



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

PEDRO LUCAS LOUZADA DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA PROJETOS DE
DESCARACTERIZAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO DE
MINERAÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE COMPARATIVA
MULTICRITÉRIO.**

Tucuruí – PA
2024

PEDRO LUCAS LOUZADA DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA PROJETOS DE
DESCARACTERIZAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO DE
MINERAÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE COMPARATIVA
MULTICRITÉRIO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva.

Tucuruí – PA
2024

PEDRO LUCAS LOUZADA DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA PROJETOS DE
DESCARACTERIZAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO DE
MINERAÇÃO, UTILIZANDO ANÁLISE COMPARATIVA
MULTICRITÉRIO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva

Aprovado por:

Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva
Universidade Federal de Roraima
Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí - NDAE/PEBGA
(Orientador)

Prof. Dr^a. Débora Dias Costa Moreira
Universidade Federal do Pará – Campus de Tucuruí - NDAE/PEBGA
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto
Universidade Federal do Ceará - DEHA/UFC
(Examinador Externo)

Tucuruí – PA
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

L886a Louzada de Oliveira, Pedro Lucas.
AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA PROJETOS DE
DESCARACTERIZAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE
REJEITO DE MINERAÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE
COMPARATIVA MULTICRITÉRIO / Pedro Lucas Louzada
de Oliveira. — 2024.
92 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva
Coorientação: Prof^a. Dra. Débora Dias Costa Monteiro

1. descaracterização de barragens. 2. barragens. 3.
mineração. 4. geotecnia. 5. projetos. I. Título.

CDD 624.15136

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, em especial aos meus filhos Éric e a Helena, por serem minha fonte inesgotável de energia e por me incentivarem a concluir o curso.

Ao meu orientador Dr. Adriano Frutuoso da Silva, pelos ensinamentos e orientação desta pesquisa.

Aos participantes da banca de defesa da qualificação e dissertação final, pelos conhecimentos repassados, orientações realizadas visando agregar melhorias no trabalho final.

À VALE e Universidade Federal do Pará (UFPA), pelo apoio e incentivo à qualificação profissional e acadêmica.

Aos meus amigos e colegas de profissão, pelo compartilhamento de aprendizado diário, que enriqueceram o presente trabalho.

RESUMO

A descaracterização de barragens de mineração tem se tornado um tema de extrema relevância e urgência no cenário global contemporâneo. Diante dos recentes desastres e tragédias ambientais decorrentes do rompimento de barragens de mineração, no Brasil em 2015 e 2019, a necessidade de implementar processos eficientes e seguros para a desativação e recuperação dessas estruturas se tornou imperativa. A complexidade inerente a esse tipo de empreendimento demanda uma abordagem criteriosa e abrangente na avaliação das opções disponíveis. A simples seleção de uma alternativa com base em um único critério, como o custo financeiro ou prazo, por exemplo, pode resultar em consequências adversas e impactos negativos tanto do ponto de vista técnico, quanto econômico, ambiental e social. Diante do exposto, esta dissertação tem como objetivo explorar a importância da análise de alternativas, considerando critérios múltiplos no processo de escolha da melhor solução, para a seleção do projeto de descaracterização de barragens de mineração mais adequado. Por meio de uma revisão da literatura e apresentação de um estudo de caso de descaracterização de uma barragem de manganês utilizando a avaliação dos requisitos técnicos, ambientais, econômicos e socioeconômicos como elemento decisivo na escolha da solução a ser detalhada. A metodologia consiste na análise dos cenários de alternativas propostos, contemplando a definição e ponderação das variáveis múltiplas a serem avaliadas. O resultado obtido demonstra que a adoção de múltiplos critérios, que englobem não apenas aspectos econômicos, mas também ambientais, sociais, técnicos e de segurança, foi fundamental para garantir uma decisão embasada e sustentável para a descaracterização da estrutura. Foi evidenciado que a análise de múltiplos critérios também foi capaz de favorecer o processo de tomada de decisão nas soluções de descaracterização de barragens de mineração, facilitando a rastreabilidade e entendimento entre as diversas partes interessadas envolvidas em projetos dessa natureza.

Palavras-chave: descaracterização de barragens, geotecnia, análise de alternativas, critérios múltiplos, sustentabilidade, gestão de projetos.

ABSTRACT

The decharacterization of tailings has become an extremely relevant and urgent topic in the contemporary global scenario. Given the recent disasters and environmental tragedies resulting from the collapse of mining dams in Brazil in 2015 and 2019, the need to implement efficient and safe processes for the deactivation and recovery of these structures has become imperative. The complexity inherent to this type of enterprise demands a careful and comprehensive approach in evaluating the available options. The simple selection of an alternative based on a single criterion, such as financial cost or deadline, for example, can result in adverse consequences and negative impacts from both a technical, economic, environmental and social point of view. Given the above, this dissertation aims to explore the importance of analyzing alternatives considering multiple criteria in the process of choosing the best solution for the mining dam decharacterization project. Through a literature review and presentation of a case study of the decharacterization of a Manganese dam using the assessment of technical, environmental, economic and socioeconomic requirements as a decisive element in choosing the solution to be detailed. The methodology consists of analyzing the proposed alternative scenarios, including the definition and weighting of the multiple variables to be evaluated. The result obtained demonstrates that the adoption of multiple criteria, which encompass not only economic aspects, but also environmental, social, technical and safety aspects, was fundamental to guarantee a well-informed and sustainable decision. It was evidenced that the analysis of multiple criteria was also able to favor the decision-making process in mining dam decharacterization solutions, facilitating traceability and understanding between the stakeholders involved in projects of this nature.

Keywords: decharacterization of tailings, geotechnics, analysis of alternatives, sustainability, project management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Estatística Mineração Brasil em 2022	18
Figura 2 – Fluxograma das etapas de metodologia.....	23
Figura 3 – Ilustração Remoção total maciço	46
Figura 4 – Ilustração Remoção parcial do maciço	46
Figura 5 – Estrutura de contenção a jusante do maciço existente	47
Figura 6 – Estrutura de contenção a jusante do maciço existente	48
Figura 7 – Fluxograma das etapas de metodologia da dissertação	51
Figura 8 – Localização da Barragem em estudo	58
Figura 9 – Foto aérea da Barragem em estudo	59
Figura 10 – Histórico da barragem	60
Figura 11 – Processo produtivo Mina de Manganês – Estudo de caso.....	62
Figura 12 – Croqui esquemático descaracterização (Alternativa 1).....	73
Figura 13 – Seção longitudinal descaracterização (Alternativa 1)	79
Figura 14 – Croqui esquemático descaracterização (Alternativa 2).....	78
Figura 15 – Seção longitudinal descaracterização (Alternativa 2)	79
Figura 16 – Croqui esquemático descaracterização (Alternativa 3).....	82
Figura 17 – Seção longitudinal descaracterização (Alternativa 3)	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acidentes barragens de rejeitos no Brasil	20
Tabela 2 – Princípios de gestão de descaracterização de barragens de rejeito GISTM.....	27
Tabela 3 – Objetivos da descaracterização	28
Tabela 4 – Fatores de segurança mínimos estabelecidos	55
Tabela 5 – Parâmetros de resistência adotados	56
Tabela 6 – Dados Gerais Barragem em estudo	61
Tabela 7 – Variáveis avaliadas – Estudo de caso	64
Tabela 8 – Variáveis e subvariáveis avaliadas – Estudo de caso	66
Tabela 9 – Indicadores de avaliação de critérios múltiplos – Estudo de caso	67
Tabela 10 – Matriz de avaliação de critérios múltiplos.....	68
Tabela 11 – Planilha de quantidades (Alternativa 1)	72
Tabela 12 – Planilha de quantidades (Alternativa 2)	77
Tabela 13 – Planilha de quantidades (Alternativa 3)	81
Tabela 14 – Matriz de avaliação de critérios múltiplos preenchida	84
Tabela 15 – Resultado das alternativas avaliadas	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANA	Agência Nacional de Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASI	Aluminium Stewardship Initiative
CTC	capacidade de troca de cátions
DAP	Diâmetro a altura do peito
DC	Diâmetro do colete
ESG	Environmental, Social and Governance
IAI	International Aluminium Initiative
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICMM	International Council on Mining & Metals
IMA	Incremento Médio Anual
IPA	Incremento Periódico Anual
MPSA	Mineração Paragominas S.A.
MST	massa seca total
NBR	Norma Brasileira
PFM	Plano de fechamento de mina
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PRAD	Programa de Recuperação de Áreas Degradadas
SB	soma de bases
SGB-CPRM	Serviço Geológico do Brasil
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UFRA	Universidade Federal Rural da Amazônia
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	13
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo Geral.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Estrutura do Trabalho.....	17
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 Panorama da mineração no Brasil	18
2.2 Acidentes com barragens de mineração no Brasil e no mundo	19
2.3 Evolução da legislação de barragens de mineração	21
2.4 Conceitos fundamentais em projetos de descaracterização de barragens de mineração.....	25
2.4.1 Definição de barragem descaracterizada e objetivos de um projeto desta natureza.....	25
2.4.2 Estudos Iniciais, Geométricos e locacionais	31
2.4.3 Estudos Geológico – Geotécnicos.....	32
2.4.4 Estudos Hidrológicos e Hidráulicos	37
2.4.5 Análises Construtivas	39
2.4.6 Análise Ambiental	41
2.4.7 Monitoramento.....	43
2.4.8 Considerações Gerais	44
2.5 Soluções usuais empregadas na descaracterização de barragens ...	45
3 – METODOLOGIA	51
3.1 Introdução	51
3.2 Coleta, tratamento e consolidação de dados	53

3.3	Estudo de caso – Descaracterização barragem de mineração de manganês.....	54
3.3.1	Apresentação e análise dos dados.....	54
3.3.2	Normas técnicas de referência	54
3.3.3	Critérios e premissas: Geométricas e geotécnicos	55
3.3.4	Critérios e premissas: Hidrológicos e hidráulicos	57
3.3.5	Critérios e premissas: Gerais.....	57
3.3.6	Informações Gerais da barragem	58
3.3.7	Caracterização Tecnológica dos Rejeitos.....	62
3.4	Análise de múltiplos critérios – Definição e ponderação das variáveis analisadas.....	63
3.4.1	Definição das variáveis, subvariáveis e indicadores e seus pesos.....	64
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....		69
4.1	Alternativas propostas para a descaracterização da barragem de mineração em estudo	69
4.1.1	ALTERNATIVA 1 – REMOÇÃO TOTAL DO MACIÇO E DOS REJEITOS COM RECONFORMAÇÃO DO TALVEGUE NATURAL COMPOSTA POR UM CANAL CENTRAL EM ENROCAMENTO	70
4.1.1.1	Escolha do método para remoção do rejeito	70
4.1.1.2	Bombeamento do reservatório e remoção da fauna aquática	70
4.1.1.3	Demolição das estruturas de concreto	70
4.1.1.4	Remoção do maciço e utilização do material para reconformação do reservatório.....	71
4.1.1.5	Construção do canal central de drenagem em enrocamento	71
4.1.1.6	Regularização do terreno e revegetação da área:	71
4.1.1.7	Planilha de quantidades:	71
4.1.1.8	Croqui da alternativa:	73

4.1.2 ALTERNATIVA 2 – REMOÇÃO PARCIAL DO MACIÇO ATÉ A ELEVÇÃO DOS REJEITOS SUBMERSOS E REFORÇO DO ESPALDAR DE JUSANTE (ESTRUTURA GALGÁVEL).....	75
4.1.2.1 Bombeamento do reservatório e remoção da fauna aquática	75
4.1.2.2 Rebaixamento do Nível Freático	75
4.1.2.3 Regularização da Área Afetada.....	75
4.1.2.4 Remoção parcial do maciço (rebaixamento da crista) e utilização do material para reconformação do reservatório	76
4.1.2.5 Demolição das estruturas de concreto	76
4.1.2.6 Reforço no talude de jusante.....	76
4.1.2.7 Revegetação	76
4.1.2.8 Planilha de quantidades:	77
4.1.2.9 Croqui da alternativa:	78
4.1.3 ALTERNATIVA 3 – REMOÇÃO PARCIAL DO MACIÇO COM ABERTURA DE BRECHA PRÓXIMA A OMBREIRA DIREITA	80
4.1.3.1 Remoção parcial do maciço (abertura de brecha) e utilização do material para reconformação do reservatório.....	80
4.1.3.2 Demolição de parte das estruturas de concreto	80
4.1.3.3 Reforço no talude de jusante.....	80
4.1.3.4 Planilha de quantidades:	81
4.1.3.5 Croqui da alternativa:	82
4.2 Avaliação das alternativas utilizando a critérios múltiplos	84
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	86
5.1 Conclusões.....	86
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As atividades de exploração mineral são fundamentais para o desenvolvimento da economia global. Dado o aumento do consumo de bens materiais, produzidos a partir da matéria prima extraída na mineração, houve também um incremento na geração de resíduos e, conseqüentemente, na necessidade de armazenamento desses materiais de maneira segura para a sociedade e meio ambiente.

A mineração, em sua cadeia produtiva, envolve várias atividades desde a pesquisa e delimitação de áreas potenciais exploratórios, análise de viabilidade da atividade, a lavra do mineral, o beneficiamento e o transporte do mineral. Como consequência da exploração minerária são gerados dois principais resíduos, os estéreis e os rejeitos. De acordo com Sanchez (2022), os resíduos estéreis podem ser entendidos como sendo os materiais provenientes da lavra na extração das camadas de solo da mina que recobrem o minério, ou seja, sem valor comercial. Os rejeitos, por sua vez, são provenientes do beneficiamento das substâncias minerais, onde os mesmo em sua maioria não apresentam valor comercial agregado e usualmente são direcionados para barragens ou fundo de cavas.

De acordo com a NBR 13.028/17, o conceito de barragens de mineração é: *“barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas.”*

No Brasil, as barragens de mineração começaram a ser construídas por volta da década de 1930 (CBDB, 2011) e, desde então, são a principal forma de armazenamento de materiais provenientes da mineração. Segundo o relatório da Agência Nacional de Mineração (ANM) de 13/07/23, existem 926 barragens de mineração cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), sendo 463, isto é, 50,00% enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Araújo (2018), cita que a maior parte das empresas do setor minerário, enxergava a barragem de rejeitos como um ponto final de sua linha produtiva. Entretanto, conforme pontuado por Thomé e Ribeiro (2019), nas últimas décadas, a realidade tem demonstrado que a atividade minerária não se encerra com a disposição de rejeitos em barragens. Inúmeras ações devem ser desenvolvidas a partir da contenção dos rejeitos, tais como descaracterização das barragens e a recuperação da área degradada.

Sanchez (2022), reforça que a pauta legislação e a necessidade de regulamentações sobre barragens de mineração, no Brasil, iniciou nos finais de 1960. Dessa maneira, o tema de descaracterização de barragens de mineração é recente, desafiador e complexo, uma vez que após os acidentes ocorridos no Brasil nos últimos anos (2015 – Mariana/MG | 2019 – Brumadinho/MG), a legislação nacional tornou-se mais restritiva visando conscientizar, responsabilizar e estabelecer parâmetros objetivos de avaliação para as seguranças de barragens, bem como aumentando a severidade da punição para os donos de mineradoras que não cumprirem os requisitos mínimos estabelecidos nas Resoluções pertinentes (destaque para as de Nº 95/22 e Nº 130/23 - ANM). A legislação atual impõe medidas para que o setor minerário realize as intervenções necessárias para a descaracterização de suas barragens que apresentem risco à sociedade/meio ambiente e busquem alternativas mais tecnológicas, seguras e sustentáveis para a disposição do rejeito.

O Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos – GISTM (ICMM, 2020) foi estabelecido como guia para as empresas do setor de mineração com o objetivo de evitar dano às pessoas e ao meio ambiente por acidentes de barragens e possui tolerância zero para fatalidades humanas em eventos com barragens de mineração. As principais mineradoras do mundo ou já implantaram ou estão em processo de implantação do padrão supracitado.

O GISTM realiza recomendações visando a priorização da segurança das estruturas de disposição de rejeitos ao longo de todas as fases do seu ciclo de vida, inclusive nas fases de fechamento e pós-fechamento. O *Tailings Guide* (2019) reforça o conceito da concepção de projeto “*design and operating for closure*”, no qual os estudos iniciais já contemplam as etapas de fechamento/d Descaracterização da estrutura na análise de viabilidade da solução final a ser desenvolvida e implantada, possibilitando projetos mais otimizados, seguros e com as principais etapas da vida útil bem definidas e planejadas.

Diante do cenário supracitado, é iminente a necessidade de empresas do setor minerário desenvolverem análises de alternativas para projetos de descaracterização de barragens, devido aos riscos, incertezas, número de partes interessadas, bem como as grandezas usuais associadas a esses tipos de obra. A análise de múltiplos critérios, contemplando as variáveis chaves do projeto, como aspectos técnicos, ambientais, econômicos e socioeconômico, pode ser utilizada como ferramenta prática capaz de auxiliar na melhor decisão da solução a ser adotada para a descaracterização de barragens de mineração pelas partes interessadas envolvidas em projetos desta natureza.

1.2 Justificativa

Conforme citado por Gigolotti et al (2022) existem algumas lacunas não esclarecidas nas legislações vigentes sobre o tema descaracterização de barragens, como o fato da Resolução Nº 13/19 - ANM, relacionar as etapas necessárias para a descaracterização de uma barragem de rejeitos, sem delimitar e definir claramente, como pode ser evidenciado na expressão “*mas não se limitando (a essas etapas)*”.

Vale ressaltar que a partir da Resolução Nº 95/22 – ANM, é mandatório a descaracterização de diversas barragens existentes no Brasil, seja por sua categoria de risco ou método construtivo. Entretanto, as legislações e/ou normas técnicas nacionais e internacionais não conseguem esclarecer todos os pontos necessários para projetos da presente natureza, que geralmente são considerados de alto risco, por ocorrerem em estruturas que, em sua maioria, apresentam características desfavoráveis de segurança geotécnica (podendo estas estar, inclusive, em estado de alerta ou nível de emergência).

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta como alternativa para mitigar a lacuna supracitada, bem como buscar um alinhamento adequado de expectativas e registro entre as partes interessadas, a proposta da realização de uma análise qualitativa de alternativas para projetos de descaracterização de barragens, considerando a especificidade de cada caso, e que as propostas desenvolvidas sejam ponderadas por meio de análise de critérios múltiplos, elaborados com foco no estudo de caso, considerando variáveis técnicas, econômicas, ambientais e socioeconômicas.

Espera-se que o presente trabalho seja capaz de agregar conhecimento e auxilie os profissionais que atuam em projetos e implantação de obras de descaracterização de barragens de mineração.

1.3 Objetivos

Para a elaboração da pesquisa foram propostos os seguintes objetivos.

1.3.1 *Objetivo Geral*

Esta dissertação tem por finalidade a proposição de uma metodologia que será base para a realização de uma avaliação comparativa, entre os três cenários propostos como solução de um estudo de alternativas para a descaracterização de uma barragem de mineração. Assim, são apresentadas as premissas e critérios, bem como a avaliação das variáveis técnicas, ambientais, econômicas e socioeconômicas, de cada alternativa, sendo estas ponderadas na metodologia apresentada para a escolha da melhor solução a ser detalhada em projeto e posteriormente implantada em campo. Este trabalho aborda como estudo de caso a barragem de contenção de rejeitos de manganês, situada no sudeste do estado do Pará.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Elaborar propostas de três alternativas para a descaracterização de uma barragem de rejeito de manganês, contemplando análise dos quesitos técnicos, sociais e ambientais para cada solução proposta;
- Propor metodologia a ser utilizada nas análises, a partir da definição dos critérios múltiplos a serem adotados como balizadores para as propostas de descaracterização estudadas, com o intuito de selecionar a solução mais adequada para o caso analisado.

1.4 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, iniciando-se por esta introdução, onde são apresentados o resumo, a motivação da pesquisa, os objetivos, bem como a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2, referencial teórico, apresenta informações sobre uma revisão bibliográfica, do estado atual da arte, referente a legislações, acidentes e incidentes, critérios para análises de múltiplas variáveis, bem como da elaboração de projetos de descaracterização de barragens de mineração.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa. Neste tópico são detalhados os dados da barragem objeto de estudo, descrição da avaliação de análise de múltiplas variáveis (AMV), bem como a definição e ponderação das variáveis econômicas, sociais, ambientais e socioeconômicas avaliadas.

O Capítulo 4, apresentação e análise dos dados, exhibe os resultados das avaliações das alternativas de projeto concebidas, a partir da metodologia descrita no Capítulo 3.

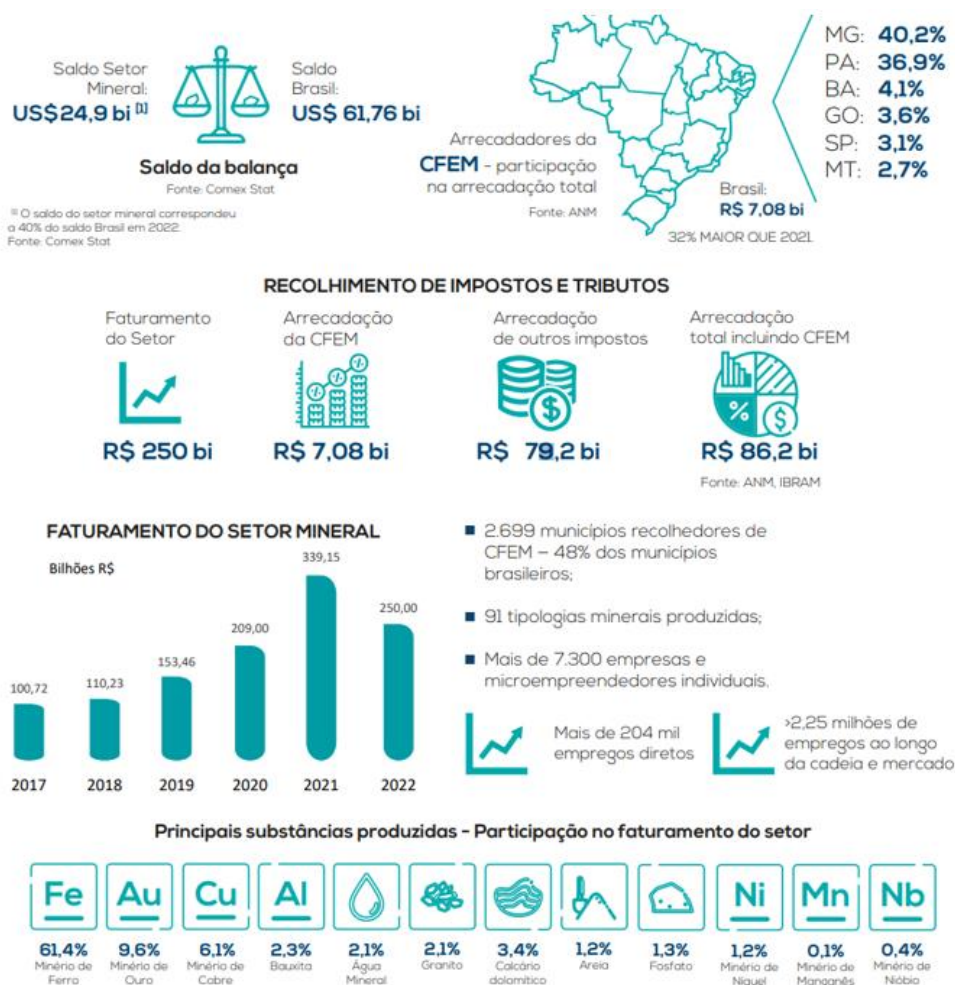
As conclusões obtidas, a partir das análises dos resultados, são apresentados no Capítulo 5, além de sugestões para trabalhos futuros na linha de pesquisa abordada.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Panorama da mineração no Brasil

A mineração tem impactos positivos sobre a sociedade, seja no provimento de matérias-primas, que são utilizadas para o desenvolvimento de produtos comerciais amplamente utilizados na sociedade atual, ou no desenvolvimento de novas tecnologia e até mesmo na arrecadação de impostos e desenvolvimento dos estados e municípios. O impacto da mineração na economia extrativista brasileira é representado no boletim “Mineração em número 2022” do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) e o manganês representa 0,1% da participação de faturamento do setor, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 — Estatística Mineração Brasil em 2022



Fonte: IBRAM (2022)

Para enfatizar a importância da mineração no cenário nacional ressalta-se que a mesma consta no chamado “Plano Verde” que trata-se de uma das medidas do plano de transição ecológica do governo federal, apresentado ao Presidente da República Luiz Inácio Lula da Silva pelo ministro da Fazenda, Fernando Haddad em 07/07/2023 e destaca a atividade extrativista como importante ator para reduzir a dependência externa de fertilizantes e também de minérios relacionados à inovação tecnológica, bem como para contribuir à transição a uma economia de baixo carbono.

Vale ressaltar que, atualmente, o Brasil se posiciona dentre os principais países mineradores do mundo tanto como detentor de reservas minerais, quanto como produtor de matérias-primas de origem mineral (Flôres e Lima, 2012), juntamente com China, Canadá, Austrália, Estados Unidos, África do Sul, Canadá, a Índia, o Reino Unido e a Rússia.

Eventos desagradáveis advindas das atividades minerárias são corriqueiros, dos quais são possíveis destacar o aumento na poluição do ar, solos e dos corpos hídricos, bem como o crescimento populacional que ocorre geralmente de forma desordenada e em áreas próximas às minas e em regiões, usualmente, susceptíveis a atingimento em eventuais rupturas de barragens/diques utilizados na mineração.

2.2 Acidentes com barragens de mineração no Brasil e no mundo

Para melhor entendimento ao tópico é necessário recorrer aos conceitos de acidente e incidente existentes descritos no Art. 2 da Resolução Nº 95/2022 – ANM:

“I - Acidente: comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo do reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa”;

“XXX - Incidente: ocorrência que afeta o comportamento da barragem ou de estrutura anexa que, se não controlada, pode causar um acidente.”

Conforme pontuado por Guidicini et al. (2021), no Brasil há uma escassez de documentação sobre os acidentes de barragens, visto que muitas barragens foram implantadas sem registro de projeto, e em regiões afastadas de centros urbanos.

Nessas condições os casos de acidentes alcançam os veículos de comunicação apenas quando afetam as condições de vida de pessoas ribeirinhas ou interrompem as vias de transporte local. Em outros países, como a China e África do Sul, que registraram diversos acidentes catalogados com barragens de mineração, muitas vezes não ocorre a divulgação dos dados de maneira íntegra dos ocorridos, bem como as tratativas e danos ocasionados, impedindo o entendimento completo da situação e consequentemente a incorporação do conhecimento adquirido para evitar situações similares em outras estruturas.

De acordo com Piciullo et al. (2020) vários bancos de dados de ruptura de barragens de rejeitos estão disponíveis, cada um com diferentes níveis de detalhe. Todos eles são originários do ICOLD e constam na base de dados publicada em 2001 no boletim 121: *“Tailings Dams, Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt From Practical Experiences”* com o resultado de um trabalho minucioso da comissão de barragens de rejeitos que, durante cinco anos, inventariou os acidentes e incidentes ocorridos desde 1970. Participaram deste inventário representantes de 52 países e analisaram cerca de 400 casos para identificar as causas destes eventos, conforme Duarte (2008).

A seguir é exposto a Tabela 1, elaborada por Ávila (2021), contemplando os principais acidentes de barragens de rejeito com perdas de vida humana e severos impactos ambientais e econômicos ocorridos e documentados no Brasil, nos últimos 35 anos:

Tabela 1 – Acidentes barragens de rejeitos no Brasil

Ano	Barragem	Principais impactos
1986	Fernandinho	7 mortes
2001	Rio Verde	5 mortes
2003	Florestal Cataguases	Vazamento de lixivia negra, contaminação de água a jusante
2006/2007	São Francisco	Vazamento de rejeito de bauxita, contaminação de água a jusante
2014	Herculano	3 mortes
2015	Fundão	19 mortes, contaminação da água a jusante
2019	Córrego do Feijão	270 mortes, contaminação ambiental a jusante

Fonte: Ávila (2021)

2.3 Evolução da legislação de barragens de mineração

O presente tópico irá abordar a evolução da legislação federal brasileira sobre segurança de barragens de mineração, uma vez que tem sido um processo contínuo e complexo, impulsionado principalmente pela necessidade de evitar novos acidentes.

As barragens de mineração no Brasil e no mundo, em sua maioria, possuem décadas de implantação e operação e poucas informações acerca delas. Por se tratar de uma atividade com consequências catastróficas, a probabilidade e potencial risco de rompimento de barragens demandou discussões sobre o tema a partir do final da década de 1960.

Como fruto de uma resposta a sociedade aos sucessivos rompimentos das barragens de mineração no Brasil, foi publicada a Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001, (DNPM, 2001) que estabelecia critérios técnicos para o projeto, construção, operação e fechamento de barragens de mineração.

Posteriormente, a Lei 12.334/2010 foi promulgada, instituindo a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Essa lei estabeleceu diretrizes para a segurança de barragens em todo o território nacional, estabelecendo responsabilidades para os órgãos fiscalizadores, empreendedores e a sociedade em geral.

Em 2012, foram publicadas as Resoluções 143 e 144 pelo DNPM, que estabeleceram diretrizes complementares à PNSB, definindo, por exemplo, os critérios para a classificação de risco das barragens e os planos de segurança delas.

Ainda em 2012, foram emitidas as Portarias 416 e 526 pelo DNPM, que tratavam, respectivamente, do monitoramento e da declaração de estabilidade das barragens de mineração.

Em 2016, o DNPM emitiu a Portaria 14, que estabelecia procedimentos para a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), um documento essencial para a prevenção e resposta a acidentes em barragens.

Já em 2017 a norma brasileira NBR 13.028, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece os requisitos para o fechamento de barragens de mineração, garantindo a segurança durante e após esse processo.

Em 2017 também foi publicada a Portaria 70389/2017 do DNPM que tratou especificamente da fiscalização e da aplicação de penalidades relacionadas à segurança de barragens de mineração.

A Agência Nacional de Mineração (ANM) foi criada pela Lei 13.575/2017 e a entidade possui um papel importante na evolução da legislação sobre segurança de barragens de mineração. Em 2019 e 2020, foram publicadas as Resoluções Nº 13/2019 e Nº 32/2020 pela agência, que reforçaram as diretrizes para o monitoramento, a declaração de estabilidade e a classificação de risco das barragens.

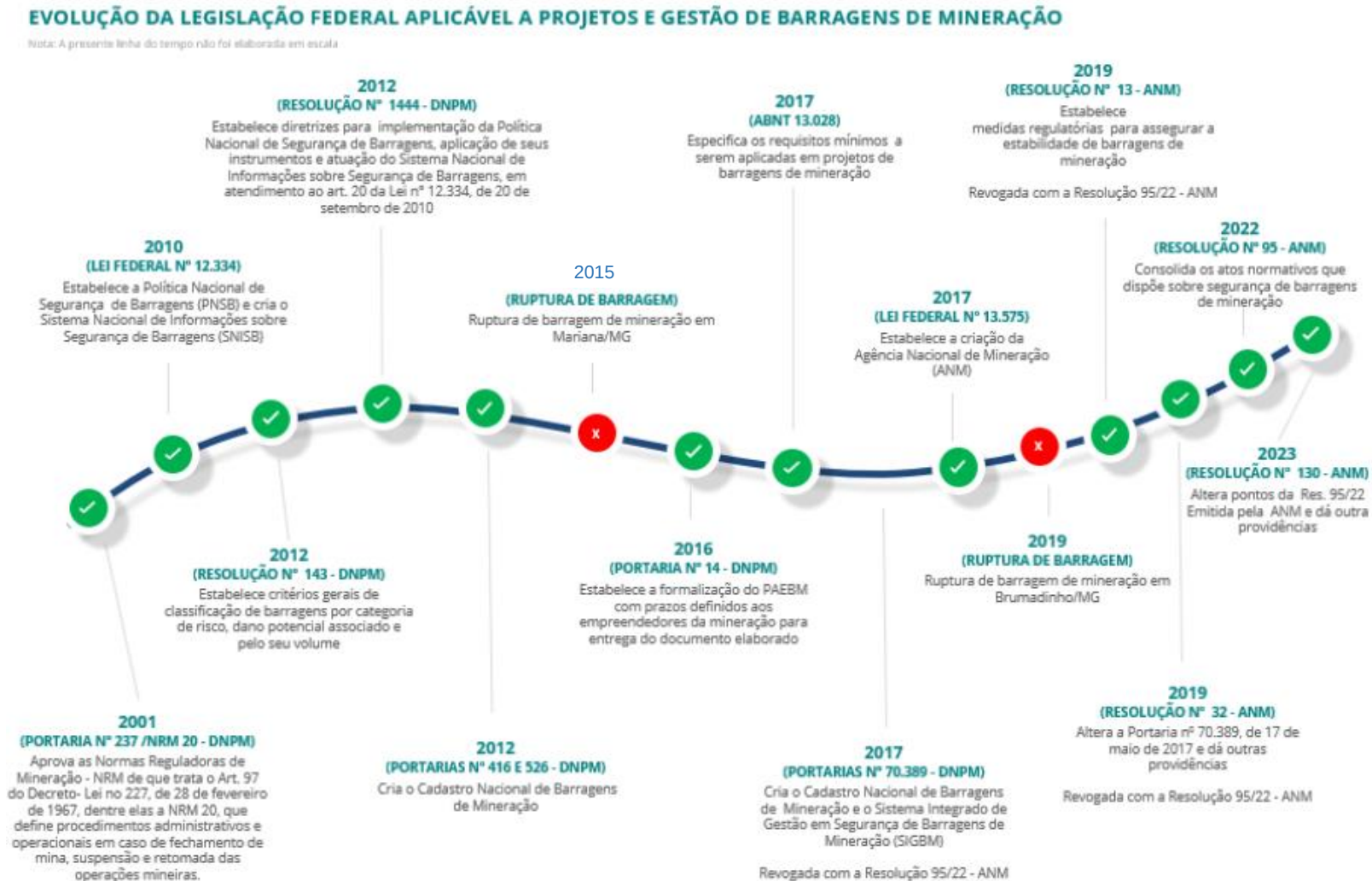
No ano de 2022, a Resolução 95 da ANM estabeleceu requisitos para a revisão dos projetos das barragens, com o objetivo de garantir a segurança e a estabilidade das estruturas.

Mais recentemente, em 2023, a Resolução 130 da ANM foi publicada, visando adequar alguns pontos da Resolução 95/2022 – ANM.

Além da legislação nacional, é importante mencionar o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM), que é uma referência internacionalmente reconhecida e adotada por diversas empresas do setor mineral. Esse padrão estabelece diretrizes e boas práticas para a gestão segura de rejeitos de mineração.

A análise das legislações e regulamentações federais foi realizada por meio de levantamento histórico das principais leis, decretos e resoluções relacionadas à segurança, gestão e elaboração de projetos, incluindo os de descaracterização de barragens de mineração, conforme visualizado na linha do tempo contida na Figura 2, exposta a seguir:

Figura 2 – Fluxograma das etapas de metodologia



Fonte: Autor (2023)

Um ponto importante a ser citado é que um dos principais instrumentos verificados nos regimentos internacionais continua não sendo contemplado pela legislação federal, conforme exposto por Fernandes (2021) que se trata da exigência de garantias financeiras para assegurar recursos para a etapa de fechamento de mina – obras de descaracterização (Taveira, 2003; Miller, 2005; ICMM, 2006; Poveda, 2007; Almeida & Lima, 2008; Sánchez et al., 2013; Neri, 2013). De acordo com MCMPR & MCA (2010) e APEC (2018), garantias financeiras são as melhores ferramentas para se evitar o surgimento de minas abandonada e garantir as devidas obras de descaracterização das barragens e demais intervenções necessárias.

Gigolotti et al. (2022) ressalta que a inexistência de uma norma técnica destinada diretamente à descaracterização de barragens conduz os profissionais envolvidos em projetos e estudos dessa natureza a ter que se valer de normas técnicas relativas a outros trabalhos de engenharia, tais como, construção de barragens e obras de terra em geral, proteção de taludes, implantação de rodovias, sondagem e compactação do solo, drenagens, dentre outros.

A NBR 13.028/17 é, conforme Gigolotti et al. (2022), uma referência, por apresentar as premissas e os critérios técnicos aplicáveis à caracterização física e química dos rejeitos, aos estudos hidrológicos, hidráulicos, geológico-geotécnicos e sísmicos, ao tratamento das fundações, à drenagem superficial e interna do maciço, à impermeabilização da barragem, às estruturas auxiliares e à instrumentação de controle. Por outro lado, considerando as exigências relacionadas às questões ambientais, um engenheiro ambiental deverá elaborar um projeto específico.

Massignam e Sanchez (2022), destacam que, apesar da evolução no quesito legal exposto, os normativos e legislações vigentes possuem algumas lacunas, dentre as quais é possível destacar:

- Quais os critérios a serem avaliados em projetos de descaracterização?
- Quais as técnicas e metodologias a serem utilizadas em projetos e obras de descaracterização de barragens de mineração?
- Qual o conceito adequado de “descaracterização de barragem de mineração”?

Massignam e Sanchez (2022), destacam que o significado de “descaracterização” pode se prestar a múltiplas interpretações: Trata-se de remover uma barragem e os rejeitos armazenados em seu reservatório ou basta estabilizar a estrutura contemplando o desvio do fluxo de água superficial? Atualmente, essas questões ainda não estão consensadas pela comunidade técnica e precisam ser mais bem esclarecidas pelas entidades competentes. Sendo assim, a importância de um estudo de alternativas, com análise de critérios múltiplos avaliando variáveis sociais, ambientais, técnicas e socioeconômicas, bem como a validação deste estudo pelas partes interessadas pertinentes, é a linha de solução adotada na presente dissertação para preencher as lacunas expostas acima em projetos de descaracterização de barragens de mineração.

A presente dissertação teve como foco a avaliação histórica de legislações federais aplicadas a barragens de mineração, por serem consideradas, usualmente, mais restritivas que as municipais e estaduais. Entretanto, ressalta-se que para a elaboração de um projeto de descaracterização de barragens devem ser verificadas e atendidas todas as legislações relacionadas e aplicáveis, inclusive considerar a adoção de normas internacionais de acordo com a especificidade de cada caso estudado.

2.4 Conceitos fundamentais em projetos de descaracterização de barragens de mineração

2.4.1 Definição de barragem descaracterizada e objetivos de um projeto desta natureza

Para a elaboração de projetos dessa natureza é fundamental entender o que caracteriza uma estrutura descaracterizada. Sendo assim, de acordo com o item XV do art. 2º da Lei 14.066/2020, tem-se o seguinte conceito para barragem descaracterizada:

“XV - barragem descaracterizada: aquela que não opera como estrutura de contenção de sedimentos ou rejeitos, não possuindo características de barragem, e que se destina a outra finalidade.”

Segundo o item VIII do art. 2º da Resolução Nº 95/2022 – ANM, a seguir é exposto a definição de barragem descaracterizada:

“VIII - Barragem de mineração descaracterizada: estrutura que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem, de acordo com projeto técnico, compreendendo, mas não se limitando, às seguintes etapas concluídas:

a) Descomissionamento: encerramento das operações com a remoção das infraestruturas associadas, tais como, mas não se limitando: a espigotes e tubulações, exceto aquelas destinadas à garantia da segurança da estrutura;

b) Controle hidrológico e hidrogeológico: adoção de medidas efetivas para reduzir ou eliminar o aporte de águas superficiais e subterrâneas para o reservatório, bem como a redução controlada da linha freática no interior do reservatório;

c) Estabilização: execução de medidas tomadas para garantir a estabilidade física e química de longo prazo das estruturas que permanecerem no local;

d) Monitoramento: acompanhamento pelo período mínimo de 2 (dois) anos após a conclusão das etapas anteriores, objetivando assegurar a eficácia das medidas de estabilização e de controle hidrológico e hidrogeológico, que deve ser dividido em até duas fases, sendo estas:

Monitoramento ativo: compreende o período mínimo obrigatório de 2 (dois) anos estabelecido no item 'd', podendo ser estendido conforme definição do projetista, tendo por base estudo de ruptura hipotética, que considere as condições reológicas do rejeito, os níveis freáticos atualizados e o volume mobilizável fisicamente possível, devendo ser mantidas as obrigações de elaboração e atualização da documentação técnica fixadas na norma, bem como a periodicidade de inspeções, níveis de monitoramento da instrumentação geotécnica, emissões de relatórios e declarações estabelecidas para as barragens em fase operacional;

Monitoramento passivo: Período adicional não obrigatório de monitoramento, exceto se exigido formalmente pela ANM, com duração, instrumentação e frequência de aquisição de dados definidas pelo projetista, compreendido entre o fim do monitoramento ativo e o efetivo descadastramento da estrutura, objetivando alcançar os critérios preconizados nas normas técnicas e legais e nas boas práticas da engenharia para a garantia da estabilidade física e química de longo prazo. ¹

¹ - Alterado pela Resolução Nº 130/23 – ANM

O Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos é estruturado em 15 (quinze) princípios, dos quais 9 (nove) estão relacionados diretamente com a etapa de descaracterização/fechamento das barragens de rejeitos, conforme apresentado na Tabela 2.

*Tabela 2 – Princípios de gestão de descaracterização de barragens de rejeito
GISTM*

Princípio	Objetivos Gerais
1	Respeitar os direitos de pessoas afetadas pelo projeto procurar engajá-las significativamente em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento
2	Desenvolver e manter uma base de conhecimentos interdisciplinar para apoiar uma gestão segura dos rejeitos ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento
3	Usar todos os elementos da base de conhecimentos – sociais, ambientais, econômicos e técnicos locais – para subsidiar decisões ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento
4	Desenvolver planos e critérios de projeto para as estruturas de disposição de rejeitos no sentido de minimizar riscos em todas as fases do seu ciclo da vida, inclusive nas fases de fechamento e pós-fechamento.
5	Desenvolver um projeto robusto que integre a base de conhecimentos e minimize o risco de falhas que possam atingir as pessoas e o meio ambiente em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive nas fases de fechamento e pós-fechamento.
6	Planejar, construir e operar a estrutura de disposição de rejeitos de modo a garantir a gestão de riscos em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, incluindo nas fases de fechamento e pós-fechamento

Princípio	Objetivos Gerais
7	Projetar, implementar e operar sistemas de monitoramento para gerenciar riscos em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento
10	Estabelecer e implementar níveis de revisão como parte de um sistema robusto de gestão da qualidade e de riscos para todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento
15	Divulgar publicamente e oferecer acesso a informações sobre as estruturas de disposição de rejeitos para apoiar a prestação de contas e responsabilização pública.

Fonte: ICMM (2020)

É válido ressaltar que, apesar dos 9 princípios supracitados abordarem tópicos relativos ao fechamento/descaracterização de maneira direta, os demais tópicos também são considerados fundamentais para a gestão das estruturas do início de sua concepção até as conclusões das etapas de descaracterização e reintegração da estrutura ao meio ambiente.

A Tabela 3, abaixo, destaca pontos elencados pelo IBRAM, em relação aos objetivos de um projeto de descaracterização de barragem de mineração.

Tabela 3 – Objetivos da descaracterização

Princípios	Objetivos Gerais
Proteção da qualidade ambiental, da segurança e da saúde pública.	Garantir a estabilidade física da área.
Garantia da recuperação das áreas degradadas, possibilitando um uso compatível com suas aptidões e restrições e com as demandas locais e regionais.	Atingir o uso futuro preestabelecido na área de responsabilidade direta da empresa (propriedade, concessão ou servidão).
Alcançar uma situação pós-fechamento que constitua um legado benéfico e duradouro para a comunidade.	Reduzir os impactos socioeconômicos negativos advindos do fechamento.
	Manter o nível de desenvolvimento econômico e social da comunidade.

Fonte: IBRAM (2013).

O tema descaracterização de barragens de mineração teve maior visibilidade e notoriedade, no Brasil, após os acidentes ocorridos no século XXI, em especial os de 2015 (Mariana/MG) e de 2019 (Brumadinho/MG), onde o último motivou a publicação da Resolução Nº 95/2022 – ANM.

De acordo com Massignam e Sanchez (2022), devido aos poucos casos documentados no Brasil, há escassa experiência prática e conhecimento limitado sobre os impactos da descaracterização de barragens de mineração.

As legislações vigentes reforçam a obrigatoriedade da elaboração de projeto conceitual de fechamento e descaracterização da estrutura, na etapa de concepção do projeto de implantação da barragem. Segundo Bjelkevik (2011), o planejamento da descaracterização das barragens deve iniciar concomitantemente ao planejamento da implantação da estrutura com a finalidade de garantir uma operação sustentável e a redução dos custos de implantação e operacionais. A boa prática da engenharia, conforme pontuado por Pozzo et al. (2006), orienta planejar o fechamento e, conseqüentemente, a descaracterização da estrutura mediante análise de riscos nas áreas de geologia, geotecnia, hidrologia, hidrogeologia, sismicidade, hidrometeorologia, população e ambiente. Lacy (2005) avalia que o registro histórico documental da estrutura é fundamental para a elaboração de projetos de descaracterização e qualquer outra natureza para a estrutura.

Guidinici et al. (2021) reforça a importância do monitoramento das variáveis capazes de afetar a estrutura (piezometria, hidrologia, sismos, pressões no maciço, fundação e tapete drenante, deformações, vazões, dentre outras) antes, durante e após a etapa de projeto e obras de descaracterização, visando garantir a fidelidade do modelo elaborado e a coerência do mesmo com a situação real de campo.

Para a elaboração do projeto de descaracterização, a obtenção de informações pré-existent sobre a barragem terá importância fundamental para facilitar o desenvolvimento dos estudos e otimizar custos e prazos. Contudo, mesmo com tais informações, usualmente é necessário a realização de estudos complementares para a elaboração de projeto executivo/detalhado tal como: mapeamentos geológicos-geotécnicos complementares, levantamentos topobatimétricos cadastrais adicionais, sondagens diversas (percussivas, rotativas, trincharias exploratórias, piezocone, dentre outras) nos locais indicados em projetos, ensaios de laboratoriais e de campo (adensamentos, triaxiais em condições drenadas e não drenadas, cisalhamentos diretos, infiltração, permeabilidade, parâmetros de resistência e caracterização da massa de rejeitos e solos, dentre outros), avaliação das condições hídricas e determinação de jazida (caixa de empréstimo) para obtenção dos materiais necessários para a implantação da obra, bem como determinação de local para descarte de material excedente de escavação (bota-fora).

É de suma importante destacar que obras de descaracterização de barragens podem ser de grande porte, demandando consumo significativo de materiais naturais utilizados na construção, como enrocamento, britas e areia.

Muitas obras envolvem a escavação de solo em áreas internas às minas e o transporte desses materiais, além de supressão vegetal seja para caminhos de serviço para sondagens e serviços preliminares ou até mesmo para viabilizar soluções técnicas previstas. Sendo assim, as análises de alternativas devem considerar esses impactos e buscar mitigá-los, otimizando os custos, prazos e prezando pela segurança da estrutura.

A seguir são elencadas as principais análises e etapas a serem realizadas em projetos de descaracterização de barragens de rejeito de mineração, que serão explanadas e avaliadas à luz dos dados de pesquisa consolidados, de maneira sucinta, na sequência do presente capítulo.

- 1) Avaliações iniciais;
- 2) Avaliação do histórico e documentação da estrutura;
- 3) Análise e gerenciamento dos riscos;
- 4) Estudos geométricos;
- 5) Estudos geológicos-geotécnicos;
- 6) Estudos hidrológicos e hidráulicos;
- 7) Análises ambientais;
- 8) Análises construtivas;
- 9) Monitoramento.

É válido frisar que apesar de aparecerem sequencialmente, etapas costumam ocorrer de maneira simultânea. Importante ressaltar que projetos são dinâmicos e possuem características singulares. Dessa maneira, as especificidades de cada caso devem ser analisadas por equipe multidisciplinar com experiência na área, adotando as soluções aplicáveis, sendo o presente trabalho orientativo e referencial para casos aplicáveis. Vale ressaltar que as etapas supracitadas ocorrem em fases específicas ou ao longo do ciclo, como por exemplo a análise de riscos, que é uma etapa que se inicia e finaliza com o projeto.

Os itens supracitados são detalhados nos tópicos 2.4.2 a 2.4.9.

2.4.2 Estudos Iniciais, Geométricos e locacionais

Para desenvolvimento das atividades de estudos geométrico e locacionais é necessário a utilização de base topográfica cadastral representativa e validada, conforme exposto por Vargas (2005). Visando garantir a fidelidade da base topográfica é recomendado a avaliação pelo projetista em visita de campo, com o intuito mitigar/eliminar o risco de retrabalhos ocasionadas pela adoção de bases incompletas ou com informações incorretas.

É necessário ter cautela ao consolidar os documentos existentes para as diferentes disciplinas e de épocas distintas, uma vez que as estruturas, principalmente as mais antigas (usualmente projetadas em SAD69, sistema de coordenadas locais ou Datum desconhecido), podem possuir projetos em bases topográficas diferentes da recomendada, atualmente, adotado como referência para o Sistema Geodésico Brasileiro – SGB pelo Instituto Brasileiro de Geociências – IBGE (Datum: UTM-SIRGAS 2000) e descompatibilizadas com levantamentos vigentes. Conforme Vargas (2005) é recomendável a avaliação da monografia dos marcos, bem como a instalação de marcos fixos e referenciais a serem utilizados como base única para todos os levantamentos a serem realizados na estrutura, independente da disciplina e natureza da atividade desenvolvida. Essa avaliação é fundamental para evitar interpretações distorcidas e, conseqüentemente, modelos não representativos, comprometendo a qualidade dos estudos subsequentes a serem desenvolvidos embasados nas informações obtidas na base topográfica.

Em projetos de implantação de novas estruturas ou alteamento de barragens existentes, é necessário a avaliação e concepção da geometria de implantação em sinergia com as soluções previstas nos projetos de descaracterização das estruturas, conforme recomendado nos princípios do GISTM.

2.4.3 Estudos Geológico – Geotécnicos

A ABNT 13.028/17 esclarece que os estudos geológico-geotécnicos devem possibilitar um entendimento adequado das características dos materiais de fundação e de construção, e respectivos comportamentos perante as solicitações que serão impostas pelas estruturas e conteúdo do reservatório. A norma torna mandatório que as características de resistência, compressibilidade e permeabilidade sejam determinadas por meio de ensaios de laboratório e de investigações “*in situ*”.

Conforme citado por Gigolotti (2022) para a elaboração de um projeto assertivo é fundamental o investimento de tempo e recurso no planejamento, execução e análise das investigações geológica-geotécnicas realizadas.

Para projetos de descaracterização de barragens de mineração, a NBR 13.028/17 recomenda a avaliação das seguintes etapas:

2.4.3.1 Mapeamento geológico-geotécnico:

Conforme exposto por Brito (2018), nesta etapa do projeto deve ser realizado o trabalho de mapeamento geológico-geotécnico de campo para reconhecimento e caracterização das unidades geológicas, ocorrências de afloramentos, avaliação das estratigrafias (rochas, formações, grupos, supergrupos e contatos geológicos), estimativa das espessuras dos pacotes rochosos, características geomecânicas (atitudes, dobras, falhas e fraturas) e características geotécnicas superficiais na área de estudo (descontinuidades devem ser observadas e mapeadas nessa fase) para a fundação e estruturas, barramento, encostas, ombreiras e estruturas acessórias/adjacentes.

Atenção especial à geologia regional e local é dada nessa fase, buscando melhorar o entendimento e fornecer informações importantes para o projeto, conforme recomendado pela NBR 13.028/17.

2.4.3.2 *Investigações Geológicas – Geotécnicas:*

2.4.3.2.1 *Sondagens:*

Conforme exposto por Brito (2018), para melhor entendimento da estrutura podem ser propostas investigações contemplando um leque de sondagens, dentre as quais as mais utilizadas são as sondagens percussivas ou mistas, com contagem de golpes SPT. Também é usual o emprego de ensaios de piezocone (com ou sem sísmica), para tanto é necessário avaliar a necessidade e velocidade de dissipação de poropressão, bem como a definição dos procedimentos para análises sísmicas (quando empregadas). A partir dos dados obtidos, seja SPT, Vane test, Piezocone é possível iniciar as análises de estabilidade, ainda que por correlação, e posteriormente ajustá-las com os dados obtidos nas campanhas de ensaios de campo e laboratório propostos, que usualmente demoram mais tempo para serem concluídos.

O modelo computacional deve fornecer informações representativas referente às condições da estrutura. Dessa maneira, usualmente são previstas avaliações contemplando mais de uma metodologia simultaneamente, isto é, além das tradicionais campanhas de sondagens e ensaios laboratoriais, são realizados levantamentos com geofísica (como o GPR e MASW – geofísica ativa e passiva), que auxiliam na interpretação do contexto geológico geotécnico e na elaboração do modelo a ser adotado como base para o projeto. Vale ressaltar que os estudos com geofísica podem, inclusive, otimizar eventuais furos de sondagem propostos em campanhas de investigações, a depender da informação obtida nos levantamentos com eletrorresistividade.

A partir da avaliação dos dados obtidos nos ensaios de SCPTUs, SPTs e demais investigações realizadas, é possível realizar uma avaliação inicial da operação e a recomendar a escolha de máquinas para a execução das obras, em função da capacidade de suporte da praça de trabalho dispostas nas investigações, além de subsidiar a definição dos parâmetros a serem utilizados nas etapas de estabilidade e estudos de ruptura hipotéticas.

2.4.3.2.2 Ensaios geotécnicos (campo e laboratório):

Para melhor estimativa dos parâmetros de resistência, bem como avaliação dos possíveis comportamentos do material são recomendados, pela ABNT NBR 13.028/17 a realização de ensaios laboratoriais e de campo diversos, dentre os quais podemos destacar os de caracterização, permeabilidade e de resistência ao cisalhamento (triaxiais e cisalhamento direto). Os ensaios fornecerão informações e índices importantes para a concepção do projeto.

2.4.3.2.3 Definição de parâmetros geológico-geotécnicos:

Os parâmetros geotécnicos devem ser criteriosamente discutidos com equipe especializada, engenheiros de registro da estrutura, consultores e avaliadores independentes, de preferência considerando os dados das sondagens, geofísicas, ensaios diversos, percepção visual e informações históricas obtidas. A escolha de parâmetros que não são representativos pode comprometer a segurança do projeto.

É válido reforçar a resolução ANM Nº 95/2022, no parágrafo 2º, do artigo 23, reforça a obrigatoriedade dos ensaios de campo e laboratório:

“§ 2º Os parâmetros de resistência utilizados para o cálculo dos fatores de segurança devem ser obrigatoriamente definidos a partir da análise e interpretação de resultados de ensaios geotécnicos, das condições drenada e não drenada, atualizados e representativos, conforme definido pelo projetista, realizados no próprio material constituinte do barramento, do reservatório e da fundação, devendo ser informadas as fontes dos parâmetros utilizados.”

2.4.3.3 Definição de modelo geológico-geotécnico:

Esta etapa, conforme exposto por Brito (2018), deve ser validada por especialistas técnicos e profissionais que detenham histórico da região, bem como responsáveis pela realização dos ensaios laboratoriais e de campo utilizados para a definição dos parâmetros. Um bom modelo precisa ser representativo, com condições coerentes de cunha de ruptura, estratigrafia, parâmetros de resistência dos materiais, níveis d'água e demais informações relevantes. É de suma importância, em projetos

de descaracterização de barragens, uma análise de sensibilidade de todos os parâmetros representativos do modelo, com o intuito de avaliar e monitorar condições críticas e de alerta para a estrutura previamente.

2.4.4 Análises de estabilidade e comportamento da estrutura

2.4.4.1 Análises de estabilidade:

É recomendável a realização de sensibilidade das principais variáveis que influenciem os fatores de segurança nas análises de estabilidade realizadas. É de suma importância conhecer e monitorar os principais gatilhos, bem como possuir sistema de gestão de riscos para resposta a esses eventos indesejados.

Dentre os principais pontos a serem avaliados na análise de estabilidade é possível destacar:

- Talude de montante para rebaixamento do reservatório;
- Capacidade de suporte das praças de trabalho (especialmente em rejeitos);
- Cenários com diferentes hipóteses/cunhas de ruptura;
- Cenários de percolação da água nos aterros, fundações e interfaces (regime normal e extremo);
- Influência de sismos;
- Análise de tensão x deformação.

Para a avaliação da segurança das estruturas é inerente a análise das condições de potenciais situações de resposta não drenada, incluindo estudos de potencial de liquefação dos materiais, quando aplicável.

É importante ressaltar que as seções de estabilidade analisadas sejam representativas e suficientes para análise técnica pelo projetista. Visando abranger regiões de possíveis rupturas, é recomendável ao menos uma seção em cada ombreira e uma seção na região mais crítica da barragem. Taludes adjacentes ao reservatório/extravasor também devem possuir sua estabilidade estudada e garantida, sendo fundamental uma análise minuciosa da fundação da estrutura.

O Guia de Boas práticas do IBRAM (2019) orienta que para estruturas descaracterizadas a estabilização de longo prazo demanda que a estabilidade independa de intervenção humana e que, ainda, seja capaz de enfrentar eventos extremos, como cheias e sismos com probabilidade mínima de recorrência.

2.4.4.2 *Rebaixamento do nível de água (N.A) do reservatório:*

Com o implemento da resolução nº 95, houve uma considerável demanda pela implantação de projetos de descaracterização de barragens de mineração, no país.

Dessa maneira, muitas vezes é necessário a elaboração de estudos de rebaixamento do nível de água dos reservatórios de barragens, como condicionante para execução dos serviços de terraplenagem previstos em projeto, incluindo a tratativa do maciço (remoção total, remoção parcial ou reforço). Essas atividades devem seguir as exigências realizadas na NBR 13028/2017, onde é recomendado que sejam efetuadas análises de estabilidade do talude de montante avaliando os cenários possíveis para rebaixamento do reservatório, seja por motivo operacional ou emergencial. Devido às incertezas presentes no estudo, recomenda-se a adoção da solução que permita um projeto mais conversador.

Para uma análise de rebaixamento mais assertiva, o conhecimento da variação da permeabilidade do solo, com a variação de sua saturação, é de suma importância para a elaboração de um modelo representativo e consequentemente estudos mais fidedignos.

De acordo com Rodrigues (2023), é fundamental a quantificação da velocidade do rebaixamento, de acordo com as características geométricas da barragem e os parâmetros geotécnicos dos materiais utilizados na sua construção, visando garantir a segurança das atividades. É recomendável a utilização da curva cota-volume do reservatório para a avaliação do quantitativo a serem removidos, bem como dimensionamento do sistema de bombeamento e faseamento do rebaixamento. Vale pontuar que os estudos supracitados são desafiadores para o engenheiro geotécnico, uma vez que rupturas não drenadas também podem ocorrer, no talude de montante, devido ao excesso de poropressão no maciço durante o rebaixamento do lago.

Segundo Rodrigues (2023) é importante que o modelo desenvolvido seja atualizado, por meio de informações de campo e monitoramento, durante todas as etapas do projeto. A partir dos dados obtidos pode ser necessário a realização de ajustes nas estratégias de rebaixamento.

2.4.5 Estudos Hidrológicos e Hidráulicos

A ABNT 13.028/17 define os requisitos para os estudos:

“Os estudos hidrológicos e hidráulicos devem descrever as características climáticas e hidrológicas da bacia de contribuição para a barragem, além de definir os parâmetros necessários ao dimensionamento do sistema extravasor da barragem, do sistema de bombeamento (quando aplicável) e do sistema de desvio do curso d’água”.

A base de informações necessárias para o desenvolvimento de balanço hídrico do reservatório deve ser apresentada e associada ao balanço de massa dos rejeitos e/ou taxa de geração de sedimentos, quando aplicável. É esperado também que seja apresentada a descrição metodológica para a determinação dos quantis de precipitação e/ou vazão que serão utilizados para o trânsito de cheias do reservatório. As estações de referências utilizadas para as análises estatísticas com a determinação dos quantis de chuvas devem ser explicitadas no que se refere à sua representatividade espacial dos processos hidrológicos existentes na bacia de contribuição da barragem. Utilizar prioritariamente estações de referência com mais de 20 anos de dados consistidos.

A ABNT 13.028/17 também determina que o balanço hídrico do reservatório deve ser apresentado incluindo os potenciais entradas e saídas de água durante toda a vida útil e após o seu fechamento. O relatório do projeto deve apresentar a origem da informação de cada variável do balanço, bem como apresentar os resultados e interpretação do comportamento do reservatório (volume e elevação) ao longo da vida útil do empreendimento, notadamente a frequência de vertimentos e atendimentos legais de restituição e manutenção de vazões mínimas. 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

Conforme Sousa (2018), a partir das vazões de projeto, da avaliação da geração de sedimentos e das condições geométricas de implantação será estabelecida a diagramação do sistema, subsidiando o dimensionamento da drenagem superficial e dos sistemas de controle de sedimentos (sumps).

É importante destacar que é parte do escopo do projeto a avaliação da necessidade de impermeabilização e controle dos fluxos de drenagem da estrutura e que o avanço desses estudos dependerá das características de cada projeto, podendo ser necessário intervenções para combater a drenagem ácida e eventos danosos ao meio ambiente.

O escopo hidrológico-hidráulico contempla também o dimensionamento de sistema de drenagem interna e do extravasor. Para projetos de descaracterização é importante atentar-se para o art. 24 da Resolução Nº 95/22 – ANM

“§ 3º O período de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor para o período de desativação ou descaracterização da estrutura, deve atender, independentemente do DPA, a 10.000 (dez mil) anos ou PMP (Precipitação Máxima Provável), a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado”.

É importante ressaltar que para a elaboração do estudo são necessárias informações obtidas nos ensaios de caracterização propostos e realizados previamente. Além de obter parâmetros importantes do mapeamento do potencial de inundação no âmbito dos estudos de *dam break* como profundidades do escoamento, velocidades e vazões, tais informações obtidas por meio deste estudo, auxiliarão as partes interessadas a identificar os possíveis principais impactos, orientando o planejamento e tratamento dos riscos a jusante.

Para a execução de estudos dessa natureza, usualmente são utilizadas as ferramentas computacionais:

- QGIS® ou ARCGIS® para o georreferenciamento e análise vetorial (OSGEO, 2021);
- HEC-HMS® para modelagem hidrológica;
- HEC-RAS® para a modelagem hidrodinâmica.

Além dos softwares supracitados, são avaliados os dados de campo e escritório obtidos.

Como fonte de consulta para análise de chuvas é usualmente consultado o livro “Diretrizes Para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração”, elaborado por Pinheiro (2011).

De acordo com as recomendações da resolução ANM Nº 95/2022, o projetista deverá avaliar a possibilidade de adoção de medidas efetivas para reduzir ou eliminar o aporte de águas superficiais e subterrâneas para o reservatório em projetos de descaracterização de barragens, conforme recomendações legislativas e boas práticas de engenharia.

Pinheiro (2011), recomenda a avaliação do risco hidrológico para todas as estruturas, inclusive as provisórias, como as utilizadas para desvio de nascentes/drenagens/cursos d'água. Uma estratégia de mitigação de riscos adotadas em projetos de descaracterização de barragens é trabalhar de maneira conservadora, frente às incertezas presentes em cada etapa de engenharia desenvolvida.

É prudente a avaliação da região a jusante da estrutura a ser descaracterizada, visando mitigar riscos associados às intervenções proposta nas drenagens da área.

Ávila (2021) enfatiza que quanto maior o histórico da região e da estrutura a sofrer intervenções, mais representativo e seguro se torna o estudo, evitando extrapolações ou correlações, sem tanta precisão, na obtenção de parâmetros importantes para os dimensionamentos de projeto.

2.4.6 *Análises Construtivas*

Por se tratar de estruturas de elevada complexidade geotécnica, as intervenções realizadas em barragens devem ser cautelosamente planejadas e ocorrer em conformidade com a documentação técnica emitida para o projeto, contemplando, minimamente, os procedimentos, processos executivos e de controle de construção para o projeto. Um ponto importante, enfatizado por Ávila (2021) é a necessidade de se trabalhar com empresas especializadas para o desenvolvimento de estudos, projetos e obras dessa natureza, tendo em vista complexidade, grandeza e impactos usuais destas intervenções.

É válido salientar que, para projetos dessa natureza, o sequenciamento da obra deve ser elaborado pelo projetista responsável com o envolvimento das partes interessadas necessárias. Sendo assim, é recomendável que ocorra reuniões de alinhamento, preferencialmente *in loco*, entre as principais partes interessadas (engenheiro de registros, projetista, responsável pelo ativo, avaliador independente, engenheiro executor das obras, dentre outros a serem mapeados para cada projeto).

Conforme exposto por Barreto (1958), antes do início das obras é recomendável a elaboração de plano de trabalho, contemplando informações sobre a execução das atividades. O ideal é que as obras de descaracterização sejam executadas em período seco, com a finalidade de propiciar condições adequadas de segurança para os envolvidos nas atividades, que, em geral, possuem alto volume de terraplenagem. O referido plano de trabalho, segundo Mattos (2019) deve contemplar o dimensionamento do histograma de mão de obras e equipamentos. Atenção especial deve ser dada para a logística de traslado dos operadores, bem como dos acessos dos equipamentos. Nessa etapa é recomendável avaliar as informações geológicas-geotécnicas para a escolha dos equipamentos, pois em casos de susceptibilidade do material a liquefação as opções, usualmente, ficam restritas à dragagem do material ou equipamentos não tripulados (menos recomendado).

O monitoramento das condições da obra, no quesito estabilidade e deformação, é importante dado a movimentação de equipamentos, especialmente nas etapas de terraplenagem. As intervenções que ocasionam vibrações, como aterros, devem ser executadas de forma gradual e monitoradas, de acordo com Oliveira (2021), evitando impacto significativo no material, com a finalidade de controlar eventuais gatilhos para liquefação, quando aplicável.

Segundo Mattos (2019), o sequenciamento construtivo deverá ser avaliado, contemplando a hierarquia das atividades predecessoras, como a necessidade de aterros de conquista, rebaixamento do reservatório, supressão vegetal, remoção da fauna e flora, construção de acessos operacionais, desvios provisórios de drenagem, demolição de estruturas existentes, relocação de instrumentação, implantação de instrumentos de controle e monitoramento para as obras, instalações administrativas e canteiro de obras, dentre outras, visando um planejamento mais assertivo e uma execução mais segura.

2.4.7 Análise Ambiental

Conforme Carneiro (2017) a presente etapa ocorre ao longo da vida útil da barragem de rejeito, desde sua implantação e enchimento até posteriormente a conclusão das obras de descaracterização. Sendo assim, trata-se de uma análise contínua, que possui dentre os principais objetivos:

- Identificação de restrições e premissas para o projeto/obra;
- Validação da seleção de materiais a serem utilizados no projeto/obra;
- Validação das escolhas de locais para disposição de material excedente;
- Avaliação hidrosedimentológica e quantificação de sedimentos;
- Recuperação ambiental e reintegração da estrutura ao bioma, por meio da escolha do melhor método, visando evitar acúmulo de água e infiltrações, bem como proteger os taludes contra erosão. A depender da característica do rejeito, pode ser necessário tratamentos especiais como a fitorremediação;
- Elaboração de estudos necessários para licenciamento das obras (ASV, LI e outras licenças);
- Auxílio no entendimento e atendimento das condicionantes impostas no licenciamento;
- Reintegração paisagística da região afetada pelas obras.

Importante destacar a necessidade de comunicado também aos órgãos ambientais para o início e conclusão da descaracterização, conforme a resolução Nº 95/22 – ANM estabelece em seu Art. 3º:

“ Art. 3º As barragens de mineração e as ECJ serão cadastradas pelo empreendedor, diretamente no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), integrando o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração (CNBM).

§ 1º O empreendedor é obrigado a cadastrar todas as barragens de mineração em construção, em operação e desativadas sob sua responsabilidade, em consonância com o § 1º do art. 13 da Lei nº 12.334, de 2010, de acordo com a periodicidade expressa no art. 4º desta Resolução.

§ 2º Para o caso de descadastramento por descaracterização, a estrutura deverá ter concluído as etapas mínimas previstas no inciso VIII, art. 2º e o empreendedor deverá apresentar à ANM, por meio do SIGBM:

I - Documento atestando a descaracterização da citada estrutura, elaborado por profissional legalmente habilitado, adicionado de revisão de segunda parte e acompanhado das respectivas anotações de responsabilidade técnica, de acordo com o art. 77 desta Resolução; ou

II - cópia de documento específico expedido pelo órgão ambiental, comprovando a descaracterização

Segundo Sanches (2022) os projetos de descaracterização de barragens devem ser condicionados à recuperação ambiental da área degradada, da estabilidade física, química e biológica e da biodiversidade, em que “o restabelecimento da vegetação pode ser considerado ponto chave”. Devem ser lastrados por um adequado diagnóstico ambiental, não somente voltado para os meios físico e biótico, mas também o antrópico, tendo em vista, também, a adequação paisagística e a definição de uso futuro. Nesse sentido, as Normas Reguladoras de Mineração Nº 39 e a NBR 13030/1999 definem os procedimentos adequados para a realização das intervenções necessárias.

Vale destacar a necessidade de antecipação e informação ao órgão do cronograma previsto para as obras de descaracterização de barragens, visando alinhamento quanto o local para a coleta da água a ser utilizada na avaliação dos parâmetros definidos nas condicionantes ambientais operacionais. Tal análise deve ser realizada em conjunto com equipe multidisciplinar, com o objetivo obter dados coerentes com a realidade e não distorcidos pela intervenção e aumento de aportes de sedimentos decorrentes da etapa de obra, uma vez que durante a execução das atividades há naturalmente um aporte elevado de materiais carreados nessa região, ainda que provisoriamente.

2.4.8 Monitoramento

A etapa de monitoramento é de suma importância para projetos de descaracterização de barragens, conforme pontuado por Massignan (2022). Diante do exposto, abaixo são referenciadas as principais alterações promovidas no art. 2 pela Resolução Nº 130/23 – ANM, em relação a Resolução Nº 95/23 – ANM, no tangente ao monitoramento previsto para as estruturas descaracterizadas ou em fase de descaracterização:

“O Monitoramento de barragens em fase de descaracterização pode ser subdividido em duas etapas, quais sejam:

Monitoramento ativo: *É obrigatório e deve se prolongar por, no mínimo, 02 (dois) anos, podendo ser estendido, a depender do projetista. É uma etapa em que se mantêm todas as obrigações de elaboração e atualização da documentação técnica da barragem, bem como a periodicidade das inspeções, níveis de monitoramento da instrumentação geotécnica, emissões de relatórios e declarações.*

Monitoramento passivo: *Não é obrigatório, exceto se exigido pela ANM. A duração, instrumentação e frequência de aquisição de dados depende de definição do projetista. Nessa etapa, o empreendedor será dispensado de preencher quinzenalmente o EIR; Realizar RPSB; Executar ACO; promover seminário orientativo anual; Emitir DCE da ECJ, quando aplicável. “*

Vale destacar que o monitoramento de barragens em fase de descaracterização fica dispensado quando houver remoção completa do barramento e do reservatório, segundo o Art. 7º, §3º - Resolução ANM 95/2022.

Segundo Machado (2007), projetar, implementar e operar um sistema de monitoramento de engenharia abrangente e integrado que seja adequado para cada situação específica analisada é de suma importância. É necessário destacar que a validação das premissas assumidas e a atualização dos modelos e estudos desenvolvidos no projeto, deve ser atualizado constantemente com os dados obtidos nas etapas de monitoramento.

2.4.9 Considerações Gerais

A engenharia de barragens possui muitas variáveis, sendo assim é importante que as estruturas sejam continuamente monitoradas, em todas as etapas. Atualmente, além das dificuldades de contratação de empresas e mão de obras especializadas para a execução das atividades fundamentais como levantamento topográfico, execução das sondagens, ensaios e projetista para elaboração de projeto, também existem erros epistêmicos e incertezas premissadas ou estimadas, dentre as quais são possíveis destacar os parâmetros de projeto (geotécnicos e hidráulicos), medidas de monitoramento (medições de piezômetros e demais instrumentações), identificação dos modos de falha, condições da provável ruptura (horário e condições de tempo) e parâmetros socioambientais, como o número de pessoas em risco no momento do incidente (MENDES, 2016).

Sendo assim, é recomendável que projetos dessa natureza passem por uma etapa prévia de avaliação de alternativas, considerando os critérios múltiplos abordando aspectos ambientais, técnicos, econômicos e socioeconômicos, previstos para cada cenário e que toda documentação técnica tenha o crivo de avaliadores independentes, tais como *design review* ou *peer review*, e demais partes interessadas anteriormente ao detalhamento do projeto e execução das obras.

De acordo com Sanchez (2022), como medidas finais de projeto, a empresa responsável pelo ativo (barragem) deverá apresentar à ANM uma revisão do Plano de Aproveitamento Econômico do empreendimento, caso aplicável, com a nova forma de operação, em função da concepção de projeto realizada e o mesmo deverá ser atestado por profissional legalmente habilitado.

2.5 Soluções usuais empregadas na descaracterização de barragens

O conhecimento da geometria e possibilidades de execução dos projetos de descaracterização, devido às condições topográficas da implantação das estruturas, devem ser considerados na elaboração de projetos de descaracterização de estruturas. Bem como o GISTM, a ABNT 13028/2017 estabelece que a concepção inicial do projeto deve ser realizada em conjunto com plano de fechamento e desativação da estrutura, definidos nos itens 5.4.14 e 5.4.15, respectivamente, conforme exposto a seguir:

“Plano de Fechamento: Apresentar o plano conceitual de fechamento da barragem incluindo a descrição dos processos, atividades e alternativas de uso futuro, buscando integrar o plano de fechamento da barragem ao plano d fechamento da mina, em conformidade com a legislação específica.

Plano de Desativação: Apresentar o plano conceitual de desativação abrangendo todas as atividades após o término da vida operacional da barragem, como medidas de monitoramento e instrumentação, revestimentos, sistema de drenagem superficial e garantia de estabilidade.”

É importante destacar que as alternativas de soluções para descaracterização de barragens costumam ser limitadas por variáveis como a topografia, restrições geológicas-geotécnicas, ambientais e/ou sociais.

Segundo a resolução ANM Nº 95/2022 as soluções a serem avaliadas, possuem o objetivo a estabilização geológica-geotécnica (contemplando a remoção total/parcial do maciço, construção de reforço na estrutura existente ou implantação de estruturas a jusante da barragem a ser descaracterizada), hidrológica (com adequação de estruturas extravasoras, drenagens internas, superficiais e ainda eventuais adequações de borda livre), ambiental (integração da solução final ao bioma existente, com espécies selecionadas especificamente) e sociais (uso futuro da estrutura descaracterizada, como, por exemplo, paisagismo visando implantação de parque no local).

Os principais métodos e geometrias finais utilizadas para descaracterização de barragens de mineração, conforme Cruz (2021), são explicados a seguir:

- Remoção total do maciço principal, diques e do rejeito, com posterior reconformação do relevo natural original e revegetação da área com espécies da flora nativa. A Figura 3, ilustra solução utilizando essa metodologia.

Figura 3 – Ilustração Remoção total maciço

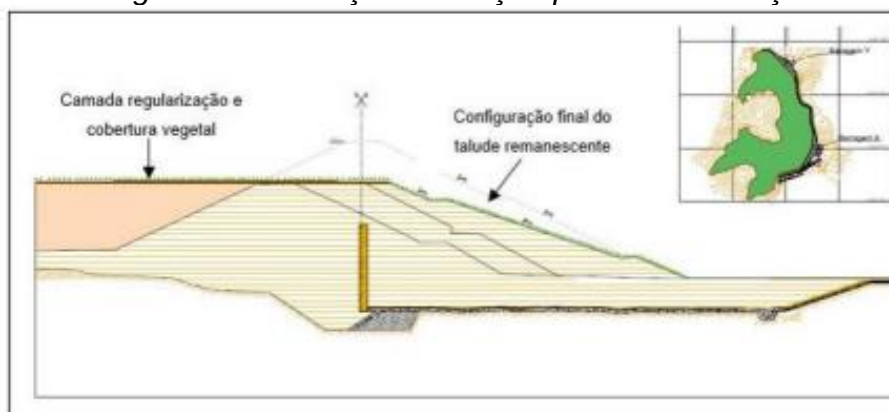


Fonte: Gonçalves (2023)

- Remoção parcial da barragem, dos diques e do rejeito; reforço do maciço principal por jusante; implantação de drenagem superficial e capeamento do reservatório com solo vegetal e vegetação da área com espécies da flora nativa:

Em casos cuja remoção total do maciço seja inviável, a remoção parcial pode ser uma solução a ser considerada em projeto. A Figura 4, ilustra solução utilizando essa metodologia.

Figura 4 – Ilustração Remoção parcial do maciço



Fonte: Gonçalves (2023)

- Construção de um maciço a jusante do maciço principal, implantação de drenagem superficial e capeamento da praia do reservatório com solo vegetal e vegetação da área com espécies da flora nativa. As estruturas a serem implantadas a jusante do maciço principal são conceituadas ECJ e fazem parte do programa de descaracterização de barragens necessários devido as legislações e normativos vigentes. O Art. 2º da Resolução 95/22 – ANM define essa solução como:

“XXIV - Estrutura de Contenção a Jusante (ECJ): estrutura construída a jusante de uma barragem de mineração ou empilhamento drenado com disposição hidráulica de rejeitos e suscetíveis à liquefação, com o objetivo de reter os efluentes desta no evento de ruptura ou funcionamento inadequado;”

As Figura 5 e Figura 6, ilustra solução utilizando essa metodologia.

Figura 5 – Estrutura de contenção a jusante do maciço existente



Fonte: Vale (Relatório RIMA, 2022 – ECJ Gongo Soco – Sul superior)

Figura 6 – Estrutura de contenção a jusante do maciço existente



Fonte: Vale (Relatório RIMA, 2022 – ECJ Gongo Soco – Sul superior)

Tendo em vista os prazos impostos pela legislação, muitas estruturas de contenção a jusante (ECJs) foram elaboradas de forma emergencial e possuem requisitos mínimos de desempenho e gestão da estrutura, contemplando inclusive cadastro no SIGBM, apresentação de DCE, conforme estabelecido, respectivamente, nos artigos 3, 9 e 69 da resolução ANM Nº 95/2022.

As ECJs, podem ser localizadas próximas a comunidades, sendo assim, devem ser projetadas prevendo a adoção de medidas para diminuir os impactos para a comunidade, como umectação de vias e a não realização de atividades que geram ruído após as 22 horas, ou conforme necessidades locais. Por se tratar de estruturas que possuem condições de monitoramento e implantação seguindo os critérios estabelecidos para barragens é fundamental a realização de todas as etapas de licenciamento necessárias, com ênfase especial ao licenciamento ambiental de estruturas com impactos sociais e ambientais significativos, que devem elaborar projeto atendendo aos requisitos impostos pelos órgãos fiscalizadores com autoridade vigente no local de implantação das obras.

Vale ressaltar que as contenções podem ser descomissionáveis, ou seja, existe a possibilidade de remoção destas estruturas, quando não forem mais necessárias.

- Estabilização prévia da estrutura:

Conforme exposto por Sanchez (2022), bem como consta na legislação atual, é mandatório a realização de análises de segurança hidrológica e geológica-geotécnica e condições ambientais da estrutura, na condição atual e futura (em obra) e, caso a estrutura não apresente fatores de segurança satisfatórios, conforme recomendados na NBR 13.028/17, Resoluções 95/22 e 130/23 – ANM, devem ser previstas intervenções visando o atendimento aos requisitos regulamentadores aplicáveis. O Artigo 2 da resolução ANM Nº 95/2022 define estabilização como sendo:

“Art. 2.... c) Estabilização: execução de medidas tomadas para garantir a estabilidade física e química de longo prazo das estruturas que permanecerem no local;”

A depender das condições de segurança, pode ser proposto a utilização de equipamentos não tripulados, visando a garantia da integridade física dos colaboradores envolvidos nas atividades de descaracterização. Conforme exposto por Massignan (2022) todas as recomendações executivas devem ser contempladas em projeto, com especificações técnicas claras indicando o tipo, quantidade e sequenciamento das atividades e recursos (máquinas, capital humano e outros, porventura, aplicáveis).

Para as estruturas que necessitam de reforços a etapa de monitoramento se torna ainda mais fundamental e deve ser dimensionada e executada de acordo com a especificidade e a necessidade de cada projeto.

2.5.1 Destinação do material removido:

Em projetos de descaracterização de barragens de mineração, deve ser avaliado a viabilidade de aproveitamento do material, conforme exposto por Massignan (2022). No caso de rejeitos, usualmente ocorre o transporte do material escavado para local onde este será reprocessado e o mesmo pode ser disposto em outra estrutura licenciada para tal finalidade, seja uma barragem de rejeito, pilha de co-disposição ou pilha de rejeito, a depender de cada cenário.

Para remoção de sedimentos e solos, pode ser avaliado a disposição em estruturas próximas ou até mesmo a utilização do material em obras de engenharia, como reforços, adequações, a serem realizadas nas imediações das intervenções nas estruturas em descaracterização.

Conforme pontuado por Santos et al. (2019), é necessário avaliar previamente os locais disponíveis para realocação do material, tal fato pode condicionar a metodologia a ser adotada para a descaracterização. Em casos em que inexistir espaço para a realocação de volume, pode ser necessário realizar apenas a remoção parcial do maciço, reduzindo a altura dele, onde em casos em que o local e as condições topográficas sejam favoráveis pode se optar pela remoção total do barramento ou ainda pelo reforço ou construção de estrutura a jusante da que será descaracterizada.

Borges (2008), enfatiza que o pleno entendimento dos rejeitos pode viabilizar o aproveitamento do mesmo como subproduto na própria usina ou em outro segmento industrial, tornando possível seu reuso, diminuindo o impacto ambiental e criando receita no lugar de despesas para realizar o armazenamento ou gestão deste material. De acordo com Kitobo et. al (2009), o alto preço das commodities de mineração em conjunto com a crescente consciência ambiental justifica o reprocessamento de rejeitos que estão acumulados a muito tempo nas barragens e possuem valor comercial e propiciam redução do custo de implantação da obra de descaracterização, além de propiciar a geração de empregos, remediação da área degradada, bem como o aumento da receita com a reutilização proposta.

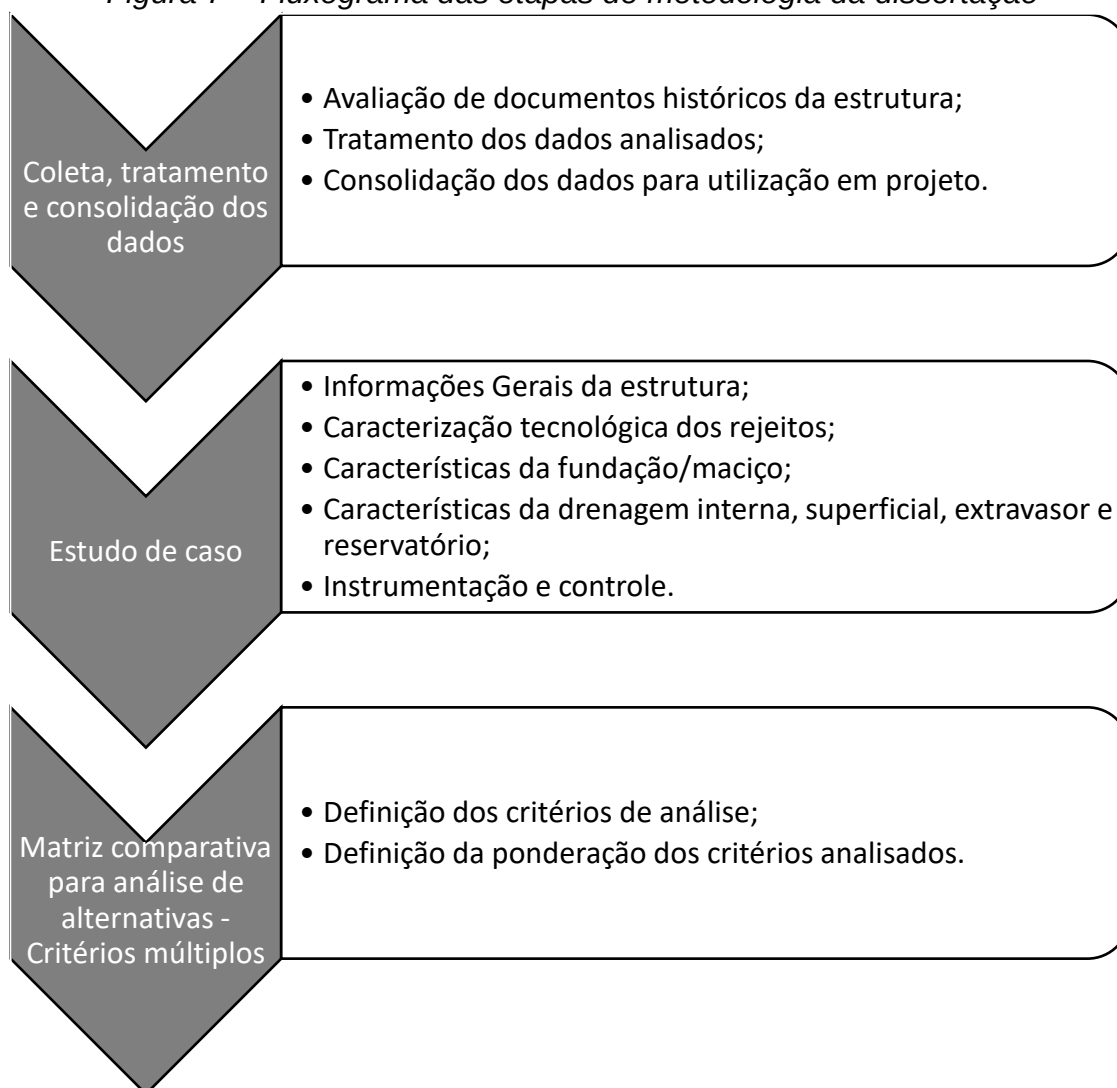
3 – METODOLOGIA

3.1 Introdução

O presente tópico aborda o processo metodológico considerado na elaboração do estudo de alternativas visando à descaracterização de uma barragem de rejeito de manganês, com o intuito de atender às condições de segurança geotécnicas, hidrológicas, hidráulicas, ambientais e sociais inerentes ao caso avaliado.

A sequência dos processos da etapa de metodologia pode ser observada na Figura 7:

Figura 7 – Fluxograma das etapas de metodologia da dissertação



Fonte: Autor (2023)

A metodologia da pesquisa, tendo como enfoque os objetivos da dissertação, foi dividida em três etapas apresentadas a seguir:

1ª Coleta, tratamento e consolidação de dados: Foi realizada a seleção dos principais dados da área de estudo, tais quais, localização, informações hidrológicas, hidrogeológicas, geológicas, geotécnicas, climáticas, sísmicas, sociais e ambientais, bem como a avaliação e consolidação dos documentos e informações relevantes para cada alternativa avaliada, além de dados disponíveis e consultados nas fontes externas, como sites da ANA, ANM, dentre outros. A atividade de coleta, tratamento, consolidação e seleção dos dados (primários e secundários) propiciaram um aprofundamento na investigação do objeto da pesquisa.

2ª Estudo de caso – Descaracterização barragem de mineração de manganês: Essa etapa é de fundamental importância e nela são avaliadas as variáveis identificadas capazes de impactar (positiva ou negativamente) o projeto de descaracterização. É válido ressaltar que a geotecnia, hidrologia e a geologia são consideradas ciências da natureza, e, conseqüentemente, possuem incertezas e devem ser avaliadas, com as medidas de gestão de riscos implementadas de acordo com cada cenário avaliado.

3ª Análise de múltiplos critérios – Definição e ponderação das variáveis analisadas: Será apresentada análise comparativa entre as técnicas empregadas em cada uma das alternativas propostas para a descaracterização da estrutura avaliada, com a consolidação do estudo em uma matriz objetiva de análise de múltiplos critérios.

As etapas metodológicas, empregadas no presente trabalho, são detalhadas nos itens 3.2 a 3.4.

3.2 Coleta, tratamento e consolidação de dados

A pesquisa bibliográfica foi conduzida em bases de dados especializadas, como o *Google Acadêmico*, *Scopus*, *Science Directm Engineering Research Database*, *Web of Science*, *Scielo*, normas técnicas, base de dados da área como ICOLD, ANCOLD, ICM, IBRAM, ANA, ANM, Defesa civis, Ministério Público e bibliotecas virtuais de universidades. As palavras-chave utilizadas na busca foram: “*descaracterização de barragens de mineração*”, “*fechamento de barragens de mineração*”, “*legislações aplicáveis a barragens*”, “*acidentes com barragens*”, “*upstream dam*”, “*decommissioning*”, “*tailings*”, “*dam*”, “*tailings dam closure*”, “*tailings dam failure*”. Além dos dados públicos, também foram avaliados e consolidados dados e levantamentos históricos da estrutura analisada.

Após a pesquisa foi realizado o tratamento dos dados obtidos, onde foram selecionados documentos que contivessem conteúdo relacionados às lições aprendidas, acidentes históricos, modos de falha, métodos construtivos, avanços nas legislações e normas técnicas federais e internacionais, desafios a serem superados, tendências tecnológicas e desafios enfrentados pela indústria da mineração para a descaracterização de barragens de mineração.

Foram avaliadas informações geométricas, geológicas, geotécnicas, recomendações, dados básicos, hidrológicas, hidrogeológicas e ambientais do presente estudo de caso referente a descaracterização de uma barragem de rejeito de manganês, localizada no sudeste do estado do Pará. Esses dados foram consolidados visando a elaboração das alternativas propostas como solução para a descaracterização da estrutura.

3.3 Estudo de caso – Descaracterização barragem de mineração de manganês

3.3.1 Apresentação e análise dos dados

Nesta fase, foram compilados todos os dados referentes às barragens de rejeito em análise. O objetivo foi coletar, organizar e examinar as informações sobre essas estruturas. Para isso, foram consultados os projetos de implantação das barragens, relatórios "As Is", pareceres técnicos, relatórios de Inspeção de Segurança Regular da barragem (RISR), relatórios de Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB), estudos de Dam Break, Planos de Fechamento de Mina, entre outros documentos contidos no Plano de Segurança da Barragem (PSB). Este levantamento e compreensão dos dados fornecem subsídios essenciais para avaliar as principais características da estrutura em estudo, permitindo a proposição de soluções de descaracterização adequadas ao contexto local e regional em que as barragens se inserem.

3.3.2 Normas técnicas de referência

As alternativas apresentadas para o projeto foram concebidas conforme as normas regulamentadoras vigentes:

NBR 10.004 – Resíduos sólidos – Classificação;

NBR 13.030 – Elaboração e apresentação de projetos de reabilitação de áreas degradadas pela mineração;

NBR 11.682 – Estabilidade de Encostas;

NBR 13.028 - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos.

Portaria nº 70.389 – Agência Nacional de Mineração;

Resolução nº 95/22 – Agência Nacional de Mineração;

Resolução nº 130/23 – Agência Nacional de Mineração;

Além das normas acima foram utilizadas as práticas de gestão de projetos, incluindo gestão de riscos, conforme estabelecido pelo Project Management Institute (PMI).

3.3.3 Critérios e premissas: geométricas e geotécnicas

Ao estudar diferentes alternativas para a descaracterização, serão seguidas duas normas de referência para avaliar a estabilidade da estrutura após a descaracterização:

Remoção Completa do Maciço: Para verificar a estabilidade geotécnica nesse cenário, serão adotados os critérios da NBR 11.682 (ABNT, 2009). Esta norma estabelece fatores de segurança mínimos baseados em dois graus de risco: impacto sobre vidas humanas e sobre perdas materiais e ambientais. Ambos serão considerados de baixo risco no presente projeto. Assim, o fator de segurança (FS) adotado será de 1,1, observando que valores de FS inferiores a 1,2 só são permitidos quando os parâmetros de resistência do solo podem ser confirmados por retroanálise. Portanto, foi estabelecido um $FS \geq 1,3$ para as análises pós-descaracterização;

Maciço Remanescente: Para soluções que envolvem a permanência de parte do maciço, mesmo que este não seja considerado como barragem, a verificação da estabilidade geotécnica da estrutura final deve seguir os critérios de segurança da NBR 13.028 (ABNT, 2017), conforme apresentados na Tabela 4 – Fatores de segurança mínimos estabelecidos:

Tabela 4 – Fatores de segurança mínimos estabelecidos

Condição de solicitação	Talude	Superfície freática	FS mínimo exigido
Operação normal	Jusante	Normal	1,5
Operação crítica		Crítica	1,3
Avaliação pseudo estática		Normal	1,1

Fonte: ABNT NBR 13.028 (2017)

- Para o estudo de alternativas do projeto de descaracterização foram utilizados os parâmetros de resistência dos materiais exibidos na Tabela 5 – Parâmetros de resistência adotados, obtidos por meio de investigações de campo e laboratório, realizados pela mineradora, para os materiais constituintes e analisados da estrutura:

Tabela 5 – Parâmetros de resistência adotados

Material	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Aterro inicial/reforço	18	20	26
Aterro alteamento	18	20	22
Areia/ Britas	19	0	32
Enrocamento	20	0	40
Rejeito	18	$S_u=0,22\sigma'_v$	-
Colúvio/ Camada Laterizada	18	20	23
Solo Residual/ Saprolito Metabásica	19	26	28
Solo Residual/ Saprolito Siltito	19	20	28
Zona de falha (brechada)	19	20	28
Rocha Metabásica	20	-	-

Fonte: Relatório As is da estrutura (2023)

Não foi observada a necessidade de complementação das investigações existentes para a elaboração dos cenários de análise de alternativas propostas, a serem avaliadas.

3.3.4 Critérios e premissas: hidrológicos e hidráulicos

Foram adotados os seguintes critérios e premissas hidrológicos e hidráulicos para o desenvolvimento do projeto de descaracterização:

- O dimensionamento hidráulico foi realizado conforme recomendação da Norma Técnica NBR 13.028 (ABNT, 2017), considerando o período de fechamento. Será utilizado o evento de chuva com tempo de retorno superior a 10.000 anos (PMP – precipitação máxima provável), recomendado pela norma e resolução ANM Nº 95/2022, independente do dano potencial associado à estrutura.
- Consideração da estação pluviométrica operada pela Agência Nacional das Águas nas proximidades de estrutura para subsidiar a determinação das precipitações de projeto, em conjunto com os estudos das estações existentes;

3.3.5 Critérios e premissas: gerais

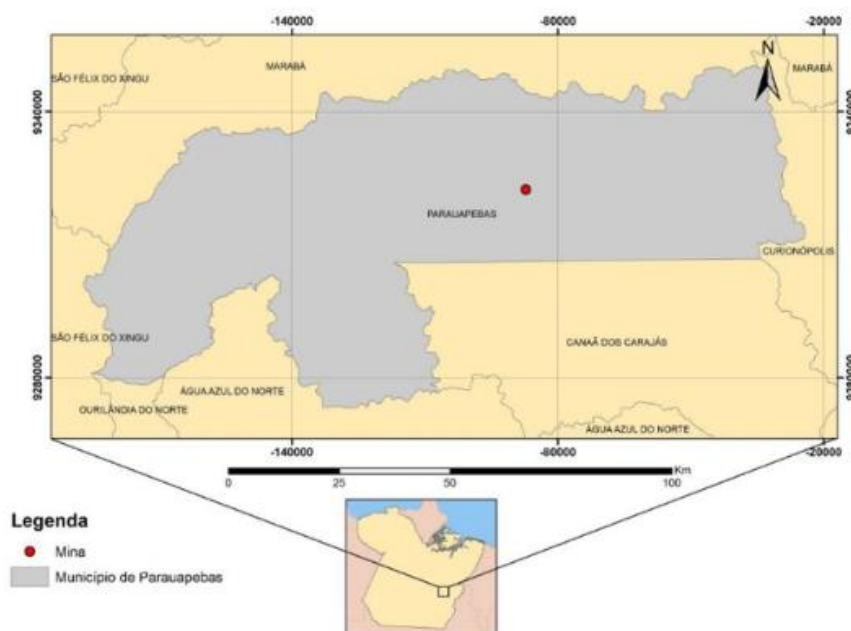
Foram adotados os seguintes critérios e premissas gerais para o desenvolvimento do projeto de descaracterização:

- O limite da área de influência do projeto considerado foi aquele compreendido na área já licenciada ocupada pelo reservatório da barragem, diminuindo o impacto ambiental das soluções a serem propostas;
- É previsto, na sequência de descaracterização, que as estruturas de montante já estejam em processo avançado de estabilização física (recuperação ambiental). Desta forma, é mitigada a possibilidade de geração de sedimentos acima da condição natural, sendo encaminhados para a área a ser recuperada/d Descaracterizada;
- O acesso principal será mantido, considerando-se eventuais necessidades de inspeção/manutenção nos primeiros anos após a descaracterização, bem como a etapa de monitoramento ativo, pós-obras, obrigatória pela Resolução ANM Nº 95/2022;

3.3.6 Informações gerais da barragem

A Barragem em estudo está localizada em uma Mina de exploração de manganês, localizado no sudeste do Pará, conforme exibido na Figura 8 – Localização da Barragem em estudo.

Figura 8 – Localização da Barragem em estudo



Fonte: Relatório As is da barragem (2023)

A estrutura, com crista localizada na cota 501,00 (Datum vertical: Imbituba) tem seu acesso via estrada de terra na margem esquerda de seu reservatório. Sendo que o acesso à mina é feito por meio de rodovia federal, distante aproximadamente 75 km de um centro urbano.

A barragem foi concebida para contenção de rejeitos de minério provenientes do processo de beneficiamento da usina de manganês (Mn) e também para captação de água a ser utilizada no processo de beneficiamento do mineral. A barragem foi projetada para ser construída em 3 etapas denominadas: (i) inicial (El.496m); (ii) intermediária (El.501m) e; (iii) final (El.506m). A estrutura encontra-se na etapa intermediária (El.501m), com seu reservatório já preenchido no limite operacional, sendo que não será implantada a etapa final, uma vez que a estrutura entrará em processo de descaracterização. A Figura 9, representa a barragem em estudo, antes do processo de descaracterização.

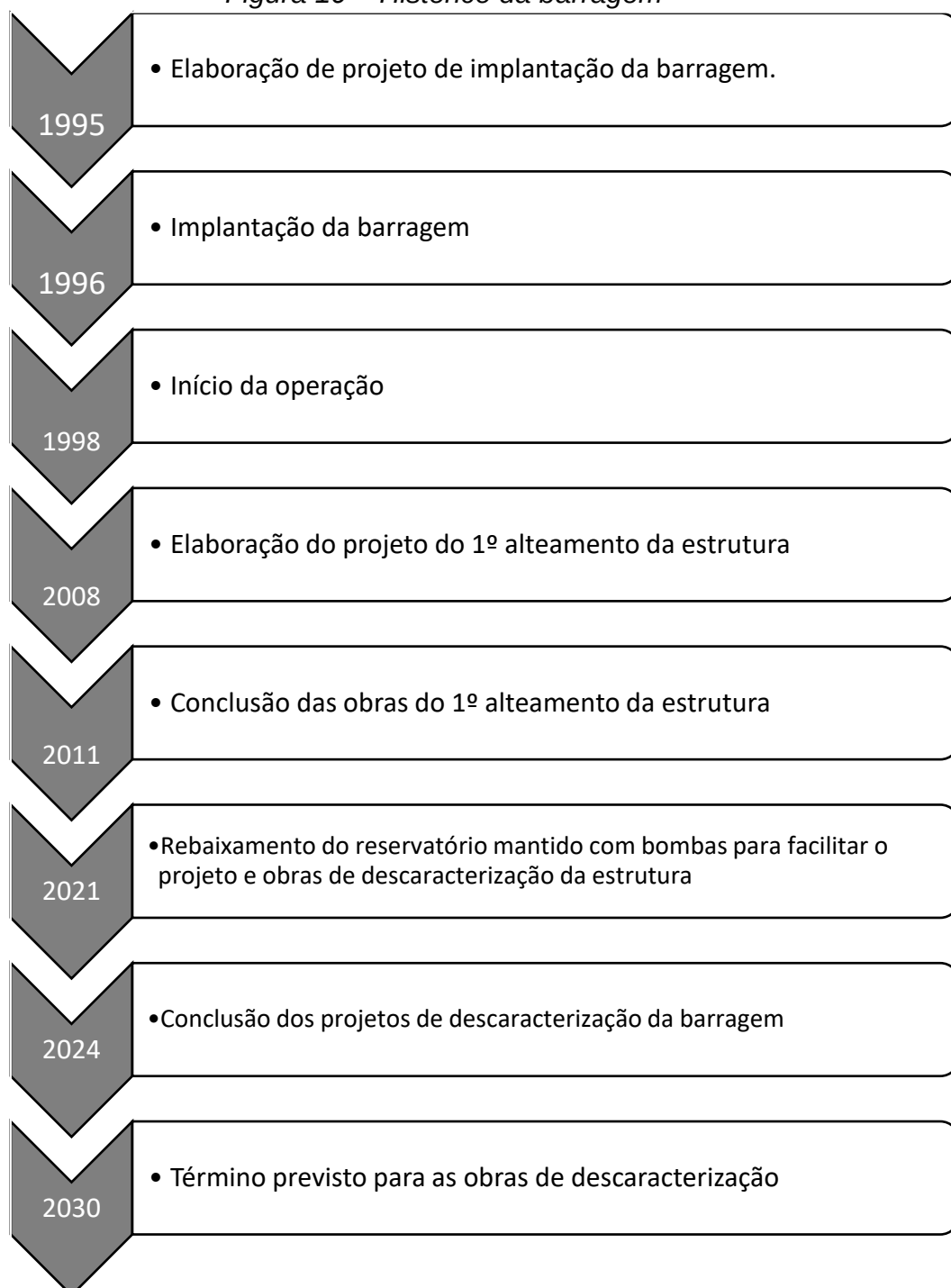
Figura 9 – Foto aérea da Barragem em estudo



Fonte: Relatório As is da barragem

A Figura 10, apresenta o histórico resumido da barragem, desde sua concepção até o final previsto de sua vida útil, com a conclusão das obras de descaracterização. A Tabela 6,expõe as principais características da barragem em estudo.

Figura 10 – Histórico da barragem



Fonte: Relatório As is da estrutura (2023)

Tabela 6 – Dados Gerais Barragem em estudo

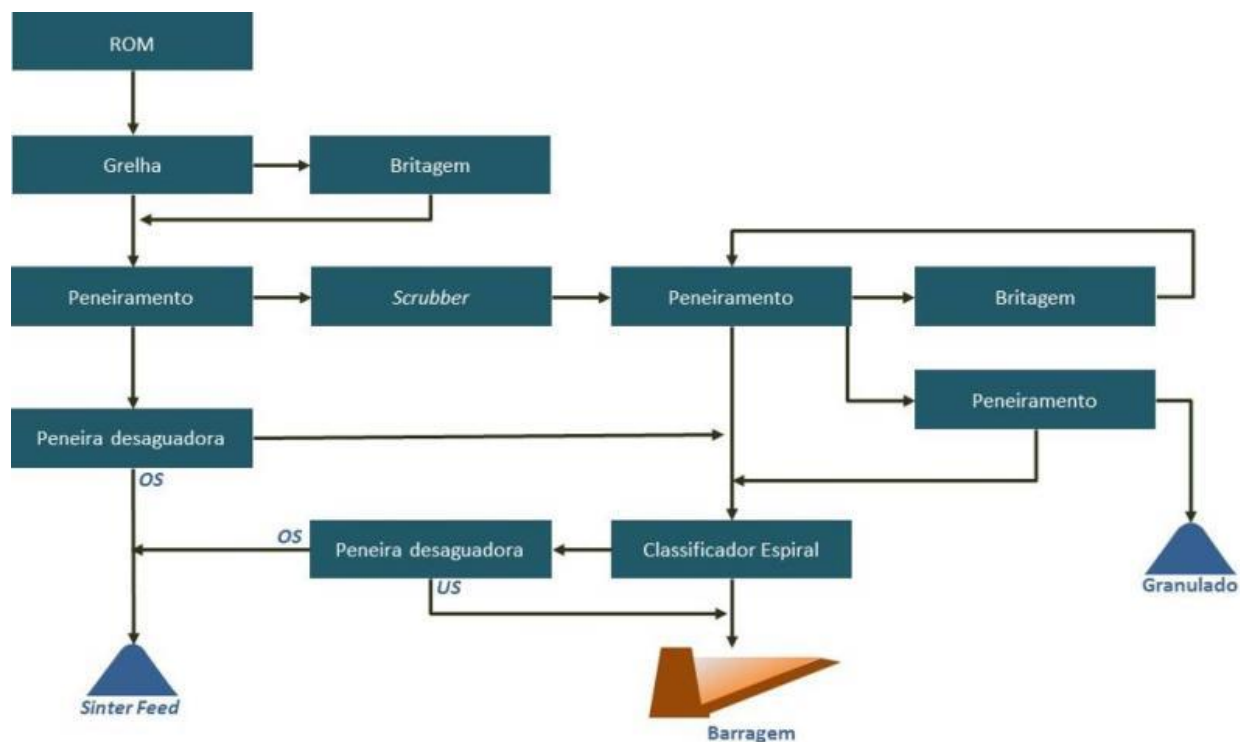
DADOS GERAIS			
Finalidade Principal:	Armazenamento de Rejeito de manganês / Captação de água		
Início de Operação:	1998	Final de Vida Útil:	2028
Vida Útil	22		
Tipo de Seção:	Homogênea		
Tipo de Fundação:	- Solos colúvio-lateríticos: natureza silto-argilosa com fragmentos lateríticos que recobrem os solos residuais; - Solos colúvio-aluvionares: em geral areno-siltosos podendo ocorrer com características argilosas; - Solos aluvionares: sobreposta por camada existente de argila orgânica de cor preta e areia média a grossa; - Embasamento Local: formado pelo solo residual/ saprolítico que ocorre a profundidade, na ombreira esquerda e mais superficialmente na direita. Apresenta características adequadas de resistência e permeabilidade.		
Curso de Água Barrado:	Afluente da Margem Esquerda do Rio		
Método de Alteamento:	01 Alteamento a jusante		
Volume de Projeto do Reservatório (m³):	12.995.662,00		
Elevação da crista (m):	501,00 (IMBITUBA/SIRGAS200)		
Comprimento da Crista de projeto (m):	304		
Altura Máxima de Projeto (m):	32		
Área de drenagem (km²)	24,95		
Drenagem Interna:	Para o alteamento o sistema de drenagem interna foi prolongado. O filtro vertical foi prolongado na mesma direção e sentido até a El. 497,50 m; já o tapete drenante foi conectado ao dreno de pé prolongado, estendendo para jusante. Este novo tapete drenante consiste em um núcleo de brita 2 e 3, envolto por camada de areia, os quais serão conectados no pé da barragem com um dreno de pé de enrocamento. Sobre o novo tapete ter-se-á uma camada de solo compactado.		
Drenagem Superficial:	Canaletas Transversais e longitudinais no talude de Jusante.		
Instrumentação e Monitoramento	Régua Limnimétrica de reservatório, Piezômetros, Indicador de Nível d'água, Marco Superficial, Medidores de Vazão, Prismas, Inclinômetro e CFTV		

Fonte: Relatório As is da estrutura (2023)

3.3.7 Caracterização Tecnológica dos Rejeitos

A Figura 11, exibe o fluxograma da instalação de beneficiamento da Mina de manganês, evidenciando a natureza dos rejeitos, isto é, esclarecendo de quais etapas do processo estes são oriundos.

Figura 11 – Processo produtivo mina de manganês – Estudo de caso



Fonte: Relatório As is da estrutura (2023)

De acordo com os dados analisados no estudo da ruptura hipotética, elaborados para a estrutura, o rejeito contido na barragem é classificado, segundo a NBR 10.004/2004, como Classe II-B (Não Perigoso – Inerte), não tendo apresentado solubilização de seus materiais constituintes superior aos padrões de potabilidade da água. Este ainda é não corrosivo, nem reativo. Sendo assim, ele não implicará em tratativas especiais, quando da etapa de descaracterização da barragem.

3.4 Análise de múltiplos critérios – Definição e ponderação das variáveis analisadas

Para reduzir a subjetividade na escolha da solução de descaracterização a ser detalhada, recomenda-se a avaliação de variáveis técnicas, ambientais, econômicas e socioeconômicas, utilizando fatores de ponderação e critérios múltiplos. Pereira e Moreira (2001) destacam que o uso de múltiplos critérios não é apenas uma extensão das abordagens tradicionais que analisam critérios únicos, mas representa um novo paradigma para examinar contextos decisórios e apoiar a tomada de decisão. Rabbani (1996) reforça que a decisão por múltiplos critérios visa identificar e selecionar a melhor alternativa para um problema que envolve diversos objetivos.

Considerando que a avaliação de risco deve englobar todos os fatores que podem influenciar o projeto, sejam eles positivos ou negativos, é necessário aplicar metodologias que padronizem esses fatores. A metodologia proposta por Robertson e Shaw (2004), denominada AMV (Análise de Múltiplas Variáveis), busca quantificar todos os aspectos relevantes do projeto, tanto os intangíveis (como a recuperação ambiental) quanto os tangíveis (como risco, custo e estabilidade), utilizando uma escala de valores predeterminada.

Este método foi desenvolvido para avaliar projetos de mineração sob o prisma da sustentabilidade.

A AMV segue três etapas principais:

- 1) Identificação dos impactos: Determinar os impactos positivos e negativos a serem incluídos na avaliação;
- 2) Quantificação dos impactos: Medir os impactos positivos e negativos para cada uma das alternativas;
- 3) Avaliação comparativa: Analisar os impactos combinados ou cumulativos para cada alternativa e comparar entre elas para criar uma lista de preferências (usando rankings, escalas e ponderações).

Os passos 1 e 2 são fundamentais para a metodologia, baseando-se em uma lista explícita de potenciais impactos, tanto negativos quanto positivos, que devem ser considerados na análise e organizados em variáveis, subvariáveis e indicadores.

Variáveis: Representam os pontos de preocupação do projeto e incluem aspectos técnicos, econômicos, ambientais e socioeconômicos.

Subvariáveis: Referem-se aos impactos associados a cada variável.

Indicadores: São as formas de medir os impactos, qualitativa e/ou quantitativamente, do ponto de vista das partes interessadas.

Com as variáveis, subvariáveis e indicadores definidos, é possível realizar uma avaliação comparativa das alternativas propostas.

3.4.1 Definição das variáveis, subvariáveis e indicadores e seus pesos

VARIÁVEIS

Para a análise das alternativas de descaracterização da Barragem foram utilizadas as variáveis indicadas na Tabela 7 – Variáveis avaliadas – Estudo de caso. Ela também exibe os pesos (ponderações) atribuídos a cada critério. Essas ponderações variaram de 1 a 5, onde 1 significa “pouco importante” e 5 significa “extremamente importante”.

Tabela 7 – Variáveis avaliadas – Estudo de caso

Variáveis	Ponderação (peso)
Técnicas	5
Ambientais	5
Econômica	3
Socioeconômico	1

Fonte: Autor (2023)

Tendo em vista que o projeto de descaracterização busca, principalmente, uma garantia da segurança da estrutura a longo prazo, juntamente com uma reintegração ambiental do espaço, as variáveis técnicas e ambientais apresentaram a ponderação igual a 5.

A variável econômica contemplou avaliação dos custos para implantação e manutenção do ativo pós-obras. Essa variável foi considerada relevante diante dos valores envolvidos em obras desta natureza, por isso, foi atribuída uma ponderação igual a 3.

A variável socioeconômica para o projeto em questão foi considerada de baixa relevância para as análises realizadas, tendo em vista que nenhuma das alternativas buscou a utilização do reservatório para recreação ou para outro meio para a sociedade e que a estrutura se encontra distante de comunidades e sequer possui cadastro na sua zona de auto salvamento (ZAS) e Zonas de Segurança Secundária (ZSS) de centros urbanos ou populações. Portanto, para essa variável foi atribuída uma ponderação também igual a 1.

SUBVARIÁVEIS

As subvariáveis foram analisadas sob cada variável, sejam elas: técnicas, ambientais, econômicas e socioeconômicas. Essas subvariáveis estão apresentadas na Tabela 8 – Variáveis e subvariáveis avaliadas – Estudo de caso, bem como as ponderações referentes a cada uma delas. Os pesos foram divididos de 1 a 5, “pouco importante” e 5 significa “extremamente importante”.

Tabela 8 – Variáveis e subvariáveis avaliadas – Estudo de caso

Variáveis	Peso Variáveis	Subvariáveis	Peso Subvariáveis	Total
Técnicas	5	Segurança hidráulica	5	= 5X5 = 25
		Segurança geotécnica	5	= 5X5 = 25
		Facilidade construtiva	4	= 5X4 = 20
		Serviços de terraplenagem	3	= 5X3 = 15
		Operação e manutenção pós-obras	2	= 5X2 = 10
		TOTAL SUBVARIÁVEIS TÉCNICA		= 25+ 25 + 20 + 15 +10 = 95
Ambientais	5	Supressão Vegetal	5	= 5X5 = 25
		Recuperação Vegetal	4	= 5X4 = 20
		Qualidade da água	5	= 5X5 = 25
		Uso da terra pós-fechamento	1	= 5X1 = 5
		TOTAL SUBVARIÁVEIS AMBIENTAL		= 25+ 20 + 25 + 5 = 75
Econômicas	3	Custo de implantação	5	= 5X5 = 25
		Custo Operacional pós-obras	1	= 5X1 = 5
		TOTAL SUBVARIÁVEIS ECONOMICA		= 25 + 5 = 30
Socio econômica	1	Infraestrutura	5	= 5X5 = 25
		Emprego	1	= 5X1 = 5
		TOTAL SUBVARIÁVEIS SOCIOECONOMICA		= 25 + 5 = 30

Fonte: Autor (2023)

INDICADORES

Os indicadores são as pontuações das alternativas em relação a determinada subvariável, e no presente estudo, variaram em uma escala de 1 a 5, em que 1 significa “muito ruim” e 5 significa “excelente”. A escolha da melhor alternativa para determinada subvariável implica em 5 pontos, sendo as demais alternativas classificadas em relação a esta. Portanto, a atribuição de 5 pontos para um cenário significa que dentre as alternativas avaliadas, foi a melhor classificada em relação a determinada subvariável. Ressalta-se que as pontuações foram atribuídas de forma isolada para cada variável e subvariável. A Tabela 9 – Indicadores de avaliação de critérios múltiplos – Estudo de caso, apresenta a organização da avaliação para os indicadores para cada alternativa.

Tabela 9 – Indicadores de avaliação de critérios múltiplos – Estudo de caso

Variáveis [A]	Peso Variáveis [B]	Subvariáveis [C]	Peso Subvariáveis [D]	Alternativas		
				1 [E]	2 [F]	3 [G]
Técnicas	5	Segurança hidráulica	5			
		Segurança geotécnica	5			
		Facilidade construtiva	4			
		Serviços de terraplenagem	3			
		Operação e manutenção pós fechamento	2			
Ambientais	5	Supressão Vegetal	5			
		Recuperação Vegetal	4			
		Qualidade da água	5			
		Uso da terra pós-fechamento	1			
Econômicas	3	Custo de implantação	5			
		Custo Operacional pós-descaracterização	1			
Socioeconômica	1	Infraestrutura	5			
		Emprego	1			

Fonte: Autor (2023)

PONDERAÇÃO FINAL

Após as definição e ponderação das variáveis, subvariáveis e indicadores é realizada a avaliação numérica das alternativas. O cálculo é realizado, primeiramente, para cada variável para obter a relevância desta frente à tomada de decisão. Em seguida, é realizada a somatória de todas elas, considerando a ponderação, com o objetivo da avaliação da melhor alternativa a ser detalhada. A proposta mais adequada é aquela que obtiver a maior pontuação na análise dos múltiplos critérios realizados.

A Tabela 10 – Matriz de avaliação de critérios múltiplos, exposta a seguir exibe a memória de cálculo a ser utilizada nos resultados dos capítulos seguintes.

Tabela 10 – Matriz de avaliação de critérios múltiplos

Variáveis [A]	Peso Variáveis [B]	Alternativa 1 [C]	Alternativa 2 [D]	Alternativa 3 [E]
Técnicas	5	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (95)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (95)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (95)} \times 5$ (ponderação)
Ambientais	5	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (75)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (75)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (75)} \times 5$ (ponderação)
Econômicas	3	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (30)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (30)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (30)} \times 5$ (ponderação)
Socioeconômicas	1	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (30)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (30)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{indicadores} \times \text{pesos subvariáveis}) / \Sigma \text{ peso total subvariável (30)} \times 5$ (ponderação)
PESO TOTAL VARIÁVEIS	$= 5 \times 5 + 5 \times 5 + 3 \times 5 + 1 \times 5 = 70$			
Total		$=\Sigma (\text{Col [C]} \times \text{Col [B]}) / \Sigma \text{ peso total variáveis (70)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{Col [D]} \times \text{Col [B]}) / \Sigma \text{ peso total variáveis (70)} \times 5$ (ponderação)	$=\Sigma (\text{Col [E]} \times \text{Col [B]}) / \Sigma \text{ peso total variáveis (70)} \times 5$ (ponderação)

Fonte: Autor (2023)

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

4.1 Alternativas propostas para a descaracterização da barragem de mineração em estudo

Para a solução de descaracterização da barragem de rejeito de manganês em estudo, foram propostas três alternativas, as quais se apresentam a seguir uma sucinta descrição.

- **ALTERNATIVA 1** – Remoção total do maciço com a reconformação do talvegue natural composta por um canal em enrocamento. Remoção total dos rejeitos, sendo considerada para a remoção dos rejeitos a utilização de dois métodos possíveis, sendo dragagem ou escavação mecanizada.
- **ALTERNATIVA 2** – Remoção parcial do maciço até a elevação dos rejeitos submersos. Nessa alternativa o maciço se torna galgável e, prevê-se o reforço do espaldar de jusante remanescente do maciço com enrocamento.
- **ALTERNATIVA 3** – Escavação e abertura de brecha próxima a ombreira direita (visando o aproveitamento de parte do canal). A crista do maciço permanece na mesma elevação e o talude da brecha possui geometria abatida, da ordem de 1V:2,5H. Nessa alternativa, o maciço remanescente a jusante é revestido com enrocamento para proteção superficial.

Cabe ressaltar que o presente estudo de alternativas apresenta o conceito da descaracterização com características qualitativas e quantitativas com ordem de grandeza pertinente ao nível de maturidade da natureza desses estudos.

As alternativas 1, 2 e 3 propostas, são detalhas respectivamente nos itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3

4.1.1 ALTERNATIVA 1 – REMOÇÃO TOTAL DO MACIÇO E DOS REJEITOS COM RECONFORMAÇÃO DO TALVEGUE NATURAL COMPOSTA POR UM CANAL CENTRAL EM ENROCAMENTO

A alternativa 1 consiste nas seguintes etapas:

4.1.1.1 Escolha do método para remoção do rejeito

As características do rejeito são predominantemente arenosas com coeficiente de permeabilidade na ordem de grandeza de 5×10^{-5} cm/s.

A remoção do rejeito será estudada visando que seja proposto qual a melhor metodologia para a execução dessa atividade. As opções avaliadas são a escavação mecanizada e a dragagem, podendo ocorrer de maneira mista.

4.1.1.2 Bombeamento do reservatório e remoção da fauna aquática

Antes do bombeamento do reservatório, é prevista a avaliação e, se necessário, o resgate e manejo da fauna do reservatório. Cabe citar que deverá ser realizado o rebaixamento do reservatório com velocidade controlada, sendo permitido o deplecionamento máximo de 30 cm/dia, a ser monitorado pelo CMG. A fim de simular o rebaixamento do nível de água do reservatório, foi realizada uma análise de estabilidade do talude de montante da barragem, considerando tanto o rebaixamento rápido do reservatório, bem como a remoção dos rejeitos a montante.

4.1.1.3 Demolição das estruturas de concreto

Para o projeto de descaracterização foi previsto a demolição das estruturas de concreto do sistema extravasor, as estruturas do sistema de drenagem superficial, calhas e dispositivos auxiliares.

4.1.1.4 Remoção do maciço e utilização do material para reconformação do reservatório

Após a remoção dos rejeitos do reservatório é previsto a remoção do maciço da barragem. Parte do material removido do maciço, será utilizada na reconformação do reservatório visando a configuração do talvegue natural da região. Contudo, visto que se trata de uma área muito extensa, são previstos materiais de jazidas próximas para reconformar o terreno.

4.1.1.5 Construção do canal central de drenagem em enrocamento

O canal deve iniciar na parcela mais a montante do reservatório e se estender até a parcela de jusante do eixo da barragem. O canal será de enrocamento com D50 em 400 mm, disponível na região.

4.1.1.6 Regularização do terreno e revegetação da área:

É prevista a regularização do terreno, de modo a garantir o escoamento do fluxo d'água para o canal central. A revegetação é prevista com a finalidade de mitigar a ação de processos erosivos pós-descaracterização.

4.1.1.7 Planilha de quantidades:

A planilha de quantidades da Alternativa 1 é exibida na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11 – Planilha de quantidades (Alternativa 1)

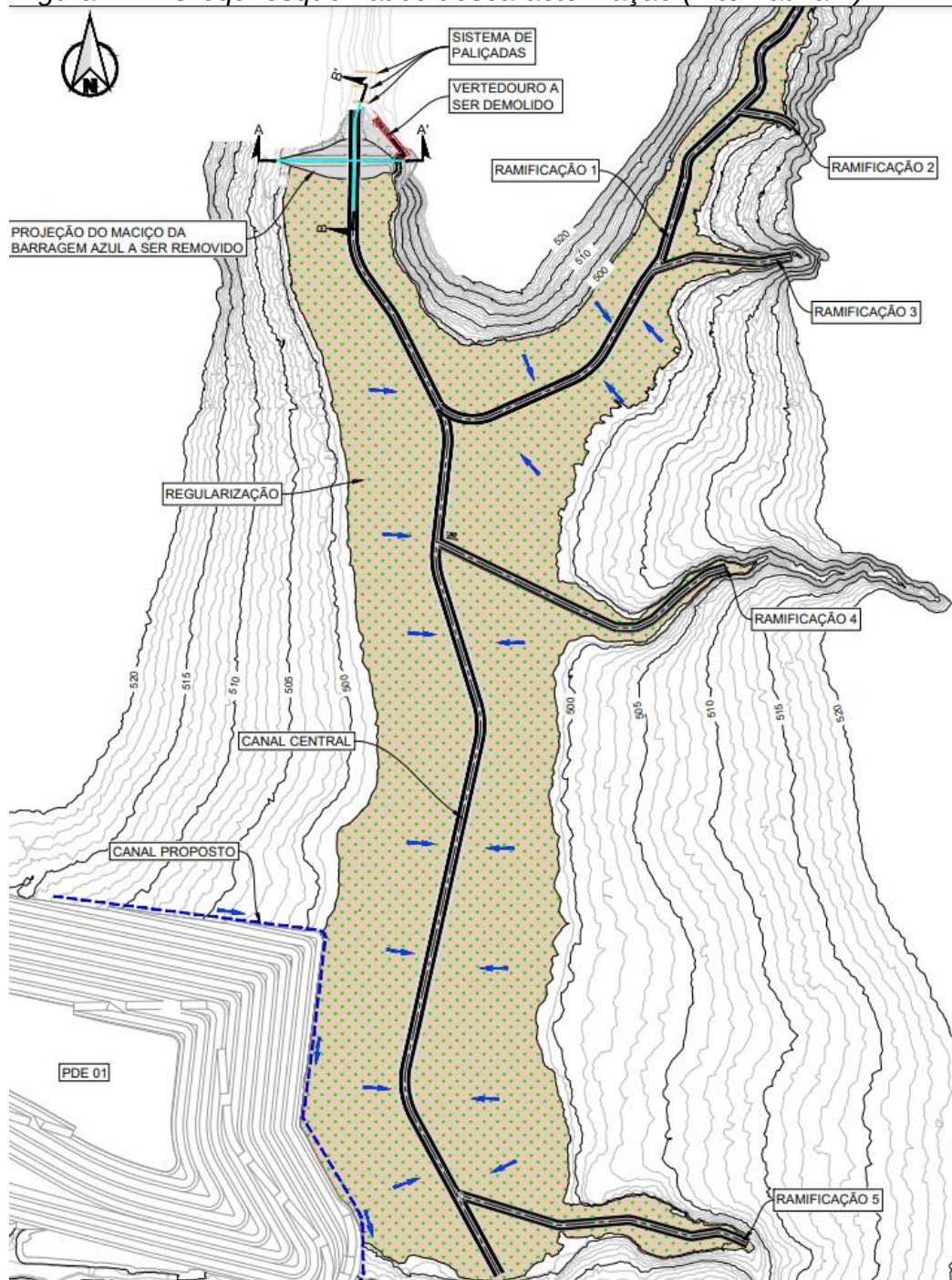
DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	UNID.	QUANTIDADE
REMOÇÃO DO MACIÇO DA BARRAGEM		
ESCAVAÇÃO, CARGA, TRANSPORTE E DESCARGA DE SOLO OU ROCHA - TERRAPLENAGEM		
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de material de 1ª categoria - DMT até 1000m	m³	103.559
REGULARIZAÇÃO DE PLATAFORMA		
Regularização e compactação da Plataforma de Terraplenagem	m²	21.845
REATERRO DE ÁREA AFETADA		
Reaterro compactado, sem controle de grau de compactação - mecânico	m³	8.738
MOMENTO EXTRAORDINÁRIO DE TRANSPORTE - TERRAPLENAGEM		
Momento extraordinário de transporte de material de 1ª categoria - Terraplenagem	m³ x km	94.821
REMOÇÃO DOS REJEITOS DO RESERVATÓRIO DA BARRAGEM		
ESCAVAÇÃO, CARGA, TRANSPORTE E DESCARGA DE SOLO OU ROCHA - TERRAPLENAGEM		
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de material de 1ª categoria - DMT até 1000m	m³	2.087.850
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de solo mole - DMT até 1000m	m³	1.391.900
REGULARIZAÇÃO DE PLATAFORMA		
Regularização e compactação da Plataforma de Terraplenagem	m²	1.846.413
REATERRO DE ÁREA AFETADA		
Reaterro compactado, sem controle de grau de compactação - mecânico	m³	738.565
MOMENTO EXTRAORDINÁRIO DE TRANSPORTE - TERRAPLENAGEM		
Momento extraordinário de transporte de material de 1ª categoria - Terraplenagem	m³ x km	2.087.850
Momento extraordinário de transporte de solo mole - Terraplenagem	m³ x km	1.391.900
DEPLECIONAMENTO DO RESERVATÓRIO - BARRAGEM		
REBAIXAMENTO DE ÁGUA		
Instalação para deplecionamento do reservatório com bombas	unid	1
Operações para rebaixamento de lençol freático com ponteira filtrante	cj x dia	1
DEMOLIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO		
DESMONTES, DEMOLIÇÕES E REMOÇÕES		
Demolição mecanizada de concreto simples	m³	1
Demolição de concreto armado	m³	1
Carga, transporte e descarga de material proveniente de demolições ou desmontes para ADME - DMT até 1000m	m³	1
Momento extraordinário de transporte de material proveniente de demolições ou desmontes	m³ x km	1
CANAL CENTRAL E RAMIFICAÇÕES		
ESCAVAÇÃO DE CAVAS E VALAS		
Escavação mecanizada de cavas ou valas em material de 1ª categoria - profundidade até 1,5m	m³	319.252
Escavação mecanizada de cavas ou valas em material de 2ª categoria - profundidade até 1,5m	m³	35.472
REGULARIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO DE FUNDO DE CAVAS OU VALAS		
Regularização e compactação de fundo de cavas ou valas	m²	
CARGA, TRANSPORTE, DESCARGA E ESPALHAMENTO DE MATERIAL – USO GERAL		
Carga, transporte, descarga e espalhamento de material de 1ª categoria em bota-fora - DMT até 1000 m	m³	319.252
Carga, transporte, descarga e espalhamento de material de 2ª categoria em bota-fora - DMT até 1000m	m³	35.472
MOMENTO EXTRAORDINÁRIO DE TRANSPORTE - USO GERAL		
Momento extraordinário de transporte de material de 1ª categoria - uso geral	m³ x km	319.252
Momento extraordinário de transporte de material de 2ª categoria - uso geral	m³ x km	35.472
BERÇOS / LASTROS / ENCHIMENTOS / BASES		
Berço, lastro, enchimento ou base de brita graduada	m³	12.837
ENROCAMENTO		
Enrocamento com pedra de mão arrumada	m³	148.718
REVEGETAÇÃO		
PAISAGISMO E AJARDINAMENTO - FORNECIMENTO E APLICAÇÃO		
Revestimento vegetal com coveamento, mix de sementes e tela vegetal	m²	1.868.258

Fonte: Autor (2023)

4.1.1.8 Croqui da alternativa:

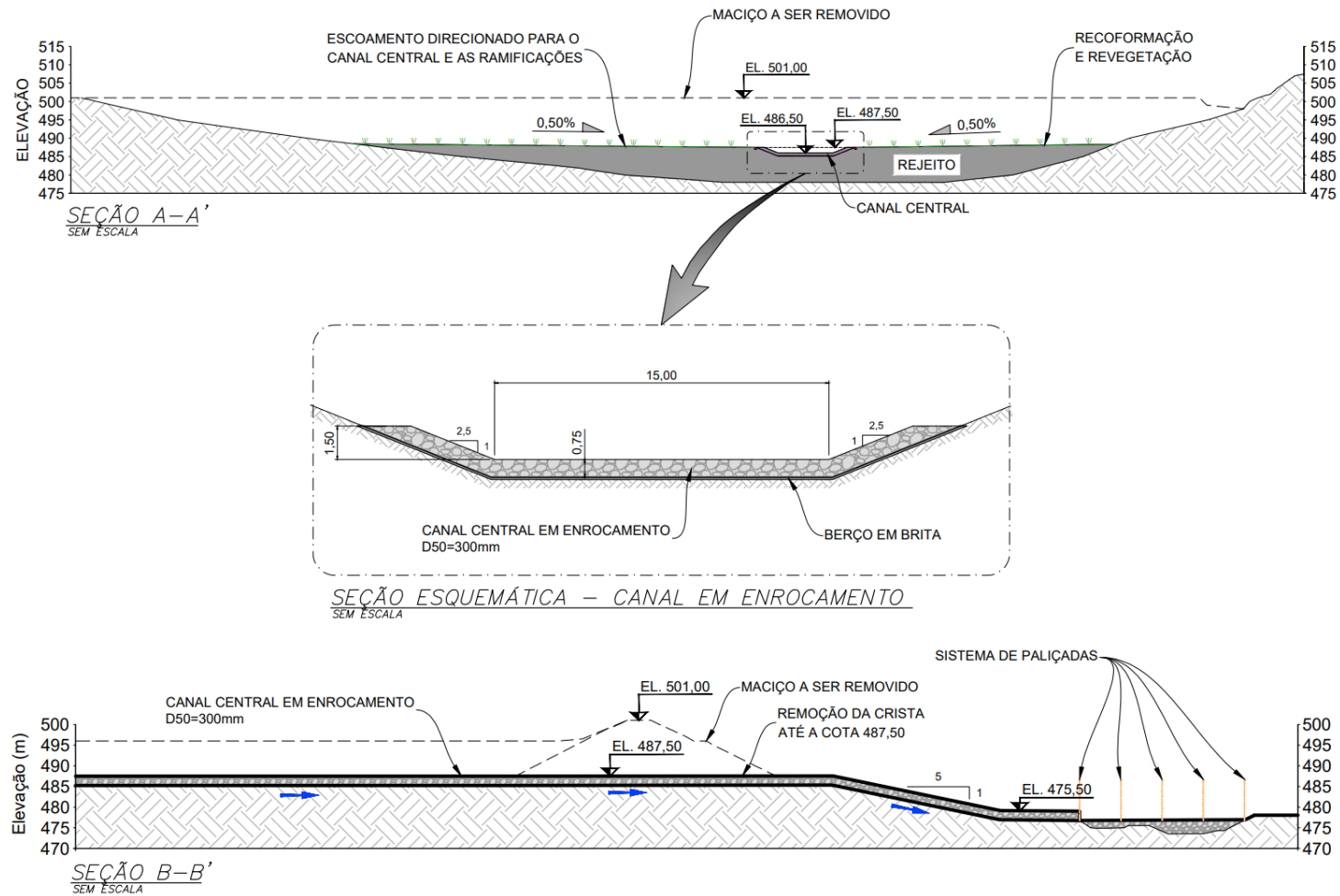
O croqui da Alternativa 1 é exibida na Figura 12, destacando o canal central e suas ramificações, responsáveis pela condução da água superficial. E a Figura 13, exibe a seção longitudinal e detalhes da solução proposta.

Figura 12 – Croqui esquemático descaracterização (Alternativa 1)



Fonte: Relatório de alternativas (2023)

Figura 13 – Croqui esquemático descaracterização (Alternativa 1)



Fonte: Relatório de alternativas (2023)

4.1.2 ALTERNATIVA 2 – REMOÇÃO PARCIAL DO MACIÇO ATÉ A ELEVAÇÃO DOS REJEITOS SUBMERSOS E REFORÇO DO ESPALDAR DE JUSANTE (ESTRUTURA GALGÁVEL)

A alternativa 2 consiste nas seguintes etapas:

4.1.2.1 Bombeamento do reservatório e remoção da fauna aquática

Nesta etapa de bombeamento deve-se considerar ao mesmo exposto na alternativa 1 (item 4.3.1.1).

4.1.2.2 Rebaixamento do Nível Freático

Além do bombeamento do reservatório, deve-se prever acompanhamento do nível freático dentro do reservatório e caso necessário prever o seu rebaixamento (com instalações de ponteiros filtrantes) de modo a permitir e possibilitar a trafegabilidade dos equipamentos sobre os rejeitos. Caso seja possível realizar tais atividades sem o rebaixamento, pode-se partir diretamente para a regularização da área afetada.

4.1.2.3 Regularização da Área Afetada

A área afetada compreende todo o reservatório da barragem. Para a regularização é previsto que sejam dadas ao terreno declividades mínimas, no sentido de montante para jusante, direcionando toda a contribuição para o eixo central do talvegue. Essa regularização deve ocorrer de forma suave para se evitar processos erosivos a longo prazo.

Para a regularização designada para o terreno foi considerada a utilização do material de escavação do maciço (rebaixamento da crista). Porém, tendo em vista a magnitude da área afetada, pode ser necessário utilizar materiais oriundos de jazidas próximas.

4.1.2.4 Remoção parcial do maciço (rebaixamento da crista) e utilização do material para reconformação do reservatório

Após o bombeamento do reservatório, prevê-se a remoção parcial do maciço da barragem até a elevação dos rejeitos, contemplando a remoção de parte da crista. O material removido do maciço poderá ser utilizado na reconformação do reservatório visando a configuração do talvegue natural da região.

4.1.2.5 Demolição das estruturas de concreto

É previsto a demolição das estruturas de concreto do sistema extravasor, as estruturas do sistema de drenagem superficial, calhas e dispositivos auxiliares.

4.1.2.6 Reforço no talude de jusante

Visando garantir a segurança a longo prazo da estrutura, é proposto um reforço na crista e no espaldar de jusante remanescente com enrocamento. Esse enrocamento possui uma geometria bem suavizada, da ordem de 1V:5H, com o intuito de minimizar possibilidades de ruptura.

4.1.2.7 Revegetação

Após a regularização do terreno é prevista a revegetação de toda a área de modo a se mitigar os processos erosivos.

4.1.2.8 Planilha de quantidades:

A Planilha de quantidades da Alternativa 2 é exibida na Tabela 12, a seguir.

Tabela 12 – Planilha de quantidades (Alternativa 2)

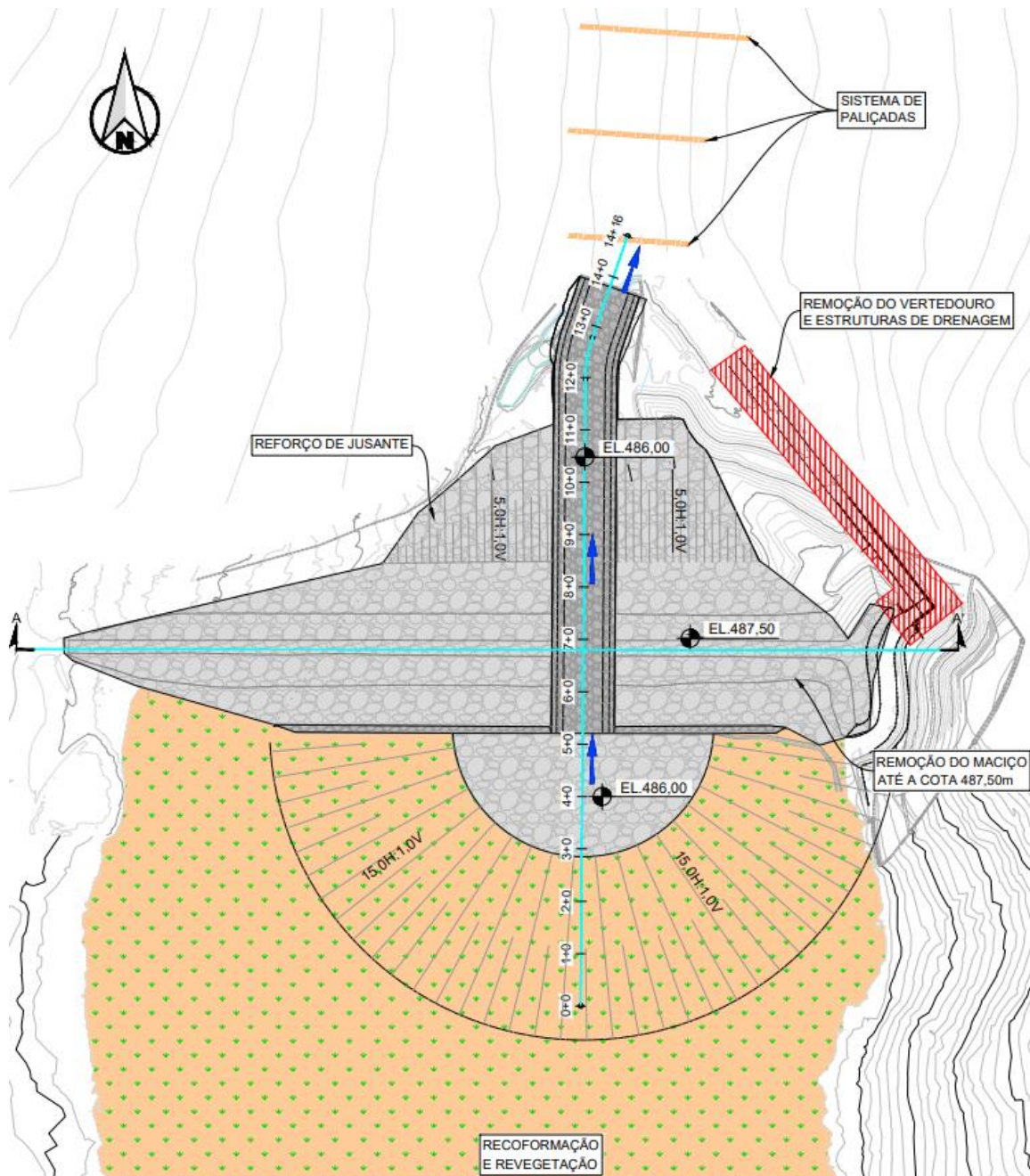
DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	UNID.	QUANTIDADE
REMOÇÃO DO MACIÇO DA BARRAGEM		
ESCAVAÇÃO, CARGA, TRANSPORTE, DESCARGA E ESPALHAMENTO DE MATERIAL DE 1ª CATEGORIA		
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de material de 1ª categoria - DMT até 1000m	m³	88.819
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de solo mole - DMT até 1000m		4.675
REGULARIZAÇÃO DE PLATAFORMA		
Regularização e compactação da Plataforma de Terraplenagem	m²	1.674.897
REATERRO SEM CONTROLE DE COMPACTAÇÃO		
Reaterro compactado, sem controle de grau de compactação - mecânico	m³	649.746
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de material de 1ª categoria - DMT até 1000m		649.746
Momento extraordinário de transporte de material de 1ª categoria - Terraplenagem		649.746
MOMENTO EXTRAORDINÁRIO DE TRANSPORTE - TERRAPLENAGEM		
Momento extraordinário de transporte de material de 1ª categoria - Terraplenagem	m³ x km	88.819
Momento extraordinário de transporte de solo mole - Terraplenagem		4.675
DEPLECIONAMENTO DO RESERVATÓRIO - BARRAGEM		
REBAIXAMENTO DE ÁGUA		
Instalação para deplecionamento do reservatório com bombas	unid	1
Operações para rebaixamento de lençol freático com ponteira filtrante	cj x dia	1
DEMOLIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO		
DESMONTES, DEMOLIÇÕES E REMOÇÕES		
Demolição mecanizada de concreto simples	m³	1
Demolição de concreto armado	m³	1
Carga, transporte e descarga de material proveniente de demolições ou desmontes para ADME - DMT até 1000m	m³	1
Momento extraordinário de transporte de material proveniente de demolições ou desmontes	m³ x km	1
REFORÇO DO ESPALDAR DE JUSANTE		
MANTA TIPO GEOTÊXTIL NÃO TECIDA / TECIDA EM POLIÉSTER / POLIPROPILENO		
Fornecimento e instalação de manta geotêxtil não tecida em poliéster, agulhado, com resistência a tração de 31kN/m (tipo Bidim RT 31 - antiga OP60)	m²	27.233
ENROCAMENTO		
Enrocamento com pedra de mão arrumada	m³	24.940
REVEGETAÇÃO		
PAISAGISMO E AJARDINAMENTO - FORNECIMENTO E APLICAÇÃO		
Revestimento vegetal com coveamento, mix de sementes e tela vegetal	m²	1.846.413

Fonte: Autor (2023)

4.1.2.9 Croqui da alternativa:

O croqui da Alternativa 2 é exibida na Figura 14, com destaque para a demolição do extravasor existente, bem como o sentido de caimento e drenagem, implantado com revestimento, no reservatório, visando a condução da drenagem pluvial.

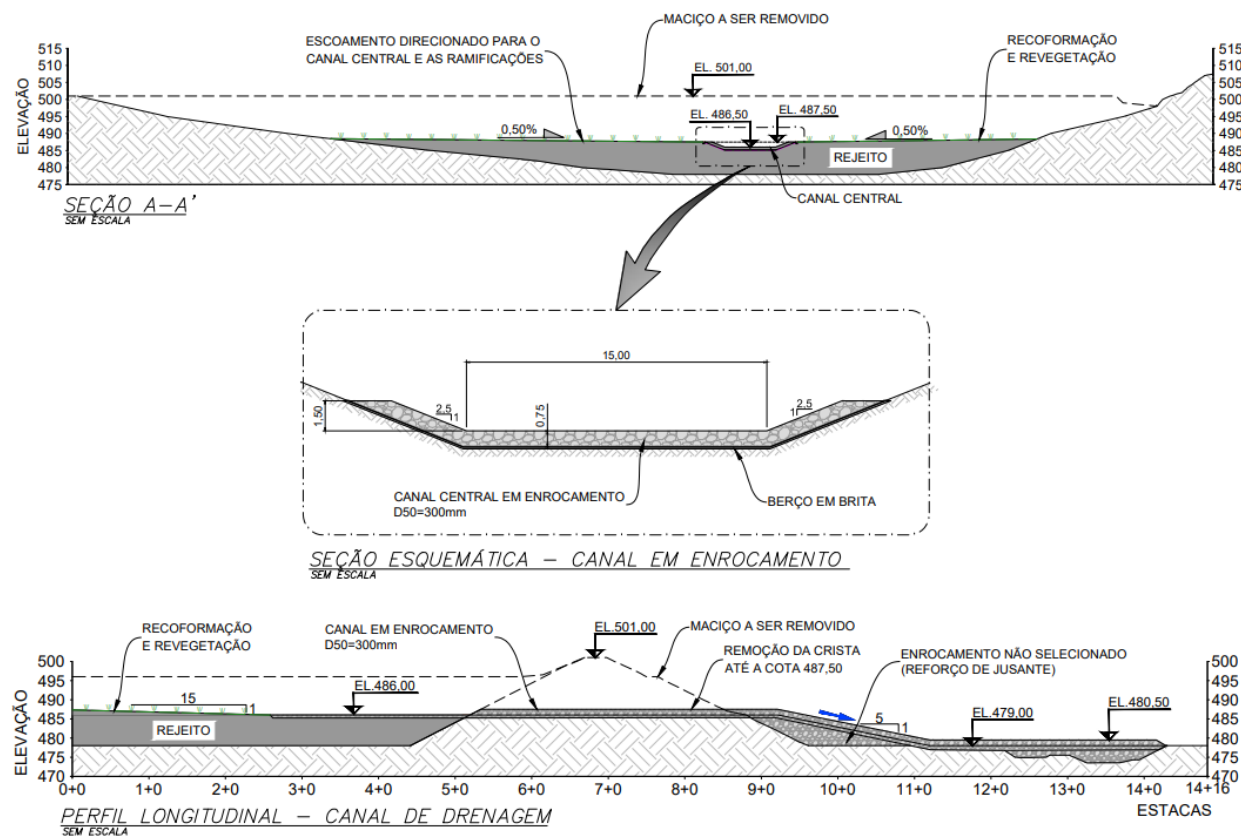
Figura 14 – Croqui esquemático descaracterização (Alternativa 2)



Fonte: Relatório de alternativas (2023)

A seção longitudinal da solução final é exibida na Figura 15, destacando a regularização e revestimento do reservatório, bem como a remoção parcial do barramento e o reforço a ser implantado no talude de jusante, responsáveis pela condução da água superficial.

Figura 15 – Seção longitudinal descaracterização (Alternativa 2)



Fonte: Relatório de alternativas (2023)

4.1.3 ALTERNATIVA 3 – REMOÇÃO PARCIAL DO MACIÇO COM ABERTURA DE BRECHA PRÓXIMA A OMBREIRA DIREITA

Os itens de bombeamento do reservatório, rebaixamento do nível freático e regularização da área afetada são os mesmos considerados para a alternativa 2 (itens 4.3.2.1, 4.3.2.2 e 4.3.2.3 respectivamente), sendo a sequência remanescente explicada a seguir.

4.1.3.1 *Remoção parcial do maciço (abertura de brecha) e utilização do material para reconformação do reservatório*

Após realizar o deplecionamento do reservatório, prevê-se a execução da abertura de brecha na região próxima a ombreira direita do maciço (visando a utilização de parte do canal) com a profundidade até a altura dos rejeitos. A brecha possibilitará o escoamento das águas superficiais sem que os rejeitos sejam transportados para jusante.

Os taludes da brecha devem ser executados com declividade abatida (da ordem de 1V:2,5H) e possuir proteção, em enrocamento, de modo a se mitigar riscos de processos erosivos. Os taludes de jusante deverão ser reforçados com enrocamento de modo a garantir a estabilidade em longo prazo e minimizar eventuais custos de manutenção.

4.1.3.2 *Demolição de parte das estruturas de concreto*

É previsto a demolição de parte das estruturas de concreto do sistema extravasor, as estruturas do sistema de drenagem superficial, calhas e dispositivos auxiliares.

4.1.3.3 *Reforço no talude de jusante*

Visando garantir a segurança a longo prazo da estrutura, é proposto um reforço na dos taludes da brecha executada e do espaldar de jusante remanescente com enrocamento.

O material de enrocamento possui geometria suavizada, da ordem de 1V:5H, visando mitigar possibilidades de ruptura. Em parcela a montante da brecha é prevista a utilização de enrocamento, com a finalidade de evitar o crescimento de vegetação que possibilitaria o fechamento da brecha extravasora. Após a regularização do terreno é prevista a revegetação de toda a área de modo a se mitigar os riscos e impactos dos processos erosivos.

4.1.3.4 Planilha de quantidades:

A Planilha de quantidades da Alternativa 3 é exibida na Tabela 13, a seguir.

Tabela 13 – Planilha de quantidades (Alternativa 3)

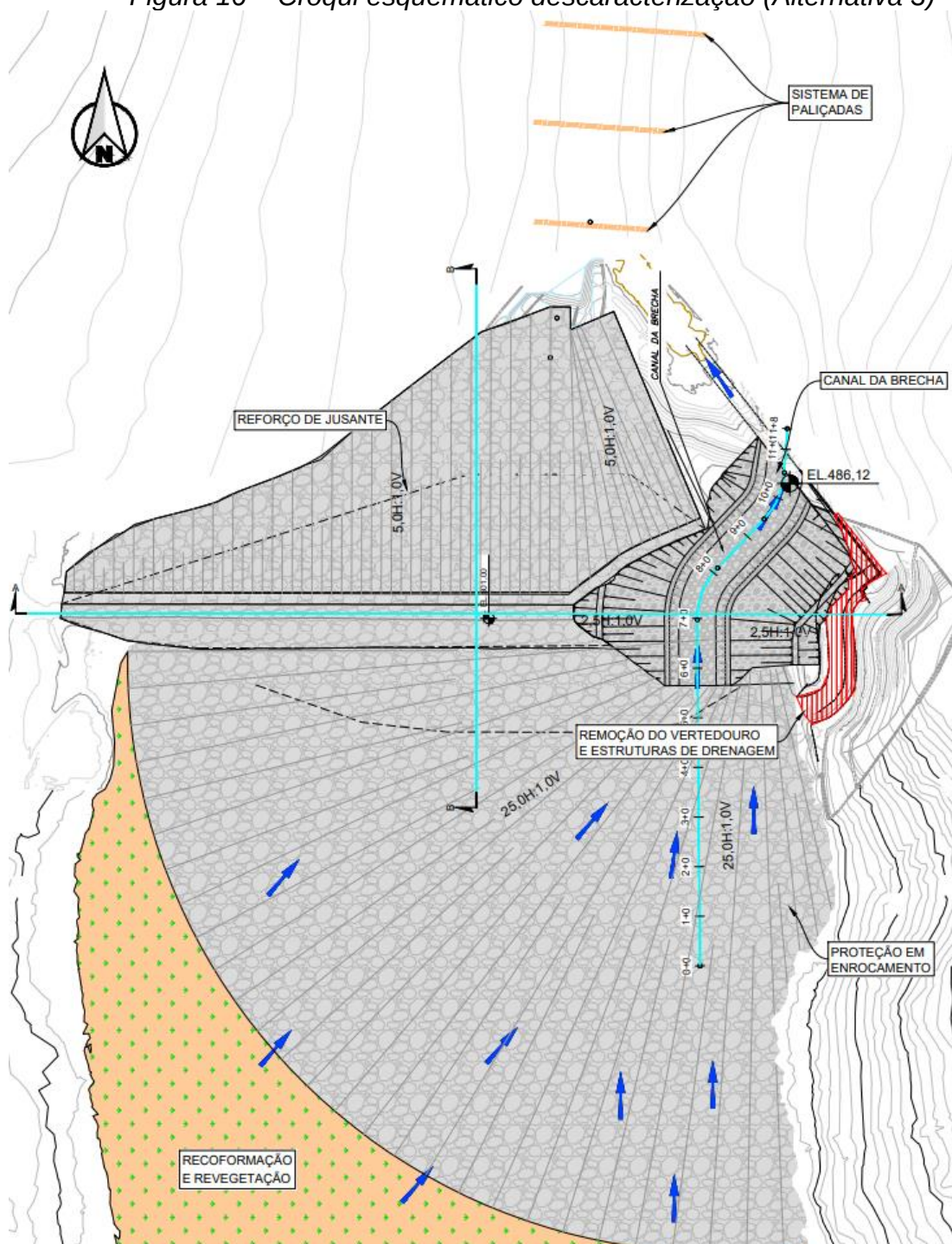
DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	UNID.	QUANTIDADE
REMOÇÃO DO MACIÇO DA BARRAGEM		
ESCAVAÇÃO, CARGA, TRANSPORTE E DESCARGA DE SOLO OU ROCHA - TERRAPLENAGEM		
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de material de 1ª categoria - DMT até 1000m	m³	47.012
ESCAVAÇÃO, CARGA, TRANSPORTE, DESCARGA E ESPALHAMENTO DE SOLO MOLE		
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de solo mole - DMT até 1000m	m³	2.474
REGULARIZAÇÃO DE PLATAFORMA		
Regularização e compactação da Plataforma de Terraplenagem	m²	1.846.413
REATERRO DE ÁREA AFETADA		
Reaterro compactado, sem controle de grau de compactação - mecânico	m³	691.553
Escavação, carga, transporte, descarga e espalhamento de material de 1ª categoria - DMT até 1000m	m³	691.553
Momento extraordinário de transporte de material de 1ª categoria - Terraplenagem	m³ x km	691.553
MOMENTO EXTRAORDINÁRIO DE TRANSPORTE - TERRAPLENAGEM		
Momento extraordinário de transporte de material de 1ª categoria - Terraplenagem	m³ x km	47.012
Momento extraordinário de transporte de solo mole - Terraplenagem	m³ x km	2.474
DEPLECIONAMENTO DO RESERVATÓRIO - BARRAGEM		
REBAIXAMENTO DE ÁGUA		
Instalação para deplecionamento do reservatório com bombas	unid	1
Operações para rebaixamento de lençol freático com ponteira filtrante	cj x dia	1
DEMOLIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO		
DESMONTES, DEMOLIÇÕES E REMOÇÕES		
Demolição mecanizada de concreto simples	m³	1
Demolição de concreto armado	m³	1
Carga, transporte e descarga de material proveniente de demolições ou desmontes para ADME - DMT até 1000m	m³	1
Momento extraordinário de transporte de material proveniente de demolições ou desmontes	m³ x km	1
REFORÇO DO ESPALDAR DE JUSANTE		
MANTA - GEOTÊXTEIL / GEOSINTÉTICA / IMPERMEÁVEL		
Fornecimento e instalação de manta geotêxtil não tecida em poliéster, agulhado, com resistência a tração de 31kN/m (tipo Bidim RT 31 - antiga OP60)	m²	22.840
BERÇOS / LASTROS / ENCHIMENTOS / BASES		
Berço, lastro, enchimento ou base de brita graduada	m³	2.284
ENROCAMENTO		
Enrocamento com pedra de mão arrumada	m³	175.785
REVEGETAÇÃO		
PAISAGISMO E AJARDINAMENTO - FORNECIMENTO E APLICAÇÃO		
Revestimento vegetal com coveamento, mix de sementes e tela vegetal	m²	1.846.413

Fonte: Autor (2023)

4.1.3.5 Croqui da alternativa:

O croqui da Alternativa 3 é exibida na Figura 16 e a seção longitudinal da solução final na Figura 17.

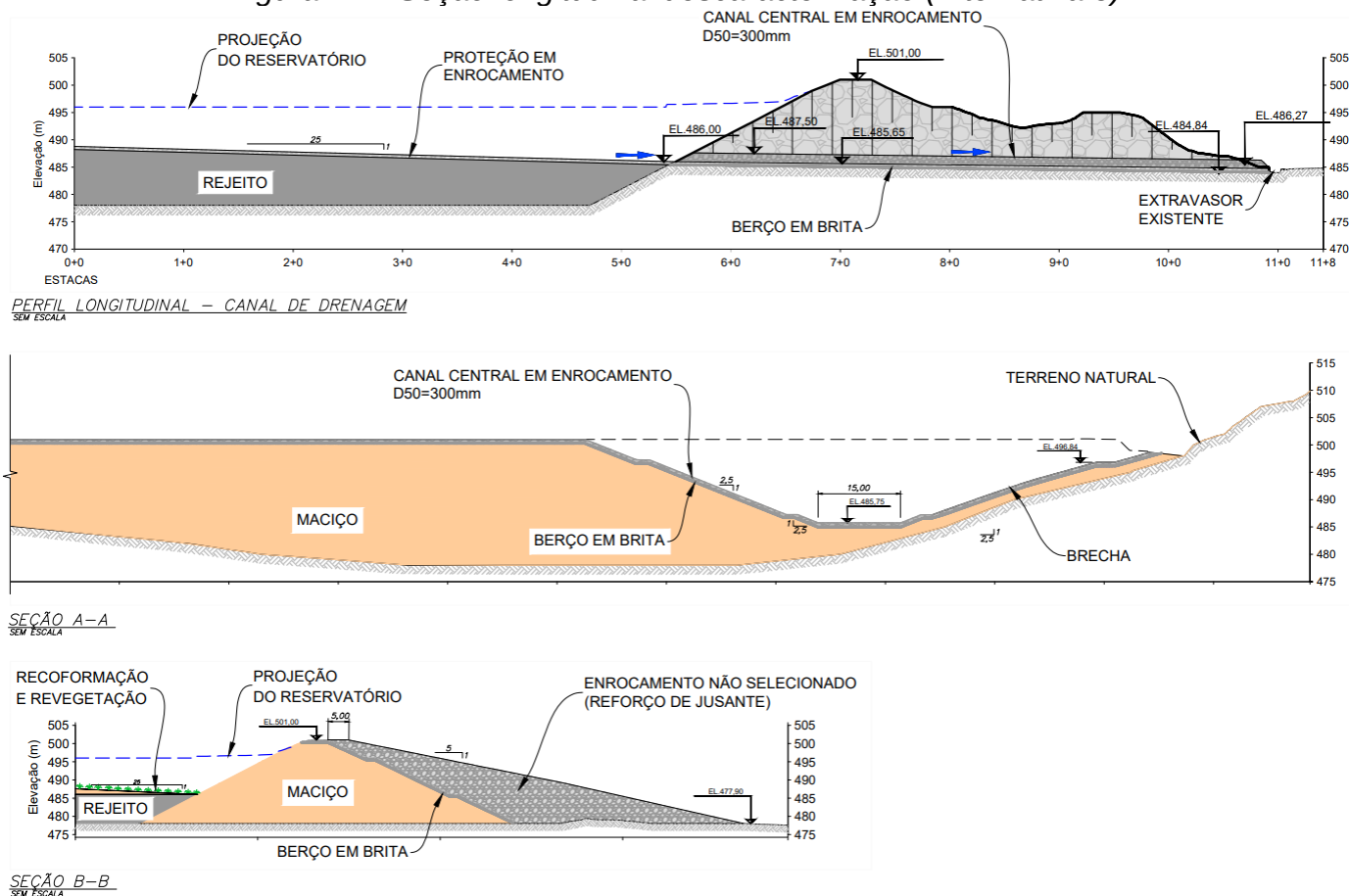
Figura 16 – Croqui esquemático descaracterização (Alternativa 3)



Fonte: Relatório de alternativas (2023)

A seção longitudinal da brecha proposta para a alternativa 3 é exibida na Figura 17, destacando a regularização e revestimento do reservatório, bem como a remoção parcial do barramento e o reforço e canal de drenagem a ser implantado no talude de jusante.

Figura 17 – Seção longitudinal descaracterização (Alternativa 3)



Fonte: Relatório de alternativas (2023)

4.2 Avaliação das alternativas utilizando a critérios múltiplos

A Tabela 14, foi gerada a partir da ponderação (variáveis, subvariáveis e indicadores) dos aspectos avaliados (técnicos, ambientais, econômicos e socioeconômicos).

Tabela 14 – Matriz de avaliação de critérios múltiplos preenchida

Variáveis [A]	Peso Variáveis [B]	Subvariáveis [C]	Peso Subvariáveis [D]	Alternativas		
				1 [E]	2 [F]	3 [G]
Técnicas	5	Segurança hidráulica	5	5	1	3
		Segurança geotécnica	5	5	3	1
		Facilidade construtiva	4	3	4	5
		Serviços de terraplenagem	3	1	3	5
		Operação e manutenção pós fechamento	2	5	3	3
Ambientais	5	Supressão Vegetal	5	5	5	5
		Recuperação Vegetal	4	5	5	5
		Qualidade da água	5	5	4	4
		Uso da terra pós-fechamento	1	5	1	1
Econômicas	3	Custo de implantação	5	3	4	5
		Custo Operacional pós-descaracterização	1	5	3	3
Socioeconômica	1	Infraestrutura	5	5	5	5
		Emprego	1	5	3	4

Fonte: Autor (2024)

Dentre os indicadores apresentados para das variáveis técnicas, destaca-se a pontuação igual a 1 para a Alternativa 2, na subvariável “segurança hidráulica” da variável “técnica”. Tal peso foi atribuída à Alternativa 2 em virtude da estrutura ser galgável nesta proposta. Quanto à subvariável “segurança geotécnica”, tendo em vista a permanência de parte do maciço na Alternativa 3 com reforço no talude de jusante, foi atribuída a pontuação igual a 1, visto que para as demais alternativas os riscos de uma ruptura geotécnica seriam mitigados (Alternativa 2), ou mesmo eliminados (Alternativa 1). A facilidade construtiva, bem como as atividades de terraplenagem são mais simples na Alternativa 3, já o custo de operação e manutenção pós fechamento é mais simples na Alternativa 1, por tender a apresentar menor necessidade de manutenção, quando comparada as demais alternativas.

Sobre os indicadores apresentados para as variáveis ambientais, destaca-se a pontuação igual a 5, para a Alternativa 1, em todas subvariáveis analisadas, como supressão, recuperação vegetal, qualidade da água e uso da terra pós fechamento.

Nos indicadores exibidos para as variáveis econômicas é importante destacar que a Alternativa 1 apresenta o maior custo de implantação, bem como o menor custo operacional pós-obras.

Os indicadores adotados para as variáveis socioeconômicas não possuíam grande variação entre as alternativas, sendo que a alternativa 1, por ser uma obra mais cara e mais robusta, será capaz de gerar maior quantidade de empregos diretos e indiretos durante a execução das atividades e por maior prazo que as demais alternativas avaliadas.

A Tabela 15, apresenta o resultado para cada uma das propostas analisadas, destacando em verde as melhores alternativas para cada variável, seguido de uma avaliação da melhor alternativa geral, onde é possível constatar a Alternativa 1 como sendo a melhor opção para detalhamento mediante os critérios múltiplos adotados e ponderados para o presente projeto.

Tabela 15 – Resultado das alternativas avaliadas

Variáveis	Peso Variáveis	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Técnicas	5	= $(75/95*5) = 3,95$	= $(51/95*5) = 2,68$	= $(61/95*5) = 3,21$
Ambientais	5	= $(75/75*5) = 5,00$	= $(66/75*5) = 3,47$	= $(66/75*5) = 3,47$
Econômicas	3	= $(20/30*5) = 3,33$	= $(23/30*5) = 3,83$	= $(28/30*5) = 4,67$
Socioeconômicas	1	= $(30/30*5) = 5,00$	= $(28/30*5) = 4,67$	= $(29/30*5) = 4,83$
Total		= $(59,74/70*5) = 4,27$	= $(46,91/70*5) = 3,35$	= $(52,24/70*5) = 3,73$

Fonte: Autor (2024)

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Neste estudo, foram apresentadas três alternativas para a descaracterização de uma barragem de rejeitos de manganês, contemplando concepções diferentes.

A escolha da melhor alternativa considerou variáveis múltiplas abordando aspectos econômicos, sociais, ambientais e técnicos, relevantes na comparação das soluções propostas neste estudo. Tais aspectos facilitam a tomada de decisão sobre a alternativa que atende aos requisitos de estabilidade física e sustentabilidade em conformidade com a legislação vigente.

Em termos de custo e tempo, de forma qualitativa, a alternativa mais vantajosa seria a intervenção na estrutura com a abertura de uma brecha (Alternativa 3), por se tratar de uma obra mais simples que as demais opções, observou-se que as ações de descaracterização, quando comparadas com as alternativas 1 e 2, envolvem menor intervenção na estrutura, o que resulta em menor tempo de execução e menor demanda de recursos financeiros.

Do ponto de vista ambiental e com menor necessidade de manutenção a longo prazo, a alternativa que contempla a intervenção na estrutura e reservatório com remoção total do barramento é a mais recomendada (Alternativa 1). Esta solução permitirá que a área seja reintegrada ao meio ambiente, com baixa suscetibilidade à erosão e apta ao processo de recuperação e reintegração ambiental, uma vez que os riscos geotécnicos e hidráulicos serão mitigados.

A Alternativa 3 (intervenção na estrutura e no reservatório com abertura de brecha e remoção parcial do barramento) se mostrou uma solução intermediária entre os cenários avaliados, apresentando pontos favoráveis e desfavoráveis em relação à manutenção parcial do maciço. Essa alternativa tem a vantagem de exigir menor área adicional para movimentação e depósitos do material escavado, bem como menor necessidade de transporte em comparação com as Alternativas 1 e 2. No entanto, como desvantagem, apresenta a necessidade de monitoramento e manutenção a longo prazo em relação à alternativa 1.

Levando-se em consideração todas as variáveis atribuídas neste documento para a avaliação de risco das alternativas para a descaracterização da barragem, é possível concluir que a ALTERNATIVA 1 é a mais adequada para dar prosseguimento com o projeto. À exceção da variável “socioeconômica”, a Alternativa 1 se destaca das Alternativas 2 e 3 quando se compara as variáveis “técnicas”, “ambientais” e “econômicas”. Para a variável “socioeconômica”, a Alternativa 1 apresentou desvantagem em relação às outras principalmente em se tratando da geração de emprego pós-descaracterização. A remoção completa do maciço e dos rejeitos minimiza a necessidade de vistorias e inspeções, e consequentemente, a geração de empregos.

Considerando as lacunas existentes nas legislações e normas atuais, conforme citado no presente trabalho, a análise de alternativas ponderando critérios múltiplos objetivos, demonstrou ser uma ferramenta útil para tomada de decisão pelas partes interessadas, na escolha da melhor alternativa a ser concebida em um projeto de descaracterização de uma barragem de rejeito de mineração.

O presente trabalho é capaz de enriquecer o arcabouço técnico de registros de descaracterização de barragens, auxiliando em projetos e análises futuras, bem como transmitir para a sociedade a importância da avaliação de critérios múltiplos, que considerem, inclusive, os impactos socioeconômicos e ambientais, garantindo maior transparência e o envolvimento e engajamento das diversas partes interessadas nas análises e decisões das soluções adotadas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O assunto descaracterização de barragens de mineração ainda é pouco explorado na literatura internacional e a experiência brasileira, que resultará do atendimento às novas legislações (com destaque para a Resolução Nº 95/22 – ANM), se devidamente analisada e documentada, contribuirá sobremaneira para o avanço do conhecimento e das técnicas de descaracterização de barragens de rejeito. Sendo assim, para trabalhos futuros sugere-se:

- Criação de banco de dados unificado, junto aos órgãos reguladores, contendo informações das obras de descaracterização de barragens;
- Incorporação das lições aprendidas em projetos e obras de descaracterização de barragens e divulgação por meio de artigos científicos para a comunidade;
- Avaliação da aplicabilidade da análise de critérios múltiplos na seleção de alternativas para a descaracterização de barragens em concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIPINO, L. et. al. **Relatório Técnico Operacional dos Sistemas de Disposição de Rejeitos da MPSA – Relatório Anual 2021**. Sistema de disposição de rejeitos I e II, Barragens B1, B5, B6 e Rejeito Platô RP1. In: Relatório de Informação Ambiental Anual, Sistema de Rejeitos I Barragens do Vale LO 11353/2018. Relatório Técnico. Paragominas, PA: Mineração Paragominas S.A. 2022. 77 p.

ARAÚJO, G. S.; DINIZ, I. N. A.; SANTOS, P. R. dos. Aplicação de controles de prevenção e mitigação para descomissionamento de barragem de rejeito. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 9.; Congresso Brasileiro de Geossintéticos, 8., 2019, São Carlos. Anais [...]. São Carlos: Associação Brasileira de Geossintéticos, 2019. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2019, p. 487 – 493.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 16 p.

BAPTISTA, M. B.; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. Belo Horizonte: UFMG, 2003.

BRASIL. Constituição (2010). Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece A Política Nacional de Segurança de Barragens Destinadas À Acumulação de Água Para Quaisquer Usos, À Disposição Final Ou Temporária de Rejeitos e À Acumulação de Resíduos Industriais, Cria O Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens e Altera A Redação do Art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, e do Art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de Julho de 2000**. Brasília, DF, 20 set. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm..

BRASIL. Constituição (2020). Lei nº 14066, de 30 de setembro de 2020. **Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração)**. Brasília, DF, 30 set. 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art3.

BRASIL. Constituição (2021). Resolução ANM nº 68, de 30 de abril de 2021. **Dispõe sobre as regras referentes ao Plano de Fechamento de Mina - PFM e revoga as Normas Reguladoras da Mineração nº 20.4 e nº 20.5, aprovadas pela Portaria DNPM nº 237, de 18 de outubro de 2001.** Brasília, DF: Agência Nacional de Mineração – ANM. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-68-de-30-de-abril-de-2021-317640591>.

BRASIL. Constituição (2022). Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. **Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.** Brasília, DF: Agência Nacional de Mineração – ANM. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>.

BRE (Building Research Establishment) – **An engineering guide to the safety of embankment dams in the UK.** BRE 363, second edition, Construction Research Communications Ltd. 1999.

BARRANTES, P. R. E. – **Análise sísmica e hidromecânica de uma barragem de terra zonada no Peru.** Dissertação de Mestrado. PUC-Rio. 2013.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. (2014) – **Soil strength and slope stability.** John Wiley & Sons.

GIGOLOTTI, J. C. J. .; FRANÇA DE FARIA, F. L.; GURGEL JÚNIOR, F. J. **Descaracterização de barragens de contenção de rejeitos de mineração: marcos regulatórios, técnico-normativos e procedimentos.** Cadernos UniFOA, Volta Redonda, v. 17, n. 49, p. 29–47, 2022. DOI:10.47385/cadunifoa.v17.n49.3911. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/3911>. Acesso em:13/04/23

GLOBAL TAILINGS REVIEW (GTR). **Padrão global da indústria para a gestão de rejeitos:** minuta final. International Council on Mining and Metals (ICMM), United Nations Environment Program (UNEP), Principles for Responsible Investment (PRI), 2020, 42 p.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Mineração em números, 2021.** Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em 08/06/2022 (a).

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Mineração em números, IT22.** Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em 25/07/2022 (b).

ICMM, International Council on Mining & Metals. **Tailings Management. Good practice guide.** May 2021. Disponível em: https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental_stewardship/2021/guidance_tailings-management.pdf. Acesso em 10/06/2022.

SANDRONI ET AL. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil [livro eletrônico]** - Rio de Janeiro : Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), 2021.

LACY, H. **Closure and rehabilitation tailings storage facilities.** In: ADAMS, M. D. (ed) *Developments in mineral processing.* Amsterdã: Elsevier, 2005, v. 15. p. 233 – 250. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15011-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15011-X)

MAO, Y. & KAM, S. **Closure of tailings dams.** In: AB Fourie, M Tibbett & A Beersing (eds), *Mine Closure 2011: Proceedings of the Sixth International Conference on Mine Closure*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 361-372. Disponível em: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1152_38_Mao. Acesso em 09/06/2022.

MASSIGNAN, R. S. & SANCHEZ, L. E. **O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura.** Engenharia Sanitária e Ambiental [online]. 2022, v. 27, n. 2 [Acessado 10 Junho 2022], pp. 225-234. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-415220200422>>. Epub 13 Maio 2022. ISSN 1809-4457.

MCKENNA, G.; DAWSON, R. – **Closure planning practice and landscape performance at 57 canadian and U.S. mines.** Proceedings of the 21st Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium in Cranbrook, BC, Canadá, 1997, 14 p

MYLONA, E.; XENIDIS, A.; CSÖVÁRI, M.; NÉMETH, G. **Application of dry covers for the closure of tailings facilities.** Land Contamination and Reclamation, v. 15, n. 2, p. 163 – 182, 2007. <https://doi.org/10.2462/09670513.849>

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. – **The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces.** Géotechnique, 15(1), 79–93, 1965.

NAMBA, M.; AKINAGA, P.; CUNHA, I.; VINUEZA, G.; FONTES, G.; NEGRO JR., A. **Wetlands: a solution to the decommissioning of mining tailings dams.** In: Proceedings of the 5th International Conference on Mine Closure, 11., 2010, Viña del Mar. Anais [...]. Viña del Mar: Australian Centre for Geomechanics, p. 575, 2010

PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

SÁNCHEZ, L. E.; SILVA-SÁNCHEZ, S. S.; NERI, A. C. **Guia para planejamento do fechamento de mina**. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2013, 224 p.

SHERARD, J. L. – **Influence of soil properties and construction methods on the performance of homogeneous earth dams**. Denver, Colo. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division. 1953.

SRK Consulting. Updated Closure Cover Design for the Minto Mine 2016 **Closure and Reclamation Plan Update**. Minto Exploration Ltd., Canadá, 2016, 248 p.

VALE. **Descaracterização de Barragens**. Disponível em: [http: https://www.vale.com/pt/eliminacao-de-barragens](http://https://www.vale.com/pt/eliminacao-de-barragens). Acesso em 21 mar. 2023.

VALE. **Glossário**: confira e entenda melhor alguns termos técnicos e específicos sobre barragens. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/glossario.aspx. Acesso em: 21 mar.