



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---



**Carla Cristina Gonçalves**

# **DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGEM DE REJEITO: ESTUDO DE CASO DE UMA MINA DE CAULIM**

Ouro Preto

2023

Descaracterização de Barragem de Rejeito: Estudo de caso de uma mina de caulim

Carla Cristina Gonçalves

Trabalho Final de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção  
do Grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 27/03/2023

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Daniel Lanzieri – DF+ Engenharia Geotécnica e Recursos Ltda.

Co-orientador: Prof. D.Sc. Adilson do Lago Leite – UFOP

Ouro Preto

2023



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Carla Cristina Gonçalves

Descaracterização de barragem de rejeito: estudo de caso de uma mina de caulim

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em 27 de março de 2023

### Membros da banca

Prof. Dr. Adilson do Lago Leite - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Engenheiro Daniel Lanzieri - Orientador (DF+ Engenharia e Recursos Ltda)  
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (Universidade Federal de Ouro Preto)  
M. Sc. Érika Aparecida dos Santos Gomes (DF+ Engenharia e Recursos Ltda)

O Prof. Dr. Adilson do Lago Leite e o Engenheiro Daniel Lanzieri, orientadores do trabalho, aprovaram a versão final e autorizaram o seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Adilson do Lago Leite**, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 11/04/2023, às 07:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0506351** e o código CRC **7B20C057**.

*Dedico este trabalho a minha amada mãezinha (in memoriam),  
cuja presença foi essencial na minha vida, sendo minha maior incentivadora  
desde o início.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha Santa Rita de Cássia por ter me dado forças e não ter deixado eu desistir perante as dificuldades e contratempos ao longo da caminhada.

Agradeço também à empresa mineradora que me permitiu à utilização dos dados das barragens de rejeitos e não mediu esforços para me auxiliar quando necessário.

Agradeço ao Daniel Lanzieri por todo carinho e dedicação para comigo no desenvolvimento do meu trabalho. Seu apoio e conhecimento técnico sobre o assunto abordado foram fundamentais para tornar a caminhada mais leve e prazerosa. Meu muito obrigada.

Por fim, mas não menos importante, deixo registrado meus sinceros agradecidos à DF+ Engenharia Geotécnica e Recursos Hídricos por permitir que eu conseguir conciliar meu trabalho com as demandas acadêmicas.

## RESUMO

Este trabalho de Conclusão de Curso avalia cenários alternativos para a descaracterização de duas barragens de rejeitos de caulim pertencentes à uma mineradora localizada na região Norte do país. Apesar do método construtivo de alteamento utilizado ser o de jusante, sem prazo ainda exigido para descaracterização pelas normas brasileira, é notória a evolução de estudos e projetos de descaracterização das barragens de rejeitos, independentemente do método construtivo adotado. Foram estudadas três alternativas de descaracterização de barragens levando em consideração metodologias descritas na literatura. Nos três cenários de descaracterização adotados (intervenção com manutenção do barramento, remoção total e remoção parcial da estrutura), foram analisados os aspectos geológicos, geotécnicos, hidráulicos-hidrologicos e ambientais e, por fim, elencadas as principais vantagens e desvantagens para auxiliar na escolha de um método em detrimento a outro.

Palavras-chaves: barragem de rejeito, descaracterização, caulim, legislação.

## **ABSTRACT**

This Course Completion work evaluates alternative scenarios for the mischaracterization of two kaolin tailings dams belonging to a mining company located in the North region of the country. Despite the constructive method of heightening used being downstream, with no deadline yet required for de-characterization by Brazilian standards, the evolution of studies and projects for de-characterization of tailings dams is notorious, regardless of the constructive method adopted. Three dam de-characterization alternatives were studied, taking into account methodologies described in the literature. In the three scenarios adopted (intervention with maintenance of the dam, total removal and partial removal of the structure), the geological, geotechnical, hydraulic-hydrological and environmental aspects were analyzed and, finally, the main advantages and disadvantages were listed to assist in the choice one method over another.

Keywords: tailings dam, mischaracterization, kaolin, legislation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Depósitos de caulim no Brasil (WILSON, SANTOS E SANTOS, 1996). .....	20
Figura 2 - Valores de Produção Mineral do caulim - Ano 2021 (ANM, 2021). ....	21
Figura 3 - a) Estrutura em camada da caulinita b) a mesma estrutura mostrada em “a”, mas enfatizando as ligações dos íons $Al^{3+}$ c) mesmo que “b”, mas hidratada e d) célula unitária (NASCIMENTO <i>et al.</i> (2013) <i>apud</i> GONÇALVES (2003)). ....	22
Figura 4 - Associações das partículas de caulinita (WANG e SIU, 2006). ....	26
Figura 5 - Trajetória de tensões efetivas das amostras de pH 4 e pH 7,8, onde $e_0$ é o índice de vazios inicial (WANG e SIU, 2006). ....	28
Figura 6 - Diagrama simplificado do processamento mineral do caulim (Modificado de AVELAR, 2019). ....	31
Figura 7 - Fluxograma de descaracterização de barragens alteadas pelo método de montante (FEAM, 2019). ....	39
Figura 8 - Vista do reservatório das Barragens de Rejeitos X e Y. ....	45
Figura 9 - Seção típica da Barragem de Rejeito X. Fonte: Disponibilizado pela mineradora. ....	48
Figura 10 - Seção típica da Barragem Y. Fonte: Disponibilizado pela mineradora. .....	48
Figura 11 - Esquema representativo dos reservatórios das barragens de rejeitos X e Y. Fonte: Disponibilizado pela mineradora. ....	49
Figura 12 - Sistema extravasor das barragens posicionado na ombreira direita da barragem de rejeito X. Fonte: Disponibilizado pela mineradora. ....	51
Figura 13 - Curva de distribuição granulométrica do rejeito. Fonte: Disponibilizado pela mineradora. ....	55
Figura 14 - Configuração atual do reservatório das barragens. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	64

Figura 15 - Bombeamento do reservatório das barragens. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	64
Figura 16 - Regularização do reservatório. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	68
Figura 17 - Condição final da barragem após a descaracterização. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	69
Figura 18 - Configuração atual do barramento. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	72
Figura 19 - Esgotamento do reservatório dos barramentos. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	72
Figura 20 - Escavação do reservatório e maciço - Etapa inicial. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	76
Figura 21 - Escavação do reservatório e maciço - Etapa final. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	76
Figura 22 - Barragem descaracterizada – Condição Final. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	79
Figura 23 - Condição atual do reservatório na El. 35,0 m. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	82
Figura 24 - Esgotamento do reservatório. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	82
Figura 25 - Etapa inicial de escavação do reservatório e remoção do maciço. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	84
Figura 26 - Regularização do reservatório. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	85
Figura 27 - Revegetação do reservatório na configuração final. Fonte: Elaborado pela própria autora. ....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índice de compressão ( $C_c$ ) do solo com diferentes estruturas (Modificado de WANG e SIU, 2006).....	27
Tabela 2- Resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ) das amostras com diferentes estruturas em diferentes pressões de confinamento (Modificado de WANG e SIU, 2016). .....	29
Tabela 3 - Princípios de gestão de descaracterização de barragens de rejeito (ICMM, 2020). .....	34
Tabela 4 - Ficha Técnica das barragens de rejeitos X e Y. ....	46
Tabela 5 – Fatores de segurança mínimos das barragens de rejeito X e Y. ....	52
Tabela 6 - Caracterização do rejeito (Estudo de Dam Break, 2022).....	56
Tabela 7 - Características do rejeito (RISR, 2021). .....	57
Tabela 8 - Quadro de vantagens e desvantagens do cenário de alternativas considerados para a descaracterização das barragens de rejeitos X e Y.....	90

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM – Agência Nacional de Mineração

DNPM – Departamento de Produção Mineral

FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente

ICMM – International Council on Mining and Metals

INA – Indicador de nível d'água

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PZs - Piezômetros

RISR – Relatório de Inspeção de Segurança de Barragem

RPSB – Relatório de Revisão Periódica de Segurança de Barragens

SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração

SPT – Standard Penetration Test

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

TR – Termo de Referência

UE – União Europeia

UEPGRH - Unidades Estaduais de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos

VPM – Valores de Produção Mineral

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	12
1.1	Objetivo .....	17
1.1.1	Objetivos Específicos.....	17
2	Revisão Bibliográfica.....	18
2.1	Caulim .....	18
2.1.1	Contexto Histórico.....	18
2.1.2	Panorama Histórico no Brasil.....	18
2.1.3	Características do Caulim .....	21
2.1.4	Características de Resistência do Caulim.....	25
2.1.5	Aplicação Industrial .....	29
2.2	Rejeitos da Mineração de Caulim.....	30
2.3	Conceitos e Termos.....	32
2.3.1	Definição de Barragens de Mineração .....	32
2.3.2	Conceito de Descaracterização de Barragens de Mineração .....	33
2.4	Panorama Brasileiro dos aspectos legais aplicáveis à descaracterização de Barragens de Rejeitos.....	35
2.4.1	Resolução nº 95/2022.....	36
2.4.2	Lei nº14.066/2022 .....	37
2.5	Descaracterização de Barragens de Rejeitos.....	37
2.6	Estratégias de Descaracterização de Barragens de Rejeitos.....	40
2.6.1	Planos de Investigação .....	40
2.6.2	Rotina de Monitoramento e Inspeção .....	43

3	Área de Estudo .....	45
3.1	Características das barragens de rejeitos X e Y .....	46
3.2	Geologia .....	53
3.3	Hidrologia .....	54
3.4	Caracterização dos Rejeitos .....	54
3.4.1	Caracterização Físico-química.....	54
3.4.2	Caracterização Granulométrica.....	55
4	Metodologia.....	58
4.1	Compilação e Análise dos Dados das Barragens de Rejeitos X e Y .....	59
4.2	Seleção e Avaliação das Alternativas de Descaracterização das Barragens de Rejeito de X e Y.....	59
4.3	Quadro Comparativo das Alternativas de Descaracterização .....	60
4.4	Resultados e Discussão .....	60
5	Resultados e Discussão.....	61
5.1	Avaliação das Alternativas.....	63
5.1.1	Alternativa 1: intervenção na estrutura e no reservatório sem desmonte da barragem.....	63
5.1.2	Alternativa 2: intervenção na estrutura e no reservatório com desmonte total da barragem .....	70
5.1.3	Alternativa 3: intervenção na estrutura e no reservatório com desmonte parcial da barragem .....	80
5.2	Quadro de Vantagens e Desvantagens das Alternativas Propostas .....	89
6	Conclusão .....	94
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	95

Referências.....97

# 1 INTRODUÇÃO

A mineração no Brasil teve seu início após o período colonial, se destacando com a descoberta e extração do ouro no século XVIII, principalmente na região hoje denominada Estado de Minas Gerais. Atualmente, a mineração representa uma importante atividade para o desenvolvimento e crescimento do país, devido principalmente às características geológicas brasileiras, com ampla variedade de materiais a serem extraídos.

Estima-se que a mineração seja responsável por 5% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, oferecendo produtos bem diversificados para as indústrias do ramo metalúrgico, fertilizantes, siderúrgicas e, principalmente as petroquímicas. Dada a importância e influência em outros setores da economia, a atividade de mineração também é responsável pela geração de empregos diretos e indiretos, contribuindo para o crescimento e desenvolvimento de oportunidades para a população economicamente ativa do país.

As atividades de mineração resultam no surgimento de grandes modificações ambientais, associadas as crescentes demandas da exploração de bens minerais, ocasionando alteração das características topográficas devido às grandes escavações, supressão vegetal, alteração da qualidade da água superficial e subterrânea, entre outros.

Durante a etapa de extração e beneficiamento dos minérios, diferentes tipos de resíduos são gerados, sendo denominados estéreis, materiais naturais sem relevância econômica no momento da extração, e rejeitos, resíduos processados provenientes do beneficiamento mineral.

Ambos carecem de disposição adequada, de modo que os estéreis normalmente são dispostos em pilhas, podendo ser utilizados, dependendo das suas características geotécnicas, na construção de barramentos. Os rejeitos, podem ser dispostos em pilhas, contudo, no Brasil a forma mais comum é em barragens, utilizando métodos de construção dos maciços com alteamentos por montante, jusante ou linha de centro.

No Brasil, no passado, era muito utilizado pelas mineradoras a construção de barragens de rejeitos pelo método de alteamento a montante. Entretanto, devido aos cenários de rupturas de barragens de rejeitos nos últimos anos, esse método tornou-se proibido pela legislação vigente, por meio da Resolução ANM nº 13/2019, substituída pela Lei 14.066/2020, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens.

Segundo Ávila *et al.* (2021), as atividades de mineração se iniciaram no Brasil há mais de 300 anos, sendo as atividades de garimpo e mineração precursoras da geração de rejeitos provenientes da extração e beneficiamento do minério. Inicialmente, a taxa de geração de rejeitos era reduzida e não provocava impactos ambientais significativos. Dentro desse contexto, com a evolução da utilização de maquinários e do processamento dos minerais, houve um aumento expressivo na taxa de geração de rejeitos.

No Brasil, com o crescimento dos pequenos distritos minerários no século XX, iniciou-se o desenvolvimento das sociedades locais, atraindo indústrias de apoio. Com a expansão populacional e urbana, tem-se um conflito entre o uso da terra e da água para os interesses agrícolas. Os rejeitos que anteriormente eram depositados no solo começaram a obstruir os poços de irrigação e contaminar as áreas a jusante. Neste contexto, os produtores rurais passam a associar a redução da colheita com a disposição dos rejeitos nas proximidades. Em virtude dos impactos ambientais provenientes da disposição de rejeitos no solo, tornou-se necessário a utilização de locais apropriados para se fazer a disposição desses materiais. Assim, a partir do ano de 1930, as mineradoras iniciaram as construções das primeiras barragens de contenção de rejeitos no Brasil (ÁVILA *et al.*, 2021).

Com o advento das tecnologias aplicadas à construção de barragens de contenção de rejeitos, surgem grandes estruturas, e com maior capacidade para armazenamento dos rejeitos e, conseqüentemente, aumento dos riscos inerentes às obras. No final da década de 1960, iniciou-se as discussões de práticas a serem adotadas para aumentar a segurança das barragens através do monitoramento do

seu comportamento, a reavaliação das barragens e vertedouros mais antigos, os efeitos do envelhecimento e os impactos ambientais (ICOLD, 2001).

No contexto brasileiro, em função dos últimos acontecimentos de rupturas de barragens de rejeitos, em 2015 em Fundão no município de Mariana e em 2019 da mina Córrego do Feijão em Brumadinho, que causaram grandes impactos ambientais, mortes e perdas financeiras, houve um enrijecimento da legislação, que, em âmbito geral, tem se tornado cada vez mais rigorosa, evoluindo e avançando, tendendo a se aproximar das melhores práticas adotadas internacionalmente.

No Brasil, a primeira legislação associada a barragens de mineração, foi a Portaria nº 237 de 18 de outubro de 2001 (DNPM, 2001). Com o passar do tempo, novas legislações foram sendo criadas para a melhoria da gestão de barragens, dentre elas podemos citar: Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010), Resoluções nº 143/2012 (BRASIL, 2012) e nº 144/2012 (BRASIL, 2012), Portarias nº 416/2012 (DNPM, 2012) e nº 526/2012 (DNPM, 2013), Portaria nº 14/2016 (DNPM, 2016), Portaria nº 70.389/2017 (DNPM, 2017), Resoluções nº 4/2019 (ANM, 2019), nº 13/2019 (ANM, 2019), Lei nº 14.066/2020 (BRASIL, 2020) e Resolução nº 95/2022 (ANM, 2022).

Salienta-se que após a ruptura da barragem de rejeito B1 da mina Córrego do Feijão, em 25/01/2019, localizada no município de Brumadinho – MG, a Agência Nacional de Mineração (ANM), publicou a Resolução nº 04 em 15 de fevereiro de 2019. Esta resolução estabeleceu medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido (ANM, 2019). Essa legislação trouxe como proibições a construção de novos alteamentos e de novas barragens utilizando o método construtivo a montante, além de estabelecer prazos para a descaracterização de todas as barragens alteadas pelo método de montante e que possuam método construtivo declarado como desconhecido.

Desta maneira, observa-se uma evolução da legislação brasileira atrelada à obrigatoriedade da descaracterização das barragens alteadas pelo método de montante, bem como os prazos estipulados para isso. Dada a necessidade de

desenvolver técnicas para a descaracterização dessas estruturas, de forma economicamente viável e ambientalmente adequada, esta ação tem sido um desafio marcante e estratégico para as empresas de mineração.

Massignan e Sánchez (2022) descrevem que no Brasil há poucos casos documentados, escassa experiência prática e conhecimento limitado sobre os impactos da descaracterização de barragens de rejeitos. Tais fatos são justificados pelos altos custos para sua execução e ausência de legislação, antes de 2019.

Esse TCC apresenta um estudo de caso que aborda possíveis soluções e técnicas de descaracterização de uma barragem de rejeito de caulim, localizada no estado do Pará/PA. Por motivo de sigilo contratual, o nome e a localização exata da mineradora não podem ser citados neste documento.

O caulim apresenta alta versatilidade industrial, sendo quimicamente inerte em uma faixa de pH relativamente ampla. Ele possui cor branca e tem bom poder de cobertura quando usado como pigmento ou extensor, além de ser macio e não abrasivo, com baixa condutividade de calor e eletricidade (PRASAD *et al.*, 1991).

Em função das suas características, segundo Zbik & Smart (1998), industrialmente o caulim possui aplicabilidade na indústria de papel, cerâmica, tinta, plástico e borracha.

Silva *et al.* (2021) relatam que globalmente o caulim possui uma das mais altas taxas de brancura e pureza mineralógica globalmente, sendo encontrados predominantemente na floresta amazônica brasileira. As reservas de caulim são estimadas em 4.144 Mt no Brasil e apenas a região amazônica possui 90% dessas reservas brasileiras. Esses autores afirmam ainda que durante a mineração e o processamento do caulim para fins comerciais, uma quantidade expressiva de resíduos inorgânicos e não perigosos são gerados. As quantidades mais significativas são provenientes de etapas de centrifugação, separação magnética, branqueamento químico e processos de filtração.

Os rejeitos do caulim normalmente são dispostos em grandes barragens de rejeitos gerando impactos econômicos e ambientais onde estão localizados. Tais

barragens são onerosas, pois exigem operações de terraplenagem permanentes e monitoramento constante para evitar vazamentos causados por seu rompimento ou acidentes graves envolvendo indústrias de mineração.

Desta maneira, a etapa de descaracterização de uma barragem de rejeito busca executar um conjunto de atividades que permitem que uma estrutura alcance sua estabilidade física, química e biológica, num cenário de longo prazo. Contudo, dada a evolução com a preocupação das questões ambientais e legislações pertinentes associadas à segurança das barragens de rejeitos, devido, principalmente, aos últimos cenários de ruptura de barragens de rejeitos no Brasil, tem-se observado uma evolução das atividades de descaracterização de barragens. Entretanto, existem ainda muitos desafios a serem superados, no que tange ao compartilhamento das experiências de projetos e a necessidade de evolução na sistematização do processo, principalmente associados aos conteúdos técnicos, dada a particularidade de cada estrutura.

Além disso, avaliar e compreender o comportamento do rejeito depositado nas barragens, envolve estudos adicionais para avaliar o seu comportamento geotécnico e hidráulico, podendo ser bastante complexo. Acredita-se que para os rejeitos de caulim, um dos principais desafios é mensurar e entender quão moroso é o processo de adensamento e como os recalques pode impactar na solução adotada para a descaracterização da barragem, sendo fundamentais para garantir a segurança das obras. Outros fatores também deverão ser levados em consideração durante o processo de descaracterização, dentre eles, as condições climáticas e implicações ambientais da área de estudo, influenciando diretamente na alternativa de descaracterização.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo geral deste trabalho envolve a discussão e a avaliação de possíveis métodos de descaracterização para uma barragem de rejeitos da mineração do caulim no contexto ambiental da Amazônia brasileira.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Propor cenários alternativos de descaracterização de barragens de rejeitos de caulim, avaliando os quesitos geológicos, geotécnicos e hidrológicos inerentes de cada método utilizado;
- Avaliar as principais vantagens e desvantagens de cada alternativa estudada, a fim de apresentar e discutir possíveis aspectos, de maneira qualitativa (sociais, ambientais, econômicos) que possam interferir na escolha da solução adequada para a descaracterização das barragens de rejeito em estudo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Caulim**

#### **2.1.1 Contexto Histórico**

Segundo Prasad (1991), o nome caulim é derivado do termo chinês "Kauling" que significa cume alto, o nome de uma colina perto de Jauchau Fu, na China, onde este material foi extraído séculos atrás uso ceramista.

Em 1712, a terminologia utilizada foi apresentada à sociedade europeia por Père d'Éntrecolles, um missionário jesuíta que encaminhou uma amostra do caulim às autoridades francesas (CHEN *et al.* (1997) *apud* KUZVART (1977) e LIU e BAI (1982)). O termo caulinita foi proposto pela primeira vez em 1987 por Johnson e Blake, denominando-a como espécie mineral contida no caulim (CHEN *et al.*,1997).

A extração da argila de Kauling iniciou-se no século XVII, sendo entre os séculos XVII e XVIII o período de maior extração, conhecido como "era de ouro", devido à sua importância para a porcelana. Após 200 anos de exploração, nos meados do século XVIII, as reservas de caulim se esgotaram. Anos depois, novas reservas foram descobertas e exploradas, sendo também comercializadas como argila de caulim (CHEN *et al.*,1997).

A utilização industrial do caulim iniciou a partir da década de 1920 na indústria de papel e depois na indústria de borracha. Com o passar do tempo, o caulim passou a ser utilizado em plásticos, pesticidas, rações, produtos alimentícios, fins farmacêuticos, dentre outros, ganhando uma gama vasta de aplicações.

#### **2.1.2 Panorama Histórico no Brasil**

As atividades de exploração do caulim na Bacia Amazônica brasileira iniciaram-se em meados da década de 1970, quando Daniel Ludwing, o homem norte americano mais rico na época, investiu na bacia do Rio Jari para produzir celulose de eucalipto local de rápido crescimento. Nas atividades de busca por minerais de fosfato para

serem utilizados como fertilizantes, descobriu-se as reservas de depósitos sedimentares de caulim (WILSON *et al.*, 2006).

Ainda, segundo os mesmos autores, na época, Daniel Ludwing operou o depósito de caulim até que no ano de 1982, quando o governo brasileiro assumiu as operações e instituiu um consórcio de mineradoras brasileiras, incluindo investimento bancários.

A grande extensão territorial do Brasil e sua heterogeneidade geológica influenciaram as argilas caulínicas brasileiras, as quais consistem basicamente em uma mistura de caulinita e haloisita.

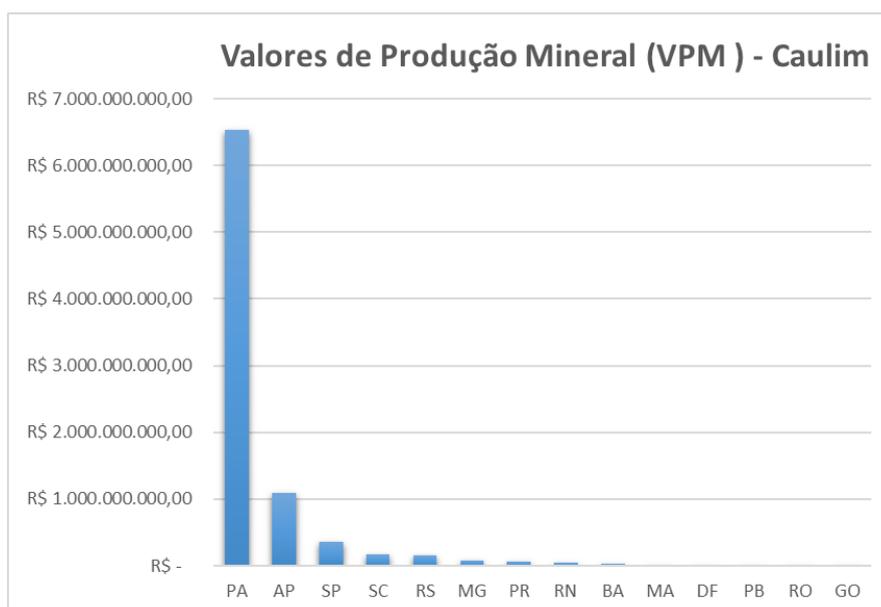
Atualmente as reservas de caulim são estimadas em 4144 Mt no Brasil e apenas a região amazônica possui 90% desse contingente. Segundo Faria (2009) as maiores concentrações das reservas de caulim localizam-se nos depósitos sedimentares dos três maiores distritos caulíferos do país (Figura 1): Rio Capim, no Estado do Pará, Jari no Estado do Amapá, e no Estado do Amazonas, no município de Manaus. Atualmente, grande parte do caulim é exportado para indústrias de papel e cerâmica, mas em menor escala, em materiais refratários, tintas, produtos químicos, entre outros.

Dados da Agência Nacional de Mineração – ANM (2021) mostram que os maiores Valores de Produção Mineral (VPM), no ano de 2021, por federação, situam-se no estado do Pará, seguidos pelo estado do Amapá (Figura 2).

Ainda, de acordo com as informações publicadas pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) sobre Economia Mineral Brasileira 2020, referente ao ano base de 2019, o caulim ocupa a sétima posição como bem mineral estratégico exportado pelo Brasil (IBRAM, 2020). No ano de 2020, o IBRAM informou que no Brasil existiam 160 minas de caulim, sendo 5 classificadas como minas subterrâneas e/ou mistas (IBRAM, 2020).



Figura 1 - Depósitos de caulim no Brasil (WILSON, SANTOS E SANTOS, 1996).



**Figura 2 - Valores de Produção Mineral do caulim - Ano 2021 (ANM, 2021).**

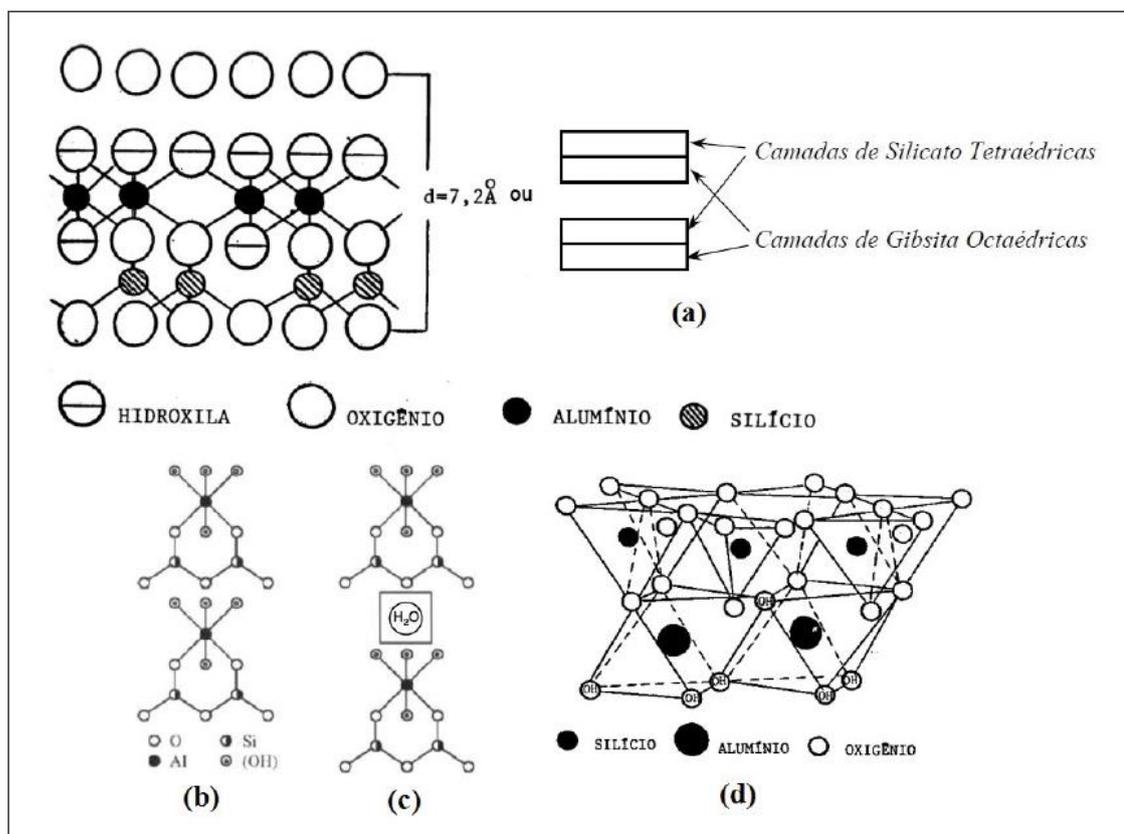
### 2.1.3 Características do Caulim

#### 2.1.3.1 Mineralogia

O principal constituinte, a caulinita, é um filosilicato de alumínio hidratado de composição aproximada  $2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ . Estruturalmente, a caulinita consiste em folhas octaédricas de alumina e folhas tetraédricas de sílica empilhadas alternadamente e tem a fórmula teórica  $(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$  e a composição teórica 46,54%  $\text{SiO}_2$ , 39,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 13,96%  $\text{H}_2\text{O}$ . A forma de um cristal de caulinita perfeitamente ordenado é pseudo-hexagonal, mas a ordenação pode variar de um alto grau de cristalinidade a um cristal mal ordenado, onde a forma não é determinante.

Luz *et al.* (s/d) descreve que além da caulinita, podem ocorrer associados ao mesmo depósito, a presença de outros minerais, tais como haloisita- $4\text{H}_2\text{O}$ , haloisita- $2\text{H}_2\text{O}$  ou metahaloisita, diquita e nacrita, que possuem composição química muito similar, entretanto com diferenças estruturais. A haloisita e a metahaloisita são variedades polimorfas da caulinita, com sistemas diferentes de cristalização.

A estrutura mais comum para a caulinita é mostrada na Figura 3.



**Figura 3 - a) Estrutura em camada da caulinita b) a mesma estrutura mostrada em “a”, mas enfatizando as ligações dos íons Al<sup>3+</sup> c) mesmo que “b”, mas hidratada e d) célula unitária (NASCIMENTO *et al.* (2013) *apud* GONÇALVES (2003)).**

### 2.1.3.2 Geologia

De acordo com Luz e Liz (2008), os depósitos de caulins podem ser classificados em duas categorias segundo sua origem geológica: primários e secundários.

- **Caulim Primário**

São materiais provenientes da alteração de rochas *in situ*, associadas à circulação de fluidos quentes advindos do interior da crosta. Podem ser classificados em intemperizados, hidrotermais e solfataras.

Os caulins intemperizados ocorrem em regiões tropicais (quente e úmido), em que as condições físico-químicas favorecem a alteração dos feldspatos e de outros

alumínio-silicatos presentes em granitos e rochas metamórficas. Os depósitos localizados na Criméia (Ucrânia), na Galícia (Espanha) e nos municípios de Mogi das Cruzes (SP) e Equador (RN), no Brasil, são exemplos de depósito primário intemperizado (LUZ e LIZ, 2008).

Os caulins do tipo hidrotermal são formados pela alteração da rocha devido a circulação de fluidos quentes, advindos do interior da crosta, sendo necessário que a rocha apresente porosidade e permeabilidade adequadas. Os granitos são as "rochas-mãe" mais comuns na formação de depósitos hidrotermais de caulins primários. As principais ocorrências deste tipo de depósito estão localizadas em Saint Austell e Cornwall, na Inglaterra, Maungaparerua (Nova Zelândia), Suzhou e Shanghai (China).

Por fim, os depósitos solfatara são formados a partir da alteração de rochas devido à ação de emanções ácidas vulcânicas, compostas de vapores d'água, ricos em enxofre. São comuns esses depósitos nas imediações de Roma, na Itália.

Segundo Prasad *et al.* (1991), nos depósitos primários, o caulim representa cerca de 15 a 30% do minério total. O restante do minério é composto por granito inalterado, incluindo quartzo, moscovita e feldspato.

- Caulins secundários

São provenientes da deposição de sedimentos em ambientes lacustres, lagunares ou deltaicos. Apresentam teores baixos de quartzo e mica, mas apresenta uma maior contaminação de óxidos de ferro e titânio, responsáveis pela brancura original. Os principais depósitos minerais são encontrados no Rio Jari-AP e Rio Capim-PA (norte do Brasil). De acordo com Prasad *et al.* (1991), os depósitos secundários relativamente apresentam muito mais caulinita e contém também quartzo, moscovita, esmectita, pirita e grafite.

Uma outra classificação dos principais ambientes geológicos formadores do caulim é proposta por Wilson, Souza e Souza (1996), sendo divididos nos seguintes grupos:

- Caulins sedimentares
- Caulins derivados de pegmatitos;

- Caulins derivados de rochas graníticas;
- Caulins derivados de rochas vulcânicas.

A seguir, será descrita resumidamente as principais características desses depósitos de caulins.

- Caulins sedimentares

Os Caulins Sedimentares podem ser encontrados principalmente na área da Bacia Amazônica e nas regiões costeiras. Esse caulim caracteriza-se por apresentar caulinita em formato pseudo-hexagonal com variados teores de Ferro (Fe) e Titânia. Wilson *et al.* (2006) relatam que não houve identificação de haloisita tubular no caulim sedimentar da Amazônia.

- Caulins derivados de Pegmatitos

O Brasil é internacionalmente reconhecido pela variedade de pedras semipreciosas associadas aos depósitos pegmatíticos (turmalina, berilo, ametista, topázio, dentre outros). Neles o caulim é usualmente encontrado como produto de alteração e são utilizados há décadas nas indústrias cerâmicas e de papel. Os depósitos pegmatíticos podem ser encontrados na região Sudeste, onde o caulim é usualmente composto por uma mistura de caulinita e haloisita e na região Nordeste, na qual os caulins caracterizam-se como essencialmente caulíníticos (WILSON *et al.*, 2006).

- Caulins derivados de Rochas Graníticas

Este tipo de caulim pode ser encontrado predominantemente na região Sudeste do Brasil, especialmente no Estado de São Paulo, constituído pelo embasamento geológico de granitos, migmatitos e gnaisses Pré-cambrianos intensamente alterados. Caracterizam-se como depósitos de pequeno porte e muito variáveis. Os caulins apresentam de 50 a 70% de haloisita-7A do tipo C e apresentam grandes variações mineralógicas, além de variações na composição química, tornando a mineração desses caulins difícil. Adicionalmente, devido à ocorrência do intemperismo laterítico nas rochas graníticas ricas em ferro faz com que muitos caulins adquiram a coloração

rósea até avermelhada, sendo uma característica não muito recomendável para esse material (WILSON *et al.*, 2006).

- Caulins derivados de Rochas Vulcânicas

Segundo Wilson *et al.* (2006), as rochas vulcânicas caulinizadas são encontradas na região Sul do Brasil, nas proximidades de São Bento do Sul. A região possui estratigrafia complexa, sendo caracterizada pela ocorrência de dois tipos de rochas vulcânicas, as ácidas (riolitos fluidos, ignimbrritos, breccias e aglomerados) e intermediárias (andesitos e dacitos). As principais áreas de caulinização foram formadas pela alteração de riolitos.

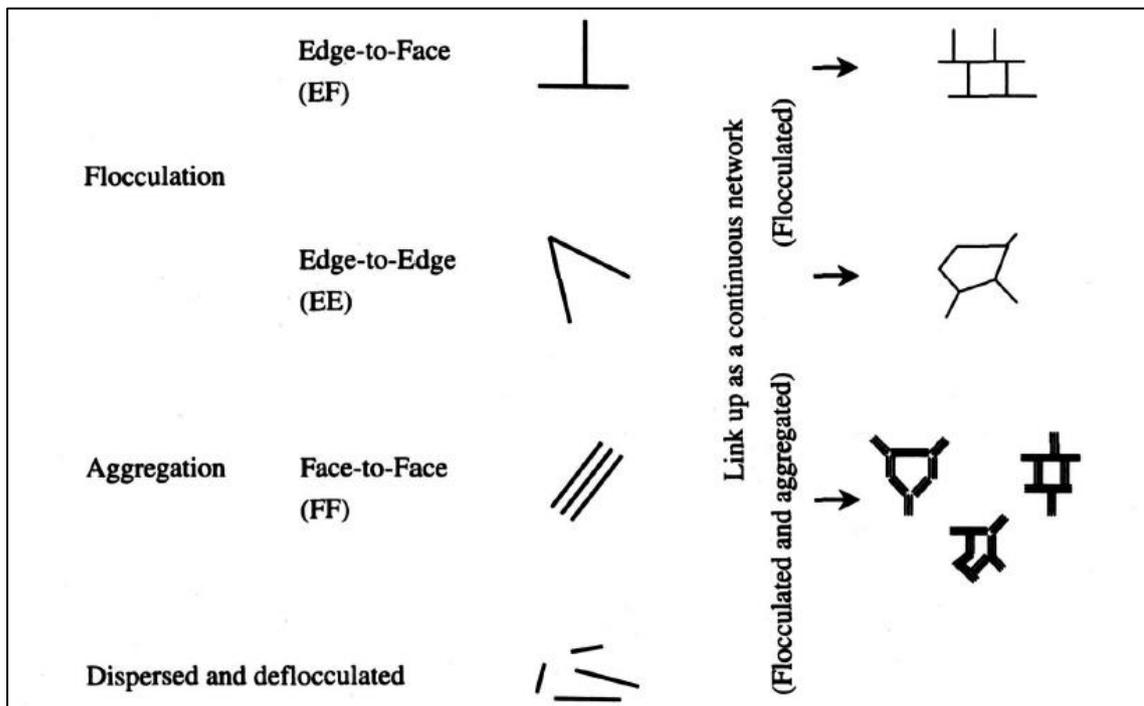
#### **2.1.4 Características de Resistência do Caulim**

Estudos realizados por Wang e Siu (2006) analisaram o comportamento dos efeitos da estrutura nas respostas mecânicas da caulinita, principal componente do caulim, com propriedades conhecidas e controladas. O material de estudo foi denominado de Speswhite Caulim com composição mineralógica de 47% de SiO<sub>2</sub> e 38% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A massa específica dos grãos e a área superficial são 2,6 g/cm<sup>3</sup> e 14 m<sup>2</sup>/g, respectivamente. A distribuição granulometria é majoritariamente menor do que 2 µm (predominantemente finos, classificados como argila) e os valores de pH é aproximadamente 5±0,5.

As amostras utilizadas para o estudo das propriedades mecânicas foram preparadas por consolidação  $k_0$  de suspensões de argila tratada com uma certa propriedade de fluido de poro sob um efeito tensão vertical de 50 kPa (onde  $k_0$  é a pressão lateral - coeficiente em repouso). A consolidação foi finalizada quando o recalque vertical registrado convergiu para um valor estável. O processo de consolidação durou 1 semana para amostras com pH baixo e mais de 1 mês para amostras de pH alto. Após esse processo, a argila consolidada foi cuidadosamente cortada em tamanhos ideais para os testes usando um tubo com uma fina parede lubrificada. A amostra tinha 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para o ensaio de compressão triaxial. A maioria das amostras foram cortadas ao longo da direção da

tensão principal, ou seja, na direção do carregamento vertical da consolidação  $k_v$ . No entanto, algumas amostras também foram propositalmente cortadas ao longo da direção da tensão principal menor, sendo denominada como amostras “menores” ou “horizontais”.

Os resultados dos ensaios de variação do volume sob confinamento isotrópico a 100 kPa, indicaram que a razão do índice de vazios e compressibilidade (em termos do índice de compressão -  $C_c$ ) relacionaram diretamente com a associação microestrutural da caulinita (Figura 4).



**Figura 4 - Associações das partículas de caulinita (WANG e SIU, 2006).**

A Tabela 1 apresenta os resultados das variações de volume obtidas para as diferentes associações das partículas de caulinita.

**Tabela 1 - Índice de compressão ( $C_c$ ) do solo com diferentes estruturas (Modificado de WANG e SIU, 2006).**

Propriedades do fluido poroso da amostra de solo	$C_c$
pH 4	0,453
pH 4 (menor)	0,452
pH 4 e [NaCl] = 0,15 mol/L	0,350
pH 5	0,352
pH 7,8	0,241
pH 7,88 (menor)	0,241
pH 7,8 e [NaCl] = 0,15 mol/L	0,359

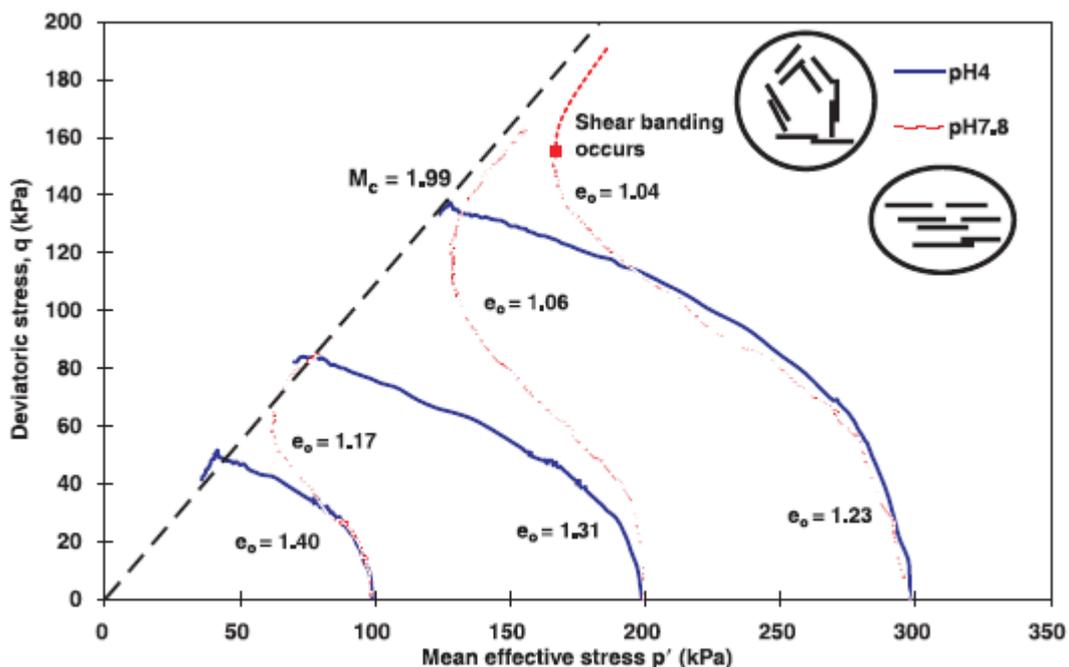
Nota: O índice de compressão ( $C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$ ) foi determinado em pressões de confinamento superiores a 100 kPa.

Observou-se que, embora a associação das partículas de caulinita no formato flocação *edge-to-face* (E-F) domine em pH mais baixos, as amostras ensaiadas possuem taxas de índice de vazios maiores e maior compressibilidade. Entretanto, observou-se que as amostras mais densas e com menor compressibilidade observadas na estrutura *face-face* (F-F) prevaleceram em pH mais altos. As amostras submetidas à adição de eletrólitos (0,15 mol/L NaCl) evidenciaram que a razão do índice de vazios inicial e a compressibilidade da amostra de pH 4 diminuiu após a adição, enquanto a amostra de pH 7,8 teve o comportamento contrário.

No ensaio de compressão triaxial não drenado utilizaram um sistema triaxial CKC com taxa de deformação de 0,015%/min para aplicar a tensão desviadora em amostras de menores permeabilidade, ou seja, com pH de 7,8. As amostras foram submetidas a pressão mínima de confinamento de 100 kPa. Os autores também analisaram amostras de caulinita em pH 4 e 7,8, além de avaliar a influência nas

mudanças do comportamento tensão-deformação após a adição de 0,15 mol/L de NaCl em duas das amostras investigadas.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para a trajetória de tensão efetiva das amostras em pH 4 e pH 7,8 sob aplicação de três pressões de confinamento (100, 200 e 300 kPa).



**Figura 5 - Trajetória de tensões efetivas das amostras de pH 4 e pH 7,8, onde  $e_0$  é o índice de vazios inicial (WANG e SIU, 2006).**

Os autores verificaram que as amostras de pH 4 apresentaram comportamento contráctil em direção à linha do estado crítico. A linha do estado crítico para o ensaio de compressão triaxial foi obtida com inclinação  $M_c = 1,09$  e o ângulo de atrito do estado crítico obtido foi de  $\theta_c = 27, 5^\circ$ . Entretanto, as amostras de pH 7,8 demonstraram comportamento diferenciado, elas se contraíram inicialmente, passando por um estado de transformação de fase e depois se dilataram sob a mesma taxa de tensão. Ainda, eles verificaram que embora as amostras em pH 7,8 não apresentaram o mesmo comportamento das amostras em pH 4, elas atingiram em estado crítico bem definido dentro da faixa de deformação tolerável de aproximadamente 25%. O

comportamento dilatante da amostra em pH 7,8 pode estar associado ao tecido compactado da estrutura e com as fortes forças repulsivas da dupla camada de caulinita.

Os valores de resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) das amostras, estão apresentadas na Tabela 2. Os resultados indicaram que para as amostras em pH 4, o valor da resistência ao cisalhamento não drenado foi muito inferior quando comparado com as amostras em pH 7,8 para todas as pressões de confinamento aplicadas.

**Tabela 2- Resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ) das amostras com diferentes estruturas em diferentes pressões de confinamento (Modificado de WANG e SIU, 2016).**

Pressão de confinamento (kPa)	$S_u$ (kPa)	
	Amostras em pH 4	Amostras em pH 7,8
100	19,4	48,1
200	40,3	79,0
300	66,0	77,5 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Espera-se que a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) seja maior que a medida porque o teste foi interrompido no início do cisalhamento.

### 2.1.5 Aplicação Industrial

O caulim apresenta alta versatilidade industrial, sendo quimicamente inerte em uma faixa de pH relativamente ampla. Esse possui cor branca e tem bom poder de cobertura quando usado como pigmento ou extensor, além de ser macio e não abrasivo e tem baixa condutividade de calor e eletricidade (PRASAD, 1991).

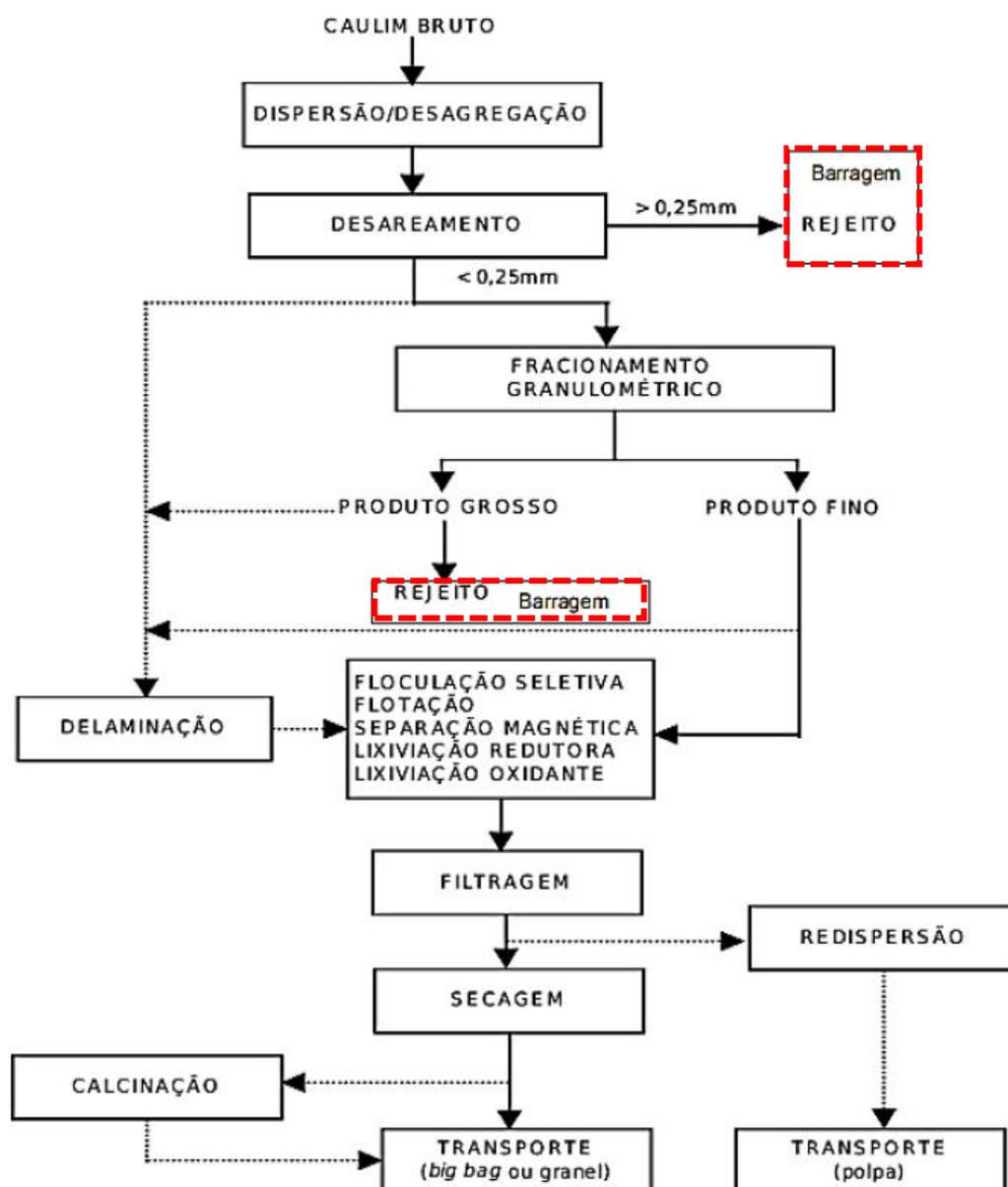
Em função das suas características, segundo Zbik Smart & (1998), industrialmente o caulim possui aplicabilidade na indústria de papel, cerâmica, tinta,

plástico e borracha. As principais aplicações industriais do caulim incluem: cerâmicas, cargas para tintas, borrachas, plásticos e cobertura para papel.

De acordo com Wang *et al.* (2011), o caulim também pode ser utilizado como um importante catalisador para hidrogenação devido às suas características específicas de preparação, uso em catalisadores, quantidades, facilidade de configuração e processamento, leve condições, ganho de rendimento e/ou seletividade e baixo custo.

## **2.2 Rejeitos da Mineração de Caulim**

A etapa de beneficiamento mineral do caulim gera dois tipos de rejeitos. Um resíduo composto por grãos com granulometria maiores (areia quartzosa), cerca de 10%, denominado de rejeito grosseiro. O segundo tipo, caracteriza-se por apresentar materiais finos, denominado rejeito fino (em torno de 26% da produção bruta), sendo proveniente da segunda etapa de beneficiamento mineral do caulim, composto pelas etapas de centrifugação, separação magnética, branqueamento e filtragem (MAIA *et al.*, 2007). A Figura 6 apresenta um diagrama simplificado do processo produtivo do caulim, com destaque para as etapas correspondentes com a geração de rejeitos.



**Figura 6 - Diagrama simplificado do processamento mineral do caulim (Modificado de AVELAR, 2019).**

Silva *et al.* (2021) afirma que durante a mineração e o processamento do caulim para fins comerciais, uma quantidade expressiva de resíduos inorgânicos e não perigosos são gerados. As quantidades mais significativas são provenientes das etapas de centrifugação, separação magnética, branqueamento químico e processos de filtração. Xu *et al.* (2018) relatam que aproximadamente 5 toneladas de rejeitos são

geradas para cada tonelada de caulim produzida. Dentre os grandes impactos ambientais observados na exploração dos depósitos de caulim estão à construção das barragens de rejeito. Silva *et al.* (2021) analisou um levantamento de imagens de satélite da evolução das áreas desmatadas na Floresta Amazônica em três períodos distintos (2000, 2010 e 2020) para construção das barragens de rejeitos. Na época do estudo, essas áreas correspondiam a cerca de 6,08 mil km<sup>2</sup> de desmatamento. Caso, o ritmo de desmatamento evolua com a necessidade de construção de novas barragens de rejeitos, os autores acreditam que os danos possam chegar a quase 15,8 mil km<sup>2</sup> até o ano de 2050, sendo maior que as áreas territoriais dos países como Timor Leste (14,9 mil km<sup>2</sup>), Catar (11,0 mil km<sup>2</sup>) e Jamaica (10,9 mil km<sup>2</sup>).

## 2.3 Conceitos e Termos

### 2.3.1 Definição de Barragens de Mineração

A Lei nº 14066 instituída em 30 de setembro de 2020, que alterou a Lei nº 12.334/2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que em seu Art. 2º define o termo barragem como sendo

*I – Barragem: qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo barramento e as estruturas associadas.*

Já Resolução nº 95 de 07 de fevereiro de 2022, que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração, conceitua o termo barragem de mineração em seu Artigo 2º como sendo:

*IV) Barragem de mineração:*

*a) barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídas em cota superior à da topografia original do terreno, utilizadas em carácter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de resíduos industriais; e*

*b) estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação.*

A Deliberação Normativa nº 62, de 17 de dezembro de 2002, que estabelece as diretrizes para os critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos no estado de Minas Gerais, conceitua o termo barragem em seu Artigo 1º como:

*I – Barragem: Qualquer estrutura – barragem, barramento, dique ou similar - que forme uma parede de contenção de rejeitos, de resíduos e de formação do reservatório de água.*

Observa-se uma distinção dos termos entre os órgãos em relação à definição conceitual do termo de barragem. Entretanto, acredita-se o conceito deva ser estendido de forma a atender a todas as legislações vigentes.

### **2.3.2 Conceito de Descaracterização de Barragens de Mineração**

O conceito de descaracterização de barragens de rejeito é uma terminologia nova, cujo significado ainda está em processo de construção. Observa-se uma equivalência na utilização dos termos desativação e fechamento. No Brasil, o termo descaracterização vem sendo utilizado para designar intervenções em barragens de rejeitos de tal forma que elas deixam de ser funcionais devido ao esgotamento de sua capacidade de armazenamento. As atividades, envolvem, principalmente, medidas de controle do escoamento de águas superficiais, permitindo que uma barragem seja descaracterizada, transformada em uma estrutura integrada ao relevo do entorno (NERI *et al.*, 2021).

Após a ruptura da barragem de rejeito de Córrego do Feijão, no município de Brumadinho em 2019, o Conselho Internacional de Mineração e Metais (*International Council on Mining and metal – ICMM*) criou, em agosto de 2020, o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos. Neste documento, adota-se apenas o termo fechamento, sendo definido quando é cessada a disposição de rejeitos na estrutura, devendo contemplar as etapas de transição das operações para o fechamento

permanente, remoção da estrutura (por exemplo, os dutos), tratamento da água e construção de coberturas, revegetação ou qualquer outro tipo de aterro sobre o rejeito.

O Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos tem a finalidade de apresentar as diretrizes de uma gestão segura das estruturas de disposição de rejeitos e evitar a ocorrência de qualquer dano às pessoas e ao meio ambiente, estruturadas em 15 princípios. Dentre esses princípios apenas 9 estão diretamente relacionados com a etapa de descaracterização/fechamento das barragens de rejeitos, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3 - Princípios de gestão de descaracterização de barragens de rejeito (ICMM, 2020).**

<b>Princípio 1</b>	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.
<b>Princípio 2</b>	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.
<b>Princípio 3</b>	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.
<b>Princípio 4</b>	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.
<b>Princípio 5</b>	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.
<b>Princípio 6</b>	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.
<b>Princípio 7</b>	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.
<b>Princípio 8</b>	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.
<b>Princípio 9</b>	Divulgar publicamente e oferecer acesso a informações sobre as estruturas de disposição de rejeitos para apoiar a prestação de contas e responsabilização pública.

## **2.4 Panorama Brasileiro dos aspectos legais aplicáveis à descaracterização de Barragens de Rejeitos**

Este item aborda sobre os aspectos legais do contexto brasileiro referentes à etapa de descaracterização de barragens de rejeitos e as suas principais diretrizes.

As rupturas de barragens de rejeitos no Brasil em estruturas construídas pelo método à montante, em especial nos municípios de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, motivaram a proibição da utilização desse tipo de método e estabeleceu que todas as barragens que utilizam essa metodologia construtiva fossem descaracterizadas. Além disso, essas mudanças trouxeram novos avanços na legislação do país, a fim de evitar novos acidentes de ruptura de barragem de rejeitos.

As obras associadas à descaracterização de barragens de rejeitos podem ser complexas e de grande porte, exigindo conhecimento técnico e tempo para entender e compreender as particularidades de cada barragem, bem como o comportamento do rejeito depositado no reservatório.

#### **2.4.1 Resolução nº 95/2022**

A Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, tem a finalidade de consolidar os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração, além de revogar a Portaria DNPM nº 70.389/2017 e as Resoluções ANM nº 13/2019, 32/2020, 40/2020, 51/2020 e 56/2021.

Dentre as definições apresentadas nessa legislação, em seu Artigo 2º, tem-se a definição de barragens de mineração descaracterizada como sendo:

*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; e*

*d) Monitoramento: acompanhamento pelo período mínimo de 2 (dois) anos após a conclusão das obras de descaracterização, objetivando assegurar a eficácia das medidas de estabilização.*

Neste contexto, outros aspectos foram definidos por essa resolução, podendo-se citar, a necessidade do monitoramento da área pelo período mínimo de dois anos após a conclusão das obras de descaracterização. Tal medida, auxiliará na eficácia das medidas de estabilização implementadas e assegura o alcance dos objetivos estabelecidos nas atividades de fechamento.

No Artigo 24 dessa resolução define-se os critérios hidráulicos a serem considerados na etapa de descaracterização, sendo:

*§ 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.*

De maneira complementar, o Artigo 58 descreve sobre os prazos e a necessidade de projeto técnico executivo de descaracterização da barragem, caso ela seja classificada como alteada pelo método de montante ou tenha método declarado como desconhecido.

#### **2.4.2 Lei nº14.066/2022**

A Lei nº 14.066 instituída em 30 de setembro de 2020, alterou a Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Dentre as diretrizes associadas à descaracterização de barragens, em seu Artigo 2º, a referida lei conceitua o termo barragem descaracterizada, como:

*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.*

De maneira complementar, em seu Artigo 3º ainda fica definido algumas diretrizes, como:

*II – Regularizar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e de usos futuros de barragens;*

#### **2.5 Descaracterização de Barragens de Rejeitos**

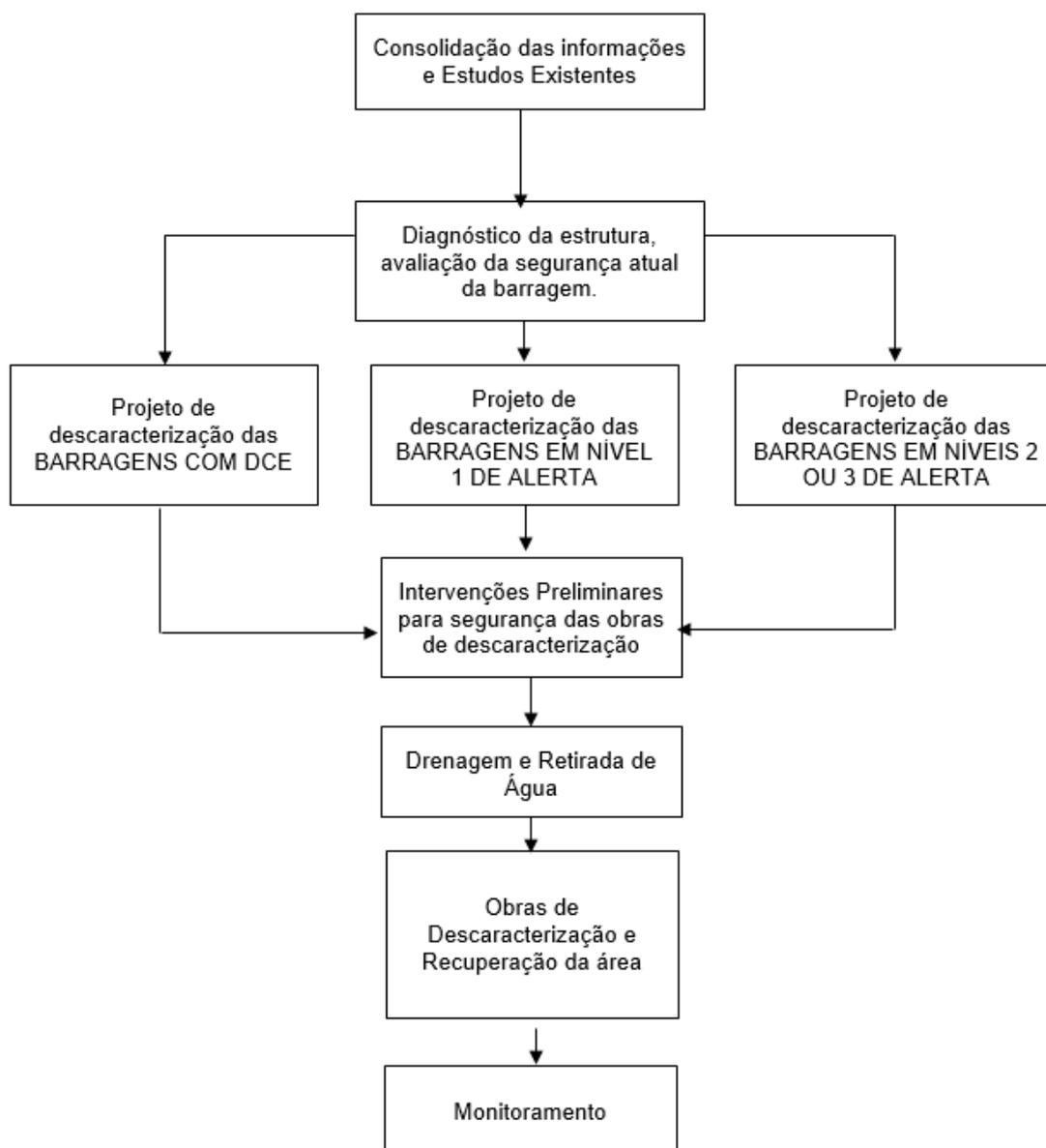
Bjelkevik (2011) descreve que a etapa de planejamento de fechamento de barragens de rejeito deve iniciar concomitantemente ao planejamento da estrutura com o intuito de garantir seu descomissionamento sustentável e a redução dos custos. Além disso, essa etapa deve contemplar a revisão periódica do plano de fechamento da estrutura, a fim de garantir que os custos envolvidos na etapa de descaracterização sejam assegurados por garantias financeiras. O autor ainda destaca a importância em

realizar uma avaliação de risco completa, iniciada a partir da fase de concepção do conceito de descaracterização da barragem de rejeitos.

De maneira complementar, segundo Pritchard, Jensen e Wesh (2010), a etapa de fechamento das barragens de rejeitos são bem complexas, pois a tipologia do rejeito e método de disposição selecionado tem forte influência na etapa de fechamento dessas estruturas, uma vez que ocupam grandes áreas e são susceptíveis a ocorrência de processos erosivos e infiltração.

Algumas organizações internacionais, tais como o Banco Mundial, o Internacional Conselho de Mineração e Metais (ICMM), União Europeia (UE), diversos departamentos governamentais e comitês nacionais e vários países chegaram a um consenso atual de que, uma barragem de rejeito, em sua etapa de fechamento/d Descaracterização deverá ser deixada em condições em que a estrutura resista permanentemente às forças naturais e não provocará danos contínuos ao meio ambiente. Entretanto, a solução sustentável a ser aplicada ao fechamento das barragens de rejeito em cenário de longo prazo é deixar o local de implantação dessas estruturas em condições autossustentáveis e de benefícios para a comunidade, sem a necessidade de manutenção e gastos contínuos (BJELKEVIK, 2011).

No Brasil, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) de Minas Gerais apresenta o Termo de Referência (TR), que estabelece os requisitos mínimos para a descaracterização de barragens de rejeitos alteradas pelo método de montante, conforme previsto na Lei 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens. Nesse documento é apresentado, como caráter orientativo, um fluxograma de descaracterização de barragem (Figura 7) que pode ser adaptado de acordo com as necessidades e peculiaridades de cada projeto.



**Figura 7 - Fluxograma de descaracterização de barragens alteadas pelo método de montante (FEAM, 2019).**

Cabe mencionar que no contexto brasileiro, ainda não há exigências quanto a prazos estabelecidos para a descaracterização de barragens de rejeitos que adotaram o método construtivo para jusante. Contudo, tem-se observado, em geral, o desenvolvimento de estudos para compreender e avaliar alternativas de descaracterização de barragens de rejeitos alteadas pelo método de jusante.

## **2.6 Estratégias de Descaracterização de Barragens de Rejeitos**

De acordo com Lacy (2005), o conhecimento do histórico de construção das barragens de rejeitos é essencial para a etapa de descaracterização, podendo influenciar no sucesso ou fracasso dessa atividade.

As opções a serem empregadas nas técnicas de descaracterização de barragens de rejeitos dependerão da natureza da estrutura e dos desafios inerentes a essa. Mao e Kam (2011) descrevem algumas estratégias a serem adotadas para a etapa de fechamento de uma barragem de rejeito, são estas descritas nos itens a seguir.

### **2.6.1 Planos de Investigação**

Os estudos de investigação devem incluir os planos de amostragem geotécnica e ambiental, associados a avaliação de desempenho. Esses planos e programas devem ser elaborados para reunir as informações relevantes e necessárias relacionadas aos aspectos ambientais e de engenharia das barragens de rejeitos.

#### **2.6.1.1 Programa de Investigação Geológico-Geotécnica**

Caso haja ausência de informações sobre a barragem de rejeitos e das características da sua fundação, torna-se necessário a realização de um plano de investigação geológico-geotécnica. Esta investigação pode envolver a execução de poços, testes de permeabilidade e instalações de instrumentação, tais como piezômetros e indicadores do nível d'água. Cabe destacar que a instrumentação é uma ferramenta valiosa para avaliar o desempenho das barragens. A avaliação do comportamento do solo e os parâmetros geotécnicos a serem adotados nos projetos devem ser definidos a partir de ensaios de campo e laboratoriais. Ainda, deve-se fazer uma revisão dos dados geotécnicos existentes para avaliar a necessidade ou não de novas campanhas de investigação.

Segundo Gigolotti *et al.* (2022), para a etapa de elaboração do projeto de descaracterização, é fundamental a obtenção de dados pré-existentes a respeito da barragem de rejeito em estudo, pois esses terão papel relevante para facilitar o trabalho, com economia de tempo e de recursos. Mesmo apesar de ter tais informações, ainda é recomendado a realização de alguns estudos preliminares detalhados, tais como: sondagem a percussão do subsolo (*Standard Penetration Test* - SPT), ensaios de permeabilidade e caracterização da massa de rejeitos, avaliação das condições hídricas, levantamento topográfico planialtimétrico e determinação de jazida (caixa de empréstimo) para obtenção de material para construção de aterro.

A execução da sondagem SPT deve ser considerada na etapa de investigação e estudos preliminares a fim de se obter informações do tipo, estado e capacidade suporte dos solos constituintes da massa de rejeito, subsidiando os estudos de projeto de terraplanagem de tamponamento do reservatório da barragem, tais como, a elevação média que o solo apresenta, compacidade/consistência (GIGOLOTTI *et al.*, 2022).

Os ensaios de permeabilidade têm a finalidade de determinar o coeficiente de permeabilidade do solo, que permitirá avaliar o escoamento da água no solo. Já, os ensaios de caracterização granulométrica visa medir a distribuição, por tamanho, das partículas individuais da massa de rejeitos, subsidiando o cálculo de vazões e do gradiente hidráulico do solo, análises de percolação de água na estrutura e as análises da estabilidade do barramento (GIGOLOTTI *et al.*, 2022).

Ainda, para viabilizar a etapa de descaracterização de barragem de rejeitos, estudos complementares para a investigação geotécnica podem ser executados, contemplando: sondagens mistas, ensaios de infiltração e ensaios de laboratório: granulometria completa, limites de Atterberg, massa específica dos grãos, massa específica aparente, umidade natural e ensaios de compressão triaxial, saturados, adensados e não drenados ( $CIU_{Sat}$ ), ou outros.

### 2.6.1.2 Estudos Ambientais

A importância da realização dos estudos ambientais na etapa de descaracterização da barragem de rejeito é estabelecer uma estrutura que permita a execução e o controle das ações de descaracterização de maneira ambientalmente adequada, visando o estabelecimento de ações de controle e gestão ambiental integradas aos procedimentos técnicos de engenharia e de meio ambiente, bem como o estabelecimento de procedimentos técnicos-gerenciais e mecanismos de acompanhamento para promover a implementação das ações de controle ambientais definidas nas etapas de operacionalização durante a descaracterização.

Os estudos ambientais visam avaliar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, o seu comportamento, bem como a análise geoquímica dos sedimentos depositados. Na fase de fechamento da barragem de rejeito, o monitoramento ambiental é relevante, pois os resultados obtidos auxiliarão na etapa de planejamento das fases compreendidas entre a transição e fechamento da estrutura. O objetivo direto dos estudos ambientais no fechamento de barragens é avaliar se medidas tais como *grouting* ou construções de *cut-off* são necessárias para o controle de infiltração na estrutura.

### 2.6.1.3 Avaliação Hidrológica

Na etapa de fechamento de uma barragem de rejeito, pode ocorrer a mudança no regime hidrológico local. Essas mudanças influenciam no projeto hidrológico das barragens de rejeitos e nas suas estruturas hidráulicas, devendo ser levadas em consideração como parte do planejamento do fechamento da estrutura. A avaliação hidrológica envolve a coleta de informações de fluxo de água de superfície para o desenvolvimento de um plano de gerenciamento de água da fase de fechamento para a área geral de rejeitos ou para todo o local da mina.

O *Guidelines for Dam Decommissioning Projects* elaborado pela *United States Society on Dams* em 2015, relata que os parâmetros típicos de impactos físicos relacionados à remoção de uma barragem e liberação de sedimentos finos, quando

permitindo, incluem mudanças na taxa de fluxo, turbidez e concentração de sedimentos suspensos e qualidade da água. Além disso, a remoção de uma grande barragem e reservatórios de armazenamento podem produzir picos de inundação mais altos a jusante, maiores flutuações de fluxo e ocorrência de fluxos mínimos aumentados ou diminuídos e até reduzir o abastecimento de água. Em contrapartida, as pequenas barragens possuem reservatórios muito pequeno para ter efeito significativo no abastecimento de água e na hidrologia da cheia.

### **2.6.2 Rotina de Monitoramento e Inspeção**

A rotina de monitoramento e inspeção das barragens de rejeitos incluem diferentes tipos de programas, tais como programas de monitoramento ambiental e inspeção regular de segurança de barragens. Esses programas geralmente iniciam-se na fase operação, fornecendo informações atualizadas sobre a condição de segurança física da estrutura e registros históricos do desempenho da barragem para a etapa de descaracterização.

O programa de monitoramento pode ser dividido em duas etapas: gerenciamento adaptativo e categorias de monitoramento de restauração. O programa de gestão adaptativa tem a finalidade de fornecer informações em tempo real sobre os processos físicos, diretamente aos gerentes de projeto, a fim de verificar ou modificar a taxa e o tempo de remoção da barragem e desencadear ações de mitigação necessárias para proteção da qualidade da água, propriedades e infraestruturas. Já o programa de monitoramento da restauração prevê o fornecimento de conhecimento técnico aplicável à compreensão e interpretação dos processos naturais de restauração do meio ambiente, auxiliando na tomada de decisões de gestão a longo prazo e podem ser aplicadas em projetos futuros de descaracterização de barragem em outros locais (*GUIDELINES FOR DAM DECOMMISSIONING PROJECTS, 2015*)

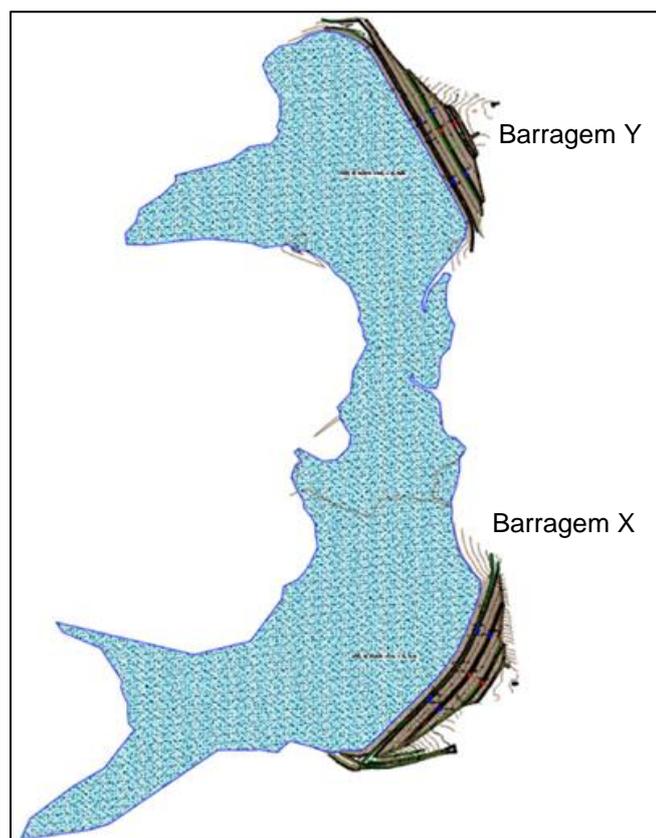
Além disso, essa etapa deverá prever o monitoramento dos dispositivos de drenagem superficiais, com adoção de medidas preventivas, corretivas e de controle para evitar a incidências dos processos erosivos e a implantação de um sistema de monitoramento que possa identificar previamente as áreas vulneráveis aos processos

erosivos e assoreamento dos corpos hídricos na região. As ações necessárias estão associadas com a realização de vistorias técnicas *in loco* para verificação da ocorrência de pontos de erosão superficial, evidências de processos que podem resultar em instabilidade geotécnica dos taludes remanescentes após a descaracterização (por exemplo, presença de trincas nos taludes e bermas), existência de obstruções, assoreamento e rachaduras nas canaletas de drenagem superficial e ocorrência da acumulação de sedimentos nos corpos hídricos a jusante das estruturas de lançamento de água.

### 3 Área de Estudo

A empresa mineradora de caulim proprietária das barragens de rejeitos em estudo localiza-se na região norte do estado país. Por motivos de sigilo, a localização exata da mineração não pôde ser apresentada.

As Barragens de Rejeitos, denominadas X e Y neste estudo, formam um único reservatório, atualmente em operação, que tem como função principal a disposição dos rejeitos gerados na planta de beneficiamento de caulim, recebimento natural de sedimentação erosiva proveniente do entorno e clarificação do efluente final com retorno para o meio ambiente. Seus materiais constitutivos são solos compactados em aterros alteados pelo método de jusante. A Figura 8 mostra uma representação esquemática do sistema.



**Figura 8 - Vista do reservatório das Barragens de Rejeitos X e Y.**

### 3.1 Características das barragens de rejeitos X e Y

As principais características técnicas das barragens de rejeitos X e Y estão apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Ficha Técnica das barragens de rejeitos X e Y.**

Dados Gerais		
Item	Barragem X	Barragem Y
Finalidade	Disposição de Rejeitos	
Ano de Construção	2000	
Método de alteamento	Jusante	
Largura da crista (m)	6,0	
Cota Atual da Crista (m)	35,0	
Comprimento da Crista (m)	374,8	396,8
Largura das bermas (m)	3,0	
Inclinação local dos taludes de jusante (V:H)	23,8°	
Inclinação do talude de montante (V:H)	1V:2H (26,6°)	
Volume Atual do Reservatório (m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	4.400.000,00 <sup>1</sup>	
Tipo de Seção	Seção homogênea	
Drenagem Interna	Colchão drenante horizontal correspondente ao espaldar da barragem, colchão drenante das	

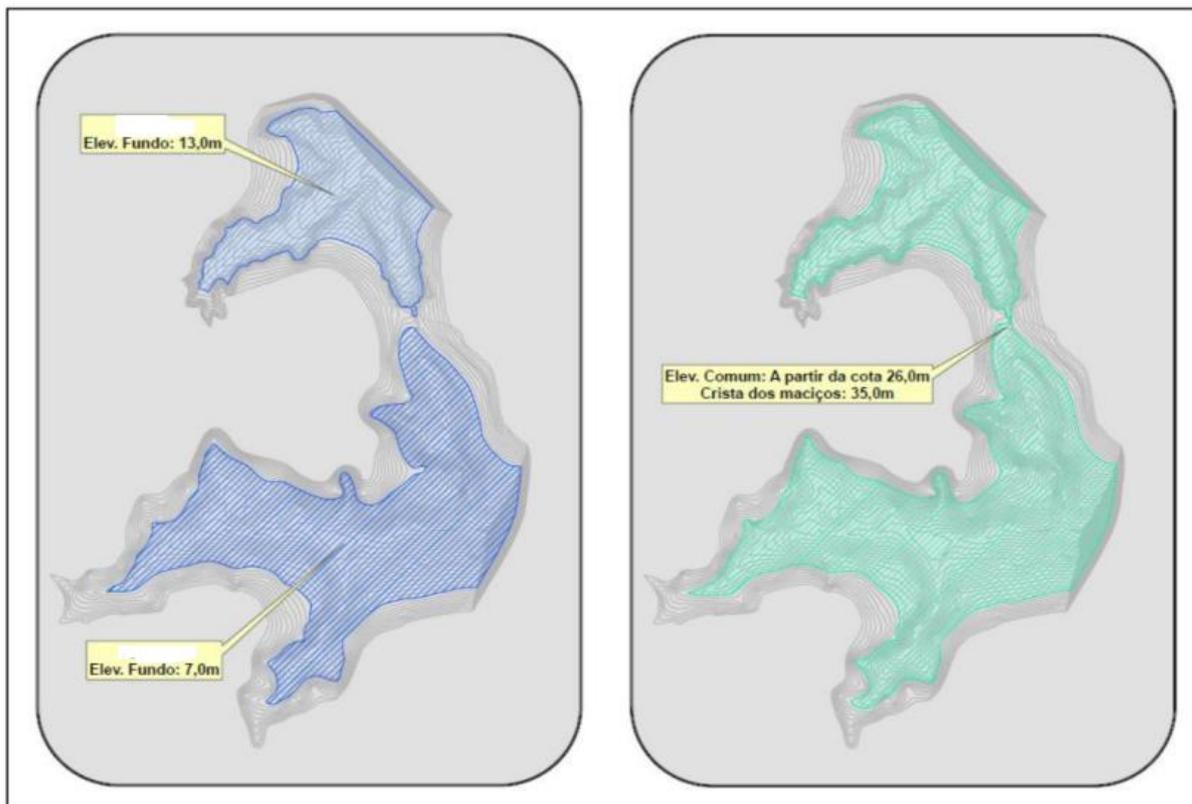
<b>Dados Gerais</b>		
<b>Item</b>	<b>Barragem X</b>	<b>Barragem Y</b>
	ombreiras esquerda e direita e filtro vertical de areia sobre dreno de brita.	
Drenagem Superficial	Canaletas e descidas d'água.	
Instrumentação	04 Indicadores de Nível d'água (INA), 03 Piezômetros (PZs), 03 medidores de recalque e 01 medidor de vazão (MV).	
<b>ESTRUTURAS VERTENTES</b>		
Vertedouro	Sistema de extravasor compartilhado com a barragem Y, composto por um vertedouro de emergência, dimensionado para TR = 10.000 anos.	Sistema de extravasor compartilhado com a barragem X, composto por um vertedouro de emergência, dimensionado para TR = 10.000 anos.

Nota:

<sup>1</sup> Consulta ao Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) da Agência Nacional de Mineração (ANM) em 18/02/2023.

As seções típicas das barragens de rejeitos X e Y estão apresentadas nas Figura 9 e Figura 10. De acordo com o Relatório de Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB) disponibilizado pela mineradora, o projeto executivo da Barragem X previa a implantação da estrutura em quatro etapas, com coroamento nas El. 27,5 m, 35,0 m, 40,0 m e 50,0 m (capacidade máxima). Em 2000, foi implantada a primeira etapa do projeto, ficando a crista da barragem na El. 27,5 m. Tendo em vista necessidades operacionais, foi executado um alteamento intermediário, não previsto, da El.27,50m para a El.31,0m (segunda etapa) e posteriormente da El.31,0m para a





**Figura 11 - Esquema representativo dos reservatórios das barragens de rejeitos X e Y. Fonte: Disponibilizado pela mineradora.**

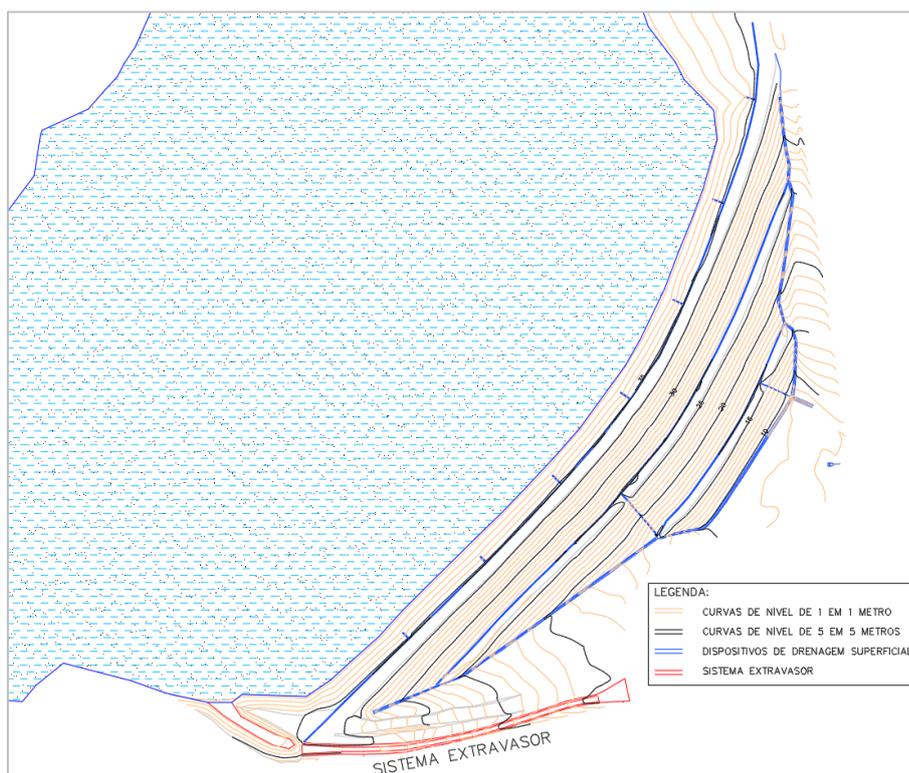
O maciço da barragem é do tipo homogêneo, constituído de solo compactado oriundo das áreas de empréstimos.

O sistema de drenagem interna da barragem é constituído por um dreno coletor/condutor, com seção retangular de 4,0 m de largura e 0,50 m de espessura, preenchido com brita 0, envolto por geotêxtil. Nas ombreiras direta e esquerda tem-se colchões drenantes, relativos ao espaldar do aterro característico da etapa de construção (El.35,0 m). Ele é composto por uma camada única de areia, com espessura de 0,25 m, distribuída ao longo de todo o espaldar do maciço da barragem até a elevação 27,50 m. O filtro vertical é composto por areia sobre dreno de brita 0 relativo ao espaldar do aterro desta etapa de construção (El. 35,0 m), com espessura de 0,50 m, conectado através do dreno condutor ao colchão drenante horizontal.

Os dispositivos de drenagem superficial são compostos por:

- Canaletas localizadas nos pés dos taludes, de seção retangular em concreto armado, moldadas *in loco*;
- Descida d'água do tipo canal rápido, escavada no talude, com seção trapezoidal de concreto armado, moldadas *in loco*;
- Caixas coletoras/passagem em concreto armado, localizadas na mudança de direção de fluxo entre a descida d'água e canaletas de pé de talude;
- Canaletas coletoras no coroamento da barragem, com seção retangular de concreto armado, moldadas *in loco*, com descidas para dentro da bacia de acumulação (talude de montante).

As barragens compartilham um único sistema extravasor, composto por um vertedouro de emergência dimensionado para TR=10.000 anos, em canal com seção trapezoidal revestido de concreto, com largura de 2,0 m e soleira na elevação 34,3 m, localizado na ombreira direita da barragem de rejeito X (Figura 12). Informações sobre a qualidade da água do reservatório não foram identificadas na documentação disponibilizada pela mineradora.



**Figura 12 - Sistema extravasor das barragens posicionado na ombreira direita da barragem de rejeito X. Fonte: Disponibilizado pela mineradora.**

As análises de estabilidade das seções A-A', B-B' e C-C' executadas para as barragens de rejeitos X e Y foram avaliadas em função da posição da linha freática, sendo considerados os seguintes cenários:

- Condição de Operação (linha freática normal atual): linha freática conforme valores registrados por indicadores de nível d'água, no período de avaliação, com leituras efetuadas até agosto de 2021 (18/08/21), considerando: o perfeito funcionamento dos dispositivos de drenagem interna e nível do reservatório na elevação 31,66. Fator de segurança admissível maior ou igual a 1,5;
- Condição de Operação (freática máxima observada): linha freática considerando os níveis máximos registrados ao longo do último ano (06/04/21). Fator de segurança admissível maior ou igual a 1,3;

- Condição de Operação (solicitação sísmica): análise somando-se os efeitos da solicitação sísmica igual a 0,05g (5% da aceleração da gravidade) na direção horizontal. Na direção vertical será utilizado 60% desse valor, ou seja, 0,03g seguindo os “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas – Eletrobrás/2003”. Fator de segurança admissível maior ou igual a 1,1.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5 obtidos indicaram fatores de segurança mínimos compatíveis com a norma vigente aplicável (NBR 13.028/2017).

**Tabela 5 – Fatores de segurança mínimos das barragens de rejeito X e Y.**

Estrutura	Condição da linha freática	Fator de segurança recomendado (NBR 13.028/2017)	Fator de Segurança Obtido		
			Seção AA'	Seção BB'	Seção CC'
Barragem de rejeito X	Freática atual, estimada no monitoramento até agosto/2021, e nível do reservatório – 31,10m. Talude geral de jusante.	1,5	2,0	1,9	2,0
	Freática atual, estimada no monitoramento até agosto/2021, e nível do reservatório – 31,10m. Talude entre bermas.	1,3	1,9	2,1	2,0
	Freática atual + sismo (0,05 g). Talude de jusante geral.	1,1	1,7	1,7	1,8
	Freática considerando os níveis máximos lidos nos instrumentos até 24/04/2021.	1,3	1,9	1,9	2,0
	Freática considerando os níveis máximos lidos nos instrumentos até 24/04/2021 + sismos (0,05 g)	1,1	1,7	1,6	1,8
Barragem de rejeito Y	Freática atual, estimada no monitoramento até agosto/2021, e nível do reservatório – 31,66m. Talude geral de jusante.	1,5	2,3	2,4	2,4

Estrutura	Condição da linha freática	Fator de segurança recomendado (NBR 13.028/2017)	Fator de Segurança Obtido		
			Seção AA'	Seção BB'	Seção CC'
	Freática atual, estimada no monitoramento até agosto/2021, e nível do reservatório – 31,66m. Talude entre bermas.	1,3	2,8	2,8	2,7
	Freática atual + sismo (0,05 g). Talude de jusante geral.	1,1	2,0	2,1	2,1
	Freática considerando os níveis máximos lidos nos instrumentos até 06/04/2021.	1,3	2,3	2,4	2,4
	Freática considerando os níveis máximos lidos nos instrumentos até 06/04/2021 + sismos (0,05 g)	1,1	2,0	2,1	2,1

### 3.2 Geologia

A região de estudo está localizada na porção noroeste da Bacia Sedimentar do Amazonas. Localmente, na área do empreendimento, ocorrem as Coberturas Cenozoicas sobrepostas a Formação Alter do Chão, sendo o depósito da área da mina de origem secundária sedimentar.

A Formação Alter do Chão repousa em discordância sobre as formações paleozoicas e constitui um pacote de sedimentos siliciclásticos de até 1.250 m de espessura, sendo a sua espessura média de aproximadamente 400 m. São sedimentos de ambiente continental flúvio-lacustre. Esta formação consiste numa alternância de arenitos claros, argilosos, finos a grossos, exibindo estratificação cruzada, argilitos e conglomerados. Acima deste ocorre o Grupo Barreiras, datado do Terciário Superior, que é representado por cascalhos, areias, siltes e argilas (Informações disponibilizada pela empresa).

Na região da mina, a camada caulínica possui em média 34 metros de espessura e é composta principalmente por caulinita, quartzo (2 até 20%), sendo que óxidos e hidróxidos de ferro são frequentes, assim com o zircônio e anatásio,

subordinadamente encontra-se poucos cristais individuais de mica. Vale destacar que o óxido de ferro se encontra em grande quantidade no retículo cristalino da caulinita.

A passagem tipológica entre os diferentes caulins é gradacional (Tipo I, II, IIIa, IIIb, IIIg), sendo interrompidas por lentes de areias (Tipo V) e concreções ferruginosas (Tipo IV). A base do Caulim coincide com um horizonte argiloso e arenoso, sendo caracterizado por uma areia basal.

### **3.3 Hidrologia**

A região de estudo está localizada na área de drenagem de três Unidades Estaduais de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UEPGRH), duas no lado do Amapá (UEPGRH Cajari e Jari) e uma no lado do Pará (UEPGRH Paru-Jari).

A área de estudo está inserida na faixa climática de Clima de Monção (Am), segundo a classificação de Köppen-Geiger. As principais características dessa faixa climática são: precipitação total anual média superior a 1.500 mm e precipitação inferior a 60 mm no mês mais seco do ano. A mina está inserida entre as isozonas correspondentes à precipitação de 2.300 e 2.400 mm totais anuais.

### **3.4 Caracterização dos Rejeitos**

#### **3.4.1 Caracterização Físico-química**

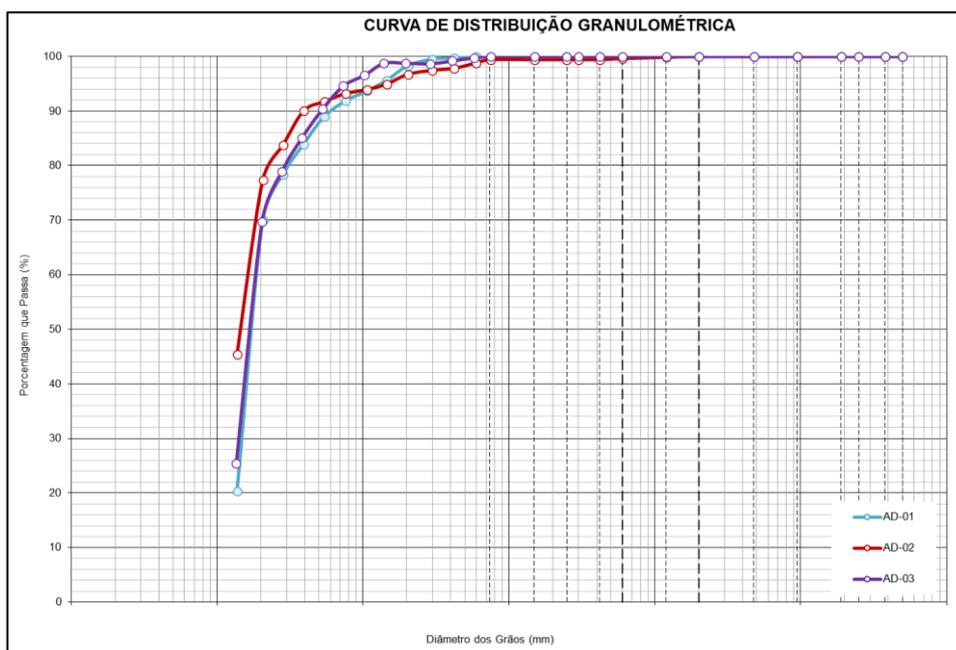
Segundo o Estudo de Dam Break elaborado em 2022, os ensaios laboratoriais executados nas amostras indicaram que o rejeito é composto predominantemente por  $\text{SiO}_2$  (óxido de silício) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio) presentes na caulinita e em outros argilominerais. Além disso, tem-se a presença de teores muito baixos de potássio, sódio e fósforo.

De acordo com a norma ABNT NBR 10.004 os rejeitos classificaram-se como “RESÍDUO CLASSE II A – RESÍDUO NÃO PERIGOSO NÃO INERTE”. As análises realizadas indicaram que as substâncias Ferro e Sulfato estavam com concentrações que ultrapassaram os padrões de potabilidade de água. Ressalta-se que o Ferro teve

valor concentrado de 5,73 mg/L, cujo limite máximo estabelecido é 0,3 mg/L e, o Sulfato, 481 mg/L, mais que o dobro do permitido para este, 250 mg/L.

### 3.4.2 Caracterização Granulométrica

Conforme os dados apresentados na Tabela 6 e Tabela 7 e na curva de distribuição granulométrica (ver Figura 13), a amostra de rejeito AD-BM-01 apresenta em sua composição 65,4% de argila e 34,6% de silte, classificando-a como Argila Siltosa.



**Figura 13 - Curva de distribuição granulométrica do rejeito. Fonte: Disponibilizado pela mineradora.**

Em relação à amostra de rejeito AD-BM-02, verificou-se a predominância de partículas argilosos (76,6%). Ademais, a amostra apresentou 22,2% de silte e 1,2% de areia, sendo 0,6% de areia fina, 0,2% de areia média e 0,4% de areia grossa, sendo classificada como Argila Siltosa com vestígios de areia.

Por fim, a amostra de rejeito AD-BM-03, assim como as amostras anteriores, apresentou um alto percentual de finos, com 68,0% de argila, 31,8% de silte e 0,2% de areia fina, classificando-a como Argila Siltosa.

Já, em relação às massas específicas reais dos grãos, as amostras de rejeitos AD-BM-01, AD-BM-02 e AD-BM-03 apresentaram 2,641 g/cm<sup>3</sup>, 2,669 g/cm<sup>3</sup> e 2,642 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, sendo os valores encontrados dentro da faixa usualmente observada em solos.

O teor de umidade natural para a amostra AD-BM-01 foi 250,6% e as amostras AD-BM-02 e AD-BM-03 apresentaram teores de umidade natural de 70,0% e 96,5%, respectivamente. Salienta-se que a diferença nos percentuais de umidade das amostras está relacionada aos pontos de coleta das amostras no reservatório das barragens de rejeitos X e Y.

Em termos granulométricos, observa-se coerência entre a distribuição granulométrica e a classificação da carta de plasticidade, uma vez que o material apresenta granulometria com predominância de argila e silte. O índice de plasticidade (IP) da amostra de rejeito foi 11,6%, que indica média plasticidade (10<IP<20), conforme classificação de Burmister (1949).

**Tabela 6 - Caracterização do rejeito (Estudo de Dam Break, 2022).**

Amostra	w <sub>nat</sub> (%)	δ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Ângulo de repouso	Granulometria (%)				Classificação
			(°)	Arg.	Silte	Areia	Ped.	
AD-BM-01	250,6	2,641	36,8°	65,4	34,6	0,0	0,0	Argila Siltosa
AD-BM-02	70,0	2,669	36,0°	76,6	22,2	1,2	0,0	Argila Siltosa com vestígios de areia

Amostra	W <sub>nat</sub> (%)	$\delta_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Ângulo de repouso	Granulometria (%)				Classificação
			(°)	Arg.	Silte	Areia	Ped.	
AD-BM-03	96,5	2,642	36,7°	68,0	31,8	0,0	0,0	Argila Siltosa

**Tabela 7 - Características do rejeito (RISR, 2021).**

$\delta_g$ (t/m <sup>3</sup> )	$\delta_{d,máx.}$ (t/m <sup>3</sup> )	$\delta_{d,mín.}$ (t/m <sup>3</sup> )	e <sub>mín.</sub>	e <sub>máx.</sub>	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\delta_{méd.polpa}$ (t/m <sup>3</sup> )	$\delta_s$ (t/m <sup>3</sup> )	v (cP)	pH <sub>bomb.</sub>
2,695	1,592	0,688	0,6928	2,9172	36,9	25,3	11,6	1,040	2,695	1,00	4,5

Em que:

$\delta_g$  = Massa específica real dos grãos (t/m<sup>3</sup>);

$\delta_{d,máx.}$  = Massa específica aparente seca máxima (t/m<sup>3</sup>);

$\delta_{d,mín.}$  = Massa específica aparente seca mínima (t/m<sup>3</sup>);

e<sub>mín.</sub> = Índice de vazios mínimo;

e<sub>máx.</sub> = Índice de vazios máximo;

LL = limite de liquidez;

LP = Limite de plasticidade;

IP = Índice de Plasticidade;

$\delta_{méd.polpa}$  = Massa específica média da polpa;

$\delta_s$  = Massa específica real dos sólidos; v = viscosidade dinâmica da polpa; e

pH = pH médio no bombeamento.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo trata do processo metodológico considerado na elaboração do estudo de descaracterização de uma barragem de rejeito de caulim, com o intuito de atender as condições de segurança geotécnicas, hidrológicas e hidráulicas.

As alternativas de descaracterização avaliadas neste TCC foram embasadas em dados de literatura, mais precisamente no livro eletrônico Avaliação Ambiental Integrada das Obras de Descaracterização das Barragens de Rejeitos alteadas pelo método a montante no estado de Minas Gerais, elaborado por de Neri *et al.* (2021). Os autores classificam os projetos de descaracterização das barragens, avaliando seus principais impactos e atividades executadas, conforme a classificação apresentada seguir.

- Intervenção na estrutura e no reservatório:
  - Desmonte total da barragem;
  - Desmonte parcial da barragem; e
  - Sem desmonte da barragem.
  
- Estabilização da estrutura:
  - Com construção de aterro de reforço a jusante;
  - Sem construção de aterro de reforço a jusante.
  
- Destino dos rejeitos removidos:
  - Com aproveitamento econômico dos rejeitos removidos;
  - Sem aproveitamento econômico dos rejeitos.

Para considerar os cenários de alternativas na etapa de descaracterização das barragens de rejeitos, genericamente denominadas de X e Y, buscou-se avaliar as possíveis variáveis envolvidas no contexto espacial e temporal, a fim de subsidiar as diretrizes iniciais para as atividades de descaracterização, de tal forma que todos os aspectos relevantes (estabilidade geotécnica, ambiental, hídrico, socioeconômico e

construtivo) fossem considerados e avaliados como fatores preponderantes na escolha da melhor solução.

#### **4.1 Compilação e Análise dos Dados das Barragens de Rejeitos X e Y**

Nesta etapa, foi feita a compilação de todos os dados referentes às barragens de rejeito X e Y disponibilizado pela mineradora em estudo. Esta fase do trabalho teve o intuito de coletar, organizar e analisar as informações a respeito das estruturas. Foram consultados os projetos de implantação das estruturas, relatório *As Is*, pareceres técnicos, relatórios de Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB), Estudos de Dam Break, Plano de Fechamento de Mina, entre outros.

O levantamento e compreensão dessas informações são subsídios para avaliar as principais características das estruturas em estudo e do rejeito depositado, permitindo elencar soluções de descaracterização condizentes com o contexto local e regional que as estruturas se encontram inseridas.

#### **4.2 Seleção e Avaliação das Alternativas de Descaracterização das Barragens de Rejeito de X e Y**

A seleção das alternativas de descaracterização identificou quais dos critérios definidos por Neri *et al.* (2021) e das boas práticas adotadas pelas mineradoras na descaracterização de outras barragens são condizentes ao contexto local e regional em que se encontram inseridas as estruturas em estudos, além de atender as legislações vigentes.

Em cada alternativa avaliou-se, de maneira qualitativa, os aspectos geológicos, geotécnicos, hidráulicos e ambientais, identificando as principais ações de descaracterização a serem executadas inerentes à cada solução considerada. As principais ações definidas foram descritas tal forma que as estruturas alcancem sua estabilidade física, química e biológica após a descaracterização.

A seleção e avaliação dos cenários de alternativas estudados são de carácter preliminar, não sendo feito um estudo detalhado dos quantitativos técnicos, logísticos a ambientais e financeiros. É importante destacar que, a elaboração desses quantitativos não é escopo do trabalho. Entretanto, com a evolução de estudos futuros e reavaliação dos cenários de alternativas propostos neste trabalho, enfatiza-se que seja feito um detalhamento das atividades e quantificação dos custos das obras de descaracterização.

### **4.3 Quadro Comparativo das Alternativas de Descaracterização**

Após a avaliação e compreensão das alternativas estudadas para a descaracterização das barragens de rejeitos X e Y, foi elaborado um quadro comparativo entre as alternativas elencando as principais vantagens e desvantagens de cada cenário considerado na descaracterização das estruturas.

### **4.4 Resultados e Discussão**

Nesta etapa é feita uma discussão sobre quais alternativas fornecem uma melhor opção para a descaracterização das barragens de rejeitos X e Y, a fim de auxiliar na tomada de decisão inicial para a mineradora na escolha do melhor método, de tal forma que atenda aos requisitos legais, ambientais, sociais e econômicos que seja de maior interesse pela mineradora.

## 5 Resultados e Discussão

Este item apresenta os resultados e discussões das alternativas consideradas na descaracterização das barragens de rejeitos X e Y. As alternativas avaliadas e consideradas neste trabalho, foram obtidas a partir de combinações de soluções apresentadas por Neri *et al.* (2021), sendo:

- Alternativa 1: intervenção na estrutura e no reservatório sem desmonte da barragem;
- Alternativa 2: intervenção na estrutura e no reservatório com desmonte total da barragem; e
- Alternativa 3: intervenção na estrutura e no reservatório com desmonte parcial da barragem.

Neste estudo não foi considerada a avaliação de alternativas com ou sem aproveitamento de rejeitos após a descaracterização, pois o objetivo principal deste TCC foi discutir as possíveis intervenções na estrutura e não o destino do rejeito. Ademais, para subsidiar alternativas de destino do rejeito, estudos específicos de outras formas e locais de disposição ou reuso em cadeias produtivas seriam necessários.

Ressalta-se que, todas as alternativas de descaracterização das barragens de rejeitos X e Y, consideraram a condição atual de elevação da crista do reservatório, El.35,0 m. É de suma importância que à medida que as estruturas se aproximem do fim de sua vida útil e das obras de descaracterização, seja realizada reavaliação das condições e dos principais aspectos considerados neste estudo. Como a evolução dinâmica das condições e aspectos avaliados, é importante que seja feito o refinamento dos dados e avaliações dos cenários para as condições futuras.

De modo geral, a avaliação dos aspectos geológicos da fundação das estruturas indicou que os barramentos se encontram totalmente assentados em terreno natural. Conforme consultado na documentação disponibilizada pela mineradora, a fundação das barragens consiste em solo residual saprolítico regional, composto por areia argilo-siltosa, alaranjada a marrom, de medianamente compacta a rija, não indicando

um material susceptível à liquefação. Entretanto, é indicado como etapa futura a realização de ensaios específicos.

Com relação aos dados geotécnicos, os resultados das análises de estabilidade para a condição atual das barragens apresentaram fatores de segurança mínimos satisfatórios para a descaracterização da estrutura conforme apresentado no Item 3.1, indicando que não há necessidade, até o presente momento, de construção de bermas de reforço para assegurar a estabilidade física dos taludes do barramento. Analisando os dados geométricos da inclinação dos taludes da barragem, a inclinação atual é de 1V:2H, que de acordo com a classificação das barragens no Sistema Integrado de Gestão de Barragens (SIGBM) da Agência Nacional de Mineração (ANM), apresentam inclinação intermediária ( $1V:2H \geq$  Inclinação média dos taludes na seção principal  $> 1V:3H$ ). Sendo assim, para os cenários de manutenção total ou parcial do maciço das estruturas, recomenda-se que haja uma adequação dos taludes para inclinação de 1V:3H. Isto porque, os estudos desenvolvidos por Mao e Kam (2011), também recomendam que sob o aspecto de fechamento de barragens de rejeitos, garantindo a segurança física dos taludes remanescentes, a inclinação global dos taludes fique entre 1V:2,5H a 1V:3H (mínimo).

É importante destacar que, por se tratar de um rejeito, não necessariamente a granulometria reflete a presença de argilas e siltes e caracteriza o comportamento como tal. Sendo rejeito, o material que passa por processamento e que o faz chegar na granulometria equivalente a estes materiais. Conforme consultado nos dados disponibilizados, os rejeitos de caulim depositados nas barragens são materiais muito finos e com características argila-siltosa. Face às características argilosas do rejeito, parte do material pode estar em processo de adensamento, conferindo ao material do reservatório consistência muito mole e baixa capacidade de suporte. Portanto, para as alternativas em que o reservatório for mantido, deverá ser avaliada a estimativa de adensamento, os impactos que poderiam causar na estrutura descaracterizada e as medidas mitigadoras.

Faz-se importante que, previamente ao início das obras de descaracterização das barragens sejam realizados ensaios geotécnicos no sedimento do reservatório para

definir os parâmetros geológico-geotécnico do rejeito de caulim e avaliar o seu comportamento geotécnico frente às atividades de descaracterização.

## **5.1 Avaliação das Alternativas**

### **5.1.1 Alternativa 1: intervenção na estrutura e no reservatório sem desmonte da barragem**

A alternativa 1 consiste na manutenção da crista do maciço da barragem na cota da estrutura na ocasião da descaracterização e recuperação ambiental da área. Contudo, pode ser necessária a adequação da inclinação dos taludes da estrutura para atender às condições de segurança física dos taludes.

Salienta-se que as figuras apresentadas nas descrições das alternativas foram utilizadas de maneira representativa, a partir do perfil de seção da barragem de rejeito X indicando as atividades e configurações das estruturas ao longo das obras de descaracterização. Essas estão representadas como croqui, sem escala específica.

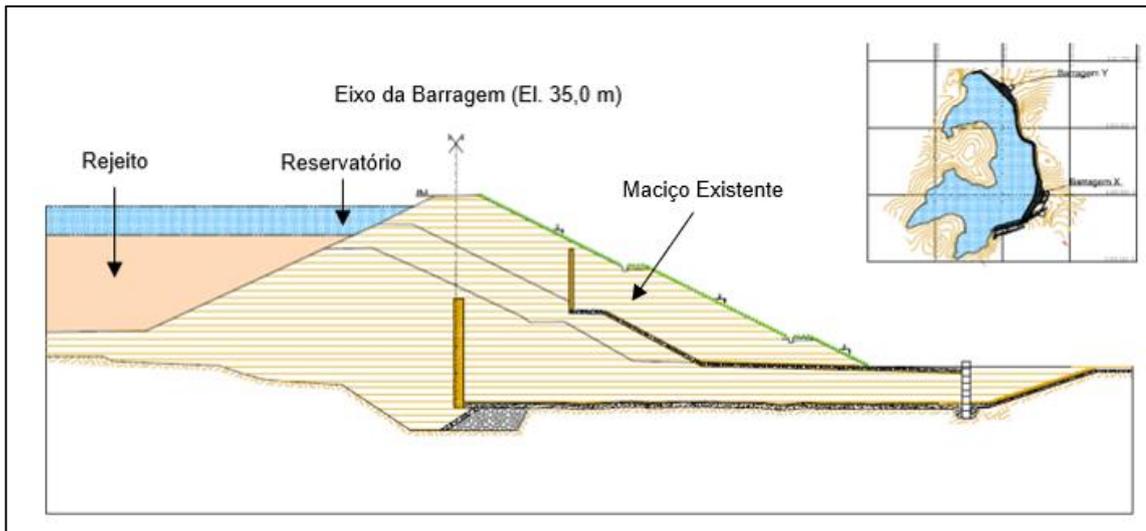
#### **5.1.1.1 Etapa 1: esvaziamento do reservatório**

Com a finalidade de rebaixamento do nível d'água para a execução das obras de descaracterização das estruturas, é proposto um sistema de bombeamento para esvaziamento do reservatório, podendo ser utilizado as estruturas de bombeamento existente, desde que atenda as vazões mínimas exigidas no projeto. Na Figura 14 é representado o perfil transversal da configuração atual do reservatório das barragens de rejeitos com elevação de crista na cota 35,0 m e a Figura 15 mostra a condição do reservatório após a etapa de bombeamento do lago dos barramentos.

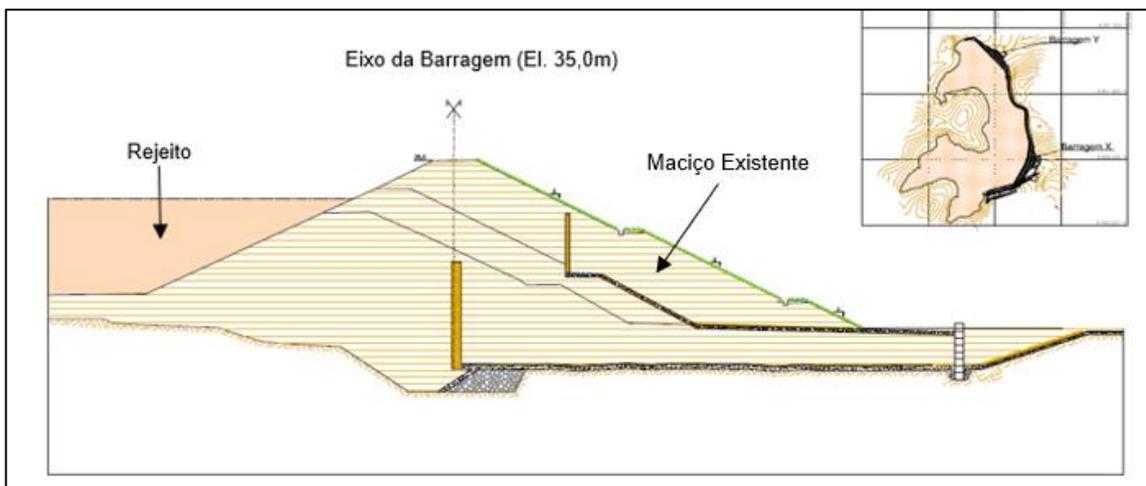
Salienta-se que o volume a ser bombeado, o tempo necessário e a vazão necessária para o bombeamento, atualmente, é desconhecida e não faz parte do escopo desse trabalho a avaliação desses itens.

O sistema de bombeamento, responsável, pelo bombeamento do reservatório, deverá operar previamente ao início das obras. Toda água bombeada do reservatório deverá ser tratada antes de ser lançada ao meio ambiente. Tal medida é necessária

devido à presença de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e Sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) utilizados para solubilização do ferro proveniente da etapa de centrifugação no beneficiamento do minério. Portanto, as diretrizes associadas ao direcionamento e tratamento da água não são escopo desse trabalho e ficam como recomendação para estudos futuros, visto que essa etapa envolve estudos químicos para permitir a escolha da metodologia adequada ao tratamento.



**Figura 14 - Configuração atual do reservatório das barragens. Fonte: Elaborado pela própria autora.**



**Figura 15 - Bombeamento do reservatório das barragens. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

### 5.1.1.2 Etapa 2: Dispositivos de drenagem superficial

O sistema de drenagem superficial dos barramentos tem a finalidade de coletar as águas provenientes da precipitação direta, incidente sobre a área do reservatório e áreas de contribuição adjacentes e conduzi-las, de forma ordenada para a porção a jusante do barramento até alcançar os talwegues naturais. Inicialmente deve ser prevista a adequação dos dispositivos de drenagem superficial existentes e/ou a instalação de novos dispositivos para as obras de descaracterização. Caso, seja adotada a opção de adequação dos taludes do barramento (1V:3H) é necessário que seja executada adequação dos dispositivos de drenagem superficiais em função da nova configuração geométrica do maciço.

A drenagem superficial da etapa de descaracterização dos barramentos proposta poderá ser composta por:

- Canaletas nas bermas, que funcionarão como canais instalados nos taludes de tal forma a conduzir os escoamentos provenientes da precipitação direta no maciço até as descidas de água e/ou canais periféricos;
- Canais periféricos, cuja finalidade principal é captar toda a contribuição advinda das áreas adjacentes (encostas ao entorno) e receber as águas das drenagens das bermas;
- Descidas de água responsáveis por captar a contribuição proveniente das canaletas de bermas e conduzi-las até os canais periféricos; e
- Canal de cintura, canal comumente implantado no contorno do reservatório com o objetivo de coletar o aporte de águas das áreas adjacentes e evitar o acúmulo de água no reservatório. Esse canal poderá ser composto com enrocamento e/ou concreto.

Com a finalidade de coletar as águas dos trechos finais dos canais, recomenda-se que seja projetada uma bacia de dissipação. As bacias de dissipação são estruturas que tem o objetivo de adequar a dissipação de parte da energia dos trechos

rápidos para que o fluxo seja devolvido aos talwegues naturais, situados a jusante da estrutura, com um menor impacto.

Para a condição de precipitação direta sobre a área do reservatório, sugere-se a implantação de um canal central que promoverá o direcionamento adequado das vazões de escoamento superficial proveniente dos eventos de chuvas, permitindo a reabilitação da área de forma a ser utilizável para outros fins após a sua implantação. Como sugestão, esse canal central, pode desembocar, com o canal rápido do extravasor existente das Barragens X e Y, se conectando mais a jusante com o canal final de descaracterização que direcionará todo o fluxo de água para os talwegues naturais.

É importante destacar que, todo o sistema de drenagem superficial considerado na etapa de descaracterização das barragens deverá ser dimensionado hidraulicamente, a fim de atender os requisitos normativos de diagramação adequada desses dispositivos. De acordo com as diretrizes preconizadas na norma NBR 13.029 (ABNT, 2017), é recomendado a utilização dos seguintes tempos de retorno -TR - (tempo médio em que determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez) para o dimensionamento dessas estruturas hidráulicas:

- 100 anos para dispositivos de pequena vazão, como canaletas de bermas e de acessos;
- 500 anos para dispositivos de grandes vazões, como descidas de água e canais periféricos.

Destaca-se que, para as estruturas de drenagem superficial é importante avaliar soluções técnicas que requeiram menor manutenção e supervisão operacional após a descaracterização das estruturas. Sendo assim, é fundamental priorizar o emprego de materiais naturais (solo e rocha) e evitar o uso de estruturas em concreto e outros materiais que necessitem de manutenção e que atendam às exigências mínimas do dimensionamento hidráulico dos dispositivos de drenagem superficial.

### 5.1.1.3 Etapa 3: Regularização topográfica do reservatório

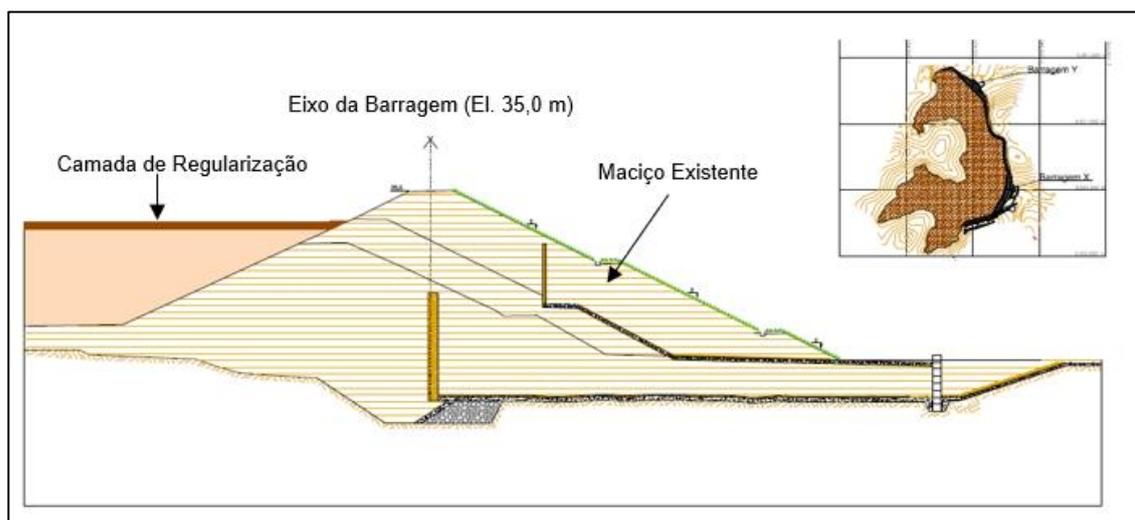
A regularização topográfica do reservatório tem como objetivo deixar a superfície do reservatório plana em uma determinada cota, de tal forma que não haja acumulação de água na região do reservatório. Usualmente a regularização do reservatório é feita por meio de aterro com declividade em direção às drenagens superficiais (Figura 16). Esta inclinação é definida levando em consideração a velocidade da água sobre a superfície para que não ocorra erosão superficiais.

No caso das estruturas em estudo, a regularização deverá ser feita após a conclusão da etapa de bombeado do lago do reservatório.

Para o aterro de regularização do reservatório é indicado que seja feita avaliação da disponibilidade de áreas de empréstimo nas dependências da mina, de forma a economizar tempo e recursos financeiros.

Ressalta-se que previamente a execução do aterro deve-se estimar o recalque provocado pelo adensamento do rejeito ainda inconsolidado presente no reservatório, pois caso este ocorra, pode acarretar o acúmulo de água na região descaracterizada do reservatório. Sendo assim, é necessário estudar medidas de aceleração do adensamento ou executar o aterro em uma tal cota que após a finalização do adensamento a superfície fique na cota desejada.

Para a execução do aterro sobre o rejeito muito mole pode se empregar a técnica de aterros de conquista ou agulhamento com blocos de rocha.

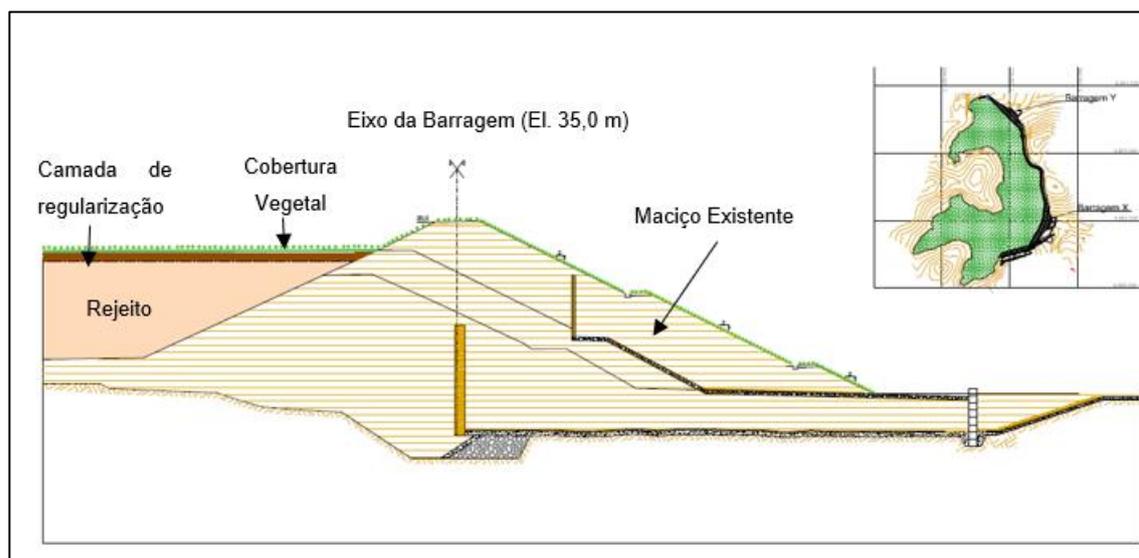


**Figura 16 - Regularização do reservatório. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.1.4 Etapa 4: Cobertura do reservatório e revegetação

Após a conclusão do aterro do reservatório, todas as superfícies expostas (aterro e taludes) deverão ser revegetadas, a fim de proporcionar uma melhor integração da área ao contexto paisagístico local e mitigar a ocorrência de erosões e carreamento de materiais (solo).

Para evitar ou reduzir a infiltração de água na região do reservatório e favorecer o crescimento da vegetação, recomenda-se a aplicação de uma camada de baixa espessura (usualmente inferior a 1 m) de selo com material de características argilosa, seguido da aplicação de biomanta e revegetação, visando proteger o material que a vegetação se estabeleça. Na Figura 17 é apresentada a configuração final prevista para as estruturas após finalizadas a sua descaracterização.



**Figura 17 - Condição final da barragem após a descaracterização. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.1.5 Etapa 5: Monitoramento e manutenção

O programa de manutenção e monitoramento pós descaracterização das barragens deverá ser realizado por um período mínimo de dois anos. As atividades de monitoramento contemplam a realização de inspeções visuais, manutenção das estruturas de drenagem, manutenção das áreas revegetadas, de forma a propiciar o desenvolvimento adequado do sistema de cobertura vegetal. Para o monitoramento da qualidade da água recomenda-se que seja composto por medidores de turbidez, medidores de vazões, inspeções para ensaios de controle de qualidade químico das águas. A instalação do medidor de turbidez e vazão é recomendado que seja na saída do canal principal de drenagem superficial, que permitirá verificar as condições de turbidez e geração de sedimentos do talvegue após a descaracterização da estrutura. Com relação à periodicidade das leituras dos instrumentos, ficará a critério da mineradora especificar essa rotina. Entretanto, é aconselhável que as leituras dos instrumentos ocorram com frequência mensal e posteriores a períodos chuvosos. Caso seja observado que, após o desenvolvimento da vegetação e manutenção das leituras do medidor de vazão, para condições semelhantes, sugere-se a redução da frequência de leituras.

A estrutura remanescente após o processo de descaracterização apresentará fatores de segurança superiores aos mínimos especificados pela legislação. Contudo, caso se identifique algum problema durante a realização das inspeções visuais, ações corretivas deverão ser implementadas.

### **5.1.2 Alternativa 2: intervenção na estrutura e no reservatório com desmonte total da barragem**

A alternativa 2 consiste no esgotamento do reservatório, remoção total da estrutura, maciço das barragens X e Y e reservatório, além da adequação dos taludes remanescentes após a descaracterização e drenagem superficial do vale onde a estrutura estava inserida, de forma a garantir o escoamento das áreas de contribuições à montante.

Também, deverá ser executado plantio de vegetação com árvores nativas para propiciar a sucessão ecológica da área.

As atividades a serem executadas em cada etapa estão descritas a seguir:

#### **5.1.2.1 Etapa 1: esvaziamento do reservatório**

O rebaixamento do nível d'água do reservatório poderá ser feito por bombeamento ou por meio de abertura de brecha no maciço. No caso de esgotamento por meio de bombas, deve-se desenvolver previamente o dimensionamento do sistema de bombeamento e avaliar os pontos de coleta e descarga do bombeamento. Caso necessário deve-se prever estruturas para receber e dissipar a energia da água bombeada. Caso a estrutura já contemple um sistema de bombeamento, este poderá ser utilizado durante a etapa de descaracterização, desde que atenda as vazões mínimas exigidas no projeto.

Salienta-se que o volume a ser bombeado, o tempo necessário e a vazão necessária para o bombeamento, atualmente, é desconhecida e não faz parte do escopo desse trabalho. Nas Figura 18 e Figura 19 são apresentadas a configuração atual do reservatório e após o seu bombeamento, respectivamente. Ressalta-se que a condição apresentada na Figura 19 está relacionada a opção do esgotamento do

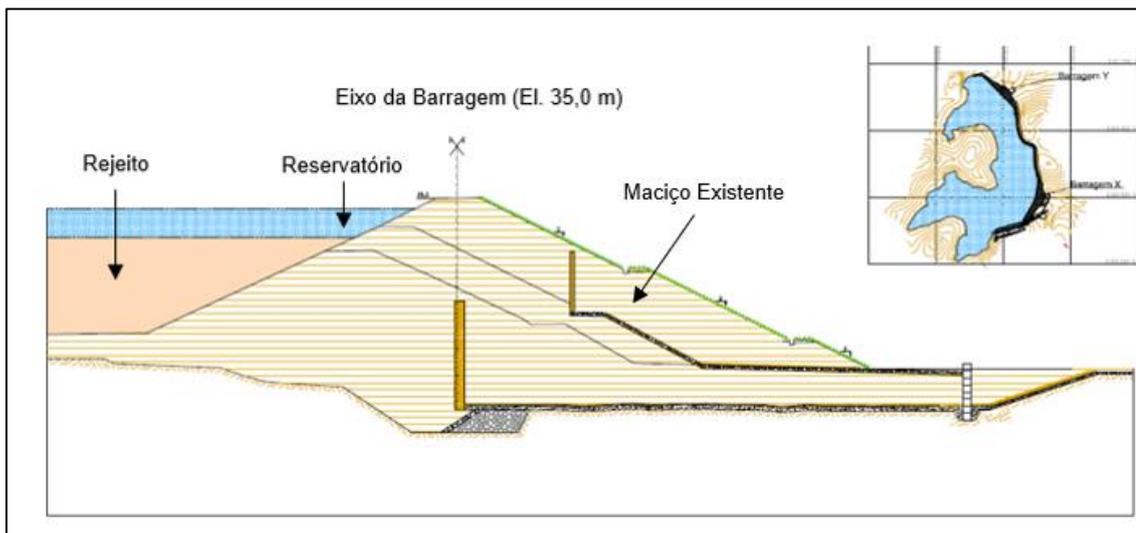
reservatório com a utilização de bombas. Entretanto métodos alternativos poder ser utilizados, conforme descrito a seguir.

Uma alternativa é a abertura da brecha no maciço, sendo indicada para situações em que é possível esgotar o volume de água armazenada no reservatório com uma escavação localizada (brecha) no maciço do barramento.

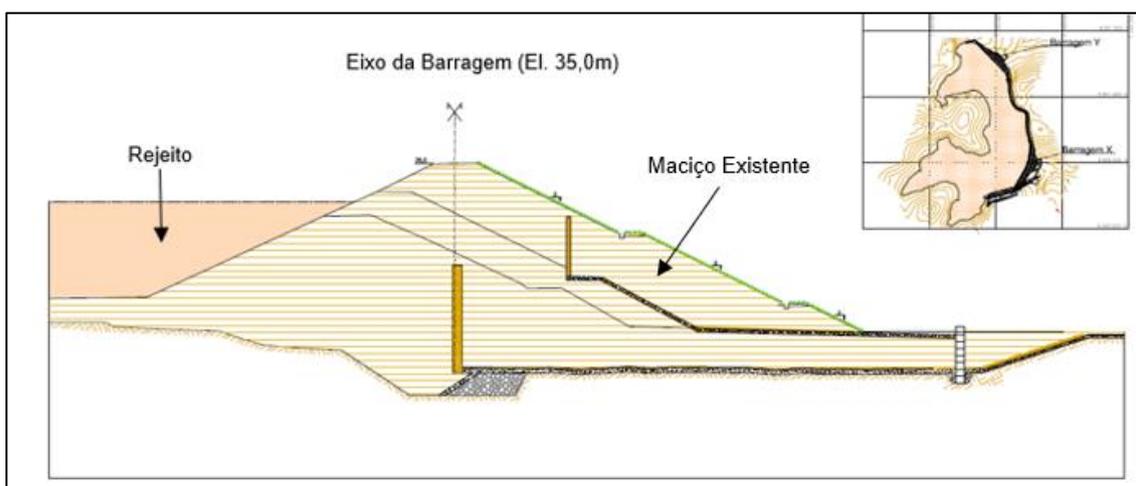
Caso seja identificada a necessidade da adoção da solução do esgotamento do reservatório através da abertura da brecha, é recomendado que a execução da brecha seja realizada de maneira cuidadosa, a fim de evitar rupturas, que poderiam ocasionar em corridas de lama do reservatório. Além disso, deve-se prever ou adequar canais de drenagem para escoar a água sem que haja erosão à jusante da brecha. Estes canais podem ser feitos com enrocamentos, gabiões, geomembranas ou mesmo estruturas de concreto. Em alguns casos pode-se aproveitar estruturas existentes, como, por exemplo, extravasores e canais periféricos.

A mineradora, em conjunto com a projetista, deverá definir em estudos prévios qual cota deverá ser posicionada a base do canal da brecha, avaliando a magnitude do volume de água armazenada no reservatório, bem como a maneira que será esgotado, a cota de assoreamento e o volume de material depositado nas estruturas. Além disso, o esgotamento do reservatório poderá ser feito com o auxílio dos sistemas de bombas existentes e/ou o sistema extravasor das estruturas.

Toda água bombeada ou que sai pela brecha do reservatório deverá ser tratada antes de ser lançada ao meio ambiente. Tal medida é necessária devido à presença de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e Sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) utilizados para solubilização do ferro proveniente da etapa de centrifugação no beneficiamento do minério. As diretrizes associadas ao direcionamento e tratamento da água não são escopo desse trabalho e ficam como recomendação para estudos futuros, visto que essa etapa envolve estudos químicos para permitir a escolha da metodologia adequada ao tratamento.



**Figura 18 - Configuração atual do barramento. Fonte: Elaborado pela própria autora.**



**Figura 19 - Esgotamento do reservatório dos barramentos. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.2.2 Etapa 2: Desativação e remoção das estruturas utilizadas na operação

As ações de desmontagem e demolição do sistema de disposição de rejeitos e drenagem superficial inclui a triagem e preparação dos materiais resultantes para o transporte e destinação final em locais adequados. Recomenda-se que sejam

utilizadas áreas próximas para as atividades de triagem dos materiais resultantes das desmontagens e demolições, propiciando controles ambientais.

As estruturas em concreto de drenagem superficial, tais como canaletas de bermas, canais periféricos, descidas em degraus e canais de acesso, tendem a ser demolidas à medida que as etapas de remoção do maciço avancem. Tal medida é fundamental para assegurar a drenagem superficial dos taludes remanescentes do maciço, enquanto as atividades de descaracterização progredirem, até ser finalizada a remoção total dos maciços.

É recomendando que o sistema de bombeamento seja mantido mesmo após o esgotamento do lago remanescente. Tal medida torna-se fundamental para bombear eventuais aporte de águas no reservatório, como, por exemplo, proveniente da precipitação direta na área, e direcioná-las para local apropriado. Concomitantemente a essa operação, é sugerido que a remoção do sistema extravasor ocorra parcialmente à medida que as obras de remoção dos maciços avancem, permitindo que, caso seja necessário bombear algum fluxo de água durante a execução das obras, esses sejam direcionados e lançados no sistema extravasor existente. Essa condição permite que durante a operação, caso haja a ocorrência de eventos externos, a segurança hidráulica da estrutura durante a etapa de descaracterização seja mantida.

#### 5.1.2.3 Etapa 3: Escavação do reservatório e remoção do maciço

Antes de iniciar a remoção do reservatório e maciço é fundamental ser prevista a implantação de acessos operacionais com capacidade para suportar o fluxo de veículos necessários para as obras de descaracterização. Esses acessos devem possuir certa declividade e conter dispositivos de drenagem superficial (canaletas de acesso), para coletar o escoamento oriundos dos acessos. O dimensionamento dos acessos deve-se considerar as diretrizes estabelecidas por normativos vigentes. Comumente, mais restritivas do que as diretrizes normativas para projeto de estradas. Todavia, usualmente é recomendado que os acessos operacionais possuam largura total da via em torno de 8 m. Caso, a área para a implantação dos acessos operacional não possua largura suficiente, uma medida alternativa, é a implantação de acessos

com larguras de 5 m e a construção de baias de manobras para os veículos necessários nas obras de descaracterização.

Essa etapa da descaracterização das barragens poderá ser executada em fases distintas, composta pela escavação do reservatório e escavação do maciço (Figura 20 e Figura 21). Na fase inicial de escavação do reservatório, sugere-se a divisão das etapas de remoção do rejeito, com volumes de escavação a serem definidos pela projetista. Além disso, a escavação deverá ser feita de montante para jusante do reservatório, sempre que possível, mantendo uma rampa com certa declividade entre a área em escavação e a área ainda não escavada.

A fase final, que contempla a escavação do maciço tenderá a ser executada, removendo o rejeito depositado até o contato com a topografia primitiva, ou seja, até alcançar o terreno natural. Além disso, o processo de escavação dos maciços das barragens de rejeitos X e Y poderá ser executado garantindo as elevações mínima do maciço estabelecidas pela mineradora. À medida que a escavação avance, o acesso a escavação deve ser implantado. É recomendado que nessa etapa de escavação do reservatório o atual sistema extravasor das barragens permaneça em operação, a fim de garantir a segurança hidráulica das barragens de rejeitos X e Y durante possível ocorrência de eventos de precipitação extrema. Além disso, o sistema de bombeamento existente na estrutura poderá ser utilizado a fim de se evitar o acúmulo de água na área em processo de escavação.

Frente às características do rejeito de caulim, com baixa capacidade suporte, recomenda-se que na etapa de escavação sejam empregadas escavadeiras anfíbias. Outra técnica recomendada para essa fase, é a construção de aterros de conquistas ou a técnica do agulhamento, que consiste no lançamento e penetração induzida de blocos de rocha sobre o solo muito mole para aumentar a sua capacidade suporte.

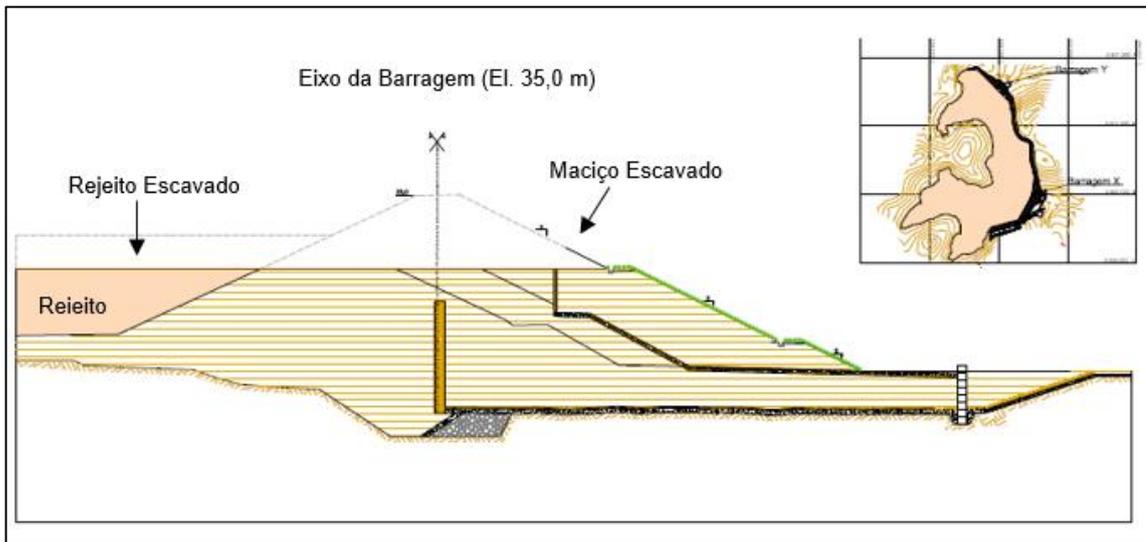
A remoção do maciço também poderá ser dividida em etapas, com a taxa de remoção volumétrica de cada camada a ser estabelecida pela mineradora em estudo, até finalizada a remoção total do maciço. Recomenda-se que, durante a execução dessa fase, seja realizada a demolição parcial do atual sistema extravasor das barragens X e Y, sendo ainda necessária a manutenção do sistema de bombeamento

para garantia da segurança hidráulica nessa fase, em caso de ocorrência de eventos de precipitação extrema.

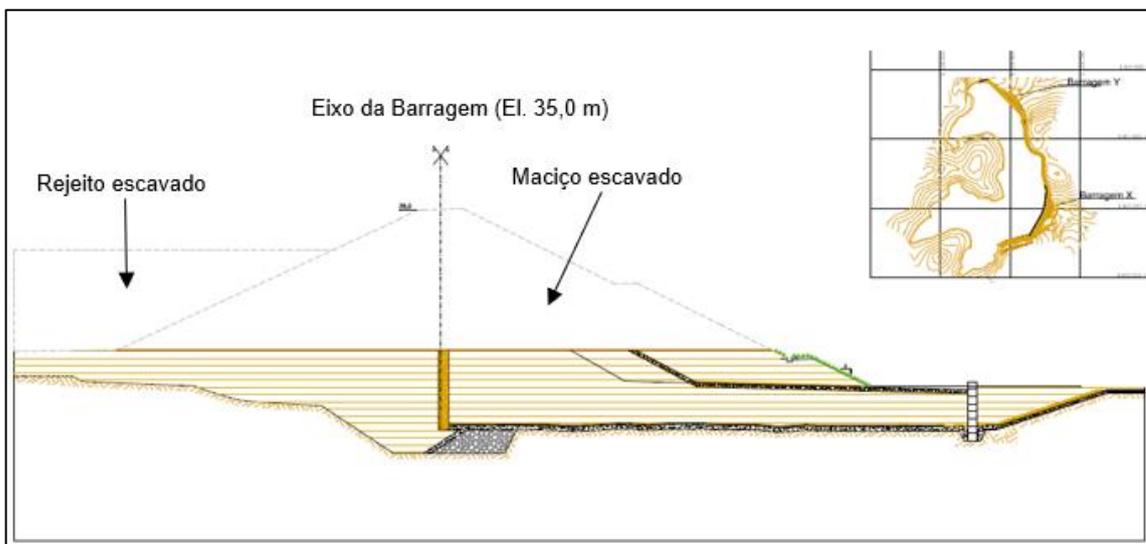
Após a etapa de remoção do maciço, é fundamental que sejam implantados os canais de drenagem superficial na área, onde encontra-se o reservatório das barragens X e Y, visando direcionar o escoamento superficial captado nessa área.

Por fim, após a remoção total do reservatório e dos maciços das barragens X e Y, os taludes remanescentes das áreas escavadas deverão ser recuperados, adotando técnicas de revestimento vegetal adequadas à área (hidrossemeadura e reflorestamento), de tal forma que a área tenda a se aproximar das condições naturais anteriores à implantação dos barramentos. Em relação a inclinação desses taludes remanescentes é recomendado que possuam inclinação suficientes que assegurem sua estabilidade física, conforme apresentado nos estudos de MAO e KIM (2011).

Finalizada a remoção total do rejeito do reservatório e maciços das barragens é necessário que a mineradora possua áreas adicionais para a ser realizada a disposição adequada desses materiais. Todavia, é importante destacar que não é escopo desse trabalho a definição de locais adequados para a disposição final desses materiais removidos do reservatório e maciços e nem a definição de métodos alternativos para reutilização do rejeito.



**Figura 20 - Escavação do reservatório e maciço - Etapa inicial. Fonte: Elaborado pela própria autora.**



**Figura 21 - Escavação do reservatório e maciço - Etapa final. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.2.4 Etapa 4: Implantação do sistema de drenagem superficial

Os dispositivos de drenagem superficial têm a finalidade de captar e conduzir os fluxos da precipitação de forma segura, a fim de minimizar os processos erosivos e garantir a integridade dos terrenos, preservando suas características geomorfológicas originais. Após a descaracterização das estruturas, novos dispositivos de drenagem superficial deverão ser implantados para disciplinar o escoamento superficial, sendo composto por:

- Canaletas nas bermas, que funcionarão como canais instalados nos taludes de tal forma a conduzir os escoamentos provenientes da precipitação direta no maciço até as descidas de água e/ou canais periféricos;
- Descidas de água responsáveis por captar a contribuição proveniente das canaletas de bermas e conduzi-las até os canais periféricos
- Canais de drenagem centrais: também é recomendado que sejam revestidos em enrocamento e tem a função de receber o escoamento provenientes das descidas de água e áreas adjacentes e conduzi-las para os talvegues naturais.

É importante destacar que, todo o sistema de drenagem superficial considerado na etapa de descaracterização das barragens deverá ser dimensionado hidraulicamente, a fim de definir de atender os requisitos normativos de diagramação desses dispositivos. De acordo com as diretrizes preconizadas na norma NBR 13.029 (ABNT, 2017), é recomendado a utilização dos seguintes tempos de retorno (TR) (tempo médio em que determinado evento é igualado ou superado pelo menos uma vez) para o dimensionamento dessas estruturas hidráulicas:

- 100 anos para dispositivos de pequena vazão, como canaletas de bermas e de acessos;
- 500 anos para dispositivos de grandes vazões, como descidas de água e canais periféricos.

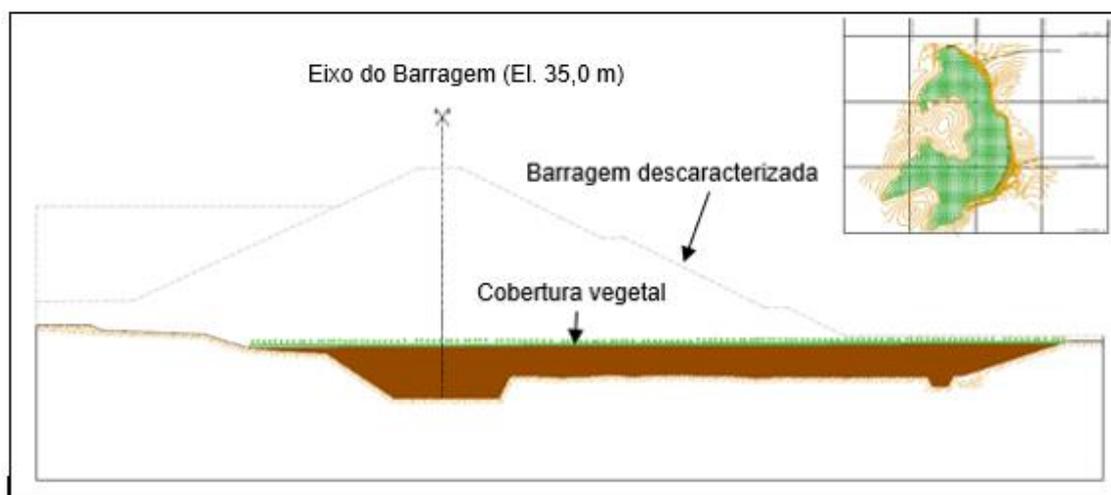
Destaca-se que, para as estruturas de drenagem superficial é importante avaliar soluções técnicas que requeiram menor manutenção e supervisão operacional após a descaracterização das estruturas. Sendo assim, é fundamental priorizar o emprego de materiais naturais (solo e rocha) e evitar o uso de estruturas em concreto e outros materiais que necessitem de manutenção.

#### 5.1.2.5 Etapa 5: Recuperação Ambiental

Toda área descaracterizada com solo exposto deverá ser revegetada, visando minimizar eventuais processos erosivos e a geração de sedimentos, buscando reintegrar a mesma ao meio ambiente. A recuperação ambiental das áreas poderá empregar as seguintes técnicas:

- Hidrossemeadura, podendo ser aplicado em áreas de declividade, normalmente nos taludes de corte das regiões remanescentes; e
- Reflorestamento, utilizando o plantio manual de espécies predominantemente nativas, para as áreas em conformação final.

A recuperação ambiental de toda a área descaracterizada é fundamental para assegurar o estabelecimento da vegetação e sucessão ecológica do ecossistema. A Figura 22 apresenta as condições da área após a etapa final de descaracterização da barragem de rejeitos. Nesta etapa, também é recomendado que a camada de regularização do terreno apresente uma declividade mínima de 1% propiciando o escoamento da água na região e evitando o empoçamento do fluxo que pode favorecer o desenvolvimento de processos erosivos.



**Figura 22 - Barragem descaracterizada – Condição Final. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.2.6 Etapa 6: Monitoramento e manutenção

Assim como descrito para a Alternativa 1, o programa de manutenção e monitoramento pós descaracterização das barragens deverá ser realizado por um período mínimo de dois anos. As atividades de monitoramento contemplam a realização de inspeções visuais, manutenção das estruturas de drenagem superficial e das áreas revegetadas, de tal forma a propiciar o desenvolvimento adequado do sistema de cobertura vegetal. O monitoramento da qualidade da água poderá ser composto por medidores de turbidez, medidores de vazões e inspeções para ensaios de controle de qualidade química das águas. A instalação do medidor de turbidez e vazão é recomendado que seja na saída do canal principal de drenagem superficial, que permitirá verificar as condições de turbidez e geração de sedimentos do talvegue após a descaracterização dos barramentos. Com relação à periodicidade das leituras dos instrumentos, ficará a critério da mineradora especificar essa rotina. Entretanto, é aconselhável que as leituras dos instrumentos ocorram com frequência mensal e posteriores a períodos chuvosos. Caso seja observado que, após o desenvolvimento da vegetação e leituras constantes do medidor de vazão, para condições semelhantes, sugere-se a redução da frequência de leituras da instrumentação.

### **5.1.3 Alternativa 3: intervenção na estrutura e no reservatório com desmonte parcial da barragem**

A alternativa 3 consiste na remoção parcial do maciço das barragens de rejeitos X e Y, esgotamento do reservatório, adequação da drenagem superficial e recuperação ambiental da área com espécies nativas. As etapas a seguir descrevem as atividades contempladas em cada etapa.

As atividades a serem executadas em cada etapa estão descritas a seguir:

#### **5.1.3.1 Etapa 1: Esvaziamento do reservatório**

O rebaixamento do nível d'água do reservatório poderá ser feito por bombeamento ou por meio de abertura de brecha no maciço. No caso de esgotamento por meio de bombas, deve-se desenvolver previamente o dimensionamento do sistema de bombeamento e avaliar os pontos de coleta e descarga do bombeamento. Caso necessário deve-se prever estruturas para receber e dissipar a energia da água bombeada. Caso a estrutura já contemple um sistema de bombeamento, este poderá ser utilizado durante a etapa de descaracterização, desde que atenda as vazões mínimas exigidas no projeto.

Salienta-se que o volume a ser bombeado, o tempo necessário e a vazão necessária para o bombeamento, atualmente, é desconhecida e não faz parte do escopo desse trabalho a avaliação desses itens. Nas Figura 23 e Figura 24 está esquematizado a condição do reservatório atual com crista na El. 35,0 m e a etapa de bombeamento do lago do reservatório dos barramentos, respectivamente.

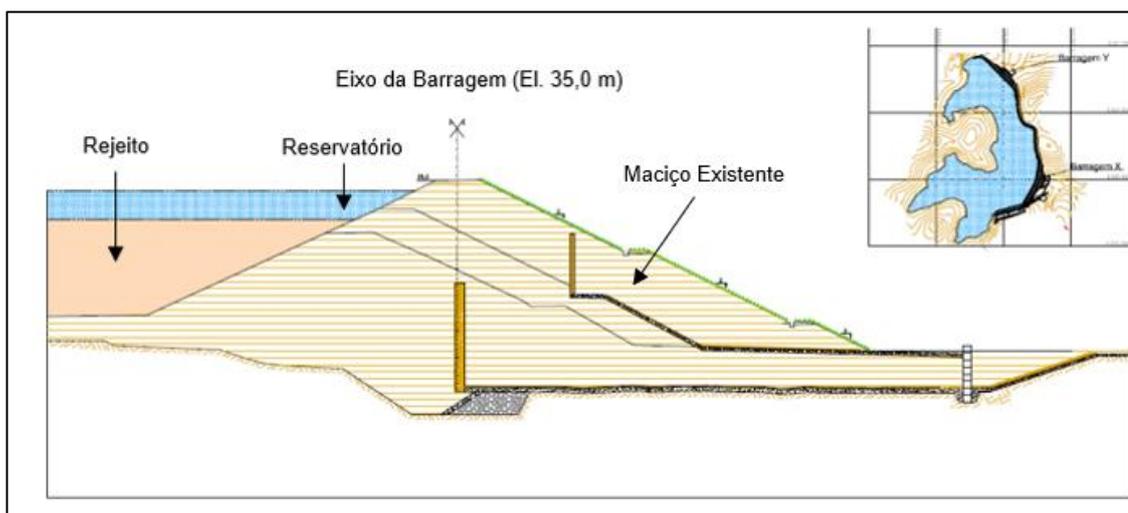
Uma alternativa é a abertura da brecha no maciço, sendo indicada para situações em que é possível esgotar o volume de água armazenada no reservatório com uma escavação localizada (brecha) no maciço do barramento.

Caso seja identificada a necessidade da adoção da solução do esgotamento do reservatório através da abertura da brecha, é recomendado que a execução da brecha seja realizada de maneira cuidadosa, a fim de evitar potencial ruptura catastrófica acompanhada de corrida de lama do reservatório. Além disso, deve-se prever ou

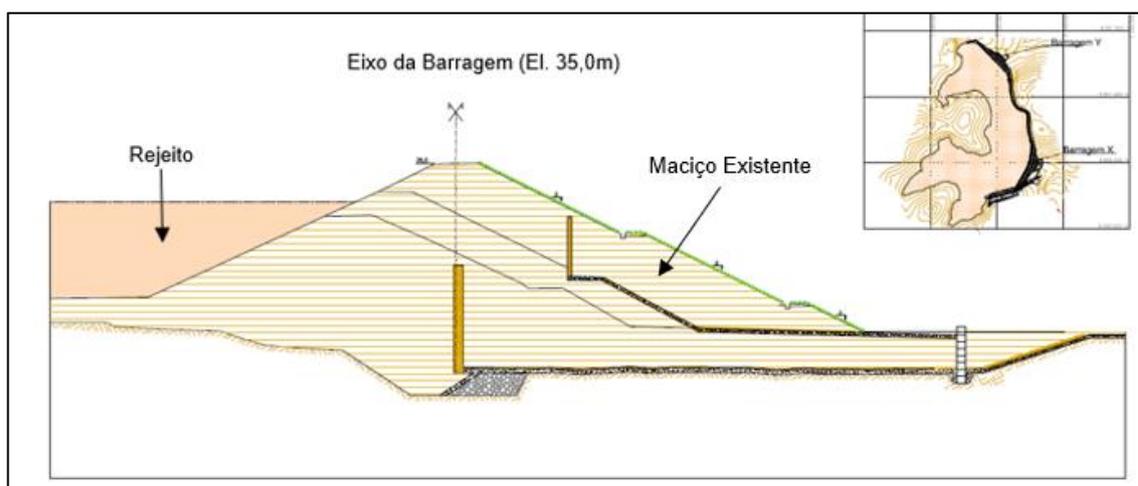
adequar canais de drenagem para escoar a água sem que haja erosão à jusante da brecha. Estes canais podem ser feitos com enrocamentos, gabiões, geomembranas ou mesmo estruturas de concreto. Em alguns casos pode-se aproveitar estruturas existentes, como por exemplo, extravasores e canais periféricos.

A mineradora deverá definir em estudos prévios qual cota deverá ser posicionada a base do canal da brecha, avaliando a magnitude do volume de água armazenada no reservatório, bem como a maneira que será esgotado, a cota de assoreamento e o volume de material depositado nas estruturas. Além disso, o esgotamento do reservatório poderá ser feito com o auxílio dos sistemas de bombas existentes e/ou o sistema extravasor das estruturas.

Toda água bombeada ou que sai pela brecha do reservatório deverá ser tratada antes de ser lançada ao meio ambiente. Tal medida é necessária devido à presença de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e Sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) utilizados para solubilização do ferro proveniente da etapa de centrifugação no beneficiamento do minério. Portanto, as diretrizes associadas ao direcionamento e tratamento da água não são escopo desse trabalho e ficam como recomendação para estudos futuros, visto que essa etapa envolve estudos químicos para permitir a escolha da metodologia adequada ao tratamento.



**Figura 23 - Condição atual do reservatório na El. 35,0 m. Fonte: Elaborado pela própria autora.**



**Figura 24 - Esgotamento do reservatório. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.3.2 Etapa 2: Remoção parcial do reservatório e maciço das barragens

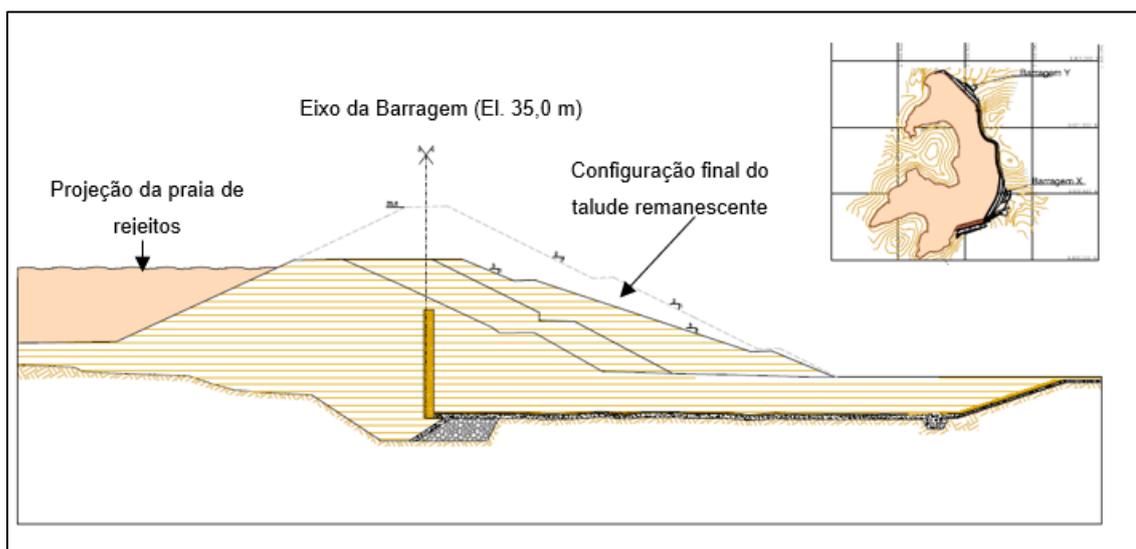
Antes de iniciar a remoção do reservatório e maciço é fundamental ser previsto a implantação de acessos operacionais com capacidade para suportar o fluxo de veículos necessários para as obras de descaracterização. Além disso, esses acessos devem conter dispositivos de drenagem superficial (canaletas de acesso), para coletar

o escoamento oriundos dos acessos. O dimensionamento dos acessos deve-se considerar as diretrizes internas adotadas pela mineradora, todavia, usualmente é recomendado que os acessos operacionais possuam largura total da via em torno de 8 m. Caso, a área para a implantação dos acessos operacional não possua largura suficiente, uma medida alternativa, é a implantação de acessos com larguras de 5 m e a construção de baias de manobras para os veículos necessários nas obras de descaracterização.

A escavação do reservatório deverá ser feita após o esgotamento do reservatório, seja por bombeamento ou por abertura de brecha. O reservatório deverá ser escavado até a cota prevista em projeto, conforme apresentado esquematicamente na Figura 25. Frente às características do rejeito de caulim, com baixa capacidade suporte, recomenda-se que na etapa de escavação seja empregadas escavadeiras anfíbias. Outra técnica recomendada para essa fase, é a construção de aterros de conquistas ou a técnica do agulhamento, que consiste no lançamento de blocos de rocha sobre o solo muito mole para aumentar a sua capacidade suporte.

Após a escavação do reservatório deverá se iniciar a remoção parcial do maciço das barragens, até uma cota a ser definida pela projetista. Em alguns casos, opta-se pela elevação do maciço inicial. Além disso, a escavação deverá ser feita de montante para jusante do reservatório. Esse material escavado poderá ser utilizado para o recobrimento da superfície do reservatório, propiciando a regularização topográfica da área

Durante toda essa etapa é recomendado a manutenção do sistema de bombeado para garantir a segurança hidráulica frente à possível ocorrência de eventos de precipitação extrema, devendo essa removida após finalizada a escavação do maciço.



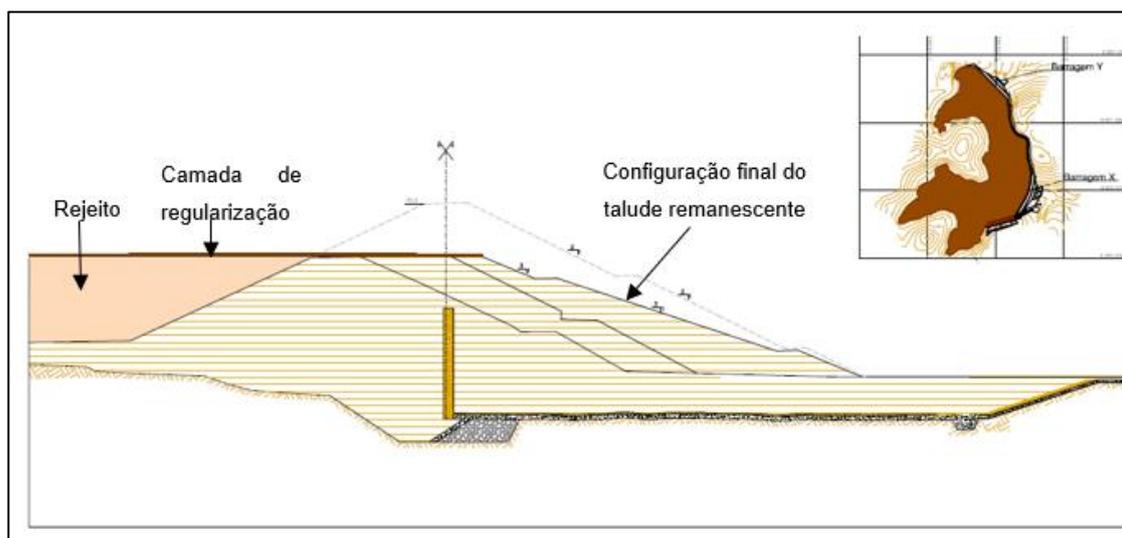
**Figura 25 - Etapa inicial de escavação do reservatório e remoção do maciço.**

**Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.3.3 Etapa 3: Regularização do reservatório

Após o deságue do reservatório, os rejeitos nele contidos serão confinados mediante aterro de conquista ou a técnica de agulhamento a ser realizado com o próprio material do maciço escavado. Porém, o aterro será lançado sob sedimento de consistência muito mole, podendo haver dificuldades durante a etapa de execução face à baixa capacidade de suporte deste material. Neste caso, o procedimento mais usual consiste em executar aterros de conquista (ou de ponta). Entretanto, em situações de maior dificuldade de execução do aterro de conquista, pode ser necessário executar agulhamento (lançamento de blocos de rocha sobre o solo muito mole para aumentar a capacidade de suporte), previamente a execução do aterro.

A regularização topográfica deve possuir uma inclinação longitudinal para proporcionar o escoamento superficial para o canal central do reservatório.



**Figura 26 - Regularização do reservatório. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.3.4 Etapa 4: Dispositivos de drenagem superficial

O sistema de drenagem superficial dos barramentos tem a finalidade de coletar as águas provenientes da precipitação direta, incidente sobre a área do reservatório e áreas de contribuição adjacentes e conduzi-las, de forma ordenada para a porção a jusante do barramento até alcançar os talvegues naturais. Inicialmente deve ser previsto a adequação dos dispositivos de drenagem superficial existentes e/ou a instalação de novos dispositivos para as obras de descaracterização. Após a remoção do maciço, caso seja necessário a adequação dos taludes do barramento remanescentes (1V:3H) é necessário que seja realizada a adequação dos dispositivos de drenagem superficiais em função da nova configuração geométrica do maciço.

A drenagem superficial da etapa de descaracterização dos barramentos proposta poderá ser composta por:

- Canaletas nas bermas, que funcionarão como canais instalados nos taludes de tal forma a conduzir os escoamentos provenientes da precipitação direta no maciço até as descidas de água e/ou canais periféricos;

- Canais periféricos, cuja finalidade principal é captar toda a contribuição advinda das áreas adjacentes (encostas ao entorno) e receber as águas das drenagens das bermas;
- Descidas de água responsáveis por captar a contribuição proveniente das canaletas de bermas e conduzi-las até os canais periféricos; e
- Canal de cintura, podendo ser implantado no contorno do reservatório com o objetivo de coletar o aporte de águas das áreas adjacentes e evitar o acúmulo de água no reservatório. Esse canal poderá ser composto com enrocamento e/ou concreto. No cenário de descaracterização, visando à execução de atividades que demandem menor manutenção ao longo do prazo, recomenda-se a utilização de enrocamento, entretanto, fica a critério da mineradora adotar o tipo de material mais adequado para suas obras de descaracterização.

Recomenda-se que as águas dos trechos finais dos canais sejam direcionadas a uma bacia de dissipação. As bacias de dissipação são estruturas que tem o objetivo de adequar a dissipação de parte da energia dos trechos rápidos para que o fluxo seja devolvido aos talwegues naturais, situados a jusante da estrutura, com um menor impacto.

Conforme já mencionado para as alternativas de descaracterização anteriores, na condição de precipitação direta sobre a área do reservatório. Esse canal promoverá o direcionamento adequado das vazões de escoamento superficial proveniente dos eventos de chuvas, permitindo a reabilitação da área de forma a ser utilizável para outros fins após a sua implantação. Como sugestão, esse canal central, pode desembocar, no canal rápido do extravasor existente das barragens X e Y, se conectando mais a jusante com o canal final de descaracterização que direcionará todo o fluxo de água para os talwegues naturais situados a jusante.

É importante destacar que, todo o sistema de drenagem superficial considerado na etapa de descaracterização das barragens deverá ser dimensionado hidraulicamente, a fim de definir a diagramação adequada desses dispositivos. De acordo com as diretrizes preconizadas na norma NBR 13.029 (ABNT, 2017), é

recomendado a utilização dos seguintes tempos de retorno para o dimensionamento dessas estruturas hidráulicas:

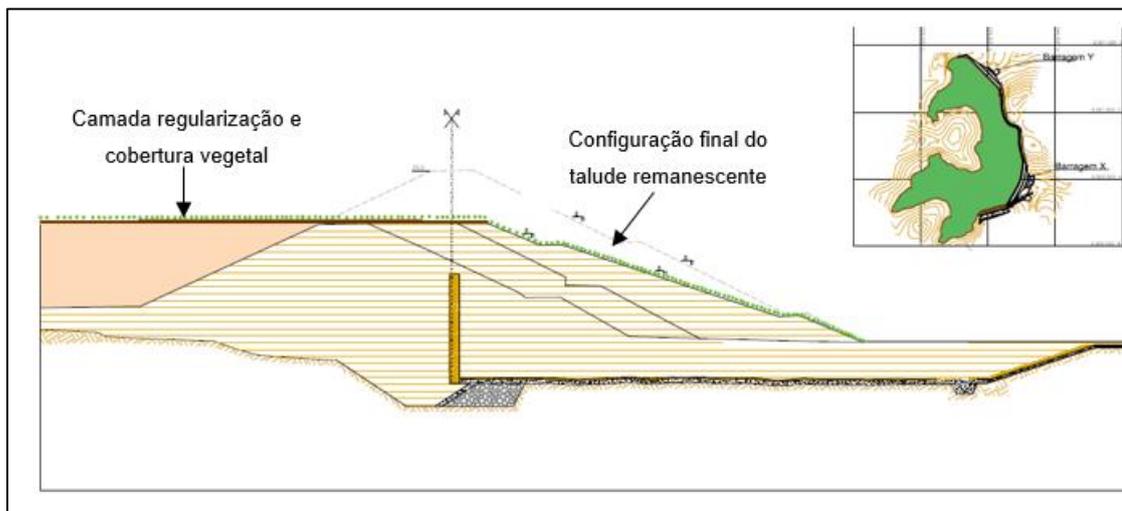
- 100 anos para dispositivos de pequena vazão, como canaletas de bermas e de acessos;
- 500 anos para dispositivos de grandes vazões, como descidas de água e canais periféricos.

Destaca-se que, para as estruturas de drenagem superficial é importante avaliar soluções técnicas que requeiram menor manutenção e supervisão operacional após a descaracterização das estruturas. Sendo assim, é fundamental priorizar o emprego de materiais naturais (solo e rocha) e evitar o uso de estruturas em concreto e outros materiais que necessitem de manutenção.

#### 5.1.3.5 Etapa 5: Recuperação ambiental

O objetivo principal da proteção superficial é criar uma barreira mecânica e natural para prevenir eventuais processos erosivos, assegurando a água proveniente das precipitações pluviométricas escoar sobre a superfície da estrutura de modo ordenado por longo período. Toda a superfície aterrada, além dos taludes naturais expostos durante a escavação serão revegetadas.

Para evitar ou reduzir a infiltração de água na região do reservatório e favorecer o crescimento da vegetação, recomenda-se a aplicação de uma camada de baixa espessura (usualmente inferior a 1 m) de selo com material de características argilosa, seguido da aplicação de biomanta e revegetação, visando proteger o material que a vegetação se estabeleça (Figura 27).



**Figura 27 - Revegetação do reservatório na configuração final. Fonte: Elaborado pela própria autora.**

#### 5.1.3.6 Etapa 6: Monitoramento e manutenção

Como a concepção do projeto de descaracterização das barragens de rejeitos X e Y foi o de remover parte do seu maciço, impedindo assim o acúmulo de sedimentos ou formação de lago através da execução de um canal central em enrocamento, preferencialmente, reestabelecendo o curso natural de água, a estrutura deixará de ter características de barramento. Dessa forma, após a descaracterização seja executado o monitoramento da estrutura remanescente, por um período mínimo de dois anos, através da realização de inspeção visual, manutenção da vegetação e monitoramento da qualidade de água.

Para o monitoramento da qualidade da água recomenda-se que seja composto por medidores de turbidez, medidores de vazões, inspeções para ensaios de controle de qualidade químico das águas. A instalação do medidor de turbidez e vazão é recomendado que seja na saída do canal principal de drenagem superficial, que permitirá verificar as condições de turbidez e geração de sedimentos do talvegue após a descaracterização da estrutura. Com relação à periodicidade das leituras dos instrumentos, ficará a critério da mineradora especificar essa rotina. Entretanto, é aconselhável que as leituras dos instrumentos ocorram com frequência mensal e posteriores a períodos chuvosos. Caso seja observado que, após o desenvolvimento

da vegetação e manutenção das leituras do medidor de vazão, para condições semelhantes, sugere-se a redução da frequência de leituras.

## **5.2 Quadro de Vantagens e Desvantagens das Alternativas Propostas**

Foram avaliados os aspectos geológicos, geotécnico e hidrológicos relevantes para as alternativas estudadas, capazes de atender as condições de fechamento de forma satisfatória, ambientalmente aceitáveis e seguras para as barragens em estudo. A partir desta avaliação, elaborou-se um quadro com as principais vantagens e desvantagens para cada cenário. Na Tabela 8 estão apresentadas principais vantagens e desvantagens em relação ao cenário de alternativas considerado para a descaracterização das barragens de rejeitos X e Y em estudo.

**Tabela 8 - Quadro de vantagens e desvantagens do cenário de alternativas considerados para a descaracterização das barragens de rejeitos X e Y.**

Cenário	Vantagens	Desvantagens
<p><b>Alternativa 1 - Intervenção na estrutura e no reservatório sem desmonte da barragem</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor intervenção, menor volume de obra e quantidade de serviço;</li> <li>• Menor custo para descaracterização;</li> <li>• Menor tempo de execução (sem considerar o adensamento do rejeito para regularização do reservatório);</li> <li>• Não necessita de outra área para disposição do rejeito;</li> <li>• Não há transporte de rejeitos, não havendo necessidade de grandes investimentos de recursos em acesso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessário esperar muito tempo para consolidação ou necessidade de estudos e projetos específicos para mitigar os impactos dos recalques causados pelo adensamento;</li> <li>• Necessidade de áreas de empréstimo para o aterro de regularização topográfica do reservatório;</li> <li>• Face à baixa capacidade de suporte do rejeito não consolidado, pode ser necessário utilizar equipamentos anfíbios (menor disponibilidade);</li> <li>• O barramento continua existindo, podendo haver necessidade em manutenções recorrentes, por exemplo, estruturas de drenagens;</li> <li>• Monitoramento em longo prazo, com controle de processos erosivos e geração de poeiras;</li> </ul>

Cenário	Vantagens	Desvantagens
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Um eventual colapso da estrutura poderia causar danos ambientais significativos e impacto em custos e à imagem da mineradora;</li> <li>• Tratamento da água a ser bombeada do reservatório antes do processo de descaracterização;</li> <li>• Menor aceitação pelo stakeholders, principalmente externos (ministério público, ANM, sociedade).</li> </ul>
<p><b>Alternativa 2 – Intervenção na estrutura e no reservatório com desmonte total da barragem</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior aceitação pelo stakeholders, principalmente externos (ministério público, ANM, sociedade);</li> <li>• Mitigação dos riscos geotécnicos e hidráulicos;</li> <li>• Restauração ambiental total da área;</li> <li>• Ausência (quase total) de manutenção e monitoramento a longo prazo;</li> <li>• Melhoria na imagem da mineradora;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior intervenção, maior volume de obra e quantidade de serviço;</li> <li>• Maior custo para descaracterização;</li> <li>• Maior tempo de execução;</li> <li>• Necessita de outra área para disposição do rejeito;</li> <li>• Grande transporte de rejeitos, havendo necessidade de grandes investimentos de recursos para desenvolvimento e melhoria de acesso;</li> </ul>

Cenário	Vantagens	Desvantagens
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não há mais riscos de ruptura do barramento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de estabilização dos taludes após a escavação do rejeito e remoção do maciço;</li> <li>• Necessidade de demolição de estruturas de concreto e transporte de entulhos;</li> <li>• Tratamento da água a ser bombeada do reservatório antes do processo de descaracterização;</li> <li>• Caso haja necessidade de adequação dos taludes remanescentes e implantação de sistemas de drenagens, esses deverão sofrer manutenções frequentes.</li> </ul>
<p><b>Alternativa 3 - Intervenção na estrutura e reservatório com desmonte parcial da barragem</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor tempo de execução (sem considerar o adensamento do rejeito para regularização do reservatório);</li> <li>• Necessita de menor área para disposição do rejeito, se comparado à alternativa 2;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de estudos e projetos específicos para mitigar os impactos dos recalques causados pelo adensamento;</li> <li>• Face à baixa capacidade de suporte do rejeito não consolidado, pode ser necessário utilizar equipamentos anfíbios (menor disponibilidade);</li> </ul>

Cenário	Vantagens	Desvantagens
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor transporte de rejeitos, se comparado à alternativa 2;</li> <li>• Menor movimentação de rejeitos do reservatório.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O barramento continua existindo, podendo haver necessidade em manutenções recorrentes, por exemplo, estruturas de drenagens;</li> <li>• Monitoramento em longo prazo, com controle de processos erosivos e geração de poeiras;</li> <li>• Um eventual colapso da estrutura poderia causar danos ambientais significativos e impacto em custos e à imagem da mineradora;</li> <li>• Tratamento da água a ser bombeada do reservatório antes do processo de descaracterização;</li> <li>• Menor aceitação pelo stakeholders, principalmente externos (ministério público, ANM, sociedade).</li> </ul>

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas três alternativas para a descaracterização de duas barragens de rejeitos de caulim. As alternativas avaliadas foram: (i) intervenção na estrutura e no reservatório sem desmonte da barragem; (ii) remoção total do reservatório e da barragem; (iii) intervenção na estrutura e reservatório com a remoção parcial do maciço.

Com base na avaliação das alternativas foram avaliados os pontos positivos e negativos de cada uma, comparadas entre si.

A escolha da melhor alternativa pode levar em consideração vários aspectos, econômicos, sociais, ambientais e técnicos relevantes na comparação das soluções apresentadas nesse trabalho. Tais aspectos auxiliam na tomada de decisão da escolha da alternativa que atenda aos requisitos de estabilidade física, sustentabilidade e legislação vigente.

Em termos de custo e tempo, de maneira qualitativa, a melhor alternativa seria a intervenção na estrutura e no reservatório sem desmonte da barragem. Observou-se que as ações de descaracterização quando comparadas com as alternativas 2 e 3 são caracterizadas por menores intervenção na estrutura que, conseqüentemente, demandariam menor tempo de execução e recursos financeiros envolvidos. Todavia, a estimativa do quantitativos dos custos necessários à execução das atividades de descaracterização não foram escopo do trabalho, mas deve ser mensurado com a evolução dos estudos de alternativas de descaracterização das estruturas.

Do ponto de vista ambiental e de menor necessidade de manutenção ao longo do tempo, a alternativa que considera a intervenção na estrutura e reservatório com remoção total do barramento (Alternativa 2) é a mais satisfatória. Essa solução permitirá a área seja reintegrada ao meio ambiente, com baixa suscetibilidade à erosão e apta ao processo de sucessão ecológica, uma vez que riscos geotécnicos e hidráulicos estarão mitigados.

Já a Alternativa 3 (intervenção na estrutura e no reservatório com remoção parcial do barramento) mostrou ser uma solução intermediária dentre os cenários avaliados,

com pontos favoráveis e desfavoráveis em relação à manutenção parcial do maciço. Pode-se destacar que essa alternativa apresentou vantagens em relação à baixa necessidade de áreas adicionais para disposição do material escavado e transporte quando comparada com a alternativa 2. Entretanto, como desvantagens está relacionado a necessidade de atividade de monitoramento e manutenção a longo prazo e, caso, exista a possibilidade de iminência da ruptura dos taludes remanescentes, a região a jusante pode ser impactada com relevantes impactos ambientais.

Atualmente, a legislação não preconiza a forma como deve ser procedida a descaracterização, desta forma, a definição da alternativa fica a critério da mineradora, levando em consideração quais são os aspectos mais relevantes para a companhia, que poderão auxiliar na tomada de decisão na escolha do projeto de descaracterização mais adequado à realidade local das estruturas.

## **6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros em função das atividades executadas para os cenários de descaracterização considerados nesse estudo, podemos indicar:

- Verificar a viabilidade técnica e financeira das alternativas de disposição do rejeito removido após a descaracterização das barragens, em que contempla a remoção do maciço. Algumas soluções são passíveis de serem empregadas, tais como, preenchimento das cavas, empilhamento do rejeito em nova área e até a reutilização em cadeias produtivas;
- Elaborar um conjunto de procedimentos técnicos para determinar tempo e taxa de bombeamento da água do reservatório, bem como definir os requisitos físico-químicos para o tratamento da água antes de ser lançada ao meio ambiente;
- Elaboração de projetos paisagístico para melhor integração da estrutura ao meio ambiente em que esta se encontra em função das necessidades da comunidade local;

- Elaboração de estudos específicos de adensamento e taxa de recalque do material inconsolidado na barragem de rejeito, para compreender o comportamento do material e avaliar possíveis impactos nas atividades de descaracterização.

## REFERÊNCIAS

ANM. Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, 2012. Disponível em: [https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7231](https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7231). Acesso em: 20/12/22.

ANM. Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012. Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Brasília, 2012. Disponível em: [https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7234](https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7234). Acesso em: 20/12/22.

ANM. Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. Brasília, 2019. Disponível em: [https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Res\\_4\\_19.htm](https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Res_4_19.htm). Acesso em: 22/12/22.

ANM. Resolução nº 13, de 08 de agosto de 2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Brasília, 2019. Disponível em: [https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/legislacao-aplicada/anm-resolucao-13-2019.pdf/view](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/legislacao-aplicada/anm-resolucao-13-2019.pdf/view). Acesso em: 22/12/22.

ANM. Resolução nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/veja-o-que-muda-com-a->

resolucao-anm-ndeg-95-2022/resolucao\_anm\_no95-1.pdf/view. Acesso em: 23/12/22.

ÁVILA, J. P., et al. (2021). Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes. *Geotecnia*, v.152, 435 – 464. Disponível em: [https://impactum-journals.uc.pt > download](https://impactum-journals.uc.pt/download). Acesso em: 19/12/22.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. 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. Brasília, 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm). Acesso em: 23/12/22.

CHEN, P. Y. et al. On the origin of the name kaolin and the kaolin deposits of the Kauling and Dazhou areas, Kiangsi, China. *Applied Clay Science*, v. 12, p. 1–25, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131797000070>. Acesso em: 28/12/22.

DNPM. Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001. Aprova as Normas Reguladoras de Mineração - NRM, de que trata o art. 97 do Decreto-lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Brasília, 2001. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=182620>. Acesso em: 19/12/22.

DNPM. Portaria nº 416, de 03 de setembro de 2012. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, 2012. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=182620>. Acesso em: 19/12/22.

DNPM. Portaria nº 526, de 11 de dezembro de 2013. Estabelece a periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM), conforme art. 8º, 11 e 12 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro

de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e art. 8º da Portaria nº 416, de 3 de setembro de 2012. Brasília, 2013. Disponível em: <https://williamfreire.com.br/areas-do-direito/direito-ambiental/portaria-no-526-de-09-dezembro-de-2013/>. Acesso em: 19/12/22.

DNPM. Portaria nº 14, de 15 de janeiro de 2016. Estabelece prazo para apresentação de comprovante de entrega das cópias físicas do Plano de Ação de Emergência de Barragem de Mineração (PAEBM) para as Prefeituras e Defesas Cíveis municipais e estaduais, conforme exigido pelo art. 7º da Portaria nº 526, de 2013, e dá outras providências. Brasília, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/portaria-dnprm-14-2016-barragens-de-mineracao.pdf>. Acesso em: 21/12/22.

DNPM. Portaria Nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/portaria-dnprm-no-70-389-de-17-de-maio-de-2017>. Acesso em: 21/12/22.

GIGOLOTTI, J. J. *et al.* Descaracterização de barragens de contenção de rejeitos de mineração: marcos regulatórios, técnico-normativos e procedimentos. Cadernos UniFOA, v. 17, 2022. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/3911>. Acesso em: 28/12/22.

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. Disponível: <https://globaltailingsreview.org/wp->

content/uploads/2020/08/global-tailings-standard\_spreads\_PT.pdf.Acesso em: 15/01/23.

MAIA, A.B. Utilização de rejeito de caulim da Amazônia na síntese da zeólita A. *Cerâmica*, v. 53, p. 319–324, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/9JfqYR6kGhvHprRBtHsNnWQ/?lang=pt>. Acesso em: 03/01/23.

MASSIGNAN, R. S; SÁNCHEZ, L.E. O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, p. 225–234, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/pxwxzxWPTWBqRhV7M9W9Dqt/>. Acesso em: 24/12/22.

NERI, A.C; *et al.* Avaliação Ambiental integrada das obras de descaracterização das barragens de rejeitos alteadas pelo método a montante no Estado de Minas Gerais. São Paulo: Fundação para o Desenvolvimento tecnológico da Engenharia, 2021.

PRASAD, M. S. *et al.* Kaolin: processing, properties and applications. *Applied Clay Science*, v. 27, p. 86–119, 1981. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016913179190001P>. Acesso em: 24/12/22.

XU, W. *et al.* Feasibility of kaolin tailing sand to be as an environmentally friendly alternative to river sand in construction applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 205, p. 1114–1126, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618328397>. Acesso em: 28/12/22.

WANG, Y; SIU, W. Structure characteristics and mechanical Properties of kaolinite soils. I. surface charges and structural characterizations. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 43, p. 587, 2006. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t06-026>. Acesso em: 04/01/23.

WANG, H; et al. Characterization and thermal behavior of kaolin. *Journal Therm Anal Calorim*, v. 105, p. 157-160, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-011-1385-0>. Acesso em: 04/01/23.

WILSON, I. R; et al. Kaolin and halloysite deposits of Brazil. *Journal Clay Minerals*, v. 41, p. 697-716, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/249853317\\_Kaolin\\_and\\_halloysite\\_deposits\\_of\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/249853317_Kaolin_and_halloysite_deposits_of_Brazil). Acesso em: 05/01/23.