



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



Augusto do Carmo Sousa Davin

MODELO DE UM PROTOCOLO DE SEGURANÇA PARA MINERAÇÃO

Ouro Preto – MG

2025

Augusto do Carmo Sousa Davin

**MODELO DE UM PROTOCOLO DE SEGURANÇA PARA
MINERAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientadora: Dra. Bruna de Fatima Pedrosa Flausino

Ouro Preto – MG

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D259m Davin, Augusto do Carmo Sousa.

Modelo de um protocolo de segurança para Mineração. [manuscrito] /
Augusto do Carmo Sousa Davin. - 2025.
51 f.

Orientadora: Profa. Dra. Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Minas e recursos minerais. 2. Escavação. 3. Modelo de Protocolo
de Segurança (MPS). 4. Administração de risco. I. Flausino, Bruna de
Fátima Pedrosa Guedes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECON



FOLHA DE APROVAÇÃO

Augusto do Carmo Sousa Davin

Modelo de um Protocolo de Segurança para Mineração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 18 de dezembro de 2025

Membros da banca

[DSc.] - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
[DSc.] - Irce Fernandes Gomes Guimarães - (Universidade Federal de Ouro Preto)
[DSc.] - Magno Silvério Campos - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/12/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Magno Silverio Campos**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 16:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Irce Fernandes Gomes Guimaraes**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/01/2026, às 14:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1034887** e o código CRC **52D22FD8**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, aos meus pais, avós e a todos que, de alguma forma, estiveram ao meu lado ao longo dessa caminhada. Sem o incentivo e a presença de cada um, este momento não seria possível.

Agradeço à UFOP, à Escola de Minas e ao Departamento de Engenharia de Produção (DEPRO) pela oportunidade de acesso ao ensino público, gratuito e de qualidade, bem como pelo incentivo à pesquisa e à extensão.

Aos professores do DEPRO, expresso minha gratidão por tanto me inspirarem ao longo da minha formação acadêmica. Em especial, agradeço à Prof.^a Bruna, pelo conhecimento compartilhado, pela dedicação e pelas valiosas contribuições que foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

“A educação exige os maiores cuidados, porque influi sobre toda a vida.”

Sêneca

RESUMO

Este trabalho apresenta um Modelo de Protocolo de Segurança aplicado à mineração, com foco específico em uma cava destinada à disposição de rejeitos e à captação de água para recirculação no processo de beneficiamento mineral. Considerando a relevância econômica da mineração de ferro no Brasil e, simultaneamente, os riscos geotécnicos, o estudo propõe uma abordagem integrada de geotecnia, planejamento estratégico e gestão de riscos. O diagnóstico situacional permite compreender os fluxos operacionais, o uso da cava, os acessos, os pontos críticos e as incertezas associadas às condições geotécnicas e hidrológicas, para assim propor um modelo hipotético. A partir dessas informações, é estruturado um protocolo de segurança, relacionado a um Procedimento Operacional Padrão (POP), com objetivos de definições claras de responsabilidades, respostas a situações, critérios de acesso e relações com as características e monitoramento geotécnico. O modelo proposto incorpora ferramentas fundamentais para a gestão da segurança do local, relacionando o planejamento estratégico da ocupação da cava, com o monitoramento geotécnico e os fluxos de resposta para execução de atividades. Destaca-se, ainda, a elaboração de mapas de perigo geotécnico e mapas de calor de processos, que permitem identificar áreas críticas e treinar pessoas para que conheçam os perigos existentes e, assim, orientar decisões operacionais mais seguras. O protocolo é estruturado de forma alinhada ao ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*), o que busca garantir o planejamento adequado, monitoramento contínuo, respostas padronizadas e constante revisão, como forma de melhoria contínua. Por fim, o trabalho enfatiza que a eficácia do protocolo depende da interação entre as áreas envolvidas na atividade, da incorporação de *feedbacks* operacionais, da atualização das tecnologias de monitoramento e da revisão periódica dos mapas de perigo, consolidando o protocolo como uma ferramenta dinâmica e essencial para a segurança e a sustentabilidade das operações minerárias.

Palavras-chaves: Mineração; Cava; Modelo de Protocolo de Segurança; Monitoramento Geotécnico; Gestão de Riscos.

ABSTRACT

This paper presents a Safety Protocol Model applied to mining, with a specific focus on the In-pit tailings backfilling and the collection of water for recirculation in the mineral processing process. Considering the economic relevance of iron ore mining in Brazil and, simultaneously, the geotechnical risks, the study proposes an integrated approach combining geotechnics, strategic planning, and risk management. The situational diagnosis allows understanding of the operational flows, pit usage, access points, critical areas, and uncertainties related to geotechnical and hydrological conditions, in order to propose a hypothetical model. Based on this information, a safety protocol is structured, linked to a Standard Operating Procedure (SOP), with clear definitions of responsibilities, responses to situations, access criteria, and relations with geotechnical characteristics and monitoring. The proposed model incorporates essential tools for local safety management, aligning the strategic planning of pit occupancy with geotechnical monitoring and response flows for the execution of activities. It also emphasizes the development of geotechnical hazard maps and process heat maps, which help identify critical areas and train personnel to recognize existing hazards, thereby guiding safer operational decisions. The protocol is structured in line with the PDCA (Plan-Do-Check-Act) cycle, aiming to ensure adequate planning, continuous monitoring, standardized responses, and ongoing review as part of continuous improvement. Finally, the paper emphasizes that the protocol's effectiveness relies on the interaction between the areas involved in the activity, the incorporation of operational feedback, the updating of monitoring technologies, and the periodic revision of hazard maps, consolidating the protocol as a dynamic and essential tool for the safety and sustainability of mining operations.

Keywords: Mining; Open Pit; Safety Protocol Model; Geotechnical Monitoring; Risk Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Enchimento da cava da Mina de Águas Claras (MAC).....	14
Figura 2 - Principais Reservas Mundiais de Ferro (2024).....	16
Figura 3 - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – CFEM..	17
Figura 4 - Fluxo simplificado de um processo minerário.....	19
Figura 5 - Sistema de disposição de rejeitos e captação de água em uma cava.	20
Figura 6 - a) Poços de rebaixamento, b) Indicador de Nível d'água (INA) ou Piezômetro (Pz), c) radar terrestre, d) batimetria e e) sistema de captação de água.....	22
Figura 7 - Ciclo PDCA.	25
Figura 8 - Logo da Conferência Rio 92.....	27
Figura 9 - Preenchendo lacunas " <i>Bridging the gaps</i> ".	29
Figura 10 - Metodologia da Pesquisa.	31
Figura 11 - Áreas e tópicos fundamentais no Modelo do Protocolo de Segurança.....	32
Figura 12 - Vista panorâmica de um exemplo de cava com o sistema de recirculação.	33
Figura 13 - Fluxograma do Modelo do Procolo de Segurança para uma cava.....	35
Figura 14 - Setorização hipotética de uma cava com disposição de rejeitos.....	36
Figura 15 - Mapa Esquemático de Perigo Geotécnico.	37
Figura 16 - Mapa esquemático de Calor de Processos.	38
Figura 17 - Mapa esquemático Integrado do Protocolo de Segurança.	38
Figura 18 - Estrutura organizacional hipotética.	40
Figura 19 - Fluxos de processos e respostas para atividades no local.	41
Figura 20 - Acompanhamento do enchimento, hipotético, de rejeito e níveis de água..	42
Figura 21 - <i>Dashboard</i> apresentando o Nível de Água, hipotético, semanal do reservatório.....	43
Figura 22 - Informações sobre o enchimento da cava.	44
Figura 23 - Controles de parâmetros físicos.....	45
Figura 24 - Controles de processos.....	46
Figura 25 - PDCA e a estruturação do modelo do protocolo de segurança.....	47
Figura 26 - Tomadas de decisão conservadoras quando as incertezas permanecem.....	48
Figura 27 - Evolução da cava nos últimos 10 anos.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Arrecadação CFEM em 2024.	17
Tabela 2 - Principais atividades no protocolo de segurança.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	- Agência Nacional de Mineração
CVRD	- Companhia Vale do Rio Doce
EPC	- Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	- Equipamento de Proteção Individual
FNDCT	- Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FS	- Fator de Segurança
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
INA	- Indicador de Nível D'água
InSAR	- <i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
ISSO	- <i>International Organization for Standardization</i>
LIDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i>
MAC	- Mina de Águas Claras
MG	- Minas Gerais
MME	- Ministério de Minas e Energia
MCT	- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
NA	- Nível de água
NBR	- Norma Brasileira
PAE	- Plano de Ação de Emergência
PDCA	- <i>Plan-Do-Check-Act</i>
PGP	- Planejamento e Gestão da Produção
PIB	- Produto Interno Bruto
POP	- Procedimento Operacional Padrão
PGR	- Programa de Gestão de Riscos
Pz	- Piezômetros
ROM	- <i>Run of Mine</i>
UTM	- Usina de Tratamento de Minérios
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivo	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Importância da Mineração de ferro para economia brasileira	16
2.2	Estruturas Geotécnicas.....	18
2.3	Instrumentação e Monitoramento Geotécnico	20
2.4	Procedimento Operacional Padrão (POP).....	22
2.5	Planejamento e Gestão da Produção	23
2.6	PDCA.....	24
2.7	Definição de Perigo	25
2.8	Gestão de Segurança: Princípio da Precaução	26
2.9	Incertezas Associadas - <i>Bridging the gaps</i>	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Metodologia da Pesquisa	30
3.2	Metodologia do Modelo de Protocolo de Segurança.....	32
4	MODELO DO PROTOCOLO DE SEGURANÇA	33
4.1	Por que de um Protocolo de Segurança?	33
4.2	Modelo de Protocolo de Segurança	34
4.3	Mapas.....	36
5	RESULTADOS	39
5.1	Gerenciamento e Principais Atividades no local	39
5.2	Planejamento Estratégico e Acompanhamento de Aderência Operacional....	42
5.3	Protocolo de Segurança e o Princípio da Precaução.....	45
5.4	Protocolo de Segurança e o Ciclo PDCA	47

5.5	Incertezas Associadas no Modelo do Protocolo de Segurança.....	48
5.6	Análise Geral do funcionamento do protocolo	49
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade de grande relevância econômica, mas também de elevado potencial de riscos, tanto para os trabalhadores quanto para o meio ambiente e as comunidades vizinhas. Acidentes envolvendo instabilidade de taludes, ruptura de barragens e/ou pilhas de estéril/rejeito podem gerar impactos humanos, ambientais e financeiros, ressaltando a importância de medidas preventivas e planos de resposta bem estruturados.

As áreas de geotecnia e gestão de riscos exercem papel central na prevenção e mitigação de eventos indesejados. Isso, através de monitoramento e avaliação contínua das estruturas, na aplicação de tecnologias para detecção precoce de problemas, bem como na proposta de estudos para as peculiaridades de cada mina. Dentre os estudos, os modelos de protocolos de segurança específicos para cada mina.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um modelo de protocolo de segurança para um empreendimento mineiro, com dados hipotéticos, focado em uma cava com finalidade de disposição de rejeitos e captação de água.

Apesar de ser um sistema fechado, a cava com rejeitos, envolve complexidades geotécnica e hidráulicas. Que, por sua vez, requer medidas relacionadas ao planejamento estratégico (para nortear as projeções de enchimento e captação de água), a geotecnia (com rotinas de inspeção e critérios de estabilidade) e, por fim, a gestão de riscos (com princípios e procedimentos para tratar possíveis eventos).

Com o protocolo, espera-se a concepção de diretrizes claras para tomadas de decisão e repostas a eventos indesejados. O que reforça a importância de uma abordagem técnica e preventiva voltada à gestão segura. Tal iniciativa, atende não apenas a requisitos técnicos e legais, mas também aos princípios de ESG, cada vez mais demandados por investidores e órgãos reguladores, (Silva *et al.*, 2024).

Flores (2012), traz informações sobre a Mina de Águas Claras (MAC), Figura 1, localizada no município de Nova Lima (MG), que teve suas atividades de lavra e beneficiamento de minério de ferro encerradas em 2002, após aproximadamente 30 anos de operação. Durante esse período, a mina produziu cerca de 290 milhões de toneladas de hematita de alto teor. A mina teve seu fechamento planejado de forma antecipada e estruturada, sendo considerado um dos projetos mais relevantes do Brasil. Incorpora ações de

descomissionamento, reabilitação ambiental e monitoramento contínuo, com forte integração entre aspectos técnicos, ambientais e sociais

Figura 1 - Enchimento da cava da Mina de Águas Claras (MAC).



Fonte: CVRD e Marcelo Mota (disponível em: <https://bcmfarquitos.com/blog/portfolio/mina-de-aguas-claras/>).

Ainda segundo o autor, Flores (2012), um dos principais aspectos do fechamento da Mina de Águas Claras foi a decisão de enchimento da cava final com água proveniente do próprio lençol freático, rebaixado durante a fase operacional. Atualmente a cava conta com um dos maiores lagos artificiais do Brasil, com mais de 200 metros de profundidade e capacidade estimada de 59 milhões de metros cúbicos de água. Paralelamente, foram implementados programas de revegetação, estabilização de taludes, drenagem e monitoramento ambiental, incluindo controle da qualidade da água, estabilidade geotécnica e recuperação paisagística.

Para o presente trabalho, o enchimento da cava apresenta semelhanças conceituais com o fechamento da Mina de Águas Claras ao utilizar a cava como estrutura de armazenamento, porém com finalidades distintas. Enquanto na MAC o enchimento teve caráter de reabilitação ambiental, no caso analisado o enchimento possui finalidade industrial, voltada à disposição de rejeitos e à captação de água para recirculação no processo produtivo.

A condição existente na cava, objeto de estudo do presente trabalho, requer controles operacionais alinhamentos com o planejamento estratégico, monitoramento geotécnico, comportamento hidrogeológico e hidrológico, bem como conceitos de gestão de riscos.

Assim, o modelo do protocolo tem a finalidade de estabelecer padronização para a execução de atividades, como critérios de acesso e rotinas de inspeção, garantindo segurança operacional. Além de controle de riscos e sustentabilidade, ao longo da vida útil da operação, tendo em vista a dinâmica do local (enchimento da cava projetado ao longo dos anos), que deve ser incorporado nas atualizações do documento.

1.1 Justificativa

Acidentes em empreendimentos minerários, frequentemente associados a falhas na gestão de riscos geotécnicos, podem provocar perdas humanas, danos ambientais de grande magnitude e severos impactos financeiros e reputacionais às empresas. Armada (2020), apresenta os casos recentes de desastres na mineração, como de Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019.

Nesse momento histórico brasileiro, envolvendo acidentes, torna-se importante o desenvolvimento de ações para respostas a eventos ou, que os minimizem. Um modelo de protocolo de segurança, específico para estruturas geotécnicas nas mineradoras, tem o caráter de embasar tomadas de decisão e boas práticas para padronizar processos. Sendo esse a proposta do presente trabalho, que tem a finalidade de apresentar um modelo hipotético para uma cava, utilizada como estrutura de armazenamento de rejeitos e captação de águas, destinada ao tratamento de minérios.

Importante ressaltar que, a projeção de enchimento pelo rejeito e o volume de água no reservatório devem ser relacionados com a geotecnia da cava, o que torna complexo esse sistema. Isso, pois, a gestão desse enchimento reflete nas condições de estabilidade que devem ser monitoradas, bem como aos processos operacionais, como por exemplo, mudança de acessos e locais de equipamentos. Logo, as definições claras de responsabilidades, rotinas de inspeção, planos de contingência e mecanismos de respostas rápidas são importantes na implementação do protocolo de segurança da estrutura.

1.2 Objetivo

Apresentar o Modelo de um Protocolo de Segurança para Mineração, hipotético, de uma empresa do segmento de minério de ferro, com o foco em uma cava utilizada para disposição de rejeitos e captação de água. Os objetivos específicos são:

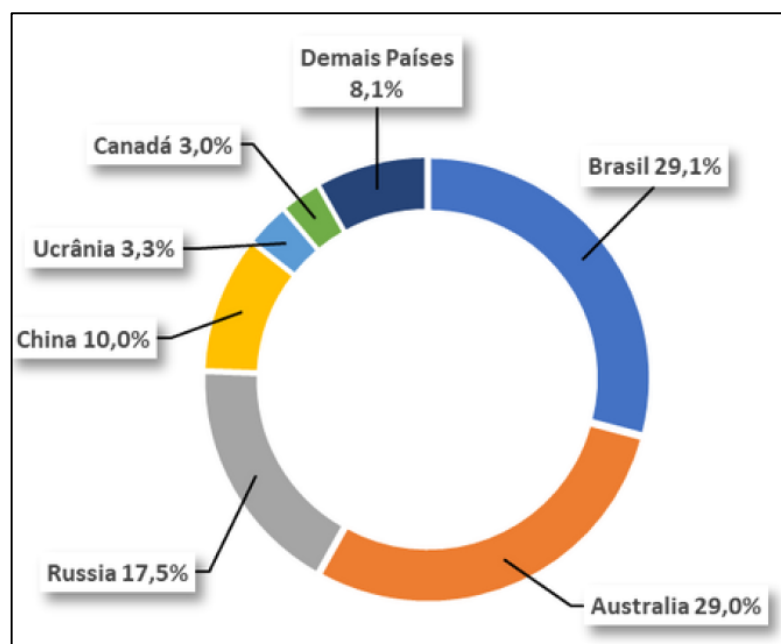
- I. Apresentar as principais estruturas geotécnicas em uma mina, focado em uma cava com finalidade de disposição de rejeitos e captação de água;
- II. Propor o Modelo de um Protocolo de Segurança e os mapas relacionados;
- III. Mapear as principais áreas e atividades relacionadas à cava;
- IV. Apresentar os controles e aderência do planejamento estratégico;
- V. Informar sobre as incertezas associadas e a necessidade de contínua revisão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância da Mineração de ferro para economia brasileira

Segundo Moreira De Sousa *et al.* (2025), diretor da Agência Nacional de Mineração, em 2024, a produção nacional de ferro, beneficiado, totalizou 447,2 milhões de toneladas (teor médio de 62,2% de Fe), aumento de 2,4%, em relação ao ano anterior. A produção esteve concentrada nos estados de Minas Gerais (57,0%), Pará (39,7%) e Mato Grosso do Sul (2,8%). Esses números demonstram a importância do minério de ferro para a economia brasileira. O país está entre os maiores produtores e detentores de reservas mundiais, Figura 2. Essa posição fortalece a balança comercial nacional e garante arrecadações de tributos.

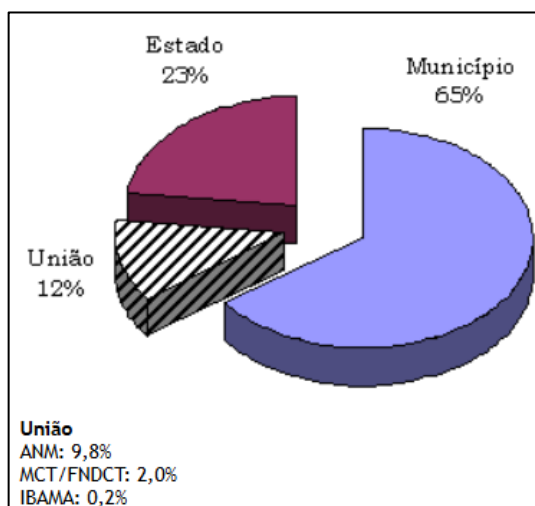
Figura 2 - Principais Reservas Mundiais de Ferro (2024).



Fonte: Brasil: ANM (disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2025/sumario-2025.pdf>).

O IBRAM, apontou que Minas Gerais é um dos principais estados mineradores do país, concentrando grande parte da produção nacional de ferro. Municípios como Mariana, Itabirito e Congonhas se destacam não apenas pela extração, mas também pela arrecadação de tributos como a Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM). Esses recursos são fundamentais para os cofres públicos locais, permitindo investimentos em infraestrutura, saúde e educação. A Figura 3, apresenta o gráfico com os valores de distribuição (estados, municípios e órgãos da união) e a Tabela 1, apresenta um quadro resumo do fechamento da CFEM no ano de 2024.

Figura 3 - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – CFEM.



Fonte: ANM (disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/arrecadacao/extra/Relatorios/distribuicao_cfem.aspx)

Tabela 1: Arrecadação CFEM em 2024.

Mês	Estado	Município
Janeiro	82.612.787,50	330.451.149,98
Fevereiro	109.880.390,69	439.521.562,75
Março	92.629.178,66	370.516.714,62
Abril	87.047.562,36	348.190.249,42
Maio	85.981.085,69	343.924.342,78
Junho	81.141.054,95	324.564.219,82
Julho	85.823.412,14	343.293.648,55
Agosto	98.695.544,57	394.782.178,30
Setembro	98.456.924,73	393.827.698,91
Outubro	103.171.805,87	412.687.223,46
Novembro	92.065.263,66	368.261.054,66
Dezembro	89.232.430,77	356.929.723,07
2024	1.106.737.441,59	4.426.949.766,32

Fonte: ANM (disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/arrecadacao/extra/Relatorios/distribuicao_cfem.aspx, acesso 20/11/2025)

Carvalho (2022), representante do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, apontou que a mineração exerce um papel central na economia nacional e de acordo com um estudo recente do Ipea em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), a cadeia produtiva da economia mineral respondeu entre 2,5% e 4% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil nas últimas décadas. Assim, conclui-se que a mineração não só abastece cadeias produtivas diversas, da siderurgia à construção civil, como também sustenta uma parcela significativa da economia nacional, justificando o contínuo investimento, regulação e aprimoramento das práticas ambientais e de segurança no setor.

Apesar dos benefícios econômicos, a mineração também impõe desafios socioambientais. Por isso, é essencial que o setor evolua com práticas sustentáveis, tecnologias de monitoramento aprimoradas e sólida gestão dos riscos. Isso, pois, a mineração deve ser vista como uma atividade essencial, porém que precisa ser exercida de forma segura, respeitando os limites ambientais e os direitos das comunidades afetadas.

É importante a implementação de melhorias na segurança, como o Modelo de um Protocolo de Segurança. Bem como, investimentos em inovação, fiscalização eficiente e diálogo com a sociedade. Que por sua vez são formas de garantir que os benefícios da mineração sejam sustentáveis.

2.2 Estruturas Geotécnicas

Gerscovich (2023), relaciona talude com a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo e/ou rocha. Taludes podem ser naturais, também denominados encostas, ou artificiais, construídos pelo homem, como em aterros (barragens de terra, aterros de estrada, pilhas) e cortes (cavas a céu aberto e cortes em estradas).

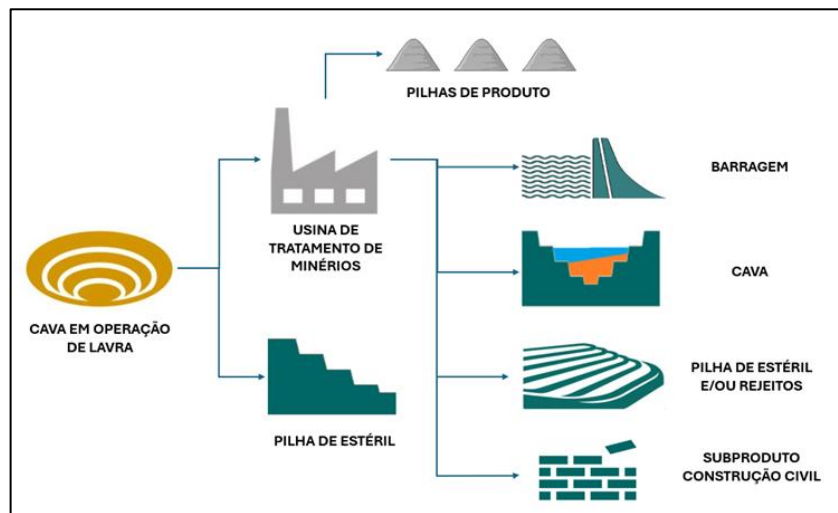
Dentro de uma mina, as principais estruturas geotécnicas, que envolvem os elementos taludes, são a cava, onde ocorre a lavra do minério e estéril, as pilhas de estéril, onde ocorre a disposição do estéril (seja ele rico ou franco) e as barragens de disposição de rejeito, que por sua vez, estão sendo substituídas por novas alternativas (como as pilhas de rejeito e enchimento de cavas).

Além disso, há estruturas como os aterros, estradas de mina, pilhas de produto, dentre outras, que também requerem atenção geotécnica. Os aterros, por exemplo, são usados para nivelamento de acessos e áreas para equipamentos e/ou instalações. Todas essas estruturas são interdependentes e fazem parte de um sistema geotécnico integrado que sustenta a operação segura e eficiente da mineração.

De maneira geral e simplificada, a estabilidade de taludes avalia o risco de movimento de massa em taludes naturais ou artificiais. A análise de estabilidade, utiliza-se muitas das vezes de uma abordagem determinística, onde o Fator de Segurança (FS) é calculado, comparando as tensões cisalhantes com a resistência ao cisalhamento. Se o FS for igual a 1,0, o talude está prestes a romper; se o FS for maior que 1, o talude é considerado estável (Gerscovich, 2023). No Brasil, a NBR 11682 trata da estabilidade de encostas e orienta esse processo.

Na Figura 4 é apresentado, de forma simplificada, o fluxo de produção em uma mina a céu aberto. Os principais elementos desse processo incluem o ROM (*Run of Mine*), que é o material bruto extraído da mina e enviado à usina para ser processado, e o estéril, que é disposto em pilhas. Após o beneficiamento, na Usina de Tratamento de Minérios (UTM), e a obtenção do produto (pilhas produtos) destinado à comercialização, são gerados os rejeitos, que podem ser destinados a diferentes estruturas, como barragens, cavas para enchimento e pilhas de estéril e/ou rejeitos. Borges *et al.* (2019), destaca uma inovação recente, relacionado a produção de subprodutos a partir dos rejeitos, com aplicação potencial na construção civil, agregando valor ao que antes era considerado resíduo.

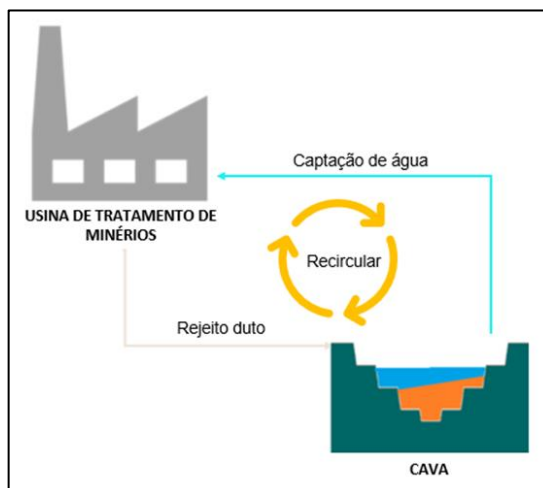
Figura 4 - Fluxo simplificado de um processo minerário.



Fonte: (Autor, 2025).

Para o presente estudo, a estrutura geotécnica em questão se trata de uma cava, sem operações de lavra (exploração de minério e/ou estéril), cuja finalidade principal está sendo a disposição de rejeitos e o sistema de captação de água, Figura 5. Esse sistema, que faz recircular a água, proporciona o tratamento de minérios na UTM, da mina em questão.

Figura 5 - Sistema de disposição de rejeitos e captação de água em uma cava.



Fonte: (Autor, 2025).

2.3 Instrumentação e Monitoramento Geotécnico

A instrumentação e o monitoramento geotécnico são fundamentais para garantir a segurança e a performance das estruturas geotécnicas. A evolução da tecnologia tende a incrementar ganhos a esse sistema (Hou, 2018). Esse monitoramento, periódico, permite com que equipes especializadas possam compreender o comportamento das estruturas ao longo do tempo, identificar variações e antecipar possíveis situações de risco, assegurando a integridade física e operacional dos empreendimentos.

Chandarana (2016) e outros autores, relacionam a instrumentação geotécnica como o uso de dispositivos como piezômetros, inclinômetros, extensômetros e células de carga, que fornecem dados sobre deformações, deslocamentos, pressões intersticiais e tensões internas.

A instrumentação hidrogeológica, tem como objetivo monitorar o comportamento da água subterrânea, utilizando piezômetros e medidores de nível d'água. Com base nesses dados, a geotecnia pode verificar essa influência na estabilidade dos taludes. Além disso, na hidrologia, os medidores de vazão são empregados para mensurar a quantidade de água superficial em bacias e sistemas de drenagem, auxiliando no estudo de bacias hidrográficas, bem como na percolação de águas superficiais em empreendimentos mineiros.

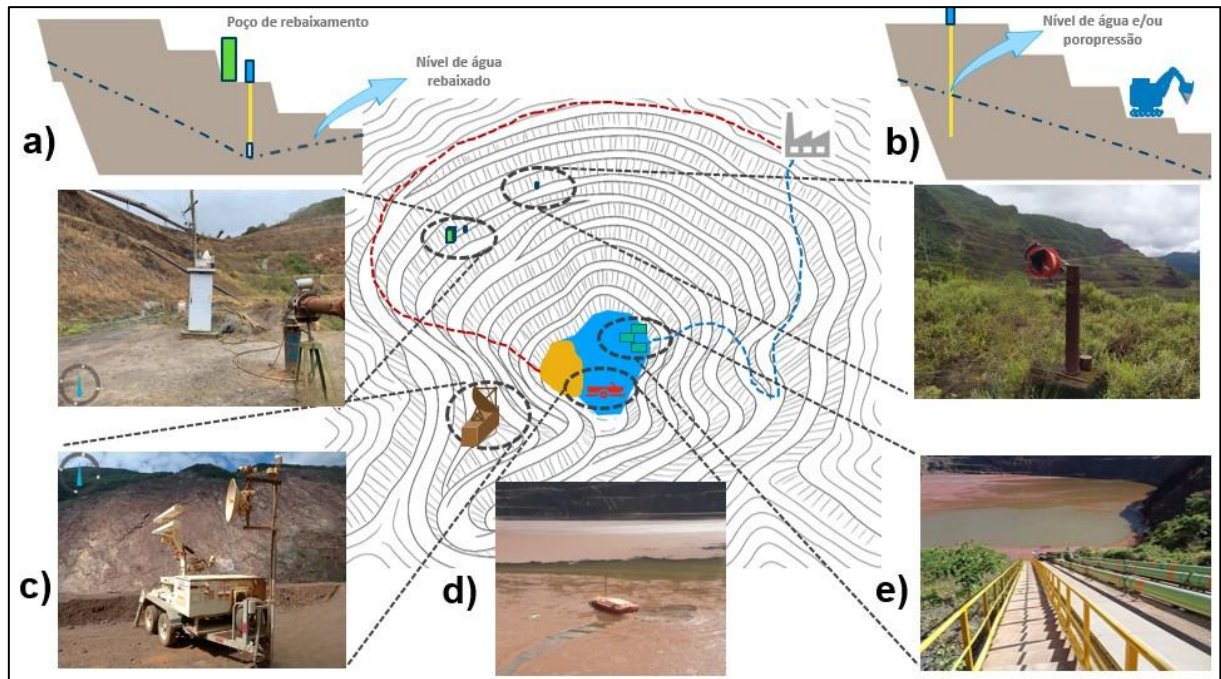
O monitoramento estrutural, dos ativos geotécnicos, pode ser a partir de tecnologias modernas, como radares orbitais (InSAR), radares terrestres, estações totais robóticas, drones e sistemas planialtimétricos (Lidar). A partir desses equipamentos é possível acompanhar deformações milimétricas, identificar indícios de trincas e deslocamentos, além de fornecer alertas para mitigação de riscos. Dessa forma, com a integração desses dados no sistema de

alerta e modelos preditivos é possível proporcionar tomadas de decisão rápidas e eficazes, reduzindo a probabilidade de falhas e garantindo maior confiabilidade operacional, (Chandarana,2016).

Outra ferramenta de monitoramento, que pode ser utilizada, principalmente no contexto de uma cava com enchimentos de rejeitos e reservatório de água, é a topobatimetria (ou batimetria). Esse levantamento, tem o sistema de sonar (*Sound Navigation and Ranging*) para enviar pulsos de som que se propagam pela água até atingir o fundo e refletir para sensores no barco. Assim, calcula a profundidade do lago (Wilson; Singh; Sethi, 2022). O uso de barcos remotos para realizar a batimetria é vantajoso, pois reduz o risco de exposição humana e pode cobrir áreas de difícil acesso, além de ser mais econômico e eficiente em termos de operação.

A Figura 6 apresenta o monitoramento esquemático de uma cava por meio de radar terrestre, que constitui uma das principais ferramentas para análise da estabilidade geotécnica de taludes. A figura também apresenta os instrumentos hidrogeológicos, como o Indicador de Nível d'Água (INA), que fornece informações contínuas sobre a variação do nível do subterrâneo, e/ou Piezômetros (Pz) com finalidade de mensurar a poropressão. Ainda na hidrogeologia, a figura apresenta os poços com finalidade de rebaixamento e controle do nível freático. As balsas, equipadas com bombas, possibilitam o manejo do volume de água armazenada no reservatório, garantindo a manutenção de níveis operacionais seguros e compatíveis com as condições geotécnicas da cava. E por fim, a figura apresenta a atividade de topobatimetria para mapear o leito, obter o nível e a profundidade do reservatório.

Figura 6 - a) Poços de rebaixamento, b) Indicador de Nível d'água (INA) ou Piezômetro (Pz), c) radar terrestre, d) batimetria e e) sistema de captação de água.



Fonte: (Autor, 2025).

Em síntese, a existência de instrumentação, monitoramento e análise geotécnica possibilitam uma gestão ativa das estruturas. Que, por sua vez, assegura conformidades com normas regulatórias, diretrizes da ANM e as recomendações internacionais. Além disso, para os empreendimentos minerários, esse acompanhamento fornece dados ao planejamento estratégico, para melhorias nas tomadas de decisão, bem como informações para manter a gestão de risco dos ativos.

2.4 Procedimento Operacional Padrão (POP)

A adoção de POP's é importante em organizações que lidam com atividades críticas ou que exigem controle rígido de segurança, como indústrias, laboratórios, hospitais e operações minerárias. Slack (2018), e outros autores, apontam que a formalização de procedimentos contribui para a confiabilidade operacional, pois estabelece parâmetros claros de execução, responsabilidades e critérios de desempenho.

Em ambientes de risco, como o setor mineral, os POP's são fundamentais para orientar rotinas de inspeção, manutenção, controle de acesso, operação de equipamentos e resposta a emergências, reduzindo a probabilidade de incidentes e garantindo a conformidade com normas regulatórias.

Além de promover segurança e eficiência, os POP's desempenham papel importante no treinamento e capacitação de equipes. Um procedimento bem elaborado serve como guia instrucional para novos trabalhadores e como base para reciclagens periódicas. Paladini (2019), reforça que os POP's devem ser documentos acessíveis, objetivos e constantemente revisados, garantindo que reflitam as melhores práticas e as necessidades atuais da organização. Dessa forma, não são apenas documentos técnicos, mas também instrumentos que fortalecem a cultura organizacional.

A eficiência dos POP's depende não apenas de sua elaboração, mas também de sua implementação, atualização e monitoramento contínuo. A participação das equipes na revisão e na aplicação dos procedimentos aumenta o nível de engajamento e assegura que o documento esteja alinhado à realidade operacional. Conforme a ABNT NBR ISO 9001, 2015, procedimentos documentados devem ser controlados, revisados periodicamente e integrados ao sistema de gestão da qualidade, garantindo rastreabilidade e melhoria contínua. Assim, os POP's representam uma ferramenta essencial para assegurar padronização, reduzir riscos e promover excelência operacional.

O presente trabalho, ao apresentar um protocolo de segurança hipotético, para uma cava com disposição de rejeitos, configura-se como um Procedimento Operacional Padrão (POP). Isso, pois, estabelece de forma estruturada, sequencial e padronizada as atividades necessárias para garantir a segurança operacional e geotécnica da área. Dessa forma, o documento serve como instrumento de treinamento, padronização e melhoria contínua, alinhado aos princípios de gestão da qualidade e prevenção de riscos.

2.5 Planejamento e Gestão da Produção

Tubino (2009), e outros autores, apontam o planejamento e gestão da produção (PGP) como uma das bases da gestão empresarial moderna, sendo responsável por coordenar os recursos, processos e prazos que garantem o funcionamento eficiente de uma organização. Sua importância se relaciona na capacidade de alinhar a demanda do mercado com a capacidade produtiva da empresa, evitando desperdícios, ociosidade de equipamentos e gargalos operacionais.

O PGP é o elo entre o planejamento estratégico e a execução prática das operações, permitindo que os objetivos de longo prazo sejam traduzidos em planos de ação concretos e mensuráveis. Assim, o sucesso de qualquer empreendimento minerário depende diretamente da qualidade do planejamento realizado em seus níveis estratégico, tático e operacional.

Slack (2018) e outros autores, resumidamente, relacionam o planejamento estratégico como responsável por definir o rumo da organização a longo prazo, estabelecendo metas, políticas e diretrizes que orientam suas decisões fundamentais. O planejamento tático, responsável por transformar essas diretrizes em planos de médio prazo, envolvendo áreas funcionais como produção, manutenção, logística e meio ambiente. E, por fim, o planejamento operacional que atua no curto prazo, e é responsável por detalhar as ações necessárias para que a execução ocorra conforme o previsto, garantindo eficiência e segurança.

Em conjunto, esses níveis de planejamento, permitem uma visão sistêmica do processo produtivo, assegurando que todos os setores trabalhem de forma integrada e coerente com os objetivos organizacionais.

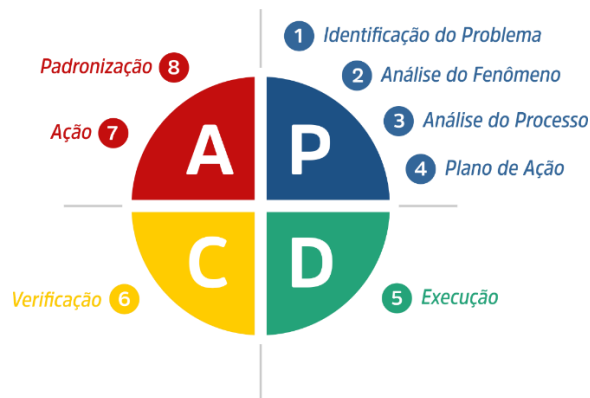
No contexto da mineração, em especial para uma cava com finalidade de disposição de rejeitos, o planejamento estratégico deve estar em conformidade com o operacional para medir a aderência do enchimento pelo rejeito na estrutura. Além disso, os dados relacionados ao volume e níveis de água (profundidade) são relacionados a necessidade para o tratamento de minérios na UTM. Sendo que, para esses dados, o longo prazo também contribui para mensurar necessidades, como o volume de água mínimo (estoque) para enfrentar períodos de estiagem (sazonalidades).

O alinhamento entre as metas estratégicas da empresa e o controle das operações é fundamental para garantir produtividade, sustentabilidade e segurança. Portanto, é importante formar uma base de dados que permita a tomada de decisão preventiva e eficiente.

2.6 PDCA

Criado a partir dos estudos de Shewhart (1931) e difundido por Deming (1986), o ciclo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*), Figura 7, propõe uma abordagem sistemática para planejar, executar, verificar e corrigir ações, garantindo maior controle, eficiência e previsibilidade nos resultados. Seu principal objetivo é reduzir falhas, padronizar processos e aprimorar o desempenho organizacional de forma contínua e estruturada. Esse método de gestão é amplamente utilizado para promover a melhoria contínua de processos, sendo aplicado em diferentes áreas como indústria, serviços, gestão ambiental e segurança do trabalho.

Figura 7 - Ciclo PDCA.



Fonte: O que é o ciclo PDCA (disponível em: <https://voitto.com.br/blog/artigo/o-que-e-o-ciclo-pdca>)

Em síntese, a primeira etapa, planejar (*plan*), consiste na identificação de problemas, definição de objetivos, análise de causas e estabelecimento de metas e métodos para alcançá-las. Já a fase executar (*do*) corresponde à implementação do que foi planejado, geralmente em escala controlada, permitindo o acompanhamento das ações propostas. A etapa verificar (*check*) envolve a análise dos resultados obtidos, comparando-os com os objetivos estabelecidos, a fim de identificar desvios, falhas ou oportunidades de melhoria. E, por fim, a etapa agir (*act*) tem como foco a padronização das ações que apresentaram resultados satisfatórios ou a correção dos desvios identificados, (Deming, 1986).

Importante destacar que, caso os objetivos não tenham sido alcançados, o ciclo é reiniciado com novos planejamentos, promovendo ajustes contínuos. Dessa forma, o PDCA não deve ser visto como um processo pontual, mas como um ciclo dinâmico e permanente de melhoria, essencial para organizações que buscam eficiência operacional, gestão de riscos e sustentabilidade. Em contextos como a mineração, o PDCA se destaca como uma ferramenta para garantir controle, aprendizado organizacional e tomada de decisão baseada em dados.

2.7 Definição de Perigo

Costa (2017), e outros autores, abordam o conceito de perigo referente a qualquer fonte, situação ou condição com potencial para causar danos à saúde, à integridade física ou ao meio ambiente. Trata-se de algo inerente ao ambiente ou à atividade, independentemente de ocorrer ou não um acidente. O perigo, portanto, é uma característica presente no local (ele existe no ambiente e precisa ser identificado para que medidas preventivas sejam adotadas).

Rodrigues (2019) aborda sobre o risco e como ele pode ser interpretado, relacionando a probabilidade de que o perigo se concretize e cause danos (severidade). Além disso, ele depende de fatores como frequência de exposição, número de pessoas expostas e gravidade das

consequências. Assim, enquanto o perigo é uma condição estática, o risco é dinâmico e varia conforme as circunstâncias. Por exemplo, um piso molhado representa um perigo; se esse piso estiver em uma área de grande circulação, o risco será alto, mas se estiver em uma área restrita e sinalizada, o risco será baixo. Essa distinção é essencial para priorizar ações de controle. Logo, a associação entre risco e perigo pode ser atribuída com a exposição e/ou probabilidade da ocorrência de um evento não desejado.

Importante destacar que, o risco só existe quando há interação entre pessoas e o perigo identificado, (Rodrigues, 2019). A gestão eficaz de segurança do trabalho envolve identificar os perigos, avaliar os riscos associados e implementar medidas para eliminá-los ou reduzi-los. Entre essas medidas estão a eliminação do perigo, substituição por alternativas menos perigosas, barreiras físicas, dispositivos de proteção coletiva e uso de Equipamentos de Proteção Individual ou Coletiva (EPI's e EPC's).

A probabilidade, neste contexto, é um parâmetro quantitativo que permite calcular a chance de um evento ocorrer e, assim, avaliar o risco de forma mais precisa. Assim, enquanto o perigo é uma condição estática, o risco é dinâmico e varia conforme as circunstâncias, (Rodrigues, 2019).

Compreender a diferença entre perigo e risco é fundamental para a elaboração de programas de prevenção, como o Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR). E no contexto do presente trabalho, essa base é fundamental para o entendimento e replicação do Modelo de Protocolo de Segurança.

2.8 Gestão de Segurança: Princípio da Precaução

Lima (1993), aborda que a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992 (Rio-92), Figura 8, representou um marco histórico na consolidação de princípios orientadores para a sustentabilidade global.

Entre esses princípios, destaca-se o Princípio da Precaução, consagrado no Princípio 15 da Declaração do Rio, que estabelece que, diante da ameaça de danos graves ou irreversíveis ao meio ambiente, a ausência de certeza científica absoluta não deve ser utilizada como razão para postergar medidas eficazes e economicamente viáveis destinadas a prevenir a degradação ambiental. Essa diretriz reforça a necessidade de uma abordagem preventiva na formulação de políticas públicas e na condução de atividades produtivas, promovendo a integração entre desenvolvimento econômico e proteção ambiental (Lima, 1993).

Figura 8 - Logo da Conferência Rio 92.



Fonte: Eco-92 (disponível em: <https://www.todamateria.com.br/eco-92/>)

O Princípio da Precaução é um conceito fundamental no direito ambiental e na gestão de riscos, que estabelece que, diante da possibilidade de danos graves ou irreversíveis ao meio ambiente ou à saúde humana, a ausência de certeza científica absoluta não deve ser usada como justificativa para postergar medidas preventivas. Esse princípio surgiu como resposta à necessidade de proteger recursos naturais e populações contra impactos que, embora não totalmente comprovados, apresentam indícios significativos de risco (Milaré, 2015).

Machado (2019), e outros autores, apontam que o princípio da precaução se aplica a duas situações bastante distintas entre si: as em que, embora as consequências do agir tecnológico sejam conhecidas, não é possível a atribuição de probabilidades objetivas a cada uma delas; e as em que não são conhecidas todas as consequências do agir. À primeira situação corresponde a disciplina dos riscos potenciais, à segunda, a da ignorância.

De forma resumida, a aplicação do princípio, na prática, implica que governos, empresas e instituições devem adotar políticas e ações preventivas mesmo quando as evidências científicas sobre os impactos não são totalmente conclusivas. Ou seja, prevalece as boas práticas mesmo quando não se tem certeza sobre a sua real necessidade.

No contexto brasileiro, o Princípio da Precaução está previsto na Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992) e incorporado à Lei da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981), além de ser reconhecido em decisões judiciais e normas regulatórias. Sua adoção reforça a responsabilidade compartilhada entre Estado, setor produtivo e sociedade, garantindo que o desenvolvimento econômico ocorra sem comprometer a integridade ambiental e a saúde das gerações presentes e futuras, (Machado, 2019).

A gestão de riscos no setor de mineração, apoia-se em um conjunto de referenciais normativos e técnicos, com especial ênfase na segurança geotécnica e operacional. Entre esses referenciais, destaca-se a ABNT NBR ISO 3001, 2018, norma internacional que estabelece diretrizes para uma gestão de riscos estruturada, integrada e eficaz.

A aplicação de normativos, na mineração, permitem a identificação sistemática de perigos, a avaliação de sua probabilidade e severidade e a implementação de medidas de controle e mitigação, sempre de forma contínua e integrada à gestão corporativa. Além disso, é de fundamental importância além das normas reguladoras a existência de fiscalização.

Para o presente trabalho, o Modelo de Protocolo de Segurança, deve seguir o Princípio da precaução. Isso, pois, esse protocolo busca prever respostas imediatas a situações mapeadas e de potenciais gravidade. Assim, o princípio, no protocolo de segurança, assume papel central, mesmo diante de incertezas ou dados inconclusivos. Ou seja, as ações preventivas devem prevalecer mesmo que com falta de informações ou ainda com busca por confirmações técnicas.

Em suma, adotar critérios conservadores, podem gerar processos mais seguros, proteger vidas e mitigar impactos ambientais. E dessa forma, a utilização desse princípio mostra a postura de maturidade institucional e responsabilidade socioambiental por parte das empresas, que por sua vez relaciona a importância de protocolos que vão além da mera conformidade legal.

2.9 Incertezas Associadas - *Bridging the gaps*

Martins (2019) relaciona que a incerteza é um elemento inerente a qualquer processo de tomada de decisão, especialmente aqueles relacionados a processos complexos nas operações industriais.

No contexto da mineração, as incertezas, por exemplo, se manifestam de diversas formas, como na variabilidade natural dos materiais geológicos, na limitação de dados e/ou monitoramento inconclusivo do terreno e, nas dificuldades em prever eventos como deslizamentos, considerados como movimentos de massa.

Quando há lacunas de informação, como exemplo não se sabe as características laboratoriais da resistência de determinada rocha, é importante adotar métodos que refletem as incertezas, como usar os valores de literatura mais conservadores. Isso significa tomar decisões com base em hipóteses mais restritivas e margens de segurança ampliadas, priorizando a preservação da vida humana e a integridade ambiental.

O conceito de "*Bridging the Gaps*", Figura 9, se refere a esse processo de preenchimento de lacunas de conhecimento, onde as decisões são orientadas para minimizar as incertezas e garantir que as operações ocorram dentro de limites seguros, mesmo na ausência de dados completos ou totalmente confiáveis (Martins, 2019).

Figura 9 - Preenchendo lacunas "*Bridging the gaps*".



Fonte: "*Bridging the gap*". (disponível em: <https://www.freevector.com/vector/bridging-the-gap>)

Portanto, lidar com a incerteza, em atividades minerárias não deve ser visto como uma limitação, mas como uma oportunidade de aprimorar processos e fortalecer a governança operacional. A construção de protocolos de segurança, visa estabelecer soluções para lacunas ("*Bridging the gaps*"), que incorporem o princípio da precaução, aliados a sistemas tecnológicos de monitoramento e análise de dados. Dessa forma evoluir para um modelo mais responsável, resiliente e comprometido com a vida e o meio ambiente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a presente pesquisa, Modelo de um Protocolo de Segurança para Mineração, foram analisados dados de um empreendimento mineiro, no Quadrilátero Ferrífero, cuja exploração de minério de ferro encontra-se inoperante e a cava recebe rejeitos provenientes da Usina de Tratamento de Minérios (ROM de outra mina). Contudo, todos os mapas, gerências, processos e atividades, dentre outros citados, são hipotéticos.

A partir disso, foi possível aplicar os conhecimentos de geotecnia e engenharia de produção, tanto para finalidades de correlacionar o planejamento estratégico com a ocupação da cava, bem como para relacionar o local com os princípios da gestão de riscos.

3.1 Metodologia da Pesquisa

A Figura 10, apresenta de forma detalhada o fluxograma da metodologia da pesquisa. Que relaciona referências bibliográficas diagnóstico situacional, modelo do protocolo e validações.

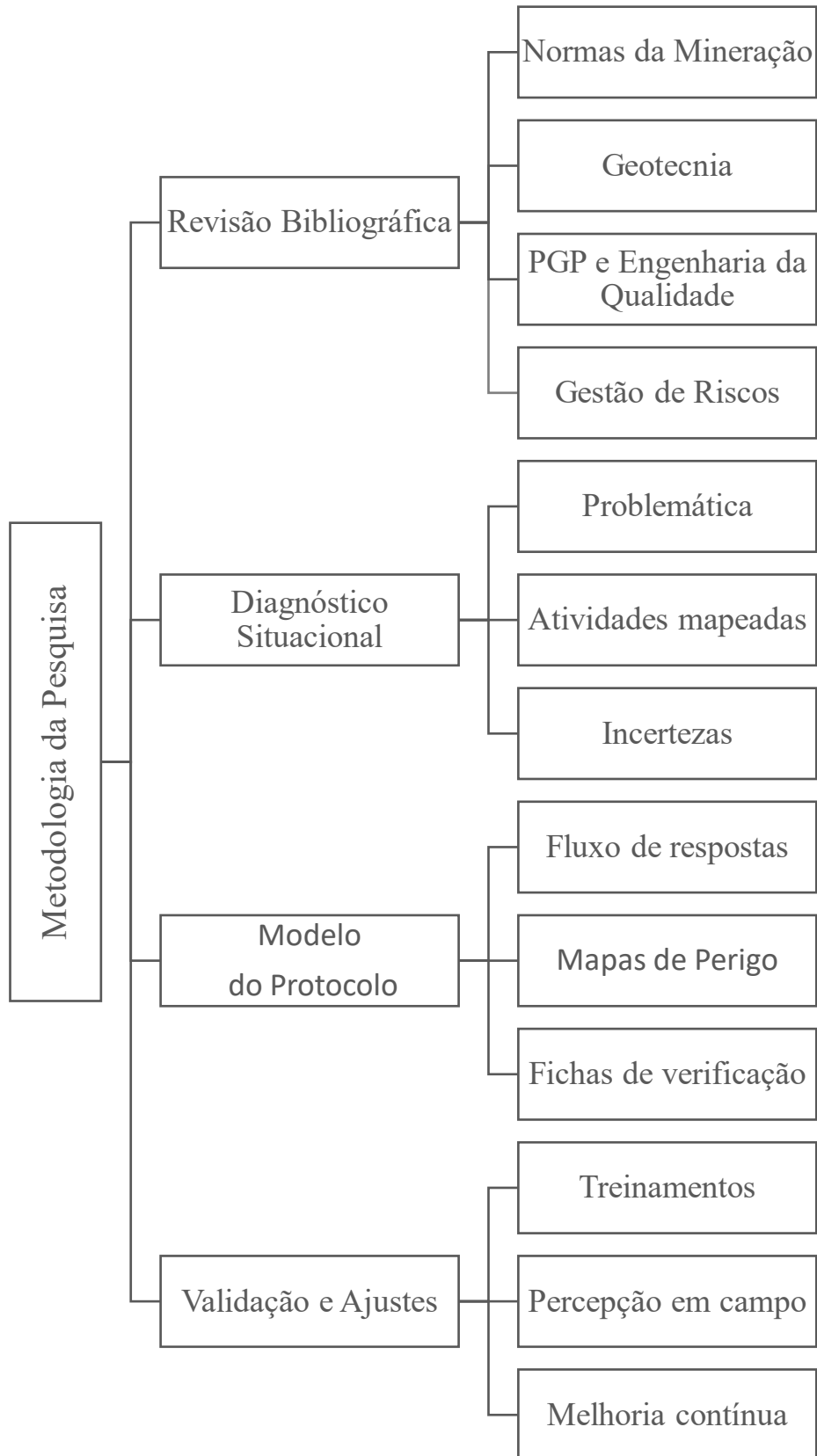
A referência bibliográfica tem a função de trazer conceitos de geotecnia, normativos e, elementos do planejamento e engenharia da qualidade. Isso, para que nos resultados, seja claro a apresentação do modelo e conclusões obtidas a partir do mesmo. Portanto, essa etapa é fundamental para um levantamento que dá sustentação teórica das bases do protocolo.

O diagnóstico situacional, ainda que o modelo apresente dados e mapas hipotéticos, teve a importante função de compreensão dos desafios do negócio relacionados com o enchimento de rejeitos e captação de água em uma cava. Além disso, pode-se entender os principais processos e atividades existentes. Dessa forma, funciona como ponte entre a teoria e a prática.

Ainda que com dados hipotéticos, o modelo do protocolo, tem sua origem nas referências bibliográficas e no diagnóstico situacional do local. Ou seja, nele são apresentados os fluxos de respostas, que definem como a equipe deve agir frente a diferentes cenários; os mapas de perigo, que identificam espacialmente as áreas críticas da cava; e a padronização das rotinas para checagem de pontos antes da execução de atividades. Assim, essa etapa consolida em apresentar o POP com finalidade de execução nos processos locais.

Por fim, a etapa de validação e ajustes tem a função de gerar a melhoria contínua. Isso após, os treinamentos e *feedbacks* pelas equipes em campo. Importante também destacar a característica viva desse documento, o que requer periódicas atualizações.

Figura 10 - Metodologia da Pesquisa.



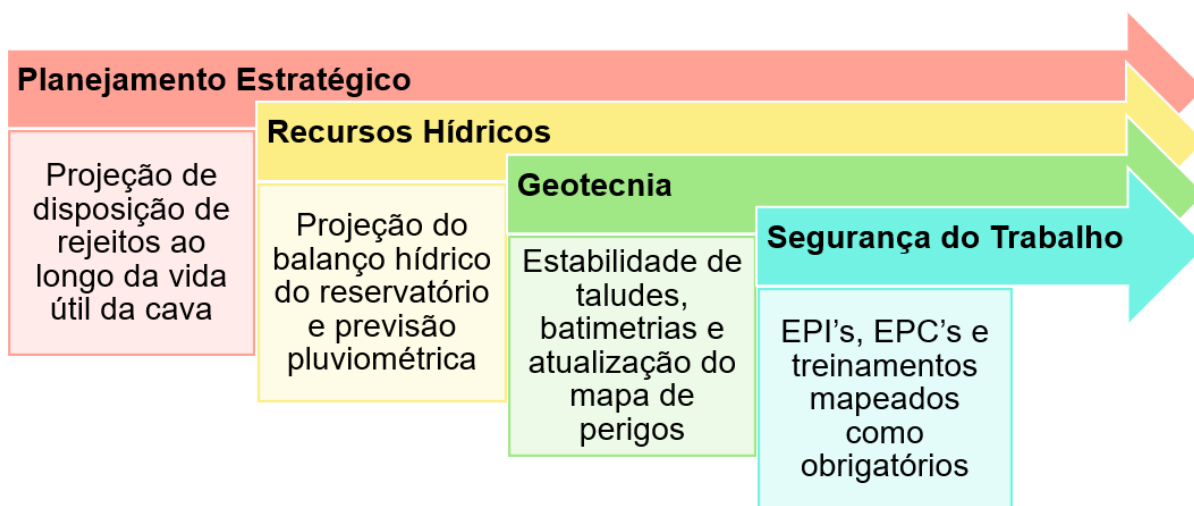
Fonte: (Autor, 2025).

3.2 Metodologia do Modelo de Protocolo de Segurança

A elaboração do Modelo do Protocolo de Segurança requer a integração de diferentes áreas técnicas que, em conjunto, asseguram uma visão abrangente dos riscos e das necessidades operacionais da cava em processo de disposição de rejeitos. Cada área contribui com informações e diretrizes que sustentam decisões estratégicas e operacionais, permitindo que o protocolo seja construído com base em dados confiáveis, previsões realistas e medidas preventivas. Nesse contexto, temas como planejamento estratégico, recursos hídricos, geotecnia e segurança do trabalho tornam-se pilares fundamentais para garantir a eficiência, a confiabilidade e a segurança da operação ao longo de toda a vida útil da cava.

A Figura 11, sintetiza visualmente essas áreas essenciais e seus respectivos tópicos, evidenciando como cada uma delas contribui para o fortalecimento do protocolo. O planejamento estratégico envolve a projeção da disposição de rejeitos ao longo dos anos, garantindo que a cava opere dentro de limites seguros e previamente estabelecidos. Os recursos hídricos abrangem o balanço hídrico do reservatório e as previsões pluviométricas, fundamentais para o controle do nível d'água e prevenção de instabilidades. A geotecnia incorpora estudos de estabilidade de taludes, batimetrias e atualizações periódicas do mapa de perigos, permitindo monitorar a evolução geométrica e estrutural da cava. Por fim, a área de segurança do trabalho define os EPI's, EPC's e treinamentos obrigatórios, assegurando que as equipes atuem de maneira padronizada e em conformidade com as normas vigentes. Dessa forma, a figura demonstra como a articulação dessas áreas sustenta a construção de um protocolo robusto, integrado e alinhado às melhores práticas da indústria minerária.

Figura 11 - Áreas e tópicos fundamentais no Modelo do Protocolo de Segurança.



Fonte: (Autor, 2025).

4 MODELO DO PROTOCOLO DE SEGURANÇA

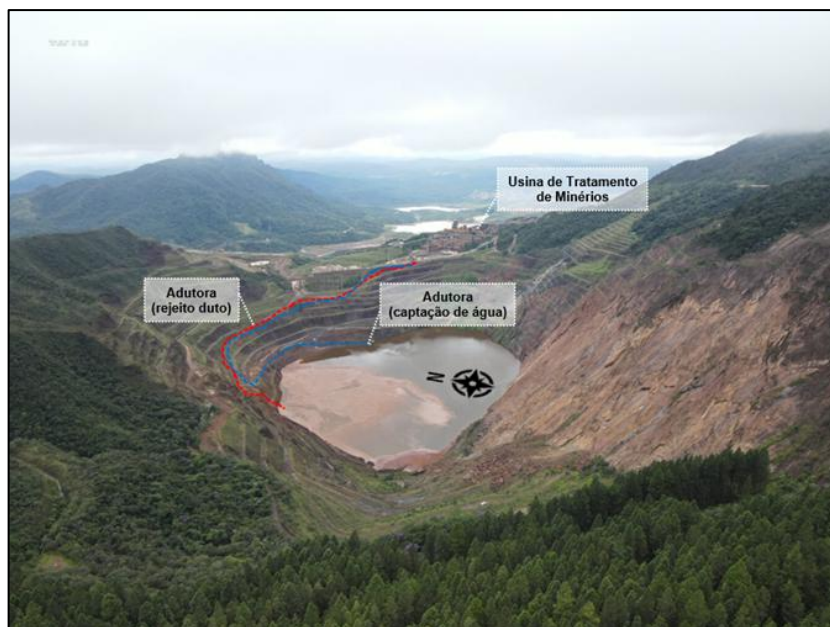
O Modelo de um Protocolo de Segurança, tem base os fundamentos de um Procedimento Operacional Padrão (POP). Ou seja, nada mais é do que um normativo com finalidade de padronização e clareza para as tomadas de decisão antes da execução de determinadas atividades.

Ainda que de origem simples, esse POP, pode ser um elemento fundamental para garantir a cultura organizacional voltada para segurança e redução de riscos. Isso, pois, atividades planejadas tem maior aderência as necessidades e peculiaridades locais, uma vez que se tem de observar o “todo” antes de sua execução.

4.1 Por que de um Protocolo de Segurança?

Em estruturas de mineração, como uma cava com enchimento de rejeitos e captação de água, Figura 12, a implementação de um modelo de protocolo de segurança pode ser importante para dar visibilidade a dinâmica e contextos geotécnicos do local.

Figura 12 - Vista panorâmica de um exemplo de cava com o sistema de recirculação.



Fonte: (Autor, 2025).

Essa dinâmica, se relaciona com o próprio planejamento estratégico que norteia os volumes de enchimento e captação de água pela UTM. Bem como, a dinâmica de fluxo de pessoas e acessos existentes, que com o próprio enchimento da cava tendem a se alterar ao passar dos anos.

No contexto geotécnico, o protocolo de segurança é importante pois nele pode ser apresentado os locais com instabilidade e/ou vulnerabilidade. Sendo que, esses locais também podem ser alterados ao passar dos anos, como por exemplo devido as condições hidrogeológicas e hidrológicas do local.

Dessa forma, o modelo do protocolo de segurança, funciona como instrumento para unificar os processos operacionais existentes no local, com as características geotécnicas da cava. Isso em um contexto dinâmico do qual o planejamento estratégico está a frente nos valores do enchimento e ocupação da cava por rejeitos, bem como na disponibilidade hídrica para abastecer a UTM.

A padronização que o POP gera nas atividades, possibilita que as equipes técnicas estejam engajadas com as características geotécnicas e perigos existentes (mapas de perigo), bem como entender sobre as características dinâmicas do local. Como por exemplo, no intervalo de um ano, devido ao enchimento, os acessos e pontos seguros podem mudar.

Por fim, a existência de um protocolo documentado e auditável aumenta a transparência das operações. Além disso, pode também facilitar a comunicação entre as áreas atuantes no local. Portanto, mais do que uma documento técnico, o modelo de protocolo de segurança representa um engajamento entre as áreas para melhor execução de atividades e percepção de perigo nos locais.

4.2 Modelo de Protocolo de Segurança

O fluxograma na Figura 13 tem por objetivo apresentar o fluxo de respostas e controles necessários antes de qualquer atividade, pelo modelo do protocolo de segurança. Dessa forma, todos os itens devem ser avaliados e no caso de alguma incoerência deve-se levar o ponto para as áreas de monitoramento (geotecnia) e/ou processos operacionais (operação usina e infraestrutura), que são áreas responsáveis pelo local.

Esse fluxo, permite que a execução das atividades ocorra apenas em condições controladas e seguras. O que, por sua vez, promove uma prevenção de riscos. Além disso, respostas necessárias para os itens são importantes para garantir que as medidas mapeadas sejam verificadas. No caso de dúvidas, as áreas correlatas fazem o comunicado e pedem o apoio da geotecnia para melhores avaliações no local.

Figura 13 - Fluxograma do Modelo do Protocolo de Segurança para uma cava.

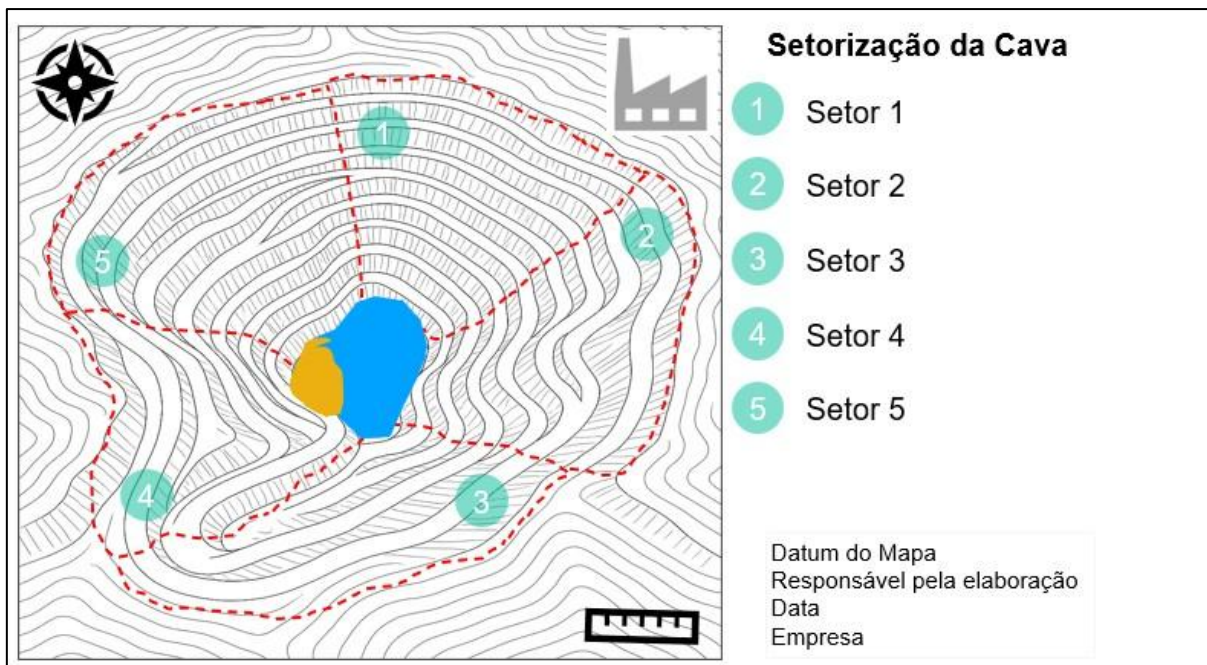


Fonte: (Autor, 2025).

4.3 Mapas

Para a elaboração de mapas, em estruturas geotécnicas como cavas de mineração, deve-se começar com a setorização. Isso é, a partir de informações geológico-geotécnicas e/ou geométricas da topografia do local, traçar regiões imaginárias com determinada similaridade ou atributos que justifiquem seu agrupamento. A Figura 14 apresenta uma setorização, hipotética, em 5 regiões que tem comportamentos que justifiquem essa separação

Figura 14 - Setorização hipotética de uma cava com disposição de rejeitos.



Fonte: (Autor, 2025).

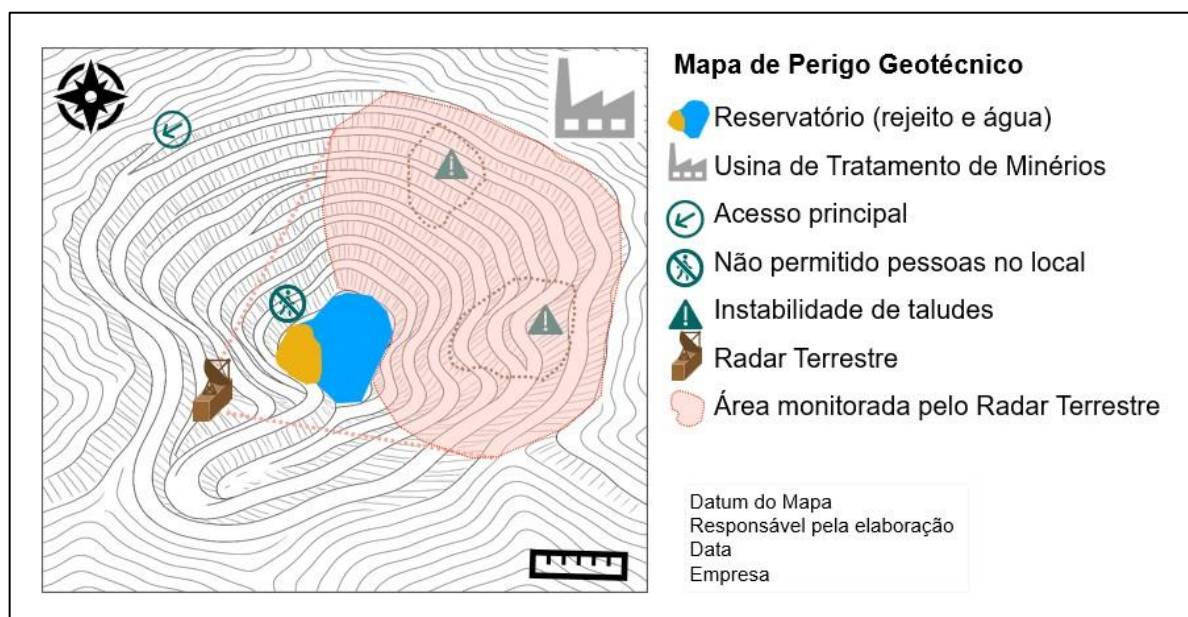
A setorização de uma cava, pode ser realizada para diversas finalidades, sendo que para a geotecnia tem a função de agrupar setores com características e/ou comportamentos semelhantes na estabilidade de taludes. Esse processo é importante também, para facilitar a localização dentro da mina, nos comunicados e para poder focar o monitoramento em determinadas áreas com maior vulnerabilidade, quando existirem.

No contexto de uma cava com enchimento de rejeitos e presença de um reservatório de água, essa setorização contribui para facilitar a visualização de locais com rotas de acessos ou pontos mais seguros. Bem como, levantar áreas que devem ter seu acesso restrito ou totalmente bloqueado. Dessa forma, é possível implementar estratégias de segurança personalizadas para cada área, e definir limites de enchimento.

O mapa de perigo geotécnico, Figura 15, tem a finalidade de apresentar, de forma clara e visual, as localidades que são pontos de vulnerabilidade e/ou monitoradas. Além de,

apresentar, locais passíveis de instabilidade que por sua vez devem permanecer bloqueados até que sejam tratados. Essas zonas de maior vulnerabilidade, dentro do modelo de protocolo de segurança, são informações importantes para o público-alvo que acessa o local, bem como para a gestão do negócio sobre as tomadas de decisão para o futuro do empreendimento.

Figura 15 - Mapa Esquemático de Perigo Geotécnico.

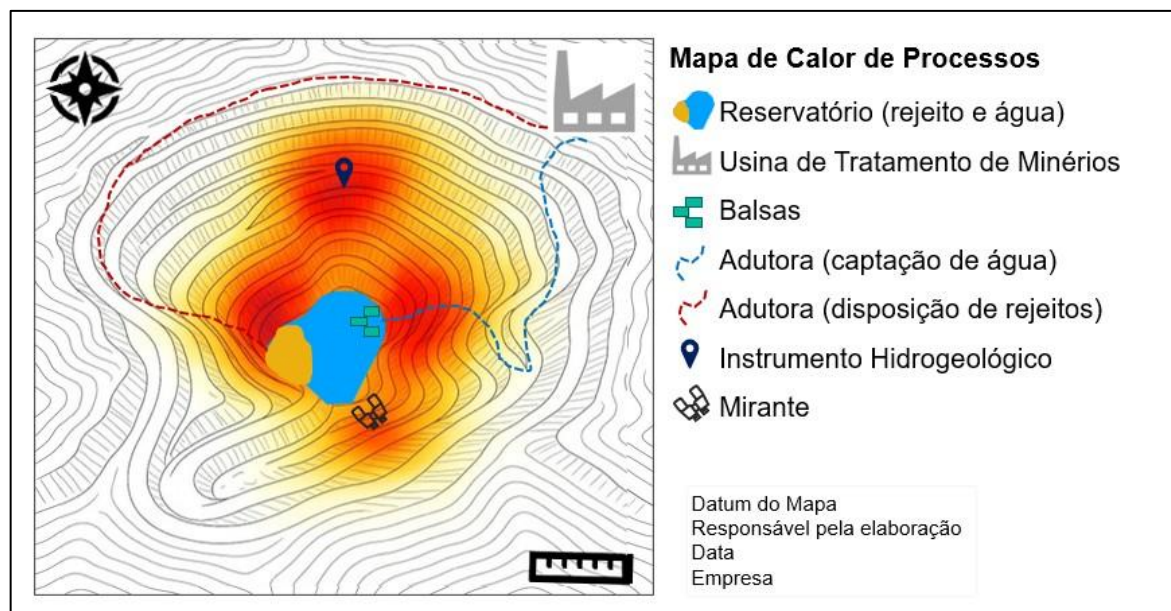


Fonte: (Autor, 2025).

Esse tipo de mapa serve como uma guia, no caso da disposição de rejeitos e captação de água, para alocar rotas, posicionar equipamentos em pontos mais seguros e traçar planos de monitoramento efetivos nas zonas mais vulneráveis. Por exemplo, locais com possibilidade de movimentos de massas devem ser interditados e sem acesso de pessoas. O que contribui para uma visão do negócio de não alocar recursos nessas regiões até que elas sejam tratadas.

A Figura 16 apresenta o mapa dos processos, ou seja, os locais que têm maior acesso de pessoas e equipamentos. Para mensurar esses locais, é possível a partir dos equipamentos fixos (como poços de hidrogeologia e balsas) ou pelo registro das atividades diárias com a devida localização. Esses mapas têm a função de melhor apresentar os pontos com circulação de pessoas (cores quentes) e dessa forma mapear os fluxos operacionais. Sabendo-se os locais de maior exposição, facilita as tomadas de decisão para reduzir ou eliminar o risco.

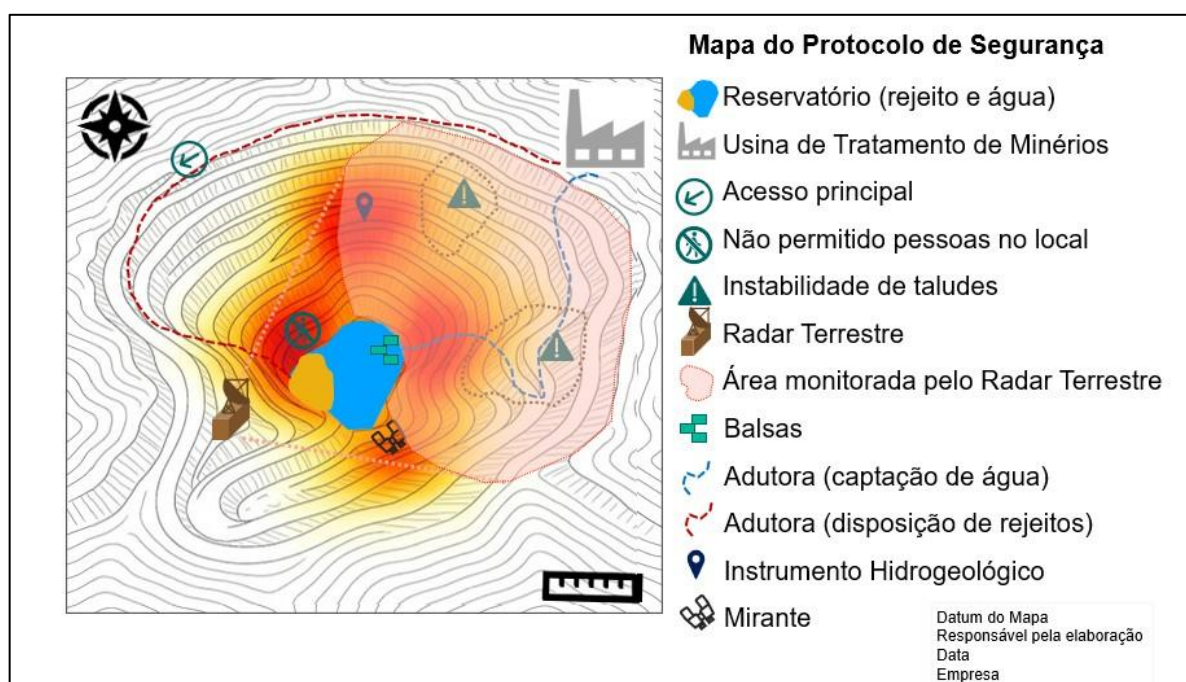
Figura 16 - Mapa esquemático de Calor de Processos.



Fonte: (Autor, 2025).

Por fim, integrando o mapa de perigo geotécnico com o de processos operacionais, tem-se a Figura 17, que é o mapa do protocolo de segurança. Nele são apresentados os pontos de atenção da geotecnia, relacionado com o fluxo e/ou permanência de pessoas em determinados locais. Essa combinação tem a finalidade de tornar visual os locais da cava que requerem maior atenção e tomadas de decisão para reduzir riscos e, manter a eficiência operacional do enchimento de rejeitos e captação de água.

Figura 17 - Mapa esquemático Integrado do Protocolo de Segurança.



Fonte: (Autor, 2025).

5 RESULTADOS

Desde os acidentes com barragens e as novas regras para tais estruturas, no momento histórico do Brasil, as soluções para o destino de rejeitos da mineração vêm sendo discutido nas empresas mineradoras e academia. Nesse cenário, a disposição de rejeitos em cava sem operação, vem sendo uma solução adotada uma vez que as características de confinamento dessa estrutura permitem essa solução.

No contexto do presente estudo, o enchimento com rejeitos de uma cava de mineração é concomitante ao sistema de captação de água. Logo, a cava funciona como um sistema de disposição e armazenamento de água para o processo industrial.

A implantação de um protocolo de segurança tem como objetivo nortear as atividades operacionais na cava junto com o monitoramento e inspeções geotécnicas. Uma vez que, esse protocolo pode ser uma ferramenta para padronizar, gerar interação e acrescentar segurança nas atividades hipotéticas.

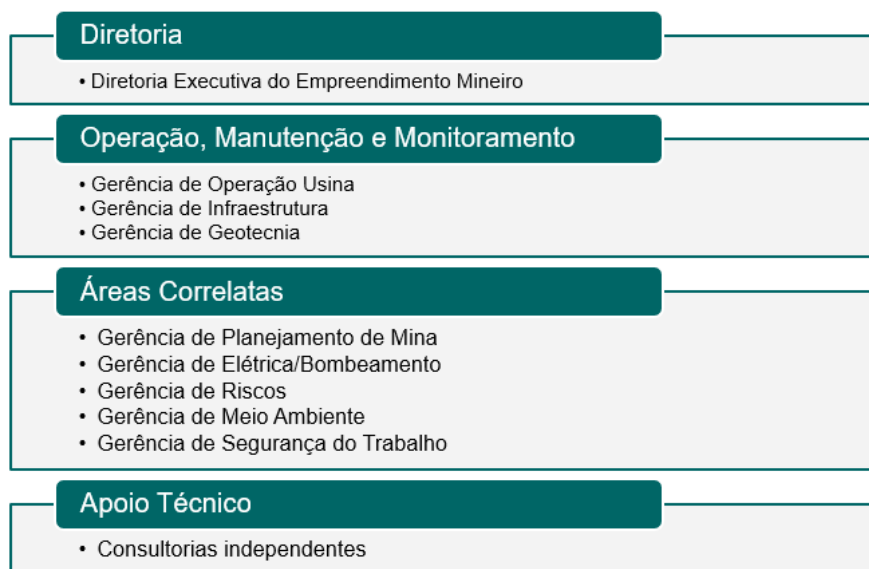
Sendo assim, o resultado desse Procedimento Operacional Padrão, será melhor explicado nos próximos subcapítulos. Mas, como resumo, tem-se o levantamento das áreas envolvidas, o mapeamento de todas as atividades realizadas no local (cava), os fluxos de respostas, as formas de medir a aderência do planejamento estratégico da disposição de rejeitos e nível de água, treinamentos e melhoria contínua (PDCA) e por fim, as incertezas envolvidas.

5.1 Gerenciamento e Principais Atividades no local

Para o protocolo de segurança de uma estrutura geotécnica, o gerenciamento do ativo é de suma importância para apresentar papéis e responsabilidades. Dessa forma, na Figura 18, é apresentado a estrutura organizacional, hipotética, do gerenciamento envolvido em uma cava com disposição de rejeitos e captação de água.

Esse mapeamento das áreas de responsáveis pelas operações na cava tem o intuito de clarear a implementação do modelo de protocolo de segurança. Isso, pois, todas essas áreas são envolvidas na confecção e divulgação desse procedimento. Além disso, com esse fluxograma das áreas envolvidas, é possível gerar uma abordagem integrada e eficaz dos fluxos de respostas e medidas de controle. Que por sua vez, torna eficaz o POP, como uma ferramenta para a prevenção de riscos e gestão de incidentes.

Figura 18 - Estrutura organizacional hipotética.



Fonte: (Autor, 2025).

A Tabela 2 apresenta, da mesma forma, um mapeamento das atividades que as áreas (gerências) envolvidas tem maior foco para as operações na cava em estudo. Essas temáticas estão relacionadas o controle do enchimento e captação de água, monitoramento, controles geotécnicos e medidas de respostas frente a eventos hipotéticos.

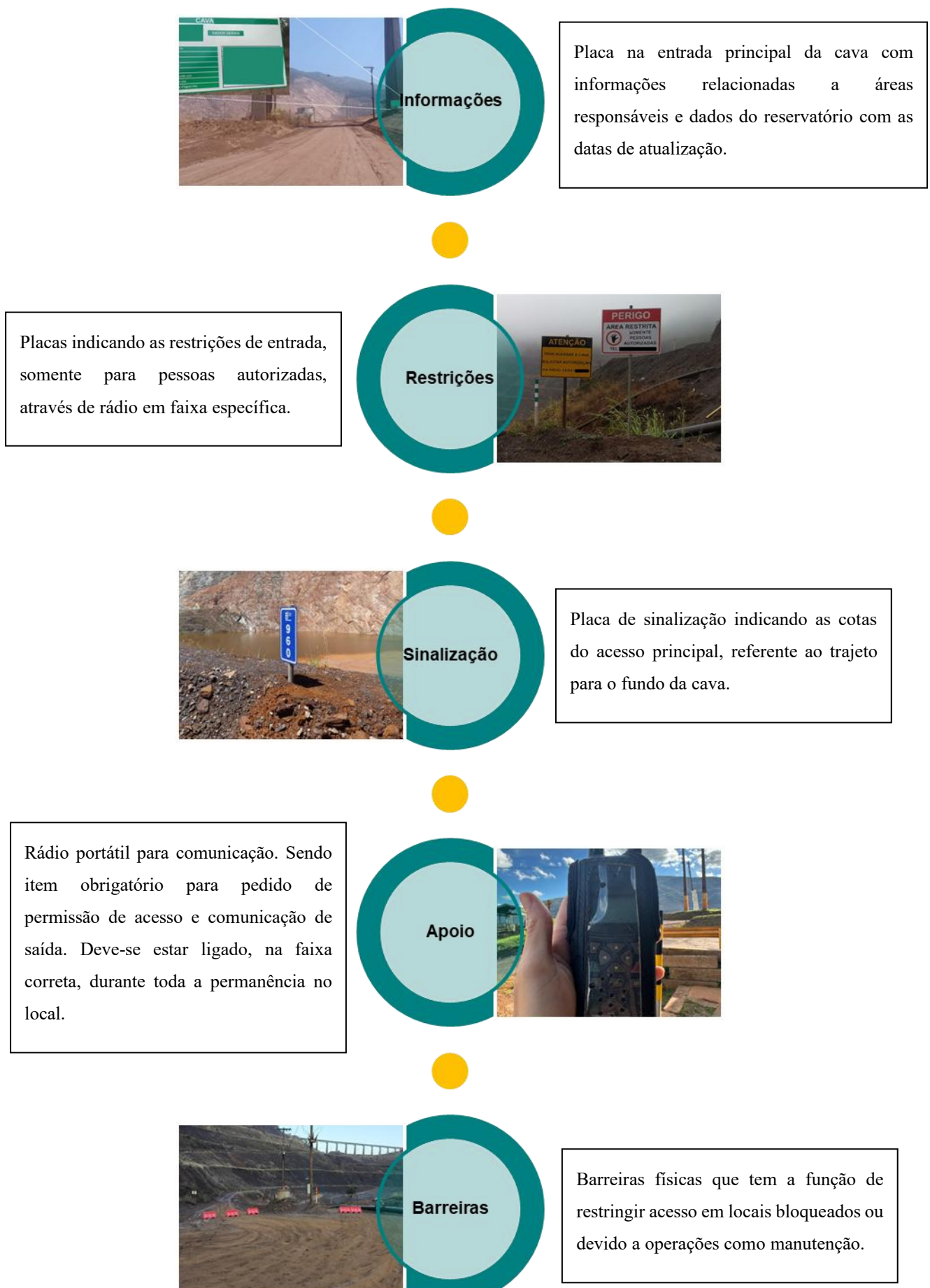
Tabela 2 - Principais atividades no protocolo de segurança.

Temática	Objetivo Principal	Exemplos de Atividades
Planejamento	Controle entre o realizado e o projetado	Controle do volume de rejeitos e de água no reservatório
Monitoramento	Condições de estabilidade geotécnica	Radar terrestre, piezômetros, indicadores de nível d'água, batimetrias e inspeções de campo
Prevenção	Evitar eventos	Mapas de perigo
Resposta	Ação frente a eventos ou situações adversas	Evacuação, comunicação e tomada de medidas mitigatórias
Melhoria Contínua	Revisões dos controles	<i>Feedback</i> , verificação das funcionalidades e abrangências adequadas

Fonte: (Autor, 2025).

A Figura 19, ilustra um exemplo de resposta para o controle de acessos. Uma vez que define as medidas de informação no local, restrições existentes, sinalizações e rotas, medidas para comunicação e, quando aplicável, barreiras de restrições de acessos.

Figura 19 - Fluxos de processos e respostas para atividades no local.



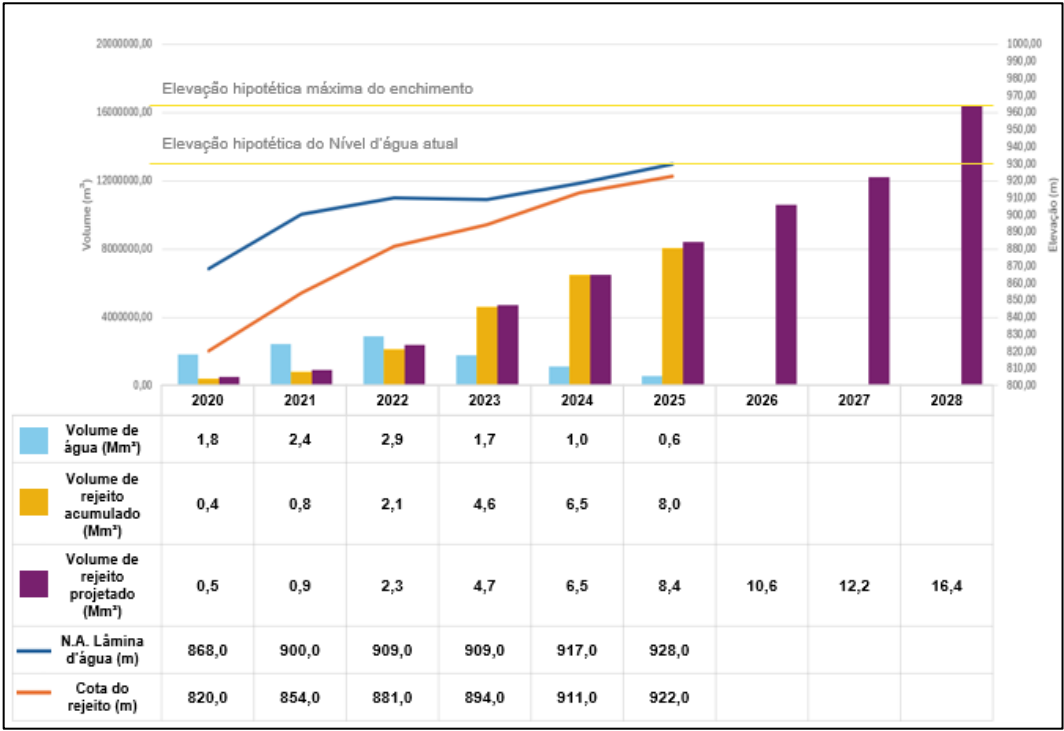
5.2 Planejamento Estratégico e Acompanhamento de Aderência Operacional

O planejamento estratégico na mineração, com foco para o enchimento de uma cava e captação de água, tem por objetivo principal mensurar volumes e nortear sobre as tomadas de decisão para os próximos anos, até o final da vida útil do ativo. Dessa forma, para o acompanhamento desses volumes deve-se ser realizado medidas operacionais locais para medir em campo e correlacionar com as projeções estimadas (verificação da aderência).

No caso específico desse modelo de protocolo de segurança o planejamento estratégico deve estar relacionado com o balanço hídrico da cava e dos dados provenientes da usina e mina, como a produção de rejeito. Isso, para poder medir as capacidades de disposição de rejeitos e captação de água conforme necessário para as atividades da UTM.

Assim, o acompanhamento da aderência entre o planejamento estratégico e o operacional é importante para não sobrecarregar a estrutura (enchimento descontrolado) bem como para equilibrar os volumes de água no reservatório, prevendo também volumes mínimos (estoques) para épocas de estiagem. Além disso, torna-se essencial para evitar sobrecarga da estrutura de disposição, perda de eficiência produtiva e melhor entendido no contexto de segurança nos locais de acesso de pessoas. A Figura 20 apresenta um modelo, com dados hipotéticos, de acompanhamento da aderência do enchimento de uma cava.

Figura 20 - Acompanhamento do enchimento, hipotético, de rejeito e níveis de água.

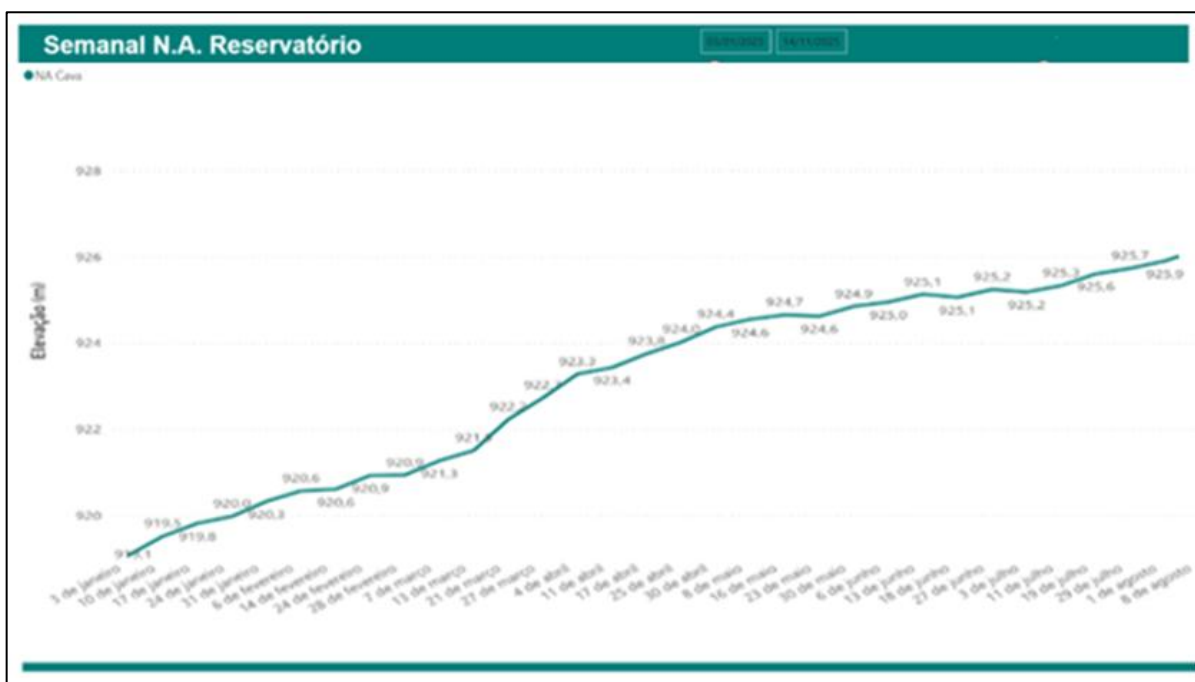


Fonte: (Autor, 2025).

Como situação hipotética, ainda para apresentar a importância das medidas de aderência entre projeção e realizado, se o enchimento da cava ocorrer em ritmo superior à capacidade de sedimentação do rejeito, há riscos relacionados a antecipação da vida útil do ativo. E, sobre o balanço hídrico, se realizado de forma inadequado, pode comprometer o funcionamento da UTM, por falta de água de processo. Dessa forma, esses estudos de aderência permitem ajustar fluxos e minimizar possíveis riscos do negócio, como parada nas atividades.

A Figura 21, apresenta um *dashboard* com finalidade de acompanhamento dos níveis de água no reservatório. Como já apresentado, a importância da água nesse sistema está relacionada às atividades e necessidades da usina. Não distante, esse controle também tem papel no modelo do protocolo de segurança para apontar as profundidades do reservatório que, por sua vez, são de suma importância para a manutenção de atividades seguras em atividades próximas da água, que requerem EPI's e EPC's específicos.

Figura 21 - *Dashboard* apresentando o Nível de Água, hipotético, semanal do reservatório.

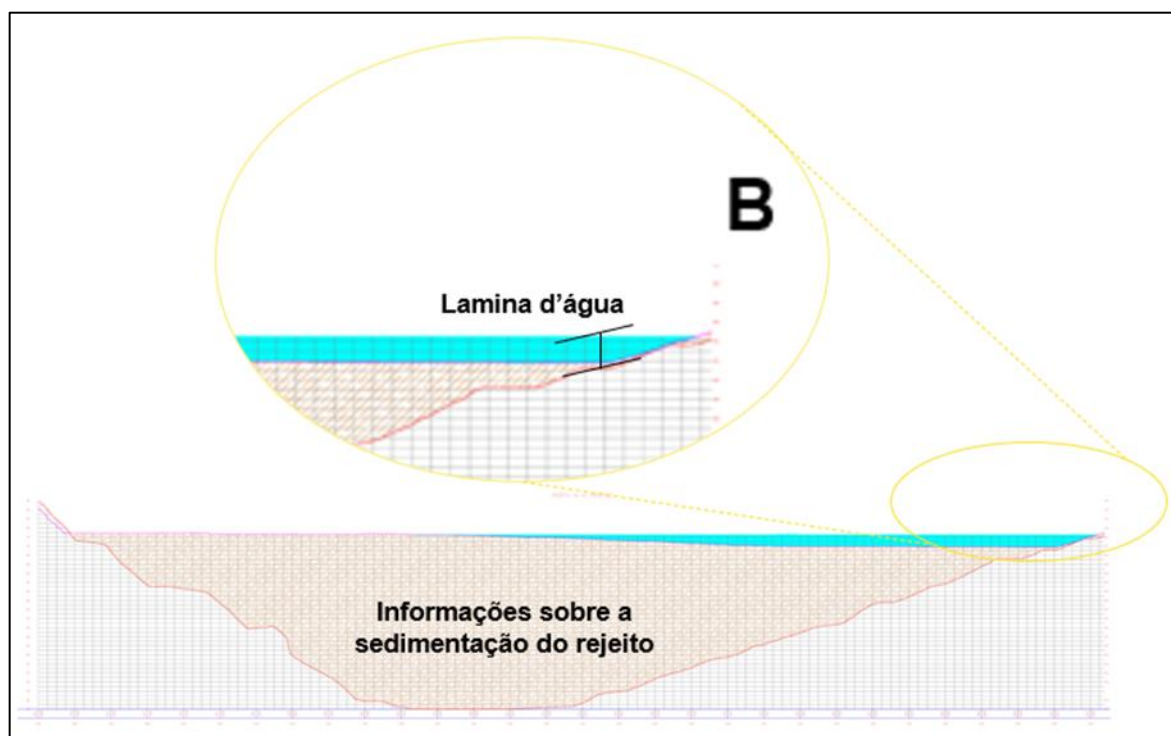


Fonte: (Autor, 2025).

Para o modelo de protocolo de segurança proposto, esse controle dos níveis de água no reservatório deve ter periodicidade bem definida e devem ser amplamente divulgados. Além disso, o acompanhamento deve ser contínuo, assegurando que as taxas de disposição estejam compatíveis com o plano e o cronograma de enchimento, bem como as variáveis de sazonalidade previstas pelas precipitações de chuvas locais.

A Figura 22, apresenta uma seção esquemática apresentando as informações da profundidade de rejeitos já ocupados (sedimentados) na cava, bem como a lâmina d'água (profundidade do reservatório). Logo, esse controle influencia as operações de disposição de rejeitos e captação hídrica no reservatório, bem como as atividades operacionais no local.

Figura 22 - Informações sobre o enchimento da cava.



Fonte: (Autor, 2025).

O acompanhamento dos níveis de profundidade do reservatório também deve ter sua periodicidade bem definida, no modelo do protocolo de segurança. Além disso, é fomentado a ampla divulgação para as áreas de interesse. Os dados são obtidos através de topobatimetrias e os volumes estimados de água são importantes para garantir a funcionalidade da UTM.

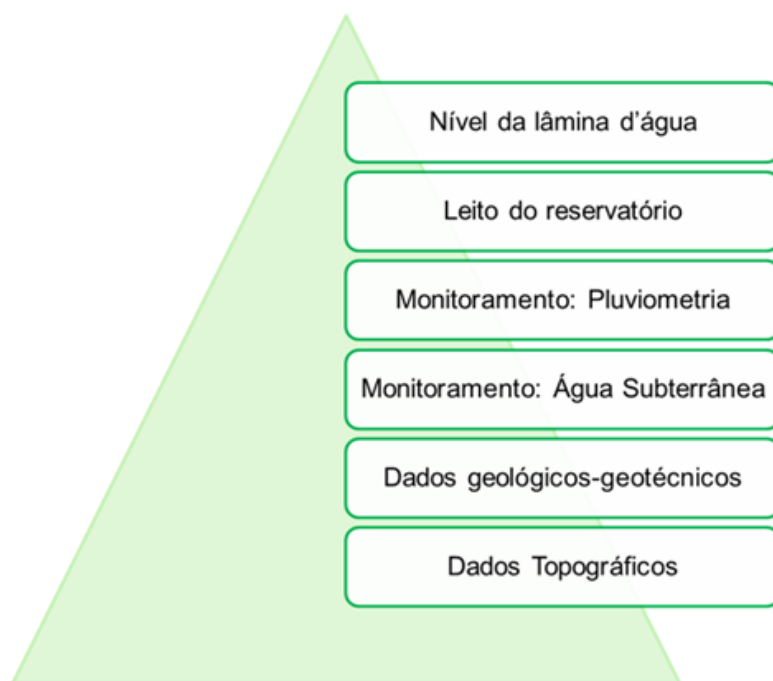
Em resumo, os resultados relacionados a aderência do planejamento estratégico e dados do operacional são importantes para manter as atividades de disposição de rejeitos e captação de água. Bem como, para manter as projeções futuras e, se necessário, ajustes quanto a aderência para melhor representar a realidade nos próximos anos. Além disso, o processo bem definido é fundamental para garantir atividades mais seguras no que tange movimentação de pessoas e equipamentos próximos do reservatório. Para isso, os controles geotécnicos de estabilidade de taludes na cava devem ser analisados e divulgados nos mapas de perigo.

5.3 Protocolo de Segurança e o Princípio da Precaução

O enchimento de rejeitos em uma cava, apesar de aparentar segurança estrutural, deve ser tratado com atenção devido às complexas variáveis relacionadas a presença de água na estrutura. Dessa forma, o Princípio da Precaução deve ser relacionado ao modelo do protocolo de segurança para nortear a tomadas de decisão conservadoras e estimular a necessidade de investigações e estudos geotécnicos, que por sua vez alimentam e atualizam os mapas de perigo geotécnico, já apresentados.

A Figura 23, apresenta os primeiros controles que devem ser analisados, os parâmetros físicos, que abrangem dados relacionados às características do local, no caso a cava com enchimento de rejeitos e captação de água. Nesse sentido, dentre os parâmetros que devem ser obtidos e atualizados, quando necessário, tem-se, a topografia da cava, os dados geológico-geotécnicos das litologias (rochas) e os níveis de água subterrânea (hidrogeologia), dados esses para análises de estabilidade dos taludes. Além desses, tem-se os dados relacionados com monitoramento pluviométrico e os níveis do reservatório como a lâmina d'água e leito, que mensuram a profundidade do reservatório.

Figura 23 - Controles de parâmetros físicos.

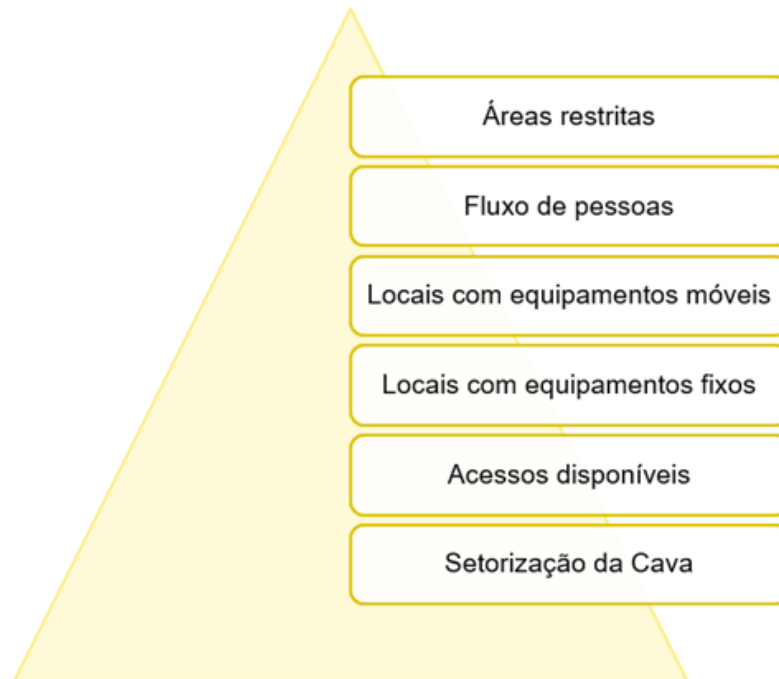


Fonte: (Autor, 2025).

Esses dados alimentam os mapas de perigo geotécnico e pelo modelo de protocolo de segurança devem ser divulgados para as áreas envolvidas. O que, por sua vez, gera a análise dos controles de processos, Figura 24. Esses controles, tem a função de ser a resposta para o

planejamento das atividades em locais específicos e permitidos na cava. Logo, tem-se a partir da setorização da cava, divulgação dos acessos disponíveis e a presença de equipamentos fixos (como poços de hidrogeologia e balsas no reservatório) bem como o fluxo de equipamentos móveis (como motoniveladoras para manter acessos). O fluxo de pessoas tem relação com as operações e manutenção e às atividades de monitoramento geotécnico, dessa forma relaciona-se também com a restrição de acessos, ou áreas bloqueadas, para evitar a exposição em tais locais.

Figura 24 - Controles de processos.



Fonte: (Autor, 2025).

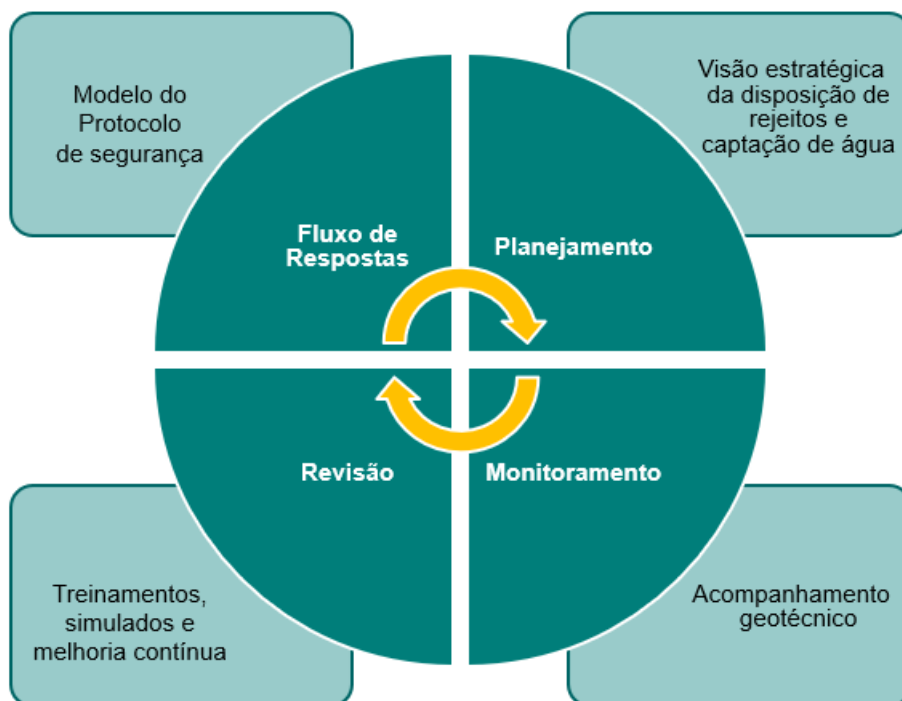
Ambos os controles, físicos e de processos, devem ser passíveis de revisões contínuas e incorporar *feedbacks* operacionais. Logo, a revisão contínua assegura que o protocolo se mantenha atualizado, incorporando dados de campo e resultados de auditorias independentes. Importante ressaltar, que esses parâmetros devem seguir as normas da empresa e as nacionais (Normas ABNT NBR), bem como as diretrizes da Agência Nacional de Mineração (ANM).

Em suma, os resultados relacionados a adoção de um protocolo de segurança orientado pelo Princípio da Precaução promovem uma mudança cultural no que tange à obtenção de dados, análises geotécnicas, clareza nos fluxos e respostas a processos. Isso, pois, mais do que um documento técnico, o protocolo passa a representar um compromisso institucional com a sustentabilidade e com a preservação da vida.

5.4 Protocolo de Segurança e o Ciclo PDCA

A Figura 25, apresenta a estruturação do ciclo PDCA no modelo de protocolo de segurança estudado. Como resultado nele, tem-se os pontos de planejamento (para disposição de rejeitos e captação de água), o monitoramento (que acrescenta a geotecnia no processo), a revisão (que inclui a necessidade de treinamentos) e, por fim, o fluxo de resposta (que abrange todo o modelo do protocolo de segurança).

Figura 25 - PDCA e a estruturação do modelo do protocolo de segurança.



Fonte: (Autor, 2025).

Importante ressaltar, que dentre as características do PDCA, uma das principais relações com a melhoria contínua do protocolo de segurança, está a relação com a visão de quem está em campo e os *feedbacks*. Isso, pois, a divulgação através de treinamentos e sinalizações são importantes para gerar interação entre as equipes que operam os processos. Para o fluxo de disposição de rejeitos e captação de água, o envolvimento entre equipes de operação e geotecnia, agregam sentido ao papel do monitoramento para garantir a estabilidade e nortear sobre os locais seguros e/ou de acesso liberado.

Em resumo, o resultado do PDCA para o protocolo de segurança é promover um ciclo iterativo de prevenção e correção. Através de uma sinergia entre as áreas envolvidas nos processos e no monitoramento da estabilidade estrutural do ativo em questão, cava com disposição de rejeitos.

5.5 Incertezas Associadas no Modelo do Protocolo de Segurança

Já citado anteriormente, no modelo do protocolo de segurança, dados como parâmetros físicos e de processos são fundamentais para avaliar as condições do local, bem como o fluxo de pessoas e equipamentos. Não obstante, esses dados são passíveis de incertezas. Que por sua vez, requerem a adoção de margens de segurança para que operação na cava se mantenha dentro de limites aceitáveis de risco.

Dessa forma, fica claro que quando há lacunas de informação é importante adotar métodos conservadores, Figura 26. Isso não significa interromper e/ou mudar completamente processos, mas significa tomar decisões com base em hipóteses mais restritivas e margens de segurança ampliadas.

Figura 26 - Tomadas de decisão conservadoras quando as incertezas permanecem.



Fonte: (Autor, com auxílio de Inteligência Artificial, 2025).

Nesse sentido, um modelo de protocolo de segurança, deve deixar claro a gestão de incertezas. E para isso, os métodos conservadores têm a finalidade de tornar as operações mais seguras diante de possíveis faltas de informações. Todavia, importante manter a obtenção de dados ativa e a correlata atualização do protocolo de segurança, quando alterações são observadas. O protocolo, portanto, deve ser dinâmico, e sempre com o objetivo de preservar vidas e o meio ambiente.

5.6 Análise Geral do funcionamento do protocolo

A análise geral do modelo de protocolo, evidencia sua funcionalidade como instrumento normativo, ou POP, com finalidade de estabelecer diretrizes claras, procedimentos padronizados e responsabilidades bem definidas para as atividades desenvolvidas na cava utilizada como embasamento para o estudo.

Através do modelo do protocolo de segurança é possível evidenciar a necessidade de levantamento das áreas envolvidas, bem como suas responsabilidades. Além disso, as atividades executadas no local são relacionadas com a existência de monitoramento e restrições de áreas pela geotecnia, o que se torna visível nos mapas de perigo e de processos hipotéticos.

O caráter do PDCA, além de proporcionar uma melhoria contínua, fortalece a percepção de perigos geotécnicos por parte dos trabalhadores que atuam no local (devido a incorporação dos *feedbacks*). Isso, pois, o protocolo deve ser um treinamento aplicável e dinâmico, de acordo com as percepções de quem está na área. Essa abordagem favorece uma postura mais atenta e preventiva, estimulando a identificação de não conformidades e promovendo a interação contínua entre a geotecnia e as áreas de operação e manutenção.

A atualização do mapa de perigo deve ser periódica para poder refletir as mudanças no local, como as condições geométricas (topografia e níveis de rejeito/água) e operacionais (fluxo de pessoas e equipamentos) da cava. Essa atualização torna o protocolo dinâmico, aderente à realidade e mais eficaz. Dessa forma, pela percepção do autor, o protocolo consolida-se não apenas como um documento formal, mas como uma ferramenta viva de gestão da segurança e da sustentabilidade da operação de disposição de rejeitos e captação de água na cava ao longo dos anos, Figura 27.

Figura 27 - Evolução da cava nos últimos 10 anos.



Fonte: (Autor, 2025).

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil se destaca no cenário mundial no ramo da mineração e, em especial, na exportação de minério de ferro. Nesse trabalho, foi possível apresentar as principais estruturas geotécnicas na mineração, com foco para uma cava com a finalidade de disposição de rejeitos e captação de água, processo esse que recircula água para a usina de tratamento de minérios.

O Modelo de Protocolo de Segurança, com dados hipotéticos, foi proposto para uma cava, visto que um procedimento operacional padrão pode gerar melhorias nos processos, respostas a eventos e fluxos de comunicação. Os mapas de perigo são produtos e estão integrados ao protocolo, fazendo parte do procedimento e uma forma de trazer aspectos geotécnicos e os fluxos de processos operacionais do local. Além disso, tem-se a necessidade de existir uma relação do planejamento estratégico com a aderência do planejamento operacional, para que o processo de enchimento da cava se torne mais seguro, em termos econômicos e pessoais.

O Princípio da Precaução, base do modelo do protocolo de segurança, é importante para amarrar as necessidades de obtenção de dados, clareza na comunicação e governança do ativo. Além disso, sabe-se que as incertezas são inerentes, dessa forma é necessário adotar, muita das vezes, medidas conservadoras, para preencher lacunas e assim, prevenir acidentes e/ou minimizar seus impactos.

O modelo do protocolo de segurança, se baseia no ciclo PDCA, de uma forma que engloba medidas de planejamento, monitoramento, respostas e melhoria contínua. Importante destacar que, com base no treinamento e divulgação dele, é possível notar uma aproximação das áreas de operação com geotecnia, o que torna o processo enriquecedor para melhorias nos fluxos e tomadas de decisão técnica.

Como proposta de estudos futuros, recomenda-se:

- Comparação de resultados relacionados à segurança operacional, custos operacionais e níveis de confiabilidade dos protocolos;
- Elaboração de indicadores quantitativos de precaução;
- Aprofundamento na avaliação do desempenho de protocolos de segurança existentes em diferentes contextos minerários e;
- Estudos e contribuição para a um modelo de protocolo de segurança para fechamento de mina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 3001. ABNT NBR ISO Gestão de riscos-Diretrizes. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ABNT NBR ISO 9001. ISO_9001_2015. p. 1–88, 2015.

ARMADA, Charles Alexandre Souza. Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho em face ao estado socioambiental brasileiro. *Territorium*, n. 28(I), p. 13–22, 15 dez. 2020.

BORGES, Paulo Henrique Ribeiro *et al.* Reuse of iron ore tailings in the production of geopolymer mortars. *REM - International Engineering Journal*, v. 72, n. 4, p. 581–587, out. 2019.

CARVALHO, Leonardo; BASTOS, E. K. X. Desempenho do PIB no primeiro trimestre de 2022. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <<https://bit.ly/3Q8Nw7E>>.

CHANDARANA, Upasna P.; MOMAYEZ, Moe; TAYLOR, Keith W. MONITORING AND PREDICTING SLOPE INSTABILITY: A REVIEW OF CURRENT PRACTICES FROM A MINING PERSPECTIVE. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <<https://ijret.org>>.

COSTA, Maria Helena; MARIANO, Ana Lucia. Gestão de Riscos e Segurança no Trabalho: Conceitos e Aplicações. São Paulo: Atlas, 2017.

DEMING, W. Edwards. *Out of the Crisis*. *[S.l.]*: Cambridge: MIT Press, 1986.

FLORES, J. C. C.; LIMA, H. M. FECHAMENTO DE MINA: ASPÉCTOS TÉCNICOS, JURÍDICOS E SOCIOAMBIENTAIS. *[S.l.: S.n.]*.

GERSCOVICH, Denise Maria Soares; VARGAS, Eurípedes do Amaral; CAMPOS, Tácio Mauro Pereira de. Estabilidade de taludes. *In: Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo, SP, Brazil: ABMS, 2023. p. 867–891.

HOU, Xiaobing. Geotechnical Engineering Slope Monitoring Based on Internet of Things. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, v. 14, n. 06, p. 165–176, 22 jun. 2018.

IBRAM. Mineração em número (2023). Comex Stat. Elaboração IBRAM., 2024.

LIMA, Maria Tereza; FONSECA, Nadir de Oliveira. A Conferência Rio-92: Desenvolvimento Sustentável e as Políticas Ambientais no Brasil. São Paulo: Editora Paz e Terra, 1993.

MACHADO, Sérgio. O Princípio da Precaução e a Gestão dos Riscos: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: [S.n.].

MARTINS, José Carlos; SILVA, Maria Helena. Bridging the Gaps: Building Sustainable Solutions. São Paulo: Atlas, 2019.

MILARÉ, Édis. Direito Ambiental Brasileiro. 9. ed. [S.l.]: Editora Revista dos Tribunais, 2015.

MOREIRA DE SOUSA, Mauro Henrique *et al.* Sumário Mineral 2025 (Ano-Base 2024). [S.l.: S.n.].

PALADINI, Edison P. Gestão e avaliação da qualidade - uma abordagem estratégica. [S.l.]: Atlas, 2019.

RODRIGUES, Carlos Alberto. Gestão de Riscos: Teoria e Prática. Rio de Janeiro: FGV, 2019.

SHEWHART, Walter A. Economic Control of Quality of Manufactured Product. [S.l.]: New York: Van Nostrand, 1931.

SILVA, Cássia Mara Alexandrino *et al.* Social, environmental, and corporate governance (ESG): Historical perspectives and key changes in organizations. *In: Interconnections of Knowledge: Multidisciplinary Approaches*. [S.l.]: Seven Editora, 2024.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. Administração da Produção. 2 ed ed. São Paulo: Atlas, 2018.

TUBINO, D. Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática. [S.l.: S.n.].

WILSON, Bibin; SINGH, Anand; SETHI, Amit. Shallow Water Bathymetry Survey using an Autonomous Surface Vehicle. 18 jul. 2022.