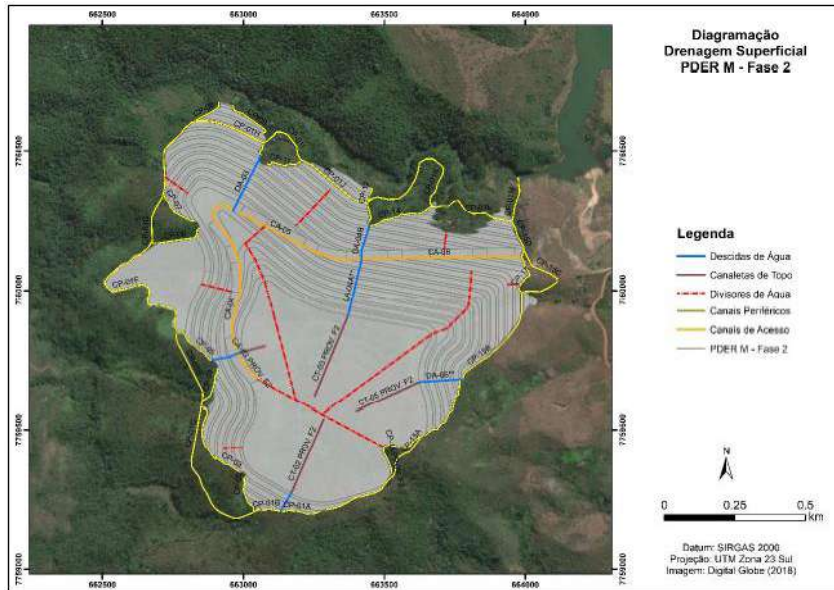


Projeto de Longo Prazo da Samarco
Pilhas PDER M e C - Alguns Aspectos Hidrológicos e Construtivos



Diagramação da drenagem superficial da PDER M - Fase 2
Fonte: INSERÇÃO 7-581 – EIA

1	Acrescentado o Anexo 4. Complementados os Anexos 1 e 3	04/02/2026	ECC	-	JCG
0	PRIMEIRA EMISSÃO	01º /02/2026	ECC	-	JCG
Rev.	Descrição	Data	Elaborado	Verificado 1	Verificado 2
PROJETO/ÁREA	TEMA/SÍTIO	CLASSIFICAÇÃO			REV.
EVENTOS EXTREMOS	ÁREAS DE MINERAÇÃO	EE-AM-NT-13			1
GRUPO	SETOR	DENOMINAÇÃO			FOLHA
COMITÊ TÉCNICO	ENGENHARIA	Projeto de Longo Prazo da Samarco Pilhas PDER M e C - Alguns Aspectos Hidrológicos e Construtivos			1/106





O Fórum Permanente São Francisco (FPSF)

é uma entidade da sociedade civil, um grupo de cidadãos e cidadãs que foi formado três dias depois do rompimento da barragem do Córrego do Feijão, da empresa Vale, em Brumadinho - MG, em janeiro de 2019. Foi criado com o objetivo inicial de dedicar-se à segurança e à qualidade de vida da população que vive em áreas de mineração no Estado de Minas Gerais. Posteriormente expandiu sua área de atuação para englobar as questões mais abrangentes ligadas à sustentabilidade e ao meio ambiente. A partir de janeiro de 2023 o FPSF se tornou um Instituto.

Missão

Defesa, preservação e conservação do meio ambiente e do patrimônio histórico-cultural, bem como a promoção do desenvolvimento sustentável.

Desenvolvimento e divulgação de tecnologias alternativas voltadas para a sustentabilidade e para a regeneração. Realização de estudos e pesquisas, produção e divulgação de informações e de conhecimentos técnicos e científicos tendo como base o conceito de ecologia integral. Incentivo ao uso racional dos recursos naturais, com ênfase na segurança hídrica.

Valores

O Fórum Permanente São Francisco (FPSF), no desenvolvimento de suas atividades, tem como fundamento os princípios da legalidade, impessoalidade, moralidade, publicidade, economicidade e eficiência, sem qualquer discriminação de raça, cor, gênero, orientação sexual e religião e sem conotações político-partidárias.

Todos os direitos reservados. É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesse documento, desde que citada a fonte.



1	Resumo Executivo	6
2	Itens Críticos Identificados	7
3	Conclusões	9
4	Objetivo	10
5	Introdução	10
6	Características Principais das Pilhas do Projeto de Longo Prazo	11
7	Considerações sobre Alguns Aspectos dos Critérios Hidrológicos de Projeto das Pilhas	12
7.1	Critérios de Projeto das Pilhas PDER M e PDER C.....	12
7.2	Descrição e Função dos Dispositivos de Drenagem.....	12
7.3	Os Padrões Brasileiros (ABNT NBR 13028 e 13029).....	14
7.4	Comparativo Internacional: Abordagem Baseada em Risco vs. Prescritiva.....	15
7.5	Principais Diferenças e Tendências Globais	16
7.6	Dimensionamento dos Sistema de Drenagem Superficial das Pilhas PDER M e C	16
8	Inconsistências e Lacunas Técnicas dos Critérios Hidrológicos Adotados no EIA	26
8.1	Análise das Inconsistências e Riscos Associados.....	29
8.1.1	Disparidade nos tempos de retorno entre sistemas interdependentes	29
8.1.2	Incompatibilidade entre Vertedouros (PMP) e Drenagem de Alimentação (TR menores) 29	
8.1.3	Drenagem Interna: Fator de Segurança Elevado, mas Baseada em Condições Médias .	29
8.1.4	Critério de Sedimentação Incompatível com o Cenário de Risco.....	30
8.1.5	Análise Compartimentada versus Risco Sistêmico	31
8.1.6	Conclusões	31
8.2	Análise do EIA à Luz da Resolução ANM nº 220/2025 e do Contexto de Mudanças Climáticas 31	
8.2.1	Comparativo Técnicos – Projeto vs. Resolução ANM nº 220/2025.....	32
8.2.2	A Lacuna das Mudanças Climáticas	33
8.2.3	Conclusão.....	34
8.3	Comparativo entre as Prescrições da ABNT NBR 13028-3:2025 e o Apresentado no EIA (2022) 34	
8.3.1	Avaliação da Condição Sísmica e sua Conformidade com a ABNT NBR 13028-3:2025... 36	
8.3.2	A Relação Direta entre Sismos e a Ruptura da Barragem de Fundão	37
8.3.3	Material de comportamento contrátil (<i>contractive material</i>):	38
8.3.4	Comportamento <i>strain-softening</i> x liquefação	39
8.3.5	Conclusões – Avaliação Sísmica, <i>Strain-Softening</i> e Liquefação	39
9	Estudos Hidrológicos do Projeto de Longo Prazo	40

9.1	Fontes dos Dados de Precipitação	40
9.2	Metodologia de Obtenção das Tabelas de Chuva.....	41
9.3	Pontos de Atenção Relevantes	41
9.4	Metodologia de Cálculo dos Valores de Tempo de Retorno (TR).....	43
9.5	Hietogramas de Chuva de Projeto	45
9.6	Metodologia de Obtenção dos Valores de PMP no Documento Pinheiro (2011) e Suas Limitações para Uso Atual.....	46
9.7	Ausência de Consideração das Mudanças Climáticas no Cálculo de PMP.....	47
9.8	Conclusões sobre a PMP	48
10	Histórico de problemas e falhas: casos, mecanismos e lições	48
10.1	O Mecanismo de Falha Primário: O "Efeito Cascata" e a Erosão Regressiva.....	48
10.2	Barragem de Fundão - Falhas no Sistema de Drenagem (2011–2015).....	49
10.3	Deslizamento da Pilha Cachoeirinha e Transbordamento do Dique Lisa – Mina Pau Branco (Vallourec, Jan/2022)	52
10.3.1	Introdução	52
10.3.2	Contexto Operacional e Histórico do Evento	52
10.3.3	Chuva Extrema e Acúmulo na Bacia e Mecânica do Deslizamento da Pilha Cachoeirinha.....	52
10.3.4	Papel de Drenagem e Gestão de Água na Estabilidade da Pilha.....	53
10.3.5	Transbordamento do Dique Lisa	53
10.3.6	Avaliações de Autoridades e Órgãos Oficiais	53
10.3.7	Síntese das Causas do Evento	54
10.4	Outros Exemplos de Rupturas de Pilhas	54
10.5	Principais Causas de Falha, Padrões Comuns e Lições Aprendidas	55
10.6	Referências Consultadas para esse Item	55
11	Características Construtivas e Critérios de Cálculo Adotados para o Projeto de Longo Prazo ...	56
12	Considerações sobre Alguns Aspectos Construtivos das Pilhas PDER M e PDER C	70
12.1	Dificuldades práticas para a compactação.....	70
12.2	Funções da camada de estéril.....	71
12.3	O risco da análise de estabilidade somente drenada	72
12.4	Critério de filtro e erosão interna (piping).....	73
12.5	Rejeito arenoso x erosão na PDER C	74
12.6	Permeabilidade diferencial	74
12.7	Dificuldades operacionais para o lançamento dos rejeitos	75
12.8	Conclusões	75
13	Pilhas – Uma Técnica que Também Apresenta Consideráveis Riscos	76
14	Revisão Geral do Projeto de Longo Prazo e do EIA.....	78

15	Referências Bibliográficas.....	80
	ANEXO 1 - NÃO CONFORMIDADE DO PROJETO PDER M E PDER C COM A ABNT NBR 13028-3:2025 QUANTO À AVALIAÇÃO DE RISCO DE LIQUEFAÇÃO E COMPORTAMENTO STRAIN-SOFTENING	82
	ANEXO 2 - NÃO CONFORMIDADE DO PROJETO PDER M E PDER C COM A ABNT NBR 13028-3:2025 QUANTO ÀS ANÁLISES DE ESTABILIDADE ESTÁTICA E À VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO PÓS-PICO/RESIDUAL (TABELA 1 DA NORMA).....	91
	ANEXO 3 – LISTA RESUMIDA DAS NÃO CONFORMIDADE DO PROJETO PDER M E PDER C ABORDADAS NO PRESENTE DOCUMENTO.....	94
	ANEXO 4 - INFORMAÇÕES E LACUNAS SOBRE SONDAGENS E PREPARAÇÃO DA BASE DAS PILHAS DE REJEITO NO EIA – PDER M E PDER C.....	102
2.1	Sondagens	102
2.2	Preparação da Base (Tratamento de Fundação).....	103
2.3	Sequenciamento Construtivo (Itens 7.7.2.7.2 e 7.7.2.8.2)	103

1 Resumo Executivo

Esta Nota Técnica (FPSF-NT-13-2026) realiza uma análise crítica dos principais critérios hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos e construtivos propostos para as Pilhas de Disposição de Estéreis e Rejeitos (PDER M e PDER C) do Projeto de Longo Prazo da Samarco no Complexo Germano (MG). O estudo, conduzido pelo Instituto Fórum Permanente São Francisco (FPSF), confronta os parâmetros e metodologias descritos no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de 2022 com as melhores práticas da engenharia nacional e internacional, as normas técnicas vigentes (em especial a recém-publicada ABNT NBR 13028-3:2025) e o imperativo de considerar os efeitos das mudanças climáticas.

A análise revela um conjunto de inconsistências, lacunas técnicas e potenciais subdimensionamentos que, em conjunto, representam um risco sistêmico à segurança das estruturas e, por consequência, ao meio ambiente e às comunidades do entorno. Entre os pontos críticos identificados, destacam-se:

- **Critérios Hidrológicos Desatualizados:** O projeto baseia-se em séries históricas de precipitação que terminam em 2010 e em eventos extremos registrados até 2007, não incorporando dados recentes nem as projeções de intensificação de eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas. A metodologia de cálculo da Precipitação Máxima Provável (PMP) e dos Tempos de Retorno (TR) é considerada ultrapassada e não conservadora.
- **Inconsistências no Dimensionamento Hidráulico:** O sistema de drenagem superficial, especialmente os canais periféricos, apresenta problemas conceituais no cálculo e resultados que indicam, para a maioria dos canais, condições operacionais de risco (velocidade excessiva, número de Froude próximo ou superior a 1, borda livre insuficiente). A abordagem "parcimoniosa" adotada não é adequada para estruturas de alto dano potencial.
- **Lacunas Críticas nas Análises Geotécnicas:** O EIA omite análises essenciais para a segurança sísmica e de longo prazo das pilhas, como: i) avaliação da suscetibilidade à liquefação cíclica (mecanismo presente no rompimento de Fundão); ii) análise de estabilidade em condição estática e para a mobilização da resistência pós-pico/residual (*strain-softening*), exigidas pela ABNT NBR 13028-3:2025; e iii) análises em condição não drenada associadas a saturação por chuvas extremas.
- **Desafios Construtivos Subestimados:** O projeto não detalha metodologias para garantir a compactação uniforme ($\geq 97\%$) nas zonas críticas das pilhas, como bordas e taludes, especialmente na PDER C, que não terá envelope de estéril. A viabilidade operacional de manter o teor de umidade ótima (15,3%) ao longo de décadas, considerando a sazonalidade climática e a disposição temporária em pilhas "pulmão", é questionável e não foi adequadamente analisada.
- **Não Conformidade com o Novo Marco Normativo:** O projeto, licenciado com base em normas já revogadas (ABNT NBR 13028/13029:2017), não atende aos requisitos mais rigorosos da Resolução ANM 220/2025 e da ABNT NBR 13028-3:2025, que tratam especificamente de pilhas de rejeitos desaguados e exigem classificação de risco, análises integradas e gestão de riscos robusta.

Este documento conclui que o Projeto de Longo Prazo, na forma como apresentado no EIA de 2022, não demonstra o nível de segurança necessário para estruturas de tal magnitude e

potencial de dano, localizadas em uma região de sensibilidade ambiental extrema e com histórico trágico.

A documentação técnica do Projeto de Longo Prazo da Samarco utilizada no licenciamento ambiental foi elaborada predominantemente em nível de projeto conceitual, com diversos parâmetros geotécnicos, hidrológicos e construtivos explicitamente indicados como sujeitos a confirmação posterior em projeto básico. O Parecer Único FEAM-SEMAD considerou a documentação apresentada formalmente suficiente e deferiu o licenciamento concomitante (LP+LI+LO), sem exigir projeto básico consolidado. Contudo, as revisões técnicas necessárias identificadas nesta Nota Técnica podem levar a mudanças substanciais de arranjo, dimensionamento e métodos construtivos, potencialmente caracterizando novo projeto e exigindo nova avaliação ambiental baseada em projeto básico completo, consolidado conforme as normas e diretrizes internacionais atuais.

2 Itens Críticos Identificados

A seguir é apresentada, de forma resumida e indicativa, a descrição de 10 itens relacionados às pilhas PDER M, PDER C e estruturas diretamente a elas associadas, itens esses considerados no presente documento como sendo os de impacto mais significativo na segurança do empreendimento, ou seja, os que resultam em maiores riscos socioambientais. Uma lista mais completa pode ser consultada no **Anexo 3**.

Essas listas devem ser tomadas apenas como um complemento ao Resumo Executivo, uma vez que o detalhamento dos itens, apresentado ao longo de todo o documento, é fundamental para a compreensão do seu significado técnico e suas implicações nos riscos construtivos, operacionais e de longo prazo, enquanto existirem as pilhas e as demais estruturas a elas associadas.

O presente trabalho é limitado ao seu conteúdo, sem intenção de apresentar uma análise global do EIA do Projeto de Longo Prazo da Samarco.

1. O EIA não incorpora cenários de mudanças climáticas no dimensionamento hidrológico e adota como base o documento Pinheiro (2011), que estimou TR e PMP sob pressuposto de estacionariedade hidrológica, com base em eventos extremos registrados apenas até 2007 (PMP 24h) e 2003 (durações superiores), sem considerar a intensificação e alteração dos padrões pluviométricos das última décadas nem as projeções para o futuro usando cenários como os do IPCC.
2. O EIA não detalha metodologias construtivas específicas para garantir a compactação efetiva ($\geq 97\%$) nas zonas críticas das pilhas, como bordas e taludes. Para a PDER M, com envelope de estéril, não são descritas técnicas de confinamento lateral para assegurar compactação adequada nas bordas. Para a PDER C, sem envelope que possa ser usado como confinamento, não são apresentadas soluções construtivas alternativas para garantir integridade e estabilidade dos taludes de rejeito. Esta omissão aumenta substancialmente o risco de formação de zonas fracas, desencadeamento de erosão regressiva e instabilidades superficiais, comprometendo a segurança global das estruturas desde as fases iniciais de construção.
3. Os cenários TR 1.000 anos, TR 10.000 anos e PMP foram calculados tão somente para verificação de canais periféricos, mas o EIA não define qual cenário será adotado no dimensionamento final. Os demais dispositivos de drenagem (topo, bermas, acessos e descidas d'água) foram dimensionados apenas para TR 100 anos.
4. As análises de estabilidade consideram predominantemente condição drenada e condicionam a segurança à manutenção de compactação uniforme $\geq 97\%$ em todo o maciço

durante todo o tempo de existência das pilhas. Não são apresentadas análises de estabilidade em condição não drenada associadas a eventos críticos de chuva e saturação, nas quais a resistência pode se reduzir significativamente.

5. Não foram apresentados estudos de suscetibilidade à liquefação cíclica dos rejeitos das pilhas. Essa omissão exclui um mecanismo de perda rápida de resistência associado a carregamentos cíclicos provocados por sismos, mesmo de baixa magnitude, e aumento de poropressões em materiais finos e saturados, já observado no rompimento de Fundão.
6. A drenagem interna das pilhas é dimensionada com base em balanço hídrico de condições médias de longo prazo, sem vinculação direta a eventos extremos de precipitação, o que pode subdimensionar vazões de percolação e favorecer elevação do nível freático interno e das pressões neutras. O uso de um elevado Fator de Segurança ($FS = 10$, conforme o EIA) pode não ser suficiente para que o sistema projetado consiga drenar os picos de percolação, permitindo a rápida elevação do lençol freático interno e o aumento das pressões neutras, fatores que precipitam a instabilidade geotécnica
7. Dados do próprio EIA, usados para recalcular e verificar o dimensionamento dos canais periféricos, mostram que parte relevante dos canais periféricos apresenta combinações de borda livre, velocidade e Número de Froude fora de faixas recomendadas de estabilidade. O uso de critério fixo e único de 20% de borda livre, sem verificação sistemática de regime de escoamento, ressaltos hidráulicos e velocidades de água admissíveis, não assegura desempenho hidráulico estável em eventos intensos, ou seja, não constitui um critério de segurança suficiente. Esta abordagem simplificada não garante que o escoamento permanecerá contido e controlado durante eventos intensos e extremos.
8. A premissa de que compactação $\geq 97\%$ elimina o risco de liquefação não é acompanhada de análise da variabilidade construtiva nem da saturação progressiva do maciço. Na prática, é praticamente inevitável a existência de zonas menos compactadas, e a infiltração de chuvas mais intensas, agravadas pelas mudanças climáticas, pode saturar essas zonas e reativar o potencial de liquefação estática, mecanismo não avaliado nas análises de estabilidade. Não são analisadas de forma suficiente as limitações operacionais de compactação em períodos muito chuvosos, que dificultam o controle da umidade ótima (15%, segundo o EIA). Assim, poderá ser necessário interromper o lançamento e a compactação de rejeitos até que sejam restabelecidas condições climáticas adequadas. A compactação em época de seca poderá ser difícil também, por ressecamento excessivo do estéril. A aspersão de água dificilmente resultará em uniformidade do teor de umidade, o que é essencial para a manutenção das condições de projeto e segurança das pilhas.
9. A princípio, segundo o EIA, a PDER C não terá envelope de estéril semelhante ao da PDER M e o EIA não apresenta análise detalhada das implicações dessa configuração para erosão e estabilidade superficial. Taludes de rejeito exposto são altamente suscetíveis à formação de voçorocas e processos erosivos severos, especialmente sob chuvas mais intensas, comprometendo a geometria da estrutura, assoreando os sistemas de drenagem e podendo evoluir para instabilidades de maior magnitude. O envelope de 40 a 60 cm de material resultante da limpeza das fundações, descrito no EIA não constitui proteção suficiente.
10. A disposição temporária de rejeitos filtrados em pilhas pulmão não cobertas não é analisada quanto aos efeitos na umidade e na qualidade geotécnica do material. Chuvas podem elevar a umidade acima do ótimo de compactação e períodos secos podem causar dessecação e poeira. O EIA também não explicita se os TCLD's (Transportadores de Correia de Longa Distância) são cobertos; se forem expostos, o material pode ganhar ou perder umidade durante o transporte.

3 Conclusões

A análise técnica contida nesta Nota Técnica permite concluir que o Projeto de Longo Prazo da Samarco, no que se refere às Pilhas PDER M e PDER C e estruturas diretamente a elas associadas, apresenta vulnerabilidades técnicas significativas que comprometem a demonstração de sua segurança a longo prazo. As principais conclusões são:

1. **Risco Hidrológico Subestimado:** Os critérios hidrológicos adotados são estáticos, desatualizados e não consideram a não estacionariedade do clima. A base de dados pluviométricos é defasada e a metodologia não incorpora as projeções de intensificação de eventos extremos, representando uma subestimação grave do carregamento hídrico futuro sobre as estruturas devido às mudanças climáticas.
2. **Fragilidade do Sistema de Drenagem:** O dimensionamento hidráulico do sistema de drenagem superficial apresenta inconsistências metodológicas e resultados que indicam operação em condições limítrofes de estabilidade (alto número de Froude, velocidades elevadas). A abordagem simplificada não é apropriada para estruturas críticas, e a falta de uma análise integrada de "passagem segura" (*safe passage*) para eventos além do projeto aumenta o risco de falha catastrófica por erosão regressiva.
3. **Análise Geotécnica Incompleta e Não Conforme:** O EIA não atende aos requisitos mínimos das normas técnicas vigentes, especialmente da ABNT NBR 13028-3:2025, por omitir análises fundamentais: estabilidade em condição estática, avaliação do comportamento pós-pico/residual (*strain-softening*) e estudo de suscetibilidade à liquefação cíclica. A premissa de que a compactação $\geq 97\%$ elimina o risco de liquefação é tecnicamente frágil e ignora a variabilidade construtiva e a saturação progressiva ao longo da vida da estrutura.
4. **Incoerência Sistêmica e Gestão de Riscos Frágil:** A disparidade nos critérios de projeto entre sistemas interligados (drenagem, reservatórios, rio) cria vulnerabilidades sistêmicas e potenciais efeitos em cascata não analisados. O projeto carece de uma análise quantitativa de riscos (AQR) e de um Plano de Segurança de Barragem (PSB) robusto, conforme exigido pela nova regulamentação, para estruturas que se enquadrariam como "empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação".
5. **Desafios Construtivos e Operacionais Não Resolvidos:** O projeto não oferece soluções técnicas detalhadas para garantir a compactação homogênea em zonas críticas, o controle perene da umidade do material e a proteção efetiva contra erosão superficial, especialmente na PDER C. A viabilidade de manter as condições de projeto ao longo de décadas, sob um clima variável, é questionável.

Diante do exposto, **o projeto das PDER M e PDER C, na configuração atual, não pode ser considerado seguro**. Sua implantação, sem a correção das deficiências apontadas, representaria uma repetição de erros do passado e uma ameaça constante ao meio ambiente e às populações do Quadrilátero Aquífero Ferrífero.

O licenciamento foi concedido com base em projeto conceitual, embora o próprio estudo reconheça a necessidade de confirmações e refinamentos típicos de projeto básico. Dada a quantidade e a relevância das revisões técnicas requeridas — com possível alteração de dimensões, localização, sistemas de drenagem e métodos de disposição — é tecnicamente recomendável revisar integralmente o projeto antes da implantação, elaborar projeto básico robusto e, se houver mudanças materiais, submeter o empreendimento a novo licenciamento com EIA fundamentado em engenharia de maior nível de definição e aderente às normas atuais e às boas práticas internacionais.

O novo projeto deverá refletir e garantir a precaução necessária frente às mudanças climáticas e o mais alto padrão de segurança exigível para uma região com o histórico do Complexo Germano.

4 Objetivo

O objetivo desta Nota Técnica é realizar uma análise crítica independente dos critérios de projeto, em especial dos sistemas de drenagem superficial e das considerações geotécnicas, das Pilhas de Disposição de Estéreis e Rejeitos (PDER M e PDER C) propostas no âmbito do Projeto de Longo Prazo da Samarco.

Esta análise visa a:

- Examinar a consistência e a robustez dos parâmetros hidrológicos e hidráulicos adotados no Estudo de Impacto Ambiental (EIA), confrontando-os com as melhores práticas nacionais e internacionais e com as normas técnicas vigentes.
- Identificar inconsistências, lacunas técnicas e potenciais subdimensionamentos nos projetos das estruturas de contenção e drenagem.
- Avaliar a adequação dos estudos geotécnicos face aos mecanismos de falha conhecidos, como liquefação e *strain-softening*, e sua conformidade com a nova ABNT NBR 13028-3:2025 e a Resolução ANM 220/2025.
- Verificar se os efeitos das mudanças climáticas sobre a intensidade e frequência de eventos pluviométricos extremos foram considerados de forma adequada e precaucionária.
- Contribuir para o debate público e para o processo de licenciamento ambiental, fornecendo subsídios técnicos que priorizem a segurança das estruturas, a proteção do meio ambiente e a prevenção de danos às comunidades do entorno.

5 Introdução

O rompimento da Barragem de Fundão, da Samarco, em 2015, constituiu uma tragédia de proporções históricas, expondo as graves consequências de falhas na gestão de riscos e no projeto de estruturas de contenção de rejeitos de mineração. Nesse contexto, o Projeto de Longo Prazo da Samarco, que propõe a disposição de estéril e rejeito filtrado em pilhas (PDER M e PDER C) no Complexo Germano, surge como uma alternativa que, em tese, visa a maior segurança.

O Instituto Fórum Permanente São Francisco (FPSF), instituição dedicada à defesa do meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável, tem acompanhado com atenção o processo de licenciamento deste empreendimento. Reconhecendo a complexidade técnica e o altíssimo potencial de impacto associado a essas novas estruturas, o FPSF entende ser seu papel fomentar uma análise técnica independente, rigorosa e isenta, que vá além da mera verificação de conformidade documental.

Esta Nota Técnica se debruça sobre o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do Projeto de Longo Prazo, com foco nos aspectos hidrológicos, hidráulicos e geotécnicos das PDER's. O trabalho parte do princípio de que, em uma região com a sensibilidade e o histórico do Quadrilátero Aquífero Ferrífero, qualquer nova estrutura deve atender aos mais elevados padrões de segurança, incorporando as lições do passado e as incertezas do futuro, em especial as relacionadas às mudanças climáticas.

A análise foi conduzida confrontando as premissas e metodologias do EIA com o estado da arte da engenharia, as normas técnicas brasileiras recentemente atualizadas e as diretrizes internacionais. O documento está estruturado para apresentar inicialmente um resumo

executivo com os pontos críticos, seguido de uma análise detalhada por tema: critérios hidrológicos, dimensionamento da drenagem, inconsistências técnicas, estudos hidrológicos de base, histórico de falhas, aspectos construtivos e conformidade normativa.

O resultado é um alerta técnico fundamentado: o projeto atual apresenta deficiências que, se não corrigidas, podem comprometer a segurança das pilhas ao longo de sua vida útil, que se estenderá por décadas ou mesmo por séculos. Este documento visa a subsidiar órgãos reguladores, o Ministério Público, a sociedade civil e a própria empresa na busca por um projeto que seja, de fato, seguro e sustentável.

6 Características Principais das Pilhas do Projeto de Longo Prazo

O empreendimento denominado “Longo Prazo” da Samarco é caracterizado da seguinte forma no item 7.1 do doc. do EIA denominado “CARACTERIZAÇÃO EMPR. - ATIVIDADE E ASPECTOS AMBIENTAIS - CONTRATO 1SAMA029 - OS15 - P01 --VF220822-1137-- AGOSTO / 22”:

Basicamente, o empreendimento em pauta, de propriedade da Samarco Mineração S. A., (neste documento será tratada apenas por Samarco) está composto por três blocos de estruturas que interagem entre si, sendo eles:

- Novos avanços de lavra na mina já existente (continuidade da mineração) sem aumento de produção;
- Disposição de estéril e rejeito arenoso em pilhas drenadas, no total de duas novas, denominadas PDER M (localizada no Vale Mirandinha) e PDER C (localizada no Vale de Camargos) e ampliação do SDER Alegria Sul (ampliação de sistema de disposição de estéril e rejeito arenoso drenado já existente).
- Disposição de rejeito (lamas) em cava, denominada Cava Alegria Sul 2;

sendo:

PDER M: Pilha de Disposição de Estéreis e Rejeitos do Vale Mirandinha

PDER C: Pilha de Disposição de Estéreis e Rejeitos do Vale de Camargos

SDER Alegria Sul: Sistema de Disposição de Estéreis e Rejeitos – localizado na Cava de Alegria Sul, no Complexo de Germano da Samarco. Por ser uma estrutura natural e confinada, pode oferecer maior estabilidade e segurança técnica em comparação aos modelos antigos. A implementação desse sistema permitiu à Samarco retomar suas operações após o rompimento da barragem de Fundão.

Características Principais da Pilha PDER M (item 7.7.2.7.1 do EIA):

Conforme apresentado no Capítulo 3, a PDER M terá cota de topo na elevação 930,00 m, cota de pé na elevação 709,00 m e altura máxima de 221,00 m. A inclinação dos taludes será de 2,0H:1,0V com altura entre bermas de 10 m. O maciço da PDER M foi proposto em disposição compartilhada de estéril e rejeito arenoso filtrado compactado.

Com a setorização interna, aproximadamente 50% do volume se compõe de estéril (31.057.040,00 m³) e 50% de rejeito (30.341.719,00 m³). Estes quantitativos e a relação entre eles poderá sofrer alterações com o avanço dos estudos da engenharia da Samarco.

Altura máxima: 221,00 m

Características Principais da Pilha PDER C :

INSERÇÃO 7-608 - Resumo quantitativo arranjo 2020		
ARRANJO GERAL		
ITEM	PORÇÃO NORTE	PORÇÃO SUL
	QUANTIDADE	QUANTIDADE
Volume de aterro (m³)	26.765.500,00	145.480.316,00
Inclinação dos taludes	2,0H:1,0V	2,0H:1,0V
Largura mínima das bermas (m)	10,00	10,00
Altura máxima dos taludes (m)	10,00	10,00
Área de ocupação (m²)	642.500,00	2.400.500,00
Cota de topo (m)	830,00	880,00
Cota de pé (m)	700,00	690,00

Altura máxima da porção norte: 130,00 m

Altura máxima da porção sul: 190,00 m

7 Considerações sobre Alguns Aspectos dos Critérios Hidrológicos de Projeto das Pilhas

7.1 Critérios de Projeto das Pilhas PDER M e PDER C

Os critérios hidrológicos e hidráulicos de cálculo do sistema de drenagem da pilha PDER M estão definidos no item 7.5.3.1.1.13 (pág. 66) do EIA do Projeto de Longo Prazo e a definição desses critérios é reiterada no seguinte item do documento (pág. 119):

7.5.3.1.4.5 Drenagem superficial

A seguir, apresentam-se as metodologias adotadas para o dimensionamento das estruturas de drenagem superficial da PDER M.

7.5.3.1.4.5.1 Hidrologia: Metodologia

Para o dimensionamento destes dispositivos, foram utilizados os quantis de chuva associados a 100 anos de tempo de retorno para os dispositivos de berma, canaletas de topo, canaletas de acesso e descidas de água, e 500 anos para os canais periféricos, em conformidade à norma ABNT NBR 13.029/2017, em que os seguintes tempos mínimos de recorrência são recomendados:

- 100 anos para dispositivos de pequena vazão, como canaletas de berma e descidas de água entre taludes;
- 100 anos para os canais periféricos temporários de coleta e condução de águas superficiais;
- 500 anos para os canais periféricos definitivos de coleta e condução de águas superficiais.

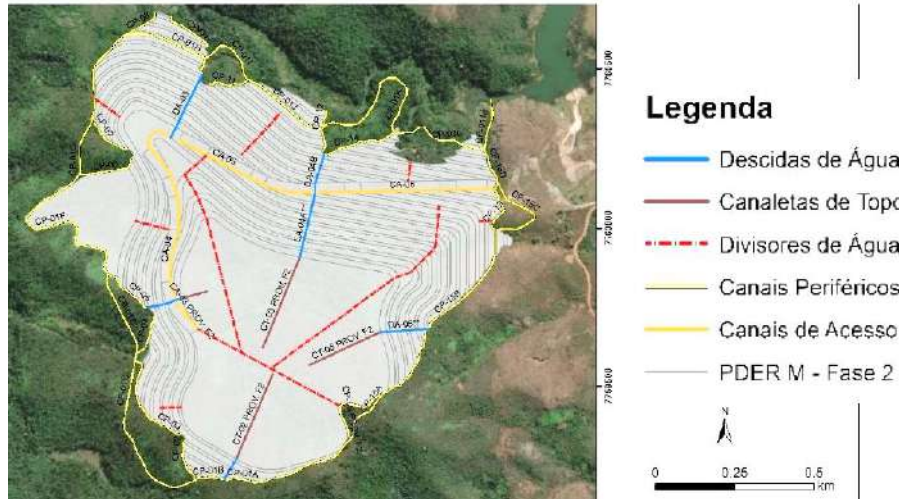
Complementarmente, buscando-se minimizar o risco de transbordamento das principais estruturas de drenagem superficial da PDER M, os canais periféricos também foram dimensionados para os períodos de retorno de 1.000 anos, 10.000 anos e PMP. Dessa forma, confere-se a essas estruturas uma maior capacidade de aporte de vazões.

Esses mesmos critérios são aplicados para o dimensionamento do sistema de drenagem da pilha PDER C (itens 7.5.4.1.1.13, pág. 159 e 7.5.4.1.4.4.2, pág. 206 do doc. do EIA acima citado).

7.2 Descrição e Função dos Dispositivos de Drenagem

Para entender a lógica do dimensionamento dos dispositivos de drenagem, é importante compreender a anatomia da drenagem de uma pilha. Uma pilha de estéreis ou de rejeitos em geral tem a forma de uma pirâmide achatada, com camadas (bermas) e um sistema de estradas para máquinas e caminhões. A figura a seguir, adaptada do EIA, ilustra os dispositivos previstos para a Fase 2 da PDER M:

INSERÇÃO 7-581 - Diagramação da drenagem superficial da PDER M - Fase 2



Dispositivos de Berma (ou Canaletas de Berma):

São pequenos canais construídos na parte traseira (a montante) de cada berma — que é a plataforma horizontal que interrompe o talude. Sua função é interceptar a água que escorre pelo talude acima e conduzi-la lateralmente até uma descida de água. Eles impedem que o fluxo concentrado desça livremente pelo talude, causando erosão em sulcos ou ravinas. São os primeiros coletores do escoamento sobre os taludes.

Canaletas de Topo:

São canais principais localizados na crista (parte mais alta e plana) da pilha. Sua função é coletar a água da chuva que cai diretamente sobre a superfície superior da pilha e, principalmente, captar e conduzir a água que escoar de áreas do entorno imediato (bacia contribuinte local) que não foi desviada pelos canais periféricos. É o primeiro grande coletor da água incidente sobre a própria pilha.

Canaletas de Acesso:

São canais construídos ao longo das estradas que sobem a pilha, usadas por caminhões e máquinas. Elas têm dupla função: drenar a própria estrada e, frequentemente, atuarem como condutores para escoar a água coletada pelas canaletas de berma e de topo, transportando-a de um nível para outro até a base. Garantem a trafegabilidade e evitam que a água da estrada se torne um agente erosivo.

Descidas de Água (ou Dissipadores de Energia):

São estruturas verticais ou em declive pronunciado (como um tubo de queda ou um canal revestido em degraus) que conectam as canaletas de diferentes níveis (ex.: da canaleta de topo para uma canaleta de acesso, ou de uma berma para a berma inferior). Sua função crítica é conduzir a água com alta vazão e velocidade de um nível mais alto para um mais baixo dissipando a energia cinética (geralmente através de bacias de dissipação ou degraus). Se não dissipada, essa energia causaria erosão catastrófica na saída da descida. São os pontos de maior energia potencial no sistema.

Canais Periféricos (ou Canais de Contorno):

Estes são os canais mais importantes e críticos do sistema. Eles são construídos fora da área da pilha, no terreno natural a montante (acima) da estrutura. Sua função exclusiva é interceptar e desviar toda a água da chuva que cai na bacia de contribuição natural externa (que pode ser enorme) antes que essa água atinja a pilha. Se esses canais falharem, um volume colossal de água externa invadirá a pilha, sobrecarregando todo o sistema interno de drenagem e

representando um risco extremo de erosão generalizada e instabilidade. Eles são a primeira e principal barreira de defesa.

7.3 Os Padrões Brasileiros (ABNT NBR 13028 e 13029)

A antiga Norma brasileira ABNT NBR 13028:2017 (referente a projetos de **barragens**) mencionada como referência no EIA do Projeto Longo Prazo estabelece tempos de recorrência iguais aos que foram informados no EIA (item acima):

5.4.12 Drenagem superficial

Apresentar os dados relativos aos dispositivos de drenagem superficial, como os elementos geométricos, os materiais a serem utilizados na sua construção, os dados de locação e os acabamentos necessários.

Recomenda-se observar os seguintes critérios gerais quando do projeto do sistema de drenagem superficial:

- dispositivos e pequenas vazões, como canaletas de berna e descidas d'água: considerar vazões calculadas para períodos mínimos de recorrência de 100 anos;
- dispositivos de grandes vazões, como canais de coleta e condução d'água: considerar vazões calculadas para períodos mínimos de recorrência de 500 anos.

Esses valores coincidem com os prescritos na Norma ABNT NBR 13029:2017 (referente a **pilhas de estéreis**), também citada como referência no EIA, e foram mantidos na nova Norma ABNT NBR 13028-3:2025 (referente a **pilhas de rejeitos**) e na nova norma ABNT 13029:2024 (referente a **pilhas de estéreis**).

De acordo com o EIA (itens 7.5.3.1.1.1, 7.5.3.1.4.5.1, 7.5.4.1.1.13, 7.5.4.1.4.4.2) “Adicionalmente, os canais periféricos também foram dimensionados para os tempos de retorno de 1.000 anos, 10.000 anos e PMP¹, conferindo a essas estruturas uma maior capacidade de aporte de vazões”. Esta prática, informada no EIA, demonstra uma adesão a padrões internacionais de segurança de alto nível (*Best Practices*), indo além do mínimo legal determinado pelas normas brasileiras mencionadas acima.

A nova Norma ABNT NBR 13028-2:2025, referente a **barragens de rejeitos**, em seu item 4.4.13, exige a consideração de eventos mais raros (1.000 anos, 10.000 anos) e da Precipitação Máxima Provável (PMP) para verificação da estabilidade geral da estrutura (ex.: capacidade do vertedouro da barragem principal, análise de *overtopping*) com DPA (dano potencial associado) médio e alto durante a fase de operação. Porém, para o fechamento, o sistema extravasor deve estar dimensionado para cheias de 10.000 anos ou PMP, o que for mais restrito:

A Tabela 3 apresenta os períodos de retorno mínimos de referência para cada nível de consequências esperadas, devido a uma falha estrutural da barragem. Na ausência de informações ou critérios específicos mais rigorosos para o enquadramento das consequências, pode ser adotado o critério do dano potencial associado da barragem, advindo da classificação da legislação vigente.

Tabela 3 – Período de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor

Dano potencial associado	Período operacional	Projeto de fechamento
Baixo	500 anos	10 000 anos ou PMP ^a
Médio	1 000 anos	10 000 anos ou PMP ^a
Alto	10 000 anos ou PMP	10 000 anos ou PMP ^a

^a Período de retorno de 10 000 anos ou PMP (precipitação máxima provável), o que for mais restritivo para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado

Os valores de referência de precipitação devem ser atualizados durante todo o ciclo de vida da estrutura.

¹ PMP = Precipitação Máxima Provável

7.4 Comparativo Internacional: Abordagem Baseada em Risco vs. Prescritiva

Diferente do Brasil, que usa valores fixos em norma, países como Canadá (CDA) e Austrália (ANCOLD) utilizam frequentemente uma abordagem baseada em risco (*Consequence-Based Design*).

A pesquisa em normas internacionais, diretrizes de órgãos reguladores e literatura técnica referentes a pilhas de mineração mostra que os critérios de dimensionamento apresentam significativa variação entre países, sendo os valores mencionados no EIA considerados equivalentes e, em alguns casos, mais conservadores do que muitas referências internacionais que não levam em conta os efeitos das mudanças climáticas. A tabela a seguir apresenta, de forma resumida, a prática de alguns países:

País / Região	Estruturas Internas (Bermas / Canaletas de Topo / Descidas)	Estruturas Críticas (Canais Periféricos/Vertedouros)	Filosofia de Projeto e Notas Específicas	Comparativo com o Critério Brasileiro Citado
Brasil (NBR 13.029:2024)	TR = 100 anos	TR = 500 anos	Valores mínimos definidos em norma, como recomendação.	Referência.
Austrália (ANCOLD)	Prática: TR entre 100 e 1.000 anos, dependendo do risco.	PMP (Precipitação Máxima Provável) para barragens de Consequência "Significante" a "Extrema".	Abordagem baseada em risco de consequência. Foco na segurança da comunidade e impacto ambiental. Suas diretrizes são amplamente adotadas globalmente.	Mais conservador para a estrutura principal. Similar para drenagem interna.
Canadá (MEND/CDA)	TR = 100 anos comum.	Foco na Performance: Dimensionamento base frequentemente na cheia de 100 anos, mas com exigência crítica: as estruturas devem sobreviver intacto à cheia de 1.000 anos (chamada de "check flood").	Abordagem baseada em desempenho e sobrevivência. A integridade física deve ser verificada para o evento extremo, mesmo que a capacidade hidráulica seja para um evento menor.	Similar na filosofia de verificação extrema, mas o Brasil define capacidades maiores (500 anos vs 100 anos como base).
Estados Unidos	TR = 100 anos comum (varia por estado).	Variável. Para estruturas de "alto risco", a exigência pode subir para a PMP ou a cheia de 1.000 anos. Regulamentação é feita principalmente por estados.	Abordagem variável por jurisdição. Para minas de grande porte e alto risco, tende a se aproximar dos critérios australianos (PMP).	Variável, mas pode ser equivalente ou mais conservador.
União Europeia e Reino Unido	TR entre 50 e 100 anos (diretiva 2006/21/EC).	Utilizar a maior entre as cheias de 1.000 anos e a PMF (<i>Probable Maximum Flood</i>) para dimensionamento de vertedouros.	Abordagem conservadora para estruturas críticas. Exige "zero falhas" e medidas	Mais conservador para a estrutura principal (vertedouro). Similar para drenagem interna.

			de prevenção de acidentes graves.	
Chile e Peru	TR elevados (>500 anos comum, devido ao relevo).	PMP (Precipitação Máxima Provável) é frequentemente exigida pelo regulador (ex.: SERNAGEOMIN no Chile).	Rigor geotécnico extremo. Ênfase em eventos climáticos extremos e sismicidade. Países andinos, com histórico de eventos extremos, adotam critérios rigorosos.	Similar ou mais conservador, com forte foco na PMP.

7.5 Principais Diferenças e Tendências Globais

Abordagem de Risco vs. Abordagem Fixa

Nos EUA e Austrália, se uma pilha de estéril ou rejeito está próxima a uma comunidade ou curso d'água importante, o projetista é obrigado a usar o PMP/PMF (Probable Maximum Flood), para canais periféricos. Empresas brasileiras estão convergindo para isso ao realizar as verificações adicionais citadas (10.000 anos e PMP), uma prática que vai além do mínimo normativo.

O Papel do GISTM (Padrão Global da Indústria)

O *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), lançado em 2020, exige que estruturas com classificação de dano "Extremo" suportem a cheia decamilenar (10.000 anos) ou a PMP. **O documento do EIA analisado aparentemente está alinhando as duas pilhas a esse padrão global, mas apenas para os canais periféricos e caso estes canais tenham sido mesmo dimensionados para TR 10.000 anos ou PMP, considerações essas que são detalhadas no presente documento.**

Dispositivos de Berma

Internacionalmente, dispositivos de berma costumam ter TR's menores (25 a 50 anos) do que o exigido no Brasil (100 anos), pois a falha de uma canaleta de berma é considerada um evento de manutenção operacional, enquanto a falha do canal periférico é um evento de segurança estrutural. Neste ponto específico, o critério brasileiro de 100 anos é considerado mais conservador e seguro.

Conclusão da Análise Comparativa:

Os critérios adotados no EIA do Projeto de Longo Prazo estão alinhados com as melhores práticas internacionais de alto padrão atuais, especialmente para estruturas de mineração de alto risco, porém essas práticas não consideram ainda as questões relacionadas às mudanças climáticas.

A exigência de dimensionar canais periféricos para TR = 500 anos e, principalmente, verificá-los para eventos de 1.000 anos, 10.000 anos e PMP, é uma **prática conservadora e robusta em um cenário de estacionariedade hidrológica**, encontrando equivalentes nas diretrizes mais rigorosas do mundo (Austrália, Chile, UE para estruturas críticas). Portanto, pode-se afirmar que o critério brasileiro, neste caso, não é menos rigoroso do que a média internacional; pelo contrário, para sistemas de drenagem periférica, ele se situa na faixa superior de conservadorismo global tradicional.

7.6 Dimensionamento dos Sistema de Drenagem Superficial das Pilhas PDER M e C

A respeito do dimensionamento dos sistemas de drenagem superficial das pilhas PDER M e PDER C verifica-se o seguinte:

1. Destaca-se – o que é de fundamental importância – que o EIA afirma ter dimensionado **apenas os canais periféricos “para os períodos de retorno de 1.000 anos, 10.000 anos e**

PMP”, ou seja, as canaletas de topo, das bermas, de acesso e as descidas de água são dimensionadas para TR 100 anos somente.

2. De fato, a Tabela 1 do “Anexo 7.5-7 - Tabelas de Drenagem Superficial – PDER M” apresenta o dimensionamento dos canais periféricos da PDER M, Fase Final, para o TR de 500 anos (não informado na tabela) e a Tabela 2 apresenta o dimensionamento para os TR’s de 1.000, 10.000 anos e PMP. Essa Tabela 2 apresenta, para cada um dos cenários de TR 1.000 anos, TR 10.000 anos e PMP, as dimensões dos 32 canais periféricos. **No entanto, não se encontrou no EIA nenhuma informação a respeito de qual dos quatro dimensionamentos será adotado na Fase Final das pilhas**, ou seja, quais serão realmente as dimensões dos canais periféricos que existirão na época do fechamento das pilhas e depois desse fechamento. Pode ser que sejam adotadas as dimensões para 500 anos ou 1.000 anos.
3. As tabelas 3 e 4 do Anexo 7.5-7 apresentam o dimensionamento para as fases construtivas 1 e 2 da PDER M, porém não informam qual foi o TR utilizado no cálculo. Assim como no caso da fase final (item acima) um subdimensionamento pode comprometer a segurança das pilhas em caso de chuvas maiores.
4. A Tabela 1 do Anexo 7.5-18 - Tabelas de Drenagem Superficial – PDER C apresenta o dimensionamento dos canais periféricos da PDER C, Fase Final, para o TR de 500 anos (não informado na tabela) e a Tabela 2 apresenta o dimensionamento para os TR’s de 1.000, 10.000 anos e PMP. Essa Tabela 2 apresenta, para cada um dos cenários de TR 1.000 anos, TR 10.000 anos e PMP, as dimensões dos 49 canais periféricos. **Como no caso da PDER M, não se encontrou no EIA nenhuma informação a respeito de qual dos quatro dimensionamentos será adotado na Fase Final das pilhas**, ou seja, quais serão realmente as dimensões dos canais periféricos que existirão na época do fechamento das pilhas e depois desse fechamento. Pode ser que sejam adotadas as dimensões para 500 anos ou 1.000 anos.
5. O EIA afirma que, para o cálculo das vazões de projeto e, conseqüentemente, para o dimensionamento dos dispositivos de drenagem, foi utilizado o Método Racional, o qual é recomendado para bacias de contribuição cujas áreas de drenagem são pequenas e é aplicável para dimensionamentos mais simples. Para áreas maiores que 1 km² deve-se usar modelos mais robustos, como o SCS (*Soil Conservation Service*) ou o Hidrograma Unitário Sintético, motivo pelo qual no EIA (ex.: item “7.5.3.1.4.5.1 Hidrologia: Metodologia”) afirma-se que:

“Recomenda-se, contudo, em etapas futuras (nível básico / executivo), a adoção de um método mais adequado para a determinação da vazão de projeto dos dispositivos de drenagem com bacias de contribuição superiores a 1(um) km²”.

6. Os valores de vazão de projeto calculados por meio do Método Racional são proporcionais ao coeficiente C, conforme definido no EIA:
*“(C) denota o coeficiente adimensional de escoamento superficial de uma dada bacia de contribuição. Esse coeficiente depende das características geológicas e condições de uso e ocupação do solo da bacia de contribuição e permite determinar a chuva efetiva, ou seja, a parcela da chuva que se transformará em escoamento superficial. Nesse estudo, **foi adotado (C) igual a 0,60** para a área de contribuição, de acordo com Pinheiro (2011).”* (item “7.5.3.1.4.5.1 Hidrologia: Metodologia” (grifo nosso).

Entretanto, pilhas de estéril (revestimento usado para o rejeito da PDER M) possuem alta porosidade inicial, mas a compactação mecânica e o preenchimento de vazios por finos podem elevar o coeficiente de escoamento ao longo do tempo. Pilhas de rejeito – caso da PDER C – que talvez terá um revestimento fino de material retirado no processo de preparação da base), dependendo da técnica (rejeito filtrado ou empilhamento a seco),

poderá ter a sua superfície quase impermeável, resultando em um **valor de C muito próximo de 0,80 a 0,95**, o que aumenta a vazão de projeto e não foi considerado no EIA.

7. O dimensionamento do sistema de drenagem também depende integralmente da definição do denominado Tempo de Concentração. No EIA (ex.: item “7.5.3.1.4.5.1 Hidrologia: Metodologia”) afirma-se que:

“As chuvas de projeto, associadas aos tempos de retorno de 100, 500, 1.000, 10.000 anos e PMP para os diversos dispositivos de drenagem, estão associadas à duração igual ao tempo de concentração da bacia de contribuição; salienta-se que o tempo de concentração foi determinado pelo método cinemático, que se baseia na velocidade de escoamento da água pelos canais. O tempo de concentração pode ser caracterizado como sendo o tempo total gasto para que o escoamento superficial, gerado a partir de um evento de precipitação, percorra toda a extensão longitudinal da bacia de contribuição. Sendo assim, considerou-se para o cálculo do tc, no presente projeto, os comprimentos e as declividades associadas ao ponto mais distante do exutório de cada estrutura definida”.

Entretanto, o EIA não informa – nem nas tabelas dos anexos 7.5-7 e 7.5-18 – os valores dos comprimentos e os das declividades para cada dispositivo de drenagem, o que impede a verificação dos resultados dos cálculos informados nas tabelas. Em pilhas de estêreis ou de rejeitos, o caminho da água é curto e geralmente íngreme. O cálculo do tempo de concentração é uma das etapas mais sensíveis da hidrologia. Errar o cálculo do tc (usando fórmulas inadequadas para taludes minerários) pode subestimar a vazão de projeto, levando ao transbordamento dos canais canaletas e, conseqüentemente, a processos erosivos graves que colocam em risco a integridade da pilha.

8. Para as canaletas de bermas e de topo, assim como para as dos acessos (dispositivos primários, que recebem o escoamento difuso das superfícies dos taludes e das vias de acesso) o tempo de concentração não pode ser calculado usando apenas distâncias e declividades. Somente quando a água já está concentrada na canaleta de berma ou de pé de talude, o cálculo muda para uma base cinemática ($\text{Velocidade} = \text{Distância} / \text{Tempo}$), podendo-se utilizar a fórmula de Manning informada no EIA (item 7.5.3.1.4.5.2 por ex.). O EIA não informa que método (Kerby ou Izzard, por ex.) foi utilizado para o cálculo das canaletas de topo, das bermas e dos acessos o que permite questionar a segurança do dimensionamento feito.
9. Os coeficientes de rugosidade adotados no EIA (item 7.5.3.1.4.5.2 por ex.) para a aplicação da fórmula de Manning são os usuais. Por outro lado, o EIA informa (id.) que:

“Alerta-se que foi adotado o critério de borda livre mínima de 20% da altura das paredes dos dispositivos com relação à lâmina de água no interior dos mesmos, o que por premissa, garante-se que o escoamento se propague 100% dentro dos dispositivos, sem possibilidade de extravasamentos. Esse critério é bastante razoável e muito utilizado em virtude da frequente ocorrência de singularidades bruscas na forma, por exemplo, de transições horizontais e verticais (curvas e deflexões)”.

O critério da borda livre mínima (ex.: 20% da altura da lâmina) é necessário, mas insuficiente para garantir a segurança hidráulica de canais em pilhas de mineração. A integridade do sistema depende fundamentalmente do controle da velocidade de escoamento, do regime de fluxo e da mitigação do fenômeno do ressalto hidráulico. A ocorrência combinada destes fatores representa um risco sistêmico à estrutura.

10. **Risco do Ressalto Hidráulico:** o ressalto hidráulico é uma transição brusca e violenta do regime de fluxo supercrítico para o subcrítico, gerando uma onda estacionária turbulenta. Em canais de pilhas, seu surgimento é um evento catastrófico para o sistema de drenagem.

Em escoamento em canais, qualquer obstáculo ou curva pode gerar um ressalto hidráulico, com as seguintes possíveis consequências:

- Transbordamento Garantido: A turbulência extrema e a elevação localizada da lâmina d'água poderão consumir instantaneamente qualquer borda livre pré-definida, causando transbordamento. Esse transbordamento não é um simples extravasamento, mas um jato de água energético direcionado para o talude da pilha ou para outras partes sensíveis da estrutura.
- Gatilho de Instabilidade Geotécnica: O jato de água sobre o talude inicia um processo rápido e localizado de erosão regressiva. Em materiais granulares (rejeito filtrado, estéril), essa erosão pode retroceder rapidamente em direção à crista do canal, descalçando o revestimento e expondo o núcleo da pilha à ação direta da água, podendo evoluir para uma ruptura progressiva.
- Danos Estruturais ao Canal: As flutuações extremas de pressão e as vibrações geradas podem arrancar placas de concreto, deslocar enrocamento ou romper juntas, destruindo a seção hidráulica do canal e agravando o problema.

11. Risco da Alta Velocidade de Escoamento (> 4.0 - 4.5 m/s): velocidades elevadas, mesmo em regime subcrítico, impõem desafios severos à durabilidade e à segurança operacional.

- Erosão e Cavitação no Revestimento: acima dos limites seguros para o concreto, ocorre o desgaste abrasivo da superfície por partículas em suspensão. Imperfeições no acabamento (juntas salientes, desníveis) desencadeiam cavitação, um fenômeno destrutivo que literalmente "explode" o concreto por colapso de bolhas de vapor.
- Amplificação de Problemas em Curvas e Singularidades: Qualquer desvio (curva, redução, junta) torna-se um ponto focal de impacto. A energia cinética elevada transforma pequenas irregularidades em pontos de falha, que podem se propagar e colapsar trechos inteiros do canal.
- Dificuldade de Manutenção e Inspeção: Canais com escoamento veloz são perigosos para inspeção in loco e qualquer intervenção de manutenção torna-se complexa e arriscada.

12. Risco do Regime de Fluxo Supercrítico (Número de Froude > 1):

- Perda de Controle do Escoamento: O fluxo supercrítico é rápido e de menor altura, com alta energia cinética. Qualquer obstáculo a jusante (deposição de sedimentos, detritos, uma curva mal projetada) forçará a formação de um ressalto hidráulico. A localização desse ressalto é imprevisível e difícil de controlar.
- Sensibilidade Extrema à Geometria: o escoamento é extremamente sensível a pequenas variações na rugosidade e no alinhamento do canal. Na prática de campo, é impossível garantir a perfeição geométrica e de acabamento ao longo de centenas de metros ou de quilômetros de canaletas, tornando o regime supercrítico inerentemente instável.
- Dificuldade de Dissipação de Energia: A energia do fluxo, que precisa ser dissipada de forma segura no pé da pilha, é muito maior. Se a dissipação não for perfeita, o potencial de erosão a jusante da estrutura é enorme.

13. Recomendação de Princípio de Projeto: para sistemas de drenagem de pilhas, onde a falha pode desencadear instabilidade geotécnica, o princípio fundamental deve ser a adoção de um regime de fluxo subcrítico (Froude < 0.8, preferencialmente) e de velocidades moderadas. Isto garante um escoamento "lento e profundo", que é robusto, previsível e tolerante a imperfeições construtivas e à deposição ocasional de sedimentos. O projeto deve procurar manter esse regime mesmo na eventualidade de eventos extremos de chuva, de

alta erosividade, para evitar que nessas situações críticas um comportamento instável do fluxo atue como gatilho para a desestabilização das pilhas e taludes.

A borda livre é uma consequência deste dimensionamento conservador, não sua premissa única. Priorizar a segurança hidráulica através do controle do regime e da velocidade é a medida mais eficaz para prevenir a cascata de falhas que começa com um ressalto hidráulico e pode terminar na ruptura de um talude. **A manutenção da funcionalidade desses canais é um compromisso de décadas, exigindo um projeto que privilegie a resiliência e não apenas a capacidade hidráulica mínima ou determinada por meio de metodologias que não levam em conta os efeitos das mudanças climáticas.**

14. Como assinalado acima, a Tabela 1 do “Anexo 7.5-7 - Tabelas de Drenagem Superficial – PDER M” apresenta o dimensionamento dos canais periféricos da PDER M, Fase Final, para o TR de 500 anos (não informado na tabela) e a Tabela 2 apresenta o dimensionamento para os TR’s de 1.000, 10.000 anos e PMP. Essa Tabela 2 apresenta, para cada um dos cenários de TR 1.000 anos, TR 10.000 anos e PMP, as dimensões dos 32 canais periféricos.

7.5.3.1.4.5.3 Resultados

Os resultados obtidos para a drenagem superficial da PDER M, a partir dos critérios e cálculos expostos anteriormente, são apresentados Anexo 7.5-7.

Os principais resultados dos cálculos hidrológicos e hidráulicos desenvolvidos para o dimensionamento e projeto dos dispositivos de drenagem superficial previstos, dadas as áreas de interesse, considerando a fase final da pilha, são apresentados na Tabela 1 do Anexo 7.5-7.

Além disso, a Tabela 2 do Anexo 7.5-7 apresenta o dimensionamento dos canais periféricos definitivos para os períodos de retorno de 1.000 anos, 10.000 anos e PMP, todos em concreto com seção retangular.

Complementarmente, a Tabela 3 e a Tabela 4 do Anexo 7.5-7 consolidam os dispositivos provisórios previstos para as duas fases construtivas.

Com base nessas dimensões e nas vazões de projeto informadas nas tabelas é possível calcular os valores de borda livre, de velocidade do fluxo e de número de Froude (Fr) para os canais periféricos, variáveis essas não informadas na tabela. No entanto, esse cálculo depende dos valores de declividades, não informados no EIA, que podem ser assumidos dentro de certas faixas para uma análise de sensibilidade.

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos das variáveis velocidade, Fr e borda livre para os 32 canais periféricos, **supondo-se que todos esses canais teriam declividade de 0,5%**, valor mínimo normalmente utilizado para os sistemas de drenagem. Os cálculos da borda livre foram feitos pela fórmula de Manning adotando-se como coeficiente de rugosidade do concreto o valor 0,015 (definido no item 7.5.3.1.4.5.2 do EIA) e como largura o valor informado nas tabelas 1 e 2 do Anexo 7.5-7, pois a Tabela 1 informa que todos os canais periféricos têm seção retangular.

A análise das tabelas abaixo revela que, de acordo com os parâmetros de cálculo acima definidos, as três variáveis (velocidade do fluxo, borda livre e Fr) não respeitam os limites aceitáveis (células destacadas em cor rosa) para uma grande quantidade de canais periféricos, mesmo considerando vazões menores. Ex. Para TR = 500 anos, 26 dos 32 canais periféricos, ou seja, (81%) dos canais periféricos teriam borda livre inferior ao valor de 20% definido no EIA como critério de projeto, caso sua declividade fosse 0,05%.

TR 500 anos							
Dispositivo de Drenagem	Vazão de Proj. (m³/s)	Base (m)	Altura (m)	Borda Livre (m)	Borda Livre (%)	Velocidade (m/s)	Froude (-)
-01A	0,71	0,7	0,7	0,096	13,7%	1,679	0,690
-01B	8,75	1,8	1,8	0,240	13,3%	3,116	0,797
-01C	13,89	2,1	2,1	0,351	16,7%	3,782	0,913
-01D	14,15	2,1	2,1	0,335	16,0%	3,818	0,917
-01E	16,79	2,3	2,3	0,335	14,6%	3,715	0,846
-01F	26,26	2,7	2,7	0,413	15,3%	4,253	0,898
-01G	27,65	2,8	2,8	0,419	15,0%	4,147	0,858
-01H	29,07	2,8	2,8	0,339	12,1%	4,219	0,859
-01I	36,85	3,2	3	0,253	8,4%	4,192	0,808
-01J	33,77	3,2	3	0,422	14,1%	4,094	0,814
-01K	35,27	3,2	3	0,340	11,3%	4,144	0,811
-01L	48,88	4,2	3	0,303	10,1%	4,315	0,839
-01M	61,47	5,3	3	0,305	10,2%	4,304	0,837
-02	0,24	0,5	0,5	0,119	23,8%	1,260	0,652
-03	0,23	0,6	0,6	0,274	45,7%	1,176	0,658
-04	1,1	0,8	0,8	0,188	23,5%	2,247	0,917
-05	5,84	1,5	1,5	0,277	18,5%	3,183	0,919
-06	1,08	0,8	0,8	0,195	24,4%	2,231	0,916
-07	0,64	0,7	0,7	0,123	17,6%	1,585	0,666
-08	0,17	0,4	0,4	0,071	17,8%	1,292	0,719
-09	0,78	0,7	0,7	0,064	9,1%	1,752	0,701
-10	6,9	1,6	1,6	0,217	13,6%	3,118	0,847
-11	0,74	0,7	0,7	0,082	11,7%	1,711	0,695
-12	0,35	0,5	0,5	0,028	5,6%	1,483	0,689
-13	0,46	0,6	0,6	0,082	13,7%	1,480	0,657
-14	14,09	2,1	2,1	0,338	16,1%	3,808	0,916
-15A	1,9	1	1	0,285	28,5%	2,657	1,003
-15B	10,21	1,9	1,9	0,297	15,8%	3,352	0,845
-15C	10,56	1,9	1,9	0,270	14,2%	3,410	0,853
-15D	13,88	2,1	2,1	0,352	16,8%	3,781	0,913
-16	0,02	0,4	0,4	0,342	85,5%	0,862	1,143
-17	0,83	0,7	0,7	0,039	5,6%	1,794	0,704

TR = 1.000 anos								
It.	Dispositivo de Drenagem	Vazão de Proj. (m³/s)	Base (m)	Altura (m)	Borda Livre (m)	Borda Livre (%)	Velocidade (m/s)	Froude (-)
1	CP-01A	0,76	0,7	0,7	0,075	10,7%	1,737	0,702
2	CP-01B	9,37	1,8	1,8	0,205	11,4%	3,264	0,825
3	CP-01C	14,85	2,2	2,2	0,356	16,2%	3,661	0,861
4	CP-01D	15,13	2,2	2,2	0,339	15,4%	3,695	0,865
5	CP-01E	17,84	2,3	2,3	0,281	12,2%	3,842	0,863
6	CP-01F	27,91	2,8	2,8	0,378	13,5%	4,116	0,844
7	CP-01G	29,38	2,8	2,8	0,323	11,5%	4,236	0,859
8	CP-01H	30,9	2,9	2,9	0,358	12,3%	4,192	0,839
9	CP-01I	39,17	3,4	3	0,237	7,9%	4,170	0,801
10	CP-01J	35,82	3,4	3	0,387	12,9%	4,032	0,796
11	CP-01K	37,4	3,4	3	0,314	10,5%	4,095	0,798
12	CP-01L	51,85	4,5	3	0,733	24,4%	5,083	1,078
13	CP-01M	65,2	5,6	3	0,836	27,9%	5,380	1,168
14	CP-02	0,26	0,5	0,5	0,101	20,2%	1,303	0,659
15	CP-03	0,24	0,5	0,5	0,119	23,8%	1,260	0,652
16	CP-04	1,16	0,8	0,8	0,166	20,8%	2,287	0,917
17	CP-05	6,25	1,6	1,6	0,286	17,5%	2,973	0,828
18	CP-06	1,16	0,8	0,8	0,166	20,8%	2,287	0,917
19	CP-07	0,68	0,7	0,7	0,106	15,1%	1,635	0,677
20	CP-08	0,18	0,4	0,4	0,061	15,3%	1,327	0,728
21	CP-09	0,83	0,7	0,7	0,049	7,0%	1,821	0,721
22	CP-10	7,39	1,7	1,7	0,131	7,7%	2,771	0,706
23	CP-11	0,79	0,7	0,7	0,064	9,1%	1,774	0,710
24	CP-12	0,37	0,5	0,5	0,014	2,8%	1,523	0,697
25	CP-13	0,49	0,6	0,6	0,051	8,5%	1,488	0,641
26	CP-14	15,07	2,2	2,2	0,343	15,6%	3,689	0,864
27	CP-15A	2,03	1	1	0,249	24,9%	2,703	0,996
28	CP-15B	10,85	1,9	1,9	0,246	12,9%	3,453	0,857
29	CP-15C	11,23	2	2	0,317	15,9%	3,336	0,821
30	CP-15D	14,75	2,2	2,2	0,361	16,4%	3,646	0,858
31	CP-16	0,02	0,4	0,4	0,342	85,5%	0,862	1,143
32	CP-17	0,89	0,7	0,7	0,027	3,9%	1,889	0,735

TR = 10.000 anos								
It.	Dispositivo de Drenagem	Vazão de Proj. (m³/s)	Base (m)	Altura (m)	Borda Livre (m)	Borda Livre (%)	Velocidade (m/s)	Froude (-)
1	CP-01A	0,92	0,8	0,8	0,173	21,6%	1,834	0,740
2	CP-01B	11,37	2	2	0,304	15,2%	3,352	0,822
3	CP-01C	18,03	2,4	2,4	0,354	14,8%	3,672	0,820
4	CP-01D	18,37	2,4	2,4	0,327	13,6%	3,692	0,819
5	CP-01E	21,31	2,5	2,5	0,277	11,1%	3,834	0,821
6	CP-01F	33,34	3	3	0,377	12,6%	4,237	0,835
7	CP-01G	35,1	3,1	3	0,316	10,5%	4,219	0,822
8	CP-01H	36,91	3,2	3	0,252	8,4%	4,197	0,808
9	CP-01I	46,79	4,1	3	0,354	11,8%	4,313	0,847
10	CP-01J	42,47	4,1	3	0,536	17,9%	4,204	0,855
11	CP-01K	44,35	4,1	3	0,456	15,2%	4,252	0,851
12	CP-01L	61,47	5,3	3	0,305	10,2%	4,304	0,837
13	CP-01M	77,31	6	3,3	0,345	10,5%	4,360	0,810
14	CP-02	0,31	0,5	0,5	0,144	28,8%	1,742	0,932
15	CP-03	0,29	0,5	0,5	0,160	32,0%	1,706	0,934
16	CP-04	1,38	0,9	0,9	0,157	17,4%	2,064	0,764
17	CP-05	7,59	1,7	1,7	0,121	7,1%	2,828	0,718
18	CP-06	1,41	0,9	0,9	0,145	16,1%	2,075	0,762
19	CP-07	0,83	0,7	0,7	0,049	7,0%	1,821	0,721
20	CP-08	0,22	0,5	0,5	0,218	43,6%	1,560	0,938
21	CP-09	1,01	0,8	0,8	0,132	16,5%	1,890	0,738
22	CP-10	8,96	1,8	1,8	0,163	9,1%	3,041	0,759
23	CP-11	0,94	0,8	0,8	0,164	20,5%	1,847	0,740
24	CP-12	0,44	0,6	0,6	0,115	19,2%	1,512	0,693
25	CP-13	0,6	0,6	0,6	0,009	1,5%	1,692	0,703
26	CP-14	18,29	2,4	2,4	0,333	13,9%	3,687	0,819
27	CP-15A	2,47	1,1	1,1	0,177	16,1%	2,433	0,808
28	CP-15B	12,96	2,1	2,1	0,309	14,7%	3,446	0,822
29	CP-15C	13,41	2,1	2,1	0,265	12,6%	3,480	0,820
30	CP-15D	17,62	2,3	2,3	0,248	10,8%	3,733	0,832
31	CP-16	0,03	0,4	0,4	0,311	77,8%	0,843	0,902
32	CP-17	1,08	0,8	0,8	0,102	12,8%	1,934	0,739

PMP								
It.	Dispositivo de Drenagem	Vazão de Proj. (m³/s)	Base (m)	Altura (m)	Borda Livre (m)	Borda Livre (%)	Velocidade (m/s)	Froude (-)
1	CP-01A	0,96	0,8	0,8	0,173	21,6%	1,914	0,772
2	CP-01B	11,84	2	2	0,304	15,2%	3,491	0,856
3	CP-01C	18,78	2,4	2,4	0,354	14,8%	3,825	0,854
4	CP-01D	19,14	2,4	2,4	0,327	13,6%	3,847	0,853
5	CP-01E	22,22	2,6	2,6	0,277	10,7%	3,679	0,771
6	CP-01F	34,76	3	3	0,377	12,6%	4,417	0,871
7	CP-01G	36,59	3,2	3	0,316	10,5%	4,260	0,830
8	CP-01H	38,48	3,4	3	0,252	8,4%	4,119	0,793
9	CP-01I	48,77	4,2	3	0,354	11,8%	4,388	0,861
10	CP-01J	44,29	4,2	3	0,536	17,9%	4,280	0,870
11	CP-01K	46,25	4,2	3	0,456	15,2%	4,329	0,866
12	CP-01L	64,11	5,6	3	0,305	10,2%	4,248	0,826
13	CP-01M	80,62	6	3,4	0,345	10,1%	4,398	0,803
14	CP-02	0,32	0,5	0,5	0,144	28,8%	1,798	0,962
15	CP-03	0,3	0,5	0,5	0,160	32,0%	1,765	0,966
16	CP-04	1,44	0,9	0,9	0,157	17,4%	2,153	0,798
17	CP-05	7,91	1,7	1,7	0,121	7,1%	2,947	0,749
18	CP-06	1,47	0,9	0,9	0,145	16,1%	2,163	0,795
19	CP-07	0,87	0,7	0,7	0,049	7,0%	1,909	0,755
20	CP-08	0,23	0,5	0,5	0,218	43,6%	1,631	0,981
21	CP-09	1,05	0,8	0,8	0,132	16,5%	1,965	0,768
22	CP-10	9,34	1,8	1,8	0,163	9,1%	3,170	0,791
23	CP-11	0,98	0,8	0,8	0,164	20,5%	1,926	0,771
24	CP-12	0,46	0,6	0,6	0,115	19,2%	1,581	0,725
25	CP-13	0,62	0,6	0,6	0,009	1,5%	1,748	0,726
26	CP-14	19,06	2,4	2,4	0,333	13,9%	3,842	0,853
27	CP-15A	2,57	1,1	1,1	0,177	16,1%	2,531	0,841
28	CP-15B	13,51	2,1	2,1	0,309	14,7%	3,592	0,857
29	CP-15C	13,98	2,1	2,1	0,265	12,6%	3,628	0,855
30	CP-15D	18,37	2,4	2,4	0,248	10,3%	3,557	0,774
31	CP-16	0,03	0,4	0,4	0,311	77,8%	0,843	0,902
32	CP-17	1,12	0,8	0,8	0,102	12,8%	2,006	0,766

Porcentagens da quantidade total de canais periféricos com variáveis de dimensionamento fora dos limites recomendados de projeto. Hip.: Declividade = 0,5%			
	Borda livre menor que 20%	Velocidade maior que 4,0 m/s	Número de Froude maior que 0,8
TR 500 anos	81,3%	25,0%	65,6%
TR 1.000 anos	75,0%	25,0%	59,4%
TR 10.000 anos	81,3%	25,0%	65,6%
PMP	81,3%	25,0%	56,3%

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos das variáveis velocidade, Fr e borda livre para os 32 canais periféricos, **supondo-se que todos esses canais teriam borda livre de 20%**, ou seja, teriam declividades maiores que 0,5% de forma a proporcionar maior velocidade do fluxo. O valor de 20% foi informado no EIA como critério de projeto para os canais periféricos.

TR 500 anos								
	Dispositivo de Drenagem	Vazão de Proj. (m³/s)	Base (m)	Altura (m)	Borda Livre (m)	Borda Livre (%)	Velocidade (m/s)	Froude (-)
	CP-01A	0,71	0,7	0,7	0,140	20,0%	1,811	0,773
	CP-01B	8,75	1,8	1,8	0,360	20,0%	3,376	0,898
	CP-01C	13,89	2,1	2,1	0,420	20,0%	3,937	0,970
	CP-01D	14,15	2,1	2,1	0,420	20,0%	4,011	0,988
	CP-01E	16,79	2,3	2,3	0,460	20,0%	3,967	0,934
	CP-01F	26,26	2,7	2,7	0,540	20,0%	4,503	0,978
	CP-01G	27,65	2,8	2,8	0,560	20,0%	4,408	0,940
	CP-01H	29,07	2,8	2,8	0,560	20,0%	4,635	0,989
	CP-01I	36,85	3,2	3	0,600	20,0%	4,798	0,989
	CP-01J	33,77	3,2	3	0,600	20,0%	4,397	0,906
	CP-01K	35,27	3,2	3	0,600	20,0%	4,592	0,946
	CP-01L	48,88	4,2	3	0,600	20,0%	4,849	0,999
	CP-01M	61,47	5,3	3	0,600	20,0%	4,833	0,996
	CP-02	0,24	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,200	0,606
	CP-03	0,23	0,6	0,6	0,120	20,0%	0,799	0,368
	CP-04	1,1	0,8	0,8	0,160	20,0%	2,148	0,857
	CP-05	5,84	1,5	1,5	0,300	20,0%	3,244	0,946
	CP-06	1,08	0,8	0,8	0,160	20,0%	2,109	0,842
	CP-07	0,64	0,7	0,7	0,140	20,0%	1,633	0,697
	CP-08	0,17	0,4	0,4	0,080	20,0%	1,328	0,750
	CP-09	0,78	0,7	0,7	0,140	20,0%	1,990	0,849
	CP-10	6,9	1,6	1,6	0,320	20,0%	3,369	0,951
	CP-11	0,74	0,7	0,7	0,140	20,0%	1,888	0,805
	CP-12	0,35	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,750	0,883
	CP-13	0,46	0,6	0,6	0,120	20,0%	1,597	0,736
	CP-14	14,09	2,1	2,1	0,420	20,0%	3,994	0,984
	CP-15A	1,9	1	1	0,200	20,0%	2,375	0,848
	CP-15B	10,21	1,9	1,9	0,380	20,0%	3,535	0,916
	CP-15C	10,56	1,9	1,9	0,380	20,0%	3,657	0,947
	CP-15D	13,88	2,1	2,1	0,420	20,0%	3,934	0,969
	CP-16	0,02	0,4	0,4	0,080	20,0%	0,156	0,088
	CP-17	0,83	0,7	0,7	0,140	20,0%	2,117	0,903

TR = 1.000 anos								
	Dispositivo de Drenagem	Vazão de Proj. (m³/s)	Base (m)	Altura (m)	Borda Livre (m)	Borda Livre (%)	Velocidade (m/s)	Froude (-)
	CP-01A	0,76	0,7	0,7	0,140	20,0%	1,939	0,827
	CP-01B	9,37	1,8	1,8	0,360	20,0%	3,615	0,962
	CP-01C	14,85	2,2	2,2	0,440	20,0%	3,835	0,923
	CP-01D	15,13	2,2	2,2	0,440	20,0%	3,908	0,940
	CP-01E	17,84	2,3	2,3	0,460	20,0%	4,216	0,992
	CP-01F	27,91	2,8	2,8	0,560	20,0%	4,450	0,949
	CP-01G	29,38	2,8	2,8	0,560	20,0%	4,684	0,999
	CP-01H	30,9	2,9	2,9	0,580	20,0%	4,593	0,963
	CP-01I	39,17	3,4	3	0,600	20,0%	4,800	0,989
	CP-01J	35,82	3,4	3	0,600	20,0%	4,390	0,905
	CP-01K	37,4	3,4	3	0,600	20,0%	4,583	0,945
	CP-01L	51,85	4,5	3	0,600	20,0%	4,801	0,989
	CP-01M	65,2	5,6	3	0,600	20,0%	4,851	1,000
	CP-02	0,26	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,300	0,656
	CP-03	0,24	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,200	0,606
	CP-04	1,16	0,8	0,8	0,160	20,0%	2,266	0,904
	CP-05	6,25	1,6	1,6	0,320	20,0%	3,052	0,861
	CP-06	1,16	0,8	0,8	0,160	20,0%	2,266	0,904
	CP-07	0,68	0,7	0,7	0,140	20,0%	1,735	0,740
	CP-08	0,18	0,4	0,4	0,080	20,0%	1,406	0,794
	CP-09	0,83	0,7	0,7	0,140	20,0%	2,117	0,903
	CP-10	7,39	1,7	1,7	0,340	20,0%	3,196	0,875
	CP-11	0,79	0,7	0,7	0,140	20,0%	2,015	0,860
	CP-12	0,37	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,850	0,934
	CP-13	0,49	0,6	0,6	0,120	20,0%	1,701	0,784
	CP-14	15,07	2,2	2,2	0,440	20,0%	3,892	0,937
	CP-15A	2,03	1	1	0,200	20,0%	2,538	0,906
	CP-15B	10,85	1,9	1,9	0,380	20,0%	3,757	0,973
	CP-15C	11,23	2	2	0,400	20,0%	3,509	0,886
	CP-15D	14,75	2,2	2,2	0,440	20,0%	3,809	0,917
	CP-16	0,02	0,4	0,4	0,080	20,0%	0,156	0,088
	CP-17	0,89	0,7	0,7	0,140	20,0%	2,270	0,969

TR = 10.000 anos								
	Dispositivo de Drenagem	Vazão de Proj. (m³/s)	Base (m)	Altura (m)	Borda Livre (m)	Borda Livre (%)	Velocidade (m/s)	Froude (-)
	CP-01A	0,92	0,8	0,8	0,160	20,0%	1,797	0,717
	CP-01B	11,37	2	2	0,400	20,0%	3,553	0,897
	CP-01C	18,03	2,4	2,4	0,480	20,0%	3,913	0,902
	CP-01D	18,37	2,4	2,4	0,480	20,0%	3,987	0,919
	CP-01E	21,31	2,5	2,5	0,500	20,0%	4,262	0,962
	CP-01F	33,34	3	3	0,600	20,0%	4,631	0,954
	CP-01G	35,1	3,1	3	0,600	20,0%	4,718	0,972
	CP-01H	36,91	3,2	3	0,600	20,0%	4,806	0,990
	CP-01I	46,79	4,1	3	0,600	20,0%	4,755	0,980
	CP-01J	42,47	4,1	3	0,600	20,0%	4,316	0,890
	CP-01K	44,35	4,1	3	0,600	20,0%	4,507	0,929
	CP-01L	61,47	5,3	3	0,600	20,0%	4,833	0,996
	CP-01M	77,31	6	3,3	0,660	20,0%	4,881	0,959
	CP-02	0,31	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,590	0,782
	CP-03	0,29	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,450	0,732
	CP-04	1,38	0,9	0,9	0,180	20,0%	2,130	0,801
	CP-05	7,59	1,7	1,7	0,340	20,0%	3,283	0,899
	CP-06	1,41	0,9	0,9	0,180	20,0%	2,176	0,819
	CP-07	0,83	0,7	0,7	0,140	20,0%	2,117	0,903
	CP-08	0,22	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,100	0,555
	CP-09	1,01	0,8	0,8	0,160	20,0%	1,973	0,787
	CP-10	8,96	1,8	1,8	0,360	20,0%	3,457	0,920
	CP-11	0,94	0,8	0,8	0,160	20,0%	1,836	0,733
	CP-12	0,44	0,6	0,6	0,120	20,0%	1,528	0,704
	CP-13	0,6	0,6	0,6	0,120	20,0%	2,083	0,960
	CP-14	18,29	2,4	2,4	0,480	20,0%	3,969	0,915
	CP-15A	2,47	1,1	1,1	0,220	20,0%	2,552	0,868
	CP-15B	12,96	2,1	2,1	0,420	20,0%	3,673	0,905
	CP-15C	13,41	2,1	2,1	0,420	20,0%	3,801	0,936
	CP-15D	17,62	2,3	2,3	0,460	20,0%	4,164	0,980
	CP-16	0,03	0,4	0,4	0,080	20,0%	0,234	0,132
	CP-17	1,08	0,8	0,8	0,160	20,0%	2,109	0,842

PMP								
	Dispositivo de Drenagem	Vazão de Proj. (m³/s)	Base (m)	Altura (m)	Borda Livre (m)	Borda Livre (%)	Velocidade (m/s)	Froude (-)
	CP-01A	0,96	0,8	0,8	0,160	20,0%	1,875	0,748
	CP-01B	11,84	2	2	0,400	20,0%	3,700	0,934
	CP-01C	18,78	2,4	2,4	0,480	20,0%	4,076	0,939
	CP-01D	19,14	2,4	2,4	0,480	20,0%	4,154	0,957
	CP-01E	22,22	2,6	2,6	0,520	20,0%	4,109	0,910
	CP-01F	34,76	3	3	0,600	20,0%	4,828	0,995
	CP-01G	36,59	3,2	3	0,600	20,0%	4,764	0,982
	CP-01H	38,48	3,4	3	0,600	20,0%	4,716	0,972
	CP-01I	48,77	4,2	3	0,600	20,0%	4,838	0,997
	CP-01J	44,29	4,2	3	0,600	20,0%	4,394	0,906
	CP-01K	46,25	4,2	3	0,600	20,0%	4,588	0,946
	CP-01L	64,11	5,6	3	0,600	20,0%	4,770	0,983
	CP-01M	80,62	6	3,4	0,680	20,0%	4,940	0,956
	CP-02	0,32	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,600	0,808
	CP-03	0,3	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,500	0,757
	CP-04	1,44	0,9	0,9	0,180	20,0%	2,222	0,836
	CP-05	7,91	1,7	1,7	0,340	20,0%	3,421	0,937
	CP-06	1,47	0,9	0,9	0,180	20,0%	2,269	0,854
	CP-07	0,87	0,7	0,7	0,140	20,0%	2,219	0,947
	CP-08	0,23	0,5	0,5	0,100	20,0%	1,150	0,581
	CP-09	1,05	0,8	0,8	0,160	20,0%	2,051	0,818
	CP-10	9,34	1,8	1,8	0,360	20,0%	3,603	0,959
	CP-11	0,98	0,8	0,8	0,160	20,0%	1,914	0,764
	CP-12	0,46	0,6	0,6	0,120	20,0%	1,597	0,736
	CP-13	0,62	0,6	0,6	0,120	20,0%	2,153	0,992
	CP-14	19,06	2,4	2,4	0,480	20,0%	4,136	0,953
	CP-15A	2,57	1,1	1,1	0,220	20,0%	2,655	0,904
	CP-15B	13,51	2,1	2,1	0,420	20,0%	3,829	0,943
	CP-15C	13,98	2,1	2,1	0,420	20,0%	3,963	0,976
	CP-15D	18,37	2,4	2,4	0,480	20,0%	3,987	0,919
	CP-16	0,03	0,4	0,4	0,080	20,0%	0,234	0,132
	CP-17	1,12	0,8	0,8	0,160	20,0%	2,188	0,873

Porcentagens da quantidade total de canais periféricos com variáveis de dimensionamento fora dos limites recomendados de projeto. Hip.: Borda Livre = 20%			
	Borda livre menor que 20%	Velocidade maior que 4,0 m/s	Número de Froude maior que 0,8
TR 500 anos	0,0%	28,1%	78,1%
TR 1.000 anos	0,0%	28,1%	81,3%

TR 10.000 anos	0,0%	31,3%	75,0%
PMP	0,0%	37,5%	81,3%

A análise das tabelas acima revela que, de acordo com os parâmetros de cálculo, as variáveis de projeto velocidade do fluxo e Fr não respeitam os limites aceitáveis (células destacadas em cor rosa) para uma quantidade de canais periféricos maior do que no caso anterior, mesmo considerando vazões menores. Ex. Para TR = 500 anos, 28% dos canais periféricos teriam velocidade maior que 4,0 m/s (contra 25% no caso anterior) e 78% teriam número de Froude menor que 0,8, contra 66% no caso anterior.

15. Sobre esses valores deve-se destacar o seguinte:

- O cálculo que impõe uma borda livre de 20% (as quatro últimas tabelas acima), limite definido no EIA, resulta em número de Froude menor ou igual a 1. O valor 1 é o limite superior teórico do regime subcrítico e deve ser evitado devido às imprecisões do cálculo e a instabilidade inerente a um regime de fluxo teoricamente no ponto exato de transição de subcrítico para supercrítico. Para segurança do dimensionamento, o recomendável é que Froude seja menor que 0,8. Esse limite conservador é tão mais necessário quanto mais se considera que se deve evitar acidentes e danos estruturais nas pilhas exatamente quando ocorrem as maiores vazões, o que se dá durante eventos extremos de chuva.
- Conforme demonstrado na Nota Técnica FPSF-NT-12-2026, os critérios tradicionalmente adotados no Brasil para o dimensionamento hidrológico e hidráulico de instalações de mineração — baseados predominantemente em séries históricas estacionárias, tempos de retorno elevados (TR) e na Precipitação Máxima Provável (PMP) — tornaram-se conceitualmente insuficientes para representar os riscos reais associados ao clima atual e futuro. Tais abordagens não capturam de forma adequada a não estacionariedade hidrológica, a intensificação dos eventos extremos, nem a erosividade das chuvas, variável física crítica diretamente relacionada aos mecanismos de falha por erosão, degradação de sistemas de drenagem e instabilização progressiva de maciços.

Estudos recentes indicam que os valores de TR 500, 1.000, 10.000 anos e PMP não são valores imutáveis, podendo ser superados em um clima mais quente, no qual os mecanismos de intensificação das chuvas convectivas e orográficas (caso do local onde se situa o Projeto de Longo Prazo) são ampliados. Organismos internacionais como a WMO e comitês técnicos do ICOLD reconhecem que estimativas tradicionais de PMP podem subestimar extremos futuros, especialmente para estruturas com vida útil longa. Portanto, o uso da PMP tradicional não garante, por si só, a consideração dos efeitos das mudanças climáticas.

Portanto, o dimensionamento dos canais periféricos apresentado no EIA, que já apresenta deficiências quando se considera apenas o ponto de vista tradicional de cálculo, certamente resultará em agravamento de condições em situações de vazões maiores que têm ocorrido e ocorrerão cada vez mais devido às mudanças climáticas.

16. O item “7.5.3.1.4.5.2 e 7.5.4.1.4.4.2 - Hidráulica: metodologia e softwares” do EIA, referente à pilha PDER M, inclui o seguinte texto:

“Dispositivos com trechos em declividade supercrítica:

Os dispositivos com declividade supercrítica foram dimensionados considerando-se o regime de escoamento permanente e crítico. No presente caso, as seções de controle foram sempre aquelas de montante, em virtude da ocorrência do regime supercrítico, sendo então aplicada a equação geral do regime crítico a essas seções. Em geral, esse é um critério amplamente

empregado a projetos de micro drenagem, como é o caso, pois simplifica os cálculos de forma parcimoniosa, resultando em geometrias únicas para longos trechos de dispositivos e facilitando, assim, a execução dos mesmos na obra. Foi adotado o mesmo critério de borda livre mínima de 20% da altura das paredes dos dispositivos citado anteriormente”.

17. Inconsistência Hidráulica e Subdimensionamento de Energia: o EIA analisado apresenta uma contradição física ao tratar de dispositivos com declividade supercrítica. O documento afirma que tais dispositivos foram dimensionados considerando o 'regime de escoamento permanente e crítico'. No entanto, a declividade crítica (Sc) é um valor único para uma dada vazão e seção. Se a declividade do fundo (S) é superior a Sc , o escoamento resultante é, por definição física, supercrítico ($Fr > 1$).

Forçar o cálculo para $Fr = 1$ em um canal onde $S > Sc$ é uma simplificação que viola as equações de conservação de energia e quantidade de movimento. Isso resulta na subestimação sistemática da velocidade real e da energia cinética do fluxo, parâmetros fundamentais para dimensionar a resistência ao arrasto dos revestimentos e a capacidade de dissipação de energia nas descidas

18. Inestabilidade do Fluxo e Riscos do Número de Froude Próximo à Unidade - um Estado Intrinsecamente Instável: A análise dos dados do EIA revela que mais de 75% dos canais periféricos foram projetados para operar com Número de Froude (Fr) entre 0,8 e 1,0, o que pode estar ocorrendo para os demais dispositivos de drenagem das pilhas. Este intervalo é hidraulicamente indesejável para canais de segurança. Próximo ao estado crítico ($Fr=1$), a energia específica é mínima e a profundidade do escoamento torna-se extremamente sensível a qualquer perturbação. Irregularidades no leito, curvas, aportes laterais ou variações de vazão podem desencadear:

- Ondas cruzadas e estacionárias de grande amplitude;
- Alternância imprevisível entre regimes sub e supercrítico;
- Flutuações bruscas na linha d'água.
- Nesse contexto, a borda livre fixa de 20% da altura da lâmina, adotada no projeto, é tecnicamente insuficiente para acomodar essas oscilações turbulentas. O risco de transbordamento por 'salto' de onda (*wave overtopping*) é elevado, representando um gatilho direto para erosão concentrada e instabilidade geotécnica nas pilhas.

19. Inadequação para Eventos Extremos (TR 500 a 10.000 anos e PMP): a adoção de critérios de "microdrenagem" e "simplificações parcimoniosas" é tecnicamente inaceitável para estruturas de alto dano potencial associado, como pilhas de rejeito no Quadrilátero Aquífero Ferrífero.

- Gestão de Energia: para TR's elevados ou PMP (Precipitação Máxima Provável), a vazão é massiva. O escoamento supercrítico real terá uma profundidade muito menor e uma velocidade muito maior do que o calculado pelo regime crítico. Isso pode causar o fenômeno de cavitação ou arrasto do revestimento.
- Localização do Ressalto Hidráulico: o critério simplificado falha em mapear onde poderão ocorrer os ressaltos hidráulicos. Em eventos extremos, um ressalto não previsto pode transbordar o canal, causando o galgamento (*overtopping*) da estrutura.
- Formação de Ondas de Rolamento (Roll-Waves): Em escoamentos supercríticos longos e em canais rugosos, é comum a formação de ondas de rolamento periódicas e auto-amplificadas. Estas ondas consomem a borda livre de forma dinâmica e imprevisível, um fenômeno que a simplificação por regime crítico é totalmente incapaz de prever.

20. Falta de Resiliência Climática e de Análise de 'Passagem Segura': a adoção de critérios simplificados de microdrenagem e uma borda livre mínima fixa demonstram uma

abordagem estática, incompatível com a necessidade de resiliência frente a incertezas climáticas. Conforme discutido nas seções anteriores deste relatório e alinhado ao princípio de precaução do GISTM, estruturas de alto dano potencial exigem uma análise explícita de 'passagem segura' (*safe passage*) ou 'tolerância ao galgamento' (*overtopping withstand*). O projeto deve demonstrar, via modelagem hidráulica dinâmica (ex.: modelo de parâmetros distribuídos ou 2D), qual o comportamento do sistema quando submetido a vazões superiores às de projeto (ex.: +30%, +50%), identificando pontos fracos e garantindo que eventuais transbordamentos não desencadeiem uma falha progressiva e catastrófica..

21. Lista de Quesitos e Perguntas Técnicas

Para o devido esclarecimento e garantia da segurança das estruturas, os seguintes pontos devem ser respondidos pelos responsáveis pelo projeto:

1. **Modelagem Hidráulica Realista:** Considerando que a declividade é supercrítica, qual é o perfil da linha d'água real e as velocidades máximas atingidas para cada TR (100, 500, 1.000, 10.000 anos e PMP), obtidos através de um cálculo de remanso (*standard step method*) que respeite o regime supercrítico? A planilha de cálculo deve ser fornecida.
 2. **Verificação de Estabilidade do Revestimento:** Para as velocidades reais do item anterior, qual é a tensão de máxima (τ_o) atuante para cada TR? Apresente a comparação direta entre τ_o e a tensão crítica admissível (τ_{adm}) do revestimento proposto (concreto, enrocamento), conforme metodologia do USBR ou similar.
 3. **Localização de Ressaltos:** Foram identificados os pontos de transição de declividade onde ocorrerão ressaltos hidráulicos? Qual a altura do ressalto nesses pontos e como ela se compara à altura total das paredes dos canais?
 4. **Sensibilidade do Número de Froude:** Como o projeto pretende mitigar as instabilidades de superfície e as ondas estacionárias decorrentes da operação de 75% da rede em regime próximo ao crítico ($0,8 > Fr < 1,0$)?
 5. **Critério de Borda Livre Dinâmico:** A NBR 10898/1990 (Drenagem Urbana) e manuais como o do *U.S. Department of Transportation (FHWA-HIF-12-026)*, por exemplo recomendam critérios de borda livre que consideram a velocidade e a profundidade (ex.: $BL = 0.076 * v * y^{(1/3)}$). Por que foi adotado, principalmente tendo-se em conta que se trata de um sistema de drenagem de pilhas de estêreis e de rejeitos, um critério fixo de 20% em detrimento de um critério dinâmico e mais conservador, e qual a borda livre resultante aplicando tais critérios aos escoamentos reais (supercríticos) de projeto?
 6. **Análise de Sensibilidade Climática e Falha Progressiva:** Foi realizada uma análise de sensibilidade do sistema de drenagem considerando um aumento de precipitação de 30% e 100% nos eventos de TR extremo (cenário de mudança climática)? Em qual ponto ocorreria o primeiro transbordamento, e qual o caminho preferencial deste fluxo extravasado? Este fluxo atingiria áreas críticas da pilha (pé do talude, acessos)? O projeto prevê bacias de contenção ou caminhos *fail-safe* para capturar este extravasamento sem causar danos. Os eventos extremos de chuva que tem sido registrados em todo o mundo, inclusive no Brasil, têm apresenta volumes muito superiores aos máximos históricos já registrados.
22. Generalização das Observações e Risco Sistêmico: As inconsistências hidráulicas e a falta de robustez identificadas nos canais periféricos – que são a primeira linha de defesa da pilha – não são um problema isolado. **A mesma metodologia simplificada e parcimoniosa foi provavelmente aplicada a todos os dispositivos de drenagem (canaletas de topo, berma, acesso e descidas de água). Portanto, todo o sistema de drenagem superficial da pilha está potencialmente subdimensionado em termos de energia cinética, velocidades e previsão de comportamento hidráulico realista. Esta falha conceitual generalizada representa um**

risco sistêmico à integridade da estrutura, exigindo a revisão completa da hidráulica de todos os seus componentes, e não apenas um ajuste pontual.

23. A relevância e necessidade de várias das considerações e pontos acima levantados é confirmada pelas seguintes exigências contidas na nova norma ABNT NBR 13018-3:20245, item “5.4.2.2 Vazão de projeto para drenagem superficial”:

“h) escolha da rugosidade das estruturas hidráulicas (coeficiente de Manning) compatível com o revestimento;

i) avaliar os segmentos em degraus e trechos de maior declividade de acordo com a característica do escoamento;

j) apresentar análise em termos de borda livre, considerando trechos em curva, baixas declividades e transições no número de Froude, quando há a possibilidade de formação de ressalto hidráulico;

k) selecionar, conforme a fase de operação e fechamento, um critério de borda livre para as estruturas considerando as características do escoamento;

l) avaliar as velocidades médias máximas compatíveis para cada revestimento e de acordo com o risco de dano à estrutura”;

8 Inconsistências e Lacunas Técnicas dos Critérios Hidrológicos Adotados no EIA

A tabela a seguir, elaborada com base nas informações contidas no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do Projeto de Longo Prazo da Samarco, sintetiza os critérios hidrológicos utilizados para o dimensionamento dos diversos dispositivos e estruturas das Pilhas de Disposição de Estéril e Rejeito (PDER M e PDER C). A análise comparativa evidencia disparidades significativas no nível de conservadorismo entre sistemas interligados, o que pode introduzir vulnerabilidades sistêmicas frente a eventos extremos, principalmente considerando-se o agravamento desses eventos devido às mudanças climáticas:

Síntese dos Critérios Hidrológicos – PDER M e PDER C

Nº	Tipo de Estudo / Sistema	Finalidade do Dimensionamento	Critérios Hidrológicos Adotados	Tempos de Retorno / Eventos	Métodos / Modelos Utilizados	Normas / Referências	Item do Documento
1	Drenagem superficial	Coletar e conduzir águas pluviais incidentes sobre as pilhas, evitando erosão e instabilidade	Quantis de chuva; coeficientes de escoamento; tempo de concentração; rotinas de cálculo próprias.	TR = 100 anos (bermas, canaletas de topo, acessos e descidas); TR = 500 anos (canais periféricos); verificação para TR = 1.000, 10.000 anos e PMP (canais periféricos).	Método racional; cálculos em planilhas (Excel).	ABNT NBR 13.029:2017	7.5.3.1.4.5; 7.5.4.1.1.13
2	Drenagem de fundo (interna)	Captar percolações, nascentes e fluxos internos no maciço da pilha	Balanco hídrico considerando precipitação média, evapotranspiração, recarga e descarga; escoamento turbulento; fator de segurança 10 aplicado à vazão de projeto.	Vazões medidas e calculadas localmente (sem TR explícito associado a eventos extremos).	Metodologia de Saliba et al. (2010); equações de fluxo turbulento; equação de Wilkins.	ABNT NBR 13.028:2017; ABNT NBR 13.029:2017	7.5.3.1.4.4; 7.5.4.1.4.3
3	Mancha de inundação – Rio Gualaxo do Norte	Avaliar interferência da cheia do rio nas pilhas e estruturas associadas	Modelagem hidrológica e hidráulica integrada; rugosidade de Manning conforme uso do solo; representação detalhada do terreno.	TR = 10.000 anos (evento extremo de referência).	HEC-HMS 4.2.1 (hidrologia); modelagem hidráulica bidimensional (2D) ; método de Huff (1967), 2º quartil, 50% de excedência.	Referências clássicas (Huff, Chow)	7.5.3.1.4.3; 7.5.4.1.4.2
4	Vertedouros (extravasores)	Garantir escoamento seguro das cheias nos diques e reservatórios de contenção de sedimentos	Dimensionamento hidrológico com base na cheia extrema; critério por dano potencial.	PMP (Precipitação Máxima Provável).	Cálculos hidrológicos convencionais e trânsito de cheias em reservatório.	ABNT NBR 13.028:2017	7.5.4.1.4.5.4



5	Trânsito de cheias	Avaliar propagação, níveis d'água, velocidades e amortecimento das cheias	Simulação não permanente; análise de velocidades e profundidades; interação rio–terreno–reservatórios.	TR = 10.000 anos (consistente com a mancha de inundação).	Modelagem hidráulica 2D integrada à hidrologia (HEC-HMS).	—	7.5.4.1.4.2; 7.5.4.1.4.5
6	Tempo de residência (sedimentação)	Garantir retenção de sedimentos nos reservatórios associados às pilhas	Tempo de residência = Volume / Vazão; avaliação granulométrica; comparação de velocidades de sedimentação.	Evento de referência: TR = 2 anos, duração 24 h (Morris & Fan).	Métodos de Brune (1953), Churchill (1948), Morris & Fan (2010) e Ábaco de Hjulström; método racional; rendimento específico regional.	Brune (1953); Churchill (1948); Souza (1993)	7.5.3.1.4.6.2; 7.5.4.1.4.5.2
7	Volume morto dos reservatórios	Estimar volume ocupado por sedimentos entre manutenções	Taxas específicas de geração de sedimentos por tipo de uso do solo.	Horizonte anual entre limpezas (baseado em condições médias).	Modelo empírico por taxas (m ³ /ha.ano).	Pinheiro (2011)	7.5.3.1.4.6.1
8	Produção de sedimentos	Subsidiar dimensionamento de reservatórios e controle ambiental	Taxas diferenciadas para terreno natural e pilha; consideração de revegetação.	Abordagem média de longo prazo.	Abordagem empírica regional.	Pinheiro (2011)	7.5.3.1.4.6; 7.5.4.1.1.15
9	Parâmetros hidráulicos operacionais	Garantir funcionamento hidráulico adequado dos dispositivos	Altura máxima da lâmina (80%); velocidades mín. e máx.; coeficientes de rugosidade; tempos mínimos de concentração.	Associados aos TR de projeto da drenagem superficial.	Hidráulica clássica de canais.	—	7.6.2.9.5
10	Eficiência de retenção de sedimentos	Avaliar desempenho ambiental dos reservatórios	Percentual de sedimentos retidos versus efluentes.	Associado às vazões médias e de pico do evento de TR = 2 anos .	Métodos de Churchill e Morris & Fan.	Churchill (1948); Morris & Fan (2010)	7.5.4.1.4.5.2

8.1 Análise das Inconsistências e Riscos Associados

A análise integrada dos critérios hidrológicos adotados para o projeto das PDER M e PDER C revela inconsistências relevantes no nível de conservadorismo, na coerência entre sistemas interligados e no alinhamento com o risco potencial das estruturas. Tais discrepâncias são particularmente preocupantes dada a localização das pilhas nas proximidades imediatas do rio Gualaxo do Norte, cujo transbordamento ou interação hidráulica com as estruturas do empreendimento pode gerar consequências ambientais e de segurança severas, risco que é consideravelmente acentuado no cenário atual de mudanças climáticas.

8.1.1 Disparidade nos tempos de retorno entre sistemas interdependentes

Enquanto a mancha de inundação do rio Gualaxo do Norte é avaliada para um evento extremo (TR = 10.000 anos), os sistemas de drenagem superficial das pilhas que conduzem as águas pluviais para jusante – muitas vezes em direção ao próprio rio ou às suas áreas de influência – são dimensionados majoritariamente para TR = 100 anos (elementos internos) e TR = 500 anos (canais periféricos). Essa assimetria cria um cenário de risco hidráulico desbalanceado: o comportamento do rio é analisado sob a ótica do pior caso, mas os sistemas que nele descarregam podem não possuir capacidade compatível para eventos raros, porém plausíveis. Durante uma cheia de TR = 10.000 anos, a sobrecarga nos sistemas de drenagem pode resultar em erosão acelerada, galgamento localizado ou colapso de canaletas, aumentando o aporte de água e sedimentos para áreas críticas do pé da pilha.

8.1.2 Incompatibilidade entre Vertedouros (PMP) e Drenagem de Alimentação (TR menores)

Os vertedouros dos diques de contenção de sedimentos são dimensionados corretamente para o PMP, atendendo à ABNT NBR 13.028 para estruturas com alto potencial de dano. No entanto, os sistemas de drenagem superficial e de captação que alimentam esses reservatórios não são, em sua totalidade, projetados para o mesmo cenário extremo. Essa desconexão pode levar a uma situação em que o vertedouro tem capacidade adequada, mas os canais e tubulações a montante entram em colapso por sobrecarga ou obstrução antes de entregar a vazão de projeto, comprometendo a funcionalidade do sistema de controle de cheias como um todo.

8.1.3 Drenagem Interna: Fator de Segurança Elevado, mas Baseada em Condições Médias

A drenagem de fundo (interna) das pilhas é dimensionada com um fator de segurança elevado, mas não justificado (FS = 10), o que pode ser positivo do ponto de vista conservador. Contudo, o critério hidrológico utilizado fundamenta-se em um balanço hídrico de condições médias, sem associação explícita a eventos extremos de precipitação de curta duração. Em cenários de chuvas intensas – exatamente aqueles considerados para a drenagem superficial (TR = 500/1000 anos) e para o rio (TR = 10.000 anos) –, a vazão de percolação interna pode ser significativamente superior à prevista.

Esta abordagem é tecnicamente inadequada, mesmo tendo-se em conta o elevado fator de segurança, pode estar subestimando gravemente o risco, pois:

- Mecanismos Críticos Ignorados: Chuvas com intensidade superior à capacidade de infiltração do material geram, desde o início do evento, uma taxa de aporte de água no topo do maciço igual à sua capacidade máxima de infiltração, criando pulsos de umedecimento potencialmente agressivos. No entanto, chuvas prolongadas, mesmo que de menor intensidade, ao infiltrar um volume total maior, representam a maior ameaça para a saturação generalizada e a estabilidade de longo prazo. O dimensionamento hidrológico da drenagem interna deve considerar ambos os cenários – o pico de intensidade e o volume total – associados a um Tempo de Retorno adequado

ao risco da estrutura. Ao usar apenas condições médias, o EIA não analisou adequadamente nenhum desses cenários críticos.

- Incompatibilidade com os Demais Critérios do Projeto: Enquanto a drenagem superficial é dimensionada para chuvas com TR de 100 a 500 anos, e o rio Gualaxo é analisado para TR 10.000 anos, a drenagem interna – que é a última linha de defesa contra a saturação e a liquefação do núcleo – é calculada para condições médias, criando um elo fraco sistêmico no projeto de segurança.
- Desconsideração do Comportamento Hidrodinâmico do Maciço: O cálculo não considera o tempo de resposta hidráulica da pilha. Uma chuva intensa de 6 horas pode iniciar um fluxo interno que atinge o sistema de drenagem de fundo muito depois do fim da chuva, mas a análise média não captura esta dinâmica transitória crucial para a estabilidade durante o evento extremo.
- Falta de Análise Acoplada (Chuva + Saturação): Não há análise integrada que simule a resposta hidrológico-geotécnica da pilha sob um evento de projeto combinado: uma chuva extrema (ex.: TR 500 ou 1.000 anos ou mais) ocorrendo sobre uma pilha com diferentes condições de umidade antecedente. Esta é a condição que definiria a vazão de pico real para a qual os drenos internos deveriam ser dimensionados.

Portanto, a metodologia adotada para a drenagem interna não atende ao princípio fundamental de segurança para estruturas geotécnicas de alto risco, que exige o dimensionamento para os cenários de carregamento mais adversos. A falha em considerar eventos críticos significa que o sistema de drenagem de fundo pode ser incapaz de prevenir a pressurização do maciço e o desencadeamento de instabilidade (liquefação estática, perda de resistência) exatamente durante as tempestades mais severas, que são também as que mais preocupam para a estabilidade global da pilha.

Esta é uma omissão que pode ser considerada grave e deve ser corrigida mediante a redefinição do evento hidrológico de projeto da drenagem interna, alinhando-o a um tempo de retorno compatível com o risco da estrutura e utilizando modelagem de infiltração transitória.

8.1.4 Critério de Sedimentação Incompatível com o Cenário de Risco

Esta é talvez a inconsistência mais crítica do ponto de vista conceitual e operacional. O tempo de residência e a eficiência de retenção de sedimentos nos reservatórios são avaliados com base em um evento de TR = 2 anos (duração 24 h), conforme a metodologia de Morris & Fan. Este critério é típico para avaliações de desempenho operacional rotineiro, mas é totalmente desalinhado com o nível de risco reconhecido para o empreendimento, que em outras componentes adota TR = 10.000 anos e PMP.

Consequências desta incompatibilidade:

- Durante eventos severos (TR = 100, 500, 10.000 anos), a vazão afluyente aos reservatórios será muito maior.
- O tempo de residência real será drasticamente reduzido, podendo ser ordens de magnitude menor que o calculado para TR = 2 anos.
- A eficiência de retenção de sedimentos cairá abruptamente, permitindo o carreamento massivo de material sólido para jusante.
- Esse carreamento pode causar assoreamento rápido de canais, dispositivos de drenagem e do próprio leito do rio Gualaxo, alterando condições hidráulicas e aumentando o risco de transbordamentos.

8.1.5 Análise Compartimentada versus Risco Sistêmico

O estudo demonstra uma abordagem robusta para componentes individuais (ex.: modelagem 2D do rio, trânsito de cheias). No entanto, há uma lacuna evidente na análise integrada dos efeitos combinados de:

- Cheia extrema do rio Gualaxo do Norte (TR = 10.000 anos).
- Precipitação intensa simultânea sobre as pilhas (evento congruente).
- Desempenho conjunto da drenagem superficial, drenagem interna, reservatórios de sedimentos e estruturas de contenção.
- Estabilidade hidráulica e geotécnica do pé das pilhas sob condição de submersão parcial.

A ausência dessa análise integrada cria um risco de avaliação fragmentada, onde cada sistema parece adequado isoladamente, mas o conjunto pode apresentar vulnerabilidades sistêmicas e efeitos em cascata não previstos.

8.1.6 Conclusões

As inconsistências identificadas nos critérios hidrológicos entre os diversos sistemas das PDER M e PDER C apontam para uma subestimação potencial dos riscos hidrológicos e hidrossedimentológicos integrados, especialmente frente a eventos extremos e sua intensificação devido às mudanças climáticas. O desalinhamento entre os Tempos de Retorno adotados para o rio (10.000 anos) e para os sistemas das pilhas (em sua maioria, 100 a 500 anos) constitui uma fragilidade significativa no projeto.

Como condição essencial para a segurança do empreendimento e do meio ambiente, o EIA deveria ter:

- Harmonizado os critérios hidrológicos para os sistemas interligados, elevando-se os TR de projeto da drenagem superficial periférica e dos sistemas de condução final para, no mínimo, o mesmo patamar do evento crítico considerado para o rio (TR = 10.000 anos), ou justifique-se tecnicamente a adoção de critérios diferenciados com base em análise de risco quantitativa.
- Adotado critérios adequados de dimensionamento para sedimentação, considerando um evento hidrológico de projeto compatível com o risco da estrutura (ex.: TR de pelo menos 500 ou 1000 anos) para o cálculo do tempo de residência e eficiência de retenção.
- Realizado uma análise integrada de risco hidrológico-hidráulico-geotécnico que simulasse cenários combinados críticos (cheia do rio + chuva intensa sobre a pilha), avaliando o desempenho sistêmico de todas as estruturas de drenagem, contenção e disposição.
- Adotado uma metodologia da drenagem interna que incorporasse cenários de precipitação extrema, assegurando que sua capacidade não seja subestimada durante os eventos que mais preocupam do ponto de vista de estabilidade.

A adoção de uma abordagem coerente e conservativa, alinhada ao alto risco potencial associado à localização do empreendimento, é fundamental para garantir a segurança a longo prazo das estruturas e a proteção adequada do rio Gualaxo do Norte, das comunidades próximas e dos ecossistemas.

8.2 Análise do EIA à Luz da Resolução ANM nº 220/2025 e do Contexto de Mudanças Climáticas

A Resolução ANM nº 220/2025 representa um marco regulatório robusto e atualizado para a segurança de barragens de mineração, consolidando e expandindo critérios técnicos,

classificatórios e operacionais em relação à antiga Resolução ANM nº 95/2022. Essa revisão reflete aprendizagem institucional advinda de acidentes com grande impacto humano, ambiental e social, como o rompimento da Barragem do Fundão, em 2015 — que lançou milhões de metros cúbicos de rejeitos no meio ambiente, destruiu comunidades inteiras em Mariana/MG e provocou um desastre que reverberou internacionalmente (impactos humanos e socioambientais amplamente documentados) — **o que torna indispensável que qualquer nova estrutura de contenção ou empilhamento de rejeitos no Complexo Germano observe os mais elevados padrões de segurança.**

Importante destacar que a Resolução 220/2025 inclui, expressamente, os “empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação” no conceito de *barragens de mineração* e atribui a eles obrigações semelhantes às aplicadas a barragens tradicionais, incluindo requisitos de estudos técnicos, cadastro e acompanhamento (Art. 2º e Art. 3º). Isso corrobora a necessidade de que as PDER M e PDER C, que se configuram como empilhamentos drenados, sejam tratadas sob este regime mais rigoroso.

Dado que o EIA do Projeto de Longo Prazo foi concluído em agosto de 2022, antes da Resolução 220 da ANM, e que a implantação das estruturas ainda não ocorreu, existe uma oportunidade normativa e técnica de alinhamento do projeto ao novo marco regulatório, o que se mostra ainda mais relevante em função do histórico local de tragédias e dos potenciais impactos futuros.

8.2.1 Comparativo Técnicos – Projeto vs. Resolução ANM nº 220/2025

A seguir, a comparação entre os critérios aplicáveis à Resolução ANM 220/2025² e aos critérios adotados no Projeto de Longo Prazo:

Tabela Comparativa – Projeto vs. Resolução ANM nº 220/2025

Aspecto Crítico	Resolução ANM 220/2025 (Requisito)	Projeto de Longo Prazo (EIA, 2022)	Análise Comparativa e Necessidade de Revisão
1. Classificação da Estrutura e Nível de Risco	Estruturas de contenção de rejeitos (ECR) incluem empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação; classificação formal de Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) obrigatório, com parâmetros técnicos e critérios objetivos (Art. 2º, Art. 3º).	As PDER’s foram consideradas pilhas de rejeito não suscetíveis a liquefação, sem classificação formal de CRI e DPA nem enquadramento como ECR conforme o novo conceito. No entanto (ver item no presente documento) é possível que tenham que ser consideradas empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação	Revisão urgente caso venha a ser constatado que são empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação. Nesse caso, as duas PDER se enquadram no conceito do inciso VII do art. 2º da Resolução 220,2025, ou seja, devem ser tratadas como barragens de mineração, o que provavelmente resultará em DPA Alta ou Máxima e exigirá critérios mais conservadores de projeto.
2. Evento Hidrológico de Projeto	Os estudos hidrológicos devem considerar condições associadas ao DPA/CRI, com dimensionamento de eventos hidrológicos compatíveis (por exemplo, eventos extremos; revisões periódicas de séries hidrológicas; inclusão de estudos de ruptura hipotética).	Projeto utiliza TR = 100/500 anos para drenagem superficial e abordagem hidrológica média para drenagem de fundo, com verificação simplificada para TR superiores.	Revisão necessária . Todos os sistemas hidráulicos (drenagens superficial e de fundo, dispositivos de controle de cheias) precisam ser recalibrados segundo o evento de projeto exigido pela classificação de risco, garantindo coesão com as exigências da Resolução e com

² Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-220-de-16-de-outubro-de-2025-663111294>. Acesso em 26/01/2026.

			os impactos potenciais identificados pelo DPA.
3. Estabilidade Hidrológico-Geotécnica	A Resolução exige, explicitamente, análise integrada de segurança geotécnica e hidráulica envolvendo regimes extremos e saturação elevada nos materiais, caso se constate que as pilhas são suscetíveis a liquefação.	A estabilidade geotécnica da pilha considera parâmetros convencionais, sem acoplamento explícito ao regime hidrológico de projeto (eventos extremos).	Revisão necessária caso venha a ser constatado que são empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação . Deve-se realizar análises hidrológico-geotécnicas integradas, simulando a infiltração e pressões internas durante o evento de projeto revisado, garantindo que a segurança do maciço seja demonstrada sob condições críticas.
4. PSEM e Instrumentação	A norma exige Plano de Segurança de Barragem (PSB) abrangente, inspeções regulares e instrumentação consolidada no SIGBM, com protocolos de alerta e resposta.	O EIA apresenta programas de instrumentação e monitoramento detalhados, mas não formalizados em um PSB conforme exigido pela nova resolução.	Revisão necessária caso venha a ser constatado que são empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação . É essencial estruturar e formalizar um PSB completo que incorpore instrumentação, padrões de alerta escalonados, responsabilidades, comunicação de risco e procedimentos de resposta conforme o DPA/CRI das PDER's.
5. Gestão de Riscos e AQR	A Resolução enfatiza análise de riscos, incluindo Estudo de Ruptura Hipotética, mapeamento de áreas afetadas (incluindo ZAS e ZSS) e consideração de consequências sociais, ambientais e econômicas (Art. 2º e conceitos correlatos).	O EIA contém análises de impacto, porém sem uma Análise Quantitativa de Riscos (AQR) detalhada com modelagem de rota de fluxo de rejeitos em cenários de ruptura ou instabilidade.	Revisão urgente caso venha a ser constatado que são empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação . A AQR para as PDER's deve ser implementada com modelagem de rotas de fluxo de rejeitos e delineamento das zonas de risco (ZAS/ZSS), com base nas diretrizes e parâmetros definidos na Resolução.

8.2.2 A Lacuna das Mudanças Climáticas

A Resolução ANM nº 220/2025 não aborda explicitamente as mudanças climáticas ou incorpora critérios de projeto adaptados a cenários futuros de mudança do clima — aspecto reconhecido internacionalmente como crítico para infraestrutura de segurança.

Considerando os cenários climáticos projetados para o Sudeste do Brasil, a ciência climática indica tendência de intensificação dos extremos pluviométricos, com maiores picos de chuva e maior variabilidade, o que pode resultar em:

- subestimação da PMP e de eventos extremos se baseados apenas em séries históricas;
- redução do tempo de retorno efetivo de cheias severas;
- maior probabilidade de eventos de intensidade superior aos parâmetros de projeto atuais.

Portanto, limitar os estudos às estatísticas históricas ou métodos clássicos (como distribuição IDF baseada em dados pretéritos) é insuficiente para garantir segurança de estruturas com vida útil prolongada, especialmente em um contexto de risco elevado como o do Complexo Germano.

8.2.3 Conclusão

À luz do exposto, a implantação do Projeto de Longo Prazo deve ser condicionada a uma revisão técnica e normativa abrangente que inclua:

1. **Estudos de liquefação:** ensaios e estudos detalhados e específicos, envolvendo os aspectos construtivos das duas pilhas, para verificação da possibilidade de liquefação dos rejeitos não apenas durante as fases de construção das pilhas, mas ao longo de toda a sua existência (décadas ou séculos).
2. **Reclassificação das PDER's como barragens, caso exista possibilidade de liquefação,** com definição de CRI e DPA conforme a Resolução 220/2025.
3. **Redimensionamento de todos os sistemas hidráulicos** (drenagens, vertedouros) segundo o evento de projeto associado à classificação de risco obtida e aos resultados de modelamentos de eventos extremos advindos das mudanças climáticas.
4. **Reexecução de modelos hidrológico-geotécnicos integrados** para avaliar estabilidade sob condições críticas de saturação.
5. **Elaboração de um Plano de Segurança de Barragem (PSB) completo,** incorporado ao SIGBM, com instrumentação, protocolos de alerta e resposta, **caso venha a ser constatada possibilidade de liquefação**
6. **Implementação de uma Análise Quantitativa de Riscos (AQR),** incluindo estudo de ruptura hipotética e definição das ZAS/ZSS concomitantemente com a ocorrência de eventos extremos advindos das mudanças climáticas.
7. **Incorporação de critérios de mudanças climáticas,** revisando séries hidrológicas, recalculando PMP/TR para cenários futuros e incluindo análises de sensibilidade.
8. **Adaptação dos planos operacionais e de emergência** de modo a integrar cenários futuros de clima extremo e garantir resiliência a eventos além dos parâmetros históricos.

8.3 Comparativo entre as Prescrições da ABNT NBR 13028-3:2025 e o Apresentado no EIA (2022)

A norma ABNT NBR 13028-3:2025 estabelece requisitos detalhados para projeto, execução, monitoramento e encerramento de pilhas de rejeito desaguado. Abaixo, contrastam-se suas prescrições com o conteúdo do EIA de 2022.

Tabela Comparativa – Prescrições da ABNT NBR 13028-3:2025 x EIA (2022)

Aspecto	O que prescreve a ABNT NBR 13028-3:2025	O que foi apresentado no EIA (2022)	Conformidade / Lacuna
5.3.1 – Projeto Conceitual	Exige estudos locacionais, alternativas tecnológicas, estudos geométricos, estudos geológico-geotécnicos preliminares, hidrológicos, hidrogeológicos, especificação para caracterização físico-química dos rejeitos, plano de instrumentação, plano de investigação e plano conceitual de fechamento.	O EIA apresentou estudos e definições com base no pressuposto de que as pilhas não são suscetíveis de liquefação, mas remeteu para fases posteriores a comprovação de que não haverá risco de liquefação nem durante a fase de operação das pilhas nem ao longo de toda a sua existência.	O EIA não realizou análise efetiva de alternativas locacionais para a disposição das pilhas. Não apresentou mapas em escala adequada, sobreposição de alternativas com áreas sensíveis e modelagens de impacto (hidrogeologia, ruído, dispersão atmosférica).

5.4.2 – Estudos Hidrológicos	Exige séries pluviométricas mínimas de 20 anos, análise de frequência, consideração de influência orográfica, tempo de retorno de 500 anos para drenagem periférica e 100 anos para drenagem superficial na pilha. Método racional só para bacias ≤ 1 km ² .	O EIA utilizou séries pluviométricas, mas não mencionou análise de influência orográfica nem justificou a escolha de métodos para bacias maiores. Algumas bacias ultrapassam a área de 1 km ² . Tempos de retorno não foram explicitamente associados a todos os dispositivos.	Parcialmente conforme. Lacunas na justificativa metodológica e na associação clara de tempos de retorno por estrutura.
5.4.3 – Estudos Hidrogeológicos	Devem permitir entender a influência na estabilidade, fluxo e qualidade da água subterrânea, e subsidiar dimensionamento de drenagem interna.	O EIA apresentou caracterização hidrogeológica, mas não integrou explicitamente os resultados ao dimensionamento da drenagem interna da pilha.	Parcialmente conforme. Falta de integração clara entre hidrogeologia e projeto de drenagem. Não considerou eventos extremos de chuva advindos das mudanças climáticas.
5.5 – Caracterização dos Rejeitos	Exige caracterização geotécnica, geoquímica e mineralógica, incluindo potencial de geração de drenagem ácida e lixiviação de metais. Deve ser contínua ao longo da vida útil.	O EIA apresentou caracterização físico-química e geotécnica, mas não detalhou programa contínuo de revalidação ao longo da operação.	Parcialmente conforme. Faltou plano de revalidação contínua da caracterização.
5.6.4 – Drenagem Interna	A necessidade deve ser justificada pelo projetista. Se ausente, justificar. Dimensionamento deve considerar vazões de percolação e sequenciamento construtivo.	A drenagem de fundo (interna) das pilhas dimensionada com um fator de segurança elevado (FS = 10).	Parcialmente conforme. O critério hidrológico utilizado fundamenta-se em um balanço hídrico de condições médias, sem associação explícita a eventos extremos de precipitação de curta duração. Em cenários de chuvas intensas a vazão de percolação interna pode ser significativamente superior à prevista.
5.6.5 – Avaliação da Segurança (Tabela 1)	Define fatores de segurança mínimos: 1,5 (estático), 1,1 (sísmico), 1,1 (pós-pico/residual). Admite 1,3 para geometria temporária se não houver potencial de mobilização para fora da área.	O EIA apresentou análises de estabilidade com fatores superiores a 1,5, mas não discriminou cenários sísmicos nem condições pós-pico/residual.	Parcialmente conforme. Ausência de análises sísmica. Análise sísmica incompleta (ver a seguir). Ausência de análises de comportamento <i>strain-softening</i>, cenários pós-pico/residual: item essencial. (Ver Anexo 1 ao presente documento).
Anexo A – Liquefação	Recomenda avaliação de suscetibilidade com metodologia justificada (linha de estado crítico, ensaios cíclicos etc.).	O EIA não apresentou análise específica de suscetibilidade à liquefação, estática ou cíclica.	Não conforme. Omite análise de risco de liquefação, exigida para materiais finos e condições sísmicas. Omite análise de estabilidade estática

			(Ver Anexo 2 ao presente documento).
--	--	--	--------------------------------------

8.3.1 Avaliação da Condição Sísmica e sua Conformidade com a ABNT NBR 13028-3:2025

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) das Pilhas PDER M e PDER C aborda a ação sísmica por meio de análises pseudostáticas de equilíbrio limite, aplicando um coeficiente de aceleração horizontal compatível com a sismicidade regional. Conforme os itens 7.5.3.1.3.4 e 7.5.4.1.3.4, essa abordagem demonstra que o carregamento sísmico foi considerado como uma força equivalente nas verificações de estabilidade global, resultando em fatores de segurança superiores aos mínimos adotados.

Entretanto, esta abordagem é parcial e não atende aos requisitos integrados de segurança sísmica estabelecidos pela ABNT NBR 13028-3:2025. As análises apresentadas possuem as seguintes limitações críticas:

1. Ausência de Análise para Condição Estática e Pós-Pico/Residual (Não Conforme à Tabela 1 da Norma): **O EIA apresenta unicamente análise para a condição pseudo-estática e omite a análise essencial da condição estática (ver Anexo 2 do presente documento).** As análises pseudostáticas foram realizadas exclusivamente com parâmetros de resistência de pico do rejeito, assumindo comportamento drenado. A norma, em sua Tabela 1, exige explicitamente a análise de estabilidade para a "Condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual" (Fator de Segurança mínimo de 1,1) para materiais com comportamento *strain-softening*. Dada a granulometria fina (0,001–0,4 mm) do rejeito filtrado, que é suscetível a esse comportamento, **a omissão da análise com parâmetros residuais sob ação sísmica constitui uma não conformidade direta** com a norma, deixando de avaliar o cenário de ruptura progressiva após a degradação da resistência do material.
2. Ausência de Avaliação de Suscetibilidade à Liquefação Cíclica (Não Conforme ao Anexo A da Norma): O EIA não apresenta qualquer estudo de liquefação sísmica (cíclica). A análise pseudostática verifica apenas o equilíbrio de forças e não avalia o mecanismo fundamental de liquefação: a geração progressiva de pressões neutras e a consequente perda de tensões efetivas sob carregamento cíclico, que pode levar ao colapso abrupto da estrutura. A norma, em seu Anexo A, prescreve a avaliação da liquefação cíclica, recomendando metodologias como a de Seed e Idriss (1971). A falta desta avaliação específica é uma omissão grave, pois a estabilidade pseudostática não garante imunidade à liquefação.

Embora o EIA do Projeto de Longo Prazo tenha sido finalizado em 2022, anteriormente à publicação da ABNT NBR 13028-3:2025, as exigências técnicas desta Norma, em especial a **Avaliação de Suscetibilidade à Liquefação Cíclica (Anexo A da Norma), não constituem uma inovação, mas a sistematização de práticas já consolidadas na engenharia geotécnica internacional para estruturas de grande porte e risco.** Nenhum impedimento técnico existia para que o EIA, à época, incorporasse voluntariamente tal avaliação, principalmente considerando a natureza fina e potencialmente contratante do rejeito, a escala e altura das pilhas, sua localização sensível próxima ao rio Gualaxo do Norte e a comunidades, e o histórico do próprio Complexo Germano. **A omissão desse estudo específico, portanto, representa uma lacuna crítica,** pois a estabilidade verificada em condições pseudostáticas não avalia o mecanismo de geração progressiva de poropressões e perda de tensões efetivas sob carregamento cíclico, que é distinto e **essencial para a segurança sísmica.**

Dessa forma, a exigência normativa para a análise de liquefação cíclica não é uma obrigação retroativa arbitrária, mas a formalização de um requisito que já integrava o corpo de

conhecimento técnico aplicável a projetos desta magnitude. **A ausência desta avaliação no EIA revela uma abordagem que não refletiu o estado da arte disponível nem o princípio da precaução exigível.** Consequentemente, sua implementação agora é mais do que uma adequação normativa; trata-se de uma necessidade técnica e preventiva imprescindível para garantir que as PDER M e PDER C não repitam vulnerabilidades já amplamente reconhecidas no setor, assegurando um padrão de segurança compatível com o risco que representam.

8.3.2 A Relação Direta entre Sismos e a Ruptura da Barragem de Fundão

Com base na análise técnica dos registros sísmicos e dos relatórios oficiais sobre o desastre de Fundão³, é inequívoca a relação temporal e espacial entre a sequência de abalos sísmicos ocorridos em 5 de novembro de 2015 e a ruptura da barragem. Na tarde do evento, uma série incomum de cinco tremores, incluindo eventos com magnitudes de momento (Mw) entre 1.4 e 2.6, foi registrada nas proximidades imediatas das barragens de Fundão, Germano e Santarém, no Complexo Germano da Samarco. Destaca-se que um desses abalos ocorreu a apenas três minutos do colapso estrutural, conforme dados sismológicos publicados por Agurto-Detzel et al. (2016).

A magnitude desses eventos, embora considerada baixa em escala global, foi suficiente para ser sentida claramente na região, causando pequenos danos e alertando funcionários. Investigações subsequentes, como o Relatório de Morgenstern (2016), apontam que esses sismos, combinados com as condições geotécnicas preexistentes da estrutura, atuaram como gatilho para a mobilização de resistência residual e a liquefação estática dos rejeitos finos e saturados, mecanismos críticos que não haviam sido adequadamente considerados nos projetos e análises de estabilidade da barragem.

Este contexto histórico é diretamente relevante para a avaliação de segurança das futuras Pilhas PDER M e PDER C, uma vez que estas estão previstas para o mesmo complexo mineral, em área geologicamente similar e comprovadamente sujeita a atividade sísmica — tanto natural quanto induzida por mineração. A ocorrência de sismos, mesmo de baixa magnitude, em uma região que já testemunhou uma catástrofe associada a rejeitos finos, reforça de maneira categórica a necessidade de que os projetos incorporem análises de estabilidade completas e conservadoras. Isso inclui, conforme exigido pela ABNT NBR 13028-3:2025, as verificações em **condição estática**, a avaliação da **mobilização de resistência pós-pico ou residual** (especialmente para materiais *strain-softening*) e a **análise de suscetibilidade à liquefação estática e cíclica**. A simples consideração de um coeficiente sísmico pseudostático, sem avaliar a degradação progressiva da resistência dos rejeitos finos (0,001–0,4 mm) sob carregamento cíclico ou impacto, reproduziria as mesmas vulnerabilidades que contribuíram para o desastre de Fundão. Portanto, a lição aprendida impõe que a segurança dessas novas estruturas seja demonstrada à luz dos mecanismos de falha realistas, já evidenciados no próprio local onde serão implantadas.

8.3.2.1 Referências:

Agurto-Detzel, H., M. Bianchi, M. Assumpção, M. Schimmel, B. Collaço, C. Ciardelli, J. R. Barbosa, and J. Calhau (2016), *The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence*, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4929–4936, doi:10.1002/2016GL069257.

³ Ver, por exemplo: <https://www.mining.com/why-samarco-tailings-dam-failed/>, <https://www.miningreview.com/international/bhp-billiton-reveals-cause-of-samarco-disaster/>, <https://www.resolutionmineeis.us/documents/fundao-2016>.

Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., Watts, B. D. (2016) Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão. Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão. 25 de Agosto de 2016.

Assumpção, M., et al. (2014), *Intraplate seismicity in Brazil, in Intraplate Earthquakes, edited by P. Talwani*, pp. 50–71, Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Agurto-Detzel, H., M. Assumpção, M. Bianchi, and M. Pirchiner (2015a), *Intraplate seismicity in mid-plate South America: Correlations with geophysical lithospheric parameters*, Geol. Soc., Lond., Spec. Publ., 432, SP432-5, doi:10.1144/SP432.5.

8.3.3 Material de comportamento contrátil (*contractive material*):

Um material contrátil é um solo ou rejeito granular fino que, quando submetido a um carregamento de cisalhamento em condições não drenadas (ou seja, quando a água nos vazios não tem tempo de escapar), tende a reduzir seu volume (contração) durante o cisalhamento. Esse fenômeno é crucial para entender o risco de liquefação e *strain-softening*.

A caracterização granulométrica do rejeito filtrado previsto para as Pilhas PDER M e PDER C, com partículas na faixa de 0,001 a 0,4 mm, é indicativa de um material com comportamento potencialmente contrátil. Essa classificação geotécnica denota uma propensão intrínseca à redução de volume sob cisalhamento não drenado, sendo um precursor direto dos fenômenos de *strain-softening* e liquefação estática.

A premissa central do Projeto de Longo Prazo, que associa a compactação inicial a graus superiores a 97% do Proctor Modificado com a eliminação deste risco, revela-se tecnicamente frágil diante de três fatores operacionais críticos. Primeiramente, a obtenção de uma compactação perfeita e homogênea é um desafio prático considerável, particularmente nas zonas mais vulneráveis, como bordas, cristas e taludes das pilhas, onde o confinamento é menor e o controle de qualidade se torna mais complexo. Em segundo lugar, a estrutura está sujeita à dinâmica hidrológica ambiental, onde a infiltração de chuvas ao longo de sua vida útil pode elevar progressivamente o grau de saturação do rejeito, alterando fundamentalmente seu comportamento mecânico e reativando sua tendência à contração. Por fim, a possibilidade de carregamento sísmico cíclico, ainda que de baixa intensidade, pode induzir o rearranjo estrutural e a contração da estrutura sólida mesmo em massas com densidade moderada, desencadeando o aumento de poropressões e a perda de resistência.

É precisamente para gerir esses riscos inerentes a materiais com tal perfil que a ABNT NBR 13028-3:2025 estabelece exigências técnicas específicas e complementares. A norma determina que materiais com características contráteis devem ser submetidos a análises explícitas de suscetibilidade à liquefação, conforme metodologias prescritas em seu Anexo A, e à verificação da estabilidade para a condição de mobilização da resistência pós-pico ou residual, com fator de segurança mínimo de 1,1, conforme a Tabela 1 da Norma.

Estas prescrições não são meras recomendações, mas requisitos mandatórios que reconhecem a sequência de falha: o comportamento contrátil é o mecanismo gerador que pode levar à liquefação ou à ruptura progressiva. Portanto, ignorar esta característica fundamental do material constitui a omissão de um dos principais mecanismos de risco geotécnico, comprometendo a avaliação de segurança integral da estrutura e representando uma não conformidade direta com o estado da arte normativo. A robustez do projeto depende, assim, do reconhecimento deste comportamento e da execução das análises específicas exigidas, as quais foram omitidas no estudo de impacto ambiental apresentado.

8.3.4 Comportamento *strain-softening* x liquefação

O comportamento ***strain-softening*** e a **liquefação** constituem mecanismos distintos de perda de resistência em materiais granulares finos, embora ambos possam resultar em instabilidade súbita de estruturas geotécnicas.

O *strain-softening* ocorre quando o material, após atingir a resistência de pico sob cisalhamento, apresenta redução progressiva da resistência com o aumento da deformação, atingindo um patamar residual significativamente inferior. Este mecanismo está associado à reorganização estrutural e à mobilização de resistência residual, podendo ocorrer mesmo em condições drenadas ou parcialmente drenadas, sendo crítico para a avaliação de rupturas progressivas e escorregamentos de grande extensão. A norma ABNT NBR 13028-3:2025 exige análise específica para esta condição, com fator de segurança mínimo de 1,1.

Já a liquefação caracteriza-se pela perda abrupta de resistência devido ao aumento excessivo da pressão neutra em condições não drenadas, estáticas ou cíclicas, levando à redução das tensões efetivas e ao colapso do esqueleto granular. Pode ocorrer mesmo em materiais inicialmente densos se submetidos a saturação localizada ou carregamentos cíclicos (ex.: sismos). O Anexo A da mesma Norma estabelece metodologias para avaliação dessa suscetibilidade.

A verificação simultânea de ambos os mecanismos é indispensável, pois a ausência de liquefação não elimina a possibilidade de perda pós-pico por *strain-softening*, assim como a estabilidade em termos de resistência residual não garante imunidade à liquefação. Ambos representam modos de falha independentes e potencialmente críticos, especialmente em pilhas de rejeitos de grande porte, nas quais variações construtivas, heterogeneidades de compactação e eventos hidrológicos extremos podem mobilizar diferentes condições de instabilidade.

A análise referente ao comportamento *strain-softening* / pós-pico é essencial e indispensável. Sobre esse aspecto, ver Anexo 1 ao presente documento.

8.3.5 Conclusões – Avaliação Sísmica, *Strain-Softening* e Liquefação

A análise comparativa entre o Estudo de Impacto Ambiental (EIA), elaborado em 2022, e os requisitos atualmente consolidados na ABNT NBR 13028-3:2025 indica que, embora o EIA tenha atendido a diversos requisitos gerais aplicáveis a pilhas de rejeito desaguado — especialmente no que se refere à caracterização inicial dos materiais e à consideração formal da ação sísmica por meio de abordagem pseudostática —, **permanecem lacunas relevantes em aspectos críticos de segurança geotécnica e gestão de riscos ao longo do ciclo de vida das estruturas.**

Em particular, as análises de estabilidade apresentadas no EIA limitam-se à verificação do equilíbrio global sob forças sísmicas equivalentes, utilizando parâmetros de resistência de pico, sem contemplar, de forma integrada, os demais mecanismos de perda de resistência exigidos pela norma. **Não foram realizadas análises específicas** para a condição pós-pico ou residual, tampouco foi demonstrado, por meio de ensaios apropriados, que o rejeito empregado não apresenta comportamento *strain-softening*. Da mesma forma, não consta no EIA avaliação da suscetibilidade à liquefação, seja em condição estática ou cíclica, apesar da granulometria fina do material, da escala das pilhas, de sua proximidade com áreas sensíveis e da possibilidade de carregamentos dinâmicos ou condições de saturação localizada.

A ABNT NBR 13028-3:2025 estabelece de forma explícita que a segurança de pilhas de rejeito desaguado deve ser avaliada por uma abordagem em camadas, que inclua, de maneira complementar: (i) a verificação do equilíbrio sob carregamento sísmico; (ii) a análise de estabilidade considerando a mobilização da resistência pós-pico ou residual em materiais potencialmente *strain-softening*; e (iii) a avaliação da suscetibilidade à liquefação, em especial sob ações sísmicas cíclicas. **A ausência das análises dos itens (ii) e (iii) representa uma lacuna técnica significativa, que impede a adequada quantificação do risco de instabilidade progressiva ou colapso associado à degradação de resistência do material.**

Dessa forma, caso o projeto fosse avaliado à luz dos critérios atualmente estabelecidos na ABNT NBR 13028-3:2025, seriam necessárias complementações substanciais nos estudos geotécnicos, especialmente no que se refere às análises sísmicas avançadas, à caracterização do comportamento pós-pico e à verificação da liquefação. Tais complementações são particularmente relevantes diante do porte das estruturas, do contexto de risco do Complexo Germano e da necessidade de adoção de critérios conservadores para garantir a segurança estrutural e a adequada gestão de riscos ao longo de toda a vida útil das PDER M e PDER C.

9 Estudos Hidrológicos do Projeto de Longo Prazo

9.1 Fontes dos Dados de Precipitação

O item “7.5.3.1.4.2 Estudos de chuvas intensas” do EIA do Projeto de Longo Prazo informa que:

“Para a região de interesse do projeto conceitual em questão, utilizou-se como referência a publicação “Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração” (PINHEIRO, 2011), a qual contém uma consolidação de estudos de chuvas intensas desenvolvidos para a região do Quadrilátero Ferrífero.

Na inserção a seguir são apresentados os quantis de precipitações da Mina Alegria, de propriedade da empresa Vale, localizada próxima à área de estudo da PDER M. Estes quantis foram considerados para o presente estudo”.

INSERÇÃO 7-86 - Relação precipitação-duração-frequência válidos para a Mina Alegria e atribuídos à área de abrangência dos estudos. Fonte: (Pinheiro, 2011)

DURAÇÃO	PRECIPITAÇÃO (MM) X PERÍODO DE RETORNO (ANOS)										PMP
	2	5	10	25	50	100	200	500	1.000	10.000	
6 min	11,6	14,8	16,9	19,5	21,4	21,7	23,4	25,8	27,6	33,5	34,9
10 min	20,1	25,3	28,7	33,0	36,1	37,8	40,7	44,5	47,3	56,5	58,9
15 min	26,8	33,7	38,2	43,7	47,7	50,6	54,5	59,4	63	74,7	77,9
20 min	31,5	39,7	44,9	51,3	56	59,7	64,2	69,9	74,1	87,6	91,4
30 min	38,2	48	54,3	62,1	67,7	72,6	77,9	84,8	89,8	106	110,4
1 hora	49,6	62,4	70,4	80,4	87,6	94,5	101	110	117	137	142,9
2 horas	65,5	82,7	93,8	108	118	128	137	150	160	190	198,3
3 horas	74,8	94,6	107	124	135	147	158	173	185	221	230,8
4 horas	81,4	103	117	135	148	161	173	190	202	243	253,8
6 horas	90,7	115	131	151	165	180	194	213	228	274	286,2
8 horas	97,2	123	140	162	178	194	209	230	245	296	309,2
10 horas	102	130	148	171	188	204	221	243	259	314	327
12 horas	107	135	154	178	196	213	230	253	271	328	341,6
18 horas	116	147	168	194	213	232	251	277	296	359	374
24 horas	122	155	177	205	226	246	266	293	313	381	397
2 dias	157	200	229	266	293	320	347	382	409	498	447
3 dias	192	245	280	324	357	390	423	466	498	606	520
5 dias	247	314	359	415	457	499	540	595	636	773	666
7 dias	292	371	423	489	538	587	635	699	747	908	902
10 dias	348	441	502	579	637	694	750	825	882	1.070	1.002
15 dias	426	541	617	713	784	855	926	1.019	1.090	1.323	1.139
20 dias	491	621	708	817	897	978	1.058	1.163	1.243	1.507	1.395
30 dias	602	755	856	985	1.080	1.174	1.268	1.393	1.486	1.798	1.607

Essa tabela é cópia exata da “Tabela AI.7.24 – Altura Pluviométrica PT,d (mm) na mina Alegria”, pág. 277 do documento de Pinheiro, 2011, o qual, em seu Anexo denominado “Estudos de Chuvas Intensas na Área de Abrangência da DIFL – Diretoria de Ferrosos Sul – E DIFS – Diretoria de Ferrosos Sudeste – MG”, inclui essa e diversas outras tabelas, para outras minas da Vale.

De acordo com as Inserções 7-114, 7-115, 7-205 e 7-206 do EIA, a precipitação média anual para a região de estudo considerada no cálculo foi de 2050 mm, conforme Pinheiro (2011).

O documento mencionado como fonte dos valores de precipitação, a seguir referenciado apenas como “Diretrizes” é:

- PINHEIRO, M. C. 2011. Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração. Mário Cicareli Pinheiro. 1ª Edição. ABRH.

Os estudos hidrológicos e os dimensionamentos hidráulicos que foram realizados para as Pilhas de Estéreis PDER M e PDER C, incluindo a mancha de inundação e os dispositivos de drenagem, foram baseados nos quantis acima apresentados.

Nos itens a seguir são abordados aspectos dos estudos hidrometeorológicos, fazendo-se uma análise de pontos passíveis de questionamentos e de revisões do EIA por apresentarem o que se pode considerar como inconsistências, lacunas e/ou deficiências.

Com base na análise das páginas 243 a 264 do documento “Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração”, é possível explicar o processo de obtenção das tabelas de valores de chuva apresentadas nas páginas 267 a 285, com destaque para os três aspectos solicitados.

9.2 Metodologia de Obtenção das Tabelas de Chuva

De acordo com descrição detalhada no Anexo acima mencionado, as tabelas de valores de chuva apresentadas (incluindo relações intensidade-duração-frequência – IDF) foram elaboradas com base em séries históricas de precipitação coletadas em estações pluviométricas localizadas predominantemente na região central de Minas Gerais. Foram utilizados nos estudos os bancos de dados da Agência Nacional de Águas – ANA, do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM (responsável pelo Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais – SIMGE), bem séries históricas de precipitações de várias estações pluviométricas da Vale cujos dados não são disponíveis publicamente.

O procedimento seguiu os métodos descritos no Capítulo 5.6 do documento, especialmente os subitens referentes à Pluviologia (5.6.4 a 5.6.6).

1. Análise estatística de séries históricas: Foram utilizadas amostras de máximos anuais de precipitação com durações variadas (desde 5 minutos até 24 horas), obtidas de estações pluviométricas da rede oficial (ANA, INMET) e de monitoramento local da VALE.
2. Ajuste de equações de chuvas intensas: Os dados foram submetidos a análise de frequência, geralmente com distribuição de Gumbel ou metodologia similar, para obtenção dos quantis correspondentes a períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.
3. Desagregação de chuvas de 24 horas: Quando não havia registros pluviográficos de curta duração, utilizou-se o método de desagregação de Taborga (1974) ou similar, baseado em relações regionais entre chuvas de diferentes durações (isozonas).
4. Regionalização: Para locais sem dados, aplicaram-se metodologias de regionalização, utilizando equações IDF ajustadas para regiões hidrologicamente homogêneas, como a equação de Pinheiro & Naghettini (1998) para a RMBH.

9.3 Pontos de Atenção Relevantes

1. **Data limite das séries históricas (até 2010)**: As séries pluviométricas utilizadas nos cálculos têm como data limite o ano de 2010. Isso significa que **eventos de chuva ocorridos nos últimos 15 anos não foram considerados** nas análises de frequência e na

definição das relações IDF. Portanto, as tabelas podem não refletir a variabilidade climática mais recente, incluindo possíveis extremos pluviométricos ocorridos após 2010.

2. **Não consideração de mudanças climáticas:** Os cálculos **não incorporam os efeitos das mudanças climáticas** observadas nas últimas décadas nem utilizam projeções climáticas futuras baseadas em cenários do IPCC. As relações IDF foram derivadas exclusivamente de séries históricas passadas, presumindo estacionariedade hidrológica. Isso pode levar a subestimação ou superestimação das precipitações de projeto para cenários futuros, especialmente em períodos de retorno longos.
3. **Aplicação da Tabela da Mina Alegria (Tabela AI.7.24, p. 277):** A **Tabela AI.7.24**, referente à **Mina Alegria**, foi elaborada com base nos mesmos métodos descritos e foi **utilizada para os cálculos do Projeto de Longo Prazo da Samarco**. Como a mina se localiza na área de abrangência da DIFL e DIFS, os valores dessa tabela são considerados aplicáveis e representativos para os estudos hidrológicos do referido projeto. Essa tabela contém as intensidades de chuva (mm/h) para diferentes durações e períodos de retorno, fundamentais para o dimensionamento hidráulico de estruturas como vertedouros, canais e sistemas de drenagem.
4. A “Tabela AI.4.1 – Estações pluviométricas selecionadas na área de abrangência dos estudos” do Anexo acima mencionado contém dados de 93 estações pluviométricas, sendo 64 da rede pública da ANA, 24 da Vale (dados privados, não acessíveis) e as restantes da CEMIG (1), DAEE-MG (1), SIMGE (1) e INMET (2). Os pluviômetros das unidades operacionais da Vale, embora de boa qualidade, tinham registros descontínuos, com falhas frequentes e períodos variáveis (em média cerca de 10 anos). Muitos não tinham dados diários (apenas totais mensais) e alguns acumulam leituras em finais de semana e feriados. Por essas limitações, seus dados não foram considerados adequados para a análise de chuvas extremas apresentada no documento de Pinheiro, 2011, mas foram utilizados para caracterizar a precipitação anual média da região.

De acordo com o item AI.4.2 do Anexo, *“foram utilizadas somente as estações com amostras superiores a 20 anos de dados, homogêneas, que respeitassem o princípio da independência serial e, preferencialmente, com assimetria positiva. Além disso, foi realizada uma cuidadosa avaliação dos outliers eventualmente presentes nas séries, bem como dos registros acumulados de chuva, especialmente para a construção das amostras de durações superiores a 1 dia”*, o que reduz significativamente a quantidade de estações úteis para os cálculos.

5. Um análise detalhada, realizada pelos autores do presente documento, da lista das 93 estações cujos dados foram consultados revela que apenas 16 situam-se em um raio de 40 km⁴ ao redor do local das Pilhas PDER M e PDER C, podendo-se considerar estações fora dessa área como não totalmente representativas das condições do local do Projeto de Longo Prazo. Dessas 16 estações, apenas 10 têm dados até 2010 (as outras 6 têm dados apenas até 1964 a 1966). Das 10 estações, apenas 6 têm séries históricas com 20 ou mais anos de duração e uma delas é da VALE. Portanto, das 93 estações, apenas 5 estão relativamente próximas da área das duas pilhas, têm dados públicos até 2010 e com mais de 20 anos de duração. Séries com dados mais antigos (até 1966 por exemplo) não incorporam possíveis comportamentos climatológicos mais recentes.

A tabela a seguir apresenta a lista das 16 estações descritas acima:

⁴ O critério adotado foi o de estar a menos de 22 minutos de arco (em latitude e longitude) da localização do projeto, o que corresponde a um raio aproximado de 40 km.

	Código	Nome	Município	Altitude (m)	Disponibilidade de Dados	Latitude	Longitude	Entidade resp.	Duração da Série (Anos)	Data Final da Série (Ano)
1	2043009	Acaiaca - Jusante	Acaiaca	423	03/1941 a 05/2010	-20°21'45"	-43°08'38"	ANA	69,2	2010
2	2043011	Fazenda Paraíso	Mariana	477	04/1941 a 05/2010	-20°23'24"	-43°10'49"	ANA	69,1	2010
3	ALEPL001	Mina Alegria	Mariana	942	01/1962 a 09/2010	-20°10'23"	-43°29'43"	VALE	48,7	2010
4	2043027	Fazenda Ocidente	Barra Longa	462	03/1967 a 05/2010	-20°17'08"	-43°05'56"	ANA	43,2	2010
5	2043059	Colégio Caraça	Santa Barbara	1300	01/1983 a 03/2010	-20°05'49"	-43°29'17"	ANA	27,2	2010
6	2043056	Fazenda Água Limpa - Jusante	Ouro Preto	965	01/1984 a 05/2010	-20°18'19"	-43°36'59"	ANA	26,3	2010
7	TIMPL001	Mina Timbopeba - Mina	Ouro Preto	1114	01/1995 a 09/2010	-20°15'54"	-43°31'04"	VALE	15,7	2010
8	FNVPL001	Mina Fábrica Nova	Mariana	973	01/2001 a 09/2010	-20°12'10"	-43°26'09"	VALE	9,7	2010
9	TIMPL002	Mina Timbopeba - Torre	Ouro Preto	1538	01/2001 a 09/2010	-20°16'04"	-43°31'38"	VALE	9,7	2010
10	FAZPL001	Mina Fazendão	Mariana	888	09/2002 a 09/2010	-20°08'31"	-43°24'54"	VALE	8,0	2010
11	2043028	Bicas	Mariana	-	08/1941 a 02/1966	-20°21'00"	-43°14'00"	ANA	24,5	1966
12	2043007	Vargem do Tejuical	Ouro Preto	1021	03/1941 a 12/1965	-20°20'00"	-43°33'00"	ANA	24,8	1965
13	2043008	Monsenhor Horta	Mariana	639	03/1941 a 12/1965	-20°21'00"	-43°17'00"	ANA	24,8	1965
14	2043022	Colégio Caraça	Santa Barbara	1300	10/1941 a 12/1965	-20°13'00"	-43°34'00"	ANA	24,2	1965
15	2043023	Conceição do Rio Acima	Santa Barbara	805	10/1941 a 12/1965	-20°04'00"	-43°35'00"	ANA	24,2	1965
16	2043003	Passagem de Mariana	Mariana	820	01/1941 a 12/1964	-20°23'00"	-43°26'00"	ANA	23,9	1964

Assim as tabelas de chuva das páginas 267 a 285 do doc. “Diretrizes” resultam de metodologias estatísticas e regionalização hidrológica consolidada, porém com duas limitações importantes:

- **Base de dados desatualizada para uso atual (séries até 2010);**
- **Ausência de ajustes para mudanças climáticas.**

A Tabela da Mina Alegria poderia ser válida para o Projeto de Longo Prazo da Samarco, desde que, reconhecidas essas restrições, tivessem sido realizadas atualizações com dados recentes e incorporado efeitos de mudanças climáticas ou projeções futuras do IPCC.

Portanto, os dados da maioria das estações – mesmo considerando os processos tradicionais de cálculo, baseados no pressuposto da estacionariedade das séries históricas – não podem ser considerados plenamente representativos das condições pluviométricas locais do Projeto de Longo Prazo da Samarco, o que introduz uma incerteza adicional na regionalização das chuvas intensas para esse empreendimento.

9.4 Metodologia de Cálculo dos Valores de Tempo de Retorno (TR)

O item AI.6.2.4 do estudo hidrológico do documento de Pinheiro (2011) utilizado como fonte dos dados de chuvas usados para os dimensionamentos do Projeto de Longo Prazo contém uma decisão metodológica crucial – a seleção da distribuição de probabilidades para modelar precipitações máximas anuais – que é **justificada de forma insuficiente e potencialmente comprometedor para a confiabilidade dos tempos de retorno calculados, especialmente para eventos raros e extremos**. As fragilidades metodológicas podem ser assim resumidas:

1. Uso exclusivo da medida de aderência (Z) é metodologicamente insuficiente como critério decisório único.

A referência à “medida de aderência (Z)” sem especificação explícita do teste estatístico utilizado compromete a transparência e a reprodutibilidade da análise. Caso a medida Z corresponda ao coeficiente de correlação de Filliben (PPCC), hipótese compatível com a prática hidrológica aplicada em diversos estudos da época, isso deveria ter sido declarado expressamente. Tal métrica é útil como indicador preliminar gráfico-numérico de ajuste global, mas é insuficiente como critério único de seleção de modelo. Ela mede correlação

geral entre quantis teóricos e amostrais, porém é reconhecidamente pouco sensível a desvios nas caudas da distribuição — justamente a região que controla os quantis associados a tempos de retorno elevados. Um valor de Z próximo de 1 indica bom ajuste central, mas não valida, por si só, a capacidade da distribuição de representar adequadamente eventos raros e extremos.

2. Ausência de testes formais de aderência e de critérios de informação para comparação de modelos.

A justificativa apresentada não menciona a aplicação de testes formais de aderência baseados em hipótese estatística, como Anderson-Darling, Cramér–von Mises ou Kolmogorov–Smirnov. Entre esses, o teste de Anderson-Darling é particularmente recomendado para estudos de extremos por atribuir maior peso às caudas da distribuição. **A omissão desses testes impede avaliação objetiva da adequação probabilística dos modelos candidatos.** Também não são apresentados critérios de informação como AIC (Akaike) ou BIC (Bayesiano), já amplamente aceitos na literatura estatística e progressivamente adotados na hidrologia aplicada para comparação entre modelos concorrentes. Esses critérios quantificam o compromisso entre qualidade de ajuste e complexidade do modelo, penalizando parâmetros adicionais de forma estatisticamente fundamentada. A afirmação de que “os ajustes de ambas as distribuições se mostraram muito parecidos” permanece qualitativa e não quantificada; sem métricas comparativas objetivas, não é possível verificar se a diferença de desempenho entre GEV e Gumbel é estatisticamente irrelevante ou tecnicamente significativa.

3. A invocação de “parcimônia estatística” não substitui a análise do comportamento da cauda.

A distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) é, sob condições gerais de máximos de blocos independentes e identicamente distribuídos, a distribuição limite teórica dos máximos (Teorema de Fisher-Tippett-Gnedenko). Ela inclui um parâmetro de forma (κ) que governa diretamente o comportamento da cauda: $\kappa > 0$ indica cauda pesada (tipo Fréchet), $\kappa = 0$ corresponde ao caso Gumbel (cauda exponencial) e $\kappa < 0$ indica cauda limitada (tipo Weibull). A adoção da distribuição de Gumbel equivale a impor $\kappa = 0$, isto é, restringir a forma da cauda a comportamento exponencial. Se o parâmetro de forma real for positivo — situação frequentemente observada em regimes de chuva convectiva intensa — a adoção da Gumbel tende a subestimar os quantis associados a tempos de retorno elevados. Assim, **a parcimônia estatística, quando aplicada sem verificação explícita do parâmetro de forma e do comportamento da cauda, pode resultar em estimativas hidrológicas não conservadoras para eventos extremos.**

4. Ausência de investigação específica do comportamento de cauda e de análises complementares de extremos.

O estudo de Pinheiro (2011) não apresenta análise explícita do comportamento da cauda amostral, nem discute o valor estimado e a incerteza do parâmetro de forma da GEV. Essa avaliação é central na decisão entre GEV e seu caso particular Gumbel. Técnicas complementares baseadas em valores acima de limiar, como a abordagem POT com ajuste pela Distribuição Generalizada de Pareto (GPD), constituem procedimento recomendável para investigação da cauda e validação cruzada dos resultados obtidos com máximos anuais, embora não sejam obrigatórias. Também não são apresentados intervalos de confiança dos quantis estimados nem análise de incerteza paramétrica (por exemplo, via *bootstrap* ou perfil de verossimilhança), elementos particularmente relevantes quando se comparam modelos com diferentes graus de flexibilidade de cauda.

Assim, a justificativa apresentada no item AI.6.2.4 do documento utilizado no EIA é metodologicamente insuficiente para sustentar, de forma transparente e robusta, a escolha da

distribuição de Gumbel em detrimento da GEV. A decisão baseia-se em medida de aderência não explicitada e em argumento qualitativo de parcimônia, sem suporte de testes formais de aderência, critérios de informação e análise explícita do comportamento da cauda.

Mesmo considerando as práticas correntes à época, a abordagem não atende plenamente às boas práticas metodológicas já disponíveis na literatura especializada. A escolha do modelo probabilístico sem essas verificações introduz incerteza não quantificada nas estimativas de precipitação extrema. Para estudos que subsidiam o dimensionamento de estruturas de maior consequência, é necessário que a análise de frequência de séries históricas seja feita ou complementada com metodologia transparente e comparativa, incluindo testes de aderência sensíveis à cauda, critérios AIC/BIC, avaliação do parâmetro de forma da GEV e quantificação explícita das incertezas dos quantis estimados.

Uma análise de frequência de extremos bem fundamentada, baseada em comparação transparente entre modelos (como GEV e Gumbel), aplicação de testes de aderência sensíveis à cauda, critérios de informação (AIC/BIC) e quantificação explícita de incertezas dos parâmetros e dos quantis, constitui a base metodológica indispensável para estudos de extrapolação de séries históricas. Esta abordagem não apenas maximiza a confiabilidade das estimativas para o clima presente, mas também se combina de forma direta e consistente com a **incorporação de projeções de mudanças climáticas** ao fornecer um ponto de partida estatisticamente sólido.

Nessa abordagem integrada e prospectiva, os parâmetros das distribuições de extremos — especialmente o crítico parâmetro de forma (κ da GEV), que define o comportamento da cauda e os quantis de alto tempo de retorno — podem ser reestimados sob séries ajustadas por fatores de mudança (*change factors*), por *downscaling* dinâmico ou estatístico, ou por modelagem não estacionária com parâmetros dependentes do tempo ou de covariáveis climáticas. Isso permite avaliar quantitativamente como a cauda da distribuição pode se tornar mais pesada ou mais variável sob aquecimento climático, superando a limitação fatal da premissa de estacionariedade. Os resultados são curvas IDF evolutivas e estimativas de precipitação extrema condicionadas a diferentes trajetórias de emissões (cenários do IPCC), acompanhadas de faixas de incerteza explícitas que comunicam o risco residual.

Portanto, a adoção de uma metodologia simplificada e não transparente para a análise de frequência — como a observada no estudo de referência de Pinheiro (2011) — não apenas compromete a confiabilidade das estimativas atuais, mas também impede a transição para análises climáticas futuras robustas.

Tal integração é não apenas metodologicamente superior, mas operacionalmente essencial para o dimensionamento resiliente de obras de infraestrutura de longa vida útil e alto dano potencial associado, exigindo a revisão dos parâmetros hidrológicos de projeto com base neste padrão técnico atualizado.

9.5 Hietogramas de Chuva de Projeto

Com base na análise do documento Pinheiro (2011), especificamente na página 286, é importante destacar um **aspecto crítico referente à atualidade e representatividade dos hietogramas de chuva utilizados nos cálculos hidrológicos**:

Os hietogramas de chuva de projeto apresentados no documento foram baseados em dois eventos históricos específicos: os anos de 1991 e 2003. Isso significa que esses eventos estão desatualizados de 20 a 35 anos em relação aos dados mais recentes. Tal abordagem não incorpora eventos extremos mais recentes, que podem apresentar padrões de intensidade, duração e distribuição temporal potencialmente mais críticos devido à variabilidade climática natural e, possivelmente, às mudanças climáticas em curso.

Além disso, o próprio documento alerta, na página 286:

“Cabe ressaltar que novos eventos ainda mais críticos poderão ocorrer a qualquer momento, e, neste caso, os seus hietogramas de chuvas diárias também poderão ser considerados para o cálculo de hietogramas de chuvas de projeto com intervalos de discretização de 1 dia.”

Essa ressalva reconhece explicitamente a possibilidade de ocorrência de chuvas mais severas no ao longo do tempo, reforçando a necessidade de atualização periódica das séries e hietogramas de referência. Portanto, a aplicação direta desses hietogramas históricos (1991 e 2003) em projetos atuais — especialmente em empreendimentos de longo prazo e alto risco, como o proposto pela Samarco — pode subestimar as cargas hidrológicas de projeto, caso não sejam revisados com dados recentes e considerações sobre tendências climáticas observadas.

9.6 Metodologia de Obtenção dos Valores de PMP no Documento Pinheiro (2011) e Suas Limitações para Uso Atual

Os valores de **Precipitação Máxima Provável (PMP)** apresentados no documento *Pinheiro (2011)* e utilizados nas tabelas das páginas 267 a 285 — incluindo a **Tabela da Mina Alegria**, aplicada ao Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do **Projeto de Longo Prazo da Samarco** — foram obtidos por meio de metodologias estatísticas e empíricas baseadas em eventos históricos extremos observados em Minas Gerais. Porém, tais eventos (páginas 288 a 302) do doc. citado, constituem uma base de dados limitada e temporalmente restrita, com implicações significativas para a atualidade e confiabilidade desses valores.

Conforme a “Tabela AII.4.5 – Cálculo da PMP pontual de 24 horas” (página 300), os valores de PMP para 24 horas foram calculados com base em apenas três eventos de chuva extrema: 2002 (Teófilo Otoni), 2003 (Mina de Águas Claras, da Vale, em Nova Lima) e 2007 (Januária). Para o EIA do Projeto de Longo Prazo da Samarco, finalizado em agosto de 2022, esses dados estavam desatualizados em 15 a 20 anos. Eventos extremos mais recentes — como chuvas intensas registradas na década de 2010 e início de jan./2026 — não foram considerados, o que pode subestimar a PMP real para cenários atuais.

A “Tabela AII.5.1 – Eventos de referência para o cálculo da PMP de durações superiores a 24 horas” (página 301) indica que foram utilizados apenas dois eventos históricos: 1991 e 2003 na região do Quadrilátero Aquífero Ferrífero (QAF). Para o EIA de 2022, essa defasagem era de 19 a 31 anos; hoje, alcança 23 a 35 anos. A exclusão de eventos prolongados mais recentes — como episódios de chuvas persistentes associados a fenômenos como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) — compromete a representatividade da PMP para durações críticas no dimensionamento de barragens e estruturas de contenção.

A tabela a seguir apresenta uma lista de eventos extremos de chuva ocorridos em Minas Gerais, com ênfase no evento do dia 08/01/2022 na região de Brumadinho, Ibirité e Sinclinal Moeda. Esse evento é similar ao verificado em na cidade de Formiga no final de janeiro de 2026:

Data	Localidade / Estação	Volume em 24 h (mm)
23/01/2026	Formiga (Centro-Oeste)	211,0
08/01/2022	Rola Moça - Ibitité	209,6
08/01/2022	PCH Rio de Pedras Rio Itabirito - Itabirito	209,0
08/01/2022	Inhotim - Brumadinho	207,0
08/01/2022	Cohab - Brumadinho	206,2
08/01/2022	Rua Pref. Maciel - Brumadinho, Piedade do Paraopeba	204,7
08/01/2022	PCH Codorna Barramento - Nova Lima	203,3
08/01/2022	Lagoa Grande (MMV) – (Lagoa dos Ingleses) Nova Lima	202,9
08/01/2022	Represa do Miguelão (MMV) - Nova Lima	201,5
08/01/2022	Subdistrito de Soares – Ouro Preto	183,6
08/01/2022	PCH Rio de Pedras Rio Maracujá – Ouro Preto	177,5
28/01/2020	Belo Horizonte (Centro-Sul) [117,4 mm em 3 horas)	183,4
24/01/2020	Belo Horizonte (Santo Agostinho)	171,8
05/02/2007	Januária (Norte de Minas)	295,0
30/11/2006	Belo Horizonte	243,0
16/01/2003	Mina de Águas Claras, em Nova Lima	217,5
04/02/2002	Teófilo Otoni (Vale do Mucuri)	242,0
16/12/2001	Belo Horizonte	150,0
17/01/1984	Belo Horizonte	238,0
03/01/1979	Belo Horizonte	159,9
14/02/1978	Belo Horizonte	164,2
13/01/1978	Belo Horizonte	129,0

9.7 Ausência de Consideração das Mudanças Climáticas no Cálculo de PMP

Os cálculos de PMP apresentados em *Pinheiro (2011)* não incorporam os efeitos das mudanças climáticas. A metodologia parte do pressuposto de estacionariedade hidrológica, isto é, de que o clima do passado é representativo do clima presente e futuro. No entanto, evidências científicas e relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicam alterações significativas nos regimes de precipitação na região Sudeste do Brasil, com tendência de aumento na frequência e intensidade de eventos extremos.

A falta de projeções climáticas futuras nos cálculos da PMP representa uma limitação crítica para a segurança de obras hidráulicas em mineração. Projeções baseadas em cenários do IPCC (como SSP2-4.5 ou SSP5-8.5)⁵ são essenciais para estimar como a PMP pode evoluir nas próximas décadas, especialmente considerando a vida útil prolongada de barragens de rejeitos e estruturas de drenagem.

⁵ O IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) utiliza os Cenários de Vias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs), como SSP2-4.5 e SSP5-8.5, para projetar futuros cenários climáticos, combinando tendências socioeconômicas (o "SSP") com níveis de forçamento radiativo (o "4.5" ou "8.5", em Watts por metro quadrado) para avaliar impactos e estratégias, variando de trajetórias de baixo (SSP1-1.9) a alto (SSP5-8.5) aquecimento para informar ações climáticas.

Cenários Principais:

- **SSP1-1.9 / SSP1-2.6:** Cenários de baixas emissões, buscando limitar o aquecimento a 1.5°C ou 2°C (ambicioso).
- **SSP2-4.5 (Cenário Intermediário):** Emissões próximas aos níveis atuais antes de caírem, resultando em aquecimento de cerca de 2.7°C até 2100, com desenvolvimento desigual.
- **SSP5-8.5 (Pior Cenário):** Altas emissões baseadas em combustíveis fósseis e alto consumo, com aquecimento em torno de 4.4°C ou mais, exigindo esforços para evitar.

A ausência de dados atualizados no EIA é reforçada pelo fato de que o Diagnóstico Ambiental do EIA foi baseado em Normais Climatológicas antigas (1961-1990), ou seja, que não consideram a realidade climática dos últimos 35 anos.

9.8 Conclusões sobre a PMP

Os valores de PMP utilizados no Projeto de Longo Prazo da Samarco — e, por extensão, em diversos outros estudos e projetos do setor de mineração em Minas Gerais e no Brasil — baseiam-se em eventos históricos limitados e desatualizados, sem ajustes para mudanças climáticas. Essa abordagem pode resultar em subdimensionamento hidrológico, aumentando o risco associado a obras críticas.

Portanto, faz-se necessário, com a máxima urgência,

1. Atualização da base de dados: Inclusão de eventos extremos ocorridos após 2007 para recalcular a PMP de 24 horas e durações superiores.
2. Incorporação de cenários climáticos: Uso de projeções do IPCC para desenvolver PMP ajustadas a cenários futuros, assegurando que as obras sejam dimensionadas com margens de segurança adequadas às condições climáticas em transformação.
3. Revisão periódica dos parâmetros: Estabelecimento de um protocolo para revisão e atualização dos valores de PMP a cada 5 a 10 anos, integrando dados recentes e avanços metodológicos.

A segurança de barragens e a gestão de riscos hídricos no setor de mineração dependem da adoção de critérios hidrológicos atuais, robustos e cientificamente embasados, capazes de responder aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela variabilidade hidrológica observada.

10 Histórico de problemas e falhas: casos, mecanismos e lições

A adoção da filosofia de projeto tradicional descrita no item acima não tem evitado, no entanto, a ocorrência de falhas.

A pesquisa detalhada em relatórios técnicos, investigações de acidentes e literatura disponível confirma **casos de incidentes e falhas diretamente associados a problemas nos dispositivos de drenagem superficial.**

10.1 O Mecanismo de Falha Primário: O "Efeito Cascata" e a Erosão Regressiva

O maior problema não é o transbordamento isolado, mas a erosão regressiva desencadeada por ele. O mecanismo típico pode ser descrito da seguinte forma:

Uma canaleta de topo ou de berma obstrui (por sedimentos ou detritos) e, por consequência, a água transborda e se concentra em um único ponto do talude (em vez de ser distribuída por toda a extensão da berma). A energia concentrada da água cria um sulco erosivo profundo (ravina) e essa ravina aumenta a inclinação local do talude, podendo saturar o material, reduzindo sua resistência ao cisalhamento. O talude sofre um escorregamento localizado, que pode evoluir para uma corrida de massa (*flow slide*) ou retroceder até comprometer níveis superiores.

10.2 Barragem de Fundão - Falhas no Sistema de Drenagem (2011–2015)

A Barragem de Fundão, operada pela Samarco, rompeu em 05 de novembro de 2015, desencadeando uma das maiores tragédias socioambientais da mineração brasileira. A investigação oficial conduzida pelo Painel de Especialistas de 2016 concluiu que a ruptura se deu por liquefação estática de parte da estrutura de rejeitos, iniciada na ombreira esquerda da barragem.

Embora essa investigação não atribua diretamente o colapso a problemas de drenagem superficial, uma análise mais detalhada dos *laudos de auditoria técnica anual*, realizados entre 2011 e 2015, revela preocupações recorrentes com os sistemas de drenagem pluvial e superficial que compunham dispositivos críticos de manejo de água da estrutura.

Auditorias Externas (2009–2015) – Recomendações de Drenagem

De acordo com relatórios de auditoria externa, os laudos técnicos anuais feitos por consultores independentes sobre a barragem de Fundão entre 2011 e 2015 identificaram de forma consistente **deficiências em dispositivos de drenagem superficial e canaletas de escoamento de água, incluindo recomendações de reparo, limpeza e melhoria** desses sistemas que não foram resolvidas de forma satisfatória antes da ruptura.

Uma síntese consolidada das recomendações de drenagem superficial/pluvial foi organizada a partir de dados extraídos dos próprios laudos (conforme transcrição encontrada em fonte técnica consolidada da *Controladoria-Geral do Estado de Minas Gerais* – ver a seguir)⁶. Pode-se ver, pelo quadro do Apêndice VII desse documento, que **a empresa, reiteradamente, falhou na implantação do projeto e na manutenção dos dispositivos de drenagem superficial do talude da barragem de Fundão** que rompeu, o que pode indicar tanto as dificuldades práticas para realização desses trabalhos quanto negligência e pode apontar para a possibilidade de que os sistemas de drenagem superficial da PDER M e PDER C, que serão bem maiores que os da barragem, venham a apresentar problemas semelhantes ao longo da fase de implantação e ao longo da sua existência, colocando em risco as comunidades e o meio ambiente.

Pág. 25 do doc. mencionado:

Nesse sentido, relevante mencionar que, além da identificação de recomendações recorrentes estipuladas no âmbito das auditorias técnicas de segurança da Barragem I, relacionadas, dentre outros, ao potencial de **liquefação** estática, bem como **drenagem** da barragem – que se rompeu em 2019; com efeitos semelhantes, também se evidenciou a recorrência de recomendações (anos 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015) contemplando o sistema de **drenagem** no âmbito das Declarações de Condição de Estabilidade, inseridas no BDA, correspondentes à Barragem de Fundão, operada pela Samarco S/A no município de Mariana – MG, que se rompeu em novembro de 2015. As recomendações recorrentes relativas à Barragem de Fundão constam demonstradas no **apêndice VII**.

Quadro Resumo - Pág. 147:

⁶ Disponível em:

https://cge.mg.gov.br/phocadownload/roteiros_auditoria/pdf/RA_1370.1239.19_Conformidade_B1_SIS_EMA.pdf. Acesso em 20/01/2025



CGE-MG

Controladoria-Geral do Estado de Minas Gerais

APÊNDICE VII – Recomendações estipuladas em Declarações de Condição de Estabilidade da Barragem de Fundão, Samarco S/A

Declarações de Condição de Estabilidade (ano) – grifos nossos						
2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Recuperar a drenagem superficial nas bermas (canaletas), assoreada em alguns pontos devido às erosões ocorridas nos taludes entre bermas.	Recuperar a drenagem superficial nas bermas (canaletas), assoreada em alguns pontos devido às erosões ocorridas nos taludes entre bermas.	Desobstruir e limpar as estruturas de drenagem superficial, principalmente a canaleta da bermas de El. 820,0m.	Concluir a implantação do projeto de drenagem superficial anteriormente ao período chuvoso de 2012/2013	Drenagem Superficial: Concluir a implantação do projeto executivo do sistema de drenagem superficial. Reparar trinças nas canaletas já existentes.	Drenagem Superficial: Desobstruir, reparar trinças e recompor as canaletas que apresentam problemas.	Drenagem Superficial: Desobstruir, reparar trinças e recompor as canaletas que apresentam problemas.
		Providenciar a conclusão das obras de drenagem superficial no talude de jusante e ombreiras, prolongando a crista e execução das demais canaletas nas bermas superiores.				
Recuperar a drenagem superficial nas bermas (canaletas), assoreada em alguns pontos devido às erosões ocorridas nos taludes entre bermas.	Providenciar a conclusão das obras de drenagem superficial a jusante do Dique 1.	Reparar as estruturas de drenagem que estão quebradas e/ou danificadas. Caso não ocorra tempo hábil anteriormente ao período chuvoso 2011/2012, implantar ações emergenciais (Sic) suficientes para passar tal período e executar os reparos posteriormente.	Concluir a calibração dos instrumentos instalados no tapete drenante (piezômetros e medidores de vazão).	Dar continuidade ao monitoramento da vazão do tapete drenante (drenagem interna) do Dique 1 e implantar o projeto executivo para adequação e melhoria das saídas dos tubos (cananetes).	Realizar uma proteção no talude de jusante, entre o canal que coleta a drenagem interna e a canaleta de drenagem construída na bermas.	Realizar uma proteção no talude de jusante, entre o canal que coleta a drenagem interna e a canaleta de drenagem construída na bermas.
		Regularizar os caimentos transversais e longitudinais das bermas evitando o represamento de águas, de forma a permitir o escoamento para as laterais do maciço do fluxo de água afluentes.				
					Ajustar a geometria das bermas de forma a garantir uma declividade transversal com o sentido do fluxo para as canaletas de drenagem construídas nas bermas. Esta ação deverá permitir o correto direcionamento das drenagens pluviais.	Ajustar a geometria das bermas de forma a garantir uma declividade transversal com o sentido do fluxo para as canaletas de drenagem construídas nas bermas. Esta ação deverá permitir o correto direcionamento das drenagens pluviais.

Adicionalmente, a empresa inseriu no Banco de Declarações Ambientais da FEAM dados de Declarações de Estabilidade divergentes dos constantes dos Relatórios de Auditoria, como mostrado no Apêndice VIII do doc. da CGE-MG acima citado, o que denota omissão de informações importantes e permite supor que a empresa não considerava relevantes os problemas relacionados à drenagem superficial:

Pág. 149:

<p>DCE 2012 – faltaram as seguintes recomendações constantes no Relatório de Auditoria (grifo nosso):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Avaliar o direcionamento da drenagem na bermas abaixo do patamar intermediário e verificar o lançamento do fluxo somente para a direita; <p>DCE 2014 – faltou a seguinte recomendação constantes no Relatório de Auditoria:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Adequar a drenagem superficial da estrada de acesso ao pé da barragem. Tal adequação apresenta-se como oportunidade de melhoria e boas práticas da estrutura.

“Visualizou-se também divergências entre a conclusão dos Relatórios de Auditoria e a conclusão inserida nas Declarações de Condição de Estabilidade declaradas no BDA, anos 2017 e 2018” (pág. 152, ano 2018):

e) Drenagem superficial

Inicialmente, é importante realizar o desassoreamento da drenagem superficial. Neste processo, deve-se atentar à remoção restos de obra que possam vir a ser carregados para canaletas e à recuperação de pontos de erosão superficial.

Uma vez realizada a limpeza, deve-se avaliar a existência de danos estruturais e fluxo com colóide através de trincas. Os danos estruturais devem ser reparados, atentando principalmente para as escadas hidráulicas deterioradas. Para as trincas que apresentam percolação, especialmente as com presença de colóide, sugere-se a instalação de pequenos tubos barbacãs envoltos por geotêxtil e areia.

O projeto de drenagem superficial deve ser revisado, considerando o novo aporte de vazão pelos DHPs. Ademais, devem-se corrigir incoerências verificadas em inspeção, tais quais declividades incompatíveis (levando a empoçamentos) e escadas inutilizadas. Quando desta revisão, deve-se prever, também, a construção de canaletas perimetrais nas ombreiras, evitando a continuação do processo erosivo identificado.

Deve-se monitorar, também, a abertura de fissuras nas canaletas próximo à ombreira esquerda, nas bermas de El. 937,00 m, El. 929,00 m, El. 922,00 m e El. 916,00 m.

Pág. 153:

Por fim, é importante garantir a drenagem da região a jusante do pé da barragem. Para tanto, recomenda-se direcionar a água proveniente da drenagem superficial (por meio de canaletas) e, no caso de permanecer a condição alagadiça a jusante do bloco rochoso mencionado, instalar drenos tipo espinha de peixe.

Assim, os laudos repetidos entre 2009 e 2015 indicaram problemas recorrentes com canaletas de drenagem superficial e recomendações para sua desobstrução, reparo de trincas e recomposição estrutural. Esses dispositivos são essenciais para o escoamento controlado de águas pluviais ao longo da superfície do aterro e bermas da barragem (assim como das pilhas de rejeitos e de estéreis), reduzindo a probabilidade de infiltração superficial na massa de rejeitos que, por sua vez, pode contribuir à elevação da umidade nos rejeitos e ao aumento da pressão de poros — fatores associados a maior susceptibilidade à liquefação.

A persistência de recomendações idênticas em anos consecutivos sugere que, apesar de destacadas nos laudos, as ações corretivas não foram plenamente efetuadas, deixando canais e sistemas de drenagem em condições deficientes no período imediatamente anterior ao rompimento.

Drenagem Interna de Água da Barragem

Relatórios e análises da imprensa especializada também mencionam que os laudos apontaram, em alguns casos, falhas nos canos de escoamento interno de água, que fazem parte de sistemas de manejo de água dentro da estrutura de rejeitos com o objetivo de reduzir saturação interna que pode levar à liquefação.

Esses dispositivos internos são projetados para captar e conduzir água infiltrada dos rejeitos para fora da barragem, diminuindo a pressão hidrostática interna, um fator crítico em barragens de rejeitos construídas de forma a montante como a de Fundão. Problemas com tais conduítes podem levar a retenção excessiva de água, contribuindo para saturação indesejada e diminuição da resistência dos materiais.

Consequências Técnicas e de Segurança

Embora o Relatório do Painel de Especialistas (2016) tenha identificado liquefação estática na massa de rejeitos como o mecanismo de ruptura, ele não negou que condições de saturação elevada e deficiências na gestão de água foram parte do contexto que permitiu a falha — mesmo que não citadas com a mesma ênfase em drenagem superficial nos relatórios finais.

A existência de recomendações de melhoria e manutenção dos sistemas de drenagem superficial e canais ao longo dos anos consecutivos sem atendimento integral indica que sistemas de controle de água pluvial e escoamento não estavam sendo mantidos de forma eficaz, potencializando as vulnerabilidades geotécnicas inerentes à operação de barragens de rejeitos em regime de deposição contínua. **Deficiências de manutenção desse tipo nos sistemas de drenagem das pilhas também poderá levar a falhas dessas estruturas..**

10.3 Deslizamento da Pilha Cachoeirinha e Transbordamento do Dique Lisa – Mina Pau Branco (Vallourec, Jan/2022)

10.3.1 Introdução

No dia 8 de janeiro de 2022, a Mina Pau Branco, operada pela Vallourec Tubos do Brasil Ltda., em Nova Lima (MG), foi afetada por um importante evento geotécnico: o deslizamento parcial da pilha de estéril/rejeitos denominada *Cachoeirinha*, que resultou no carreamento de material sólido para o *Dique Lisa* — uma estrutura de contenção de água pluvial — e no transbordamento desse dique sobre a rodovia BR-040. Este episódio ocasionou danos socioambientais, interrupção de tráfego e exigiu medidas de emergência das autoridades competentes⁷.

10.3.2 Contexto Operacional e Histórico do Evento

A Mina Pau Branco adota o método de disposição de rejeitos e estéril em pilhas (*dry stacking*), uma alternativa que dispensa grandes barragens de lama, utilizando filtragem e deposição a seco⁸.

No evento de janeiro de 2022, ocorreram chuvas excepcionalmente intensas na região, com acumulados pluviométricos extraordinários. Relatórios mencionam que estes foram os maiores volumes de chuva desde o início dos registros, impulsionando condições extremas de escoamento superficial e engajamento de material solto na pilha⁹.

Segundo a Vallourec, as chuvas extremas levaram parte do material da pilha Cachoeirinha a deslizar para o reservatório de água pluvial contido pelo dique Lisa, provocando seu *galgamento* (transbordamento). A empresa destacou que a estrutura principal permaneceu íntegra e não houve ruptura da própria barragem do dique, caracterizando o evento como carreamento de material e transbordamento decorrente de chuva intensa, e não uma falha total da contenção¹⁰.

10.3.3 Chuva Extrema e Acúmulo na Bacia e Mecânica do Deslizamento da Pilha Cachoeirinha

A chuva excepcional que atingiu a região chegou a 209 mm em 24 horas, com registros que indicam tratar-se do maior volume pluviométrico já medido para aquela área, significativamente superior a eventos típicos de precipitação.

Eventos dessa intensidade podem gerar:

- pressões hidrodinâmicas elevadas na superfície da pilha,
- escoamento superficial acelerado,
- mobilização de material que não estava firmemente consolidado,

⁷ Ver:

https://www.almg.gov.br/acompanhe/noticias/arquivos/2022/03/29_release_meio_ambiente_vallourec_transbordamento_mina_pau_branco. Acesso em 21/01/2026

⁸Ver: <https://folhanobre.com.br/2022/12/12/mining-company-will-pay-brl-73-million-to-compensate-for-damages-in-minas/353034>. Acesso em 21/01/2026

⁹ Ver: https://www.vallourec.com/app/uploads/sites/5/2024/02/Relatorio-de-Sustentabilidade-2021_2022_EN.pdf. Acesso em 21/01/2026

¹⁰ Ver: <https://brazil.vallourec.com/en/news/communication-about-overflow-of-the-dike/>. Acesso em 21/01/2026

- e excesso de água acumulada no reservatório de contenção, com limites de capacidade excedidos.

Esse cenário aumenta drasticamente a probabilidade de ruptura de taludes não consolidados e de carreamento de resíduos, independentemente de falhas geotécnicas prévias.

Diferentemente de rompimentos clássicos de barragens de rejeitos saturados (como liquefação estática), o evento em Pau Branco foi essencialmente um colapso de parte do talude da pilha de estéril, provavelmente por perda de estabilidade de talude sob carregamento hidrológico extremo.

As possíveis causas geotécnicas do deslizamento incluem:

- Saturação local do material ao longo do talude devido à chuva intensa, elevando pressões de poros e diminuindo resistência interna dos resíduos filtrados;
- Presença de gradientes de água dentro do maciço empilhado, resultantes de chuva persistente;
- Insuficiência de capacidade de manejo de águas pluviais e galerias de drenagem para lidar com um evento extremo de precipitação;
- Mobilização de sedimentos não consolidados por escoamento superficial acelerado.

Posteriormente, o material deslocado atingiu o reservatório do Dique Lisa, contribuindo para o transbordamento e inundação da rodovia BR-040 e áreas adjacentes.

10.3.4 Papel de Drenagem e Gestão de Água na Estabilidade da Pilha

Embora não tenham sido localizados relatórios técnicos públicos detalhando análises geotécnicas completas do projeto estrutural da pilha Cachoeirinha e de seu sistema de drenagem, o evento sugere fortemente que:

- sistemas de drenagem superficial e interna podem não ter sido adequados para um evento de chuva extrema,
- a capacidade de desviar e controlar o escoamento das superfícies pode ter sido excedida,
- e a água que percolou ou escorreu sobre a pilha contribuiu para perda de coesão nas partes superiores, facilitando o deslizamento.

A ocorrência de chuva extrema pode ter supersaturado a superfície da pilha e infiltrado água nas zonas de transição, reduzindo resistência de taludes compostos de material filtrado semi-consolidado. A subsequente queda de material sugere que a drenagem (superficial ou subsuperficial) não foi capaz de evitar pressões excessivas de água no maciço empilhado, especialmente sob condições pluviométricas fora do comum.

10.3.5 Transbordamento do Dique Lisa

O Dique Lisa atuava como estrutura de retenção de águas pluviais e sedimentos, não como um reservatório principal de rejeitos. Quando o deslizamento da pilha proporcionou entrada massiva de sólido e água, a capacidade de contenção foi ultrapassada, resultando em *galgamento*, uma forma de transbordamento que ocorre quando o nível da água (e material sólido) excede a crista do dique.

Este transbordamento indica que os sistemas de captação, condução e escoamento de água pluvial para fora da área de pilha e reservatórios associados podem não ter sido dimensionados ou mantidos considerando um evento extremo, ainda que tais sistemas normalmente sejam projetados para tempos de retorno elevados (ex.: 100–1 000 anos).

10.3.6 Avaliações de Autoridades e Órgãos Oficiais

A Agência Nacional de Mineração (ANM) registrou o episódio como um evento de emergência envolvendo talude da pilha e transbordamento do dique Lisa, tendo classificado o cenário no

Nível de Emergência 3 (risco iminente de ruptura) antes de medidas corretivas como extravasores de emergência serem implantados com apoio da fiscalização.

O Ministério Público de Minas Gerais (MPMG) e o Estado de Minas Gerais ajuizaram ações civis públicas exigindo medidas emergenciais de segurança e responsabilização da Vallourec pelos danos causados, ressaltando que a pilha não suportou o volume de chuvas, gerando impactos socioambientais e de infraestrutura.

As reportagens de imprensa e **pareceres de técnicos independentes também destacam que, embora a pilha possuísse laudos de estabilidade, ela não deveria ter cedido sob o volume de chuva observado, sugerindo que os critérios de projeto, gestão de água ou capacidade de drenagem podem não ter sido suficientes para aquele evento meteorológico extremo.**

10.3.7 Síntese das Causas do Evento

A análise integrada dos relatos sugere que o evento de janeiro de 2022 na Vallourec — envolvendo deslizamento da pilha de estéril Cachoeirinha e transbordamento subsequente do Dique Lisa — foi resultado de um conjunto de fatores, com destaque para:

- **Chuvas extremamente intensas, que produziram volumes de água e pressões hidrológicas que excederam a resposta normal de drenagem e estabilidade da pilha;**
- Perda de estabilidade do talude da pilha Cachoeirinha, possivelmente associada à permeabilidade e saturação local em face da chuva extrema, levando ao deslizamento de material;
- Carreamento de material sólido para o reservatório do Dique Lisa, reduzindo sua capacidade efetiva de contenção e provocando o transbordamento;
- **Capacidade de drenagem e manejo de águas pluviais insuficiente para lidar com o cenário excepcional,** contribuindo para a instabilidade da pilha e a não evacuação rápida de volumes de água.

Pilhas de estéril e rejeitos empilhados a seco, embora eliminem grandes barragens de lama, ainda dependem de sistemas de drenagem superficial e interna para manter estabilidade geotécnica, controlando a percolação de água e evitando acumulações que reduzam a resistência do maciço. **A fala de especialistas no contexto do evento indica que eventos de chuva com tempos de retorno elevados podem exceder a capacidade de tais sistemas, exigindo análises hidrológicas robustas e medidas de engenharia adicionais.**

10.4 Outros Exemplos de Rupturas de Pilhas

Desastre de Aberfan (País de Gales, 1966): O caso de estudo clássico. Uma pilha de estéril de carvão colapsou sobre uma escola, matando 144 pessoas. O problema de drenagem foi central: a pilha foi construída sobre nascentes e não possuía drenagem interna ou superficial adequada. O excesso de água saturou a base, e a falta de dispositivos de topo/berma permitiu que o escoamento superficial acelerasse a instabilidade.

Caso Norilsk, Rússia (Medvezhy Ruchey, Lebyazhye, 1990 - Operação da Norilsk Nickel): Em uma instalação na Sibéria, canaletas de berma e de topo obstruídas por gelo e neve foram um fator chave em múltiplos incidentes. Durante o degelo da primavera, a água derretida não pôde ser escoada adequadamente, infiltrando-se na pilha de rejeitos. Isso levou a um aumento no nível do lençol freático interno, aumento na poropressão e na redução da tensão efetiva provocando uma ruptura por liquefação estática de parte da pilha.

10.5 Principais Causas de Falha, Padrões Comuns e Lições Aprendidas

Ao pesquisar relatórios de FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) de mineradoras globais, os problemas recorrentes são:

- Assoreamento (Sedimentação): As canaletas de topo e bermas recebem sedimentos finos da pilha. Se não houver limpeza constante, a seção útil diminui, e ela transborda com chuvas de TR muito menores.
- Degraus Cinéticos em Descidas d'Água: Pequenos desalinhamentos nas juntas das descidas criam turbulência. Em eventos extremos, essa turbulência faz a água "ejetar" da calha, destruindo o talude lateral.
- Obstrução por Vegetação ou Lixo: Em canais periféricos e de acesso, o crescimento de vegetação densa aumenta a rugosidade, reduzindo drasticamente a capacidade de vazão.
- Danos por Equipamentos: Canaletas de acesso são frequentemente danificadas por equipamentos pesados, e o reparo é negligenciado.

A pesquisa revela padrões claros:

- **Interação Dinâmica:** A falha raramente é isolada. A obstrução de uma canaleta de topo leva ao transbordamento que sobrecarrega uma descida de água, que pode colapsar e erodir a base da estrutura.
- **Manutenção como Fator Decisivo:** Praticamente todos os casos envolvem manutenção deficiente, inspeções inadequadas ou negligência operacional. A drenagem superficial é frequentemente vista como um elemento "menor", mas seu mau funcionamento é um indicador precursor comum de problemas maiores.
- **Eventos Climáticos Extremos como Gatilho:** Embora os sistemas sejam dimensionados para eventos raros, são os eventos de intensidade moderada combinados com dispositivos obstruídos ou degradados que causam a maioria dos incidentes. Exemplo: uma chuva de 50 anos pode ser catastrófica se as canaletas estiverem 70% obstruídas por sedimentos.

A manutenção das condições de projeto dos dispositivos dos sistemas de drenagem de uma pilha constitui um trabalho detalhado, que demanda atenção constante e equipes específicas, devendo ser tratada como item essencial das atividades da mina. Essa manutenção deve continuar por tempo indeterminado, enquanto a pilha existir, ou seja, por décadas ou séculos, de modo a garantir a segurança da estrutura.

10.6 Referências Consultadas para esse Item

- ALMG e imprensa local — detalhes operacionais do deslizamento da pilha e transbordamento, bem como impacto na BR-040 e debates públicos.
- ANM *Report Mensal Janeiro* (boletim de barragens de mineração) — classificação do evento e medidas de emergência no Dique Lisa.
- GlobeNewswire — *Operations at Vallourec's Pau Branco mine suspended...* — relato corporativo da Vallourec sobre o deslizamento e suspensão de atividades.
- MPMG e SEPLAG — Termo de compromisso e relato do Ministério Público sobre os impactos e medidas emergenciais.
- Reuters — *France's Vallourec fined 51.6 million after dike overflows in Brazil* (Euronews via Reuters) — acúmulo de chuva intenso e overflow do dique causado por material da pilha Cachoeirinha.
- Vallourec *Sustainability Report 2021-2022* — descrição do evento do Lisa Dike overflow e volume histórico de chuva na área.
- *WISE Uranium tailings dam failures chronology* — registro internacional do evento Pau Branco em 8 jan. 2022.

11 Características Construtivas e Critérios de Cálculo Adotados para o Projeto de Longo Prazo

Apresenta-se a seguir algumas observações a respeito dos critérios adotados para o Projeto de Longo Prazo:

- 1) Embora o item 7.1 acima referido informe, literalmente, que o Projeto de Longo Prazo inclui “Disposição de estéril e rejeito arenoso em pilhas drenadas, no total de duas novas, denominadas PDER M (localizada no Vale Mirandinha) e PDER C (localizada no Vale de Camargos)”, **a pilha PDER C é prevista no EIA somente com rejeitos (sem estéreis), o que denota incongruência tanto na denominação (PDER) quanto na descrição, resultando também, em necessidade de adoção de critérios específicos para a pilha PDER C** (ver a seguir). De fato, na pág. 625 do doc. acima mencionado encontra-se o seguinte texto:

7.7.2.8 PDER C

7.7.2.8.1 Disposição dos materiais

De acordo com as informações que já vem sendo relatadas neste capítulo, a operação da PDER C dar-se-á por meio da disposição de rejeito arenoso filtrado proveniente do processo de beneficiamento do minério no Complexo Germano. A natureza e características deste material já foi discutida neste capítulo e pode ser revista no item referente à Fase de Planejamento. Cabe mais uma vez destacar aqui que, como abordado em outros pontos desta caracterização do empreendimento, no momento não está prevista a disposição de estéril nesta pilha, contudo, a Samarco mantém estudos acerca deste empilhamento podendo ser uma oportunidade no futuro com a maturidade do projeto a proteção de taludes com estéril e uma primeira camada drenante.

Logo, neste item será apresentada a forma de disposição de rejeito arenoso filtrado na PDER C considerando sua geometria e seu processo construtivo.

O fato de o EIA mencionar a possibilidade futura de uso de estéril também na PDER C não altera a necessidade de se considerar, no EIA apresentado, as especificidades dessa pilha (somente rejeitos), pois não é certo que seria possível ou factível o uso de rejeitos para envelopar essa pilha no futuro. Essa possibilidade também é aventada no item 3.2.2 do EIA (pág. 40):

O empilhamento de rejeitos filtrados pode ser feito juntamente com outros materiais. A co-disposição visa garantir que a estrutura alcance propriedades geotécnicas mais adequadas. Logo, a Samarco projetou um sistema de disposição de rejeitos arenosos em pilhas, com um cinturão de estéril envolvendo a mesma (caso da PDER M e futuramente, com o avanço dos estudos de engenharia e dos processos de melhoria contínua do projeto, também deverá ser feito para a PDER C). Os detalhes construtivos e demais estudos de viabilidade serão apresentados ao longo do Capítulo 7.

O EIA prevê somente o seguinte para a PDER C:

7.5.4.1.1.10 Sistema de cobertura

No projeto conceitual, considerou-se o revestimento da PDER C com uma camada do material retirado da fundação durante sua limpeza e armazenado em áreas de espera (vide ADME 1 e ADME 2 no Anexo 7.5-9) até o momento do uso, visando a redução da emissão de particulados e poeira do rejeito. Nas bermas será disposta uma camada de 40 cm e nos taludes de 60 cm.

Para finalização, propôs-se o plantio de vegetação rasteira com objetivo de reduzir a erosão superficial.

- 2) Os tempos de recorrência das chuvas utilizados para os cálculos são os estabelecidos na norma brasileira “**NBR 13029 (ABNT/NB 1465) de 07/2017 - Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**”, cujo Escopo é assim descrito: “Essa norma especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto

de pilha para disposição de **estéril** gerado por lavra de mina a céu aberto ou de mina subterrânea, visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economia e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente” (grifo nosso).

- 3) O EIA do Projeto de Longo Prazo analisado pela FEAM/SEMAD é datado de Agosto/2022 e a Câmara de Atividades Minerárias (CMI) do Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (COPAM) aprovou a licença (LP+LI+LO) em 27 de junho de 2025. No entanto, a norma ABNT NBR 13029:2017 foi cancelada e substituída pela norma ABNT NBR 13029:2024, publicada em 08/11/2024. **Assim, a aprovação da licença ambiental se deu com base em documentos baseados em norma já inválida.**
- 4) Adicionalmente, **a Norma ABNT NBR 13029 aplica-se a pilhas de estéreis. A pilha PDER M do Projeto de Longo Prazo é prevista como do tipo híbrido, ou seja, com codisposição ou disposição compartilhada de rejeito e estéril e a pilha PDER C, apenas com rejeito.** Isso impõe ao projeto alterações significativas que demandam características específicas de projeto de sistemas de drenagem interna e externa. Dependendo da influência relativa de cada fração de material da pilha híbrida (rejeito ou estéril) sobre a estabilidade geotécnica da estrutura o projeto deve se basear na nova Norma ABNT NBR 13028-3 (ver a seguir).
- 5) Entre as duas edições da Norma ABNT NBR 13029, não houve alteração dos tempos mínimos de recorrência que devem ser utilizados no projeto (100 e 500 anos). No entanto, várias alterações importantes, com implicações na segurança da estrutura, foram introduzidas na versão de 2024. As diferenças entre as edições de 2017 e 2024 são apresentadas no Anexo 1 do presente documento.
- 6) A norma “ABNT NBR 13028 - Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água – Requisitos” teve uma nova edição publicada em 04/12/2025. Essa nova versão, a quinta edição da norma, passou a ser dividida em três partes: a ABNT NBR 13028-1, referente à terminologia; a ABNT NBR 13028-2, que estabelece os requisitos; e a ABNT NBR 13028-3, que trata da disposição de rejeitos desaguados em pilhas. **A ABNT NBR 13028-3:2025 juntamente com as ABNT NBR 13028-1:2025 e ABNT NBR 13028-2:2025, cancelam e substituem a ABNT NBR 13028:2024.**
- 7) Trata-se da primeira norma brasileira sobre o tema. Pela magnitude e pelo potencial de dano das pilhas do Projeto de Longo Prazo, **consideramos imprescindível que todo o projeto – e não apenas os sistemas de drenagem – seja revisto e analisado, para efeitos de aprovação de licenças, de acordo com as determinações da nova ABNT NBR 13028-3 (de 04/12/2025), que trata da disposição de rejeitos desaguados em pilhas.** Essa norma deve ser utilizada não apenas para o dimensionamento da PDER C (que está prevista apenas com rejeitos), mas também para o da PDER M, pois
- 8) entre a disposições da ABNT NBR 13028-3 encontra-se a seguinte:

Além disso, a aplicabilidade desta Norma às estruturas formadas por codisposição ou disposição compartilhada de rejeito e estéril depende da influência relativa de cada fração de material sobre a estabilidade geotécnica da estrutura. Nos casos em que o material estéril for predominante, aplicam-se os critérios estabelecidos na versão mais atualizada da ABNT NBR 13029.

Portanto, **é de crucial importância que o projeto da pilha PDER M seja reavaliado sob a ótica da influência de cada material sobre a estabilidade geotécnica das estruturas, o que determinará a aplicabilidade das normas e a avaliação dos diversos riscos associados.** A tabela a seguir apresenta as frações volumétricas dos materiais e as características de etapa construtiva da pilha PDER M, o que pode servir de indicativo preliminar da influência de cada material na estabilidade:

Característica da Pilha PDR M (item 7.7.2.7.2, pág. 595)	Volume de Estéril (m3)	Volume de Rejeito Filtrado (m3)	Volume Total da Etapa (m3)	% Estéril	Volume Total da Pilha
Etapa 1 - Platô de estéril que deverá atingir a EL. 800,00 m	19.816.005	0	19.816.005	100,0%	19.816.005
Etapa 2 - Platô 2 com rejeito arenoso filtrado e estéril, o qual irá atingir a EL. 860,00 m. O rejeito nesta etapa representa a maior parcela do maciço, sendo o estéril utilizado, para o cobrimento dos taludes e bermas, por meio de uma camada de 15m de estéril, até que se atinja a cota final de projeto. O cobrimento dos taludes com material estéril deve ser feito concomitantemente com a disposição do rejeito arenoso filtrado.	6.369.627	23.659.262	30.028.889	21,2%	49.844.894
Etapa 3 - Platô 3 com rejeito arenoso filtrado e estéril, o qual irá atingir a EL. 930,00 m. Construção semelhante à da Etapa 2.	4.871.408	6.682.457	11.553.865	42,2%	61.398.759

- 9) O item “5.3.1 - Projeto conceitual” da ABNT NBR 13028-3 encontra-se a seguinte determinação:

5.3.1 Projeto conceitual

Nesta fase de projeto, devem ser validadas e consolidadas as premissas estabelecidas na fase do estudo de alternativas, devendo justificar a viabilidade técnica da alternativa selecionada, na qual deve ser verificada a existência de potenciais falhas fatais para a implantação do projeto, devendo conter minimamente:

Portanto, o EIA deveria ter apresentado os resultados de verificação de potenciais falhas fatais advindas da intensificação dos eventos extremos de chuva (não apenas volumes e quantidade, mas também erosividade) devido às mudanças climáticas.

- 10) No item “5.4.2.1 - Projeto conceitual” da ABNT NBR 13028-3 encontram-se as seguintes determinações a respeito dos estudos hidrológicos e hidráulicos:

5.4.2 Estudos hidrológicos e hidráulicos

5.4.2.1 Chuva de projeto

Para a definição da chuva de projeto, devem ser considerados no estudo os seguintes itens:

- estações pluviométricas representativas do local de implantação da pilha, com no mínimo 20 anos de dados com ciclos hidrológicos completos para realização da análise de frequência estatística;
- atualização dos estudos de chuvas intensas a partir de evidência da alteração da tendência na série histórica;
- avaliação da influência orográfica, quando pertinente, para a análise da precipitação de projeto.

Mesmo para as estruturas de pilhas, categorizadas como temporárias, o dimensionamento deve enquadrar o período chuvoso completo.

O item 5.4.2.1.b define que, para o cálculo da chuva de projeto, deve ser considerada a “atualização dos estudos de chuvas intensas a partir de evidência de alteração da tendência na série histórica”. Esse item já constitui um avanço com relação a normas anteriores que não mencionam alterações das tendências das séries históricas, ou seja, a verificação da tendência em comparação com os valores históricos, porém a Norma ABNT NBR 13028-3,

mesmo tendo sido publicada no final de 2025, não menciona a necessidade – inegável na atualidade – de consideração de projeções de chuvas baseados em modelos que levam em conta os diversos cenários de mudanças climáticas.

A Norma ABNT NBR 13028:2017, em seu item “5.4.4 – Balanço Hídrico” especifica que:

“É importante que na preparação do balanço hídrico também sejam consideradas análises de sensibilidade para eventos extremos, tanto ligados ao excesso de chuva quanto à ocorrência de estiagens, associando a estes cenários seus próprios riscos de ocorrência. O balanço hídrico deve ser revisado durante todo o período de operação da barragem”.

Nem o EIA analisado nem a nova Norma ABNT NBR 130283:2025 mencionam análises de sensibilidade para levar em conta eventos extremos e estiagens. A expressão “eventos extremos” aparece uma única vez no item 7 do EIA, referindo a capacidade de vertimento e não efeitos sobre a integridade e estabilidade das pilhas.

Como o EIA do Projeto de Longo Prazo foi feito com base nas versões de 2017 das Normas ABNT NBR 13028 e 13029 – mesmo se desconsideramos o fato de que essas normas não se aplicam a pilhas de rejeitos nem a pilhas – híbridas, não foi pautado pela obrigação de considerar tendências das séries históricas e, muito menos, as projeções relativas às mudanças climáticas. O EIA não menciona tendências das séries nem projeções de valores com base em modelos climáticos.

O item 5.4.2.1 da Norma ABNT NBR 13028-3 não é uma inovação metodológica, mas tão somente a transcrição – e o reconhecimento – das práticas da boa engenharia utilizadas há décadas, tanto no Brasil quanto no exterior, para definição da chuva de projeto¹¹.

Assim, o EIA, de acordo com as práticas usuais da boa engenharia, deveria apresentar comprovações de que:

- a) os dados pluviométricos considerados para o dimensionamento, por meio de frequências estatísticas, dos sistemas de drenagem foram obtidos de estações pluviométricas realmente representativas dos locais de implantação das pilhas; as estações consideradas nos estudos devem ser explicitamente informadas (nome, coordenadas geográficas, fonte ou link de onde foi obtida a série histórica, período abrangido pelos dados); é determinante que os dados provenham de estações pluviométricas com dados públicos (e não de estações privadas), devidamente consistidos por órgãos do governo, de modo que possam ter sua autenticidade e

¹¹ A "chuva de projeto" em um sistema de drenagem é a intensidade de precipitação (mm/h) considerada para o dimensionamento, definida por parâmetros como Duração (T), Intensidade (I) e Tempo de Retorno (TR) (ex: 100, 500, 1000, 10.000 anos), que representa a "pior chuva" esperada com uma certa probabilidade para a região, usando equações ou curvas IDF, visando calcular a vazão de pico para dimensionar galerias, bueiros e condutos para evitar alagamentos e danos. Como é definida:

- **Curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência):** São os gráficos que relacionam a intensidade da chuva com sua duração e o tempo de retorno (frequência) para uma localidade específica, sendo a base para o cálculo.
- **Equações de Chuva:** Fórmulas matemáticas (ex: $I = \frac{K \cdot TR^A}{(T+B)^C}$) que usam parâmetros regionais (K, A, B, C) para determinar a intensidade da chuva de projeto para uma dada duração e tempo de retorno.
- **Tempo de Concentração (TC):** Em métodos como o Racional, a duração da chuva (T) é igual ao tempo de concentração da bacia, o tempo que a água leva para escoar de um ponto mais distante até o ponto de interesse.
- **Tempo de Retorno (TR):** Indica a probabilidade de uma chuva de certa intensidade ocorrer. Um TR de 100 anos significa 1% de chance de uma determinada quantidade de chuva ocorrer em um ano.
- **Cálculo da Vazão de Projeto:** Transformar a chuva de projeto em vazão (Q). Ex.: pelo Método Racional $Q = C * I * A$ para dimensionar o sistema.

- confiabilidade atestadas; na ausência de estações públicas na área do empreendimento, ou próximas a ela, a metodologia utilizada para interpolação ou extrapolação de dados deve ser completa e claramente descrita e sujeita a verificação por entidades e órgãos independentes;
- b) as metodologias estatísticas de estudos de frequências são adequadas e feitas de acordo com o estado da arte dessa área de estudos;
 - c) as séries históricas de precipitações consideradas abrangem, no mínimo, 20 anos de dados com ciclos hidrológicos completos; é forçoso depreender desse requisito que o conjunto dos dados deve incluir os dos 20 anos os mais recentes, visto que não faz sentido não considerar os dados mais recentes, representativos das condições climáticas atuais;
 - d) **foram feitos estudos detalhados e sistemáticos em busca de evidências de alterações de tendências nas séries históricas e que, adicionalmente, foram feitas projeções, baseadas em cenários de mudanças climáticas tais como os definidos pelo IPCC, de valores de chuva com uso de modelos computacionais adequados, e que os resultados de tais estudos e projeções foram utilizados para se fazer atualizações adequadas dos quantitativos de chuvas intensas utilizadas para o projeto dos sistemas de drenagem; as comprovações relativas a esses itens devem incluir o detalhamento das metodologias de cálculo, as quais devem estar de acordo com o estado da arte atual no setor, sendo completa e claramente descritas e sujeitas a verificação por entidades e órgãos independentes;**
 - e) foram feitas, de modo tecnicamente correto, as avaliações da influência orográfica, ou seja, a influência, nos valores e frequências das precipitações, das serras em que se encontram o empreendimento; deve-se destacar que o Complexo Germano, local do empreendimento, encontra-se situado na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, na parte sul da Serra do Espinhaço, entre esta e as serras do Caraça e de Antônio Pereira, nos municípios de Mariana e Ouro Preto, região de altitudes elevadas e comprovadamente de maior pluviosidade devido ao efeito orográfico, conforme demonstrado em vários artigos técnicos e literatura especializada.
 - f) foi realizado o projeto e o dimensionamento adequados da “pilha pulmão”, ou seja, pilha temporária, que atenderá a PDER M, conforme descrito no seguinte item do EIA:

7.7.2.7.2 Sequenciamento construtivo

A construção da PDER M será realizada em três etapas, de jusante para montante, conforme os anexos 7.7-23, 7.7-24, 7.7-25, 7.7-26 (Tetra Tech, 2020). A disposição de material na pilha, dar-se-á a partir de uma pilha pulmão, a qual servirá de depósito temporário, até que ele seja disposto na estrutura, por intermédio de equipamentos definidos em projeto. Para contenção de sedimentos gerados por meio da precipitação direta na pilha, foram definidos canais periféricos, os quais irão direcionar os sedimentos até o Dique S3, já existente na área.

Não foram encontradas, no EIA, informações sobre as características dessa pilha pulmão, a qual, assim como as demais estruturas da mina, estará sujeita a eventos climáticos extremos, podendo apresentar falhas com consequências graves, dependendo de sua localização e características de projeto. O mesmo se aplica às demais pilhas pulmão já existentes na mina ou a serem construídas no âmbito do Projeto de Longo Prazo.

Por outro lado, o rejeito filtrado, com baixa umidade, se colocado em pilha pulmão exposta ao tempo, em épocas mais úmidas, como no período chuvoso, poderá adquirir alta umidade, inviabilizando a sua deposição e compactação nas pilhas finais (ver considerações sobre esse ponto mais adiante nesse documento). Se o lançamento e a compactação do rejeito forem feitos com umidade acima do valor máximo de projeto

(3,0% de conteúdo de água) as características estruturais da pilha – e, conseqüentemente – a sua segurança, estarão comprometidas, elevando consideravelmente os riscos de falhas estruturais.

As comprovações acima elencadas não foram localizadas no EIA apresentado pela Samarco para aprovação pela CMI do COPAM.

11) No item “5.4.2.2 Vazão de projeto para drenagem superficial” da ABNT NBR 13028-3 encontram-se as seguintes determinações a respeito dos estudos hidrológicos e hidráulicos:

5.4.2.2 Vazão de projeto para drenagem superficial

Para a definição da vazão de projeto, devem ser considerados no estudo os seguintes itens:

- a) base topográfica com precisão suficiente para definição das áreas de drenagem e interferências existentes, de acordo com a fase de projeto específica;
- b) avaliação do grupo hidrológico (pedologia, geologia regional e local e a hidrogeologia);
- c) avaliação da umidade antecedente pelo projetista com justificativa técnica consolidada no estudo;
- d) avaliação da área de contribuição e a necessidade de subdivisão de bacias, conforme a complexidade geográfica local. O tempo de concentração deve ser representativo das condições das calhas, declividades e área de abrangência;
- e) o método racional somente é recomendado para pequenas bacias com áreas de drenagem de até 1,0 km²;
- f) tempo de retorno mínimo para o dimensionamento das estruturas periféricas de drenagem superficial de 500 anos;
- g) tempo de retorno mínimo para o dimensionamento das estruturas de drenagem superficial na pilha de 100 anos;
- h) escolha da rugosidade das estruturas hidráulicas (coeficiente de Manning) compatível com o revestimento;
- i) avaliar os segmentos em degraus e trechos de maior declividade de acordo com a característica do escoamento;
- j) apresentar análise em termos de borda livre, considerando trechos em curva, baixas declividades e transições no número de Froude, quando há a possibilidade de formação de ressalto hidráulico;
- k) selecionar, conforme a fase de operação e fechamento, um critério de borda livre para as estruturas considerando as características do escoamento;
- l) avaliar as velocidades médias máximas compatíveis para cada revestimento e de acordo com o risco de dano à estrutura;
- m) prever no desemboque, quando pertinente, estruturas de dissipação de energia.

Da mesma forma como no caso anterior, esse item 5.4.2.2 da Norma ABNT NBR 13028-3 não é uma inovação metodológica, mas tão somente a transcrição – e o reconhecimento – das práticas da boa engenharia utilizadas há décadas, tanto no Brasil quanto no exterior, para definição da vazão de projeto de um sistema de drenagem superficial.

A tabela a seguir apresenta considerações a respeito de cada item:

Item	Descrição do item conforme a norma	Avaliação	Inovação?	Significado (resumido)
a	Base topográfica com precisão suficiente para definição das áreas de drenagem e interferências existentes, de acordo com a fase de projeto específica.	Prática tradicional consolidada	Não	Exige levantamento topográfico compatível com o nível de detalhamento do projeto para correta delimitação de bacias, talwegues e interferências.

b	Avaliação do grupo hidrológico (pedologia, geologia regional e local e a hidrogeologia).	Prática conhecida da engenharia hidrológica	Não (apenas reforço conceitual)	Caracteriza o comportamento hidrológico do terreno quanto à infiltração e geração de escoamento superficial.
c	Avaliação da umidade antecedente pelo projetista com justificativa técnica consolidada no estudo.	Prática conhecida, antes implícita	Sim (procedimental)	Obriga o projetista a definir e justificar tecnicamente a condição de umidade pré-chuva adotada no cálculo.
d	Avaliação da área de contribuição e necessidade de subdivisão de bacias; tempo de concentração representativo das calhas, declividades e área.	Prática clássica da hidrologia	Não	Garante que bacias, sub-bacias e tempos de concentração representem fielmente as condições físicas do escoamento.
e	Método racional recomendado apenas para bacias com áreas de drenagem de até 1,0 km ² .	Prática clássica e consagrada	Não	Limita o uso do método racional ao seu domínio de validade técnica (no EIA da Samarco utilizou-se o Método Racional para bacias de até 4,0 km ² ; ex.: item 7.6.3.2.1.7.4).
f	Tempo de retorno mínimo de 500 anos para estruturas periféricas de drenagem superficial.	Prática usual, adotada em normas anteriores como a NBR 13029:2017	Não	Define padrão mínimo de proteção hidrológica para drenagem para estruturas externas críticas. O TR 500 anos é definido no item 5.6.6 da nova Norma NBR 13028-3:2025 para canais periféricos definitivos de coleta e condução de águas superficiais.
g	Tempo de retorno mínimo de 100 anos para estruturas de drenagem superficial na pilha.	Prática usual, adotada em normas anteriores como a NBR 13029:2017	Não	Define padrão mínimo de proteção hidrológica para drenagem sobre a pilha. O TR 100 anos é definido no item 5.6.6 da nova Norma NBR 13028-3:2025 para os dispositivos: canaletas de berma, canaletas de topo, drenagens de acesso sobre a pilha e descidas de água entre taludes.
h	Escolha da rugosidade das estruturas hidráulicas (coeficiente de Manning) compatível com o revestimento.	Prática básica e clássica	Não	Garante coerência entre material da estrutura e parâmetros hidráulicos adotados.
i	Avaliação de segmentos em degraus e trechos de maior declividade conforme a característica do escoamento.	Prática usual em projetos bem elaborados	Não	Exige análise específica de trechos com escoamento acelerado ou em transição.
j	Análise de borda livre considerando curvas, baixas declividades e transições no número de Froude, com possibilidade de ressalto hidráulico.	Prática conhecida, porém nem sempre exigida	Sim (normativa relevante)	Obriga avaliação formal de transições de regime e riscos de extravasamento. O valor da borda livre aqui não se refere a previsões de eventos extremos de chuva, mas à geometria dos dispositivos de drenagem.
k	Seleção de critério de borda livre conforme a fase de operação e fechamento.	Prática pouco formalizada anteriormente	Sim (conceitual e procedimental)	Ajusta o nível de segurança hidráulica às condições operacionais e de longo prazo. A norma não relaciona a borda livre à intensificação dos eventos extremos de chuva.
l	Avaliação das velocidades médias máximas compatíveis com cada revestimento e risco de dano à estrutura.	Prática clássica da engenharia hidráulica	Não	Evita erosão, desgaste ou falha estrutural por excesso de velocidade.

m	Previsão de estruturas de dissipação de energia no desemboque, quando pertinente.	Prática tradicional consolidada	Não	Reduz a energia do escoamento antes do lançamento para evitar erosão a jusante.
---	---	---------------------------------	-----	---

Dessa forma, pode-se afirmar que na nova Norma ABNT NBR 13028-3 não há inovação metodológica no cálculo hidrológico em si. As principais novidades são normativas, procedimentais e de rigor técnico, destacando-se:

- Exigência explícita de justificativas técnicas (item c);
- Obrigatoriedade de análises hidráulicas avançadas (item j);
- Tratamento diferenciado por fase operacional (item k).

Ou seja, a norma não cria novos métodos de cálculo de vazão, mas consolida a boa engenharia, reduz ambiguidades, eleva o patamar mínimo de segurança e dificulta soluções simplificadas ou mal justificadas.

Como no caso anterior, não foram localizadas no EIA apresentado pela Samarco para aprovação pela CMI do COPAM comprovações claras e completas de que as práticas tradicionais de engenharia, elencadas na tabela acima, foram corretamente adotadas. Por outro lado, o EIA deve ser revisado de modo a incluir, de forma explícita e bem documentada, os requisitos dos itens c), j) e k) da tabela acima, além das comprovações faltantes referentes aos demais itens.

Conforme observado na tabela, no EIA da Samarco utilizou-se o Método Racional para bacias de até 4,0 km² (ex.: item 7.6.3.2.1.7.4), enquanto a prática (e a norma NBR 13028-3) limitam a área a 1,0 km².

- 12) No item “5.6.7 Estruturas auxiliares ou temporárias de drenagem superficial e controle de sedimentos” da ABNT NBR 13028-3 encontram-se as seguintes determinações a respeito dos estudos hidrológicos e hidráulicos:

A retenção de sedimentos é uma medida importante para controle ambiental. Por isso, o projeto de pilhas de rejeitos de mineração deve prever sistemas de retenção de sedimentos adequados ao tipo, à quantidade e à granulometria dos rejeitos, bem como às condições hidrológicas, topográficas e climáticas da área.

Para escolha e dimensionamento dos sistemas de retenção de sedimentos em projetos de pilhas de rejeitos de mineração, é necessário considerar diversos aspectos fundamentais:

(...)

b) caracterização hidrológica, utilizando dados de precipitação, vazão, nível de água, frequência e duração das chuvas na área, conforme disponibilidade;

(...)

e) análise de risco: é importante avaliar a probabilidade e a magnitude dos impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes da liberação de sedimentos.

Ao considerar esses aspectos, o projeto de pilhas de rejeitos de mineração deve desenvolver sistemas de retenção de sedimentos eficientes e adequados às especificidades da área e do material envolvido, reduzindo assim o impacto ambiental e aumentando a segurança da operação mineira.

Não foram localizadas no EIA apresentado pela Samarco para aprovação pela CMI do COPAM comprovações de que foram feitas quaisquer análises de risco dos sistemas de retenção de sedimento, análises essas que devem ter em conta as tendências de alterações das séries históricas de precipitações, conforme determinado no item 5.4.2.1. b da Norma ABNT NBR 13028-3.

- 13) **De modo especial, deve-se avaliar os riscos de liberação de sedimentos e de rupturas nos sistemas de contenção de sedimentos devidos a eventos extremos de chuvas decorrentes de mudanças climáticas.** Em caso de evento de chuvas de maior intensidade, a ruptura de um sistema de contenção (diques) equivale à ruptura de uma barragem, principalmente ao

se considerar que tal evento pode incluir o carreamento, em tempo curto, de maior volume de sedimentos (por erosão superficial) associado ao maior volume de água. Os riscos aumentam, também, em um cenário em que o dique de contenção já esteja com parte significativa do seu volume útil ocupado por sedimentos. Os fatores de segurança e os riscos derivados de eventos extremos de chuva não foram contemplados no EIA.

Adicionalmente, os cálculos apresentados no EIA são baseados em estimativas e não em medições efetivas de descargas sólidas (ver exemplos a seguir, extraídos do EIA), o que pode aumentar significativamente os riscos devido às imprecisões envolvidas nos métodos de estimação.

7.5.3.1.4.6 Estrutura de contenção de sedimentos

Considerou-se no presente estudo a utilização do Dique S3, existente na área do Complexo Germano, como estrutura de contenção de sedimentos.

A seguir, são apresentadas as metodologias utilizadas para a estimativa da geração do volume de sedimentos, aqui considerada equivalente ao volume morto, para o cálculo do volume de residência necessário para a sedimentação das partículas em suspensão, bem como na avaliação do Dique S3 como estrutura de contenção de sedimentos da PDER M.

7.5.3.1.4.6.1 Volume morto

Em tese, este volume deveria ser calculado a partir de metodologias cujos dados de entrada considerassem valores de descargas sólidas medidas através de amostradores específicos. Contudo, a ausência dessa informação e a decorrente impossibilidade de aplicação dessas metodologias conduziram à seguinte alternativa de modelo:

$$VM = \left(\sum_{i=1}^{i=N} AD_i \cdot tx_i \right) \cdot n$$

7.5.4.1.4.5 Estrutura de contenção de sedimentos

Considerou-se no presente estudo, como estruturas de contenção de sedimentos para a PDER C, o seguinte: Dique Norte, Dique Sul e Dique Sul 2.

Salienta-se que ambas as estruturas serão dotadas de sistemas extravasores, os quais serão tratados na descrição da etapa de operação deste capítulo.

A seguir, são apresentadas as metodologias utilizadas para a estimativa da geração do volume de sedimentos, aqui considerada equivalente ao volume morto, para o cálculo do volume de residência necessário para a sedimentação das partículas suspensão, bem como para o dimensionamento das estruturas de contenção de sedimentos da PDER C, a saber, o Dique Norte, Dique Sul 1 e Dique Sul 2.

7.5.4.1.4.5.1 Volume morto

Em tese, este volume deveria ser calculado a partir de metodologias cujos dados de entrada considerassem valores de descargas sólidas medidas através de amostradores específicos. Contudo, a ausência dessa informação e a decorrente impossibilidade de aplicação dessas metodologias conduziram à seguinte alternativa de modelo:

$$VM = \left(\sum_{i=1}^{i=N} AD_i \cdot tx_i \right) \cdot n$$

- 14) Um ponto de crucial importância a ser destacado é o que se refere à estabilidade e desempenho dos diversos diques de contenção de sedimentos face a eventos extremos de chuvas decorrentes das mudanças climáticas. O EIA do Projeto de Longo Prazo não apresenta nenhum estudo de estabilidade desses diques, nem mesmo para as condições usuais de dimensionamento. No entanto, menciona estudos realizados por outras empresas sem informar se tais estudos incluíram os de estabilidade dos diques e modelagem hidrológica em cenários de mudanças climáticas: BVP, 2016 – Dique S3, modelagem hidrológica e estudo de “Avaliação da Segurança Hidrológica e Hidráulica do Sistema de Barragens da Bacia do Córrego Santarém”, realizado pela empresa POTAMOS em 2017. **Considera-se que o EIA do Projeto de Longo Prazo deve ser revisado para incluir a estabilidade de todos os diques associados a esse Projeto e a sua modelagem hidrológica em cenários de mudanças climáticas.**

- 15) A capacidade de um dique para armazenar sedimentos depende da taxa de geração de sedimentos da área da qual o dique recebe as águas de chuva. Conforme afirma-se no item “7.5.3.1.4.6.1 Volume morto” do EIA, “ No Brasil, tem sido prática a adoção do limite superior dessa faixa para cálculo da contribuição de sedimentos em áreas de mineração”. No entanto, contrariando essa prática, no EIA do Projeto Longo Prazo considerou-se uma taxa intermediária, o que aumenta os riscos. A taxa adotada pressupõe o seguinte cenário descrito no item mencionado (grifos nossos):

Os valores de taxa de geração de sedimentos anual supracitados advêm de Pinheiro (2011), que apresentou valores de contribuição específica de sedimentos variando entre 300 m³/ha.ano a 600 m³/ha.ano em empreendimentos ocupados por atividades de mineração nos Estados Unidos. **No Brasil, tem sido prática a adoção do limite superior dessa faixa para cálculo da contribuição de sedimentos em áreas de mineração.**

No presente estudo considerou-se um valor intermediário por compreender como improvável um cenário em que toda a pilha estará 100% exposta, ou seja, sem nenhuma cobertura vegetal. A cobertura vegetal tem papel crucial no controle ambiental e é responsável por reduzir significativamente a geração de sedimentos. Complementarmente, tendo em vista o exposto, destaca-se a importância de se realizar a revegetação da estrutura em acordo com o cronograma operacional, trabalhando com a menor área e tempo de exposição possível.

Um método mais apropriado para cálculo da produção de sedimentos em uma área ou bacia deve ocorrer a partir de dados de monitoramento de estações hidrossedimentológicas.

Devido às condições específicas do empreendimento, que envolve o histórico do Complexo Germano e as comunidades do seu entorno, pode-se considerar que, **para reduzir os riscos, além de se considerar volumes de chuva e erosividades de cenários de mudanças climáticas, deveria ter sido utilizado o limite superior da taxa de geração de sedimentos, baseado em monitoramento de estações hidrossedimentológicas** que não foram consideradas no EIA, caso existam no local.

Deve-se considerar que **a cobertura vegetal não é uma condição estável**, visto que pode ser reduzida, muitas vezes de modo acentuado, por condições de seca e/ou por queimadas, o que altera sua capacidade de atuar na retenção de sedimentos. **A manutenção da qualidade e da quantidade da cobertura vegetal depende de cuidados contínuos, que deverão ser mantidos durante todo o período de existência das pilhas para minimizar, no futuro, os riscos associados a essas estruturas. Por esse motivo e por todos os demais associados aos vários tipos de riscos, a responsabilidade pela manutenção perene da segurança das pilhas – para além do período de sua construção, por tempo indefinido – deverá ser claramente determinada e assumida.**

- 16) A segurança de uma estrutura de contenção de sedimentos (dique) depende, também, do denominado “Volume de Residência” que, por sua vez, determina o “Tempo de Residência”:

O Tempo de Residência depende, portanto, da magnitude da afluência líquida que transporta o sedimento até o reservatório, reduzindo-se durante a ocorrência de cheias. Contudo, está também associado, implicitamente, às propriedades intrínsecas do sedimento, a exemplo da granulometria do material.

Posto isso, o Volume de Residência pode ser determinado multiplicando-se uma vazão de referência, assumida para a afluência líquida, pelo Tempo de Residência. Contudo, para tal, faz-se necessário estabelecer critérios de determinação de ambas as variáveis.

Para o presente estudo, então, utilizaram-se as metodologias de Brune (1953), Churchill (1948), Morris & Fan (2010) e Ábaco de Hjulström para a avaliação do volume de residência.

Este conjunto de metodologias opera com vazões de referência que representam condições médias ou de projeto para o transporte e decantação de sedimentos. Elas não são métodos

para determinação das vazões máximas de cheia para estabilidade estrutural do dique nem para o dimensionamento hidrológico-hidráulico seguro do dique contra eventos extremos. **O aumento de eventos extremos de chuvas impacta primeiro a integridade estrutural dos diques, exigindo uma análise hidrológica separada e mais rigorosa, análise essa não encontrada no EIA mencionado.**

Metodologia Citada	Domínio Principal	Adequada como Única Base para Dique com Eventos Extremos?	Papel Recomendado no Novo Projeto que Considere os Cenários de Mudanças Climáticas
Brune (1953)	Eficiência de Retenção (Sedimentos)	Não.	Complementar - Estimar assoreamento com dados revisados.
Churchill (1948)	Tempo de Residência (Sedimentos)	Não.	Complementar - Idem acima.
Morris & Fan (2010)	Manual de Sedimentação	Não.	Complementar - Fornecer base teórica e métodos detalhados.
Ábaco de Hjulström	Velocidade Crítica (Erosão/Deposição)	Não.	Complementar Crítico - Verificar se a decantação é viável sob as novas vazões.

É importante destacar que, conforme os itens mencionados, **o Volume de Residência para os diques foi dimensionado para um evento de TR 2 anos e duração de 24 horas** utilizando-se como referência a metodologia de Morris & Fan (2010). O Tempo de Recorrência de apenas dois anos é bem inferior ao TR 100 anos utilizado para as canaletas de topo, de bermas, de acessos e descidas de água das pilhas. Esta premissa tem como objetivo garantir uma determinada eficiência (80% ou mais, conforme o EIA) de decantação para as condições hidrológicas mais frequentes na área.

Em eventos mais intensos que o de referência (TR 2 anos), o Tempo de Residência no reservatório diminui e a eficiência de retenção de sedimentos decai, conforme previsto pelas metodologias de Brune e Churchill. Conseqüentemente, para estas situações, é esperado que o efluente vertido apresente concentrações de sedimentos superiores às observadas em condições médias. Assim, **vazões um pouco maiores (chuvas um pouco mais intensas que aquelas com TR 2 anos) passarão pelos diques e serão vertidas, podendo conter cargas progressivamente maiores de sedimentos em suspensão, diretamente correlacionadas ao aumento da intensidade e volume do evento precipitante, que serão lançados nos cursos d'água que receberão as descargas dos diques.**

- 17) Deve-se ressaltar que, para os estudos de mancha de inundação do rio Gualaxo do Norte, foi considerada a precipitação correspondente a TR 10.000 anos conforme item. "7.5.4.1.4.2 Estudos para obtenção da mancha de inundação" do EIA. Para tanto, foi desenvolvido uma simulação hidráulica no modelo Bidimensional (2D) das bacias de contribuição da área.
- 18) A íntegra do item "7.5.3.1.3.2 Modelo geológico-geotécnico" pág. 89 do doc. EIA denominado "CARACTERIZAÇÃO EMPR. - ATIVIDADE E ASPECTOS AMBIENTAIS", é a seguinte (grifos nossos):

7.5.3.1.3.2 Modelo geológico-geotécnico

As seções de estudo da PDER M serão apresentadas no Item 7.5.3.1.3.4 já com a setorização dos materiais. Elas foram consideradas as seções de maior representatividade, tendo sido priorizadas a abrangência de regiões de talvegue, nos quais verifica-se uma maior tendência de presença de materiais inconsolidados e de baixa consistência, e seções de maior altura dos taludes.

Conforme descrito no Capítulo 3, na ausência de informações sobre a fundação, nas análises de estabilidade, foi considerado um ponto de vista otimista.

Os parâmetros geotécnicos seguiram o relatório técnico da ruptura de Barragem de Fundão (2016) e levantamentos geológicos superficiais executados no escopo deste projeto. O nível d'água se baseou em levantamentos das nascentes e relatórios de sondagens da Samarco. O perfil geológico foi definido a partir dos mapas geológicos, ensaios geotécnicos e visita de campo. Estes foram adotados de forma otimista pela equipe da empresa Tetra Tech. Após a execução da campanha de sondagens proposta, existe a previsão de piora dos parâmetros, o que impacta diretamente nas análises de estabilidade.

Como não há certeza sobre a estabilidade da pilha PDER M, por ausência de informações sobre sua fundação, que poderiam ser obtidas por sondagens adequadas, todo o projeto dessa estrutura e, até mesmo a sua localização, são questionáveis e, dependendo das condições geológicas do local para ela previsto, pode-se concluir pela inviabilidade dessa pilha e todo o Projeto deverá ser refeito e submetido a novo licenciamento. O correto, portanto, é dirimir essa e as demais dúvidas antes da continuação dos trabalhos de implantação do Projeto. Deve-se destacar que, conforme o item “7.5.3.1.1.11 Análises de estabilidade” do doc. supracitado, as análises de estabilidade da PDER M foram baseadas nas normas NBR 13.028 (ABNT, 2017) e a NBR 13.029 (ABNT, 2017), já superadas em 2025 e 2024 respectivamente, além do fato de que a norma NBR 13029 trata apenas de pilhas de estéreis e não de pilhas mistas de estéreis e rejeitos tais como a PDER M e a norma NBR 13028 de 2017 trata apenas de barragens de rejeitos e não de pilhas.

A necessidade de novas sondagens, que poderão comprovar o não a capacidade do terreno para suportar a pilha PDER M, é reiterada no item “7.5.3.1.3.1 Especificação técnica de sondagens e ensaios de laboratório”, item que também se refere ao “projeto conceitual” em que todo o EIA se baseou:

7.5.3.1.3.1 Especificação técnica de sondagens e ensaios de laboratório

Com objetivo de avançar nas informações sobre a área de implantação da PDER M, para implementação no projeto básico, deverão ser executadas as sondagens e os ensaios de campo e laboratório conforme apresenta o Anexo 7.5-6, referentes à fundação, de maneira a auxiliar no refinamento das análises efetuadas até o momento, em nível conceitual.

A incerteza sobre a localização da PDER M é, ainda, evidente no item “7.5.3.1.3.1.1 Sondagens a serem realizadas”, no qual “estão apresentadas as localizações das 48 sondagens mistas programadas na região potencial de implantação da PDER M. Parte das sondagens deverá incluir “ensaios de permeabilidade “in situ” a cada 3 metros, sendo ensaios de infiltração em solo consorciados com ensaios de perda d'água sob pressão (EPA) em rocha”.

Esses aspectos confirmam que o licenciamento ambiental da PDER M foi feito com base em um projeto conceitual com incertezas evidentes no que diz respeito às fundações e, portanto, à estabilidade da pilha e à segurança do seu dimensionamento.

Para mais informações sobre esse tema, consultar o **Anexo 4** ao presente documento.

- 19) A íntegra do item “7.5.4.1.3.2 Modelo geológico-geotécnico” da PDER C, pág. 181 do doc. EIA denominado “CARACTERIZAÇÃO EMPR. - ATIVIDADE E ASPECTOS AMBIENTAIS”, é a seguinte:

7.5.4.1.3.2 Modelo geológico-geotécnico

As seções de estudo da PDER C são apresentadas nos Anexos 7.5-16 e 7.5-17. As seções utilizadas nos estudos de estabilidade são as mesmas apresentadas no item 7.5.4.1.3.4 a seguir e foram selecionadas por serem consideradas as de maior representatividade, tendo sido priorizadas a abrangência de regiões de talvegue, nos quais verifica-se uma maior tendência de presença de materiais inconsolidados e de baixa consistência, e seções de maior altura dos taludes.

Ou seja, o EIA não informa que premissas relativas às fundações foram adotadas para os estudos de estabilidade, que talvez pudessem ser até similares as “otimistas” utilizadas para a PDER M. Pode-se considerar que a omissão dessas informações básicas compromete seriamente a confiabilidade de estudos de estabilidade e afirmações sobre a segurança da estrutura proposta.

- 20) No que diz respeito aos fatores de segurança da estabilidade calculada para a PDER M, o item “7.5.3.1.3.4 Fator de segurança” informa que as análises de estabilidade consideraram apenas a condição drenada, o que exigirá um **controle extremamente rigoroso do grau de compactação do rejeito arenoso filtrado para que ele atinja valores superiores a 97%** (ver item 6 do presente documento):

Visando eliminar a possibilidade de liquefação do rejeito arenoso filtrado, propôs-se a disposição do material compactado, obrigatoriamente, com graus de compactação superiores a 97%. Desta forma, as análises não drenadas propostas no Relatório sobre Critérios de Projeto, desenvolvido pela Tetra Tech em 2020, foram descartadas. Segundo dados constantes no relatório da empresa BVP, desenvolvido em 2018, em estudos experimentais de compactação com o rejeito no campo, foi possível obter graus de compactação entre 95% e 98% ($w_{ót.}=15,3\%$ e $\rho_{d,máx.}=1,8 \text{ g/cm}^3$), o que torna a proposta viável.

Esse mesmo parágrafo é reproduzido no item “7.5.4.1.3.4 Fator de segurança”, pág. 181, que trata do fator de segurança da pilha PDER C.

- 21) Os valores dos fatores de segurança das duas pilhas apresentados no EIA (item “7.5.3.1.3.4.1 Resultados”, pág. 91, para a PDER M e item “7.5.4.1.3.4.1 Resultados”, pág. para a PDER C) atendem aos requisitos da norma NBR 13029:2017 (que trata apenas de estéreis e não de rejeitos e que já está superada pela NBR 13028:2024) e devem ser revistos à luz da nova norma NBR 13028-3:2025. Ademais, os dois itens citados incluem o seguinte parágrafo:

Embora os resultados dos fatores de segurança apresentados nas análises de estabilidade desenvolvidas por análises determinísticas e por meio da metodologia de equilíbrio limite, atendam os critérios mínimos estabelecidos para o fator de segurança, recomenda-se, para o projeto básico, que sejam realizadas análises tensão-deformação pela metodologia de elementos finitos, visto que se trata de uma estrutura de grande porte, com altos níveis de tensões e consequentemente deformações elevadas.

Portanto, pode-se considerar que estudos mais confiáveis poderão concluir que os fatores de segurança não atendem aos requisitos de normas, o que constitui mais um ponto – a ser considerado em conjunto com os demais elencados no presente documento – a ser considerado na análise de risco que deve ser feita para o empreendimento como um todo.

Deve-se destacar, também, que o Anexo A da NBR 13028-3:2025 inclui a seguinte determinação, que é de grande importância para a verificação da segurança de médio e longo prazo das pilhas:

A.6 Níveis de tensões

Devem ser considerados os níveis de tensão de projeto gerados durante a vida útil da estrutura, e deve ser analisada a possibilidade de quebra de partículas e mudança de comportamento do material no âmbito da segurança da estrutura.

- 22) Embora a meta de 97% de grau de compactação seja viável tecnicamente, sua implementação bem-sucedida depende de um rigoroso plano de controle operacional que contemple a gestão da umidade sazonal, procedimentos específicos de compactação para bordas e taludes (com equipamentos e especificações dedicadas), e uma frequência de Controle de Qualidade compatível com o risco. A falha em controlar essas variáveis pode resultar em zonas localizadas com compactação inferior à de projeto, comprometendo o desempenho geotécnico assumido nas análises de estabilidade. **Por esses motivos, uma análise de riscos deve ser considerada obrigatória, além de ser necessária, para segurança da estrutura, a realização da análise não drenada de estabilidade, como corretamente proposto pela empresa Tetra Tech em 2020.**

O envelopamento do rejeito com estéril, dependendo da sequência construtiva, poderá colaborar para a manutenção da umidade (15,3%) nas bordas do rejeito a ser compactado, mas falhas na compactação do núcleo de rejeito não são corrigidas pelo estéril.

- 23) A compactação do rejeito e/ou do estéril em tempo de seca poderá requisitar quantidades expressivas de água, principalmente considerando-se que o rejeito será disposto, inicialmente, em uma pilha pulmão, onde poderá perder umidade. De acordo com o item 7.6.2.3.1 do EIA, “o sistema de captação de água para cada platô (PDER M e PDER C) será feito por meio de poços, visando suprir a demanda de água a ser utilizada tanto durante determinado momento da etapa de implantação quanto a etapa de operação por completo”. O EIA (item 7.6.2.3.1.6) informa que será necessária uma vazão de água de 200 m³/h (4 poços de 50 m³/h cada, dois para cada pilha), mas não informa claramente que parcela dessa água seria usada para a compactação nem se a captação em poços já foi outorgada, ou se garantidamente será outorgada pelo IGAM, fato que introduz nova incerteza em todo o Projeto. O quadro da INSERÇÃO 7-557 - Balanço de água global do Projeto Longo Prazo (2021), pág. 570, informa um valor de 160 m³/h para a disposição de estéril/rejeito, utilizado para obras industriais e civis (confeção de aterros) e Controles ambientais e Aspersão de vias.
- 24) No item “7.5.6 - Levantamentos e projetos realizados para o sistema de disposição de rejeitos em cava (SDR Alegria Sul 2)” subitem “7.5.6.3.2 Resultados dos estudos de balanço hídrico do reservatório”, pág. 261 do doc. “EIA denominado “CARACTERIZAÇÃO EMPR. - ATIVIDADE E ASPECTOS AMBIENTAIS”, encontra-se o seguinte parágrafo:

Vale ressaltar ainda que, nas simulações de balanço hídrico, embora tenha sido considerada a série histórica de precipitações observadas pela Samarco, não foram feitas as análises de risco de transbordo da cava de forma concomitante, ou seja, mediante a ocorrência de um evento extremo. De qualquer modo, admitindo-se o histórico de precipitações simulado (pouco significativo frente a magnitude das precipitações de projeto), pode-se considerar que o canal de drenagem ou o sistema de bombeamento dimensionado pela Samarco são suficientes. Entretanto, análises posteriores devem ser realizadas considerando a hipótese de ocorrência de eventos consecutivos de grande magnitude, dada a grande inércia do reservatório ou tempo de esvaziamento.

Além de não terem sido realizadas análises de risco, nota-se (pág. 254) que foi utilizada nos estudos de transbordamento uma série histórica de precipitações observadas pela Samarco, ou seja, não uma série com dados públicos, independentes e consistidos e, provavelmente (não está muito claro no doc.) de apenas 13 anos, e não de 20 anos, mínimo recomendado pela boa prática de engenharia e pela nova Norma NBR 13028-3.

- 25) Nos itens “7.7.2.7.4 e 7.7.2.8.4 Drenagem superficial e proteção superficial das pilhas PDER M e C” informa-se que

“a proteção superficial proposta para os taludes prevê a utilização de vegetação, que deverá ser comprovadamente adequada à região, podendo ser através de mudas de

grama em placas, hidrossemeio coberto com biomantas, ou por outros processos adequados”.

Deve-se destacar que a manutenção da vegetação de pequeno porte nos taludes, principalmente em épocas de secas prolongadas, pode demandar o uso regular de irrigação, aumentando o consumo de água exatamente em época de restrição hídrica, com impacto no custo operacional e na sustentabilidade. Uma vegetação seca é sujeita a incêndios e, mesmo que estes não ocorram, pode perder sua função principal de proteção contra o impacto das gotas de chuva e de contenção do escoamento superficial pelos taludes. A manutenção da vegetação deve ser feita não apenas durante a fase de operação das estruturas, mas enquanto elas existirem, possivelmente durante décadas ou séculos.

Adicionalmente, é necessário impedir – também de maneira perene – o crescimento de árvores de porte médio e grande sobre os taludes e bermas, selecionando-se os possíveis arbustos que possam vir a crescer, devido aos riscos e problemas associados a esse tipo de vegetação: comprometimento da estabilidade geotécnica e dificuldades para inspeção.

- 26) A análise dos itens 7.5.3.1.1.11, 7.5.3.1.3.4, 7.5.3.1.3.4.1, 7.5.4.1.1.11, 7.5.4.1.3.4 e 7.5.4.1.3.4.1 do EIA indica que as verificações de estabilidade das PDER M e PDER C foram realizadas exclusivamente em condição pseudo-estática, com aplicação de coeficiente sísmico horizontal, não tendo sido identificadas análises de estabilidade em condição estática. **A falta de análise estática constitui uma grave lacuna no que diz respeito à segurança das pilhas. Sobre esse ponto, ver o Anexo 2 ao presente documento.**

12 Considerações sobre Alguns Aspectos Construtivos das Pilhas PDER M e PDER C

No item 7.5.3.1.3.4 do EIA afirma-se que a estabilidade calculada da pilha PDER M estará condicionada à compactação do rejeito filtrado arenoso a graus iguais ou superiores a 97% do Proctor Normal (densidade máxima $pd,máx. = 1,8 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima $wót = 15,3\%$), visando eliminar o risco de liquefação e permitir, tornando possível – pelo menos em termos teóricos – considerar válida a análise de estabilidade em condições drenadas, a única feita para efeitos do EIA. De acordo com o item “7.5.4.1.1.5 Materiais” do EIA os rejeitos da PDER C também deverão ter grau de compactação mínimo de 97%.

Contudo, a execução prática de grau de compactação uniforme ao longo de todo o ano e em toda a extensão da pilha (incluindo bordas e taludes) enfrenta desafios significativos, principalmente considerando o clima tropical da região do Quadrilátero Ferrífero, caracterizado por estações chuvosas intensas e um período seco prolongado.

12.1 Dificuldades práticas para a compactação

As principais dificuldades práticas são:

1. Controle Contínuo da Umidade Ótima ($wót. = 15,3\%$):
 - Período Chuvoso: A elevada pluviosidade pode elevar rapidamente o teor de umidade do rejeito *in situ* acima do ótimo, exigindo interrupções para drenagem superficial, cobertura das frentes de trabalho ou revolvimento para secagem, impactando a produtividade e a homogeneidade.
 - Período Seco: A manutenção da umidade no valor ótimo torna-se difícil, sendo necessário umedecimento contínuo e homogêneo do material antes da compactação. Dispersões locais (pontos secos) são comuns e comprometem a compactação mínima requerida. Uma quantidade expressiva de água poderá ser necessária impactando a disponibilidade desse insumo justamente na época seca, em que ele se faz mais

necessário para as comunidades do entorno, para animais e vegetação e para as demais atividades da área da mina.

2. Compactação Homogênea em Bermas e Bordas de Talude:

- **Acesso e Manobra de Equipamentos:** As bordas e as áreas próximas aos taludes apresentam acesso restrito para os rolos compactadores pesados, que são essenciais para atingir energias elevadas necessárias à compactação mínima de 97%. O uso de equipamentos menores (ex.: soquetes vibratórios manuais ou rolos compactadores de pequeno porte, tipo "baby"), que mesmo assim não atingem a energia do Proctor Normal necessária para o mínimo de 97%.) nessas áreas frequentemente resulta em energia de compactação inferior, criando zonas menos densas ("hot spots") potencialmente críticas para a estabilidade global.
- **Confinamento do Material:** Nas bordas, a falta de confinamento lateral reduz a eficiência da compactação, dificultando a obtenção da mesma densidade alcançada no núcleo da pilha.

3. Controle de Qualidade em Tempo Real e Escala:

- A garantia de que 100% do material depositado atenderá ao critério mínimo exigirá um programa de controle de qualidade (CQ) extremamente rigoroso, com frequência elevada de ensaios (pesagem específica in situ, por exemplo) em todas as zonas, incluindo as de difícil acesso. Isso impõe desafios logísticos e de custo. O relatório da BVP (2018) aponta uma faixa de 95% a 98%, indicando a variabilidade inerente ao processo. Garantir que o mínimo sempre supere 97% é um desafio operacional considerável.

A princípio, a camada de estéril, de 15 metros de espessura prevista para envelopar o rejeito compacto da PDER M também deveria ser compactada de forma controlada, porém não foi localizada no EIA nenhuma informação a esse respeito.

Deve-se ter em conta que o QAF (Quadrilátero Aquífero Ferrífero) possui uma sazonalidade extrema. No verão, o rejeito filtrado, se exposto ao tempo, pode tornar-se uma "lama" imprópria para compactação; no inverno, a dessecação rápida gera poeira (que o vento espalha facilmente) e provoca perda de coesão para o tráfego. Some-se a isso que o rejeito arenoso de ferro, após a filtragem, mantém uma umidade residual que muitas vezes já está acima da Umidade Ótima. Reduzir essa umidade no período chuvoso em escala industrial é virtualmente impossível sem pátios de secagem cobertos, o que raramente é viável para grandes volumes, como os previstos para o Projeto Longo Prazo.

O relatório da BVP (2018) citado no EIA informa que os ensaios obtiveram uma faixa de 95% a 98%, o que indica que a média está em 96,5%. Exigir um **mínimo** de 97%, como está explícito no EIA, significa que a média operacional terá que ser próxima a 98-100%, o que é extremamente difícil para rejeitos arenosos sem adição de cimento ou controle rigoroso de granulometria.

12.2 Funções da camada de estéril

Embora o objetivo principal dessa camada seja o de recobrimento e não a estabilização do rejeito, a compactação do estéril é de grande importância para:

- Garantir sua estabilidade própria, reduzindo a erosão superficial e a instabilidade localizada nos taludes.
- Reduzir do risco de erosão superficial, conferindo maior resistência à erosão das chuvas intensas típicas da região, protegendo as bermas e taludes.
- Controlar a infiltração de água da chuva para dentro do núcleo de rejeito, funcionando como uma barreira hidrológica complementar. Ou seja, essa camada, quando bem

construída, pode proteger o núcleo de rejeito compactado, pelo menos parcialmente, das flutuações sazonais de umidade (períodos de alta pluviosidade e seca prolongada), reduzindo o risco de variações volumétricas (retração/fissuração no seco e amolecimento no úmido) no rejeito.

- Fornecer uma superfície estruturada para operação de equipamentos e futuras fases de disposição, se aplicável.
- Atuar como elemento de confinamento lateral sobre o rejeito. A falta de confinamento lateral é o "calcanhar de Aquiles" de pilhas compactadas, motivo pelo qual a disposição de rejeitos empilhados em cavas – ou no interior de estruturas de contenção construídas antes do lançamento dos rejeitos – é mais recomendada. Quando feito de forma adequado, o recobrimento da pilha com estéril é particularmente benéfico nas bordas e proximidades dos taludes, onde a compactação do rejeito é mais difícil. Isso pode melhorar o desempenho global da estrutura. Pode-se aumentar a segurança da camada de estéril, se necessário, com técnicas de grampeamento.

Por esses motivos – e, até mesmo, por coerência conceitual do Projeto – o envelopamento da pilha PDER C com estéril também deveria ter sido previsto e incluído no EIA como fator de redução dos riscos – inclusive ambientais – dessa estrutura.

Naturalmente, o uso de um recobrimento com estéril aumenta a complexidade construtiva e acentua a necessidade do controle de qualidade em camadas, exigindo controle rigoroso da interface. O desafio de compactar uniformemente o rejeito, especialmente nas bordas, persiste, principalmente quando o lançamento do rejeito é feito de forma não confinada. Falhas no núcleo não são corrigidas pelo estéril.

Deve-se considerar também que o estéril, dependendo de sua granulometria, pode reter água. É imperativo, portanto, que o projeto dos sistemas de drenagem interna e superficial sejam robustos para evitar o acúmulo de água na interface rejeito-estéril ou dentro da própria camada de recobrimento, o que poderia gerar pressões indesejadas.

Por outro lado, a espessa camada de estéril dificulta o monitoramento visual e o acesso direto ao núcleo de rejeito para inspeção de possíveis deformações ou umidificação, requerendo um aprimorado sistema de monitoramento do núcleo.

Finalmente, destaca-se que deveria ter sido informado no EIA um critério específico e uma sequência clara de compactação e deposição do estéril considerando suas características granulométricas e plásticas, de modo a garantir maiores condições de segurança para as estruturas.

O EIA informa apenas, para a pilha PDER M (item “7.7.2.7.2 Sequenciamento construtivo”), que “O cobrimento dos taludes com material estéril deve ser feito concomitantemente com a disposição do rejeito arenoso filtrado”, sem detalhar a forma de cobrimento e permitindo inferir que o rejeito será lançado sem confinamento lateral nas bordas. Sem cobrimento com estéril, a pilha PDER C está sujeita aos problemas referidos acima e nos itens a seguir.

12.3 O risco da análise de estabilidade somente drenada

O EIA descarta a análise não drenada baseando-se em uma *promessa* de compactação.

Na engenharia geotécnica moderna (pós-Fundão e pós-Córrego do Feijão), é temerário descartar análises de estabilidade em condições não drenadas (*Peak e Undrained Residual*). Se houver um erro operacional e uma camada de 1 metro ficar com 94% de compactação e saturar por uma falha de drenagem, ela pode liquefazer.

Assim, a premissa de que a compactação > 97 elimina o risco de liquefação é teórica. Falhas operacionais locais podem criar lentes saturadas e fofas. Portanto, a análise de estabilidade deve contemplar o cenário de 'Triggering' de liquefação e o fluxo pós-ruptura, conforme as melhores práticas internacionais (ICOLD e ANM)."

12.4 Critério de filtro e erosão interna (piping)

O texto do EIA menciona o envelope de estéril na PDER M, mas não a compatibilidade de filtro. Se o estéril for muito graúdo (blocos de rocha) e for colocado diretamente sobre o rejeito arenoso fino, a água da chuva que infiltra pode carregar as partículas de rejeito para dentro dos vazios do estéril (erosão interna na interface), fazendo-se necessário prever uma camada de transição ou geotêxtil entre o rejeito e o envelope de estéril para evitar o carreamento de finos, o que não é mencionado no EIA. Sem essa camada (ou geotêxtil) os riscos de piping aumentam, comprometendo a segurança da pilha PDER M.

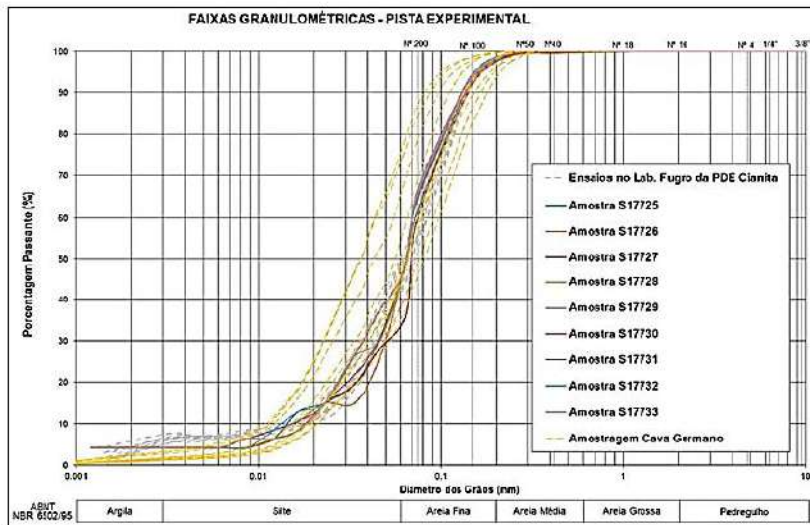
De acordo com "INSERÇÃO 7-136 - Faixa granulométrica típica do estéril a ser depositado em Mirandinha. Fonte: BVP (01/2018)", a granulometria do material a ser depositado como recobrimento do rejeito é um estéril de granulometria muito ampla, variando de matações (500 mm) até finos (abaixo de 0,1 mm). Fração grosseira tem um diâmetro máximo de 500 mm, o que é típico de um *Run-of-Mine* (ROM) e a fração fina possui entre 10% e 37% de material passando na malha 0,1 mm. Isso indica um estéril "sujo" (com presença de solo/saprolito ou finos de britagem), e não uma rocha limpa.

É necessário evitar que o rejeito arenoso (fino) seja carregado, pela água de chuva, para dentro dos vazios do estéril (grosseiro). A fração mais fina do estéril (até 0,5 mm) estaria bem próxima da granulometria do rejeito (que vai de 0,001 mm a 0,4 mm – ver gráfico abaixo, Inserção 7-119) e, se em contato direto com o rejeito, poderia impedir a migração de finos dos rejeitos para a cobertura de estéril, indicando segurança contra a erosão interna (piping), desde que o material fosse colocado de forma homogênea. Mas, como a amplitude da granulometria é muito grande (até 500 mm = 0,5 metro) o risco de segregação durante o lançamento é altíssimo.

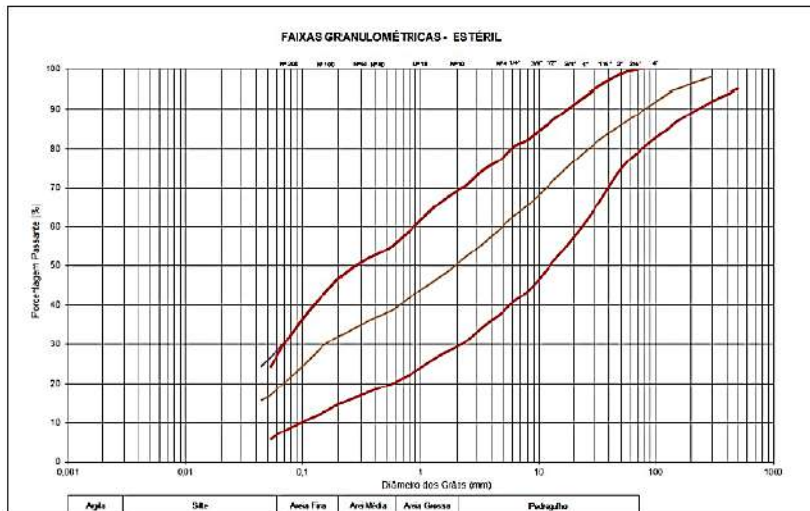
Ao se descarregar o estéril nos taludes, os blocos maiores (200-500 mm) tendem a rolar para a base e para as extremidades, enquanto os finos ficam no topo ou em alturas médias. Isso cria zonas de "ninhos de pedras" (*nesting*) na interface direta com o rejeito. Nessas janelas segregadas, o critério de filtro é violado. A água da chuva que percola pelo envelope de estéril encontrará um "caminho preferencial" e arrastará o rejeito arenoso para dentro desses vazios (erosão interna), podendo gerar recalques diferenciados e instabilidades no envelope. **Esse risco deve ser cuidadosamente avaliado, o que poderá resultar em necessidade de alteração significativa do conceito do projeto apresentado no EIA.**

Por outro lado, o gráfico da Inserção 7-136 mostra que o estéril poderá ter até 40% de finos (passante em 0,1 mm). um material com tantos finos, se compactado, terá uma permeabilidade baixa, possivelmente próxima à do próprio rejeito, o que contradiz a função de um envelope que deveria ser "drenante". Se o estéril não for mais permeável que o rejeito, ele pode aprisionar a linha freática dentro da pilha, aumentando a poropressão no núcleo de rejeito, o que é prejudicial à estabilidade. **Dessa forma, o material estéril a ser utilizado como envelope da PDER M pode ser considerado operacionalmente perigoso devido ao alto potencial de segregação e baixa permeabilidade dos seus finos.**

INSERÇÃO 7-119 - Curvas granulométricas do rejeito arenoso filtrado e não filtrado Fonte: BVP (09/2017)



INSERÇÃO 7-136 - Faixa granulométrica típica do estéril a ser depositado em Mirandinha. Fonte: BVP (01/2018)



12.5 Rejeito arenoso x erosão na PDER C

A PDER C não terá envelope. Deve-se destacar que o rejeito arenoso de ferro é extremamente erodível. Sem o envelope de estéril, a PDER C sofrerá com processos de voçorocamento e sulcos erosivos profundos a cada temporada de chuva, exigindo manutenção constante e aumentando o aporte de sedimentos no sistema de drenagem.

12.6 Permeabilidade diferencial

Deve-se considerar ainda, para a PDER M, que o estéril pode ser mais permeável que o rejeito compactado e, assim, criar um efeito de "esponja", onde o envelope de 15 m retém água e a mantém em contato prolongado com a face do rejeito, facilitando a saturação periférica. Para evitar isso, o projeto deveria detalhar o sistema de drenagem de interface (tapete drenante) entre o rejeito e o envelope, o que não é mencionado no EIA.

12.7 Dificuldades operacionais para o lançamento dos rejeitos

A operação de uma pilha de rejeitos filtrados, da forma como é descrita no EIA, enfrentará obstáculos severos que comprometerão diretamente a meta de se atingir um Grau de Compactação igual ou superior a 97%.

Em primeiro lugar, a ausência de proteção (cobertura) na pilha pulmão expõe o material arenoso de forma contínua às variações climáticas extremas da região, transformando o estoque em um acumulador de umidade ou em uma fonte de poeira, o que torna o controle tecnológico da umidade ótima um desafio de difícil execução em escala industrial.

Durante o período chuvoso, que se estende por aproximadamente seis meses, o rejeito invariavelmente atinge teores de umidade muito acima do limite ideal para a compactação. Sem uma cobertura, a água da chuva penetra na pilha pulmão e nas frentes de trabalho, saturando o material e impedindo que os rolos compactadores rearranjem as partículas de forma eficiente. Nesses cenários, ocorre com frequência o fenômeno conhecido como solo "borrachudo", em que a energia de compactação gera pressões neutras instantâneas nos vazios preenchidos por água, resultando em uma deformação elástica da camada em vez de sua densificação. Além disso, a trafegabilidade de caminhões e equipamentos de espalhamento fica seriamente prejudicada, e as tentativas de secagem por escarificação são frequentemente interrompidas por novos eventos de precipitação, inviabilizando a homogeneidade da estrutura. **A continuidade dos trabalhos nessas condições resulta em uma pilha com características estruturais comprometidas, o que afeta seriamente a sua segurança, aumentando bastante os riscos ao longo de toda a sua vida útil. Para respeitar as premissas de cálculo e de projeto, poderá ser necessário interromper o lançamento dos rejeitos durante vários períodos, que poderão se estender por semanas, dependendo das condições climáticas.**

Por outro lado, na temporada de seca, a problemática se inverte para a dessecação rápida e intensa do rejeito arenoso. Com a umidade muito abaixo da ótima, a fricção entre as partículas aumenta consideravelmente, exigindo uma energia de compactação muito superior para vencer a resistência interna do material. Para mitigar esse efeito, torna-se necessária uma logística complexa de umectação contínua por meio de caminhões-pipa, o que raramente garante uma distribuição uniforme da água em toda a extensão da camada. Essa dificuldade operacional resulta na criação de pontos secos e zonas de baixa densidade, enquanto a suspensão de partículas sólidas no ar gera desafios ambientais adicionais e possíveis conflitos com as comunidades vizinhas devido tanto à geração de poeira quanto ao uso intensivo de água em períodos de escassez hídrica.

Essa alternância sazonal, aliada à falta de um ambiente controlado para o manejo do rejeito, acaba por gerar uma estrutura com comportamento geotécnico heterogêneo, assemelhando-se a uma colcha de retalhos de diferentes resistências. As camadas depositadas nos extremos climáticos tendem a não atingir o critério mínimo de projeto, **criando lentes subcompactadas que podem atuar como gatilhos para instabilidades futuras ou processos de liquefação caso venham a saturar por falhas no sistema de drenagem, principalmente se associadas a eventos extremos de chuvas.**

Assim, a premissa teórica de que a compactação eliminaria riscos de liquefação torna-se vulnerável a falhas operacionais sistêmicas impostas pelo clima, elevando significativamente o risco global das pilhas PDER M e da PDER C.

12.8 Conclusões

Além dos desafios operacionais, a decisão do EIA de descartar análises não drenadas baseando-se apenas no Grau de Compactação (GC) alvo é tecnicamente questionável. A variabilidade intrínseca de uma operação de grande escala impede a garantia de que 100% da estrutura seja imune à saturação e à liquefação. Adicionalmente, para a PDER M, a ausência de critérios de

transição (filtro) entre o rejeito e os 15 metros de estéril pode induzir processos de erosão interna na interface. Já para a PDER C, a exposição direta do rejeito arenoso filtrado às intempéries, sem envelope, representa um risco muito elevado de instabilidades superficiais e assoreamento dos sistemas de drenagem a jusante.

13 Pilhas – Uma Técnica que Também Apresenta Consideráveis Riscos

(Esse item constitui uma transcrição do item 9.1 da Nota Técnica FPSF-NT-06-2023):

O armazenamento de rejeitos com conteúdo de umidade natural, também denominado armazenamento “a seco” tornou-se uma tendência no setor mineral após o rompimento das barragens da Samarco em Mariana, em 2015, e da Vale em Brumadinho, em 2019. Nesse processo, os rejeitos gerados com os processos tradicionais são filtrados com maquinário avançado, reduzindo a umidade. A seguir, o rejeito é transportado para os locais de disposição, onde é empilhado e compactado sob condições previamente estabelecidas.

O armazenamento a seco tem sido, muitas vezes, divulgado como método seguro, que elimina os riscos das barragens, sem que sejam divulgados os riscos inerentes ao processo nem suas desvantagens. Entretanto, para a implantação de uma pilha é necessária a realização de uma série de estudos prévios, feitos por profissionais que reconhecidamente tenham experiência no assunto, bem como a adoção de técnicas e de cuidados específicos para a preparação, construção e manutenção das pilhas.

Alguns dos aspectos mais importantes relacionados ao processo estão resumidos de forma didática no seguinte texto:

Os rejeitos filtrados não são 'secos', mas são insaturados, de modo que a nomenclatura inicial referente a eles como seca é incorreta. A natureza do material de rejeitos é importante quando se considera a filtração. Não é apenas importante a gradação dos rejeitos, mas também a mineralogia. (...)

Determinar a maneira mais econômica de obter um produto filtrado consistente com os requisitos geomecânicos dos rejeitos pode ser um desafio. Os fabricantes de filtros são fundamentais para o dimensionamento, mas algum teste piloto é essencial, pois todo produto de rejeitos exibirá seu próprio comportamento de filtragem exclusivo. É importante prever mudanças mineralógicas e de moagem que possam ocorrer ao longo da vida do projeto.

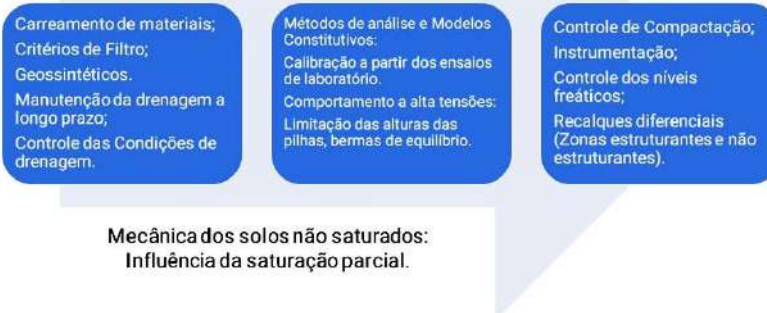
A caracterização do comportamento mecânico do rejeito a ser disposto na pilha deve ser avaliada quanto a trabalhabilidade, deformabilidade, resistência e permeabilidade. Assim, é muito importante a construção de aterros experimentais, ou seja, verificar o grau de compactação, a espessura da camada, condições de umidade e o número de passadas dos equipamentos de compactação. (...).

(...) As características de resistência, retenção de umidade e condutividade hidráulica dos rejeitos precisam ser estabelecidas para qualquer projeto, considerando a tecnologia. A relação de densidade e de umidade não saturada indicam a expectativa de densidade in situ, bem como a sensibilidade do grau de compactação disponível para qualquer conteúdo de umidade. O grau de saturação ideal de 60 a 80%. Os rejeitos filtrados podem ser colocados em um estado relativamente denso, podendo ser dispostos em encostas de vales e fundações pouco competentes.

A fundação deve ser consistente com os critérios aceitáveis de deformação (estática dinâmica). As condições topográficas são distintas as previstas em projetos de barragens de rejeito. Devemos evitar fluxos de água na direção da pilha. Devemos buscar posicionar a pilha de forma que as partículas não sejam carregadas por correntes de ar. Outro ponto importante é evitar a

colocação da pilha onde “cegar” as áreas de descarga de águas subterrâneas (a menos que um sistema de drenagem suficientemente robusto seja projetado, construído e mantido). (...)

Desafios na Concepção do Projeto



Nenhum corpo de minério é homogêneo. A operação (atividade antrópica) é muito variável. Resultado: As características do filtrado variam e, ocasionalmente, não atende ao conteúdo de umidade alvo. **Dificuldade: some ainda as variações climáticas.**

(...) Para o desenvolvimento do local para uma pilha seca normalmente carece da construção de sistemas de controle de águas superficiais e subterrâneas. Normalmente existem dois sistemas: (i) um sistema de coleta e desvio de água sem contato; (ii) um sistema de interceptação e coleta de águas superficiais de contato, águas subterrâneas impactadas e infiltração da pilha seca. O elemento de fechamento mais importante é um plano de gerenciamento de escoamento superficial garantido com “redundância”. Em todos os casos, é necessário um material de cobertura de fechamento para resistir à erosão do escoamento, evitar poeira e criar um meio de crescimento apropriado para a recuperação do projeto.

Em regiões de elevada pluviosidade ocorre grande dificuldade operacional e conseqüentemente o estabelecimento da freática no interior das pilhas. Em função da operação a taxa de produção de rejeitos pode ser elevada e da mesma forma a taxa de formação da pilha; com isso pode haver dificuldade na dissipação do excesso de poropressão. Os métodos de disposição influenciam aspectos como: grau de compactação, umidade e espessura de lançamento das camadas (compactação versus drenagem). Rejeitos em condições saturadas, com comportamentos contráteis e susceptíveis ao aumento da poropressão podem sofrer liquefação. (grifo nosso)

(...) Os rejeitos devem ser bem compactados a fim de garantir a estabilidade estática da pilha e evitar a liquefação. Apenas filtragem dos rejeitos não é satisfatória para evitar a liquefação, especialmente em regiões de climas tropicais. É fundamental fazer um controle de longo prazo de condições de construção, operação e drenagem.

(...) A ressaturação de rejeitos filtrados (adequadamente colocados e compactados) é extremamente difícil (subestimada). As valas de desvio de água devem ser adequadamente revestidas. A água escoada não deve permitir a erosão da superfície dos rejeitos. As especificações de compactação podem ser alcançadas se as camadas de rejeitos forem compactadas dentro de algumas horas após serem transportadas da planta. O local de armazenamento deve ser próximo à planta de filtragem.

Prof. Márcio Leão¹²

¹² Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/O-minimo-que-voce-precisa-saber-sobre-projetos-de-pilhas-de-rejeito-filtrado> Acesso em 09/09/2023

Um artigo técnico recente desse professor apresenta a seguinte conclusão¹³:

O empilhamento de rejeito seja único ou híbrido (estéril/rejeito) ainda é um processo que está em desenvolvimento, onde a teoria e prática caminham juntas com a experiência dos profissionais na área

A aplicação do QA/QC tem sido uma ferramenta extremamente útil no planejamento de projetos de engenharia, porém a implantação desses procedimentos necessita de um intenso entendimento dos processos envolvidos, bem como os mecanismos de controle para que esses procedimentos (QA) sejam garantidos e controlados (QC).

Evitar esses problemas e os riscos associados requer um compromisso com um planejamento rigoroso e a aplicação de práticas de ponta ao longo de todo o ciclo de vida da mina, incluindo a etapa pós-fechamento. (grifos nossos)

É necessário ressaltar que não apenas as pilhas de rejeitos, mas também as de estéreis, apresentam riscos consideráveis no caso de eventos extremos de precipitação e que existem, nas áreas de mineração do Estado de Minas Gerais, centenas – talvez milhares – de pilhas de estéreis cujos volumes, técnicas de disposição, estado de conservação etc. não são conhecidos.

14 Revisão Geral do Projeto de Longo Prazo e do EIA

O conjunto de documentos técnicos do Projeto de Longo Prazo da Samarco demonstra que o empreendimento submetido ao licenciamento ambiental foi desenvolvido predominantemente em nível de projeto conceitual.

No documento de Caracterização do Empreendimento e Aspectos Ambientais, há diversas referências explícitas a esse nível de maturidade técnica, indicando que os cálculos, arranjos geométricos, premissas de dimensionamento e soluções de engenharia foram adotados como base preliminar para avaliação ambiental e de viabilidade técnica, com previsão de refinamento posterior. O próprio texto registra expressamente que as pilhas e sistemas associados foram definidos em “projeto conceitual”, e que parâmetros essenciais deveriam ser confirmados em fases posteriores. Consta, por exemplo, que “foram adotados na elaboração do projeto conceitual da PDER M” determinados critérios normativos; que estudos e parâmetros derivam de “Relatório Técnico de Projeto Conceitual”; que, “no projeto básico, tais espessuras deverão ser confirmadas por meio de sondagens”; que “para implementação no projeto básico deverão ser executadas as sondagens e os ensaios de campo e laboratório”; e que análises mais avançadas, como modelagens tensão-deformação por elementos finitos, são recomendadas explicitamente “para o projeto básico”. Esse conjunto de trechos caracteriza de forma direta que o nível de definição de engenharia apresentado ao licenciamento não corresponde a projeto básico consolidado, mas a base conceitual sujeita a confirmação, complementação investigativa

¹³ Desafio na Concepção de Pilhas Híbridas na Mineração. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/362684485_Desafio_na_Concepcao_de_Pilhas_Hibridas_na_Minerao [Acesso em 09/09/2023].

“Cabe destacar que a ferramenta QA/QC por definição significa: combinação de um programa de garantia da qualidade de acordo com procedimentos através dos quais técnicos responsáveis possam atuar. O QA representa as ações planejadas e sistêmicas necessárias para fornecer confiança de que uma estrutura funcionará em conformidade com os requisitos satisfatoriamente. OQC representa os procedimentos específicos envolvidos em todos os processos de garantia da qualidade como, planejamento, coordenação, desenvolvimento, verificação, revisão e programação do trabalho. Ferramentas para assegurar que os processos estejam em controle e que a exatidão e precisão dos resultados sejam adequadas (James J. O’Brien P.E., 1989).”

e reengenharia de detalhamento. (Para mais informações sobre sondagens e preparação da base das pilhas, ver o **Anexo 4** ao presente documento).

Apesar disso, o Parecer Único FEAM-SEMAD que embasou a decisão administrativa conclui pelo deferimento do licenciamento concomitante (LAC1 – LP+LI+LO), registrando que a documentação apresentada foi considerada suficiente para a análise técnica no âmbito do processo.

O Parecer Único nº 35/FEAM/GST/2025 descreve o processo como instruído com EIA/RIMA e estudos complementares, registra que a análise técnica foi realizada sobre o conjunto de documentos protocolados e afirma, em trechos de conclusão e enquadramento, que o processo se encontrava formalmente instruído e apto à decisão, com base nos estudos ambientais apresentados.

O texto do Parecer enfatiza o atendimento aos requisitos documentais do procedimento e a suficiência dos elementos constantes dos autos para fins de deliberação. Em contrapartida, não há, no Parecer Único, exigência expressa de que o nível de engenharia apresentado corresponda a projeto básico completo, nem há caracterização técnica do empreendimento como estando suportado por projeto básico executivo consolidado; a referência é genérica aos estudos e projetos apresentados no EIA e anexos. Também não há, no Parecer, reclassificação do nível de maturidade do projeto como básico; o enquadramento permanece associado aos estudos ambientais protocolados.

Considerando, entretanto, o conteúdo técnico detalhado das análises críticas constantes na presente Nota Técnica FPSF-NT-13-2026 e o conteúdo da Nota Técnica FPSF-NT-12-2026, a realização das revisões metodológicas, hidrológicas, hidráulicas, geotécnicas, construtivas e normativas aqui apontadas e justificadas pode conduzir a uma **reformulação substancial do arranjo de engenharia atualmente proposto. Essa reformulação pode implicar um novo projeto conceitual** com características sensivelmente distintas do atual, incluindo, entre outros aspectos, possível redimensionamento das pilhas PDER M e PDER C, alteração de geometrias e alturas, modificação de critérios e tempos de retorno de drenagem, revisão completa dos sistemas de drenagem interna e superficial, redefinição de métodos construtivos e de compactação, mudança nas soluções de envelopamento e proteção superficial, revisão das áreas de apoio e de disposição de materiais escavados, reavaliação locacional de estruturas, alteração das formas de disposição e sequenciamento de rejeitos e estéreis, revisão de sistemas de transporte (como TCLD), bem como reanálise de interfaces com cursos d'água e estruturas de contenção de sedimentos. Mudanças desse porte caracterizam, tecnicamente, um novo arranjo de projeto, com potencial de alterar impactos, riscos e medidas de controle — situação que, em regra técnica de licenciamento, pode demandar novo ciclo de avaliação ambiental.

Diante desse quadro, **é tecnicamente necessário e recomendável que a revisão global seja realizada antes do avanço das obras de instalação e da operação**, com migração do nível de definição de engenharia de projeto conceitual para **projeto básico completo**, com investigações de campo suficientes, parâmetros confirmados, análises de sensibilidade, estudos de extremos, verificações independentes e detalhamento construtivo compatível com estruturas de alto dano potencial.

Um eventual novo EIA — ou revisão substancial do EIA existente — deveria então estar baseado em projeto básico robusto e fechado, aderente às normas técnicas brasileiras vigentes e às melhores práticas internacionais, incluindo os referenciais do Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), frameworks de disclosure climático e risco físico como ISSB/IFRS S2 e TCFD, diretrizes técnicas do ICMM, guias técnicos da ANCOLD e da Canadian Dam Association (CDA), entre outros referenciais de boa prática para estruturas de disposição de rejeitos e pilhas de grande porte e longa vida útil.

15 Referências Bibliográficas

ALVES, G. J.; MELLO, C. R.; LI GUO, THEBALDI, M. S. *Natural disaster in the mountainous region of Rio de Janeiro state, Brazil: Assessment of the daily rainfall erosivity as an early warning index. International Soil and Water Conservation Research*. Volume 10, Issue 4, December 2022, Pages 547-556. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095633922000107>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13029: Barragens de rejeitos e reservatórios de estéreis — Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (ANCOLD). *Guidelines on Tailings Dams – Planning, Design, Construction, Operation and Closure*. Melbourne: ANCOLD, 2019. Disponível em: <https://www.ancold.org.au/>. Acesso em: 26 mar. 2024.

BANCO MUNDIAL. *Safety First: Managing Tailings and Preventing Tragedies*. Washington, DC: World Bank Group, 2021. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/publication/safety-first-managing-tailings-and-preventing-tragedies>. Acesso em: 26 mar. 2024.

CANADIAN DAM ASSOCIATION (CDA). *Dam Safety Guidelines*. 2007. Disponível em: <https://www.cda.ca/>. Acesso em: 26 mar. 2024.

COMMISSION OF INQUIRY INTO THE COLLAPSE OF THE HERITAGE MINE TAILINGS DAM. *Report of the Commission of Inquiry into the collapse of the heritage mine tailings dam (Aberfan Disaster)*. Londres: HMSO, 1967.

GLOBAL TAILINGS REVIEW. *Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM)*. 2020. Disponível em: <https://globaltailingsreview.org/>. Acesso em: 26 mar. 2024.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). *Tailings Dam Design: Technology and Monitoring / Bulletin 45*. Paris: ICOLD, 2019.

MEND (MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE). *Design and Evaluation of Tailings Dams*. Canmet MINING, Natural Resources Canada, 2017. Disponível em: <https://mend-nedem.org/>. Acesso em: 26 mar. 2024.

MOUNT POLLEY INDEPENDENT EXPERT INVESTIGATION AND REVIEW PANEL. *Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach*. 2015. Disponível em: <https://www.mountpolleyreviewpanel.ca/>. Acesso em: 26 mar. 2024.

NORILSK NICKEL. *Internal Review Reports on Hillside Creek Incidents (1990s)*. (Documentos internos citados em literatura técnica secundária e relatórios do regulador).

PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DE ACIDENTES (PIA) - Agência Nacional de Mineração (ANM). *Relatórios de Análise de Incidentes*. Brasília: ANM. (Para casos brasileiros como Pau Branco).

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Mine Tailings Storage: Safety is No Accident*. 2017. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/mine-tailings-storage-safety-no-accident>. Acesso em: 26 mar. 2024.

WISE URANIUM PROJECT. *Tailings Dam Failures and Incidents*. Disponível em: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Acesso em: 26 mar. 2024. (Fonte para compilação de casos históricos globais).

Observação: As informações específicas sobre casos como Pau Branco, Aberfan e detalhes operacionais de minas no Chile/Canadá foram extraídas de relatórios de órgãos ambientais,



literatura de conferências técnicas (ex.: Tailings and Mine Waste) e bancos de dados consolidados como o WISE Uranium Project, que agrega fontes primárias de investigações governamentais e relatórios técnicos.

Belo Horizonte, 1º de fevereiro de 2026

Euler de Carvalho Cruz
Engenheiro – CREA/MG nº 18.738

Júlio Cesar Dutra Grillo
Engenheiro – CREA/MG nº 15.133

ANEXO 1 - NÃO CONFORMIDADE DO PROJETO PDER M E PDER C COM A ABNT NBR 13028-3:2025 QUANTO À AVALIAÇÃO DE RISCO DE LIQUEFAÇÃO E COMPORTAMENTO STRAIN-SOFTENING

1. OBJETO

Análise da conformidade do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de 2022 e do projeto conceitual das Pilhas de Disposição de Rejeitos (PDER) M e C, frente aos requisitos técnico-normativos da ABNT NBR 13028-3:2025, com foco na caracterização do material, avaliação de estabilidade em empilhamentos drenados e gestão de riscos geotécnicos.

2. FUNDAMENTAÇÃO NORMATIVA

A ABNT NBR 13028-3:2025 estabelece os requisitos para elaboração e apresentação de projeto de pilhas de rejeito desaguado, incluindo:

- Item 5.6.5 e Tabela 1: Exigência de análise de estabilidade para a "Condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual" para materiais com comportamento *strain-softening* ("amolecimento por deformação" – alto índice de fragilidade), com Fator de Segurança mínimo de 1,1.
- Anexo A: Exigência de análises específicas quanto à suscetibilidade à liquefação (estática e cíclica).
- Ressalta-se que a norma não condiciona a exigência dessas análises à comprovação prévia de existência dos fenômenos, mas impõe sua avaliação técnica explícita sempre que houver plausibilidade geotécnica.
- Item 5.5: Exigência de caracterização geotécnica contínua dos rejeitos, abrangendo todo o ciclo de vida da estrutura.

3. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E PREMISSAS DO PROJETO

Conforme o EIA, o material a ser disposto é um rejeito arenoso filtrado, de granulometria muito fina (faixa de 0,001 a 0,4 mm). A premissa central de segurança adotada é que a compactação do material a graus superiores a 97% do Proctor Modificado eliminaria o risco de liquefação, permitindo análises de estabilidade apenas em condições drenadas e com parâmetros de resistência de pico.

Ainda que elevados graus de compactação reduzam a suscetibilidade à liquefação, a literatura técnica e a própria norma não admitem que a compactação, isoladamente, elimine a necessidade de avaliação do comportamento não drenado e pós-pico.

Enfatiza-se a necessidade de elaboração de estudos exaustivos e uso de amplos fatores de segurança devido às incertezas nos cálculos, lacunas no conhecimento dos fenômenos envolvidos, principalmente tendo-se em conta os impactos socioambientais e econômicos das rupturas de Fundão e Córrego do Feijão. Entre 2020 e 2025, avanços substanciais foram alcançados em testes experimentais, caracterização *in situ*, modelagem numérica e interpretação de casos históricos, porém ainda persistem grandes lacunas de conhecimento, conforme artigo importante, publicado em 29/11/2025, de Pereira, A. C., da UFMG (ver Ref. Bibl.).

4. IDENTIFICAÇÃO DAS NÃO CONFORMIDADES

Caracterização Geotécnica Incompleta e Premissa Frágil

- Falta de Ensaio para Comportamento Pós-Pico: O EIA não apresenta ensaios (ex. cisalhamento direto com grandes deformações, triaxial não drenado) para determinar o comportamento de “amolecimento por deformação” (*strain-softening*) e a resistência residual do rejeito. Materiais finos e uniformes, como o descrito, são classicamente suscetíveis a uma significativa perda de resistência após o pico (alto índice de fragilidade), especialmente em condições não drenadas.
- Cabe destacar que **comportamento *strain-softening* e liquefação são mecanismos distintos de perda de resistência, ambos explicitamente contemplados pela norma e igualmente não avaliados no EIA.**

Inviabilidade Prática da Premissa de Compactação:

a) Compactação nas Bordas: Nas proximidades dos taludes, principalmente na PDER C (sem envelopamento de estéril), a compactação é extremamente difícil de ser executada. A obtenção do grau de 97% de compactação de forma homogênea e controlada nestas zonas críticas é improvável na prática operacional.

b) Restrição por Condições Climáticas: O próprio projeto reconhece a impossibilidade de compactação em períodos chuvosos. A umidade elevada altera fundamentalmente as características de compactação e a curva de retenção de água do solo, podendo resultar em camadas com grau de saturação mais alto, densidade mais baixa e comportamento geotécnico totalmente distinto do projetado. Isso invalida a premissa de um material uniformemente compactado e drenado.

A ABNT NBR 13028-3:2025 não admite que a segurança estrutural seja fundamentada exclusivamente em premissas construtivas cuja verificação contínua seja inviável ou altamente incerta.

Omissão de Análises de Estabilidade Críticas

- Ausência de Análise para Condição Pós-Pico/Residual: A norma é explícita ao exigir esta análise para materiais *strain-softening*. Como não foi comprovado que o rejeito não possui este comportamento, a análise é mandatória. O EIA não realizou qualquer avaliação de estabilidade utilizando parâmetros de resistência residual, descumprindo a Tabela 1 da norma.
- Ausência de Análise de Liquefação Cíclica/Estática: A exclusão de análises não drenadas com base apenas na premissa de compactação é tecnicamente insustentável. A ABNT NBR 13028-3:2025 (Anexo A) exige avaliação de suscetibilidade à liquefação, que não foi realizada.

Trata-se, portanto, não de uma divergência interpretativa, mas de descumprimento direto de exigências normativas expressas.

5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A NATUREZA NÃO INOVADORA DAS EXIGÊNCIAS DA ABNT NBR 13028-3:2025

Ressalta-se que, embora o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do Projeto de Longo Prazo tenha sido concluído em agosto de 2022, portanto anteriormente à publicação da ABNT NBR 13028-3:2025 (dezembro de 2025), as exigências nela consolidadas não configuram inovação técnica no campo da engenharia geotécnica aplicada a pilhas de rejeitos. Ao contrário, a norma representa o reconhecimento formal, a sistematização e a padronização de práticas, métodos e critérios de segurança amplamente conhecidos e utilizados no meio técnico nacional e internacional há muitos anos, em diversos casos há décadas.

A avaliação de comportamento pós-pico (*strain-softening*), a consideração de resistência residual em análises de estabilidade, a investigação de suscetibilidade à liquefação estática e

cíclica, o uso de ensaios geotécnicos avançados e a adoção de análises não drenadas para cenários críticos já constituíam, à época da elaboração do EIA, práticas consagradas na literatura técnica, em diretrizes internacionais de segurança de barragens e em projetos de referência para estruturas de contenção de rejeitos de grande porte. A ABNT NBR 13028-3:2025 apenas consolida essas práticas em um texto normativo unificado, eliminando ambiguidades e reduzindo margens de interpretação que historicamente contribuíram para falhas de projeto.

Nesse sentido, nada impediria que os estudos apresentados no EIA de 2022 já tivessem incorporado, de forma voluntária e tecnicamente responsável, os ensaios, verificações e análises hoje explicitamente exigidos pela norma, especialmente considerando as características do empreendimento em questão. As PDER M e PDER C possuem volumes expressivos de rejeitos, alturas elevadas, elevada energia potencial armazenada e estão implantadas em área sensível, tanto do ponto de vista ambiental quanto social, situando-se:

- em proximidade imediata de comunidades;
- junto ao rio Gualaxo do Norte, curso d'água de elevada relevância ambiental e histórica;
- no interior do Complexo Germano, local marcado pelo rompimento da barragem de Fundão, em 2015, um dos maiores desastres tecnológicos do setor mineral no mundo.

Além disso, **já em 2022 havia amplo reconhecimento científico e técnico de que o regime hidrológico e climático estava em processo de intensificação,** com aumento da frequência e severidade de eventos extremos de precipitação, condição que **agrava significativamente os riscos** associados à saturação localizada, ao comportamento não drenado e à mobilização de resistência residual em materiais finos e uniformes, como os rejeitos descritos no EIA.

Embora o EIA apresente um conjunto de ensaios geotécnicos clássicos, incluindo ensaios de compactação, caracterização física, adensamento e ensaios triaxiais drenados e não drenados, tais investigações são adequadas exclusivamente à determinação de parâmetros de resistência de pico e à caracterização geotécnica básica do rejeito.

Os ensaios realizados, conforme apresentados entre os itens 7.5.3.1.6.2 e a Inserção 7-128, não permitem a caracterização do comportamento pós-pico do material, não determinam a resistência residual nem avaliam formalmente a possibilidade de comportamento *strain-softening*, instabilidade progressiva ou suscetibilidade à liquefação estática ou cíclica. A interpretação dos resultados limita-se à ruptura no pico da tensão desviadora ou da obliquidade máxima, sem condução de ensaios com grandes deformações, sem identificação de perda de resistência após o pico e sem diferenciação entre parâmetros de pico e residuais.

Dessa forma, o conteúdo apresentado não demonstra que o rejeito seja não suscetível a *strain-softening*, tampouco comprova que a resistência pós-pico seja irrelevante para a estabilidade das pilhas. Igualmente, não sustenta tecnicamente a dispensa de análises residuais nem valida a premissa de que a compactação, mesmo quando especificada a elevados graus, seja suficiente para eliminar os riscos associados à perda súbita de resistência, saturação localizada ou mobilização de mecanismos de ruptura não drenados, especialmente considerando a escala, a altura, o contexto construtivo e a sensibilidade do entorno das PDER M e PDER C.

Diante desse contexto, a adoção de uma abordagem de projeto limitada a condições drenadas, com parâmetros de resistência de pico e baseada em premissas construtivas idealizadas, não refletiu o estado da arte disponível à época, tampouco o princípio da precaução exigível para estruturas dessa magnitude e localização. A publicação posterior da ABNT NBR 13028-3:2025 não cria uma obrigação retroativa arbitrária, mas explicita de forma normativa aquilo que já era tecnicamente recomendável e esperado para projetos de pilhas de rejeitos de alto potencial de impacto.

Assim, a não conformidade identificada não deve ser interpretada como mera desatualização formal frente a uma norma superveniente, mas como a ausência, no EIA, de análises e

verificações que já integravam o corpo de conhecimentos técnicos disponíveis e aplicáveis no momento de sua elaboração.

À luz da segurança estrutural, da experiência acumulada do setor e das lições aprendidas com eventos passados, torna-se inequívoco que a revisão do projeto à luz da ABNT NBR 13028-3:2025 constitui não apenas uma exigência normativa atual, mas uma necessidade técnica, ética e preventiva, indispensável para assegurar que as PDER M e PDER C atendam a padrões adequados de segurança e não reproduzam vulnerabilidades já amplamente reconhecidas no setor mineral.

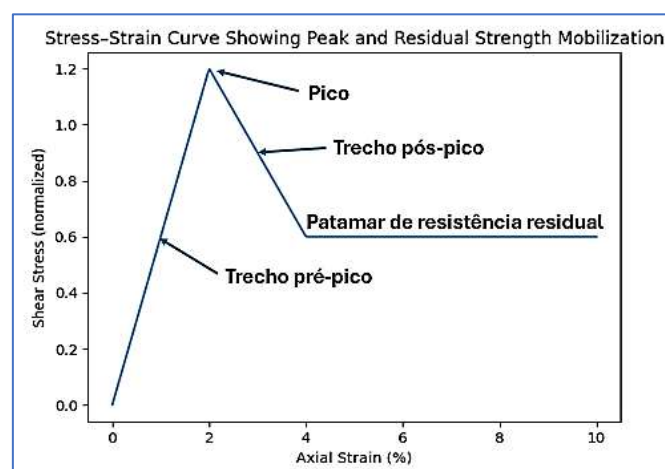
6. CONDIÇÃO DE MOBILIZAÇÃO DE RESISTÊNCIA PÓS-PICO OU RESIDUAL

A condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual corresponde à situação em que o material já ultrapassou o ponto de resistência máxima (pico) e passa a se deformar com redução progressiva da resistência ao cisalhamento, até atingir um valor mínimo estável, denominado resistência residual.

Ou seja, trata-se do comportamento do material após o início da ruptura, quando o equilíbrio não depende mais da resistência máxima do solo ou rejeito, a estrutura passa a ser sustentada apenas pela resistência remanescente do material e deformações significativas já ocorreram ou estão em curso.

- **Resistência de pico:** É a maior resistência ao cisalhamento que o material pode mobilizar, normalmente associada a pequenas deformações e a um estado estrutural ainda intacto.
- **Resistência pós-pico:** É a resistência mobilizada logo após a superação do pico, quando ocorre reorganização da estrutura do material, quebra de contatos entre partículas, aumento de poropressões ou redução de tensões efetivas.
- **Resistência residual:** É o valor mínimo de resistência que o material mantém após grandes deformações, quando sua estrutura interna já está totalmente rearranjada. Esse valor controla a estabilidade em rupturas progressivas ou movimentos lentos e contínuos.

A seguir é apresentado um gráfico esquemático, conceitual, preparado pelos autores do presente documento, que mostra o comportamento típico observado em ensaios triaxiais drenados e não drenados e ensaios de cisalhamento direto com grandes deformações descritos em estudos clássicos e recentes sobre rejeitos de mineração. O Gráfico mostra o trecho pré-pico (mobilização progressiva da resistência), a resistência de pico, queda de resistência pós-pico (*strain-softening*) e o patamar de resistência residual.



O gráfico representa, conceitualmente, o comportamento de um rejeito granular fino ou arenoso relativamente denso, no qual a resistência cresce até um pico bem definido, ocorre redução progressiva da resistência após o pico e, finalmente, o material atinge uma resistência residual

constante, que governa a estabilidade em grandes deformações. Esse comportamento é típico de materiais *strain-softening*, nos quais análises baseadas apenas em resistência de pico são não conservadoras.

Esse tipo de resposta está associado a ruptura progressiva, **sendo crítico em pilhas altas e extensas**, especialmente quando há saturação localizada ou carregamentos dinâmicos.

Em materiais com “amolecimento por deformação” (*strain-softening* - que perdem resistência com a deformação), como rejeitos finos e relativamente uniformes:

- a resistência de pico pode ser significativamente maior que a resistência residual;
- uma pequena perturbação (chuva intensa, saturação localizada, sismo, falha construtiva) pode levar o material rapidamente do pico ao pós-pico;
- a estabilidade passa a ser controlada pela resistência residual, e não mais pela resistência inicialmente considerada no projeto.

Por isso, analisar apenas a condição de pico não garante segurança em estruturas de grande porte. Quando a norma ABNT NBR 13028-3:2025 exige a verificação da condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual, ela está determinando que o projetista assuma cenários de degradação de resistência, avalie se a estrutura permanece estável mesmo após a perda da resistência máxima e demonstre que não haverá ruptura progressiva ou colapso caso o material entre em regime pós-pico. Essa exigência reconhece que falhas reais raramente ocorrem no pico, mas sim após a perda de resistência, quando o sistema já está fragilizado.

Em síntese, a condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual é o cenário em que a estabilidade da estrutura é avaliada considerando que o material já perdeu sua resistência máxima e está se deformando com resistência reduzida, sendo essa a condição mais crítica e realista para análise de segurança em estruturas de rejeitos.

7. RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS, DRENAGEM E ALTURA DA PILHA

A determinação da altura máxima de uma pilha de rejeitos filtrados não é definida por um valor único, mas resulta de um processo iterativo de projeto que harmoniza a geometria do talude, as propriedades geotécnicas do material e as condições hidráulicas do sítio.

Em condições drenadas de longo prazo, utilizando parâmetros de pico do rejeito como um ângulo de atrito efetivo (ϕ' pico) de aproximadamente 35° e coesão nula (conforme consta do EIA), a estabilidade de um talude homogêneo é mais sensível à sua inclinação do que à sua altura absoluta. **Para taludes com inclinação típica, como 1V:2H, análises de estabilidade preliminares estimam que alturas na ordem de 100 a 120 metros podem ser viáveis, mantendo fatores de segurança adequados.**

No entanto, os verdadeiros fatores limitantes são as condições não drenadas ou parcialmente drenadas, que governam os riscos críticos de liquefação e de propagação de rupturas progressivas associadas ao comportamento de amolecimento por deformação (*strain-softening*) do material. A **resistência residual pós-pico (ϕ' res), cujo valor foi omitido no EIA**, é um parâmetro essencial para quantificar esses riscos e, conseqüentemente, para definir com segurança a altura admissível.

A segurança final da estrutura depende fundamentalmente da capacidade do sistema de drenagem de controlar as poropressões durante **eventos climáticos extremos** e da definição de um ritmo construtivo que não ultrapasse a resistência não drenada do material. Portanto, a confirmação segura de uma altura específica está condicionada à obtenção do parâmetro residual, à realização de análises de estabilidade acopladas hidro-geomecânicas e de liquefação, e ao dimensionamento robusto dos sistemas de drenagem e controle construtivo.

8. RISCOS SÍSMICOS INDUZIDOS, CONTEXTO GEOTECTÔNICO LOCAL E INSUFICIÊNCIA DAS ANÁLISES APRESENTADAS

A estabilidade das estruturas de disposição de rejeitos no Complexo Germano deve considerar, além dos parâmetros do material e das cargas estáticas, a possibilidade de carregamentos cíclicos decorrentes de atividade sísmica. Este risco apresenta duas fontes potenciais inter-relacionadas: a sismicidade natural regional e a sismicidade induzida por mineração.

A região do Quadrilátero Aquífero Ferrífero, onde se inserem os municípios de Mariana, Ouro Preto e Catas Altas, está situada em um contexto geotectônico estável no interior da placa Sul-Americana, com baixa ocorrência histórica de sismos naturais de grande magnitude. No entanto, registros instrumentais e históricos indicam uma sismicidade de baixa a moderada magnitude, frequentemente associada a falhas geológicas pré-existentes reativadas por tensões crustais.

Mais relevante para o projeto em análise é o fenômeno dos sismos induzidos por mineração. Estes são eventos sísmicos, ou tremores, desencadeados pelas alterações no campo de tensões geostáticas provocadas pela atividade de mineração, principalmente através da extração de volume massivo de rocha (formação de cavas e pilares), do rebaixamento do lençol freático e da carga imposta por grandes estruturas, como pilhas e barragens de rejeitos. A redistribuição de cargas no maciço rochoso pode levar à reativação súbita de falhas ou fraturas, liberando energia na forma de ondas sísmicas.

O histórico do próprio Complexo Germano oferece um precedente de extrema gravidade. O rompimento da Barragem do Fundão em 5 de novembro de 2015 foi precedido, na tarde do mesmo dia, por um evento sísmico de baixa magnitude registrado na região. Investigações técnicas e periciais subsequentes, incluindo laudos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e estudos acadêmicos, apontaram que a combinação da saturação do rejeito, sua natureza propensa à liquefação e o carregamento cíclico imposto pelo sismo (mesmo de pequena magnitude) foi um fator catalisador decisivo para o colapso da estrutura. Este evento demonstra, de forma trágica, a vulnerabilidade de estruturas de contenção de rejeitos a carregamentos sísmicos na região, mesmo aqueles de magnitude moderada.

No contexto de mineração a céu aberto, a própria formação de grandes cavas gera uma significativa redistribuição de tensões no maciço. O avanço planejado das cavas de Alegria Norte e Sul durante a operação do Complexo Germano constitui uma fonte potencial de geração de sismicidade induzida. A combinação desta fonte geradora com a presença das massivas pilhas PDER M e PDER C – estruturas cujo material constituinte é suscetível à liquefação e ao *strain-softening* – cria um cenário de risco sinérgico e elevado.

Diante deste contexto, a abordagem adotada no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) para avaliar a estabilidade sísmica das pilhas revela-se insuficiente e não conforme com as melhores práticas técnicas e normativas atuais. As análises apresentadas nos itens referentes às PDERs (7.5.3.1.1.11, 7.5.3.1.3.4 e seus equivalentes para a PDER C) limitam-se à aplicação do método pseudo-estático. Este método simplificado representa a ação sísmica por meio de um coeficiente de aceleração horizontal aplicado estaticamente ao peso do maciço, gerando forças inerciais equivalentes. Embora útil para uma avaliação preliminar do equilíbrio global, a análise pseudo-estática possui limitações fundamentais: ela não modela o movimento real do terreno no tempo, não avalia a geração e dissipação dinâmica de poropressões, não considera a degradação cíclica da resistência do solo e é incapaz de analisar fenômenos complexos como a liquefação e a propagação de rupturas progressivas associadas ao *strain-softening*.

Conforme estabelecido pela norma técnica específica ABNT NBR 13028-3:2025, a análise pseudo-estática não substitui, mas complementa, as análises de estabilidade estática (condição normal de operação, sem sismo) e as análises que consideram a mobilização da resistência

residual pós-pico. A norma exige uma hierarquia clara de verificações, onde a condição estática é fundamental e obrigatória, servindo de base para as demais. O EIA do Projeto de Longo Prazo, no entanto, omite a apresentação dos fatores de segurança para a condição estática pura e, de forma mais crítica, não realiza qualquer análise considerando a mobilização da resistência residual do material, informação essencial para avaliar a segurança contra rupturas progressivas. Portanto, o estudo não atende aos requisitos técnicos mínimos para a avaliação integral da segurança das estruturas frente aos mecanismos de ruptura mais plausíveis no contexto local.

Dada esta constatação, a premissa de projeto que se apoia apenas em análises pseudo-estáticas é tecnicamente indefensável. As análises de estabilidade das PDERs devem, obrigatoriamente, ser expandidas para incluir: (i) análises estáticas detalhadas com parâmetros de pico e residuais; (ii) análises dinâmicas avançadas (análises de resposta sísmica e deformação permanente) que simulem a propagação das ondas sísmicas no maciço e sua interação com o rejeito susceptível; e (iii) análises específicas de liquefação sísmica. Os parâmetros de aceleração sísmica de projeto devem ser definidos considerando tanto a sismicidade regional natural quanto um espectro de sismicidade induzida plausível, baseado em modelagens geomecânicas dos avanços de lavra e no histórico de monitoramento sísmico local.

Alternativamente, em uma abordagem de precaução extrema justificada pelo histórico local e pelas incertezas analíticas, deve-se considerar seriamente a relocação das pilhas para o interior de cavas já existentes ou em formação. Esta estratégia, conhecida como disposição em cava, reduz drasticamente a altura e o volume expostos das estruturas de rejeitos, diminuindo a energia potencial gravitacional, o momento de inércia suscetível à ação sísmica e o volume de material passível de liquefação. Além disso, confina o rejeito em um receptáculo geológico naturalmente mais estável, mitigando as consequências de uma eventual liquefação ou deformação. A opção pela disposição em cava, já prevista para as lamas no projeto (Cava Alegria Sul 2), representaria uma internalização do risco e um alinhamento com o princípio da precaução mais elevado, especialmente pertinente em um local com o histórico traumático do Complexo Germano.

A reavaliação da localização, geometria e dos métodos de análise das PDER's à luz do risco sísmico induzido e das deficiências analíticas identificadas não é uma mera recomendação técnica, mas uma medida de segurança imperativa.

9. CONCLUSÃO E IMPLICAÇÕES DE RISCO

O projeto das PDER M e PDER C, na forma apresentada no EIA de 2022, apresenta não conformidade grave com a ABNT NBR 13028-3:2025, conforme a tabela 1 da norma:

Avaliação de estabilidade	Fator de segurança mínimo
Ruptura de talude – Condição estática ^a	1,5
Ruptura de talude – Condição sísmica ^b	1,1
Ruptura de talude – Condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual ^c	1,1

^a Admite-se o Fator de Segurança mínimo de 1,30 para pilhas em condições de geometria temporária, distinto do Fator de Segurança de Projeto, desde que não exista potencial de mobilização de material para fora da área de abrangência direta da pilha. Análises relativas à liquefação são discutidas no Anexo A.

^b O método de análise sísmica deve ser selecionado a critério e julgamento de engenharia apropriado pelo responsável da análise, sendo esse fator de segurança sugerido baseado na análise de Equilíbrio-Limite. Caso sejam utilizadas análises T-D, por exemplo, os critérios admissíveis devem ser definidos pelo responsável pela análise.

^c Aplicável apenas a materiais com comportamento *strain-softening* (alto índice de fragilidade)

A premissa de eliminação do risco geotécnico via compactação é invalidada por três fatores:

1. Natureza do Material: Rejeito fino e uniforme, suscetível a comportamento *strain-softening* e liquefação.
2. Inviabilidade Construtiva: Dificuldade extrema de atingir e manter a compactação especificada nas bordas e sob condições climáticas reais.
3. Omissão Analítica: Falta completa das análises de estabilidade para condições pós-pico/residual e de liquefação, exigidas pela norma.

A persistência nesta premissa sem os devidos estudos comprobatórios coloca a estrutura em risco potencial de ruptura progressiva ou colapso, já que um cenário de saturação localizada ou carregamento não previsto poderia mobilizar a resistência residual do material, com fatores de segurança inferiores aos mínimos normativos.

Em estruturas de grande porte, a mobilização localizada de resistência residual pode evoluir para mecanismos de ruptura progressiva, mesmo sem colapso global instantâneo.

Para garantir a segurança da estrutura, é imprescindível que o empreendedor tivesse apresentado, como condicionante prévia à emissão de licença de instalação ou construção:

1. Campanha de Ensaios Específicos: Realização de ensaios geotécnicos avançados para caracterizar o comportamento *strain-softening* e determinar os parâmetros de resistência residual e pico do rejeito sob diferentes graus de saturação e compactação.
2. Análises de Estabilidade Complementares: Execução de análises de estabilidade (métodos de equilíbrio limite e, preferencialmente, análises tensão-deformação) considerando:
 - a) Condição Pós-Pico/Residual ($FS \geq 1.1$).
 - b) Condição Não Drenada (considerando a possibilidade de saturação).
 - c) Análise de Liquefação estática e cíclica, conforme Anexo A da norma ABNT NBR 13028-3:2025.
3. Revisão do Projeto Construtivo: Reavaliação das especificações de compactação, considerando sua viabilidade prática nas bordas e sob regime climático real, e proposição de medidas compensatórias (e.g., geometria diferente, inclusão de drenos internos, zoneamento de materiais).

Sem a apresentação e aprovação destes complementos, o projeto não atende ao estado da arte técnica nem aos requisitos normativos vigentes, constituindo um risco inaceitável.

Esses estudos não configuram aprimoramento de projeto, mas requisitos mínimos de segurança que deveriam ter antecedido qualquer decisão de licenciamento ou implantação.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pereira, A. C. (2025). *Static Liquefaction in Tailings and Fine Ores (2020–2025): Mechanisms, Assessment Methods, Modeling, and Management Guidelines*. Engenharias, Volume 29 - Edição 152/NOV 2025 / 29/11/2025 Registro DOI: 0.69849/revistaft/ni10202511292312. https://revistaft.com.br/static-liquefaction-in-tailings-and-fine-ores-2020-2025-mechanisms-assessment-methods-modeling-and-management-guidelines/?utm_source
2. Urbina, F., Reid, D. & Fourie, A. (2023). *Strain Softening response of loose unsaturated tailings samples in undrained triaxial tests*. E3S Web of Conferences, 382:16009. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/19/e3sconf_unsat2023_16009/e3sconf_unsat2023_16009.html

3. Hoch, B. Z., Araújo, M. T. de, Festugato, L., Consoli, N. C. & Reddy, K. R. (2025). *Mechanical and Microstructural Behavior of Mine Gold Tailings Stabilized with Non-Conventional Binders*. Minerals, 15(9), 995. https://www.mdpi.com/2075-163X/15/9/995?utm_source
4. Coelho, P. et al. (2024). *The Experimental Characterization of Iron Ore Tailings*. Applied Sciences, 14(12), 5033. https://www.mdpi.com/2076-3417/14/12/5033?utm_source
5. Carrizo, L. G., Tasso, N. & Rivarola, F. L. (2024). *The influence of slope inclination and post-peak strengths on triggering of flow liquefaction of upstream tailings dams*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/385941476_The_influence_of_slope_inclination_and_post-peak_strengths_on_the_triggering_of_flow_liquefaction_of_upstream_tailings_dams
6. *Comparative evaluation of constitutive models for stress-strain analysis of an iron ore tailings from the Quadrilátero Ferrífero*, Soil & Rocks, 47(1), 2024. <https://www.scielo.br/j/soiroc/a/hcHb8DJQyx8N6xr4HtMcYzz/?format=html&lang=en>
7. *Susceptibility to Liquefaction of Iron Ore Tailings in Upstream Dams Considering Drainage Conditions*, Applied Sciences, 14(14), 6129. https://www.mdpi.com/2076-3417/14/14/6129?utm_source

ANEXO 2 - NÃO CONFORMIDADE DO PROJETO PDER M E PDER C COM A ABNT NBR 13028-3:2025 QUANTO ÀS ANÁLISES DE ESTABILIDADE ESTÁTICA E À VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO PÓS-PICO/RESIDUAL (TABELA 1 DA NORMA)

1. OBJETO

Análise da conformidade do Estudo de Impacto Ambiental (EIA), concluído em 2022, e do projeto conceitual das Pilhas de Disposição de Rejeitos (PDER) M e C, frente aos requisitos técnico-normativos da ABNT NBR 13028-3:2025, com foco específico na obrigatoriedade das análises de estabilidade em condição estática e na verificação da condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual, conforme estabelecido na Tabela 1 da norma, e sua adequação à gestão de riscos geotécnicos ao longo do ciclo de vida das estruturas.

2. FUNDAMENTAÇÃO NORMATIVA

A ABNT NBR 13028-3:2025 estabelece critérios objetivos e hierarquizados para a avaliação da estabilidade de pilhas de rejeitos desaguados, reconhecendo que a segurança dessas estruturas deve ser demonstrada por meio de diferentes condições de carregamento e estados de resistência do material. Nesse contexto, destacam-se os seguintes dispositivos normativos:

- Item 5.6.5 e Tabela 1: Estabelecem a obrigatoriedade da análise de estabilidade em condição estática, entendida como a condição normal de operação da pilha, com definição de fatores de segurança mínimos, inclusive para a condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual, quando aplicável.
- Tabela 1: Distingue explicitamente as condições de análise (estática, sísmica e pós-pico/residual), deixando claro que a análise pseudo-estática não substitui a análise estática, mas a complementa.
- Item 5.6 (Avaliação da Segurança): Reforça que a estabilidade deve ser demonstrada de forma consistente com os mecanismos de ruptura plausíveis, considerando o comportamento real dos materiais e as condições operacionais previsíveis.
- Item 5.5: Requer que as análises de estabilidade sejam coerentes com a caracterização geotécnica dos rejeitos ao longo de todo o ciclo de vida da estrutura, assegurando compatibilidade entre parâmetros adotados e cenários de verificação.

A norma estabelece uma hierarquia clara de verificações, onde a análise da condição estática (normal de operação) é fundamental e obrigatória, servindo de referência para as demais análises (sísmica, pós-pico), que são complementares e não substitutivas.

Ressalta-se que a norma não admite a substituição da análise estática por análises pseudo-estáticas, nem condiciona a realização da análise estática à inexistência de ações sísmicas, uma vez que ambas tratam de condições físicas distintas e complementares.

3. ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE PILHAS DE REJEITOS

A análise de estabilidade de pilhas de rejeitos pode ser conduzida por diferentes abordagens, sendo fundamental distinguir, do ponto de vista técnico e normativo, a análise estática da análise pseudo-estática.

A **análise estática** de estabilidade avalia o comportamento da estrutura sem a consideração de ações sísmicas, contemplando apenas as cargas permanentes e variáveis usuais, tais como o peso próprio do maciço, a geometria da pilha, as condições de drenagem e os níveis d'água, bem como os parâmetros de resistência do material, sejam eles de pico ou residuais. Essa análise representa a condição normal de operação da estrutura e constitui a base para a verificação da segurança frente a mecanismos de instabilidade progressiva, comportamento *strain-softening* e mobilização de resistência pós-pico ou residual. Por essa razão, a Tabela 1 da ABNT NBR 13028-3:2025 estabelece explicitamente fatores de segurança mínimos para a condição estática, inclusive para a condição pós-pico ou residual, quando aplicável.

A **análise pseudo-estática**, por sua vez, consiste em uma extensão simplificada da análise estática, na qual os efeitos da ação sísmica são representados pela aplicação de um coeficiente de aceleração horizontal — e, eventualmente, vertical — multiplicado pelo peso do maciço, gerando forças inerciais equivalentes. Trata-se de uma abordagem que não modela o movimento real do terreno no tempo, não avalia a geração de poropressões nem a degradação cíclica da resistência do material, sendo adequada apenas para a verificação do equilíbrio global da estrutura sob uma representação simplificada da ação sísmica. **Em razão dessas limitações, a análise pseudo-estática não substitui as análises de resistência residual, de comportamento *strain-softening* ou de liquefação, seja em condição estática ou cíclica.**

Portanto, como já pontuado, a realização de uma análise pseudo-estática **não atende, por si só, ao requisito de análise da condição estática** estabelecido na Tabela 1 da norma, sendo necessária a execução de ambas as verificações de forma **distinta e complementar**.

4. ANÁLISES DE ESTABILIDADE DAS PILHAS PDER M E PDER C

Para pilhas de rejeitos arenosos filtrados e de grande porte, como as PDER M e PDER C, a prática técnica consolidada — e atualmente explicitada pela ABNT NBR 13028-3:2025 — exige uma abordagem hierarquizada e complementar. Esta abordagem deve incluir análises estáticas com parâmetros de resistência de pico, análises estáticas considerando parâmetros pós-pico ou residuais quando houver possibilidade de comportamento *strain-softening*, análises pseudo-estáticas para avaliação do efeito global das ações sísmicas e, quando aplicável, análises específicas de suscetibilidade à liquefação. Nesse contexto, a análise pseudo-estática, quando utilizada de forma isolada, é tecnicamente insuficiente para a avaliação integral da segurança.

A leitura detalhada dos itens do EIA referentes às PDER M (7.5.3.1.1.11, 7.5.3.1.3.4 e 7.5.3.1.3.4.1) e PDER C (7.5.4.1.1.11, 7.5.4.1.3.4 e 7.5.4.1.3.4.1) evidencia um quadro analítico incompleto. Os textos metodológicos, tabelas de resultados e títulos das inserções indicam de forma consistente que os fatores de segurança apresentados derivam exclusivamente da aplicação de um coeficiente sísmico horizontal em análises de equilíbrio limite, caracterizando a condição pseudo-estática.

Não são apresentados, contudo, os fatores de segurança para a condição estática pura (sem ação sísmica), que constitui a verificação primária de segurança. Da mesma forma, ausentam-se por completo as análises que consideram a mobilização da resistência pós-pico ou residual, conforme exigido pela norma para materiais potencialmente *strain-softening*, como é o caso do rejeito fino em questão. O escopo das verificações restringe-se à análise pseudo-estática, realizada apenas com parâmetros de resistência de pico.

Conclui-se, portanto, que o EIA não atende aos requisitos da ABNT NBR 13028-3:2025, que estabelece fatores de segurança mínimos específicos e obrigatórios para a condição estática, inclusive para a mobilização de resistência pós-pico ou residual.

Esta omissão é particularmente crítica, pois impede a avaliação do comportamento da estrutura em sua condição operacional fundamental e não permite quantificar sua segurança frente

ao mecanismo de ruptura progressiva mais provável para o rejeito fino em questão, que é a mobilização da resistência residual ao longo de superfícies de cisalhamento.

Conforme esclarecido no Anexo 1 do presente documento, **a obrigatoriedade da análise de estabilidade estática e da verificação da condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual, conforme prescritas pela ABNT NBR 13028-3:2025 (Tabela 1), não constitui uma inovação técnica. Trata-se, na realidade, da formalização normativa de práticas de segurança geotécnica há muito consolidadas** no meio técnico-científico nacional e internacional, especialmente aplicáveis a estruturas de grande porte, alto potencial de impacto e construídas com materiais finos de comportamento potencialmente *strain-softening*.

À época da elaboração do EIA (2022), já era amplamente reconhecida a necessidade de uma abordagem analítica hierarquizada para projetos desta natureza, que incluísse explicitamente a análise estática (condição operacional fundamental) e a avaliação de cenários de degradação progressiva da resistência, com base em parâmetros residuais.

A não incorporação destas verificações no estudo não se justifica por uma suposta desatualização em face de uma norma posterior, mas representa a omissão de requisitos técnicos já pertinentes e recomendáveis, agravada pelas características de escala, altura e sensibilidade ambiental e social das Pilhas PDER M e PDER C. **Portanto, a exigência atual da norma reflete um padrão de diligência técnica que já deveria ter orientado o projeto desde sua concepção.**

5. CONCLUSÕES

A distinção entre análise estática e análise pseudo-estática é fundamental para a avaliação da segurança de pilhas de rejeitos desaguados. A análise estática representa a condição normal de operação da estrutura e constitui a base para a verificação da estabilidade frente a mecanismos de instabilidade progressiva, comportamento *strain-softening* e mobilização de resistência residual, sendo expressamente exigida pela Tabela 1 da ABNT NBR 13028-3:2025.

A análise pseudo-estática, por sua vez, consiste em uma abordagem simplificada para representar a ação sísmica por meio de forças inerciais equivalentes e não substitui as análises estáticas nem as avaliações de resistência residual ou liquefação.

Portanto, conclui-se que o EIA de 2022 não atende aos requisitos da ABNT NBR 13028-3:2025. A norma exige, como verificação mandatória e distinta, a análise de estabilidade em condição estática (FS mínimo definido na Tabela 1) e, para materiais como o rejeito do projeto, a análise para a condição de mobilização de resistência pós-pico ou residual. A apresentação exclusiva de fatores de segurança obtidos em análises pseudo-estáticas constitui uma não conformidade formal e técnica, deixando de demonstrar a segurança da estrutura para seu estado de carregamento permanente e para cenários de degradação progressiva da resistência.

ANEXO 3 – LISTA RESUMIDA DAS NÃO CONFORMIDADES DO PROJETO PDER M E PDER C ABORDADAS NO PRESENTE DOCUMENTO

1. OBJETO

A seguir é apresentada, de forma resumida e indicativa, a descrição de diversos itens diretamente relacionados às pilhas PDER M, PDER C e estruturas a elas associadas, itens esses considerados no presente documento como sendo os de maior impacto na segurança do empreendimento, ou seja, os que resultam em maiores riscos socioambientais. O presente trabalho é, portanto, limitado ao seu conteúdo, sem intenção de apresentar uma análise global do EIA do Projeto de Longo Prazo da Samarco.

Essa lista deve ser tomada apenas como um complemento ao Resumo Executivo, uma vez que o detalhamento dos itens, apresentado ao longo de todo o documento, é fundamental para a compreensão do seu significado técnico e suas implicações nos riscos construtivos, operacionais e de longo prazo, enquanto existirem as pilhas e as demais estruturas a elas associadas.

2. CLIMA

1. Os critérios hidrológicos adotados baseiam-se no pressuposto de estacionariedade das séries históricas sem tratamento explícito de não-estacionariedade climática. *Isto significa que o projeto assume que o clima do passado se repetirá no futuro, ignorando as tendências de aumento de frequência e intensidade de eventos extremos.*
2. O EIA não incorpora cenários de mudança climática no dimensionamento hidrológico. *Não foram utilizadas projeções climáticas (ex: cenários do IPCC) para recalcular valores de precipitação de projeto, deixando as estruturas vulneráveis a chuvas intensas e extremas cada vez mais frequentes e mais fortes no futuro.* O EIA sequer menciona o termo “mudanças climáticas”.
3. Não foram realizadas análises de sensibilidade a incrementos de intensidade de precipitação associados a cenários climáticos futuros. *O projeto não testa como os sistemas de drenagem e contenção, bem como os taludes e áreas sujeitas a erosão, se comportariam se as chuvas de projeto fossem, por exemplo, 30% ou 50% maiores.*
4. As séries históricas de precipitação utilizadas (as do doc. “Diretrizes”, de Pinheiro, 2011), possuem limite temporal anterior a eventos intensos e extremos mais recentes. *Os dados pluviométricos foram coletados até 2010, excluindo eventos severos da última década que poderiam alterar as estatísticas de chuvas intensas.* Das 93 estações pluviométricas listadas nas “Diretrizes” apenas 5 podem ser consideradas efetivamente representativas das condições históricas para efeitos do empreendimento. O Diagnóstico Ambiental do EIA foi baseado em Normais Climatológicas antigas (1961-1990), que não incluem a realidade climática dos últimos 35 anos.
5. Os hietogramas de projeto foram baseados em eventos históricos antigos sem incorporação de eventos intensos e extremos mais recentes. *Os padrões de chuva usados nos cálculos são de 1991 e 2003, não refletindo a possibilidade de tempestades com distribuição temporal mais crítica ocorridas nos últimos 22 anos.*
6. A base de dados utilizada para cálculo da Precipitação Máxima Provável (PMP) é limitada em número de eventos e não foi atualizada. *A PMP foi estimada com base em apenas 2-3 eventos antigos (ex: 2002, 2003, 2007), sem considerar registros mais recentes que*

poderiam elevar esse limite teórico e sem considerar projeções que tomem em conta as mudanças climáticas.

7. Não são apresentadas, no documento de referência (Pinheiro, 2011) utilizado no EIA como fonte de dados para o Projeto, análises de tendência nas séries históricas de precipitação. *Não há estudo estatístico que busque identificar se já há uma tendência de aumento nos volumes ou intensidades de chuva ao longo das décadas nas séries disponíveis.* O EIA não menciona análise de tendências.

3. HIDROLOGIA

1. Apenas os canais periféricos das pilhas foram dimensionados com base em valores diferentes de TR (Tempo de Retorno). Porém, o EIA não informa qual dos cenários de dimensionamento avaliados (TR 500 anos, TR 1.000 anos, TR 10.000 anos ou PMP) será efetivamente adotado para os canais periféricos das PDER M e PDER C na configuração final. *Há múltiplas opções de tamanho para os canais, mas não se define qual o cenário será usado efetivamente para a construção.* Os demais dispositivos de drenagem (canaletas de topo, de berma e de acesso e descidas de água) são dimensionados apenas para TR 100 anos.
2. O EIA não explicita o Tempo de Retorno (TR) adotado para o dimensionamento da drenagem superficial nas fases construtivas intermediárias da PDER M. *Durante a construção, as pilhas estarão temporariamente mais vulneráveis, mas o grau dessa vulnerabilidade (TR adotado) não é claramente declarado.*
3. Foram apresentados múltiplos cenários hidrológicos de cálculo sem definição clara de qual constitui o critério de projeto vinculante para cada dispositivo de drenagem. *A falta de um critério único e definido para cada componente (canais, descidas, bermas) gera ambiguidade na segurança pretendida.*
4. O Método Racional foi utilizado para algumas bacias com áreas superiores a 1 km², sem justificativa técnica detalhada, apesar de sua limitação de aplicabilidade para bacias maiores. *Este método é considerado simplificado e pouco preciso para grandes áreas, onde métodos mais complexos são recomendados.*
5. Foi adotado, na aplicação do método racional, coeficiente de escoamento superficial único ($C = 0,60$) sem variação por fase construtiva, tipo de superfície ou evolução de compactação e selamento das pilhas. *Um valor fixo não captura a realidade de que superfícies compactadas ou com finos tornam-se mais impermeáveis, aumentando o escoamento (C maior).* A PDER C, se construída apenas com rejeitos, como previsto no EIA, poderá ter o valor de C próximo de 1, aumentando a vazão de projeto.
6. O EIA não demonstra avaliação da evolução do coeficiente de escoamento ao longo da operação, considerando aumento de impermeabilização superficial. *Não há análise de como a vazão de projeto pode aumentar com o tempo à medida que a superfície da pilha se consolida e perde capacidade de infiltração.*
7. Não são informados os comprimentos de percurso hidráulico e as declividades utilizados no cálculo dos tempos de concentração. *Esses dados são fundamentais para reproduzir e verificar os cálculos hidrológicos; sua ausência impede a auditoria independente.*
8. O método de cálculo do tempo de concentração para canaletas de topo, bermas, acessos, descidas de água e canais periféricos não é explicitado. *Diferentes trechos do escoamento exigem fórmulas distintas; a omissão do método usado questiona a precisão dos tempos calculados.*

9. As memórias de cálculo hidrológico não são apresentadas de forma completa e verificável. *Faltam planilhas, scripts ou detalhamento passo a passo que permitam a verificação integral dos resultados apresentados.*
10. No documento utilizado pela EIA como fonte dos dados de chuvas não é justificada a metodologia estatística aplicada às séries de precipitação. *Falta explicar qual distribuição estatística (Gumbel) foi usada e porque foi usada, em detrimento de outras, para extrapolar os tempos de retorno usados para o Projeto.*
11. Há incompatibilidade entre os vertedouros dimensionados para PMP ou TR 10.000 anos e canais de alimentação dimensionados para TR inferiores. *Os vertedouros podem ter capacidade para a maior chuva possível, mas os canais que levam água até eles podem entupir ou romper antes devido a chuvas intensas e carreamentos de sedimentos.*
12. A drenagem interna das pilhas é dimensionada com base em balanço hídrico de condições médias, sem vinculação direta a eventos extremos. *O cálculo da água que percola dentro das pilhas usou chuvas médias, não considerando os picos de infiltração durante tempestades severas.*
13. O dimensionamento da drenagem interna das pilhas foi realizado com base em um balanço hídrico de condições médias, sem vinculação a eventos extremos de precipitação de curta duração e alta intensidade. *Esta abordagem desconsidera os picos de infiltração rápida gerados por chuvas severas, que são justamente os mecanismos capazes de elevar subitamente o nível freático, aumentar as pressões neutras e reduzir a resistência do maciço, potencialmente desencadeando instabilidade.*
14. Os estudos hidrogeológicos não são explicitamente integrados ao dimensionamento da drenagem interna. *As informações sobre o fluxo de água no subsolo e nas fundações não foram claramente usadas para definir a capacidade dos sistemas de drenagem de fundo.*
15. Não foram apresentadas análises integradas de eventos simultâneos e de falhas de estruturas em cascata, o que eleva substancialmente os riscos, principalmente nos cenários cada vez mais agressivos de mudanças climáticas.
16. A eficiência e o tempo de residência dos reservatórios de retenção de sedimentos foram avaliados apenas para eventos de baixo TR. *A capacidade de reter sedimentos foi analisada para chuvas comuns (TR 2 anos), não para tempestades severas, quando muito mais sedimento é carregado.*
17. O dimensionamento de retenção de sedimentos não está alinhado com os níveis de risco hidrológico adotados em outras partes do projeto. *Usar TR 2 anos para sedimentos é incoerente com o uso de TR 10.000 anos para a cheia do rio ou para canais periféricos (se esse for realmente o valor a ser adotado para tais canais), sendo que ambos os fenômenos ocorrem simultaneamente.*
18. Não foram apresentadas análises de risco específicas para falha de estruturas de retenção de sedimentos sob eventos extremos. *Não se avaliou o que aconteceria se um dique de contenção de sedimentos rompesse durante uma chuva extrema, liberando uma onda de água e lama.*
19. O volume morto dos diques foi calculado com taxa intermediária de geração de sedimentos, sem uso de cenário superior conservador. *Adotou-se um valor médio, não o pior caso, para estimar o assoreamento, o que pode à redução da capacidade.*

4. HIDRÁULICA

1. O critério de borda livre mínima baseado em percentual fixo de 20% não é acompanhado de verificação hidráulica de regime de escoamento, estabilidade do fluxo (ressaltos) e velocidade de escoamento. *O critério exclusivo de borda livre não representa elemento indicador da segurança do dimensionamento.*
2. Não são apresentados critérios dinâmicos de borda livre associados a regime de escoamento (número de Froude), energia específica e transições hidráulicas. *Faltam critérios que considerem a velocidade e profundidade da água para calcular uma borda livre segura, especialmente em curvas e mudanças de declividade.*
3. Não foram localizadas verificações sistemáticas de ocorrência de ressaltos hidráulicos nas transições de declividade dos canais. *O ressalto hidráulico eleva bruscamente o nível da água e pode causar transbordamento; sua localização e controle são essenciais e não foram demonstrados.*
4. As verificações hidráulicas não demonstram controle consistente de velocidades máximas admissíveis e de estabilidade de revestimentos. *Não se mostra que as velocidades da água nos canais, para condições de maiores vazões (eventos de chuva intensos e extremos) estão abaixo do limite que causa erosão no concreto ou no material do revestimento.*
5. Parte relevante dos canais periféricos apresenta, para todos os cenários de TR, segundo os próprios dados do EIA, combinações de borda livre, velocidade e Número de Froude fora das faixas recomendadas. *Recálculos baseados nos dados do EIA indicam que muitos canais teriam operação insegura, com risco de transbordamento ou erosão acelerada.*
6. Elevada proporção dos canais foi dimensionada com Número de Froude próximo da condição crítica, faixa reconhecida como hidraulicamente instável. *Com Froude próximo a 1, o escoamento é sensível a pequenas irregularidades, podendo oscilar entre regimes e gerar ondas que transbordam, podem erodir os taludes e provocar danos à estrutura.*
7. O EIA apresenta inconsistência conceitual ao afirmar dimensionamento em regime crítico para canais com declividade supercrítica, o que subestima velocidades e energia do escoamento. *Se a declividade é supercrítica, o fluxo é mais rápido e raso; forçar o cálculo no regime crítico resulta em dimensões subdimensionadas para a energia real.*
8. Não foram apresentadas análises de passagem segura para vazões superiores às de projeto. *Não se simulou o que acontece se a chuva for maior que a de projeto (ex.: 120% da vazão), para garantir que eventuais extravasamentos não causem ruptura catastrófica.*
9. Não há análise de comportamento hidráulico do sistema sob falhas parciais, obstruções ou perda de seção de escoamento. *Não se estudou o efeito cascata caso um canal seja bloqueado por sedimentos ou detritos, desviando todo o fluxo para áreas vulneráveis.*
10. Não foram apresentadas análises de sensibilidade hidrológica e hidráulica dos parâmetros de projeto. *Não se testou como os resultados (velocidades, níveis d'água) mudam se parâmetros como rugosidade ou coeficiente de escoamento estiverem um pouco errados.*

5. GEOTECNIA

1. Não foram apresentados estudos de estabilidade geotécnica dos diques de retenção de sedimentos. *Os diques que armazenam água e sedimentos lavrados das pilhas são estruturas de contenção; sua segurança contra deslizamento ou ruptura não foi calculada.*

2. Os estudos geotécnicos da PDER M foram desenvolvidos com base em premissas declaradas como otimistas devido à limitação de investigações de campo. *Reconhece-se que os parâmetros de resistência do terreno de fundação utilizados nos cálculos podem ser melhores do que a realidade, por falta de sondagens adequadas. Assim, não se sabe, com segurança, se o terreno suportará o peso das pilhas sobre eles.* De acordo com o EIA “Após a execução da campanha de sondagens proposta, existe a previsão de piora dos parâmetros, o que impacta diretamente nas análises de estabilidade”. Ver **Anexo 4** ao presente documento.
3. Não são explicitadas as premissas geotécnicas de fundação adotadas para a PDER C. *Não se sabe quais valores de resistência do solo foram assumidos para calcular a estabilidade da pilha PDER C, impossibilitando a avaliação da segurança do dimensionamento.* O EIA declara explicitamente a “a ausência de investigações geológico-geotécnicas de subsolo que abrangessem a área de implantação da pilha”
4. As análises de estabilidade consideram essencialmente condição drenada, condicionando a segurança a compactação elevada uniforme. *A estabilidade só é garantida se o rejeito estiver bem compactado e seco; não se analisa a situação mais perigosa de saturação rápida (não drenada).*
5. Não são apresentadas análises completas de estabilidade em condição não drenada. *Falta a análise crítica que avalia a resistência do material no curto prazo, durante ou logo após uma chuva intensa e/ou de longa duração.*
6. Não foram apresentadas análises de estabilidade sísmica completas. *As verificações para terremotos são parciais e não atendem aos critérios usuais e necessários preconizados pela estado da arte e por normas atuais; faltam análises com parâmetros de resistência degradada (pós-pico e residual) e avaliação de liquefação cíclica.*
7. Não foram apresentadas análises de suscetibilidade à liquefação estática. *Não se avaliou se o material, mesmo em condições estáticas (sem terremoto), pode perder resistência e fluir devido a um carregamento ou saturação excessiva.*
8. Não foram apresentados estudos de suscetibilidade à liquefação cíclica. *Faltam ensaios e análises específicas para avaliar se as vibrações de um sismo, mesmo de baixa magnitude, podem causar a liquefação dos rejeitos finos e saturados.*
9. As análises sísmicas pseudostáticas – as únicas apresentadas no EIA – utilizam parâmetros de resistência de pico sem avaliação de resistência pós-pico ou residual. *Usa-se a resistência máxima do material, ignorando que, após uma deformação, a resistência pode cair drasticamente (strain-softening), um mecanismo presente no rompimento de Fundão.*
10. O risco de comportamento *strain-softening* não é adequadamente explorado nas análises. *A possibilidade de o rejeito perder resistência progressivamente após o início da deformação, levando a uma ruptura progressiva, não foi investigada em profundidade. Essa análise é determinada por normas atuais.*
11. A premissa de eliminação de risco de liquefação apenas por compactação elevada não é acompanhada de análise de variabilidade construtiva e saturação futura. *Assume-se que 97% de compactação garante segurança, mas não se considera que na prática haverá zonas menos compactadas e que a saturação pode aumentar com o tempo por infiltração.*
12. O EIA reconhece que fatores de segurança dependem de investigações adicionais, indicando incerteza nos parâmetros adotados. *O próprio documento afirma que os*

fatores de segurança calculados podem mudar com estudos mais detalhados, mostrando que os resultados atuais são preliminares e incertos.

13. O material de estéril previsto para envelope apresenta ampla faixa granulométrica e teor de finos que pode induzir segregação. *Ao ser lançado, os blocos grandes podem rolar para baixo e os finos ficar no topo, criando zonas heterogêneas que podem não funcionar bem como filtro ou dreno.*
14. O risco de não atendimento a critérios de filtro na interface estéril-rejeito não é avaliado em detalhe. *Não se demonstra que, mesmo com segregação, as partículas do rejeito (finas) não serão carregadas pela água para os vazios do estéril (grosso), causando erosão interna (piping).*
15. Não há avaliação específica de risco de *piping* na interface entre materiais. *Falta uma análise dedicada ao processo de erosão interna progressiva (piping), que pode formar tubulações no interior da estrutura e levar ao colapso.*
16. A possível baixa permeabilidade do envelope de estéril e seus efeitos sobre poropressões internas não são analisados em profundidade. *Se o estéril tiver muitos finos, pode impermeabilizar a superfície, prendendo a água da chuva dentro da pilha e aumentando a pressão nos poros do rejeito.*
17. A PDER C não possuirá envelope de estéril, mas não foi apresentada no EIA uma análise detalhada das implicações erosivas dessa configuração. *A superfície de rejeito exposta será altamente erodível; não há estudo sobre a formação de voçorocas e o impacto no sistema de drenagem e estabilidade de taludes.*
18. Não há análise detalhada de suscetibilidade a processos erosivos severos nas superfícies expostas de rejeito. *Não se quantifica a taxa de erosão esperada nas faces da PDER C nem o volume de sedimentos gerado, crucial para dimensionar estruturas de contenção a jusante.*
19. A meta operacional de compactação elevada contínua não é acompanhada de análise detalhada de viabilidade prática sazonal. Não se modela ou discute a heterogeneidade que surgirá inevitavelmente na pilha devido às interrupções e dificuldades impostas pelo clima, criando zonas de menor resistência. *Não há um plano operacional mostrando como manter 97% de compactação no período chuvoso (material encharcado) e no seco (material poeirento). Todo o Projeto de Longo Prazo é baseado na premissa de que os rejeitos serão compactos no mínimo a 97%, o que dificilmente pode ser obtido com valores de umidade diferentes do valor ótimo de 15% estabelecido em ensaios.*
20. Não são descritos critérios construtivos detalhados para deposição do estéril de envelopamento. *Não é explicado como o estéril será colocado para minimizar segregação e garantir contato adequado com o rejeito.*
21. Não há detalhamento de critérios de compactação da camada de estéril de grande espessura prevista. *Os 15 metros de estéril também precisam ser compactados para serem estáveis; os métodos e controles para isso não são apresentados*
22. Faltam no EIA as informações referente às sondagens e preparação da base das pilhas PDER M e PDER C. As informações são genéricas, dependem de investigações futuras, não constituindo um projeto geotécnico definitivo. Não há análise para suportar as pressões extremas (que podem chegar 500-600 t/m²) de pilhas de 200 m de altura, nem avaliação de riscos específicos como a heterogeneidade do terreno, falhas geológicas ou a presença de solos problemáticos.
23. A disposição temporária dos rejeitos filtrados em pilhas pulmão não cobertas não é analisada quanto aos seus riscos operacionais e de qualidade. *Essa prática expõe o*

material às intempéries: nos períodos chuvosos, o rejeito absorve umidade acima da ótima para compactação, tornando-o inapropriado para a construção da pilha final; nos períodos secos, a dessecação gera poeira em escala significativa e reduz a umidade abaixo do ótimo, comprometendo a homogeneidade e a resistência do maciço compactado. O EIA não informa se os transportadores de correia (TCLD) são cobertos ou não: se expostos, o rejeito poderá receber chuvas ou secar demais durante o transporte.

24. O EIA não descreve metodologias específicas para garantir a compactação efetiva ($\geq 97\%$) nas bordas e taludes da PDER M, zonas criticamente vulneráveis. *A compactação eficaz em bordas frequentemente exige técnicas de confinamento, como a construção prévia de leiras-guia de estéril ou o uso de equipamentos e procedimentos especiais. A omissão de um plano detalhado para essas áreas aumenta o risco de formação de zonas fracas e desencadeamento de instabilidades superficiais e erosão regressiva.*
25. A PDER C, prevista sem envelope de estéril, carece de análise sobre técnicas alternativas para garantir a compactação e estabilidade de seus taludes expostos. *A ausência de envelopamento elimina a possibilidade de usar o estéril como elemento de confinamento lateral para compactação das bordas. O EIA não apresenta métodos compensatórios para assegurar a densidade mínima requerida e a integridade dos taludes de rejeito puro, que são intrinsecamente mais erodíveis e instáveis.*
26. A implantação da PDER M sobre um platô de estéril pré-existente introduz um risco geotécnico crítico não avaliado. *O estéril, menos resistente e mais compressível que o terreno natural, pode sofrer recalques diferenciais sob o peso extremo da pilha, podendo levar à sua ruptura progressiva.*
27. O EIA limita-se à análise pseudo-estática para avaliação sísmica, método simplificado que não modela a geração dinâmica de poropressões, a degradação cíclica da resistência ou a liquefação. São omitidas as análises de estabilidade estática (condição operacional fundamental) e as análises com parâmetros de resistência residual, ambas exigidas pela ABNT NBR 13028-3:2025 para materiais com *strain-softening*. Esta lacuna é grave, considerando o histórico de sismicidade (natural ou induzida) na região (evento associado ao rompimento do Fundão) e o risco sísmico potencial do avanço das cavas vizinhas, tornando a avaliação de segurança das PDERs incompleta e potencialmente não conservadora.
28. A definição da altura segura das PDERs carece de fundamentação conclusiva devido à omissão de dados críticos. Não foram apresentados o valor da resistência residual pós-pico (ϕ'_{res}) nem os gráficos tensão-deformação que comprovem e quantifiquem o comportamento *strain-softening* do material. Sem estes elementos, é impossível avaliar adequadamente os riscos de ruptura progressiva e liquefação, que são os verdadeiros limitadores da altura, tornando qualquer estimativa de altura máxima da pilha meramente especulativa e não comprovadamente segura.

6. NORMAS

1. O EIA não classifica formalmente as PDER's quanto a Categoria de Risco e Dano Potencial Associado. A Resolução ANM 220/2025 – que inclui, expressamente, os “empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação” no conceito de barragens de mineração e atribui a eles obrigações semelhantes às aplicadas a barragens tradicionais – exige essa classificação para definir o nível de segurança necessário. *A ausência de classificação deixa o projeto sem uma base clara de requisitos. O EIA não demonstrou que as pilhas estão totalmente isentas de risco de liquefação.*

2. O enquadramento normativo das pilhas não foi reavaliado à luz das normas ABNT mais recentes aplicáveis a empilhamentos drenados de rejeitos. O projeto usou normas antigas e inadequadas para as pilhas PDER M e PDER C (NBR 13029:2017, que se aplica a pilhas de estéreis e não de rejeitos e NBR 13028:2017, que se aplica a barragens de rejeito e não a pilhas); *norma nova e específica (NBR 13028-3:2025) já foi publicada e traz requisitos mais rigorosos.*
3. Para a PDER M, não foi avaliada explicitamente a dominância geotécnica relativa entre rejeito e estéril para definição normativa aplicável. *Sendo uma pilha mista, a norma a ser seguida depende de qual material controla o comportamento da estrutura; essa definição crucial não foi feita.*

7. OPERAÇÃO

1. O EIA assume manutenção de cobertura vegetal como fator de controle de sedimentos sem análise de perda por seca ou incêndio. *A vegetação pode morrer ou queimar, perdendo sua função protetora; não há plano para este cenário que poderia aumentar drasticamente a erosão.*
2. O EIA não apresenta programa de revalidação contínua das propriedades físico-químicas e geotécnicas dos rejeitos ao longo da operação. *As características do rejeito podem variar ao longo dos anos; não há um plano de amostragem e ensaio periódico para atualizar os parâmetros de projeto.*

ANEXO 4 - INFORMAÇÕES E LACUNAS SOBRE SONDAgens E PREPARAÇÃO DA BASE DAS PILHAS DE REJEITO NO EIA – PDER M E PDER C

1. INTRODUÇÃO

Este Anexo analisa as informações contidas no documento do EIA denominado "CARACTERIZAÇÃO EMPR. ATIVIDADES E ASPECTOS AMBIENTAIS" referentes às investigações geotécnicas (sondagens) e ao preparo da base para as Pilhas de Disposição de Estéril e Rejeito (PDER M e PDER C).

O objetivo é o de avaliar se o nível de detalhamento apresentado é compatível com as melhores práticas da geotecnia e com a exigência de segurança para estruturas que, conforme o Projeto de Longo Prazo, podem atingir alturas da ordem de 200 metros, implicando em pressões na base que podem chegar 500–600 toneladas por metro quadrado (t/m²).

A análise compara o descrito no EIA com as exigências as normas técnicas ABNT NBR 13028-3:2025 e 13029:2024 e com protocolos reconhecidos para projetos de altíssima responsabilidade, considerando também a possibilidade de heterogeneidades geológicas, falhas e a presença de materiais problemáticos.

2. SÍNTESE DAS INFORMAÇÕES PRESENTES NO EIA SOBRE SONDAgens E PREPARAÇÃO DA BASE

O documento mencionado do EIA apresenta uma estrutura descritiva e metodológica para as etapas de investigação e preparação da fundação, conforme resumido a seguir:

2.1 Sondagens

- PDER M (Mirandinha):
 - Estudos anteriores: Menciona mapeamento geológico-geotécnico e investigações existentes, mas sem apresentar os dados.
 - Campanhas futuras: Descreve a especificação técnica para sondagens a percussão (SPT), a trado (ST) e poços de inspeção (PI), com objetivos genéricos (definir espessura de camadas, nível d'água, obter amostras). Refere-se ao ANEXO 7.5-6 para detalhes de locação, quantidade e profundidade dos furos.
 - Ensaio CPTu: Menciona ensaios de piezocone para caracterizar os rejeitos, com referência à INSERÇÃO 7-130 para locação.
- PDER C (Camargos):
 - Estudos anteriores: Descreve mapeamento de campo com referência a inserções (7-144, 7-145, 7-148) que descrevem afloramentos e perfis de solo. Cita a INSERÇÃO 7-147 para seções geológicas conceituais.
 - Campanhas futuras: Especifica sondagens SPT, ST e PI, com objetivos semelhantes aos da PDER M. Remete às INSERÇÕES 7-158 e 7-159 para a locação dos furos.
 - Ensaio laboratoriais: Lista ensaios planejados (granulometria, Atterberg, cisalhamento, adensamento)

2.2 Preparação da Base (Tratamento de Fundação)

- PDER M: Lista "supressão vegetal, limpeza superficial e tratamento de fundação" como critério. A Seção 7.5.3.1.2.5 descreve ações genéricas: remoção de materiais orgânicos e solos moles, compactação e melhoria da drenagem. Remete ao ANEXO 7.5-5 para plantas e detalhes.
- PDER C: Apresenta descrição mais específica, incluindo a escavação em "V" no talvegue principal para drenagem, preenchida com material granular. As INSERÇÕES 7-156 e 7-157 ilustrariam esses detalhes.

2.3 Sequenciamento Construtivo (Itens 7.7.2.7.2 e 7.7.2.8.2)

A análise do sequenciamento construtivo reforça a abordagem genérica:

- As descrições focam na ordem das atividades (limpeza, terraplenagem, implantação de drenos, construção das camadas da pilha).
- Não há vinculação explícita entre os resultados das campanhas de sondagem (que seriam futuras) e a definição das soluções de tratamento da base. Não se especificam critérios decisórios como: "*Caso as sondagens revelem uma camada de solo mole com espessura superior a X metros, será adotada a solução Y*".
- A linguagem é prescritiva de etapas, mas não integrada a um projeto geotécnico específico do sítio, que deveria preceder e direcionar o sequenciamento.

3. IDENTIFICAÇÃO DE LACUNAS E INSUFICIÊNCIAS CRÍTICAS

Com base na leitura integral, identificam-se as seguintes lacunas fundamentais:

1. Ausência de Dados Primários e Detalhes Executivos: O documento do EIA é apenas referencial.
2. Investigações "Por Fazer" e Projeto Indefinido: O documento estrutura-se em um plano de investigações futuras. Portanto, o projeto geotécnico da base é, atualmente, conceitual e não definitivo. Não há como afirmar, com base no EIA, que as bases das pilhas serão adequadamente preparadas, pois as soluções finais dependerão de resultados que ainda não existem.
3. Falta de Integração com a Magnitude da Carga: As descrições do tratamento das bases são genéricas e assemelham-se a procedimentos para cargas moderadas. Não há menção ou análise específica para suportar pressões da ordem de até 500–600 t/m², que exigiriam soluções extraordinárias como:
 - Fundações profundas para transferência de carga a camadas competentes.
 - Pré-carregamento com drenos verticais (PVDs) em larga escala para acelerar o adensamento de solos compressíveis.
 - Análises numéricas avançadas (Elementos Finitos) para prever recalques diferenciais e interação solo-estrutura.
4. Subestimação da Heterogeneidade Geológica e Riscos Associados: O EIA menciona a existência de diferentes tipos de solo (residual, coluvionar, aluvionar) e a necessidade de remoção de materiais inadequados. No entanto, não demonstra como a malha de investigação foi ou será dimensionada para detectar:
 - Variações laterais abruptas na espessura ou resistência das camadas.
 - Presença de falhas, fraturas ou zonas de cisalhamento que possam constituir planos de fraqueza.

- A existência de solos colapsíveis (como alguns solos residuais de rochas cristalinas em certos estados) ou solos expansivos.
 - A possibilidade de solos calcários ou margosos, que, embora não sejam "moles", apresentam riscos únicos de solubilidade, colapso e formação de cavidades (carstificação), um perigo crítico em encostas úmidas.
5. Falta de Critérios de Aceitação e Monitoramento: Não são estabelecidos parâmetros quantitativos para aceitação da base preparada (ex.: grau de compactação mínimo, índice de resistência à penetração - CPT ou SPT, módulo de deformação). Também não há um plano detalhado de instrumentação geotécnica (piezômetros, inclinômetros, marcos de recalque) para monitoramento durante a construção e operação da pilha, prática obrigatória para estruturas de alto risco.
6. Fundação da PDER M sobre Platô de Estéril: Um aspecto de alta criticidade identificado na descrição da PDER M é seu assentamento sobre um platô de estéril previamente depositado, o qual, por sua vez, repousa sobre o terreno natural preparado. Esta configuração em "pilha sobre aterro" introduz riscos geotécnicos adicionais e significativos, que não são adequadamente abordados no EIA.

O estéril depositado, tipicamente um material granular solto ou com compactação variável e não controlada para fins estruturais, apresenta resistência mecânica e rigidez inferiores às de rochas ou de um terreno naturalmente compactado. Este comportamento é esperado e configura um risco real: o colchão de estéril pode sofrer compressão significativa e potencialmente desigual sob o imenso peso da pilha de rejeitos (200 m de altura). Esse fenômeno pode levar a recalques diferenciais acentuados na base da PDER M, mesmo que o terreno subjacente esteja bem preparado.

A compressão do estéril pode, ainda, gerar extrusão lateral do material, comprometendo a estabilidade do platô e, conseqüentemente, da pilha principal. A ausência, no EIA, de uma caracterização geotécnica específica deste corpo de estéril (parâmetros de resistência, compressibilidade, grau de compactação atual) e de análises numéricas que simulem a interação tripartite (terreno natural → platô de estéril → pilha de rejeitos) representa uma lacuna técnica bastante significativa.

Ignorar esta condição particular é negligenciar um potencial mecanismo de ruptura progressiva, onde a falha pode se iniciar pela recompactação não homogênea do estéril, propagando instabilidade para toda a estrutura.

4. RISCOS POTENCIAIS DECORRENTES DAS LACUNAS IDENTIFICADAS

A implantação de pilhas de 200 m de altura sobre uma base cujas condições não foram completamente e detalhadamente caracterizadas, e para a qual não há um projeto executivo de tratamento, implica em riscos que podem ser considerados graves:

1. Recalque Diferencial Excessivo: Apoio parcial sobre rocha sã e parcial sobre solo residual espesso ou coluvionar levará a assentamentos desiguais. Isso pode causar:
 - Fissuras e rupturas no núcleo ou no sistema de drenagem interno da pilha.
 - Alteração dos gradientes hidráulicos planejados, podendo induzir erosão interna.
 - Perda da geometria de estabilidade dos taludes.
2. Falha por Capacidade de Carga: Se a pressão transmitida pela pilha superar a resistência do solo de fundação, pode ocorrer uma ruptura por puncionamento ou por extrusão lateral dos solos, levando a uma deformação catastrófica rápida ou a um deslizamento rotacional profundo. O deslizamento da pilha da Jaguar Mining é um exemplo histórico que ilustra esse mecanismo potencial.

3. Comprometimento do Sistema de Drenagem: Recalques diferenciais podem fraturar drenos de pé e trincheiras, tornando-os ineficazes. O acúmulo de pressões de poro na base reduz drasticamente a resistência do solo, podendo levar à liquefação estática ou ruptura progressiva.
4. Ativação de Superfícies de Fraqueza Pré-existentes: A enorme carga da pilha pode reativar falhas geológicas ou planos de fraqueza não mapeados, desencadeando movimentos de massa em grande escala, potencialmente catastróficos em áreas de encosta.
5. Erosão Interna (Piping) em Solos Cársticos ou Colapsíveis: A percolação de água através de fundações heterogêneas pode, ao longo do tempo, lavar finos ou dissolver materiais, criando caminhos preferenciais de vazão que evoluem para túneis (piping) e levam ao colapso súbito.

5. O que Deveria Ter Sido Apresentado – Boas Práticas e Exigências Técnicas

Para um Projeto que propõe estruturas de disposição de rejeitos de altíssimo risco potencial, o documento deveria conter, no mínimo:

1. Campanha de Investigação Definida e Justificada: Planta com malha de sondagens (SPT, CPT) justificada pela complexidade geológica, com espaçamento compatível com a variabilidade esperada (ex.: malha de 50m x 50m para áreas homogêneas, reduzindo para 25m x 25m ou menos em zonas de transição ou de interesse). Perfis de sondagem representativos anexados.
2. Caracterização Geotécnica Quantitativa da Fundação: Tabelas e gráficos com os parâmetros geotécnicos (resistência, compressibilidade, permeabilidade) obtidos dos ensaios de campo e laboratório nos materiais que efetivamente constituem a fundação.
3. Projeto Executivo do Tratamento de Base: Plantas, cortes e detalhes construtivos vinculados às condições geotécnicas mapeadas. Especificação clara das soluções para cada cenário encontrado (ex.: escavação até X metros, compactação a Y% do Proctor Normal etc.).
4. Análises de Estabilidade e Recalque Incluindo a Fundação: Resultados de modelagens numéricas considerando o perfil geotécnico realista, demonstrando fatores de segurança adequados e recalques diferenciais dentro de limites toleráveis (ex.: < 1/500 do vão) mesmo sob a carga máxima de 200 m de rejeito.
5. Plano de Controle e Monitoramento Geotécnico: Descrição da instrumentação a ser instalada na fundação, com frequência de leitura e planos de ação para cada instrumento.

6. CONCLUSÃO DA ANÁLISE

O capítulo do EIA analisado reconhece a importância das sondagens e do preparo da base, porém falha em demonstrar e comprovar que estas etapas críticas serão executadas com o rigor, o detalhamento e a profundidade necessários para garantir a segurança de pilhas que atingirão alturas e pressões excepcionais. A informação é qualitativa, genérica e dependente de estudos futuros, configurando uma lacuna técnica significativa.

A segurança de uma estrutura deste porte não pode ser baseada em planos de investigação futuros. Ela exige, desde a fase de licenciamento ambiental, a apresentação de um projeto geotécnico, ainda que preliminar, robusto, fundamentado em dados reais de campo, que



comprove a viabilidade da implantação e defina as soluções técnicas necessárias para mitigar os riscos inerentes a fundações heterogêneas sob cargas extremas.

A ausência destes elementos no EIA constitui um ponto de acentuada vulnerabilidade na análise de risco do empreendimento como um todo.