessário para construir os diques (comparar os volumes dos diques nas Figs. 6a e 6b). Figura do TailPro Consulting (2020) com sobreposição de etiquetas portuguesas.

Geralmente, é feita uma distinção entre liquefação sísmica e liquefação estática. Durante a atividade sísmica, as tensões cíclicas podem induzir uma consolidação repentina dos rejeitos. A liquefação devido a todos os outros gatilhos possíveis é chamada de liquefação estática. Esses gatilhos podem incluir um aumento na carga de rejeitos (especialmente quando os rejeitos são

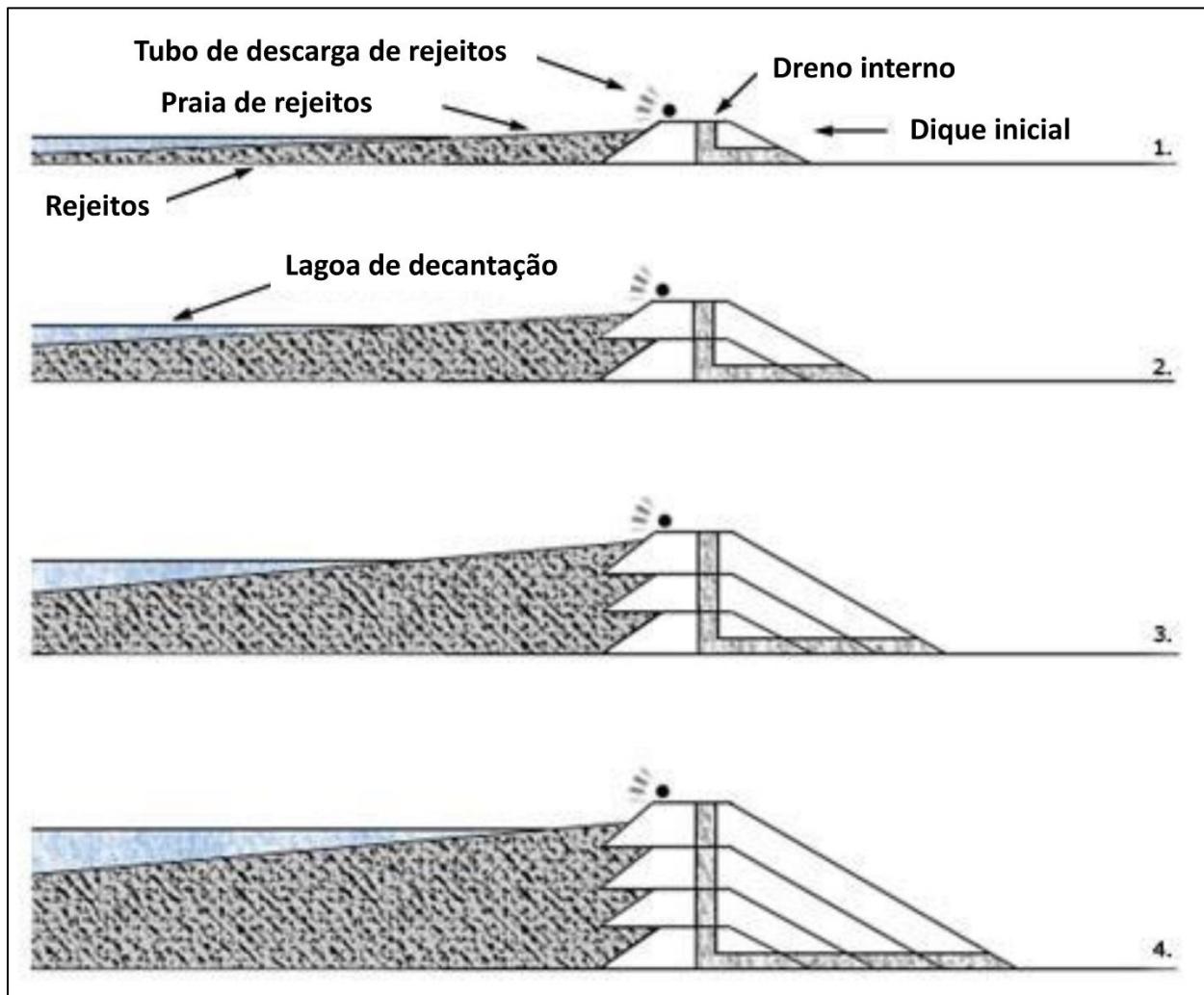
adicionados tão rapidamente que os rejeitos subjacentes não têm tempo para se consolidar), fortes chuvas ou distúrbios de tipo sísmico, como explosões. Os depósitos de rejeitos são especialmente suscetíveis à liquefação porque os rejeitos são muito fracamente empacotados devido à descarga hidráulica no reservatório sem compactação (ver Fig. 5). A chave para evitar a liquefação é manter o lençol freático (o limite que separa os suprajacentes poros insaturados e os subjacentes poros saturados com água) dentro do reservatório de rejeitos o mais baixo possível. Mesmo com um lençol freático baixo, ainda é importante manter o teor de água baixo na região acima do lençol freático, porque a liquefação ainda pode ocorrer mesmo que os poros estejam apenas 80% saturados antes da consolidação repentina. Falha na fundação (a terra sob a instalação de gerenciamento de rejeitos ou sob a própria barragem) geralmente também é um tipo de liquefação estática. A falha da fundação pode ocorrer quando o carregamento excessivo ou a água em excesso na massa de rejeitos força a água numa fundação que tem permeabilidade insuficiente para que a água passe através da fundação.

Os métodos comuns de construção de barragens de rejeitos agora podem ser analisados em termos de vulnerabilidade às causas comuns de falhas em barragens de rejeitos. Não surpreende que os métodos de construção mais caros também sejam menos vulneráveis a falhas. As barragens de rejeitos construídas usando o método a montante são especialmente vulneráveis a falhas por liquefação sísmica ou liquefação estática, porque a barragem é construída sobre os rejeitos não compactados (ver Fig. 6a). Assim, mesmo que a barragem mantenha temporariamente sua integridade estrutural enquanto os rejeitos subjacentes se liquefazem, a barragem pode falhar ao cair nos ou deslizar sobre os rejeitos liquefeitos. Por esse motivo, o método de construção a montante é ilegal no Chile (Ministerio de Minería [Ministério de Mineração], 2007), Equador (Valencia, 2019) e Peru (Sistema Nacional de Información Ambiental [Sistema Nacional de Informação Ambiental], 2014) devido a seu alto potencial para fortes terremotos. O método de construção a montante é mesmo proibido no Brasil (Agência Nacional de Mineração, 2019b; Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2019) e efetivamente proibido na província de Ontário, Canadá (MacDonald et al., 2019), onde o potencial para grandes terremotos é muito menor. As barragens construídas usando o método da linha de centro mantêm alguma vulnerabilidade a falhas durante a liquefação, porque ainda existem alguns rejeitos não compactados embaixo dos diques (ver Fig. 6c). Por outro lado, uma barragem de rejeitos construída usando o método a jusante poderia sobreviver à liquefação completa dos rejeitos armazenados atrás da barragem (ver Fig. 6b). Obviamente, ainda são necessários desenho e construção adequados para impedir a liquefação da própria barragem, mesmo quando o método a jusante é usado.

### ***Redução do Teor de Água dos Rejeitos Armazenados***

Nesse ponto, deve ficar claro que, além de evitar o método de construção a montante, a chave para reduzir a probabilidade de falha da barragem de rejeitos por qualquer modo de falha comum (inundações, erosão interna, falha de fundação, liquefação sísmica ou estática) está baixando o lençol freático dentro do depósito de rejeitos e da barragem de rejeitos e reduzindo o teor de água dos rejeitos. Baixar o lençol freático e reduzir o teor de água dos rejeitos e da barragem de rejeitos também pode reduzir as consequências da falha, porque é mais provável que os rejeitos insaturados deslizam, em vez de evoluir para um fluxo liquefeito. O lençol freático pode ser baixado com camadas impermeáveis apropriadas e sistemas de drenagem

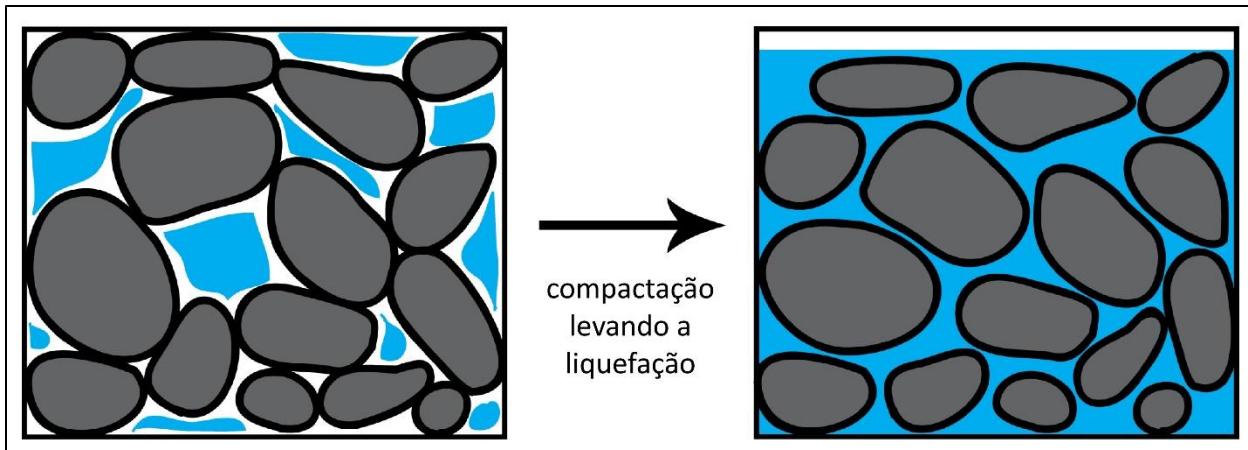
interna (ver Figs. 6b-c). No entanto, é mais importante abordar a causa raiz do excesso de água, que é a exportação excessiva de água para a instalação de gerenciamento de rejeitos.



**Figura 6c.** No método de construção da linha de centro, diques sucessivos são construídos colocando material de construção na praia e na encosta a jusante do dique anterior. As linhas de centro das elevações coincidem à medida que a barragem é construída para cima. Os diques podem ser construídos com estériles de mina, solo natural, preenchimento de rocha natural ou a fração mais grossa de rejeitos (com compactação adequada). O método da linha de centro é intermediário entre os métodos a montante e a jusante (ver Figs. 6a-b) em termos de custo e risco de falha. A resistência à liquefação sísmica e estática é moderada, porque ainda existem alguns rejeitos não compactados abaixo dos diques. Ainda é necessário manter uma praia adequada para evitar inundações na barragem. Figura do TailPro Consulting (2020) com sobreposição de etiquetas portuguesas.

No gerenciamento de rejeitos convencional, toda a água que é misturada com o minério triturado na planta de processamento de minério é enviada para o reservatório de rejeitos, de modo que a mistura de água e rejeitos tem um teor de sólidos na faixa de 20 a 40% em peso, ou às vezes até 60%. Uma tecnologia mais segura é converter os rejeitos numa polpa espessa de alta densidade ou numa pasta, com um teor de sólidos de 60 a 75% em peso, antes do envio para a lagoa de rejeitos. A tecnologia mais segura atualmente é filtrar os rejeitos para um teor de sólidos superior a 80%, para que os rejeitos se comportem como um solo úmido, em oposição a uma polpa ou uma pasta (Klohn Crippen Berger, 2017). A vantagem adicional da filtragem é que é

possível compactar os rejeitos antes do armazenamento, o que reduz ainda mais a probabilidade de liquefação (ver Fig. 7). Atualmente, a tecnologia de rejeitos filtrados deve ser considerada a Melhor Tecnologia Disponível (MTD) (Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel, 2015).



**Figura 7.** No diagrama à esquerda, embora as partículas sólidas estejam fracamente empacotadas e os poros estejam saturados, as partículas se tocam, de modo que a carga é suportada pelas partículas (e parcialmente pela água). No diagrama à direita, após um aumento na carga ou uma perturbação (como um terremoto), os sólidos se consolidam para um estado mais densamente empacotado. Se a água não puder escapar (devido à baixa permeabilidade ou à velocidade da perturbação), a água é comprimida e a pressão da água aumenta, de modo que as partículas não se tocam mais. Nesse caso, a água suporta toda a carga, de modo que a massa de partículas e água se comporta como um líquido. Esse fenômeno de liquefação é promovido por poros saturados e partículas fracamente empacotadas. Os depósitos de rejeitos são especialmente suscetíveis à liquefação porque os rejeitos são muito fracamente empacotados devido à descarga hidráulica no reservatório sem compactação (ver Fig. 5). Figura do DoITPoMS (2019) com sobreposição de etiquetas portuguesas.

### ***Terremotos de Desenho***

Qualquer barragem de rejeitos deve ser desenhada para resistir a uma inundação particular e a um terremoto particular, chamados da inundação de desenho e do terremoto de desenho. Sem o conhecimento da inundação de desenho e do terremoto de desenho, não há base para determinar a largura mínima da praia de rejeitos, a inclinação máxima do aterro externo ou qualquer outro aspecto de uma instalação de gerenciamento de rejeitos. O terremoto de desenho é realmente uma aceleração sísmica de desenho, que depende da magnitude do terremoto de desenho, da distância da falha na qual se espera que o terremoto ocorra e da natureza do material sob a barragem. Normalmente, a inundação de desenho e o terremoto de desenho dependem do potencial de perigo ou das consequências da falha. Nesta subseção, serão consideradas três diretrizes amplamente reconhecidas para determinar terremotos de desenho, que são as diretrizes da (U.S.) Federal Emergency Management Agency [(EUA) Agência Federal de Gerenciamento de Emergências] (FEMA, 2005, 2013), U.S. Army Corps of Engineers [Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA] (USACE, 2016) e Canadian Dam Association [Associação Canadense de Barragens] (2013). Por fim, serão consideradas os regulamentos vigentes no Brasil. Esta subseção enfatizará os terremotos de desenho em oposição às inundações de desenho, como os mais relevantes para uma avaliação do Projeto Volta Grande.

A Federal Emergency Management Agency classifica as barragens em três categorias, de acordo com o potencial de perigo (FEMA, 2013). Potencial de alto perigo significa “probable

*loss of life due to dam failure or misoperation*” [provável perda de vida devido à falha ou operação incorreta da barragem]. É esclarecido que “*probable loss of life*” [provável perda de vida] se refere a “*one or more expected fatalities*” [uma ou mais fatalidades esperadas] e que “*economic loss, environmental damage or disruption of lifeline facilities may also be probable but are not necessary for this classification*” [perda econômica, dano ambiental ou interrupção das instalações de salvamento de vida também podem ser prováveis, mas não são necessárias para esta classificação]. Potencial de baixo perigo significa “*no probable loss of human life and low economic and/or environmental losses due to dam failure or misoperation*” [nenhuma provável perda de vida humana e baixas perdas econômicas e/ou ambientais devido à falha ou operação incorreta da barragem].

Cada um dos potenciais de perigo corresponde a um terremoto de desenho. De acordo com a Federal Emergency Management Agency, o Terremoto Máximo Credível (TMC), é “*the largest earthquake magnitude that could occur along a recognized fault or within a particular seismotectonic province or source area under the current tectonic framework*” [a maior magnitude de terremoto que poderia ocorrer ao longo de uma falha reconhecida ou dentro de uma província sismotectônica ou área de origem específica sob a atual estrutura tectônica] (FEMA, 2005). Além disso, para barragens com Potencial de alto perigo, “*the MDE [Maximum Design Earthquake] usually is equated with the controlling MCE [Maximum Credible Earthquake]*” [o TDM [Terremoto de desenho máximo] geralmente é igualado ao TMC controlador]. No entanto, “*where the failure of the dam presents no hazard to life, a lesser earthquake may be justified, provided there are cost benefits and the risk of property damage is acceptable*” [onde a falha da barragem não apresenta perigos à vida, um terremoto menor pode ser justificado, desde que haja benefícios de custo e o risco de danos à propriedade seja aceitável] (FEMA, 2005). Linguagem semelhante é usada pelo U.S. Army Corps of Engineers ao afirmar “*for critical features, the MDE is the same as the MCE*” [para recursos críticos, o TDM é o mesmo que o TMC] (USACE, 2016) e enfatizou que “*there is no return period for the MCE*” [não há período de retorno para o TMC] (USACE, 2016), o que significa que o TMC não tem probabilidade anual de ocorrência especificada. Por outro lado, no contexto da discussão de critérios para determinar o TMC em um local específico, FEMA (2005) afirma, “*For high-hazard potential dams, movement of faults within the range of 35,000 to 100,000 years BP is considered recent enough to warrant an ‘active’ or ‘capable’ classification*” [Para barragens com potencial de alto perigo, o movimento de falhas no intervalo de 35.000 a 100.000 anos AP [antes do presente] é considerado suficientemente recente para justificar uma classificação ‘ativa’ ou ‘capaz’]. Em outras palavras, o TMC pode ser tão raro quanto um terremoto de 100.000 anos, com uma probabilidade anual de excedência correspondente de 0,001%. FEMA (2005) continua, “*However, for low or significant-hazard dams, the MDE may be determined based on faults active in Holocene time*” [No entanto, para barragens de baixo ou significativo perigo, o TDM pode ser determinado com base em falhas ativas no tempo do Holoceno]. Como a época do Holoceno durou nominalmente nos últimos 10.000 anos, o terremoto de desenho para uma barragem com potencial de baixo ou significativo perigo seria equivalente a um terremoto de 10.000 anos (probabilidade anual de excedência de 0,01%).

As diretrizes da Canadian Dam Association (2013) incluem cinco classes de barragens, classificadas de acordo com as consequências da falha. O perigo para qualquer população permanente coloca uma barragem nas três categorias de maior consequência, nas quais as categorias de alta consequência, muito alta consequência e extrema consequência, correspondem a mortes esperadas de dez ou menos, 100 ou menos e mais de 100, respectivamente. As diretrizes

consideram os critérios de desenho de terremoto com base em uma abordagem informada sobre riscos e uma abordagem tradicional baseada em padrões. De acordo com a abordagem informada sobre riscos, a mínima probabilidade anual de excedência do terremoto de desenho nas categorias de consequências muito altas ou extremas deve ser de 1/10.000 (correspondendo a um período de retorno de 10.000 anos). De acordo com a abordagem tradicional, baseada em padrões, para uma barragem na categoria de muito altas consequências, o terremoto de desenho deve ser a meio caminho entre o terremoto de 2.475 anos e o terremoto de 10.000 anos ou o TMC. Para uma barragem na categoria de extremas consequências, o terremoto de desenho deve ser o terremoto de 10.000 anos ou o TMC.

Os atuais regulamentos brasileiros de barragens de rejeitos estão especificados em Portaria No. 70.389 (Agência Nacional de Mineração, 2017). Esta portaria, por sua vez, exige a “análise da estabilidade da Barragem de Mineração a qual concluirá pela Declaração de Condição de Estabilidade tendo por base os índices de fator de segurança descritos na Norma Brasileira ABNT NBR 13.028 ou Norma que venha a sucedê-la, fazendo uso das boas práticas da engenharia” (Agência Nacional de Mineração, 2017). O fator de segurança é o valor mais baixo da razão entre a resistência ao cisalhamento e a tensão de cisalhamento, considerado em todas as superfícies de falha possíveis dentro da instalação de gerenciamento de rejeitos (Canadian Dam Association, 2013). O fator de segurança pode ser calculado sob condições estáticas (aceleração sísmica zero) ou sob a aceleração sísmica de um terremoto de desenho. ABNT NBR 13.028 então declara, “Os estudos sísmicos devem avaliar o potencial de sismicidade na área de implantação da barragem, com base em bibliografia, incluindo normas existentes e registros. Recomenda-se, para as etapas iniciais de estudo, a utilização do critério sugerido pela Canadian Dam Association (CDA), que indica a adoção da aceleração da gravidade resultante do Sismo Máximo Provável (MCE – Maximum Credible Earthquake) para análise pseudoestáticas [cálculo do fator de segurança sob o terremoto de desenho]”. Pelo exposto, o requisito de desenho para o TMC, independentemente das consequências da falha da barragem de rejeitos, fornece ao Brasil o mais rigoroso critério de desenho sísmico para barragens de rejeitos no mundo. De maneira semelhante, o Australian National Committee on Large Dams [Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens] declara, “*When considering the MDE, the concept of Maximum Credible Earthquake (MCE) is often used...For closure the MCE should be used for design but taking into account expected long term properties of the tailings*” [Ao considerar o TDM, o conceito de Terremoto Máximo Credível (TMC) é frequentemente usado...Para fechamento, o TMC deve ser usado para o desenho, mas levando em consideração as propriedades esperadas a longo prazo dos rejeitos (ANCOLD, 2012)].

## **REVISÃO DO USO DO CIANETO PARA BENEFICIAÇÃO DE MINÉRIO DE OURO**

Uma solução de cianeto atua como um lixiviente para o ouro, o que significa que extrai seletivamente o ouro das partículas trituradas do minério de ouro. Em particular, o cianeto dissolvido em água reage com ouro sólido para formar um complexo dissolvido de ouro-cianeto. A solução com o complexo de ouro-cianeto é chamada a solução grávida. Quando a solução grávida é passada sobre ou misturada com carbono ativado (carvão), o carbono ativado remove o ouro do complexo de ouro-cianeto na solução grávida, após o qual o processamento adicional separa o ouro e o carbono para formar um ouro puro. Parte da solução gasta (solução de cianeto após a remoção do ouro) é então reciclada através da operação de processamento de minério após a substituição de qualquer cianeto perdido. O restante da solução de cianeto gasta é enviado

para a lagoa de rejeitos junto com os rejeitos de mina. A menos que os rejeitos tenham sido filtrados ou substancialmente espessados, a maior parte do material enviado à lagoa de rejeitos é a solução de cianeto gasta.

O cianeto é altamente tóxico para os organismos aquáticos. Uma falha na barragem de rejeitos da mina de ouro Omai na Guiana em 1995 liberou 4,2 milhões de metros cúbicos de água contaminada por cianeto no rio Omai, felizmente, com apenas pequena mortandade de peixes (ICOLD e UNEP, 2001). No entanto, a falha de uma barragem de rejeitos na mina de ouro Aurul S.A. perto de Baia Mare, Romênia, em 2000 liberou 100.000 metros cúbicos de água contaminada com cianeto. O cianeto foi transportado pelos rios Somes e Tisza para o rio Danúbio e finalmente para o mar Negro, resultando em significativa mortandade de peixes e destruição de espécies aquáticas (ICOLD e UNEP, 2001). Os impactos do cianeto tendem a ser de curto prazo, porque o cianeto dissolvido oxida rapidamente para formar dióxido de carbono e amônia. Por esse motivo, é preferível oxidar o cianeto antes que os rejeitos e a solução de cianeto gasta sejam exportados para a lagoa de rejeitos.

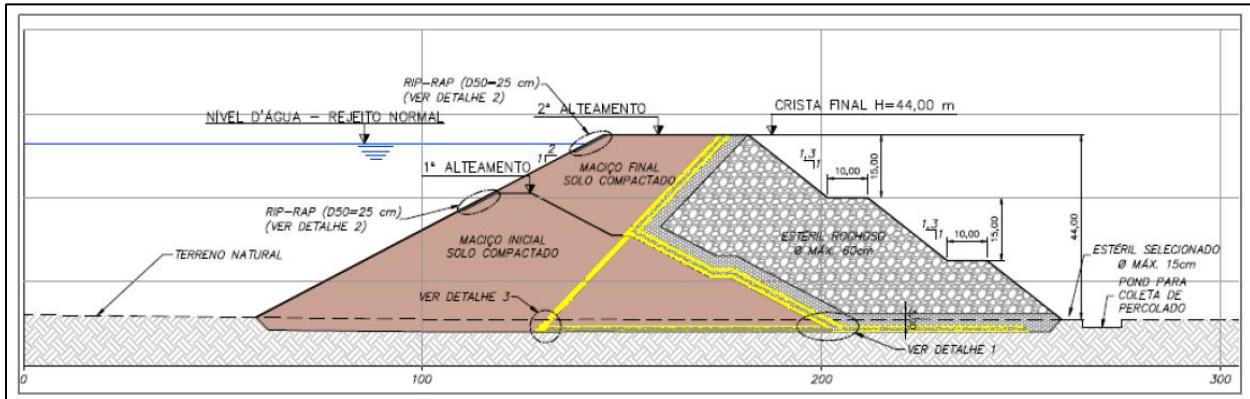
Os impactos a longo prazo do uso de cianeto tendem a resultar dos subprodutos do processamento de minério de ouro. Em particular, a solução de cianeto também extrai mercúrio do minério triturado. O mercúrio não é removido pelo carbono ativado para que permaneça na solução de cianeto gasta, mesmo após a oxidação da solução. Além disso, o uso de uma solução de cianeto requer água altamente alcalina (pH cerca de 10,5) para impedir que o cianeto dissolvido se converta no gás altamente tóxico, cianeto de hidrogênio. Essa solução alcalina resulta na dissolução de arsênico e antinomia do minério de ouro, que também permanecerão na solução de cianeto gasta mesmo após o tratamento com carbono ativado e oxidação. Mais informações sobre o uso de cianeto estão disponíveis no website do International Cyanide Management Institute [Instituto Internacional de Gerenciamento de Cianeto] (2020).

## **DESENHO DO PROJETO DE OURO VOLTA GRANDE**

A barragem de rejeitos do Projeto Volta Grande seria construída em duas etapas, usando o método de construção a jusante (ver Figs. 6b e 8). O dique inicial seria construído a partir de solo compactado desde o local do projeto até uma altura de 26,5 metros. O dique final seria construído com solo compactado no lado a montante e os estériles de mina no lado a jusante até uma altura final de 44 metros (ver Fig. 8). Antes da exportação para a lagoa de rejeitos, o cianeto seria destruído usando dióxido de enxofre e os rejeitos seriam espessados até um teor de sólidos de 53% em peso. A barragem de rejeitos teria descarga zero a jusante, pois toda a infiltração através da barragem seria bombeada de volta para a lagoa de rejeitos (Brandt Meio Ambiente, 2016a; VOGBR, 2016a).

Como a água é sempre reciclada durante qualquer operação de mineração, até certo ponto, o consumo de água pode ser muito menor que o uso da água. O consumo de água refere-se à água que deve ser substituída por retiradas de recursos hídricos superficiais ou subterrâneos. O consumo de água também é chamado da “*blue water footprint*” [pegada hídrica azul] e inclui a água perdida por evaporação, a água que é armazenada nos poros dos rejeitos e qualquer água que não seja devolvida à mesma bacia hidrográfica da qual foi retirada (Northey e Haque, 2013). No caso do Projeto Volta Grande, Brandt Meio Ambiente (2016a) previu um consumo de água de 473,1 metros cúbicos de água por hora, incluindo a reciclagem de 211,2 metros cúbicos de água por hora da lagoa de rejeitos e a retirada de 261,9 metros cúbicos de água por hora a partir da água superficial (correspondente ao consumo de água). Essa previsão mais recente do

consumo de água é muito maior do que a previsão do ano anterior (Chubb et al., 2015) de consumir 80 metros cúbicos de água por hora durante uma Fase I de operação (3,5 milhões de toneladas de minério por ano com grau médio de 1,56 gramas de ouro por tonelada de minério) e 130 metros cúbicos de água por hora durante uma Fase II de operação (7 milhões de toneladas de minério por ano com grau médio de 0,97 gramas de ouro por tonelada de minério). Mais detalhes sobre o desenho do Projeto Volta Grande serão fornecidos ao responder às perguntas específicas na seção Resultados.



**Figura 8.** A barragem de rejeitos para o Projeto de Ouro Volta Grande proposto seria construída em dois alteamentos usando o método a jusante (ver Fig. 6b), com uma altura final de 44 metros. O dique inicial seria construído a partir de solo compactado, enquanto o dique final seria construído a partir de solo compactado no lado a montante e os estériles de mina no lado a jusante. Embora o método a jusante seja o mais seguro dos três métodos de construção mais comuns, a segurança adicional provavelmente não contrabalança o risco adicional criado pela quantidade excessiva de água que seria armazenada atrás da barragem. As linhas amarelas indicam o sistema de drenagem interno. Figura do VOGBR (2016a).

## METODOLOGIA

À luz das revisões anteriores de rejeitos, barragens de rejeitos e o uso de cianeto, as três perguntas mencionadas anteriormente podem ser subdivididas em um conjunto de seis perguntas:

- 1) O consumo de água previsto do Projeto Volta Grande é consistente com as tendências do setor de mineração de ouro e seria uma fração significativa da vazão do rio Xingu?
- 2) A redução proposta no teor de água dos rejeitos armazenados do Projeto Volta Grande é consistente com as tendências em diretrizes para o setor de mineração?
- 3) A análise da sismicidade local e regional e a escolha de um terremoto de desenho são consistentes com as diretrizes internacionalmente reconhecidas e os regulamentos brasileiros das barragens de rejeitos?
- 4) A proposta do Projeto Volta Grande fornece proteção ambiental adequada contra os subprodutos tóxicos típicos do uso de cianeto (arsênico, antimônio, mercúrio)?
- 5) A proposta do Projeto Volta Grande prevê adequadamente e corretamente as consequências da falha da barragem de rejeitos?
- 6) A proposta para o Projeto Volta Grande inclui um plano adequado para o fechamento seguro da barragem de rejeitos após os 12 anos de operação de mineração?

Uma avaliação da probabilidade anual de falha da barragem de rejeitos será considerada na seção Discussão.

As seis perguntas foram abordadas principalmente por comparação do Estudo de Viabilidade de 2015 (Chubb et al., 2015) e dos documentos do Estudo de Impacto Ambiental

(EIA) de 2016 com tendências atuais em e diretrizes e regulamentos para o setor de mineração, com ênfase na mineração de ouro e no setor de mineração no Brasil. As principais seções do EIS 2016 foram Brandt Meio Ambiente (2016a-c) e VOGBR (2016a-b). Nem todas as seções do EIS 2016 estavam disponíveis para o autor. No entanto, as seções ausentes pareciam ser apenas análises detalhadas, para as quais os resumos e conclusões poderiam ser encontrados nas seções disponíveis. As versões mais recentes da proposta para o Projeto Volta Grande são os dois Estudos de Componentes Indígenas que consideram os possíveis impactos do projeto de ouro nas terras indígenas Paquiçamba e Arara da Volta Grande do Xingu (ver Fig. 3) (JGP Consultoria e Participações, 2020a-b). Esses documentos incluem apenas um resumo das informações técnicas disponíveis no EIS de 2016, sem alterações ou detalhes adicionais.

A quinta pregunta sobre as consequências da falha nas barragem de rejeitos foi abordada comparando as conclusões de Brandt Meio Ambiente (2016a) com o mais recente modelo estatístico de falhas na barragens de rejeitos (Larrauri e Lall, 2018). O modelo estatístico prevê a distância inicial percorrida pelos rejeitos após a falha da barragem. Essa distância inicial resulta da liberação de energia potencial gravitacional à medida que os rejeitos caem do reservatório de rejeitos. Após a cessação do fluxo ou deslizamento inicial, processos coluviais ou fluviais normais podem transportar os rejeitos ladeira abaixo ou rio abaixo indefinidamente até que os rejeitos cheguem ao oceano ou a uma bacia fechada. Quando o fluxo ou deslizamento inicial atinge um rio principal, como ocorreria na falha da barragem de rejeitos do Projeto Volta Grande, pode ser difícil separar o fluxo inicial dos processos fluviais normais subsequentes. Por exemplo, a falha da barragem de rejeitos na mina da Samarco (ver Tabela 1) derramou rejeitos no rio Doce, de modo que o fluxo inicial estendeu 637 quilômetros até o Oceano Atlântico (Larrauri e Lall, 2018).

De acordo com (Larrauri e Lall, 2018), o melhor preditor da distância inicial de rejeitos liberados é o fator de barragem  $H_f$ , definido como

$$H_f = H \left( \frac{V_F}{V_T} \right) V_F \quad (1)$$

onde  $H$  é a altura da barragem (metros),  $V_T$  é o volume total de rejeitos confinados e água (milhões de metros cúbicos) e  $V_F$  é o volume do derramamento (milhões de metros cúbicos). As previsões mais prováveis para o volume do derramamento e da distância inicial  $D_{max}$  (quilômetros) são então

$$V_F = 0.332 \times V_T^{0.95} \quad (2)$$

$$D_{max} = 3.04 \times H_f^{0.545} \quad (3)$$

Se deve notar que as Eqs. (2- (3) expressam as consequências mais prováveis da falha da barragem. Em particular, a consequência mais provável é que a falha da barragem resultará na liberação de cerca de um terço dos rejeitos armazenados (ver Eq. (2)). No entanto, o pior cenário é que a falha da barragem resultará na liberação de 100% dos rejeitos armazenados, para os quais existem exemplos (Larrauri e Lall, 2018). Portanto, a distância do pior cenário ( $V_F = V_T$ ) deve ser calculada usando a Eq. (3) com

$$H_f = HV_F \quad (4)$$

Discussões adicionais sobre as tendências e diretrizes do setor de mineração que foram usadas para comparação com o Projeto Volta Grande serão apresentadas na seção Resultados.

## RESULTADOS

### *Adequação da Previsão do Consumo de Água*

As tendências de consumo de água no setor de mineração de ouro podem ser baseadas no consumo de água por unidade de produção de minério (Mudd, 2007a-b; Gunson, 2013; Department of Water and Sanitation [Departamento de Água e Saneamento], 2016) ou por unidade de produção de ouro (Mudd, 2007a-b, 2010; Norgate e Haque, 2012; Gunson, 2013). As estimativas baseadas na produção de minério variaram de 0,745 a 2,56 metros cúbicos de água por tonelada de minério (ver Tabela 2), com o valor mais baixo (Gunson, 2013) sendo o mais recente e abrangente (com base nas minas de ouro globais). As estimativas baseadas na produção de ouro variaram de 259.290 a 691.000 metros cúbicos de água por tonelada de ouro (ver Tabela 2), com a mais recente e abrangente sendo 400.000 metros cúbicos de água por tonelada de ouro (Gunson, 2013). A literatura sobre tendências de consumo de água e outros recursos foi revisada por Tost et al. (2018).

**Tabela 2. Consumo médio de água por minas de ouro e estimativas para o Projeto Volta Grande**

Fonte	Baseado na Produção de Minério (m <sup>3</sup> água / tonelada de minério)	Baseado na Produção de Ouro (m <sup>3</sup> água / tonelada de ouro)
<b>Estudo</b>		
Mudd (2007a)	1,42	691.000
Mudd (2007b)	0,88	325.000
Mudd (2010)		634.900
Norgate e Haque (2012)		259.290
Norgate e Haque (2012) <sup>1</sup>		288.140
Gunson (2013)	0,745	400.000
DWS <sup>2</sup> (2016)	2,56	
<b>Projeto Volta Grande</b>		
2016 EIA	0,655 <sup>3</sup>	445.920 <sup>3,4</sup>
2015 Fase I	0,200 <sup>5</sup>	128.350 <sup>5,6</sup>
2015 Fase II	0,163 <sup>7</sup>	167.720 <sup>7,8</sup>

<sup>1</sup>Norgate e Haque (2012) utilizaram dois métodos diferentes.

<sup>2</sup>Departamento de Água e Saneamento (África do Sul)

<sup>3</sup>Consumo de água = 261,9 m<sup>3</sup>/h, produção de minério = 3,5 Mt/a (Brandt Meio Ambiente, 2016a)

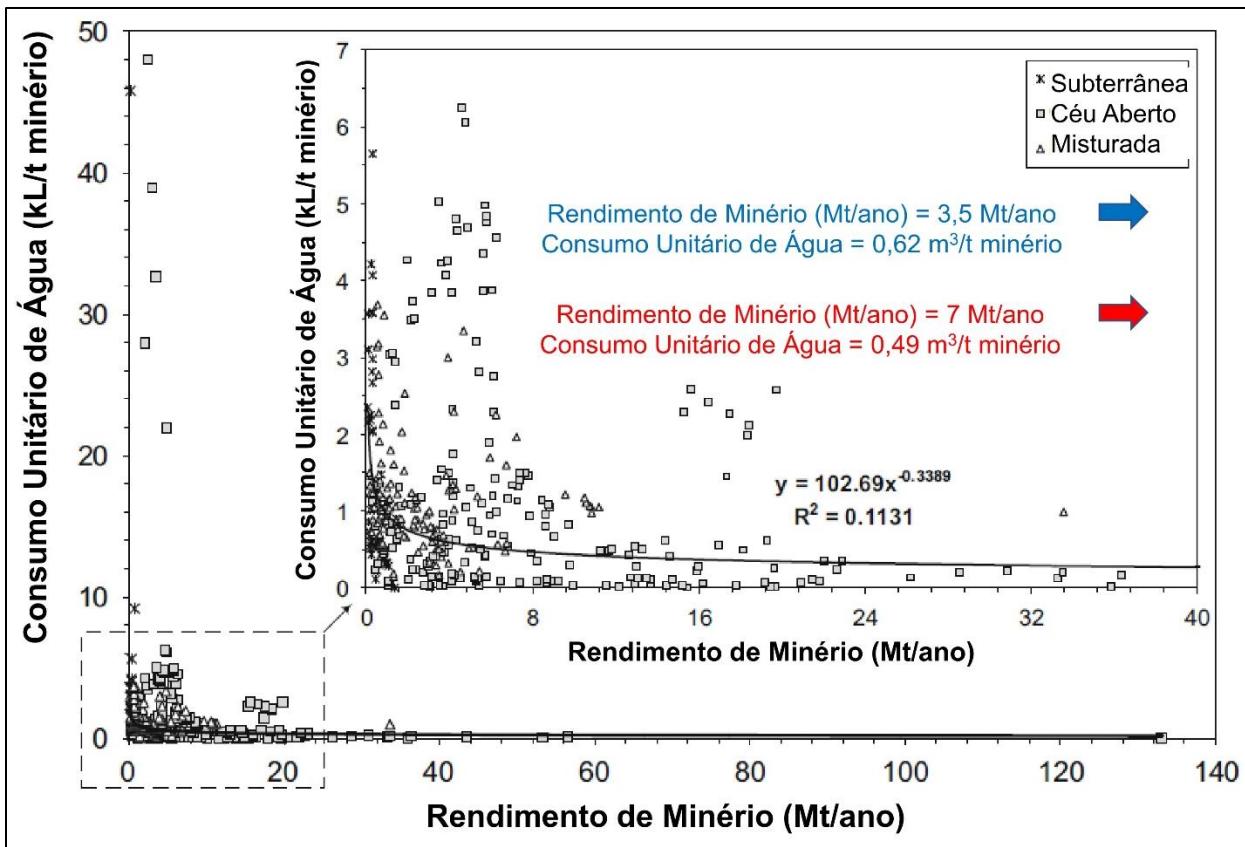
<sup>4</sup>Grau = 1,47 g Au/tonelada (Brandt Meio Ambiente, 2016a)

<sup>5</sup>Consumo de água = 80 m<sup>3</sup>/h, produção de minério = 3,5 Mt/a (Chubb et al., 2015)

<sup>6</sup>Grau = 1,56 g Au/tonelada (Chubb et al., 2015)

<sup>7</sup>Consumo de água = 130 m<sup>3</sup>/h, produção de minério = 7 Mt/a (Chubb et al., 2015)

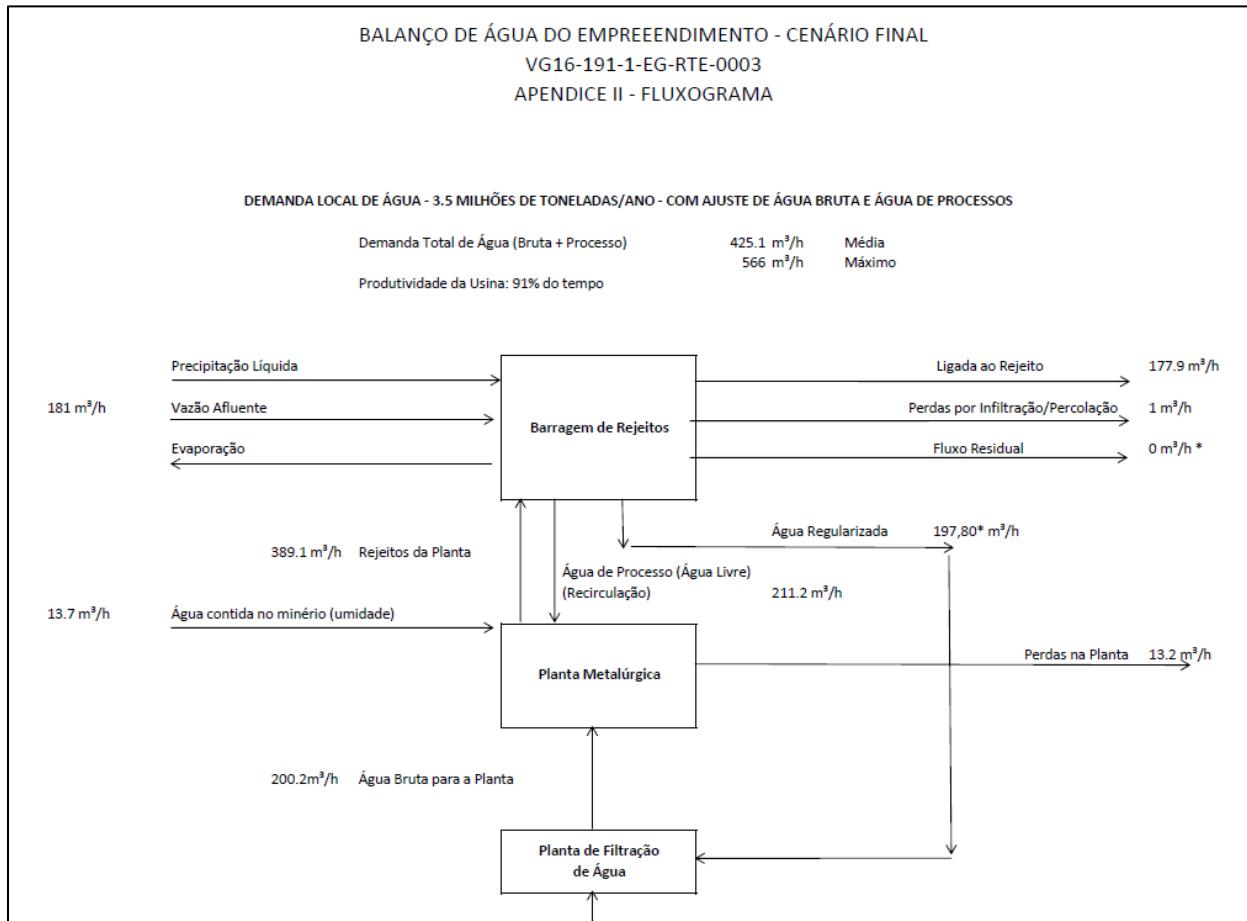
<sup>8</sup>Grau = 0,97 g Au/tonelada (Chubb et al., 2015)



**Figura 9.** Brandt Meio Ambiente (2016a) estimou o consumo de água do Projeto de Ouro Volta Grande proposto em 261,9 metros cúbicos por hora, para uma taxa de produção de minério de 3,5 milhões de toneladas por ano, correspondendo a 0,655 metros cúbicos de água por tonelada de minério (ver Tabela 2). A estimativa é consistente com a curva de melhor ajuste para minas de ouro globais (Mudd, 2010), que prevê um consumo unitário de água de 0,62 metros cúbicos de água por tonelada de minério para a mesma taxa de produção de minério. Por outro lado, uma estimativa anterior para a mina de ouro proposta de 0,163 metros cúbicos de água por tonelada de minério para uma taxa anual de produção de 7 milhões de toneladas (ver Tabela 2; Chubb et al., 2015) seria muito menor do que a previsão baseada em minas de ouro globais (0,49 metros cúbicos de água por tonelada de minério). Figura modificada do Mudd (2010) e com sobreposição de etiquetas portuguesas.

Com base no consumo de água previsto (261,9 metros cúbicos de água por hora), na taxa de produção de minério (3,5 milhões de toneladas por ano) e no grau (1,47 gramas de ouro por tonelada) do Projeto Volta Grande, o consumo de água por unidade seria 0,655 metros cúbicos de água por tonelada de minério e 445.920 metros cúbicos de água por tonelada de ouro (ver Tabela 2). Embora nenhum documento tenha apresentado um orçamento detalhado da água, as previsões acima são totalmente consistentes com as tendências do setor de mineração de ouro (ver Tabela 2). Por outro lado, o consumo horário previsto de água, a taxa de produção de minério e o grau médio do Relatório de Viabilidade anterior (Chubb et al., 2015) teriam previsto um consumo por unidade de água de 0,200 metros cúbicos de água por tonelada de minério e 128.350 metros cúbicos de água por tonelada de ouro na Fase I, e 0,163 metro cúbico de água por tonelada de minério e 167.720 metros cúbicos de água por tonelada de ouro na Fase II (ver Tabela 2). As previsões anteriores teriam sido muito menores do que é típico para o setor de mineração de ouro e não foram acompanhadas de nenhuma explicação sobre como seria alcançada tal alta eficiência de água. Assim, parece ter ocorrido um entendimento mais realista

da eficiência de água entre o Estudo de Viabilidade de 2015 (Chubb et al., 2015) e o EIA de 2016 (Brandt Meio Ambiente, 2016a).

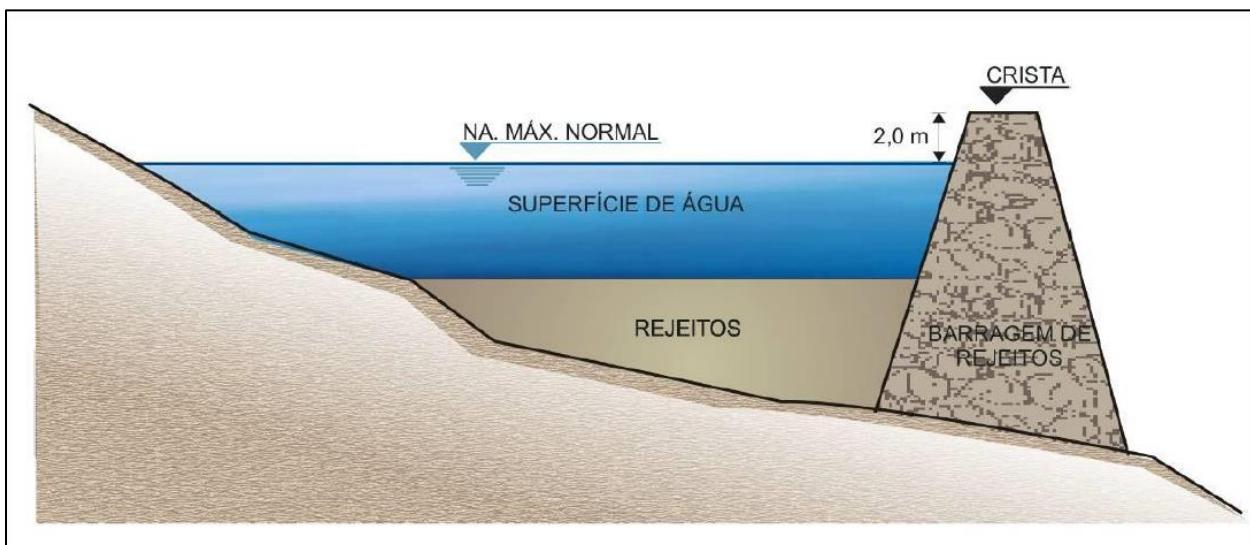


**Figura 10.** A mistura de rejeitos e água será espessada até um teor de 53% de sólidos antes da exportação para o reservatório de rejeitos. No entanto, a adição de 181 metros cúbicos de água da bacia hidrográfica para cada 389,1 metros cúbicos de água da planta de processamento de minério daria à mistura de rejeitos e água um teor de sólidos efetivo de 43%, o que está dentro da faixa para o gerenciamento de rejeitos convencional sem espessamento. A adição de água da bacia hidrográfica ao reservatório de rejeitos é o oposto da prática atual de construção de canais de desvio ao redor do reservatório de rejeitos, a fim de impedir a entrada de água da bacia hidrográfica, de modo a reduzir a água armazenada atrás da barragem de rejeitos. Devido ao uso de cianeto na planta de processamento de minério, a recirculação de água do reservatório tem o potencial de aumentar as concentrações de antimônio, arsênico e mercúrio na água a cada passagem pela planta de processamento de minério. Parte da figura do VOGBR (2016b).

O consumo de água previsto do Projeto Volta Grande também pode ser comparado com as taxas típicas de consumo de água das minas de ouro em função do rendimento de minério (Mudd, 2010). Embora exista uma dispersão considerável nos dados globais, melhorias acentuadas na eficiência de água parecem ocorrer para rendimentos de minério superiores a cerca de 3 milhões de toneladas por ano (ver Fig. 9). Para a taxa de produção de minério do Projeto Volta Grande (3,5 milhões de toneladas por ano), a curva de potência de melhor ajuste aos dados globais prevê um consumo de água de 0,62 metros cúbicos de água por tonelada de minério (ver Fig. 9), que é notavelmente semelhante à previsão para o Projeto Volta Grande (0,655 metros cúbicos de água por tonelada de minério). Para a taxa de produção de minério da Fase II do

Estudo de Viabilidade de 2015 (Chubb et al., 2015), a curva de melhor ajuste prevê um consumo de água de 0,49 metros cúbicos de água por tonelada de minério, o que é mais uma vez muito maior do que a previsão anterior. Em resumo, o consumo de água previsto do Projeto Volta Grande não exige nenhuma inovação na eficiência de água.

O consumo de água do Projeto Volta Grande também deve ser comparado com a vazão do rio Xingu, uma vez que a mina de ouro estaria consumindo água que teria contribuído para a vazão do rio. De acordo com seu contrato com o governo brasileiro, a Norte Energia, empresa que opera a barragem Belo Monte, é obrigada a fornecer 700 metros cúbicos por segundo ao rio Xingu abaixo da barragem (ver Fig. 2; Higgins, 2020). O consumo de água do Projeto Volta Grande (261,9 metros cúbicos por hora ou 0,07 metros cúbicos por segundo) seria só 0,01% do fluxo mínimo do rio Xingu. Portanto, o Projeto Volta Grande teria um impacto insignificante na vazão do rio Xingu.

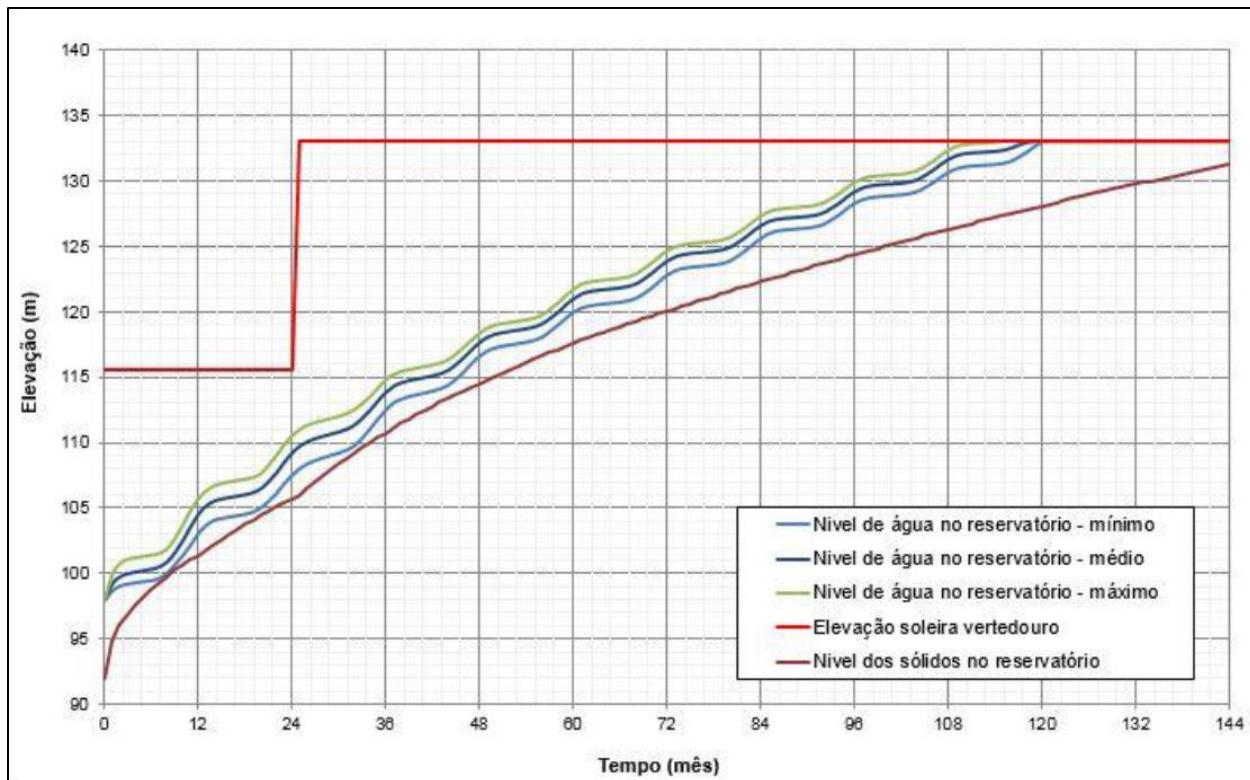


**Figura 11a.** A entrada de água da bacia hidrográfica no reservatório de rejeitos e a falta de descarga a jusante da barragem de rejeitos permitiria que o reservatório de rejeitos atuasse como um reservatório de água livre (água que não é armazenada nos poros entre os rejeitos) para reciclagem no minério planta de processamento (ver Fig. 10). No entanto, o resultado é que os rejeitos serão completamente saturados com água. Isso é contrário à prática atual de reduzir o teor de água e abaixar o lençol freático dentro dos rejeitos, a fim de reduzir tanto a probabilidade quanto as consequências da falha da barragem. Figura do VOGBR (2016b).

### Adequação da Redução do Teor de Água dos Rejeitos Armazenados

Embora o consumo de água previsto do Projeto Volta Grande pareça perfeitamente razoável, é importante considerar como a economia da água é alcançada. O reservatório de rejeitos receberia tanto a água (a lixiviação de cianeto gasta) da planta de processamento de minério quanto o escoamento superficial da bacia hidrográfica (ver Figs. 3 e 10). A partir de água livre que se acumula no reservatório de rejeitos, 211,2 metros cúbicos de água por hora seriam bombeados de volta para a planta de processamento de minério sem tratamento de água e 197,8 metros cúbicos de água por hora seriam bombeados através uma planta de filtragem de água para remoção de sedimentos antes de bombear para a planta de processamento de minério (VOGBR, 2016b; ver Fig. 10). O resultado do uso do reservatório de rejeitos como essencialmente uma lagoa de armazenamento de água é que sempre haveria água livre em cima dos rejeitos (ver Fig. 11a) com 7 metros de água livre ao final da operação de mineração (ver

Fig. 11b). Como consequência, quase todos os rejeitos seriam saturados com água (ver Fig. 12a). Dos 35,43 milhões de metros cúbicos de rejeitos e água que permaneceriam no final da operação de mineração, 32,36 milhões de metros cúbicos seriam rejeitos saturados, enquanto 3,07 milhões de metros cúbicos seriam água livre em cima dos rejeitos (Brandt Meio Ambiente, 2016b).

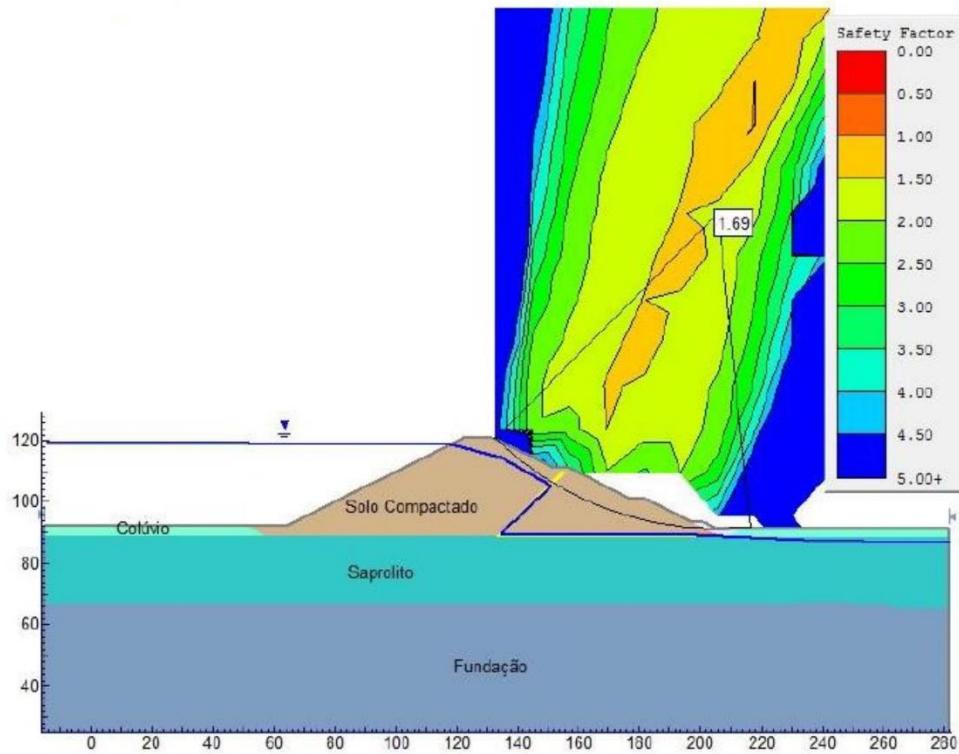


**Figura 11b.** A entrada de água da bacia hidrográfica no reservatório de rejeitos e a falta de descarga a jusante da barragem de rejeitos permitiria que o reservatório de rejeitos atuasse como um reservatório de água livre (água que não é armazenada nos poros entre os rejeitos) para reciclagem na planta de processamento de minério (ver Fig. 10). Após 10 anos de mineração, o nível da água atrás da barragem de rejeitos deve ficar 7 metros acima do nível dos rejeitos sólidos (ver Fig. 11a). O resultado é que os rejeitos serão completamente saturados com água. Isso é contrário à prática atual de reduzir o teor de água e abaixar o lençol freático dentro dos rejeitos, a fim de reduzir tanto a probabilidade quanto as consequências da falha da barragem. Figura do VOGBR (2016b).

O uso do reservatório de rejeitos para capturar o escoamento superficial é uma prática muito incomum atualmente. De fato, é muito mais comum a construção de um sistema de canais de desvio ao redor a reservatório de rejeitos para impedir a captação de água da bacia hidrográfica, a fim de reduzir o teor de água dos rejeitos (Vick, 1990). A empresa de mineração planeja espessar a mistura de rejeitos e água para um teor de 53% de sólidos antes de exportar para o reservatório de rejeitos. No entanto, a adição de 181 metros cúbicos de água (escoamento superficial + precipitação – evaporação) para cada 389,1 metros cúbicos de água da planta de processamento de minério (ver Fig. 10) daria à mistura de rejeitos e água um teor de sólidos efetivo de 43%, que está dentro da faixa para gerenciamento de rejeitos convencional sem espessamento.

Em contraste com o plano para o Projeto Volta Grande, a literatura do setor de mineração sobre a necessidade de reduzir tanto a probabilidade quanto as consequências das falhas nas barragens de rejeitos, abaixando o lençol freático e reduzindo o teor de água dos rejeitos é

demais vasta para ser revisada aqui. Três exemplos recentes devem ser suficientes. Uma das “Key Messages” [Mensagens Principais] do Australian Government [Governo Australiano] (2016) é que “*Leading practice tailings storage methods seek to eliminate the potentially catastrophic risks associated with the release of tailings slurry from TSFs [Tailings Storage Facilities] by dewatering the tailings before deposition and by minimizing the containment of water in the TSF*” [Os melhores métodos de armazenamento de rejeitos procuram eliminar os riscos potencialmente catastróficos associados à liberação de polpa de rejeitos dos IARs [Instalações de Armazenamento de Rejeitos] desidratando os rejeitos antes da deposição e por minimizando a contenção de água no IAR]. Australian Government (2016) esclarece ainda, “*An increasing number of mining operations employ dewatering to produce thickened and paste tailings and this is more likely to become more widespread in the future*” [Um número crescente de operações de mineração emprega desidratação para produzir rejeitos espessos e pastosos, e é mais provável que isso se torne mais difundido no futuro]. Em sua análise da causa da falha da barragem de rejeitos na mina Mount Polley, Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel (2015) escreveu, “*In accomplishing this objective [physical stability of the tailings deposit], BAT [Best Available Technologies] has three components that derive from first principles of soil mechanics: 1) Eliminate surface water from the impoundment 2) Promote unsaturated conditions in the tailings with drainage provisions 3) Achieve dilatant conditions throughout the tailings deposit by compaction*” [Ao atingir esse objetivo [estabilidade física do depósito de rejeitos], a MTD [Melhores Tecnologias Disponíveis] possui três componentes que derivam dos primeiros princípios da mecânica do solo: 1) Eliminar a água da superfície do represamento 2) Promover condições insaturadas nos rejeitos com provisões de drenagem 3) Atingir condições dilatantes em todo o depósito de rejeitos por compactação]. Os autores continuaram, “*Demonstrated technology for producing and placing filtered tailings (sometimes termed ‘dry stack’ tailings) is well-known in the industry...Its adoption and design practices are documented in the literature...Filtered tailings technology embodies all three BAT components...There are no overriding technical impediments to more widespread adoption of filtered tailings technology*” [A tecnologia demonstrada para produção e colocação de rejeitos filtrados (às vezes denominados rejeitos de ‘pilha seca’) é bem conhecida na indústria...Suas práticas de adoção e desenho estão documentadas na literatura...A tecnologia de rejeitos filtrados incorpora todos os três componentes de MTD... Não há impedimentos técnicos predominantes para a adoção mais ampla da tecnologia de rejeitos filtrados]. O primeiro parágrafo do “*Study of Tailings Management Technologies*” [Estudo das Tecnologias de Gerenciamento de Rejeitos] (patrocinado pela Mining Association of Canada e pelo Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program [Associação Canadense de Mineração e Programa de Drenagem Neutra para o Ambiente de Mineração] declarou, “*Although one root cause has not been identified for all tailings dam failures, a common contributing factor to the higher consequence of failure includes the storage and behavior of water within the facilities. This has led the industry to reconsider alternatives to conventional tailings facilities, including dewatering tailings prior to deposition...*” [Embora uma causa raiz não tenha sido identificada para todas as falhas nas barragens de rejeitos, um fator comum que contribui para a consequência mais alta das falhas inclui o armazenamento e o comportamento da água dentro as instalações. Isso levou a indústria a reconsiderar alternativas às instalações de rejeitos convencionais, incluindo a remoção de água dos rejeitos antes da deposição...] (Klohn Crippen Berger, 2017).



**Figure IV-1 – Análise de Estabilidade – Maciço Inicial: EL. 121m – Nível D’água Condição Normal**

**Figura 12a.** O dique inicial teria um fator de segurança de 1,69, onde o fator de segurança é a razão mínima entre a resistência ao cisalhamento e a tensão de cisalhamento, considerada em todas as superfícies de falha possíveis. O fator de segurança calculado excede o valor mínimo de 1,50 exigido pelos regulamentos brasileiros das barragens de rejeitos (ABNT, 2017). No entanto, o fator de segurança foi calculado apenas para a condição estática e não para a resposta da barragem à aceleração sísmica, ao contrário dos mesmos regulamentos da barragem de rejeitos que exigem desenho para suportar o Terremoto Máximo Credível (ABNT, 2017). Nenhuma análise de estabilidade foi fornecida para o dique final (ver Fig. 8). Observar o papel do sistema de drenagem interno (ver Fig. 8) no rebaixamento do lençol freático dentro do dique inicial. Figure do VOGBR (2016a).

#### *Adequação da Análise Sísmica e Desenho Sísmico*

Com base na geometria do depósito de rejeitos, em uma suposta altura do lençol freático e nos parâmetros geotécnicos do solo compactado e da fundação, o dique inicial teria um fator de segurança de 1,69 contra falhas por deslizamentos (ver Fig. 12a), que é razoavelmente superior ao valor mínimo (1,50) exigido pelos regulamentos brasileiros de barragens de rejeitos (ABNT, 2017). O sistema de drenagem interno (linhas amarelas nas Fig. 8 e 12a) teria claramente um papel crítico no abaixamento do lençol freático dentro da barragem de rejeitos (embora não nos rejeitos armazenados atrás da barragem). Qualquer falha no sistema de drenagem interno que permitiria que o lençol freático subisse cerca da metade da altura da barragem no lado descendente do dique de partida faria com que o fator de segurança caísse abaixo do valor mínimo aceitável (ver Fig. 12b). Não vi nenhum documento que realize a mesma análise de estabilidade para o dique final.

O mais inquietante é que as análises de estabilidade existentes foram realizadas apenas sob condições estáticas e não sob a condição de uma aceleração sísmica de desenho. De fato,

nenhum dos documentos do EIA de 2016 discute um terremoto de desenho ou inclui qualquer análise da sismicidade local ou regional. Isso é surpreendente, porque os documentos mostram mapas de falhas e fraturas geológicas nas proximidades do local do projeto de mineração, incluindo três falhas possíveis que se cruzam no local exato da barragem de rejeitos proposta (ver Figs. 13a-b; VOGBR, 2016a). No entanto, essas falhas geológicas foram discutidas apenas em termos de capacidade de transmitir infiltração de água do reservatório de rejeitos, e não em termos de capacidade de atuar como fontes de sismicidade.

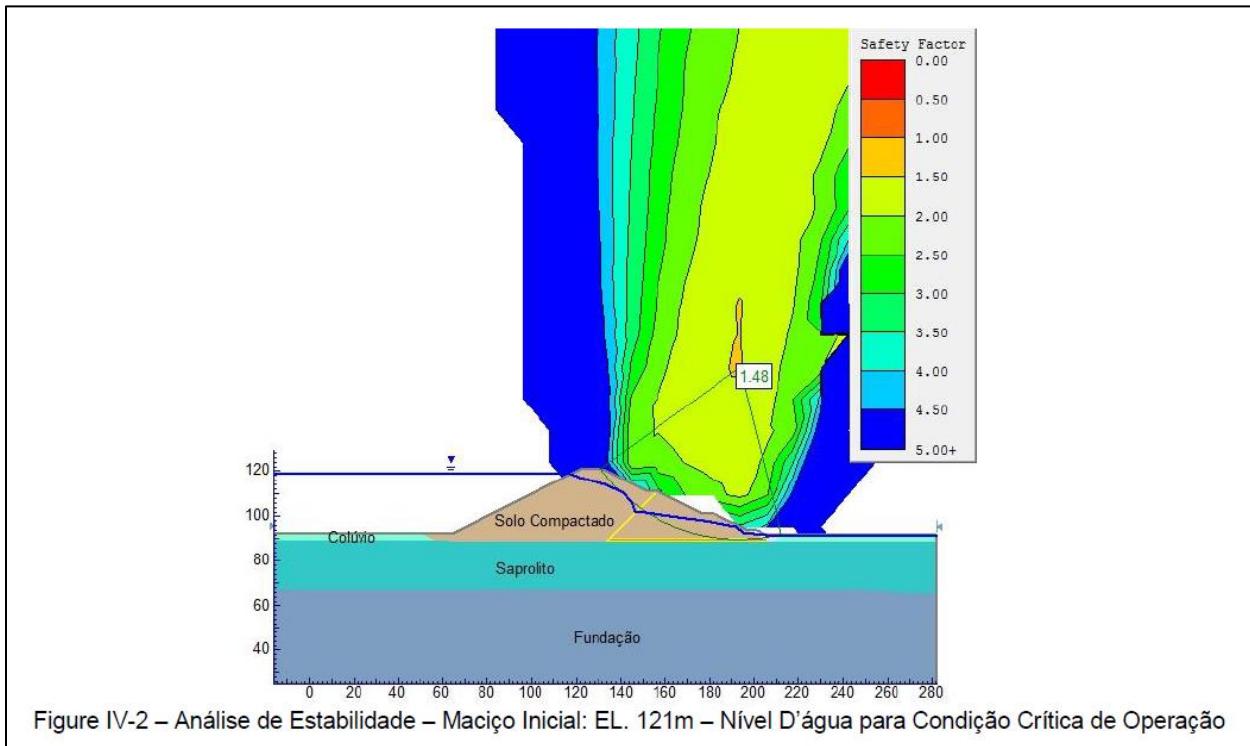
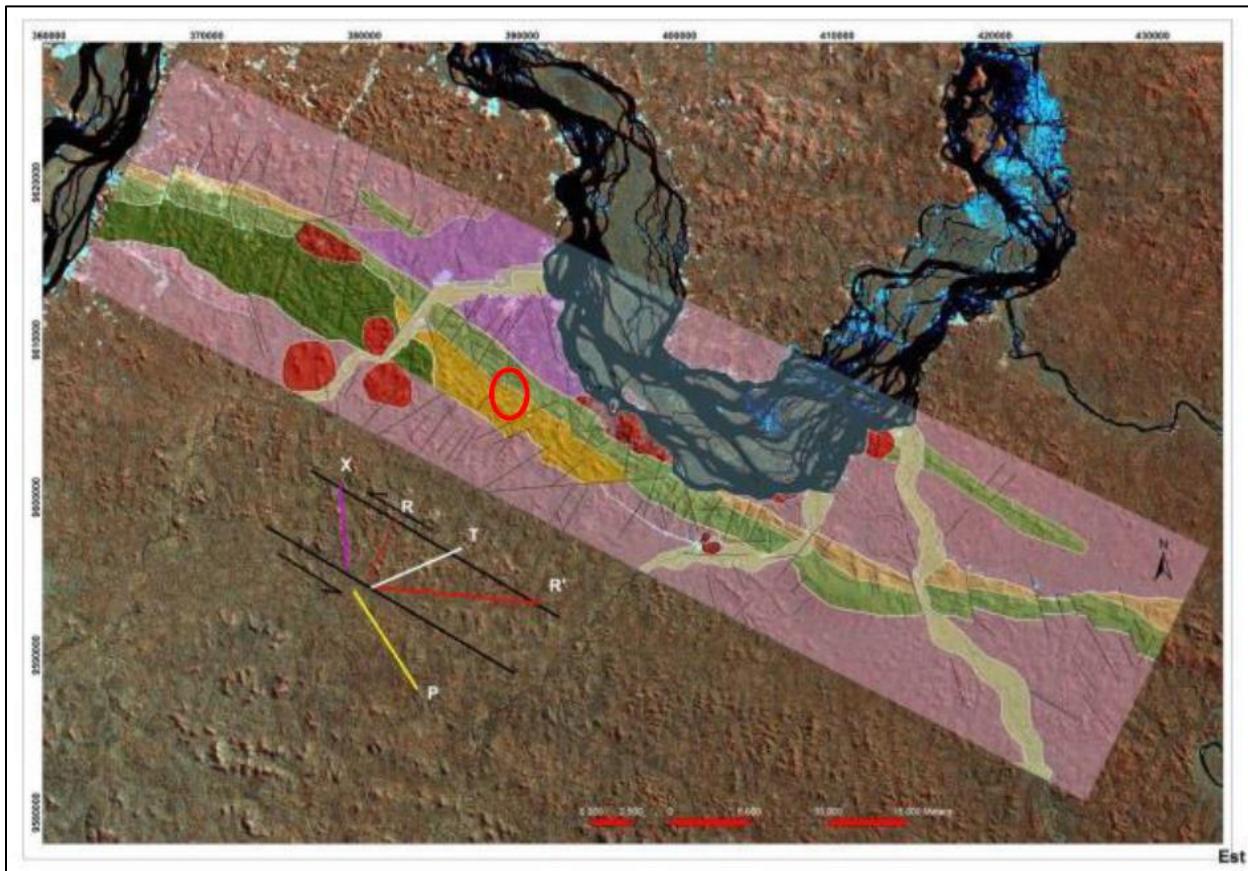


Figure IV-2 – Análise de Estabilidade – Maciço Inicial: EL. 121m – Nível D’água para Condição Crítica de Operação

**Figura 12b.** A figura mostra o nível crítico do lençol freático dentro da barragem de rejeitos, no qual o fator de segurança ficaria abaixo do valor mínimo (1,50) exigido pelos regulamentos brasileiros da barragem de rejeitos (ABNT, 2017). O fator de segurança é a razão mínima entre a resistência ao cisalhamento e a tensão de cisalhamento, considerada em todas as superfícies de falha possíveis. No entanto, o fator de segurança foi calculado apenas para a condição estática e não para a resposta da barragem à aceleração sísmica, ao contrário dos mesmos regulamentos da barragem de rejeitos que exigem desenho para suportar o Terremoto Máximo Credível (ABNT, 2017). Nenhuma análise de estabilidade foi fornecida para o dique final (ver Fig. 8). Observar o papel do sistema de drenagem interno (ver Figs. 8 e 12a) no rebaixamento ou na falta de rebaixamento do lençol freático dentro do dique inicial. Figure do VOGBR (2016a).

Como mencionado anteriormente, essa falha na realização de estudos sísmicos e no desenho de uma barragem de rejeitos para acomodar o Terremoto Máximo Credível (TMC) viola os atuais regulamentos de barragens de rejeitos (ABNT, 2017). É inquietante que, em uma apresentação à FUNAI (Fundação Nacional do Índio) em outubro de 2019, a Belo Sun Mineração (2019) ainda afirmasse que a barragem de rejeitos havia sido desenhada de acordo com a ABNT NBR 13.028/2006, embora esses anteriores regulamentos de barragens de rejeitos já estavam desatualizados há dois anos. De fato, o desenho da barragem de rejeitos poderia ter sido consistente com os mais antigos regulamentos de barragens de rejeitos, que não exigiam estudos sísmicos ou desenho para um terremoto em particular (Franca, 2018). (Ver Franca (2018) para uma comparação dos regulamentos de barragens de 2006 e 2017. O autor,

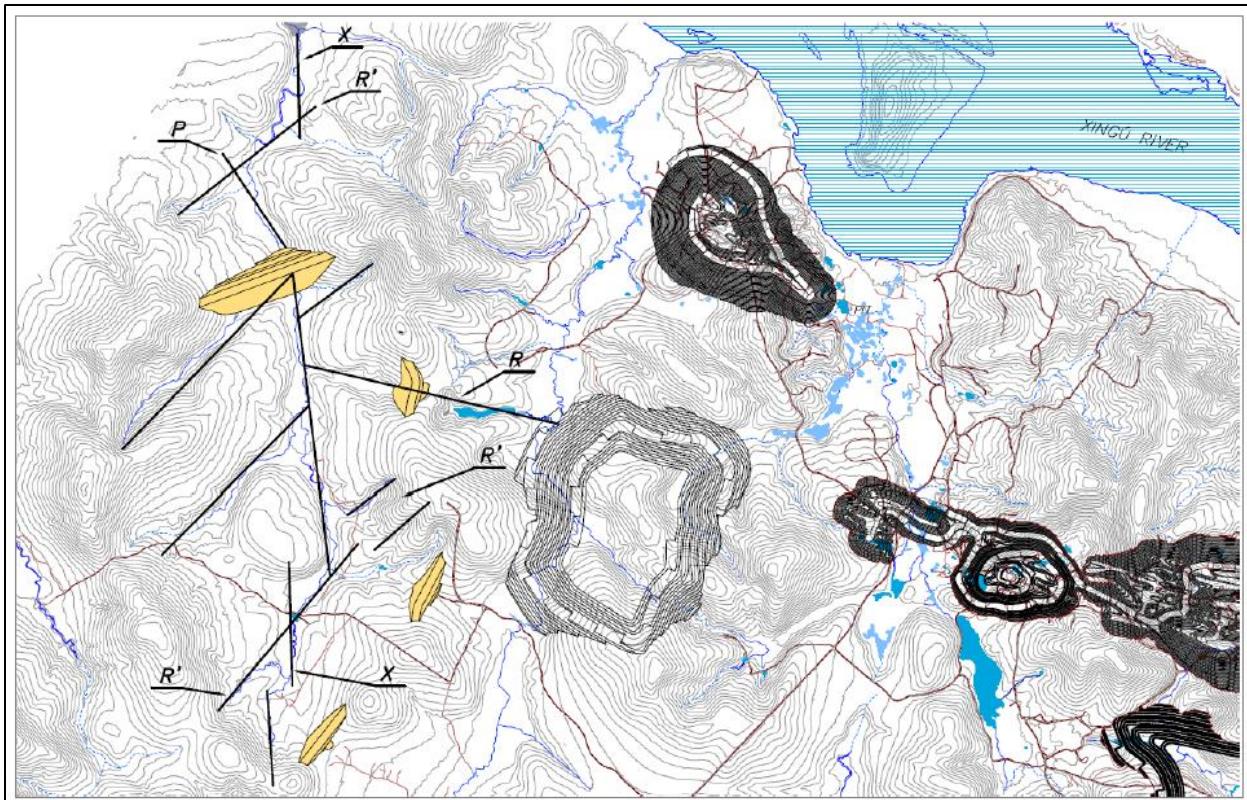
Paulo Franca, era associado ao Projeto Volta Grande, pois foi o quarto autor do Estudo de Viabilidade de 2015 (Chubb et al., 2015)).



**Figura 13a.** Um mapa geológico sobreposto à imagem do Landsat mostra possíveis falhas geológicas com as direções T, R, X, P e R' nas proximidades do reservatório de rejeitos (elipse vermelha). (Comparar com Fig. 2 para localização.) Embora a figura tenha sido fornecida por VOGBR (2016a), não houve discussão sobre a capacidade das falhas de atuarem como fontes de sismicidade que poderiam impactar a barragem de rejeitos. Figure do VOGBR (2016a).

#### *Adequação da Proteção Ambiental dos Efeitos do Cianeto*

Já foi mencionado que o uso de cianeto para extrair ouro a partir do minério triturado também tem o potencial de dissolver arsênico, antimônio e mercúrio. Além disso, os processos utilizados para remover o ouro da solução de cianeto e destruir o cianeto não removerão os subprodutos tóxicos antimônio, arsênico e mercúrio da solução de cianeto gasta. Como, de acordo com o plano do Projeto Volta Grande, a solução de cianeto seria infinitamente reciclada entre a planta de processamento de minério e o reservatório de rejeitos sem tratamento de água (ver Fig. 10), a solução de cianeto tem potencial para enriquecer-se cada vez mais em antimônio, arsênico e mercúrio a cada passagem pela planta de processamento de minério. O resultado pode ser o derramamento de uma mistura de rejeitos e água que seria altamente tóxica para os organismos aquáticos no rio Xingu, se a barragem de rejeitos falhar.



**Figura 13b.** VOGBR (2016a) forneceu uma figura que mostrou possíveis falhas geológicas nas proximidades da barragem de rejeitos, mas não discutiu a capacidade das falhas de atuarem como fontes de sismicidade que poderiam impactar a barragem de rejeitos. O grande polígono amarelo é a principal barragem de rejeitos, enquanto os três polígonos amarelos menores são diques ao redor do perímetro do reservatório de rejeitos. (Comparar com Fig. 3 para localização.) Figure do VOGBR (2016a).

O ponto aqui não é afirmar que a água no reservatório de rejeitos seria altamente enriquecida em elementos tóxicos, mas ressaltar que a possibilidade nunca foi investigada no EIA de 2016. Por contraste, o Estudo de Viabilidade de 2015 (Chubb et al., 2015) enfatizou repetidamente as altas concentrações de arsênico nos estériles de mina e nos rejeitos. De acordo com Chubb et al. (2015), “*Of the 16 samples [of waste rock] classified as not dangerous and non-inert, arsenic was the parameter that exceeded guidelines most frequently (n = 12), with an average exceedance 30 times the Resíduo Solubilização [Solubilized Waste] guideline (0.01 mg/L)... The solubilized waste and free draining leach column studies completed by Belo Sun suggest that arsenic could be a parameter of concern in the contact water leaching through the WMF [Waste Management Facility] ...Free draining leach columns and Resíduo Solubilização results indicated a potential for arsenic as a parameter of concern; the risk of untreated discharge from the seepage ponds needs to be further assessed... Six tailings samples were analyzed by the Resíduo Lixiviação (leachate waste) and Resíduo Solubilização (solubilized waste) methods; all six were not dangerous and non-inert, arsenic was the parameter that exceeded guidelines most frequently (n = 5), with an average exceedance 40 times the Resíduo Solubilização guideline (0.01 mg/L)...*” [Das 16 amostras [de estériles de mina] classificadas como não perigosas e não inertes, o arsênico foi o parâmetro que mais frequentemente excede as diretrizes ( $n = 12$ ), com excedência média de 30 vezes a diretriz Resíduo Solubilização (0,01 mg/L)... Os estudos de resíduo solubilização e de coluna de lixiviação de drenagem livre concluídos pela Belo Sun sugerem que o arsênico pode ser um parâmetro de preocupação na

lixiviação de água de contato através do IGE [Instalação de gerenciamento de estériles]... Os resultados de colunas de lixiviação de drenagem livre e de Resíduo Solubilização indicaram um potencial de arsênico como parâmetro de preocupação; o risco de descarga não tratada das lagoas de infiltração precisa ser avaliado mais... Seis amostras de rejeitos foram analisadas pelos métodos Resíduo Lixiviação (resíduo lixiviado) e Resíduo Solubilização (resíduo solubilizado); todos os seis não foram perigosos e não inertes; o arsênico foi o parâmetro que mais excedeu as diretrizes ( $n = 5$ ), com excedência média de 40 vezes a diretriz Resíduo Solubilização (0,01 mg/L)]. Os documentos disponíveis no EIA de 2016 não dão nenhuma indicação de que a questão acima foi considerada mais adiante ou de que foram realizadas previsões sobre a qualidade final da água do reservatório de rejeitos.

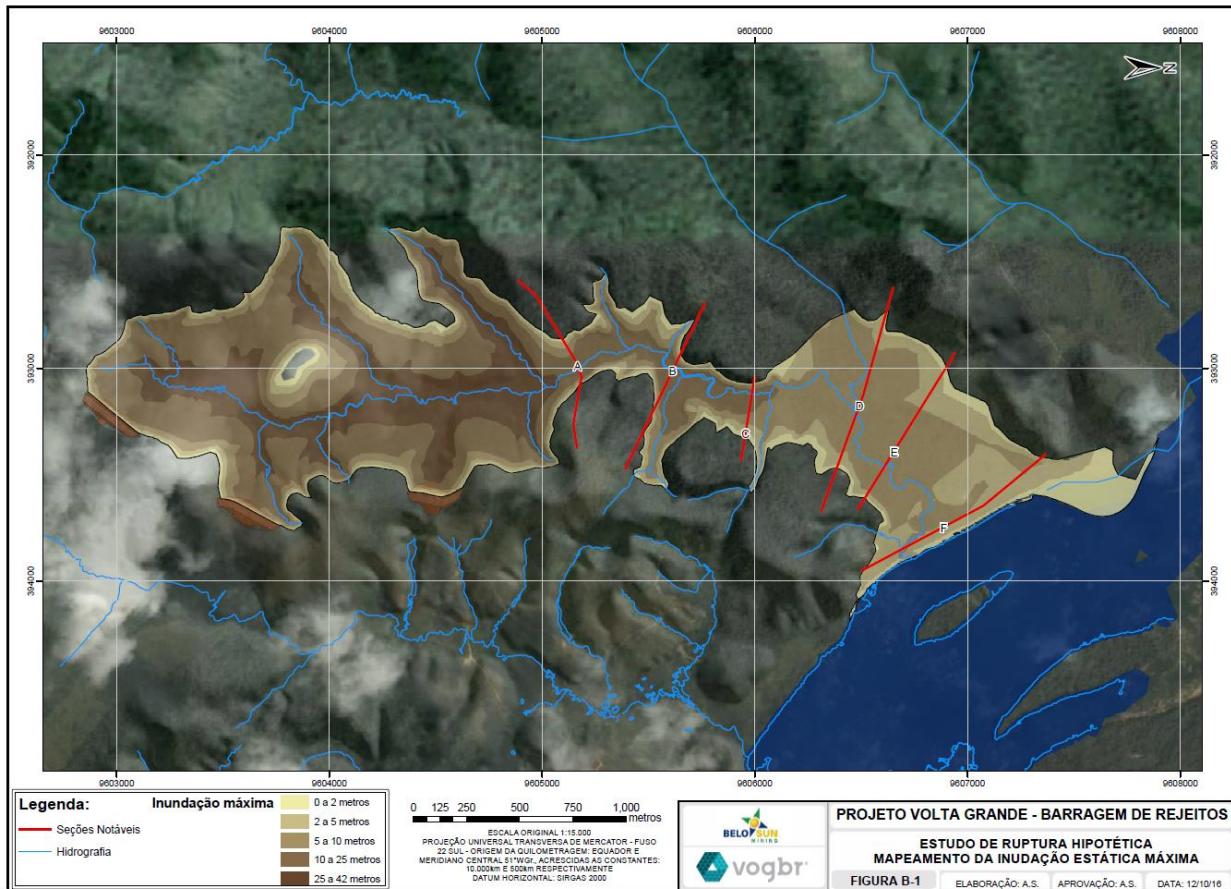
### *Adequação da Análise das Consequências da Falha da Barragem*

Com base em uma altura da barragem  $H = 44$  metros e um volume de rejeitos e água armazenados  $V_T = 35,43$  milhões de metros cúbicos, Eqs. (1)- (3) preveem um volume de derramamento  $V_F = 9,84$  milhões de metros cúbicos (27,8% dos rejeitos e água armazenados) e uma distância inicial de 41,4 quilômetros ao longo do rio Xingu (ver Fig. 2). O cenário acima é o cenário mais provável após o rompimento da barragem e certamente impactaria a terra indígena Arara de Volta Grande do Xingu (ver Fig. 2). O pior cenário seria o derramamento de 100% dos rejeitos e água armazenados, o que resultaria em uma distância inicial de 98,1 quilômetros ao longo do rio Xingu, de acordo com Eqs. (3)-(4). Posteriormente ao evento inicial, os processos fluviais normais continuariam a transportar os rejeitos derramados ao longo do rio Xingu, no rio Amazonas e, eventualmente, no oceano Atlântico (ver Fig. 1).

A escala de tempo dos eventos acima também é motivo de preocupação. Embora a margem do reservatório de rejeitos esteja a 1535 metros das margens do rio Xingu, é mais provável que a inundação de rejeitos flua ao longo de um canal existente por 2228 metros antes de chegar ao rio Xingu (ver Fig. 3). Não havia muitas medições das velocidades das inundações de rejeitos, mas elas variaram de 20 a 160 quilômetros por hora (Jeyapalan, 1981). Segundo Petley (2019), a inundação de rejeitos após a falha de 2019 da barragem de rejeitos em Brumadinho, Minas Gerais (ver a Tabela 1), acelerou para 120 quilômetros por hora e depois diminui para 66 quilômetros por hora. O limite inferior de 20 quilômetros por hora aparentemente é responsável pela nova legislação de mineração em Minas Gerais que proíbe a construção ou expansão de uma barragem de rejeitos, onde existe uma população que reside a 10 quilômetros a jusante da barragem ao longo do curso do vale ou dentro da zona que poderia ser alcançada pela inundação de rejeitos em 30 minutos, o que estiver mais longe (Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2019). Utilizando o valor mais conservador de 20 quilômetros por hora, a inundação de rejeitos resultante de uma falha na barragem de rejeitos chegaria às margens do rio Xingu em menos de 7 minutos e cobriria a distância inicial (41,4 quilômetros), atingindo e passando a terra indígena Arara de Volta Grande do Xingu, em cerca de duas horas (ver Fig. 2).

É difícil conciliar os resultados acima com as conclusões de Brandt Meio Ambiente (2016a). De acordo com o EIA de 2016, a inundação de rejeitos chegaria às margens do rio Xingu em 97 minutos, correspondendo a uma velocidade de fluxo de rejeitos de 1,4 quilômetros por hora. A velocidade acima é bastante lenta. A grande maioria dos córregos no estágio de inundação tem velocidades na faixa de 4 a 11 quilômetros por hora (Leopold, 1994). Nenhum documento disponível explicou os detalhes do cálculo. No entanto, uma dica é dada em Brandt Meio Ambiente (2016a), que lista como uma das suposições do cálculo “Critério de parada:

atingir o Rio Xingu” (ver Fig. 14). Não há base física para a suposição de que os rejeitos parariam ao chegar ao rio Xingu, especialmente um rio com vazão mínima de 700 metros cúbicos por segundo (Higgins, 2020).



**Figura 14.** A análise da ruptura da barragem foi defeituosa, pois supunha que a inundação de rejeitos cessaria quando os rejeitos chegassesem ao rio Xingu (Brandt Meio Ambiente, 2016a). A seção transversal A é a borda da barragem de rejeitos (comparar com Fig. 3 para localização, mas observar a diferença nas setas do norte). A figura vem de um relatório que não estava disponível para o autor.

### Adequação do Plano de Fechamento Seguro da Barragem de Rejeitos

Brandt Meio Ambiente (2016b) reconhece que após o término da operação de mineração, a barragem de rejeitos e o reservatório de rejeitos permanecerão um “destaque permanente na paisagem”. Isso significa que será necessário garantir que a barragem de rejeitos seja estável e possa conter os rejeitos em perpetuidade. O único plano concreto para alcançar estabilidade permanente é drenar a água livre para o lago de contenção de água Oeste (ver Fig. 3). Por sua vez, existe uma promessa infundada de que a água nos lagos de contenção atenderá aos padrões ambientais brasileiros, de modo que os lagos de contenção forem drenados, a menos que haja interesse da comunidade em usá-los para outros fins.

Caso contrário, o EIA de 2016 contém apenas uma promessa de descobrir mais tarde como estabilizar permanentemente a barragem de rejeitos. Em particular, o plano de fechamento seguro e permanente da barragem de rejeitos não se torna mais detalhado que o seguinte: “O fechamento do empreendimento pressupõe vistorias finais de Engenharia para averiguar a

qualidade dos trabalhos de controle físico das superfícies da área diretamente afetada no Projeto Volta Grande. Todas as estruturas, durante a fase de fechamento serão objeto de avaliação para assegurar a estabilidade física do terreno e das estruturas remanescentes. A Engenharia da empresa, ainda durante a operação, mas também durante a fase de fechamento, irá realizar as obras necessárias para garantir esta estabilidade. Todas as estruturas, antes da saída da empresa, serão objeto de avaliação criteriosa quanto a sua estabilidade de longo prazo...Á medida que o Plano de Fechamento for sendo atualizado, chegando finalmente a um Plano Executivo de Fechamento, estes projetos de adequação das barragens para o período após a saída da empresa mineradora precisam ser detalhados especificamente...Esta versão do Plano de Fechamento é a inicial, podendo, portanto, esta forma de tratamento do sistema da barragem de rejeito, do Projeto Volta Grande, estar sujeita a modificações, com base em novas tecnologias ou métodos de fechamento, ou mesmo propostas alternativas de uso futuro diferenciadas das atualmente imaginadas” (Brandt Meio Ambiente, 20016b). Certamente, não há nenhum plano para continuar em perpetuidade o monitoramento, inspeção e manutenção de uma barragem de rejeitos que deverá confinar os rejeitos em perpetuidade.

## DISCUSSÃO

### *Probabilidade Anual de Falha da Barragem de Rejeitos*

Nesse ponto, a probabilidade anual de falha da barragem de rejeitos para o Projeto Volta Grande proposto pode ser considerada. Uma probabilidade anual de falha é estimada começando com uma taxa base de falha para todas as barragens de rejeitos (ou todas as barragens de rejeitos em uma categoria específica), após o que são considerados os fatores que podem aumentar ou diminuir a probabilidade de falha numa barragem de rejeitos específica. Já foi mencionado que a taxa de falha de barragens de rejeitos no Brasil tem sido de 0,06% por ano (ver Tabela 1 e Fig. 4), embora isso deva ser subestimada, pois pressupõe que todas as barragens de rejeitos atuais já existiam em 1986. Como a taxa global de falhas tem sido de 0,06-0,14% por ano (Davies, 2002) e a taxa de falhas na Colúmbia Britânica tem sido de 0,17% por ano, uma taxa anual base de falha de 0,1% provavelmente é razoável nas barragens de rejeitos no Brasil.

Para a barragem de rejeitos do Projeto Volta Grande proposto, o único fator que reduziria a probabilidade de falha abaixo da linha de base é o método de construção a jusante, que é o mais seguro dos métodos de construção comuns. Por outro lado, os seguintes fatores tenderiam a aumentar a probabilidade de falha em ordem de importância (1 = mais importante):

- 1) Os rejeitos armazenariam uma quantidade excessiva de água. Em particular, todos os rejeitos seriam saturados e haveria 7 metros de água livre em cima dos rejeitos.
- 2) Não foram realizados estudos de sismicidade local ou regional.
- 3) Não houve análise da estabilidade da barragem de rejeitos em resposta à aceleração sísmica.
- 4) Falhas geológicas de interseção foram mapeadas no local da barragem de rejeitos proposta.

O segundo e o terceiro fatores listados acima requerem consideração cuidadosa. É possível que o Projeto Volta Grande esteja localizado em uma região de sismicidade insignificante. Também é possível que a barragem de rejeitos seja estável em resposta ao Terremoto Máximo Credível (TMC), mesmo que essa resposta nunca tenha sido calculada, nem a aceleração devida ao MCE tenha sido determinada. No entanto, uma probabilidade anual de falha é essencialmente uma medida subjetiva da falta de confiança na capacidade de sobrevivência de uma estrutura (Vick, 2002). Assim, qualquer falta de conhecimento (como a

falta de estudos sísmicos) deve diminuir a confiança na capacidade de sobrevivência e, assim, aumentar a avaliação da probabilidade de falha.

Embora, baseados em princípios de engenharia, as barragens de rejeitos a jusante devam ser mais seguras que as barragens a montante ou da linha de centro, é difícil quantificar quanto mais seguro, simplesmente com base nas estatísticas de falhas de barragens anteriores. Das 356 falhas de barragens de rejeitos listadas no banco de dados de World Mine Tailings Failures [Falhas nos Rejeitos de Minas no Mundo] (2019), o método de construção é desconhecido para 171 falhas (48%). É mais importante que não haja um banco de dados global do número de barragens de rejeitos que foram construídas por cada método. Falhas nas barragens a jusante certamente ocorreram. O mesmo banco de dados (World Mine Tailings Failures, 2019) lista 26 falhas de barragens a jusante, ou 14% de todas as falhas pelas quais o método de construção é conhecido. Essas falhas nas barragens a jusante incluem a falha de uma barragem de rejeitos na fábrica Ajka Alumina na Hungria em 2010, que liberou 1 milhão de metros cúbicos de rejeitos, resultando em 10 mortes. Existem dois casos conhecidos adicionais de falhas de barragens, para os quais a barragem começou como uma barragem a montante, embora alteamentos posteriores usaram o método a montante (World Mine Tailings Failures, 2019). Esses dois casos são a falha de uma barragem de propriedade da AngloGold Ashanti em Crixás, Goiá, em 1994 (ver Tabela 1), e a barragem que falhou perto de Baia Mare, Romênia, em 2000, liberando 100.000 metros cúbicos de água contaminada por cianeto.

Uma abordagem é considerar o número de barragens de rejeitos construídas por cada método no Brasil, que tem sido bastante bem documentado (Agência Nacional de Mineração, 2019a), e assumir que essas mesmas porcentagens se aplicam aproximadamente ao resto do mundo. Das 769 barragens de rejeitos no Brasil, 152 foram construídas usando o método a jusante, enquanto 81 barragens têm um método de construção desconhecido, de modo que as barragens a jusante compreendem 22% das barragens com um método de construção conhecido. Comparado com os 14% de todas as falhas globais pelas quais o método de construção é conhecido, parece que as barragens a jusante podem ser duas vezes mais seguras que as outras, mas certamente não uma ordem de magnitude (dez vezes) mais segura. Nessa base, pode-se supor que o método de construção a jusante reduz a probabilidade anual para 0,05%, mas não menor.

Não é possível quantificar objetivamente, com base na história passada de falhas nas barragens de rejeitos, a probabilidade aumentada de falha devido aos quatro fatores prejudiciais do excesso de água, nenhum estudo sísmico, nenhuma análise de estabilidade sísmica e a presença de falhas geológicas cruzadas no local proposto para a barragem de rejeitos. Simplificando, não há banco de dados de barragens de rejeitos para as quais não foram realizados estudos sísmicos. Por outro lado, do ponto de vista subjetivo, os quatro fatores prejudiciais são tão prejudiciais que devem aumentar a probabilidade anual de falha em pelo menos uma ordem de magnitude. Assim, a combinação do fator positivo da construção a jusante e dos quatro fatores prejudiciais leva a uma probabilidade anual de falha de pelo menos 0,5%.

Uma probabilidade de falha da barragem de rejeitos de 0,5% por ano não seria aceitável em qualquer circunstância. Essa probabilidade seria equivalente a uma falha numa barragem de rejeitos no Brasil a cada três meses (com base em 769 barragens de rejeitos no Brasil). Essa probabilidade é muito maior do que a exigência da FEMA (2005) de desenho de barragens mesmo com Potencial de baixo perigo para suportar um terremoto com um período de retorno de 10.000 anos (correspondendo à probabilidade anual de excedência de 0,01%). Uma probabilidade anual de falha de 0,5% seria equivalente a uma probabilidade de falha de 5,8%

durante pelo menos um ano dos 12 anos da operação de mineração. Obviamente, a possibilidade de falha da barragem de rejeitos não termina quando a operação de mineração termina. A possibilidade de falha da barragem termina somente quando a barragem seja colocada em um estado de estabilidade permanente, sem necessidade de nenhum monitoramento, inspeção ou manutenção adicional. Como já discutido, atualmente, não há planos para alcançar tal estado permanente.

### ***Desafios Técnicos de Rejeitos Filtrados***

A empresa controladora, Belo Sun Mining, aparentemente já decidiu que o plano atual para o Projeto Volta Grande é inviável. Em várias comunicações corporativas em 2019, a empresa declarou que estava abandonando o plano atual em favor de uma instalação de armazenamento de rejeitos filtrados. Em 30 de janeiro de 2019, o Presidente e Presidente Executivo da Belo Sun Mining escreveu para a MiningWatch Canada, “*As you may know the Government of Brazil, Minister of Environment, Mr. Ricardo Salles stated (29 Jan 2019) that mining companies must look for alternatives to wet tailings. Belo Sun has been undertaking the test work and engineering on a filtered tailing (dry stack) prior to the Brumadinho accident, and will be complying with this mandate and plan to modify our tailing disposal to a filtered (dry stack) system that will not require a retaining dam... We feel that the mining industry needs to move away from wet tailings and Belo Sun will be moving to present to the government ministries a filtered and stacked system for the Volta Grande Project*” [Como você deve saber, o Ministro do Meio Ambiente do Governo do Brasil, Sr. Ricardo Salles afirmou (29 de janeiro de 2019) que as empresas de mineração devem procurar alternativas para rejeitos úmidos. A Belo Sun estava realizando o trabalho de teste e engenharia em um rejeito filtrado (pilha seca) antes do acidente de Brumadinho, e estará cumprindo este mandato e planejará modificar nossa deposição de rejeitos para um sistema filtrado (pilha seca) que não exigirá uma barragem de retenção... Consideramos que o setor de mineração precisa se afastar dos rejeitos úmidos e a Belo Sun se moverá para apresentar aos ministérios do governo um sistema filtrado e empilhado para o Projeto Volta Grande] (Belo Sun Mining, 2019a). Em informações fornecidas aos investidores em maio de 2019, a Belo Sun Mining (2019b) escreveu que, durante os primeiros três meses de 2019, “*the Company engaged SRK to undertake a scoping study to review dry stack [filtered] tailings storage*” [a empresa contratou a SRK para realizar um estudo de escopo para revisar o armazenamento de rejeitos de pilha seca [filtrados]]. Por fim, um slide de uma apresentação de julho de 2019 para investidores indica sob o título “*Engineering Optimization*” [Otimização de engenharia] o ponto de marcador “*Dry stack filtered tailings*” [Rejeitos filtrados de pilha seca] (Belo Sun Mining, 2019c).

Se deve notar que o Presidente e CEO da Belo Sun Mining está incorreto ao afirmar que os rejeitos filtrados não requerem uma barragem. Geralmente, as instalações de rejeitos filtrados são construídas com um aterro externo de rejeitos compactados (às vezes chamado de “zona estrutural”) que envolve um núcleo interno de rejeitos não compactados ou levemente compactados. A zona estrutural cumpre exatamente a mesma função que uma barragem, ou seja, é uma estrutura de engenharia que impede o fluxo de água ou outros materiais. Klohn Crippen Berger (2017) enfatizou que “*if filtered tailings are placed in a stand-alone facility (pile/stack), the outer slopes must maintain structural stability (similar to a dam or a waste dump), particularly under seismic loading conditions*” [se os rejeitos filtrados forem colocados em uma instalação independente (pilha/monte), as ladeiras externas devem manter a estabilidade

estrutural (semelhante a uma barragem ou lixão), principalmente em condições de carregamento sísmico].

O núcleo interno de uma instalação de rejeitos filtrados é, de fato, um requisito para o armazenamento de rejeitos que deixaram a planta de filtragem com muita água para compactação adequada. Crystal et al. (2017) enfatizaram que o teor de água alvo para rejeitos filtrados raramente é alcançado. De acordo com Crystal et al. (2017), “*Commonly, projects are specifying (or promising) a target filter-cake moisture at the limit of the filter performance (including at the limit of the thickener’s ability to deliver feed at the required solids ratio). This has caused numerous examples where the operating performance does not consistently meet the target... Essentially, irrespective of site, ore body type, or filter press manufacturer, a 15% moisture content remains a typical target, while tracking of day-in and day-out moisture contents of filter cakes demonstrates that achievable moisture contents are often in the range of 17 to 18% when things are running smoothly and can be up to 20 to 23% when off-spec... ‘Targets’ may be cited or promised, but achievable filter cake moisture contents and the variability of the process are not generally within the tailings engineer’s control*” [Geralmente, os projetos estão especificando (ou prometendo) uma umidade alvo de bolo de filtração no limite do desempenho do filtro (inclusive no limite da capacidade do espessador de fornecer alimentação na proporção de sólidos necessária)... Essencialmente, independentemente do local, tipo de corpo de minério ou fabricante da prensa de filtro, um teor de umidade de 15% continua a ser um alvo típico, enquanto o rastreamento diário do teor de umidade dos bolos de filtração demonstra que o teor de umidade atingível geralmente está na faixa de 17 a 18% quando as coisas estão funcionando sem problemas e pode chegar a 20 a 23% quando fora das especificações... Os ‘alvos’ podem ser citadas ou prometidas, mas o teor de umidade alcançável do bolo de filtração e a variabilidade do processo geralmente não estão sob o controle do engenheiro de rejeitos]. A solução é separar um núcleo interno (uma região distante das ladeiras externas) para a colocação de rejeitos que não podem ser compactados e confinar o núcleo interno com uma zona estrutural (uma barragem). Crystal et al. (2017) continuam, “*The tailings engineer can, however, specify acceptable moisture contents for different areas of the dry stack, depending on stacking strategies. For example, external structural zones may have more stringent criteria than non-structural zones, for which reduced constraints may be allowed*” [O engenheiro de rejeitos pode, no entanto, especificar um teor de umidade aceitável para diferentes áreas da pilha seca, dependendo das estratégias de empilhamento. Por exemplo, zonas estruturais externas podem ter critérios mais rigorosos que zonas não estruturais, para as quais restrições reduzidas podem ser permitidas]. Os três autores de Crystal et al. (2017) são todos funcionários da SRK Consulting, que foi contratada pela Belo Sun Mining para projetar a instalação de armazenamento de rejeitos filtrados (Belo Sun Mining, 2019b) e o documento está disponível no website SRK Exploration Services [Serviços de Exploração SRK].

Embora a transição para uma instalação de armazenamento de rejeitos filtrados seja, sem dúvida, um passo em uma direção positiva, esse plano ainda precisaria superar vários desafios técnicos. A seguir, são apresentados alguns dos desafios que ainda precisam ser abordados:

- 1) Dada a dificuldade atual de alcançar o teor de água ideal para uma compactação adequada, a dificuldade se torna ainda mais aguda em áreas de alta precipitação. Mesmo que os rejeitos deixem as prensas de filtro com o teor de água adequado, eles ainda podem ser molhados novamente pela precipitação e, assim, ficarem úmidos demais para mesmo compactação parcial. Portanto, será necessário ter espaço de armazenamento temporário suficiente para os rejeitos filtrados que precisarão secar antes da compactação.

- 2) Em uma área com altas chuvas, será crucial evitar o novo humedecimento dos rejeitos após o armazenamento na instalação de rejeitos filtrados. No mínimo, isso exigirá canais de desvio apropriados para impedir a entrada de escoamento superficial nos rejeitos filtrados.
- 3) Se o reservatório de rejeitos não for mais usado como um meio de capturar o escoamento superficial, outra fonte de água para a operação de mineração deve ser encontrada.
- 4) Ainda será necessário realizar estudos sísmicos locais e regionais e desenhar a instalação de armazenamento de rejeitos filtrados para que possa suportar o Terremoto Máximo Credível (TMC).

O aspecto inquietante dessa transição declarada para rejeitos filtrados é que a Belo Sun Mineração forneceu as informações opostas às organizações e autoridades reguladoras brasileiras. Em sua apresentação à FUNAI em outubro de 2019, Belo Sun Mineração (2019) descreveu o mesmo plano de armazenamento de rejeitos úmidos descrito no EIA de 2016. É mais inquietante que os dois Estudos de Componentes Indígenas (JGP Consultoria e Participações, 2020a-b) também descrevam o mesmo plano de armazenamento de rejeitos úmidos descrito no EIA de 2016. Este fornecimento de informações contraditórias a diferentes públicos pela Belo Sun Mining e pela sua subsidiária brasileira não é tranquilizador.

## CONCLUSÕES

As principais conclusões deste relatório podem ser resumidas da seguinte forma:

- 1) O uso do reservatório de rejeitos para captura do escoamento superficial é contrário à tendência do setor de mineração de reduzir a água armazenada nos reservatórios de rejeitos, a fim de reduzir tanto a probabilidade e quanto as consequências da falha da barragem.
- 2) A barragem de rejeitos não foi desenhada para nenhum critério de segurança sísmica, violando os regulamentos brasileiros das barragens de rejeitos.
- 3) Não houve estudo da sismicidade local ou regional, embora falhas geológicas cruzadas tenham sido mapeadas no local da barragem de rejeitos proposta, o que também viola os regulamentos brasileiros das barragens de rejeitos.
- 4) A reciclagem do lixiviado de cianeto pode resultar em água de rejeitos altamente enriquecida em antimônio, arsênico e mercúrio.
- 5) No cenário mais provável da falha de barragem (liberação de 28% dos rejeitos armazenados), o fluxo inicial de rejeitos cobriria 41 quilômetros ao longo do rio Xingu, com impacto significativo na terra indígena Arara de Volta Grande do Xingu. No pior cenário (liberação de 100% dos rejeitos armazenados), o fluxo inicial cobriria 98 quilômetros ao longo do rio Xingu. Após o evento inicial, processos fluviais normais transportariam os rejeitos para o rio Amazonas e o Oceano Atlântico.
- 6) Não há planos para o fechamento seguro da barragem de rejeitos, exceto a drenagem da água livre para um lago de contenção de água.
- 7) A probabilidade anual de falha da barragem de rejeitos seria de pelo menos 0,5%, o que é inaceitavelmente alta.
- 8) Embora a empresa de mineração tenha declarado aos investidores que abandonarão o plano atual de armazenamento de rejeitos úmidos em favor de rejeitos filtrados, ainda existem desafios técnicos significativos para o armazenamento de rejeitos filtrados em áreas com alta precipitação.

- 9) É inquietante que a empresa de mineração tenha fornecido as informações contraditórias sobre seu plano de armazenamento de rejeitos aos investidores e às autoridades reguladoras brasileiras.

## **RECOMENDAÇÕES**

Com base na alta probabilidade de falha da barragem de rejeitos proposta, o Projeto de Ouro Volta Grande deve ser rejeitado pelas autoridades reguladoras brasileiras sem consideração adicional. Simplesmente o fornecimento de informações conflitantes aos investidores e às autoridades reguladoras brasileiras deve ser motivo suficiente para rejeição.

## **RECONHECIMENTOS**

Sou grato a Kirsten Francescone, da MiningWatch Canada, por me fornecer um e-mail do Presidente e Presidente Executivo da Belo Sun Mining.

## **SOBRE O AUTOR**

O Dr. Steven H. Emerman tem um B.S. em Matemática pela Universidade Ohio State, M.A. em Geofísica pela Universidade Princeton, e Ph.D. em Geofísica da Universidade Cornell. O Dr. Emerman tem 31 anos de experiência no ensino de hidrologia e geofísica e tem 66 publicações revisadas por pares nessas áreas. O Dr. Emerman é o proprietário da Malach Consulting, especializada em avaliar os impactos ambientais da mineração para empresas de mineração, bem como organizações governamentais e não-governamentais.

## **REFERÊNCIAS**

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2017. Mineração – e laboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos: Norma Brasileira ABNT NBR 13028, 3<sup>a</sup> ed., 22 p.

Agência Nacional de Mineração, 2017. Portaria Nº 70.389, de 17 de Maio de 2017, 40 p.  
Disponível online em: <http://www.anm.gov.br/acesso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-70-389-de-2017/view>

Agência Nacional de Mineração, 2019a. Cadastro Nacional de Barragens de Mineração.  
Disponível online em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao/classificacao-oficial-anm/view>

Agência Nacional de Mineração, 2019b. Resolução Nº 4, de 15 de Fevereiro de 2019, 1 p.  
Disponível online em: [http://www.in.gov.br/materia-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056](http://www.in.gov.br/materia-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056)

ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams [Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens]), 2012. Guidelines on tailings dams—Planning, design, construction, operation and closure [Diretrizes sobre barragens de rejeitos—Planejamento, projeto, construção, operação e fechamento], 84 p. Disponível online em:  
<https://www.resolutionmineis.us/sites/default/files/references/ancold-2012.pdf>

Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2019. Legislação Mineira (Lei 23291, de 25/02/2019).

Disponível online em:

<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=23291&ano=2019>

Australian Government [Governo Australiano], 2016. Tailings management—Leading practice sustainable development program for the mining industry [Gerenciamento de rejeitos—Programa de principais práticas para o desenvolvimento sustentável para a indústria de mineração], 128 p. Disponível online em:

<https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-04/lpsdp-tailings-management-handbook-english.pdf>

Belo Sun Mineração, 2019. Apresentação Funai Outubro 2019, 56 p.

Belo Sun Mining, 2019a. Management's discussion and analysis for the three months ended March 31, 2019 [Discussão e análise da administração para os três meses findos em 31 de março de 2019], 24 p. Disponível online em:

[https://www.belosun.com/\\_resources/financials/BSX\\_MDA\\_Q1\\_2019.pdf](https://www.belosun.com/_resources/financials/BSX_MDA_Q1_2019.pdf)

Belo Sun Mining, 2019b. Developing the open pit Volta Grande Gold Project, Brazil—The largest undeveloped gold deposit in Brazil [Desenvolvimento do Projeto de Ouro Volta Grande a céu aberto, Brasil—o maior depósito de ouro não desenvolvido do Brasil], 24 p. Disponível online em: [https://www.belosun.com/\\_resources/presentations/Belo-Sun-Corporate-Presentation-July-2019.pdf](https://www.belosun.com/_resources/presentations/Belo-Sun-Corporate-Presentation-July-2019.pdf)

Belo Sun Mining, 2019c. Question regarding tailings dam [Pergunta sobre barragem de rejeitos]: E-mail de P. Tagliamonte (Presidente e Presidente Executivo, Belo Sun Mining) para K. Francescone (MiningWatch Canada) em 30 de janeiro de 2019.

Brandt Meio Ambiente, 2016a. Projeto Volta Grande—Senador José Porfírio - PA—Licença de Instalação Processo 5340/2015—Atendimento à Notificação N. 91205-GEMIM-CMINA-DLA-SAGRA-2016—Sumário Executivo, 40 p.

Brandt Meio Ambiente, 2016b. Projeto Volta Grande—Belo Sun Mineração Ltda.—Senador José Porfírio - PA—3.1 - Programas do meio físico, 1190 p.

Brandt Meio Ambiente, 2016c. Projeto Volta Grande—Belo Sun Mineração Ltda.—Senador José Porfírio - PA—Capítulo 1—Identificação do empreendor e da empresa de consultoria—Histórico do empreendimento—Caracterização do empreendimento, 644 p.

Canadian Dam Association [Associação Canadense de Barragens], 2013. Dam safety guidelines 2007 (2013 edition) [Diretrizes de segurança de barragens 2007 (edição 2013)], 88 p.

Chubb, D., A. Cleugh, J.-F. Couture, P. Franca, S. Gueorguiev, O. Leuangthong, A. Luz, G. Wahl, L. Weierhäuser, and G. Zurowski, 2015. Feasibility study on Volta Grande Project, Pará, Brazil [Estudo de viabilidade do Projeto Volta Grande, Pará, Brasil]: NI 43-101 Technical Report [Relatório Técnico], Relatório à Belo Sun Mining, 484 p. Disponível online em: [https://www.belosun.com/staging/belosun.com/\\_resources/Feasibility-Study-Volta-Grande-Project.pdf](https://www.belosun.com/staging/belosun.com/_resources/Feasibility-Study-Volta-Grande-Project.pdf)

Crystal, C., C. Hore, e I. Ezama. Filter-pressed dry stacking—Design considerations based on practical experience [Empilhamento a seco prensado por filtro—Considerações sobre o projeto com base na experiência prática]: Tailings and Mine Waste 2018 [Rejeitos e Resíduos de Minas 2018], 11 p. Disponível online em:

<https://www.srkexploration.com/en/publication/na-filter-pressed-dry-stacking-design-considerations-based-practical-experience>

- Davies, M.P., 2002. Tailings impoundment failures—Are geotechnical engineers listening? [Falhas na contenção de rejeitos—Os engenheiros geotécnicos estão prestando atenção?]: Geotechnical News, November 2002, pp. 31-36.
- Department of Water and Sanitation (South Africa) [Departamento de Água e Saneamento (África do Sul)], 2016. Benchmarks for water conservation and water demand management (WC/WDM) in the mining sector [Referências para conservação da água e gerenciamento da demanda de água no setor de mineração], 76 p. Disponível online em: <https://www.mineralscouncil.org.za/work/environment/environmental-resources>
- DoITPoMS (Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science [Divulgação de TI para a Promoção da Ciência dos Materiais]), 2019. Liquefaction [Liquefação]. Disponível online em: [https://www.doitpoms.ac.uk/tplib/granular\\_materials/liquefaction.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tplib/granular_materials/liquefaction.php)
- FEMA ((U.S.) Federal Emergency Management Agency [(EUA) Agência Federal de Gerenciamento de Emergências]), 2005. Federal guidelines for dam safety—Earthquake analyses and design of dams [Diretrizes federais para segurança de barragens—Análise de terremotos e desenho de barragens]: FEMA-65, 75 p. Disponível online em: <https://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/fema-65.pdf>
- FEMA ((U.S.) Federal Emergency Management Agency [(EUA) Agência Federal de Gerenciamento de Emergências]), 2013. Selecting and accommodating inflow design floods for dams [Seleção e acomodação de inundações de desenho de influxo para barragens]: FEMA-94, 38 p. Disponível online em: [https://www.fema.gov/media-library-data/1386108128706-02191a433d6a703f8dbdd68cde574a0a>Selecting\\_and\\_Accommodating\\_Inflow\\_Design\\_Floods\\_for\\_Dams.PDF](https://www.fema.gov/media-library-data/1386108128706-02191a433d6a703f8dbdd68cde574a0a>Selecting_and_Accommodating_Inflow_Design_Floods_for_Dams.PDF)
- Franca, P., 2018. As novas normas NBR ABNT 13.028 e 13.029 e seus efeitos no setor mineral: Apresentação em 17º Congresso Brasileiro de Mineração, 19 p. Disponível online em: <https://fdocuments.net/document/as-novas-normas-nbr-abnt-13028-e-13029-da-apresentacao-historico-de-elaboracao.html>
- Gunson, A.J., 2013. Quantifying, reducing and improving mine water use [Quantificando, reduzindo e melhorando o uso de água nas minas]: Ph.D. dissertação, University of British Columbia, Vancouver, BC, 285 p. Disponível online em: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0071942>
- Higgins, T., 2020. Belo Monte boondoggle—Brazil's biggest, costliest dam may be unviable [Solvedouro Belo Monte—A maior e mais cara barragem do Brasil pode ser inviável]: Mongabay—News & Inspiration from Nature's Frontline, 17 de janeiro de 2020. Disponível online em: <https://news.mongabay.com/2020/01/belo-monte-boondoggle-brazils-biggest-costliest-dam-may-be-unviable/>
- ICOLD (International Commission on Large Dams [Comissão Internacional de Grandes Barragens]) e UNEP (United Nations Environment Program [Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente]), 2001. Tailings dams risk of dangerous occurrences—Lessons learnt from practical experiences [Risco de ocorrências perigosas de barragens de rejeitos—Lições aprendidas de experiências práticas]: Boletim 121, 146 p. Disponível online em: <https://ussdams.wildapricot.org/resources/Documents/ICOLD%202001%20Bulletin%2021.pdf>
- Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel [Painel de Revisão e Investigação Engenharia de Peritos Independentes], 2015. Report on Mount Polley

Tailings Storage Facility breach [Relatório sobre a brecha da instalação de armazenamento de rejeitos de Mount Polley]: Relatório ao Ministry of Energy and Mines e Soda Creek Indian Band [Ministério da Energia e Minas e Tribo Indígena Soda Creek], 156 p. Disponível online em:

<https://www.mountpolleyreviewpanel.ca/sites/default/files/report/ReportonMountPolleyTailingsStorageFacilityBreach.pdf>

International Cyanide Management Institute [Instituto Internacional de Gerenciamento de Cianeto], 2020. International Cyanide Management Code—For the Gold Mining Industry [Código Internacional de Gerenciamento de Cianeto—Para o Setor de Mineração de Ouro. Disponível online em: <https://www.cyanidecode.org/>

Jeyapalan, J.K., 1981. Flow failures of some mine tailings dams [Falhas no fluxo de algumas barragens de rejeitos de minas]: Geotechnical Engineering, v. 12, pp. 153-166.

JGP Consultoria e Participações, 2020a. Projeto Volta Grande—Estudo do Componente Indígena (ECI) – Terra Indígena Paquiçamba: Processo FUNAI Nº 08620.19136/2012-40, 816 p.

JGP Consultoria e Participações, 2020b. Projeto Volta Grande—Estudo do Componente Indígena (ECI) – Terra Indígena Arara da Volta Grande do Xingu: Processo FUNAI Nº 08620.19136/2012-40, 593 p.

Klohn Crippen Berger, 2017. Study of tailings management technologies [Estudo das tecnologias de gerenciamento de rejeitos]: Relatório à Mining Association of Canada e Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program [Associação Canadense de Mineração e Programa de Drenagem Neutra para o Ambiente de Mineração, Relatório MEND 2.50.1, 164 p. Disponível online em: [http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings\\_Management\\_TechnologiesL.pdf](http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf)

Larrauri, P.C. e Lall, U., 2018. Tailings dams failures—Updated statistical model for discharge volume and runout [Falhas nas barragens de rejeitos—Modelo estatístico atualizado para volume de descarga e distância do evento inicial]: Environments, v. 5. Disponível online em: doi:10.3390/environments5020028.

Leopold, L., 1994. A view of the river [Uma vista para o rio]: Harvard University Press, Cambridge, MA, 298 p.

MacDonald, A., K. Maher, e K. Mackrael, 2019. ‘Sense of dread’—How a mining disaster in Brazil raised alarms in Minnesota [‘Senso de pavor’—como um desastre de mineração no Brasil despertou alarmes em Minnesota]: Wall Street Journal, 14 de outubro de 2019. Disponível online em: <https://www.wsj.com/articles/minnesotas-iron-range-likes-its-miners-a-deadly-brazil-disaster-is-giving-it-pause-11571064180>

Ministerio de Minería (Chile) [Ministério de Minas (Chile)], 2007. Decreto Supremo nº 248—Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves—publicado en el Diario Oficial el 11 de abril de 2007 [Decreto Supremo nº 248 - Regulamento para aprovação de projetos de desenho, construção, operação e fechamento de depósitos de rejeitos—publicado no Diário Oficial em 11 de abril de 2007], 24 p. Disponível online em: [https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248\\_Reglamento\\_DepositosRelave.pdf](https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf)

Mudd, G., 2007a. Gold mining in Australia—Linking historical trends and environmental and resource sustainability [Mineração de ouro na Austrália—Vinculando tendências históricas e sustentabilidade ambiental e de recursos]: Environmental Science & Policy, vol. 10, pp. 629-644.

- Mudd, G., 2007b. Global trends in gold mining—Towards quantifying environmental and resource sustainability[Tendências globais na mineração de ouro—Rumo à quantificação da sustentabilidade ambiental e de recursos]: Resources Policy, vol. 32, pp. 42-56
- Mudd, G., 2007c. Resource consumption intensity and the sustainability of gold mining [Intensidade de consumo de recursos e sustentabilidade da mineração de ouro]: 2<sup>nd</sup> International Conference on Sustainability Engineering & Science [2<sup>a</sup> Conferência Internacional de Engenharia e Ciência da Sustentabilidade], Auckland, Nova Zelândia, 20-23 de fevereiro de 2007. Disponível online em:  
<https://www.thesustainabilitysociety.org.nz/conference/2007/papers/MUDD-Gold-Mining-v-Sustainability.pdf>
- Mudd, G.M., 2010. The environmental sustainability of mining in Australia—Key mega-trends and looming constraints [A sustentabilidade ambiental da mineração na Austrália—Mega-tendências importantes e restrições iminentes]: Resources Policy, vol. 35, pp. 98-115.
- Norgate, T. e N. Haque, 2012. Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production [Usando a avaliação do ciclo de vida para avaliar alguns impactos ambientais da produção de ouro: Journal of Clean Production, vols. 29-30, pp. 53-63.
- Northey, S.A e N. Haque, 2013. Life cycle based water footprint of selected metal production—Assessing production processes of copper, gold and nickel [Pegada hídrica baseada no ciclo de vida da produção de metal selecionada—Avaliação dos processos de produção de cobre, ouro e níquel]: CSIRO, Austrália, 43 p. Disponível online em:  
<https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP137374&dsid=DS3>
- Petley, D., 2019. The speed of the Brumadinho tailings dam landslide [A velocidade do deslizamento da barragem de rejeitos Brumadinho]: AGU100 Blogosphere—The Landslide Blog, 4 de fevereiro de 2019. Disponível online em:  
<https://blogs.agu.org/landslideblog/2019/02/04/brumadinho-tailings-dam-landslide/>
- Sistema Nacional de Información Ambiental (Perú) [Sistema Nacional de Informação Ambiental (Peru)], 2014. Decreto Supremo N° 040-2014-EM .- Reglamento de protección y gestión ambiental para las actividades de explotación, beneficio, labor general, transporte y almacenamiento minero [Decreto Supremo No. 040-2014-EM .- Regulamento de proteção e gerenciamento ambiental para atividades de exploração, benefício, trabalho geral, transporte e armazenamento de minas], 30 p. Disponível online em:  
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-proteccion-gestion-ambiental-las-actividades-explotacion>
- TailPro Consulting, 2018. Conventional Impoundment Storage – The Current Techniques [Armazenamento de contenção convencional – As técnicas atuais]. Disponível online em:  
<https://tailings.info/disposal/conventional.htm>
- Tost, M., B. Bayer, M. Hitch, S. Lutter, P. Moser, e S. Feiel, 2018. Metal mining's environmental pressures—A review and updated estimates on CO<sub>2</sub> emissions, water use, and land requirements [Pressões ambientais da mineração de metais—Uma revisão e estimativas atualizadas das emissões de CO<sub>2</sub>, o uso de água e os requisitos de terra]: Sustainability, vol. 10, 14 p. Disponível online em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2881/htm>
- Ulrich, B.F. e J.G. Coffin, 2017. Characterization of unsaturated tailings & its effects on liquefaction [Caracterização de rejeitos não saturados e seus efeitos na liquefação]:

Tailings and Mine Waste 2017 [Rejeitos e Estériles de Minas de 2017], 10 p. Disponível online em: <http://knightpiesold.com/es/noticias/publicaciones/characterization-of-unsaturated-tailings-its-effects-on-liquefaction/>

USACE (U.S. Army Corps of Engineers [Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA]), 2016. Earthquake design and evaluation for civil works projects [Desenho e avaliação de terremotos para projetos de obras civis]: Engineer Regulation ER 1110-2-1806, 28 p. Disponível online em:  
[https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerRegulations/ER\\_1110-2-1806.pdf](https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerRegulations/ER_1110-2-1806.pdf)

Valencia, A., 2019. Ecuador alista reglas más estrictas para relaves con el fin de evitar desastres ambientales [O Equador lista regras mais rígidas para rejeitos, com o objetivo de evitar desastres ambientais]: Infobae, 26 de novembro de 2019. Disponível online em:  
<https://www.infobae.com/américa/agencias/2019/11/26/ecuador-alista-reglas-mas-estritas-para-relaves-con-el-fin-de-evitar-desastres-ambientales/>

Vick, S.G., 1990. Planning, design, and analysis of tailings dams [Planejamento, desenho e análise de barragens de rejeitos]: BiTech Publishers, Vancouver, Canada, 369 p.

Vick, S.G., 2002. Degrees of belief—Subjective probability and engineering judgement [Graus de crença—Probabilidade subjetiva e julgamento de engenharia]: ASCE Press, Reston, Virginia, 455 p.

VOGBR, 2016a. Projeto Volta Grande—Projeto de viabilidade—Barragem de rejeitos—Relatório técnico: VOGBR No. VG16-191-1-EG-RTE-0001, Relatório à Belo Sun Mineração, 57 p. com quatro Apêndices (47 p.)

VOGBR, 2016b. Projeto Volta Grande—Projeto de viabilidade—Plano de utilização de água do empreendimento—Relatório técnico: VOGBR No. VG16-191-1-EG-RTE-0003, Relatório à Belo Sun Mineração, 17 p. com três Apêndices (46 p.)

WISE (World Information Service on Energy) Uranium Project [Projeto Urânia WISE (Serviço Mundial de Informação sobre Energia)], 2020. Chronology of Major Tailings Dam Failures [Cronologia das Principais Falhas em Barragens de Rejeitos]. Disponível online em: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>

World Mine Tailings Failures [Falhas nos Rejeitos de Minas no Mundo], 2019. World Mine Tailings Failures – From 1915 [Falhas nos Rejeitos de Minas no Mundo – Desde 1915]. Disponível online em: <https://worldminetailingsfailures.org/>