



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Gladimir Astolfo Ferreira de Castro

**Aplicação de tecnologias digitais para apoiar o
monitoramento da descaracterização de barragens a
montante no Brasil**

OURO PRETO

2026

Gladimir Astolfo Ferreira De Castro

**Aplicação de tecnologias digitais para apoiar o
monitoramento da descaracterização de barragens a
montante no Brasil**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia de
Minas da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

OURO PRETO

2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gladimir Astolfo Ferreira de Castro

Aplicação de tecnologias digitais para apoiar o monitoramento da descaracterização de barragens a montante no Brasil

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

Aprovada em 16 de julho de 2026

Membros da banca

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. José Fernando Miranda - (Universidade Federal de Ouro Preto)

M.Sc. Tiago Mozart Gonçalves Leite - Magnesita

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/08/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2026, às 11:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1155685** e o código CRC **831C069C**.

RESUMO

Este trabalho analisa como tecnologias digitais podem apoiar, sem substituir, a engenharia geotécnica no monitoramento e na execução da descaracterização de barragens de mineração construídas pelo método de alteamento a montante no Brasil. A pesquisa foi reestruturada como revisão narrativa, bibliográfica e documental, com critérios explícitos de aderência temática, atualidade, confiabilidade e utilidade para a decisão de engenharia. Foram examinados o marco regulatório brasileiro, relatórios da Agência Nacional de Mineração, estudos sobre rupturas, publicações geotécnicas e aplicações de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina. A análise demonstra que o núcleo do processo está na investigação geotécnica, no controle de poropressões, na verificação de estabilidade durante cada etapa da obra, no planejamento do balanço de massas, na drenagem e na instrumentação. As tecnologias digitais agregam valor quando integram séries de piezômetros, inclinômetros, radares, levantamentos topográficos, imagens orbitais, inspeções e registros executivos em uma cadeia rastreável de evidências. O panorama oficial de julho de 2026 indicou 42 estruturas a montante enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens, com diferentes estágios de projeto, obra e monitoramento, o que confirma a necessidade de soluções específicas para cada sítio. A síntese propõe um framework em seis etapas: diagnóstico, estabilização prévia, projeto executivo, execução por fases, recuperação ambiental e monitoramento para descadastramento. Conclui-se que a eficiência da descaracterização depende da combinação entre segurança geotécnica, governança regulatória, capacidade fiscalizatória, transparência, participação social e uso criterioso de tecnologias digitais.

Palavras-chave: barragens a montante; descaracterização; estabilidade geotécnica; instrumentação; sensoriamento remoto; governança.

ABSTRACT

This study analyzes how digital technologies can support, without replacing, geotechnical engineering in the monitoring and execution of the decharacterization of upstream-raised mining tailings dams in Brazil. The research was restructured as a narrative bibliographic and documentary review with explicit criteria of thematic relevance, timeliness, reliability, and usefulness for engineering decisions. The Brazilian regulatory framework, reports issued by the National Mining Agency, failure investigations, geotechnical publications, and applications of remote sensing and machine learning were examined. The analysis shows that the core of decharacterization lies in geotechnical investigation, pore-pressure control, stability verification throughout each construction stage, mass-balance planning, drainage, and instrumentation. Digital technologies add value when they integrate data from piezometers, inclinometers, ground-based radar, surveying, satellite imagery, inspections, and construction records into a traceable chain of evidence. The official panorama of July 2026 identified 42 upstream structures covered by the National Dam Safety Policy, distributed across different stages of design, construction, and monitoring, confirming that each site requires a specific technical solution. The synthesis proposes a six-stage framework: diagnosis, prior stabilization, detailed design, staged execution, environmental rehabilitation, and monitoring for formal removal from the national registry. It is concluded that efficient decharacterization depends on combining geotechnical safety, regulatory governance, inspection capacity, transparency, social participation, and the careful use of digital technologies.

Keywords: upstream dams; decharacterization; geotechnical stability; instrumentation; remote sensing; governance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo metodológico da revisão narrativa estruturada.....	11
Figura 2 - Representação esquemática dos métodos de alteamento	16
Figura 3 - Evolução do estoque de barragens a montante acompanhadas pela ANM.....	17
Figura 4 - Fase declarada dos processos de descaracterização em julho de 2026.....	17
Figura 5 - Sequência lógica para descaracterização segura.....	21
Figura 6 - Arranjo esquemático de instrumentação durante as obras	24
Figura 7 - Linha do tempo regulatória da segurança de barragens de mineração	32
Figura 8 - Framework integrado para programas de descaracterização	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estratégia de busca e critérios de análise	11
Tabela 2 - Comparação entre métodos de alteamento e implicações para a descaracterização	18
Tabela 3 - Alternativas de intervenção e condicionantes de seleção.....	21
Tabela 4 - Controles geotécnicos essenciais durante as obras.....	24
Tabela 5 - Síntese comparativa de casos brasileiros.....	29
Tabela 6 - Diferença entre CRI e DPA.....	31
Tabela 7 - Marco legal e institucional aplicável.....	32
Tabela 8 - Matriz de recomendações e horizonte de implementação	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM - Agência Nacional de Mineração
ART - Anotação de Responsabilidade Técnica
CNBM - Cadastro Nacional de Barragens de Mineração
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CREA - Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CRI - Categoria de Risco
DCE - Declaração de Condição de Estabilidade
DPA - Dano Potencial Associado
ECJ - Estrutura de Contenção a Jusante
EIR - Extrato de Inspeção Regular
FIE - Ficha de Inspeção Especial
FIR - Ficha de Inspeção Regular
GNSS - Global Navigation Satellite System
GISTM - Global Industry Standard on Tailings Management
IA - Inteligência Artificial
InSAR - Interferometria por Radar de Abertura Sintética
ISE - Inspeção de Segurança Especial
ISR - Inspeção de Segurança Regular
MAB - Movimento dos Atingidos por Barragens
NA - Nível de água
PAEBM - Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens
PRAD - Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
PSB - Plano de Segurança da Barragem
RDD - Relatório de Descaracterização e Descadastramento
RISR - Relatório de Inspeção de Segurança Regular
RPSB - Revisão Periódica de Segurança da Barragem
SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração
SIGMINE - Sistema de Informações Geográficas da Mineração
ZAS - Zona de Autossalvamento
ZSS - Zona de Segurança Secundária

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Metodologia.....	9
2 PROBLEMATIZAÇÃO	12
3 OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo geral.....	14
3.2 Objetivos específicos.....	14
4 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E PANORAMA ATUAL.....	15
5 FUNDAMENTOS TÉCNICOS DA DESCARACTERIZAÇÃO.....	19
5.1 Método a montante, instabilidade e liquefação	19
5.2 Etapas e alternativas de descaracterização	20
5.3 Drenagem, rebaixamento do nível de água e estabilidade.....	22
5.4 Instrumentação e controle observacional.....	23
5.5 Destinação de rejeitos e recuperação ambiental.....	24
6 TECNOLOGIAS DIGITAIS COMO APOIO À ENGENHARIA	26
6.1 Sensoriamento remoto e InSAR.....	26
6.2 Integração de dados e limites da inteligência artificial	26
7 ESTUDOS DE CASO E ANÁLISE COMPARATIVA	28
8 MARCO LEGAL, FISCALIZAÇÃO E GOVERNANÇA	30
8.1 PNSB, CRI, DPA e sistemas de informação.....	30
8.2 Transição normativa entre as Resoluções ANM nº 95/2022 e nº 220/2025.....	31
8.3 Capacidade institucional e participação social	32
9 FRAMEWORK E DIRETRIZES PROPOSTAS	34
10 CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

A mineração ocupa posição relevante na estrutura produtiva brasileira, mas a geração e a disposição de rejeitos introduzem riscos que persistem para além do período operacional da mina. As rupturas da barragem de Fundão, em Mariana, em 2015, e da Barragem I da mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, em 2019, evidenciaram que a segurança não depende apenas da resistência de um maciço em uma data de inspeção. Ela resulta da interação entre projeto, construção, operação, condição dos rejeitos, drenagem, instrumentação, qualidade da governança e capacidade de reconhecer e tratar sinais de deterioração. O relatório do painel de especialistas sobre Brumadinho indicou que a compreensão do comportamento não drenado e da liquefação dos rejeitos era decisiva para explicar o mecanismo de ruptura, reforçando a necessidade de modelos geotécnicos atualizados e de interpretação integrada dos dados (ROBERTSON et al., 2019).

Barragens alteadas a montante foram amplamente utilizadas porque reduzem o volume de material compactado e o custo inicial de implantação. Nessa configuração, os alteamentos sucessivos avançam sobre rejeitos previamente depositados, que podem apresentar elevada saturação, baixa densidade, heterogeneidade e suscetibilidade à perda de resistência. A economia obtida na fase de construção transfere complexidade para a gestão de segurança, especialmente quando há deficiência de drenagem, elevação da linha freática ou condições não drenadas. Por essa razão, a legislação brasileira proibiu a construção, a operação e o alteamento pelo método a montante e determinou a descaracterização das estruturas existentes, compreendida como a eliminação de suas características e de sua função de barragem (BRASIL, 2020; ANM, 2022).

A descaracterização não equivale a uma simples demolição. A retirada indiscriminada de material pode reduzir confinamento, modificar trajetórias de drenagem, provocar desconfinamento de rejeitos contráteis e criar superfícies temporárias mais críticas do que a condição inicial. O projeto deve estabelecer uma sequência executiva que preserve margens de segurança, trate as incertezas do modelo geológico-geotécnico e compatibilize escavação, transporte, disposição, drenagem, controle de erosão e monitoramento. Em certos casos, a solução final inclui remoção total; em outros, permanece uma estrutura geotécnica remanescente, porém sem reservatório, sem função de contenção e com drenagem livre. A escolha depende do sítio e não pode ser padronizada apenas por tipo construtivo.

As tecnologias digitais passaram a ocupar espaço crescente nesse campo. Imagens de satélite, radar de abertura sintética, drones, radares terrestres, sistemas GNSS, bancos de dados e modelos de aprendizado de máquina permitem ampliar a cobertura espacial e organizar séries temporais. O BrazilDAM, por exemplo, consolidou imagens de barragens brasileiras para pesquisas de detecção automatizada, enquanto estudos com Sentinel-2 mostraram a utilidade do sensoriamento remoto na avaliação da área afetada por Brumadinho (FERREIRA et al., 2020; MORAGA; GURKAN; DUZGUN, 2021). Entretanto, esses recursos não calculam sozinhos a estabilidade nem substituem investigação, instrumentação, inspeção e responsabilidade técnica. O valor do dado digital surge quando ele é confrontado com o modelo geotécnico e vinculado a uma ação operacional.

O problema científico deste trabalho decorre do descompasso entre o avanço das ferramentas digitais e a necessidade de decisões de engenharia específicas para cada barragem. Uma abordagem excessivamente tecnológica corre o risco de tratar a descaracterização como problema de dados, quando o objeto principal é a transformação física segura de uma estrutura potencialmente instável. Uma abordagem exclusivamente convencional, por outro lado, pode deixar de aproveitar fontes de evidência que melhoram a detecção de mudanças, a rastreabilidade e a fiscalização. O posicionamento adotado é que a tecnologia deve funcionar como camada de apoio ao diagnóstico, ao controle observacional e à governança, mantendo a engenharia geotécnica no centro do processo.

Assim, o trabalho investiga como integrar fundamentos de estabilidade, drenagem, instrumentação, planejamento executivo, recuperação ambiental, fiscalização e tecnologias digitais para tornar a descaracterização mais segura e eficiente. A contribuição proposta não consiste em apresentar uma solução universal, mas em organizar critérios de decisão e um framework aplicável à estruturação de programas. A análise também atualiza o panorama nacional com dados oficiais de julho de 2026 e considera a transição regulatória introduzida pela Resolução ANM nº 220/2025, cuja maior parte somente entra em vigor em agosto de 2027.

1.1 Metodologia

A pesquisa possui natureza qualitativa, exploratória e aplicada, desenvolvida por meio de revisão narrativa estruturada e análise documental. A denominação “revisão sistemática” foi retirada porque não houve registro prévio de protocolo, dupla triagem

independente, avaliação formal de viés ou fluxograma PRISMA com quantitativos auditáveis. Para aumentar a transparência sem atribuir ao estudo um rigor metodológico que ele não possui, foram explicitados os eixos de busca, os critérios de seleção, a forma de extração e o procedimento de síntese. Essa opção é coerente com o objetivo de integrar literatura técnica, documentos regulatórios, relatórios de fiscalização e estudos de caso heterogêneos.

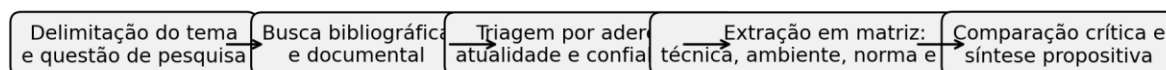
As buscas foram orientadas pelas combinações, em português e inglês, dos termos “barragem a montante”, “descaracterização”, “tailings dam decharacterization”, “liquefação”, “estabilidade”, “piezômetro”, “drenagem”, “instrumentação”, “remote sensing”, “InSAR”, “monitoramento geotécnico” e “segurança de barragens”. Foram consultados Google Scholar, SciELO, bases de periódicos, repositórios institucionais e páginas oficiais da ANM, da legislação federal e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. A análise concentrou-se em documentos publicados de 2015 a julho de 2026, sem excluir referências anteriores quando fundamentais para conceitos de engenharia ou para a trajetória institucional.

Foram incluídos materiais que apresentavam relação direta com pelo menos um dos seguintes eixos: mecanismos de instabilidade; métodos de descaracterização; investigação e instrumentação; sequência construtiva; destinação de rejeitos; recuperação ambiental; regulação e fiscalização; estudos de caso brasileiros; ou uso de tecnologia digital associado a uma decisão de segurança. Foram excluídos textos meramente promocionais, conteúdos sem autoria ou origem identificável, duplicatas e trabalhos de inteligência artificial sem conexão demonstrada com o comportamento ou a gestão de barragens. A confiabilidade foi ponderada pela origem da fonte, privilegiando legislação, relatórios oficiais, artigos revisados por pares, relatórios técnicos de especialistas e padrões internacionais.

A extração das informações foi realizada em matriz temática com as colunas: fonte; objeto; tipo de estrutura; problema analisado; método; variável geotécnica; tecnologia; resultado; limitação; implicação para projeto, obra ou fiscalização. Em seguida, as evidências foram comparadas para identificar convergências, divergências e lacunas. Dados oficiais de julho de 2026 foram tratados como fotografia temporal e não como inventário permanente, pois o SIGBM é atualizado continuamente. Não foram produzidos novos cálculos de estabilidade nem validações de campo, o que constitui limitação relevante: o framework

proposto é conceitual e deve ser adaptado por profissionais habilitados a cada empreendimento.

A síntese final foi construída em cinco planos interdependentes: técnico-geotécnico, ambiental, tecnológico, gerencial e institucional. O plano técnico recebeu prioridade na hierarquia analítica. Dados de sensoriamento ou modelos computacionais somente foram considerados úteis quando vinculados a uma hipótese de comportamento, a um nível de controle ou a uma decisão. Esse critério evita confundir precisão algorítmica com segurança geotécnica e responde à principal fragilidade identificada na versão anterior do trabalho.



Revisão narrativa estruturada, sem reivindicação de protocolo sistemático

Figura 1 - Fluxo metodológico da revisão narrativa estruturada

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 1 - Estratégia de busca e critérios de análise

Componente	Definição adotada	Finalidade
Bases e fontes	Google Scholar, SciELO, periódicos, ANM, legislação federal, UNEP e relatórios técnicos	Cobrir literatura científica, normas, dados oficiais e investigações
Período	2015 a julho de 2026, com exceções conceituais justificadas	Priorizar a fase posterior a Fundão e Brumadinho
Inclusão	Aderência a engenharia, descaracterização, ambiente, fiscalização ou tecnologia aplicada	Manter foco na questão de pesquisa
Exclusão	Duplicatas, material sem origem, IA sem vínculo com decisão geotécnica e textos promocionais	Reduzir dispersão temática e fragilidade documental
Síntese	Matriz temática e comparação crítica	Distinguir evidência, limitação e implicação prática

Fonte: Elaboração própria (2026).

2 PROBLEMATIZAÇÃO

A questão central é: como tornar a descaracterização de barragens a montante efetiva e segura, ao mesmo tempo em que se controlam impactos ambientais, incertezas executivas e responsabilidades institucionais? A dificuldade não reside na inexistência de uma obrigação legal, mas na transformação dessa obrigação em projetos exequíveis para estruturas com diferentes alturas, volumes, materiais, níveis de saturação, ocupações a jusante e históricos construtivos. A expressão “descaracterizar” define o resultado regulatório, porém não determina uma solução geométrica única. O caminho técnico precisa ser construído a partir de dados de investigação, análise de estabilidade, risco de liquefação, balanço hídrico e restrições de obra.

Um primeiro conflito aparece entre rapidez e segurança. A sociedade demanda a eliminação célere do risco, mas acelerar escavações, rebaixamentos ou movimentações sem controle pode aumentar a probabilidade de instabilidade. O cronograma deve reconhecer que obras em rejeitos saturados são governadas por comportamento hidráulico e por resposta de poropressão, e não apenas por produtividade de equipamentos. Fases de espera para dissipação, bermas temporárias, limitações de frente, drenagem prévia e monitoramento intensivo podem alongar o prazo, mas constituem controles essenciais. A eficiência, portanto, não é medida somente pela duração total; inclui a capacidade de executar cada etapa dentro de limites seguros.

O segundo conflito envolve a destinação dos rejeitos. A remoção total pode parecer a alternativa mais definitiva, mas exige áreas receptoras, vias, controle de poeira, estabilidade de pilhas, licenciamento, grande volume de transporte e gestão de águas. A permanência parcial, por sua vez, exige provar que a geometria final não conserva função de barragem, que a drenagem é estável e que o remanescente pode ser gerido no plano de fechamento. Não existe solução ambientalmente neutra. A análise deve comparar riscos residuais, emissões e impactos logísticos, demanda de materiais, possibilidade de reaproveitamento e desempenho pós-obra.

O terceiro conflito relaciona-se à fragmentação institucional. Segurança geotécnica, licenciamento ambiental, defesa civil, uso do solo, patrimônio cultural, reparação e comunicação com comunidades podem envolver órgãos e procedimentos distintos. A ausência de integração gera prazos incompatíveis, duplicidade de exigências e lacunas de

responsabilidade. A ANM mantém o SIGBM e fiscaliza barragens de mineração em sua esfera, mas a eficácia do sistema depende da qualidade das declarações, da análise técnica, das inspeções e do intercâmbio com órgãos ambientais e de proteção e defesa civil. Transparência pública é necessária, porém não substitui capacidade estatal para auditar e intervir.

O quarto conflito é epistemológico: mais dados não significam automaticamente mais conhecimento. Um radar pode medir deslocamentos superficiais com grande frequência; um piezômetro pode registrar poropressão; um satélite pode indicar deformação ou mudança de cobertura. Ainda assim, sem referência de projeto, validação, contexto hidrogeológico e regras de resposta, a série pode produzir alarmes excessivos ou falsa tranquilidade. A questão pertinente não é se a inteligência artificial detecta padrões, mas se o padrão é material para o mecanismo de falha considerado e se existe governança para transformar o alerta em inspeção, análise e ação.

O trabalho responde a esses conflitos ao propor uma hierarquia: primeiro, definir mecanismos de risco e critérios geotécnicos; segundo, selecionar intervenções e sequência; terceiro, estruturar monitoramento e gatilhos; quarto, integrar planejamento, ambiente e governança; quinto, empregar tecnologias digitais para aumentar cobertura, rastreabilidade e velocidade de interpretação. Nessa hierarquia, o componente tecnológico é importante, mas deliberadamente subordinado ao problema de engenharia.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Analisar estratégias integradas de engenharia, monitoramento, gestão ambiental e governança para apoiar a descaracterização segura de barragens a montante no Brasil, definindo o papel complementar das tecnologias digitais e propondo diretrizes aplicáveis ao planejamento, à execução e ao acompanhamento dessas obras.

3.2 Objetivos específicos

- Explicar os principais mecanismos de instabilidade associados a barragens a montante, com ênfase em saturação, poropressão, drenagem, comportamento não drenado e liquefação.
- Comparar alternativas de descaracterização, suas etapas, condicionantes, riscos executivos e necessidades de monitoramento.
- Analisar o papel da instrumentação geotécnica, das inspeções e das tecnologias digitais na formação de evidências para decisões de obra e fiscalização.
- Atualizar o panorama brasileiro e discutir casos que evidenciem diferenças entre remoção, reconformação, transformação em empilhamento drenado e monitoramento pós-obra.
- Examinar o marco regulatório, a classificação por CRI e DPA, a função do SIGBM e a transição normativa para a Resolução ANM nº 220/2025.
- Propor um framework e uma matriz de recomendações para integrar engenharia, ambiente, cronograma, custos, transparência e participação social.

4 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E PANORAMA ATUAL

A disposição hidráulica de rejeitos em barragens acompanhou a expansão da mineração e a necessidade de manejar grandes volumes de material fino. No método a montante, o dique de partida é seguido por alteamentos deslocados em direção ao reservatório e apoiados parcial ou majoritariamente sobre rejeitos. Em condições favoráveis, o sistema pode manter desempenho por longos períodos; contudo, a segurança é sensível à localização da praia, à eficiência de drenagem, ao controle da linha freática, à qualidade construtiva e ao comportamento dos rejeitos. A figura comparativa evidencia que a posição dos alteamentos altera a fundação sobre a qual cada etapa se apoia e, consequentemente, a natureza do problema geotécnico.

Fundão e Brumadinho mudaram o patamar de aceitabilidade social e regulatória. Fundão mostrou a escala territorial de um fluxo de rejeitos e a persistência dos efeitos ambientais na bacia do Rio Doce. Brumadinho demonstrou a possibilidade de ruptura súbita com pequena margem para resposta, produzindo elevada perda de vidas. A investigação técnica da Barragem I associou o colapso à liquefação estática em rejeitos suscetíveis, em um contexto de deformação acumulada e condições de saturação (ROBERTSON et al., 2019). Esses eventos confirmaram que inspeções visuais e fatores de segurança calculados com hipóteses inadequadas podem não capturar mecanismos frágeis de comportamento.

A Lei nº 14.066/2020 alterou a Lei nº 12.334/2010, fortaleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens e proibiu a construção ou o alteamento pelo método a montante, além de estabelecer a obrigação de descaracterização. A Resolução ANM nº 95/2022 consolidou requisitos aplicáveis às barragens de mineração e definiu conceitos, enquadramento, inspeções, declarações, fatores de segurança, monitoramento e descadastramento. Em 2025, a Resolução ANM nº 220 atualizou a disciplina, mas estabeleceu entrada em vigor escalonada para 2027. Em julho de 2026, portanto, a Resolução nº 95, com suas alterações, continuava sendo a principal referência operacional.

Os relatórios trimestrais da ANM permitem acompanhar a redução do estoque de estruturas. O reporte de julho de 2026, com dados coletados em 8 de julho, registrou 42 barragens a montante enquadradas na PNSB, ante 74 em 2019. Aproximadamente 60% estavam em Minas Gerais e um terço se encontrava em nível de alerta ou emergência. O número revela avanço, mas também mostra que os casos remanescentes tendem a concentrar

maior complexidade técnica, social ou regulatória. À medida que projetos menos complexos são concluídos, a carteira restante exige intervenções mais longas, monitoramento mais rigoroso e coordenação institucional mais intensa (ANM, 2026a).

Quanto à fase, 16 estruturas possuíam projeto ou obras em andamento; sete tinham projeto concluído sem início de obra; quatro estavam com projeto em elaboração; 14 estavam em monitoramento ativo ou passivo; e uma havia sido autodeclarada concluída. A separação entre conclusão física e descadastramento é relevante. Uma obra pode terminar e continuar sujeita a monitoramento até que o desempenho seja demonstrado e a ANM aprove a retirada do cadastro. Esse intervalo evita tratar a aparência final da área como prova suficiente de estabilidade e funcionalidade hidráulica.

O mesmo relatório indicou diversidade nas configurações finais previstas: permanência de estrutura geotécnica sem função de barragem, remoção total, permanência apenas do dique de partida ou transformação da geometria. Essa diversidade confirma que a descaracterização é um objetivo funcional, não um desenho único. Licenciamento ambiental, autorização para transporte, preparação de áreas receptoras e liberação após auditorias aparecem entre as causas de postergação do início das obras. Logo, prazos não podem ser analisados exclusivamente como produtividade de terraplenagem.



Figura 2 - Representação esquemática dos métodos de alteamento

Fonte: Elaboração própria com base nas definições da ANM (2022).

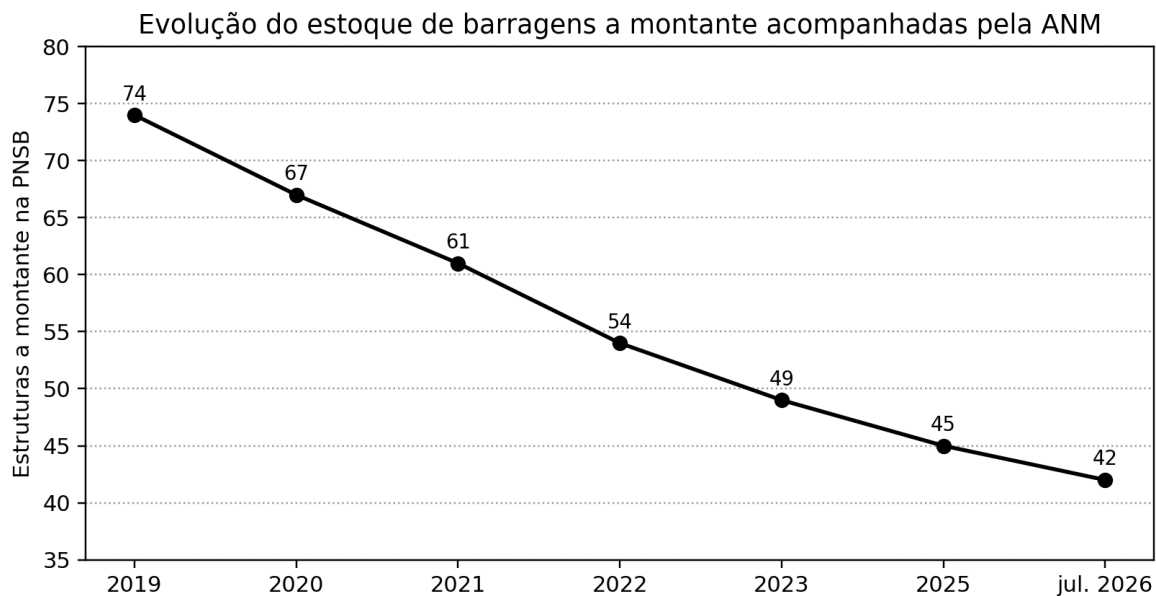


Figura 3 - Evolução do estoque de barragens a montante acompanhadas pela ANM

Fonte: Elaboração própria com base nos relatórios de descaracterização da ANM (2019-2026).

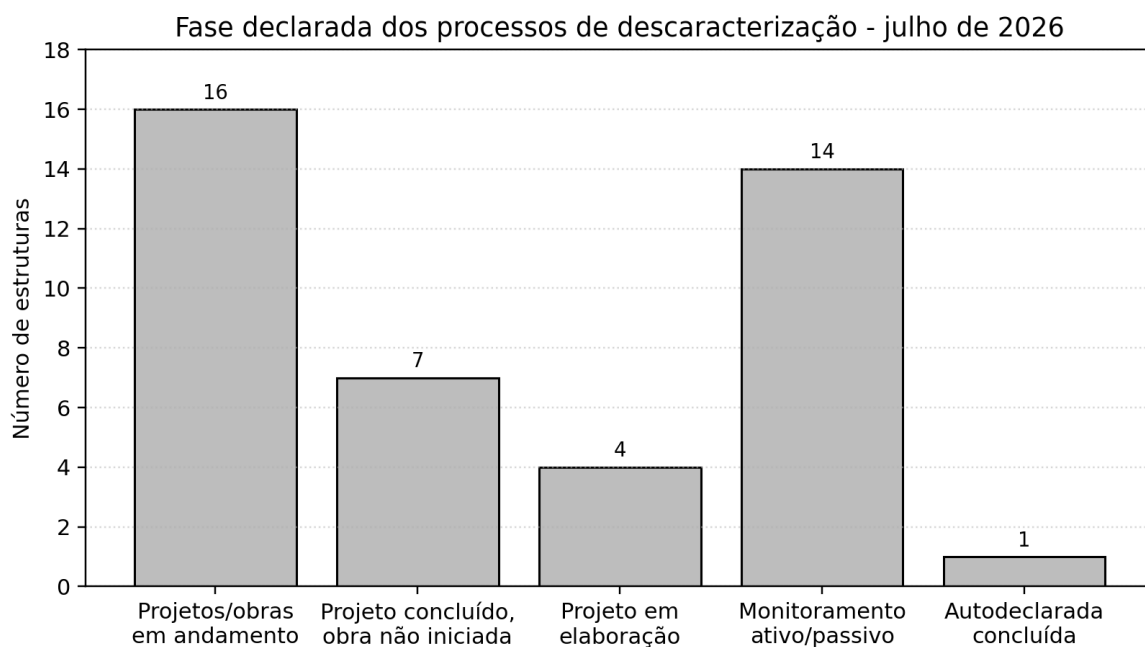


Figura 4 - Fase declarada dos processos de descaracterização em julho de 2026

Fonte: Elaboração própria com base em ANM (2026a).

Tabela 2 - Comparação entre métodos de alteamento e implicações para a descaracterização

Método	Configuração	Vantagem histórica	Implicação geotécnica
A montante	Alteamentos avançam sobre o reservatório e se apoiam em rejeitos	Menor volume de material compactado e menor custo inicial	Maior dependência da qualidade e drenagem dos rejeitos; atenção a liquefação e perda de resistência
Linha de centro	Eixo dos alteamentos permanece aproximadamente alinhado	Compromisso entre ocupação e volume de material	Parte da carga pode atuar sobre rejeitos; requer avaliação específica de fundação e drenagem
A jusante	Alteamentos avançam para jusante a partir do dique inicial	Maior controle de fundação e geometria	Maior consumo de material e área; pode integrar reforço ou transformação em casos específicos

Fonte: Elaboração própria com base em ANM (2022).

5 FUNDAMENTOS TÉCNICOS DA DESCARACTERIZAÇÃO

5.1 Método a montante, instabilidade e liquefação

O comportamento de uma barragem de rejeitos é controlado pelo estado de tensões, pelas propriedades dos materiais, pela pressão da água e pela geometria. Rejeitos finos depositados hidraulicamente podem permanecer soltos e saturados. Quando o carregamento ocorre mais rapidamente do que a dissipação de poropressões, a resistência mobilizada pode ser não drenada. Materiais contráteis tendem a gerar excesso de poropressão durante o cisalhamento, reduzir a tensão efetiva e, em situações extremas, apresentar liquefação. Portanto, a simples adoção de parâmetros drenados de pico pode superestimar a segurança de uma estrutura suscetível.

A avaliação precisa distinguir liquefação de fluxo, mobilidade cíclica e deformações progressivas. Em barragens a montante, a preocupação principal durante a descaracterização é que mudanças de geometria ou de carregamento ativem uma resposta frágil. Escavar o pé, reduzir confinamento, concentrar tráfego, produzir vibrações ou permitir infiltração pode alterar o estado do material. O projeto deve investigar suscetibilidade, estado, resistência não drenada de pico e residual, bem como a localização das zonas críticas. Ensaios de campo, como CPTu, SPT e palheta quando aplicável, e ensaios laboratoriais triaxiais ou de cisalhamento simples devem ser interpretados dentro de um modelo geológico-geotécnico consistente.

O fator de segurança continua sendo indicador essencial, mas não é autossuficiente. Seu valor depende da superfície analisada, da resistência adotada, das condições hidráulicas, da hipótese drenada ou não drenada e do estágio construtivo. Uma análise de equilíbrio-limite com parâmetros inadequados pode gerar resultado numericamente confortável e tecnicamente enganoso. Devem ser verificadas condições de longo prazo, etapas temporárias, rebaixamentos, carregamentos de equipamentos, chuvas, falhas de drenagem e cenários de resistência residual. A análise de deformações e o método observacional complementam o cálculo ao confrontar previsão e resposta real.

A investigação de Brumadinho tornou-se referência porque mostrou a importância de considerar a evolução de tensões e deformações em rejeitos suscetíveis, não apenas uma fotografia final. O aprendizado generalizável é que a estabilidade de uma barragem a montante não pode ser tratada como propriedade fixa. Ela muda com o tempo, com o nível

d'água, com a consolidação, com intervenções e com o histórico de carga. A descaracterização deve ser concebida como uma sequência de estados, cada qual com suas hipóteses, margens e controles.

5.2 Etapas e alternativas de descaracterização

A Resolução ANM nº 95/2022 descreve a descaracterização por etapas que incluem descomissionamento, controle hidrológico e hidrogeológico, estabilização e monitoramento. Na prática, o projeto começa com a consolidação do cadastro, levantamento “as built”, topografia, sondagens, ensaios, instrumentação e diagnóstico de drenagem. Antes de movimentar rejeitos, é necessário verificar se a condição existente suporta a obra. Se fatores de segurança ou incertezas forem incompatíveis, executam-se medidas de estabilização, como drenagem, bermas, reforço, redução de carga ou construção de estrutura de contenção a jusante.

A remoção total elimina o reservatório e pode reduzir o passivo residual, mas transfere o desafio para o manejo de grandes massas. É preciso definir escavabilidade, teor de umidade, condição de tráfego, produtividade, área de disposição, estabilidade da pilha, drenagem de contato, tratamento de efluentes e controle de poeira. A opção é especialmente exigente quando rejeitos moles não suportam equipamentos convencionais ou quando as rotas atravessam áreas urbanas. A avaliação de risco deve incluir acidentes de transporte e interferências ambientais, e não apenas o maciço original.

A remoção parcial e a reconformação buscam eliminar a função de contenção por meio de rebaixamento, suavização de taludes, abertura de drenagem e integração do antigo reservatório ao relevo. A estrutura remanescente deve apresentar escoamento livre, estabilidade e plano de manutenção compatível com fechamento de mina. Essa alternativa pode reduzir volumes transportados, mas exige comprovar que nenhum elemento conserva capacidade de represamento relevante. Canalizações permanentes devem considerar assoreamento, erosão, eventos extremos e facilidade de inspeção.

A transformação em empilhamento drenado ou superfície drenante requer cuidado conceitual. Não basta denominar o material de “pilha”. A geometria, a drenagem interna, a condição de saturação e a suscetibilidade à liquefação determinam o enquadramento e o risco. O caso da Barragem B2, citado pela ANM em 2026, exemplifica a conversão para

empilhamento drenado após comprovação técnica de não suscetibilidade à liquefação. A lição é que a classificação final depende de evidências, não de alteração terminológica.

Qualquer alternativa precisa ser sequenciada. Frentes simultâneas, cotas máximas de escavação, bermas, distância de equipamentos, drenagem temporária, contingência para chuvas e critérios de paralisação devem aparecer no projeto executivo. A sequência também deve ser representada no cronograma com relações lógicas, e não como barras genéricas. Marcos de liberação técnica evitam que a pressão por produção ultrapasse condições hidráulicas ou instrumentais ainda não estabilizadas.

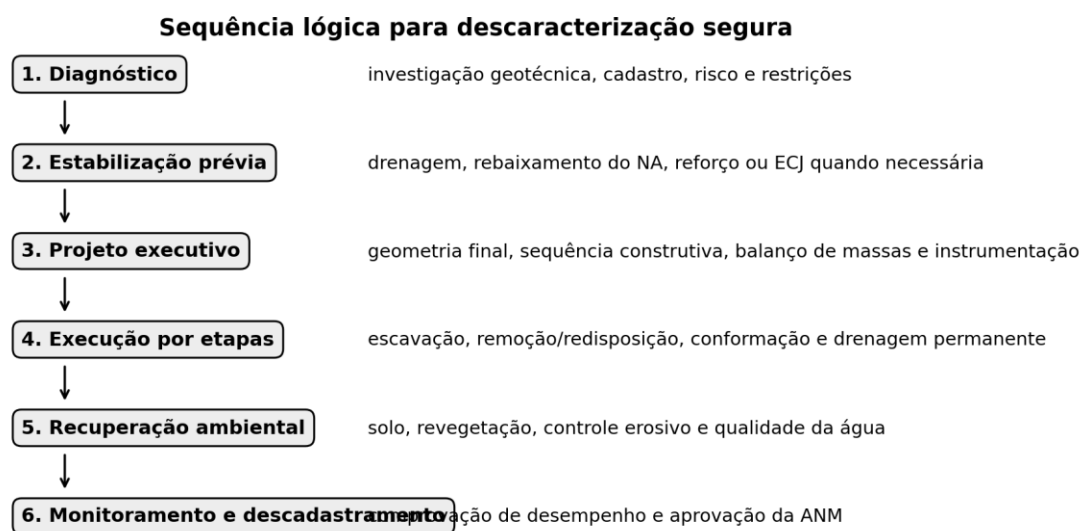


Figura 5 - Sequência lógica para descaracterização segura

Fonte: Elaboração própria com base na Resolução ANM nº 95/2022 e em práticas de engenharia.

Tabela 3 - Alternativas de intervenção e condicionantes de seleção

Alternativa	Aplicação possível	Vantagens	Condicionantes e riscos
Remoção total	Quando há área receptora e escavação tecnicamente viável	Elimina reservatório e reduz dependência de desempenho remanescente	Grande movimentação, tráfego, umidade, estabilidade da disposição e licenciamento
Remoção parcial e reconformação	Quando parte do maciço/rejeito pode permanecer sem função de barragem	Reduz volume e permite integração ao relevo	Prova de drenagem livre, estabilidade e controle erosivo de longo prazo
Reforço e geometria final a jusante	Quando estabilização prévia ou transformação é necessária	Aumenta confinamento e margem durante fases críticas	Consumo de área/material e necessidade de controle de fundação

Alternativa	Aplicação possível	Vantagens	Condicionantes e riscos
Empilhamento drenado	Quando o material e a drenagem permitem condição não suscetível à liquefação	Pode reduzir água armazenada e facilitar fechamento	Caracterização rigorosa, controle construtivo e verificação periódica

Fonte: Elaboração própria (2026).

5.3 Drenagem, rebaixamento do nível de água e estabilidade

A água é variável central porque controla tensões efetivas, erosão interna, surgências e capacidade de executar escavações. O diagnóstico deve identificar fontes de recarga, nível freático, condutividade, continuidade de camadas drenantes, condição dos filtros, capacidade de extravasores e influência de chuvas. A linha freática inferida a partir de poucos instrumentos pode ser inadequada em maciços heterogêneos; por isso, a distribuição espacial de piezômetros e a coerência com seções geológicas são tão importantes quanto a frequência de leitura.

O rebaixamento deve ser planejado para evitar gradientes excessivos, carreamento de finos ou deformações diferenciais. Poços, drenos horizontais profundos, valas, drenos de fundo e bombeamento podem ser combinados, mas sua eficiência precisa ser verificada por vazões, poropressões e balanço hídrico. Uma queda de nível em um instrumento não prova que toda a massa drenou. A resposta pode ser local e retardada em camadas de baixa permeabilidade. O projeto deve estabelecer metas por zona, taxas máximas de rebaixamento e comportamento esperado.

Durante a obra, drenagem temporária e permanente não podem ser tratadas como sistemas independentes. Canais provisórios, sumps e bombeamento devem evitar infiltração nas frentes e conduzir águas com sedimentos para tratamento. A geometria final precisa resistir a eventos de projeto, controlar erosão e permitir manutenção. O dimensionamento hidrológico deve considerar mudanças climáticas e atualização de séries, conforme reforçado por padrões atuais de segurança. A falha de um canal durante chuvas intensas pode reintroduzir água em materiais que estavam sendo estabilizados.

Estudo recente de Hamze-Guilart et al. (2025) analisou correlações entre precipitação, nível de reservatório e instrumentação para avaliar o efeito da drenagem na estabilidade, ilustrando como séries temporais podem revelar resposta hidráulica. A utilidade do método está em testar a coerência do sistema: chuva, vazão de drenos e poropressão devem apresentar relações fisicamente explicáveis. Correlações sem interpretação causal, entretanto, podem

induzir erro. Uma mudança de sensor, manutenção ou obstrução também altera a série e precisa ser registrada.

5.4 Instrumentação e controle observacional

A instrumentação deve responder a perguntas de engenharia. Piezômetros monitoram pressão ou carga hidráulica; inclinômetros identificam deslocamentos internos; marcos, prismas e GNSS medem movimentos superficiais; radares terrestres oferecem alta frequência e cobertura de taludes; medidores de vazão avaliam drenagem; estações meteorológicas contextualizam recarga; e câmeras registram condições visuais. A seleção deve partir dos mecanismos plausíveis e das zonas críticas. Instalar grande número de instrumentos sem plano de interpretação apenas aumenta volume de dados.

Cada instrumento necessita de referência, faixa, resolução, calibração, localização, cadastro, proteção física e rotina de validação. Leituras anômalas devem ser confrontadas com redundâncias e condições de campo. Uma falha de comunicação não pode ser confundida com ausência de movimento; um salto de piezômetro pode decorrer de manutenção; e um radar pode responder a vegetação ou equipamentos. A governança da qualidade inclui trilha de alterações, responsáveis por validação e preservação do dado bruto.

O controle observacional transforma previsão em decisão. Para cada etapa da obra, o projeto define comportamento esperado e limites de atenção, alerta e paralisação. Esses níveis não devem ser escolhidos apenas por estatística histórica; precisam refletir margem de estabilidade, velocidade de deformação, poropressão admissível e tempo necessário para resposta. Um plano TARP - Trigger Action Response Plan - associa gatilho, ação, responsabilidade, comunicação e critério de retomada. Isso reduz imprevisto em situações de pressão operacional.

A figura esquemática mostra que a interpretação é integrada: o piezômetro informa o estado hidráulico; o inclinômetro, a deformação interna; o radar, a cinemática superficial; o sistema GNSS, deslocamentos tridimensionais; e os drenos, a resposta do rebaixamento. Nenhuma fonte isolada é suficiente. Quando dados convergem, a confiança aumenta; quando divergem, a divergência é em si um resultado que exige inspeção e revisão do modelo.

Arranjo esquemático de instrumentação durante as obras

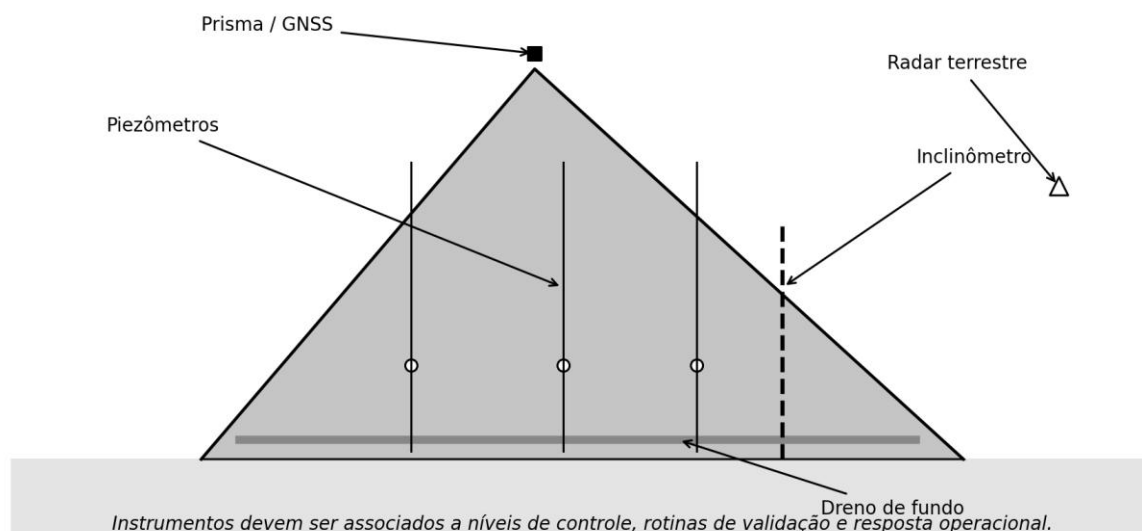


Figura 6 - Arranjo esquemático de instrumentação durante as obras

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 4 - Controles geotécnicos essenciais durante as obras

Controle	Indicador	Risco tratado	Resposta típica
Poropressão	Carga piezométrica e tendência	Redução de tensão efetiva e instabilidade não drenada	Ajustar drenagem, reduzir ritmo, paralisar frente e reavaliar
Deslocamento interno	Perfil inclinometria	Formação de zona de cisalhamento	Interditar área, reforçar, revisar sequência
Deslocamento superficial	Prisma, GNSS ou radar	Aceleração e movimentação de talude	Confirmar, inspecionar e aplicar TARP
Vazão e turbidez	Drenos e pontos de descarga	Obstrução, erosão interna ou carreamento	Limpar, investigar origem e controlar gradientes
Precipitação e nível	Pluviometria, reservatório e sumps	Recarga e sobrecarga hidráulica	Acionar contingência de chuva e bombeamento
Geometria executada	Topografia e nuvem de pontos	Desvio do projeto e sobre-escavação	Corrigir frente e atualizar modelo

Fonte: Elaboração própria (2026).

5.5 Destinação de rejeitos e recuperação ambiental

A engenharia de descaracterização precisa incorporar o destino final dos materiais desde a fase de alternativas. O balanço de massas diferencia rejeitos, solo, enrocamento, materiais contaminados e material apto a reaproveitamento. Volume geométrico não equivale ao volume transportado: empolamento, umidade, segregação e necessidade de condicionamento alteram frota, prazo e área. A disposição deve possuir estabilidade global e

interna, drenagem, controle de erosão, acesso e monitoramento. Transferir rejeitos de uma barragem para uma pilha mal projetada apenas desloca o risco.

O reaproveitamento pode reduzir passivo quando existe caracterização tecnológica, mercado, controle ambiental e regularidade de consumo. Filtragem e empilhamento a seco diminuem água livre, mas não eliminam riscos de instabilidade, erosão, poeira e drenagem ácida. A seleção deve considerar todo o ciclo de vida. Soluções apresentadas como “secas” podem manter saturação local ou comportamento contrátil se o controle construtivo for insuficiente.

A recuperação ambiental começa durante a obra, não após a última escavação. Solo orgânico deve ser segregado; superfícies precisam de proteção progressiva; drenagem deve controlar ravinas; águas de contato exigem monitoramento; e a revegetação deve ser compatível com substrato, clima e uso futuro. O PRAD deve conter indicadores mensuráveis, como cobertura, sobrevivência, erosão, qualidade da água e estabilidade superficial. Plantio sem manutenção e sem avaliação de função ecossistêmica não caracteriza recuperação.

Os impactos sobre comunidades incluem tráfego, ruído, poeira, restrições territoriais, percepção de risco e duração prolongada das obras. A comunicação técnica deve explicar etapas, alterações de cronograma e níveis de segurança sem minimizar incertezas. Participação social não se limita a divulgar um projeto pronto; ela pode revelar rotas sensíveis, usos de água e impactos cumulativos ignorados. A legitimidade do processo aumenta quando dados essenciais são acessíveis e quando reclamações têm resposta rastreável.

6 TECNOLOGIAS DIGITAIS COMO APOIO À ENGENHARIA

6.1 Sensoriamento remoto e InSAR

Imagens ópticas permitem observar mudanças de cobertura, expansão de áreas, condição de drenagem superficial e evolução de obras. O BrazilDAM demonstrou a possibilidade de organizar imagens Sentinel-2 e Landsat para detecção de barragens, com aplicações de redes neurais convolucionais (FERREIRA et al., 2020). Essa contribuição é relevante para inventário e priorização, mas sua acurácia em uma tarefa de classificação não equivale a diagnóstico de estabilidade. Resolução espacial, nuvens, sombras, sazonalidade e diferenças entre sítios limitam o uso operacional.

O InSAR mede deslocamentos na linha de visada do satélite a partir da fase do sinal radar. Em condições favoráveis, séries temporais podem indicar deformação milimétrica em extensas áreas. Das, Priyadarshana e Grebby (2023) aplicaram análise espectral a séries InSAR de Brumadinho e identificaram mudanças de regime anteriores à ruptura. O resultado mostra potencial de alerta complementar, porém não prova que o método, isoladamente, teria permitido prever o evento em tempo real. Geometria orbital, coerência, vegetação e decomposição do movimento precisam ser considerados.

Drones e levantamentos fotogramétricos produzem modelos de superfície e ortomosaicos detalhados, úteis para controle de volumes, geometria executada, erosão e inspeção de áreas de difícil acesso. A repetição de voos exige pontos de controle, parâmetros consistentes e gestão de versões. Diferenças entre modelos podem resultar de processamento e não de movimento real. Em obras de descaracterização, o ganho mais direto está no controle geométrico e no registro de fases, que podem ser confrontados com o projeto e o cronograma.

O sensoriamento remoto deve operar como camada de triagem e contexto. Uma anomalia espacial direciona inspeção e análise; uma tendência confirmada por instrumentação aumenta prioridade; e uma mudança de drenagem observada por imagem pode justificar revisão de campo. A cadeia adequada é dado remoto - validação - hipótese geotécnica - decisão. Inverter essa lógica e tratar uma classificação algorítmica como laudo de segurança cria risco técnico e jurídico.

6.2 Integração de dados e limites da inteligência artificial

A integração digital útil começa pelo cadastro de ativos e pela qualidade dos metadados. Instrumentos, seções, cotas, unidades, frequência, calibração e responsáveis

devem ser padronizados. Bancos de dados precisam preservar valores brutos, tratamentos e versões. Painéis devem permitir rastrear a origem de um indicador, e não apenas apresentar cores. A governança também define quem pode alterar níveis de controle, quem valida uma anomalia e como uma decisão é registrada.

Modelos de aprendizado de máquina podem classificar imagens, detectar outliers, preencher lacunas e apoiar a priorização. Seu desempenho, contudo, depende da representatividade dos dados e da estabilidade do domínio. Um modelo treinado em determinadas geometrias, minerais e condições climáticas pode perder acurácia em outra região. Eventos raros geram desequilíbrio de classes, e a ausência de falhas no conjunto histórico não significa segurança. Métricas médias podem ocultar falsos negativos inaceitáveis.

A explicabilidade é requisito prático. Equipes precisam compreender por que um alerta foi emitido e quais variáveis influenciaram o resultado. Em decisões de segurança, um algoritmo opaco não pode substituir julgamento responsável. O sistema deve possuir limiares conservadores, revisão humana e procedimento para falha. Também é necessário monitorar deriva, mudanças de sensor e atualização de modelos. “Inteligência” sem manutenção vira uma fonte adicional de incerteza.

A maior contribuição digital é fechar o ciclo entre dado, decisão e ação. Uma plataforma pode combinar precipitação, poropressão, deslocamento, avanço físico e restrições para gerar uma fila de inspeções e tarefas. O benefício deve ser medido por tempo de detecção, tempo de resposta, redução de retrabalho, aderência ao projeto e qualidade do registro. Termos como pipeline, benchmark ou edge computing somente são pertinentes quando vinculados a esses resultados. Por isso, nesta versão, a discussão tecnológica foi reduzida e reconectada ao processo de descaracterização.

7 ESTUDOS DE CASO E ANÁLISE COMPARATIVA

Os casos brasileiros confirmam que a carteira remanescente não é homogênea. O relatório de julho de 2026 apresenta estruturas com diferentes fases, prazos, condições de segurança e soluções finais. A Barragem B4, em Nova Lima, possuía prazo informado para outubro de 2028; Forquilha III, em Ouro Preto, apresentava horizonte até dezembro de 2035; e Doutor, em Ouro Preto, até novembro de 2029. A amplitude temporal reflete volumes, riscos, licenciamento, logística, necessidade de estabilização e complexidade de cada sítio (ANM, 2026a).

No caso da Barragem Doutor, a ANM informou acompanhamento de obras e fatores de segurança acima dos mínimos normativos no período do relatório. A informação é positiva, mas deve ser interpretada dentro da lógica de estágio: fatores precisam ser verificados para cada fase e confrontados com instrumentação. O caso ilustra que a fiscalização não se resume a verificar um prazo final; ela acompanha condições intermediárias e mudanças de projeto.

A Barragem B2, da Mosaic, foi apresentada como estrutura convertida em empilhamento drenado e considerada não suscetível à liquefação após avaliação. O caso é relevante porque mostra que a descaracterização pode resultar em outra configuração geotécnica, desde que a função de barragem seja eliminada e as propriedades sejam comprovadas. Ele também evidencia o papel da caracterização do material e da drenagem na definição regulatória.

B4 e Forquilha III representam projetos de maior duração e visibilidade. Em estruturas desse porte, a sequência pode exigir estabilização prévia, contenções secundárias, acessos específicos, extensos sistemas de drenagem e forte controle de interface. A comparação de prazos sem comparar escopo é inadequada. Indicadores de desempenho deveriam incluir avanço por fase, redução de risco, atendimento de gatilhos e qualidade do monitoramento, além do percentual físico.

Um caso técnico publicado sobre descaracterização de dique no Quadrilátero Ferrífero descreveu investigação com SPT, CPTu e ensaios laboratoriais, modelagem das etapas de escavação, monitoramento automatizado 24 horas, remoção parcial e construção de superfície com drenagem livre (VIZCARRA et al., 2023). O valor do estudo está em

mostrar a conexão entre investigação, simulação de fases, monitoramento e geometria final. Essa cadeia é mais transferível do que copiar a solução geométrica.

Os rompimentos de Fundão e Brumadinho funcionam como casos de falha e não como projetos de descaracterização. Fundão evidencia consequências ambientais de longo prazo e necessidade de monitoramento de bacia; Brumadinho evidencia liquefação e perda de vidas em ruptura súbita. Em conjunto, eles mostram que o processo de fechamento deve evitar a permanência de mecanismos de falha e também planejar recuperação e transparência. A descaracterização é, portanto, parte de uma mudança de gestão de rejeitos, não apenas resposta a um prazo legal.

Tabela 5 - Síntese comparativa de casos brasileiros

Caso	Situação/solução destacada	Lição técnica	Limitação da comparação
Doutor	Obras acompanhadas; estabilidade reportada acima dos mínimos no período	Verificar estabilidade e instrumentação em cada estágio	Dados públicos não substituem documentação detalhada do projeto
B2 - Mosaic	Conversão para empilhamento drenado, com avaliação de liquefação	A configuração final deve ser comprovada por propriedades e drenagem	Solução não é automaticamente replicável
B4	Programa com prazo até 2028 no relatório de julho de 2026	Projetos complexos exigem fases e controles de interface	Escopo e volume diferem de outras barragens
Forquilha III	Horizonte prolongado até 2035	Prazo pode refletir estabilização, logística, risco e licenciamento	Comparar apenas duração produz interpretação incompleta
Dique no Quadrilátero Ferrífero	Remoção parcial, conformação drenante e monitoramento 24 h	Integração investigação-modelagem-obra-monitoramento	Estudo de um sítio não define padrão universal

Fonte: Elaboração própria com base em ANM (2026a) e Vizcarra et al. (2023).

8 MARCO LEGAL, FISCALIZAÇÃO E GOVERNANÇA

8.1 PNSB, CRI, DPA e sistemas de informação

A Lei nº 12.334/2010 instituiu a PNSB e foi profundamente alterada pela Lei nº 14.066/2020. A aplicação depende do tipo de barragem e da competência do órgão fiscalizador. No campo da mineração, a ANM fiscaliza estruturas associadas a direitos minerários. Isso não significa que todos os temas sejam exclusivamente federais: licenciamento ambiental, recursos hídricos, defesa civil e uso do solo podem envolver órgãos estaduais ou municipais. A governança efetiva exige articulação sem diluir a responsabilidade do empreendedor pela segurança.

Na disciplina vigente em julho de 2026, barragens de mineração são abrangidas pela PNSB quando apresentam ao menos uma das seguintes características: altura do maciço igual ou superior a 15 m; capacidade total igual ou superior a 3 milhões de metros cúbicos; reservatório com resíduos perigosos; DPA médio ou alto; ou CRI alta. O enquadramento não deve ser confundido com a classificação. Uma estrutura pode entrar na PNSB por um único critério e, uma vez enquadrada, deve cumprir os instrumentos correspondentes.

O CRI expressa aspectos que influenciam a possibilidade de acidente, incluindo características técnicas, método construtivo, conservação e atendimento ao plano de segurança. O DPA representa a gravidade das consequências de um eventual rompimento, independentemente da probabilidade. Essa diferença é crucial: uma barragem com baixa probabilidade estimada, mas situada a montante de população, pode ter DPA alto; uma barragem com problemas técnicos, mas baixa exposição a jusante, pode apresentar CRI alto e DPA distinto. Fiscalização e priorização devem considerar ambos.

O SIGBM é o sistema informatizado da ANM para cadastro, declarações, inspeções e informações de segurança. O módulo público disponibiliza classificação atualizada, localização e histórico, constituindo ferramenta importante de transparência. A anotação do parecer que sugeria inserir dados “em tempo real” foi atendida com a identificação do sistema correto: SIGBM, e não SIGMINE. O SIGMINE disponibiliza geoinformação de processos minerários; o SIGBM é a base específica de barragens. A distinção evita erro conceitual e direciona o leitor à fonte adequada.

A qualidade do sistema depende de três camadas: declaração do empreendedor, auditoria técnica e fiscalização estatal. Dados públicos devem ser utilizados com data de corte

porque mudam com reclassificações e avanço das obras. Além disso, um painel é instrumento de acesso, não garantia de conformidade. Inspeções presenciais, análise de documentos, verificação da DCE e resposta a anomalias continuam essenciais.

Tabela 6 - Diferença entre CRI e DPA

Critério	Pergunta central	Elementos típicos	Implicação
Categoria de Risco - CRI	Quais condições influenciam a possibilidade de acidente?	Método, características técnicas, conservação, estabilidade, documentação e gestão	Prioriza correções, inspeções e controles sobre a probabilidade
Dano Potencial Associado - DPA	Quais seriam as consequências de uma falha?	Perdas de vidas, impactos sociais, ambientais e econômicos	Define exigências proporcionais à exposição, independentemente da probabilidade

Fonte: Elaboração própria com base em Brasil (2010, 2020) e ANM (2022).

8.2 Transição normativa entre as Resoluções ANM nº 95/2022 e nº 220/2025

A Resolução ANM nº 95/2022 consolidou atos anteriores e permaneceu como referência principal no momento desta pesquisa. Ela define barragem descaracterizada, método a montante, CRI, DPA, SIGBM, requisitos de cadastramento, inspeções e critérios de segurança. A Resolução nº 220/2025 estabeleceu nova disciplina, alinhada à Resolução CNRH nº 241/2024 e a padrões técnicos mais recentes, incluindo novas regras de classificação, revisão periódica por equipes independentes e maior padronização de termos.

É necessário evitar a afirmação de que a Resolução nº 220 já substituiu integralmente a nº 95. Os artigos 76 e 77 entram em vigor em 22 de abril de 2027, e os demais dispositivos em 2 de agosto de 2027. As Resoluções nº 95/2022, nº 130/2023 e nº 175/2024 serão revogadas a partir de 2 de agosto de 2027. Entre 22 de abril e 1º de agosto de 2027, permanecem os critérios de CRI e DPA e os demais dispositivos da Resolução nº 95, conforme regra de transição (ANM, 2025).

A atualização inclui linguagem de risco, controles críticos, Engenheiro de Registros, revisão periódica independente e requisitos proporcionais ao DPA. Para barragens a montante, a obrigação de descaracterização permanece. O texto da Resolução nº 220 reforça que, se os fatores de segurança estiverem abaixo dos critérios da própria resolução e da ABNT NBR 13.028:2024, o empreendedor deve estabilizar a barragem ou construir ECJ antes do início das obras de descaracterização. Esse dispositivo explicita a prioridade da segurança sobre o cronograma.

Para projetos em andamento durante a transição, a gestão documental deve identificar a norma aplicável a cada entrega, antecipar alterações de classificação e verificar impactos em instrumentação, estudos de ruptura, revisão periódica e sistemas de alerta. A atualização legal não deve ser tratada como revisão burocrática no fim do projeto; pode alterar escopo, critérios e custos. Contratos e cronogramas precisam prever gestão de mudanças regulatórias.



Figura 7 - Linha do tempo regulatória da segurança de barragens de mineração

Fonte: Elaboração própria com base em Brasil (2010, 2020), ANM (2019, 2022, 2025) e CNRH (2024).

Tabela 7 - Marco legal e institucional aplicável

Instrumento	Conteúdo relevante	Situação em julho de 2026
Lei nº 12.334/2010	Institui a PNSB, instrumentos e responsabilidades	Vigente, com alterações posteriores
Lei nº 14.066/2020	Altera a PNSB e proíbe barragens a montante	Vigente
Resolução ANM nº 95/2022	Consolida regras de segurança para barragens de mineração	Principal disciplina operacional, com alterações
Resolução CNRH nº 241/2024	Atualiza critérios gerais de classificação	Em processo de implementação pelos fiscalizadores
Resolução ANM nº 220/2025	Nova disciplina para barragens de mineração	Vigência escalonada em 2027
SIGBM	Cadastro e gestão de informações de barragens de mineração	Atualização contínua e acesso público

Fonte: Elaboração própria (2026).

8.3 Capacidade institucional e participação social

A efetividade da norma depende da capacidade de fiscalização. O relatório anual de 2025 informou 30 fiscalizações presenciais em barragens a montante e redução do estoque, mas o número deve ser lido frente à complexidade e à distribuição territorial das estruturas.

Recomenda-se ampliar equipes especializadas da ANM, manter formação continuada, garantir recursos para inspeções e consolidar apoio laboratorial e de geoprocessamento. A fiscalização deve combinar análise remota e presença em campo, sem que uma seja usada para justificar a redução da outra.

Independência técnica é outro requisito. Auditorias, revisões periódicas e declarações de estabilidade precisam evitar conflitos de interesse e repetição automática de equipes. A Resolução nº 220 avança ao prever maior independência na revisão periódica. Ainda assim, a governança corporativa deve assegurar que riscos relevantes alcancem níveis decisórios capazes de interromper produção ou obra. O GISTM reforça responsabilidade, transparência e consideração de comunidades em todo o ciclo de vida (UNEP; PRI; ICMM, 2020).

A participação das comunidades atingidas deve ocorrer por mecanismos permanentes de informação, escuta e resposta. Mapas de inundação, níveis de emergência, cronogramas de obra e resultados de monitoramento precisam ser comunicados em linguagem compreensível. Transparência não significa divulgar dados brutos sem contexto; significa explicar limites, ações e responsáveis. Canais de reclamação devem produzir registro, prazo e devolutiva.

A integração entre ANM, órgãos ambientais, defesa civil, municípios e instituições de pesquisa pode reduzir lacunas. Bases interoperáveis evitam divergência de localização, nome, classificação e condição. Protocolos de compartilhamento devem respeitar segurança da informação, mas não podem ser usados para ocultar dados de interesse público. A academia pode contribuir com métodos e avaliações independentes, desde que tenha acesso a dados suficientemente documentados.

9 FRAMEWORK E DIRETRIZES PROPOSTAS

A síntese deste estudo propõe um framework integrado organizado em seis etapas e cinco dimensões. As etapas são diagnóstico, estabilização prévia, projeto executivo, execução por fases, recuperação ambiental e monitoramento para descadastramento. As dimensões são geotécnica, digital, gerencial, ambiental-social e regulatória. O framework não substitui projeto; ele funciona como lista de verificação para impedir que uma dimensão seja tratada isoladamente.

No diagnóstico, devem ser consolidados dados “as built”, investigação, estado dos rejeitos, drenagem, instrumentação, riscos a jusante, licenças, áreas de disposição e interfaces. A saída é um modelo geológico-geotécnico com incertezas explícitas e um registro de riscos. Na estabilização prévia, o objetivo é criar condição segura para intervir. Isso pode envolver rebaixamento, reforço, bermas, ECJ, restrição de acesso e aumento de monitoramento.

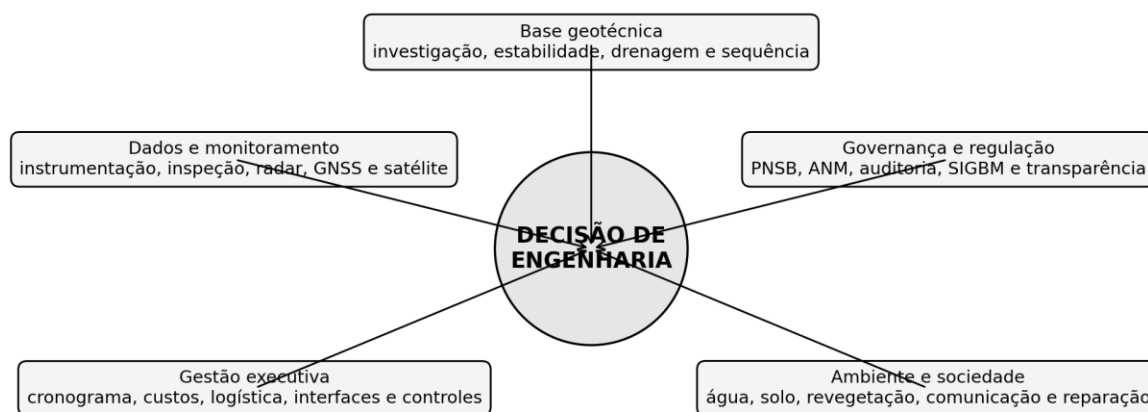
O projeto executivo deve conter alternativa selecionada, critérios de projeto, análises por etapa, balanço de massas, logística, drenagem temporária e final, instrumentação, TARP, plano de qualidade, plano ambiental e cronograma integrado. Deve também definir gatilhos de revisão: resultados de ensaios, comportamento diferente do previsto, chuvas, desvios geométricos ou mudança regulatória. O projeto precisa ser vivo, mas mudanças não podem ocorrer sem justificativa, responsável e avaliação de risco.

Na execução, cada frente é liberada por critérios objetivos. Reuniões de produção devem incorporar a condição geotécnica, e não apenas volumes. Painéis digitais podem apresentar poropressão, deslocamento, chuva, avanço e pendências; porém, a autorização deve permanecer com profissionais designados. A rastreabilidade inclui versão de projeto, levantamento da geometria, inspeção, ocorrências e medidas corretivas.

A recuperação ambiental deve acompanhar a liberação de áreas. Indicadores de água, solo, vegetação e erosão são acompanhados junto com estabilidade. No monitoramento pós-obra, verifica-se se o sistema de drenagem e a estrutura remanescente mantêm o desempenho sob sazonalidade e eventos. O pedido de descadastramento deve ser instruído com evidências, e o encerramento da obrigação regulatória não elimina compromissos de fechamento de mina e recuperação.

As recomendações institucionais são: fortalecer o quadro técnico da ANM; integrar bases de ANM, órgãos ambientais e defesa civil; padronizar dados mínimos de instrumentação e obras; exigir monitoramento automatizado proporcional ao risco, sem dispensar inspeção; publicar indicadores de avanço e redução de risco; fomentar pesquisa aplicada; e garantir comunicação contínua com comunidades. No plano empresarial, recomenda-se governança independente, Engenheiro de Registros quando aplicável, auditoria de modelos e orçamento protegido para segurança.

Framework integrado para programas de descaracterização



O dado digital é evidência complementar; a decisão permanece vinculada ao modelo geotécnico, à inspeção e à responsabilidade técnica.

Figura 8 - Framework integrado para programas de descaracterização

Fonte: Elaboração própria (2026).

Tabela 8 - Matriz de recomendações e horizonte de implementação

Horizonte	Ação prioritária	Responsável principal	Indicador
Curto prazo	Revisar modelo geotécnico, instrumentação e TARP de cada estrutura	Empreendedor e responsável técnico	Cobertura dos mecanismos críticos e tratamento de anomalias
Curto prazo	Integrar cronograma de obra, licenças, massas e controles geotécnicos	Gestão do projeto	Marcos de liberação e desvios justificados
Curto/médio	Ampliar fiscalização presencial e capacidade de análise da ANM	Poder público	Inspeções por criticidade e tempo de resposta
Médio prazo	Interoperar SIGBM com dados ambientais e de defesa civil	ANM e órgãos parceiros	Consistência cadastral e redução de duplicidades
Médio prazo	Padronizar dados e APIs para instrumentação crítica	Regulador e setor	Rastreabilidade, qualidade e disponibilidade

Horizonte	Ação prioritária	Responsável principal	Indicador
Longo prazo	Consolidar pesquisa aplicada e avaliação pós-descaracterização	Universidades, ANM e empresas	Lições incorporadas em normas e projetos

Fonte: Elaboração própria (2026).

10 CONCLUSÃO

A questão de pesquisa perguntava como garantir descaracterização efetiva e segura, com recuperação ambiental e justiça social. A resposta construída é que não existe uma tecnologia ou método único capaz de garantir esse resultado. A efetividade depende de um processo sequenciado, no qual diagnóstico e estabilidade precedem a produção; o projeto considera estados temporários; a água é controlada; a instrumentação está ligada a gatilhos; o destino dos rejeitos é tecnicamente resolvido; a recuperação ocorre de forma progressiva; e o descadastramento é sustentado por desempenho comprovado.

As estratégias que tornam o processo mais eficiente são aquelas que reduzem incerteza antes de mobilizar grandes frentes: investigação orientada aos mecanismos de falha, modelagem por etapas, drenagem e estabilização prévias, balanço de massas, logística licenciada, marcos de liberação e TARP. Eficiência não significa apenas terminar mais rápido. Significa reduzir retrabalho, evitar paralisações emergenciais, concentrar recursos nos controles críticos e diminuir risco a cada fase. Cronogramas devem evidenciar essa redução, e não apenas volume escavado.

As tecnologias digitais apoiam esse objetivo quando ampliam cobertura e rastreabilidade. Sensoriamento remoto, InSAR, drones, radar, GNSS e algoritmos podem detectar mudanças e priorizar inspeções. Sua utilização deve ser complementar, validada e explicável. A decisão de segurança permanece vinculada à interpretação geotécnica, à inspeção e à responsabilidade profissional. O trabalho, portanto, rejeita tanto o tecnossolucionismo quanto a recusa das ferramentas digitais.

No campo regulatório, a PNSB, a Lei nº 14.066/2020 e a Resolução ANM nº 95/2022 estruturam a obrigação e os controles. A Resolução nº 220/2025 introduz atualização relevante, mas sua vigência principal ocorre em 2027. A distinção entre CRI e DPA, a utilização correta do SIGBM e a atualização da classificação são essenciais. Para aumentar a efetividade, é necessário fortalecer a ANM com mais especialistas e inspeções, integrar bases públicas, garantir independência de revisões e padronizar dados de monitoramento.

Os casos analisados mostram que remoção total, reconformação, reforço e transformação em empilhamento drenado podem ser soluções legítimas em contextos distintos. O elemento comum não é a geometria, mas a cadeia de evidências: investigação, análise, projeto, execução monitorada e verificação. Prazos longos não devem ser

normalizados sem crítica, mas também não podem ser comparados sem escopo. A fiscalização precisa acompanhar redução de risco e estágios intermediários.

Como contribuição, foi proposto um framework que integra cinco dimensões e seis etapas. Ele oferece um roteiro para estruturar programas, revisar projetos e comunicar decisões. Sua aplicação requer adaptação ao sítio e não dispensa estudos específicos. Pesquisas futuras devem avaliar desempenho pós-descaracterização, comparar custos e riscos de alternativas, desenvolver métricas públicas de redução de risco e testar modelos digitais em bases independentes. A maturidade científica do tema avançará quando dados, modelos e decisões puderem ser auditados em conjunto.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.** Brasília, DF: ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf/view>. Acesso em: 21 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução ANM nº 220, de 16 de outubro de 2025. Estabelece a disciplina aplicável às barragens de mineração.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ed. 199, p. 43, 17 out. 2025. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-220-de-16-de-outubro-de-2025-663111294>. Acesso em: 21 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Report trimestral: descaracterização de barragens a montante - julho de 2026.** Brasília, DF: ANM, 2026a. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/descaracterizacao-de-barragens-a-montante>. Acesso em: 21 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Relatório anual de segurança de barragens de mineração 2025.** Brasília, DF: ANM, 2026b. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-anuais-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao-2>. Acesso em: 21 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM): versão pública.** Brasília, DF: ANM, 2026c. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/aceso-a-sistemas/sistema-integrado-de-gestao-de-barragens-de-mineracao-sigbm-versao-publica/sistema-integrado-de-gestao-de-barragens-de-mineracao-sigbm-versao-publica>. Acesso em: 21 jul. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028:2024 — Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água** — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BALANIUK, Remis; ISUPOVA, Olga; REECE, Steven. Mining and tailings dam detection in satellite imagery using deep learning. **Sensors, Basel**, v. 20, n. 23, art. 6936, 2020. DOI: 10.3390/s20236936. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20236936>. Acesso em: 21 jul. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 21 jul. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.** Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 1 out. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em: 21 jul. 2026.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). **Resolução nº 241, de 10 de setembro de 2024. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens.** Brasília, DF: CNRH, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/cnrh-no-241-2024.pdf/view>. Acesso em: 21 jul. 2026.

DAS, S.; PRIYADARSHANA, A.; GREBBY, S. Monitoring the risk of a tailings dam collapse through spectral analysis of satellite InSAR time-series data. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 38, p. 2911–2926, 2024. DOI: [10.1007/s00477-024-02713-3](https://doi.org/10.1007/s00477-024-02713-3). Acesso em: 21 jul. 2026.

FERREIRA, Edemir et al. BrazilDAM: a benchmark dataset for tailings dam detection. The International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-3/W12-2020, p. 343-348, 2020. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-343-2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-343-2020>. Acesso em: 21 jul. 2026.

HAMZE-GUILART, Moustafa et al. Analyzing the effect of drainage on the stability of tailings dams using the interpretation of cross-correlations. **Sensors, Basel**, v. 25, n. 6, art. 1833, 2025. DOI: 10.3390/s25061833. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s25061833>. Acesso em: 21 jul. 2026.

MORAGA, Jaime; GURKAN, Gurbet; DUZGUN, H. Sebnem. Monitoring the impacts of a tailings dam failure using satellite images. In: **USSD ANNUAL CONFERENCE**, 2020, Denver. Anais [...]. Denver: United States Society on Dams (USSD), 2020. v. 2020, p. 1-12. Disponível em: https://damfailures.org/wp-content/uploads/2022/05/IR_Feijao-Dam.pdf. Acesso em: 21 jul. 2026.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); PRINCIPLES FOR RESPONSIBLE INVESTMENT (PRI); INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). **Global Industry Standard on Tailings Management**. Nairobi: UNEP, 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/global-industry-standard-tailings-management>. Acesso em: 21 jul. 2026.

VIZCARRA, Gino Omar Calderon et al. Case study: decharacterization of tailings dike in the Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil. In: **TAILINGS AND MINE WASTE 2023**, Vancouver. **Proceedings** [...]. Vancouver: UBC, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378872556_Case_Study_Decharacterization_of_Tailings_Dike_in_the_Iron_Quadrangle_Minas_Gerais_Brazil. Acesso em: 21 jul. 2026.