

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/9

Análise de Alternativas de Descaracterização de Barragem por Meio da Análise de Múltiplas Variáveis (AMV)

Mariana Martins Corrêa

Engenheira de Minas, J&F Mineração, Corumbá, Brasil, mariana.correa@jfmin.com.br

Guilherme Roberto Slongo

Engenheiro Civil, TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil, gslongo@tec3engenharia.com.br

Gabriel Wilke Saliba

Engenheiro de Minas, J&F Mineração, Corumbá, Brasil, gabriel.saliba@jfmin.com.br

Hernani Mota de Lima

Engenheiro de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, hernani.lima@ufop.edu.br

RESUMO: O estudo investigou opções de descaracterização de uma barragem de rejeito usando Análise de Múltiplas Variáveis (AMV), uma abordagem comum em fechamento de minas, avaliando alternativas de forma qualitativa e quantitativa para garantir a sustentabilidade. Objetivou-se analisar vantagens e desvantagens considerando critérios técnicos, ambientais e socioeconômicos. A AMV desdobra-se em identificação, quantificação e avaliação dos impactos, organizados em variáveis, subvariáveis e indicadores. Variáveis técnicas e ambientais receberam a maior ponderação, destacando-se pela ênfase na segurança e reintegração da biodiversidade. A análise envolve cálculos de médias ponderadas para determinar a alternativa mais adequada. Uma das alternativas foi considerada via AMV como a mais vantajosa, priorizando a estabilidade e a redução de riscos. Isso foi alcançado através da eliminação do acúmulo de água, da remoção parcial do maciço, da integração adequada da estrutura desativada com o entorno, da reconformação do terreno e da revegetação, visando alcançar um risco residual mínimo.

PALAVRAS-CHAVE: Descaracterização, Barragem de Rejeitos, Análise de Múltiplas Variáveis, Sustentabilidade, Estabilidade.

ABSTRACT: The study investigated options for decommissioning a dam using Multiple Accounts Analysis (MAA), a commonly employed approach in mine closure, assessing alternatives qualitatively and quantitatively to ensure sustainability. The objective was to analyze the advantages and disadvantages considering technical, environmental, and socioeconomic criteria. MAA unfolds in identification, quantification, and evaluation of impacts, organized into variables, sub-variables, and indicators. Technical and environmental variables received the highest weighting, standing out for their emphasis on safety and biodiversity reintegration. The analysis involves weighted average calculations to determine the most suitable alternative. One of the alternatives was considered via AMV as the most advantageous, prioritizing stability and risk reduction. This was achieved through the elimination of water accumulation, partial removal of the massif, proper integration of the deactivated structure with the surroundings, land reshaping, and revegetation, aiming to achieve minimal residual risk.

KEYWORDS: Decommissioning, Tailings Dam, Multiple Accounts Analysis, Sustainability, Stability.

1 INTRODUÇÃO

Em geral, um projeto de mineração utiliza o sistema de Análise de Múltiplas Variáveis (AMV) como metodologia para a avaliação da sustentabilidade, tanto como uma plataforma de envolvimento das partes interessadas, quanto para a avaliação conjunta dos indicadores. O processo AMV permite a inclusão de

indicadores e valores para questões intangíveis (como estética, risco etc.) e questões tangíveis (como custos, estabilidade e segurança etc.) em uma avaliação de alternativas. Isto posto, a AMV foi proposta pelos autores Robertson e Shaw (2006) para avaliar qualitativa e quantitativamente, diferentes alternativas sob o viés da sustentabilidade, frente a projetos de fechamento de mina por meio de indicadores e metodologia de comparação de opções previamente propostas.

Em especial, a descaracterização de barragens de mineração envolve uma série de riscos técnicos, ambientais e socioeconômicos. A análise de múltiplas variáveis permite a identificação e avaliação desses riscos de forma integrada. Isso inclui fatores como a estabilidade da estrutura, a qualidade da água, a gestão de rejeitos, a erosão do solo e os impactos nas comunidades locais. Ao considerar todas essas variáveis em conjunto, os engenheiros e tomadores de decisão podem desenvolver estratégias de descaracterização que abordem efetivamente esses desafios complexos.

O objetivo deste estudo foi avaliar as vantagens e desvantagens das alternativas propostas para a descaracterização de uma barragem de rejeito, levando-se em consideração critérios técnicos, ambientais e socioeconômicos, bem como auxiliar o empreendedor nas fases posteriores do projeto conceitual. Cumpre observar que nesta análise os riscos relacionados ao custo de cada alternativa não foram abordados de forma quantitativa.

2 METODOLOGIA

Em linhas gerais, a AMV desdobra-se em três etapas fundamentais:

1. Identificar os impactos (positivos e negativos) para ser incluídos na avaliação;
2. Quantificar os impactos (positivos e negativos) para cada uma das alternativas;
3. Avaliar os impactos combinados ou cumulativos para cada alternativa e realizar uma comparação entre elas para desenvolver uma lista de preferência (por ranking, escalas e ponderações) das opções.

Os passos 1 e 2 consistem em toda a base da metodologia. Esses passos fundamentam-se de uma lista explícita de potenciais impactos (negativos ou positivos) que devem ser considerados na análise e organizados no que Robertson e Shaw (2006) chamaram de variáveis, subvariáveis e indicadores de impactos das várias alternativas.

Uma **variável** é um ponto do projeto relevante e tipicamente caracteriza-se por aspectos técnico, econômico, ambiental e socioeconômico. Dentro de cada variável listam-se os impactos referentes a cada variável, denominados de **subvariáveis**. Subsequentemente, as subvariáveis são divididas em **indicadores**. Indicadores são formas de medir os impactos qualitativamente e/ou quantitativamente sob a visão dos *stakeholders*.

Definidas as variáveis, subvariáveis e os indicadores, pode-se ranquear, escalar e ponderar todos os pontos para que sejam avaliados. Ranquear significa escolher, dentre as alternativas, a que recebe o melhor indicador para aquela subvariável daquela variável. Escalar significa atribuir um indicador para cada alternativa. Por fim, ponderar significa avaliar o grau de importância e influência que cada variável e subvariável apresenta no seu projeto e em relação às demais.

A seguir estão definidas as variáveis, subvariáveis e os indicadores para a análise apresentada neste documento. A Figura 1 apresenta os valores utilizados como escala para auxiliar na tomada de decisão.

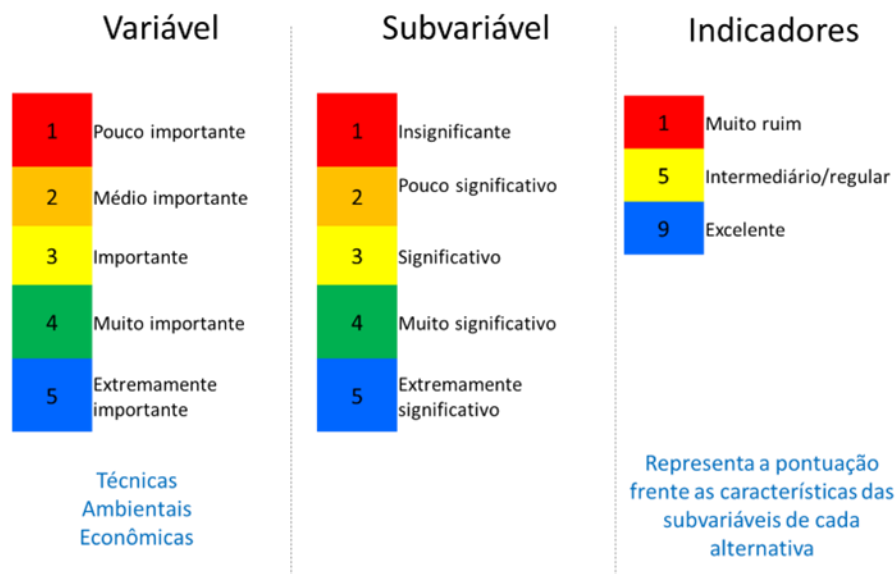


Figura 1. Escalas utilizadas como referência para a atribuição de pontos para as alternativas em estudo.

2.1 Alternativas Avaliadas

As alternativas para a descaracterização da barragem de rejeitos deste estudo, foram propostas no sentido de garantir a estabilidade da estrutura no longo prazo e reduzir eventuais riscos (geotécnicos e hidráulicos) associados.

Como atendimento ao projeto de descaracterização da barragem foram considerados os itens:

- Eliminação do acúmulo de água do reservatório (não ter mais a formação de lago);
- Remoção parcial do maciço;
- Manutenção do funcionamento do poço existente na crista da barragem;
- Garantia da adequada integração da estrutura desativada com a região do entorno, incluindo a reconformação do terreno e revegetação das áreas afetadas;
- Busca por um risco residual tão mínimo quanto for possível.

Deste modo, para o projeto de descaracterização, foram propostas três alternativas. Nos itens a seguir serão abordadas as particularidades de cada alternativa, contudo, cabe citar que há algumas atividades comuns as três opções, sendo elas:

- Fechamento da área do sump disposto na margem esquerda do reservatório (ponto atual de lançamento) e remoção da fauna (caso necessário);
- Demolição das estruturas de concreto com o correto descarte dos resíduos oriundos da demolição;
- Após as obras de descaracterização deverá ser realizado o tratamento da área e revegetação de todo o reservatório com espécies nativas da região;
- Monitoramento e acompanhamento do desempenho das obras, com eventuais necessidades de manutenções preventivas e/ou corretivas.

2.1.1 Alternativa 1

Consiste no corte do maciço com declividade de 10H:1V, remoção de duas bermas (aproximadamente redução de 12 m na altura do maciço), implantação de um sistema de drenagem superficial periférico ao reservatório, direcionando a drenagem para jusante do maciço remanescente, regularização do reservatório (com rampas de 3% no rejeito) direcionando a declividade para os canais periféricos, manutenção do sump existente para manejo de sedimentos e/ou descarga de rejeitos provenientes do processo de filtragem e reforço do talude de jusante com declividade de 5H:1V.

2.1.2 Alternativa 2

Consiste no corte do maciço com declividade de 5H:1V, remoção de duas bermas (aproximadamente redução de 12 m na altura do maciço), implantação de um sistema de drenagem superficial periférico ao reservatório, direcionando a drenagem para jusante do maciço remanescente, regularização do reservatório (com rampas de 3% no rejeito) direcionando a declividade para os canais periféricos, manutenção do sump existente para manejo de sedimentos e/ou descarga de rejeitos provenientes do processo de filtragem e reforço do talude de jusante com declividade de 5H:1V.

2.1.3 Alternativa 3

Consiste no corte do maciço com declividade de 5H:1V, remoção de duas bermas (aproximadamente redução de 12 m na altura do maciço), implantação de um sistema de drenagem superficial central, direcionando a drenagem para jusante do maciço remanescente, regularização do reservatório (com rampas de 3% no rejeito) direcionando a declividade para o canal central, manutenção do sump existente para manejo de sedimentos e/ou descarga de rejeitos provenientes do processo de filtragem e reforço do talude de jusante com declividade de 5H:1V.

2.2 Variáveis

A análise das alternativas de descaracterização da barragem utilizou as variáveis indicadas na Tabela 1. Na mesma tabela também estão definidos os pesos (ponderações) de cada variável. Esses pesos variaram de 1 a 5, onde 1 significa “pouco importante” e 5 significa “extremamente importante”.

Tabela 1. Variáveis e respectivos pesos para a avaliação das alternativas da descaracterização da barragem.

Variáveis	Ponderação (peso)
Técnicas	5
Ambientais	5
Econômica	4

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

A variável econômica foi avaliada com base nos volumes de terraplenagem e de forma qualitativa sob o ponto de vista dos custos relacionados à manutenção pós-descaracterização. Para essa variável, foi atribuída uma ponderação igual a 4.

2.3 Subvariáveis

As subvariáveis devem ser analisadas sob cada variável, sejam elas: técnicas, ambientais e econômicas. Essas subvariáveis estão apresentadas na Tabela 2 juntamente com os pesos. Os pesos foram divididos de 1 a 5, onde 1 significa “pouco significativo” e 5 “extremamente significativo”.

Tabela 2. Peso das subvariáveis em relação às variáveis.

Variáveis	Peso Variáveis	Subvariáveis	Peso Subvariáveis
Técnicas	5	Dificuldade de construção	5
		Segurança hidráulica	5
		Segurança geotécnica	5
		Desempenho no longo prazo	5
		Drenagem	5
		Poço de Bombeamento	5
		Remoção de Rejeitos	4

		Serviços de terraplenagem	5
		Campanha de ensaios complementares	4
		Operação e manutenção pós descaracterização	4
Ambientais	5	Supressão Vegetal	5
		Recuperação Vegetal	4
		Qualidade da água superficial	5
		Qualidade da água subterrânea	5
		Estabilização de Sedimentos	5
		Uso da área pós descaracterização	3
Econômicas	4	Custo para descaracterização	5
		Remineralização do rejeito	2
		Custo Operacional pós-descaracterização	5

2.4 Indicadores

Os indicadores são as pontuações das alternativas para determinada subvariável, e neste documento, variaram entre 1 (muito ruim), 5 (intermediário/regular) e 9 (excelente). Portanto, a atribuição de 9 pontos para uma alternativa não quer dizer que ela seja “excelente”, mas sim que, dentre as alternativas avaliadas, foi a que foi melhor classificada. Ressalta-se que as pontuações foram atribuídas de forma isolada para cada variável e subvariável.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos indicadores para cada alternativa e uma breve descrição do item avaliado.

Tabela 3. Indicadores das alternativas.

Variáveis	Peso Variáveis	Subvariáveis	Descrição de como o item foi avaliado	Peso Subvariáveis	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03
Técnicas	5	Dificuldade de construção	Há dificuldades de construção inerentes a alternativa? Ex: Escavação de rejeito saturado...	5	5	9	9
		Segurança hidráulica	Há algum risco hidráulico? Pode haver algum problema nos canais de drenagem (interferência com sump operando)?	5	9	7	5
		Segurança geotécnica	Há possibilidade de ruptura dos taludes?	5	9	8	8
		Desempenho no longo prazo	Qual alternativa há um maior desempenho?	5	9	9	5
		Drenagem	Há garantia de direcionamento do fluxo através dos sistemas de drenagem? Problemas com recalques diferenciais?	5	9	9	5
		Poço de Bombeamento	As obras de descaracterização podem impactar no poço existente?	5	5	8	8

Variáveis	Peso Variáveis	Subvariáveis	Descrição de como o item foi avaliado	Peso Subvariáveis	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03
		Remoção de Rejeitos	Qual o volume de rejeito removido do reservatório?	4	1	5	5
		Serviços de terraplenagem	O volume de corte no maciço é igual para todas as alternativas?	5	5	9	9
		Campanha de ensaios complementares	Alguma alternativa vai demandar uma campanha mais robusta de ensaios?	4	5	9	9
		Operação e manutenção pós descaracterização	Qual das alternativas irá apresentar a maior necessidade de atividade de manutenção pós-descaracterização?	4	9	9	5
		Supressão Vegetal	A área de supressão vegetal é igual para todas as alternativas?	5	9	9	9
		Recuperação Vegetal	A área de recuperação vegetal é igual para todas as alternativas?	4	5	5	5
		Qualidade da água superficial	A qualidade da água superficial pode ser prejudicada no período pós descaracterização até a consolidação/estabilização das obras?	5	9	9	5
Ambientais	5	Qualidade da água subterrânea	A manutenção dos rejeitos no reservatório pode interferir na qualidade da água subterrânea (aumento de concentração de minerais)?	5	5	5	5
		Estabilização de Sedimentos	A manutenção dos rejeitos no reservatório pode interferir no prazo de estabilização dos sedimentos?	5	9	9	5
		Uso da área pós descaracterização	A área após as obras de descaracterização tem potencial para uso futuro?	3	5	5	2
Econômicas	4	Custo para descaracterização	Qual das alternativas tem maior tempo e custo de execução?	5	5	8	9
		Remineralização do rejeito	O rejeito removido pode ser reprocessado e gerar renda?	2	9	5	5

Variáveis	Peso Variáveis	Subvariáveis	Descrição de como o item foi avaliado	Peso Subvariáveis	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03
		Custo Operacional pós-descaracterização	Qual das alternativas irá apresentar maior custo operacional?	5	1	5	1

3 RESULTADO DAS MÚLTIPLAS VARIÁVEIS

Após a definição das variáveis, subvariáveis e indicadores, pode-se realizar os cálculos para verificar qual a alternativa que melhor se adequou às variáveis e subvariáveis. Os cálculos para definição das pontuações finais das alternativas constam de médias ponderadas onde:

- Primeiramente, deve-se realizar a média ponderada para as subvariáveis (equação 1);
- Em seguida, com o resultado da média das subvariáveis é realizada a média ponderada das variáveis (equação 2), de modo a se obter o resultado final.

$$Mp_{sub} = \frac{p_{sub1} * x_1 + p_{sub2} * x_2 + \dots + p_{subn} * x_n}{p_{sub1} + p_{sub2} + \dots + p_{subn}} \quad (1)$$

$$Mp_{var} = \frac{p_{var1} * x_1 + p_{var2} * x_2 + \dots + p_{varn} * x_n}{p_{var1} + p_{var2} + \dots + p_{varn}} \quad (2)$$

A alternativa em vantagem é aquela que obtiver a maior pontuação. A Tabela 4 apresenta o resultado para cada alternativa.

Tabela 4. Resultado da AMV para as alternativas de descaracterização da barragem de rejeitos.

Variáveis	Peso Variáveis	Alternativa 01	Alternativa 02	Alternativa 03
Técnicas	5	6,70	8,23	6,83
Ambientais	5	7,22	7,22	5,41
Econômicas	4	4,00	6,25	5,00
Total		6,12	7,31	5,80

Levando-se em consideração todas as variáveis atribuídas neste documento para a avaliação das alternativas para a descaracterização da barragem, pode-se dizer que a Alternativa 2 é a mais adequada.

Ressalta-se que a avaliação apresentada trata-se de uma elucidação qualitativa dos itens avaliados pelos autores. Cabe ainda uma ponderação da equipe técnica do empreendedor, quanto à pontuação atribuída, avaliando as necessidades e demandas da empresa, para que seja realizada a escolha da alternativa adequada e dada a sequência para a próxima fase de projeto conceitual.

4 CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentadas três alternativas para a descaracterização de uma barragem de rejeitos. O intuito foi descrever cada uma delas, apresentando as suas principais características, os seus prós e contras, de forma a auxiliar o empreendedor na escolha da melhor alternativa a ser seguida para a etapa de projeto conceitual.

Para todas as opções propostas foram consideradas soluções no intuito de maximizar a segurança da estrutura pós-descaracterização e minimizar os impactos ambientais, reintegrando a área afetada ao meio ambiente.

As alternativas foram avaliadas isoladamente e comparativamente pelo método da Análises de Múltiplas Variáveis (AMV), no intuito de se obter uma análise clara e consolidada sobre todos os impactos inerentes ao projeto de descaracterização.

A alternativa que apresentou melhor desempenho frente às variáveis e subvariáveis foi a Alternativa 2. Essa alternativa demonstrou ser mais vantajosa frente as outras, principalmente, por apresentar as variáveis técnicas e econômicas melhores pontuadas.

Ressalta-se que a análise realizada nesse documento teve cunho preliminar, tendo em vista as incertezas atribuídas a cada uma das alternativas. Ademais, este estudo pretende apenas auxiliar de forma qualitativa o empreendedor quanto à tomada de decisão, para que seja dado o prosseguimento das próximas etapas do projeto de descaracterização.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a J&F Mineração pelo apoio e liberação dos dados para publicação e a TEC3 pela elaboração do projeto de descaracterização da barragem de rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Robertson, A., Shaw, S. (2006) *Use of the multiple-accounts-analysis process for sustainability optimization*. Mining Engineering, 58, 33-33.