



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VILDEMAR SOARES DA COSTA

**SELEÇÃO DE LOCAIS PARA PILHA DE REJEITOS PELO MÉTODO DE ANÁLISE
HIERÁRQUICA**

CRATEÚS
2023

VILDEMAR SOARES DA COSTA

SELEÇÃO DE LOCAIS PARA PILHA DE REJEITOS PELO MÉTODO DE ANÁLISE
HIERÁRQUICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Márcio Avelino de Medeiros.

CRATEÚS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C876s Costa, Vildemar Soares da.

Seleção de locais para pilha de rejeitos pelo Método de Análise Hierárquica / Vildemar Soares da Costa. – 2023.

65 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2023.

Orientação: Prof. Me. Márcio Avelino de Medeiros.

1. Pilha de rejeitos. 2. Método de análise hierárquica. 3. Impacto locacional. I. Título.

CDD 620

VILDEMAR SOARES DA COSTA

SELEÇÃO DE LOCAIS PARA PILHA DE REJEITOS PELO MÉTODO DE ANÁLISE
HIERÁRQUICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Márcio Avelino de Medeiros (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Thayres de Sousa Andrade
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Weber Anselmo dos Ramos Souza
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e por me permitir realizar mais um sonho.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Vídia Soares e Pedro Aurélio, cujos ensinamentos carregarei ao longo de toda a minha existência.

Sou grato à Antônia Célia, carinhosamente conhecida como mãe Toinha, por sua notável contribuição para minha educação e desenvolvimento.

Ao meu irmão, Francélio Soares, dedico meus sinceros agradecimentos pelos valiosos conselhos que desempenharam um papel fundamental em minha jornada até o momento presente.

Um agradecimento especial é dedicado à minha irmã, Antônia Nara, pelo apoio incondicional durante todo o percurso acadêmico. Sua generosidade ao me oferecer um lar e criar condições para que eu pudesse continuar no curso é inestimável.

À minha namorada, Maria Darlene, expresso minha sincera gratidão pela atenção e cuidado nos momentos em que mais necessitei. Seu apoio foi fundamental.

Aos amigos Wellington, Vitor e Evandro, que tornaram os dias na universidade mais leves com sua amizade e companheirismo, agradeço de coração.

Por fim, estendo minha gratidão ao meu orientador, professor Márcio Avelino, pela sua disponibilidade e incentivo constantes, os quais foram cruciais para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O aumento na geração de resíduos provenientes de processos minerários trouxe consigo inúmeros problemas relacionados à destinação do material descartado. Acidentes envolvendo métodos de disposição convencionais, como barragens de rejeitos, passaram a ser cada vez mais frequentes devido, principalmente, ao grande volume de material armazenado nessas estruturas. Com isso, alternativas mais seguras ganharam notoriedade, entre elas as Pilhas de Disposição de Rejeitos (PDR). Neste trabalho, os esforços se concentraram na seleção de locais para implantação de uma pilha, que irá servir como alternativa de armazenamento aos rejeitos provenientes de barragens descomissionadas. A pesquisa considerou a necessidade de descaracterização de estruturas em risco de rompimento. Como objeto deste estudo, foram escolhidas três barragens construídas pelo método de montante, localizadas na cidade de Ouro Preto – MG. O Método de Análise Hierárquica (MAH) contribuiu para a avaliação de múltiplos critérios que foram definidos com o objetivo de encontrar a alternativa locacional onde a pilha causaria maiores impactos. Ao final do processo, a análise hierárquica forneceu os pesos individuais das alternativas, a partir dos quais foi possível extrair a sequência dos melhores locais para implantação da PDR.

Palavras-chave: Pilha de rejeitos; Método de análise hierárquica; Impacto locacional.

ABSTRACT

The increase in waste generation from mining processes has brought numerous problems related to the disposal of discarded material. Accidents involving conventional disposal methods, such as tailings dams, have become increasingly frequent, primarily due to the large volume of material stored in these structures. As a result, safer alternatives have gained prominence, including Tailings Disposal Piles (TDP). This study focused on selecting locations for implementing a pile that will serve as a storage alternative for tailings from decommissioned dams. The research considered the need for decharacterization of structures at risk of rupture. Three upstream-constructed dams located in the city of Ouro Preto, MG, were chosen as the subject of this study. The Analytic Hierarchy Process (AHP) contributed to the evaluation of multiple criteria defined to identify the locational alternative where the pile would have the greater impact. At the end of the process, the hierarchical analysis provided the individual weights of the alternatives, from which the sequence of the best locations for implementing the TDP was derived.

Keywords: Tailings pile; Analytic Hierarchy Process; Locational impact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Razões médias entre rejeitos e produtos gerados	12
Figura 2 - Etapas de descaracterização de barragens de rejeitos	14
Figura 3 - Fluxograma típico de tratamento de minério	17
Figura 4 - Consistência dos rejeitos e formas de disposição	19
Figura 5 - Esquema de direcionamento geral de rejeitos na mineração	20
Figura 6 - Alçamento de barragem de rejeitos pelo método de montante.....	21
Figura 7 - Alçamento de barragem de rejeitos pelo método de jusante.....	22
Figura 8 - Alçamento de barragem de rejeitos pelo método de linha de centro	23
Figura 9 - Empilhamento drenado	24
Figura 10 - Pilha de rejeito filtrado (dry stack)	26
Figura 11 - Tendências de utilização de rejeitos desaguados na mineração.....	27
Figura 12 - Modelo de hierarquização para avaliação de alternativas	30
Figura 13 - Escala de julgamento paritário	30
Figura 14 - Fluxograma de atividades	36
Figura 15 - Complexo de barragens (Mina Fábrica)	37
Figura 16 - Visão geral das áreas em estudo	39
Figura 17 - Hierarquia para avaliação locacional da pilha de rejeitos	40
Figura 18 - Alternativa de disposição: Local A	41
Figura 19 - Alternativa de disposição: Local B	42
Figura 20 - Alternativa de disposição: Local C	43
Figura 21 - Comparações paritárias de critérios	44
Figura 22 - Comparações paritárias de subcritérios	45
Figura 23 - Comparações paritárias de alternativas	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz genérica de comparação paritária	31
Tabela 2 - Índice randômico de Saaty	35
Tabela 3 - Coordenadas geográficas das alternativas locacionais para a PDR	39
Tabela 4 - Descrição fisiográfica do Local A	41
Tabela 5 - Descrição fisiográfica do Local B	42
Tabela 6 - Descrição fisiográfica do Local C	43
Tabela 7 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor dos critérios	52
Tabela 8 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor dos subcritérios I	53
Tabela 9 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor dos subcritérios II	54
Tabela 10 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor dos subcritérios III	54
Tabela 11 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas I	55
Tabela 12 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas II	55
Tabela 13 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas III	56
Tabela 14 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas IV	57
Tabela 15 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas V	57
Tabela 16 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas VI	58
Tabela 17 - Autovetor do 2º nível	59
Tabela 18 - Autovetores do 3º nível	59
Tabela 19 - Autovetores do 4º nível	60
Tabela 20 - Pesos finais das alternativas	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 Mineração e beneficiamento de minérios	16
3.2 Rejeitos	17
3.3 Disposição em barragens	19
3.3.1 Alçamento a montante	21
3.3.2 Alçamento a jusante	22
3.3.3 Linha de centro	23
3.4 Disposição em pilhas	23
3.4.1 Empilhamento drenado	24
3.4.2 Rejeitos filtrados (dry stacking)	25
3.4.3 Impactos locais	27
3.5 Método de Análise Hierárquica – MAH	28
3.5.1 Estrutura da hierarquia	29
3.5.2 Desenvolvimento do método	30
3.5.3 Análise de inconsistência	32
4 METODOLOGIA	36
4.1 Delimitação	36
4.1.1 Área de estudo	37
4.1.2 Barragens descomissionadas	37
4.2 Formulação do MAH	38
4.2.1 Problema Decisório / Objetivo	38
4.2.2 Definição dos critérios	38

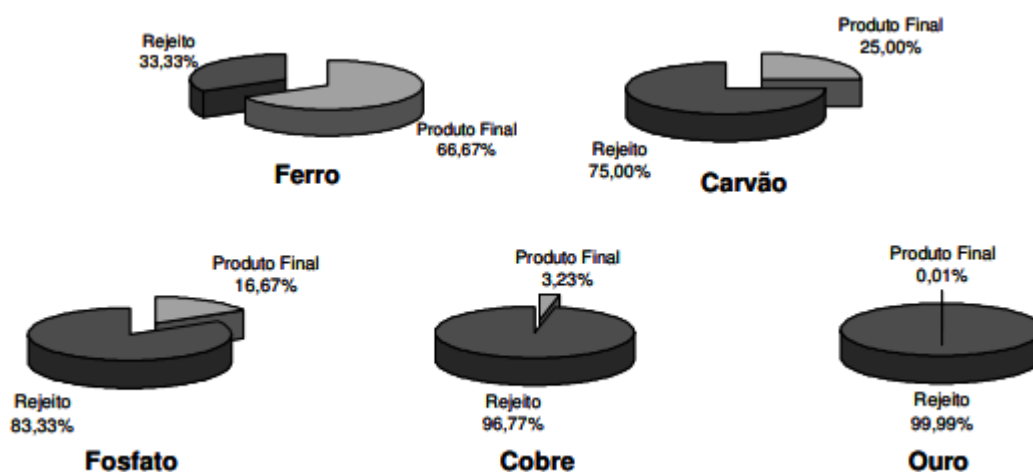
4.2.3 Definição dos subcritérios	38
4.2.4 Seleção das alternativas	39
4.3 Julgamentos	40
4.3.1 Atribuição de Pesos	44
4.4 Cálculos	50
4.4.1 Prioridades	50
4.4.2 Análise de Inconsistência.....	50
5 RESULTADOS	52
5.1 Matriz pareada no 2º nível	52
5.2 Matrizes pareadas no 3º nível	53
5.3 Matrizes pareadas no 4º nível	55
5.4 Agregação de prioridades às alternativas.....	59
6 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016), a Revolução Industrial foi responsável pelo aumento na produção de insumos minerais devido a fatores como maior demanda e mecanização do trabalho pela introdução de máquinas a vapor. Nesse período, o desenvolvimento de novas tecnologias de beneficiamento tornou possível e viável minerar substâncias com baixo teor mineral. Como consequência, acentuou-se a geração de rejeitos.

A Figura 1 faz uma comparação entre as percentagens de rejeitos e produtos gerados durante o tratamento de diferentes minérios. Percebe-se que, na maioria dos casos, a fração aproveitada do material é bem inferior àquela descartada.

Figura 1 - Razões médias entre rejeitos e produtos gerados



Fonte: Abrão (1987).

Os resíduos provenientes das atividades de mineração representam a principal fonte de impacto ambiental. Lidar com o tratamento e armazenamento desses rejeitos, com o objetivo de reduzir os custos e aumentar a segurança, emerge como um dos principais desafios para as empresas mineradoras no cumprimento das normas ambientais. Isso ocorre, em parte, devido ao fato de que a disposição desses resíduos é classificada como um custo adicional sem retorno imediato dentro do escopo do projeto (LOZANO, 2006). Assim, Soares (2010) afirma que a disposição desses materiais é considerada um contratempo às empresas do ramo. Apesar disso, a correta gestão de resíduos pode se mostrar extremamente benéfica para as

mineradoras pois, viabilizando o reuso desses rejeitos, é possível converter as despesas oriundas do descarte em receita (GOMES, 2017).

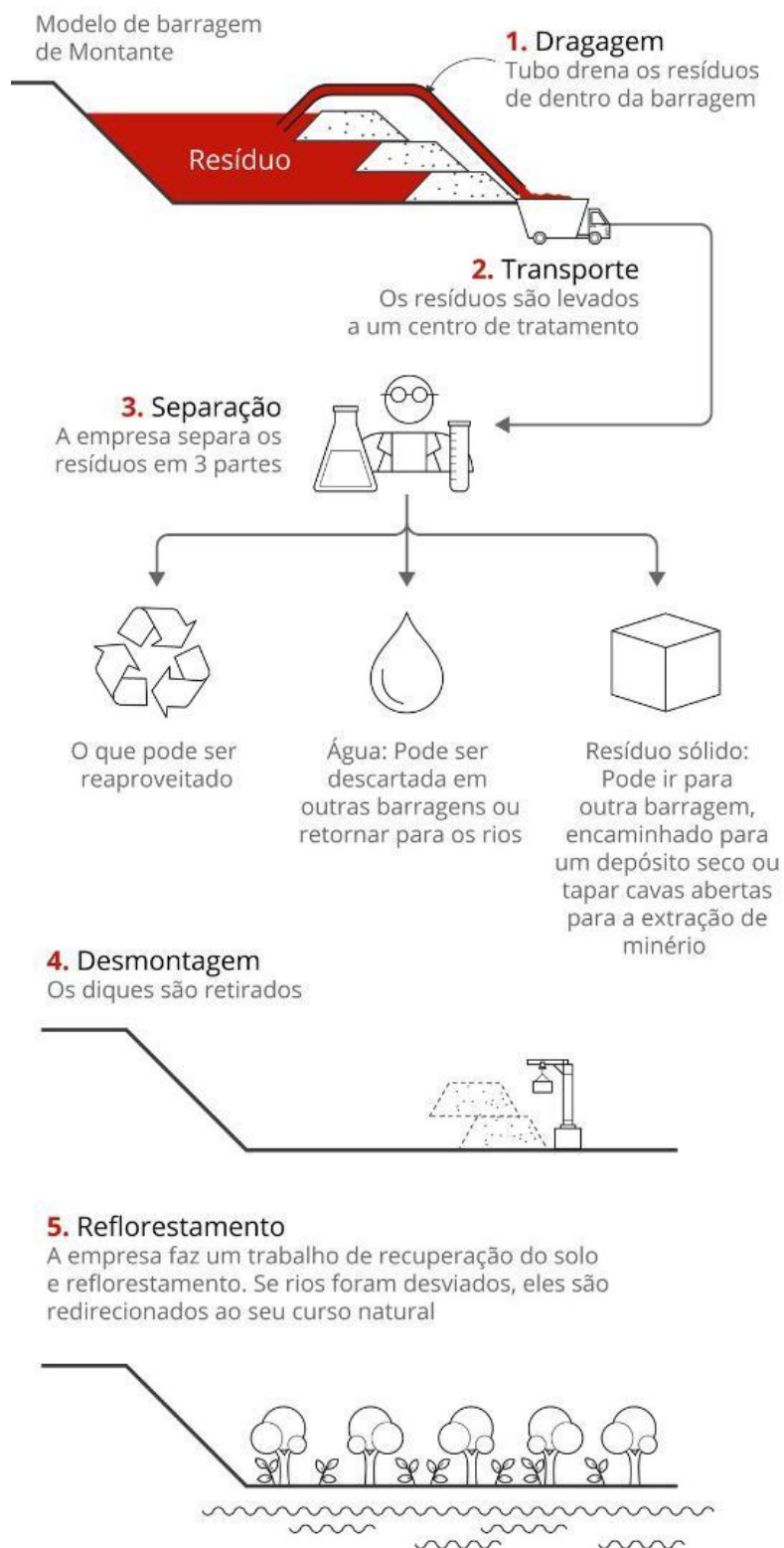
As barragens se destacam como o método mais utilizado para a disposição de rejeitos provenientes do beneficiamento de minérios, principalmente pelo baixo custo e facilidade de operação (VENTURIN,2022). Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2021), o Brasil tem um total de 905 barragens de rejeitos. A grande maioria dessas estruturas está presente no estado de Minas Gerais, onde ocorreram os dois últimos grandes acidentes causados por rompimento. Gomes (2017) destaca os impactos ocasionados pelo rompimento de barragens como: supressão vegetal, contaminação da água, danos à fauna e à flora, desalojamento da população, impactos econômicos, e até mesmo, perdas humanas.

Em resposta aos desastres mencionados, sancionou-se a Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que determina a descaracterização de estruturas de contenção construídas pelo método a montante no Estado de Minas Gerais. Esse processo consiste no esvaziamento das barragens, possibilitando a desmontagem dos diques e a consequente recuperação da área. Os rejeitos, por sua vez, são encaminhados à unidades de tratamento para que sejam desaguados, permitindo a disposição dos resíduos sólidos resultantes em pilhas (FIÚZA; FREITAS, 2022).

Assim, as pilhas de rejeitos despontam como uma alternativa viável para disposição dos resíduos de barragens descomissionadas. Porém, a implantação desse sistema está condicionada à escolha de um local conveniente, que favoreça sua operacionalidade e minimize seus impactos ambientais e sociais. Portanto, este trabalho tem como foco a aplicação de um modelo de análise multicriterial que determina o melhor local para implantação de uma pilha de rejeitos, com base em critérios e subcritérios definidos pelo tomador de decisão.

Para facilitar a compreensão, a Figura 2 ilustra o processo de descaracterização de barragens a montante.

Figura 2 - Etapas de descaracterização de barragens de rejeitos



Fonte: Fiúza e Freitas, TV Globo (2022).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Definir um modelo em análise hierárquica para apoio à tomada de decisão para alocação de uma pilha de rejeitos de mineração, levando em conta o maior número possível de variáveis relevantes.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar e compilar uma lista de variáveis relevantes para a tomada de decisão;
- Desenvolver critérios gerais e refiná-los em subcritérios específicos que representam aspectos mais detalhados de cada categoria;
- Atribuir pesos aos elementos com base na importância relativa de cada um na decisão;
- Criar indicadores para cada subcritério, permitindo a comparação entre diferentes opções de alocação;
- Escolher ferramentas específicas e metodologias para realizar a análise hierárquica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Mineração e beneficiamento de minérios

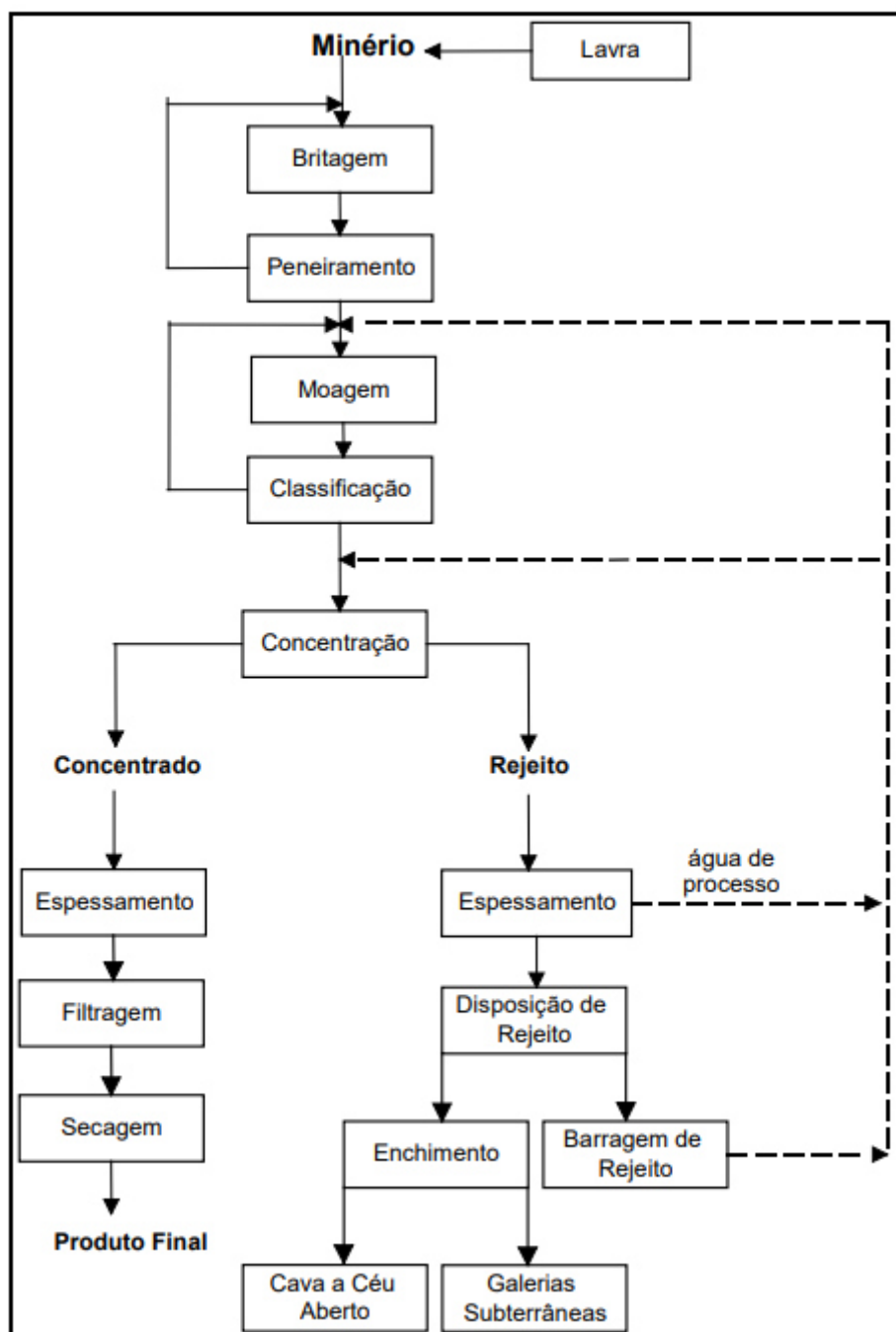
A mineração se define como um conjunto de operações essenciais para a extração econômica de recursos minerais da crosta terrestre, resultando em alterações ambientais significativas por meio de atividades de lavra e tratamento. A lavra representa o conjunto coordenado de atividades destinadas a extrair um recurso mineral, visando seu aproveitamento industrial ou uso direto. O beneficiamento, por sua vez, engloba processos de separações físicas e químicas para a obtenção da substância mineral desejada (ESPÓSITO, 2000).

Durante o curso de seu processo produtivo, a mineração gera diversos tipos de resíduos, incluindo estéreis e rejeitos. Estes últimos podem ser descritos como a porção do minério que não contém minerais úteis ou de valor econômico, resultante de diversas fases de beneficiamento (GALO, 2017). De acordo com os autores Luz e Lins (2010), o processo de beneficiamento é descrito pelas operações a seguir:

- i. Cominuição: redução do tamanho de materiais sólidos por meio de britagem e moagem;
- ii. Peneiramento e classificação: separação do minério em frações de partículas com tamanhos distintos;
- iii. Concentração: separação das espécies mineralógicas economicamente viáveis das de ganga;
- iv. Desaguamento: separação sólido/líquido;
- v. Secagem: redução final da saturação;
- vi. Disposição do rejeito: descarte do material não aproveitado em estruturas adequadas ao seu recebimento.

A Figura 3 mostra o fluxograma típico do tratamento de minérios, com recirculação de água.

Figura 3 - Fluxograma típico de tratamento de minério



Fonte: Luz e Lins (2010).

3.2 Rejeitos

A Lei nº 12.305/2010 de que trata a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define rejeitos como “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e

economicamente viáveis, não apresentam outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”.

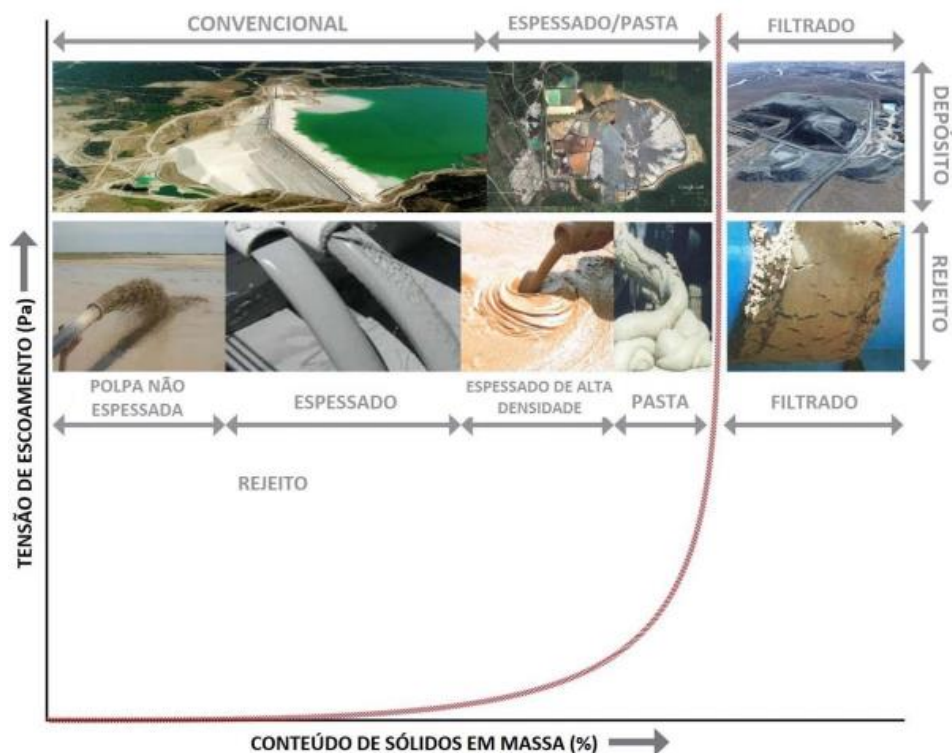
Rejeitos de mineração são materiais provenientes do processo de beneficiamento em instalações industriais. Suas características granulométricas dependem do tipo de minério bruto explorado (ferro, ouro, bauxita etc.) e das técnicas de tratamento utilizadas, abrangendo uma ampla faixa de materiais, desde grosseiros até solos finos (PEREIRA, 2005).

Gomes (2004) apresenta uma classificação geral para os rejeitos de mineração:

- **Rejeitos em polpa (slurry)** – rejeitos com baixo teor de sólidos que apresentam pequena ou nenhuma resistência ao cisalhamento, permitindo o transporte por gravidade ou bombeamento;
- **Rejeitos espessados (thickened tailings)** – rejeitos parcialmente desaguados, mas que ainda apresentam consistência de polpa, permitindo o bombeamento;
- **Rejeitos em pasta (paste tailings)** – rejeitos espessados que apresentam consistência típica de pasta devido a incorporação de aditivos químicos (Ex: cimento Portland), resultando em um material menos fluido.
- **Rejeitos filtrados úmidos (wet cake tailings)** – rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase saturada, não passível de bombeamento.
- **Rejeitos filtrados secos (dry cake tailings)** – rejeitos na forma de massa não saturada que não permite o bombeamento.

A Figura 4 apresenta diferentes formas de disposição de rejeitos de acordo com a consistência apresentada pelo material.

Figura 4 - Consistência dos rejeitos e formas de disposição



Fonte: Mend (2017).

3.3 Disposição em barragens

Barragens são estruturas construídas com a finalidade de conter substâncias líquidas ou misturas de sólidos e líquidos. Na mineração, são responsáveis por armazenar todos os materiais não aproveitados no beneficiamento. De acordo com a *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2001), uma barragem de rejeitos deve ser uma estrutura estável que, juntamente com sua fundação, assegure a retenção integral dos rejeitos em seu reservatório. Além disso, deve possibilitar o controle apropriado de toda a água percolante, a fim de atender aos requisitos de controle ambiental, segurança, eficiência econômica e capacidade de armazenamento.

Essas estruturas são gradualmente erguidas por meio de alteamentos sucessivos, cuja progressão está atrelada à vida útil das minas associadas. Embora seja possível utilizar solos de empréstimo e materiais estéreis da própria mina na construção, frequentemente, o próprio rejeito, especificamente o underflow (partículas mais grossas resultantes do processo de hidrociclonação), é empregado como

componente principal na formação do maciço durante os alteamentos. A fração mais fina, conhecida como overflow, é direcionada para o reservatório da barragem. É importante destacar que a construção em fases requer a implementação de um dique inicial, construído conforme os métodos convencionais utilizados em barragens de terra para armazenamento de água (GALO, 2017).

A Figura 5 esquematiza os métodos convencionalmente empregados na mineração para a disposição de estéreis e rejeitos. A técnica de disposição em pilhas é frequentemente aplicada aos estéreis, uma vez que esse material não passa por processamento em usinas de beneficiamento, resultando em níveis reduzidos de saturação. Os rejeitos, por outro lado, são tipicamente direcionados para barragens de contenção devido à significativa absorção de água durante o tratamento dos minérios.

Figura 5 - Esquema de direcionamento geral de rejeitos na mineração



Fonte: Gomes (2017).

As barragens de armazenamento de rejeitos são classificadas em três tipos distintos, dependendo das técnicas empregadas em sua construção. Estas são: alteamento a montante, alteamento a jusante e linha de centro.

3.3.1 Alçamento a montante

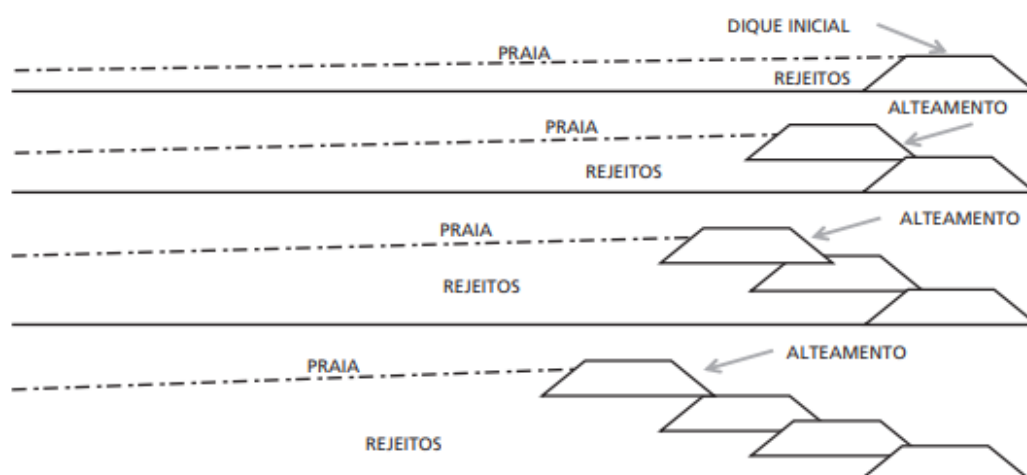
A fase inicial na implementação desse método envolve a construção de um dique de partida, geralmente utilizando material argiloso ou enrocamento compactado. Esse dique é construído simultaneamente com a drenagem interna da barragem. Após a conclusão dessa etapa, o rejeito é lançado por canhões (spigots) em direção à montante da linha de simetria do dique, formando a praia de disposição dos rejeitos. Essa praia desempenha dupla função, servindo como fundação e fornecendo material de construção para o próximo alçamento (REZENDE, 2013).

Araújo (2006) destaca os problemas associados à segurança de barragens à montante. Para Araújo:

Embora seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método de montante apresenta um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em relação à segurança. O agravante neste caso está ligado ao fato de os alçamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de compactação fofo, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos (ARAUJO, 2006, p. 14).

A Figura 6 apresenta esquematicamente um modelo de barragem a montante, destacando a sequência de alçamentos da estrutura.

Figura 6 - Alçamento de barragem de rejeitos pelo método de montante

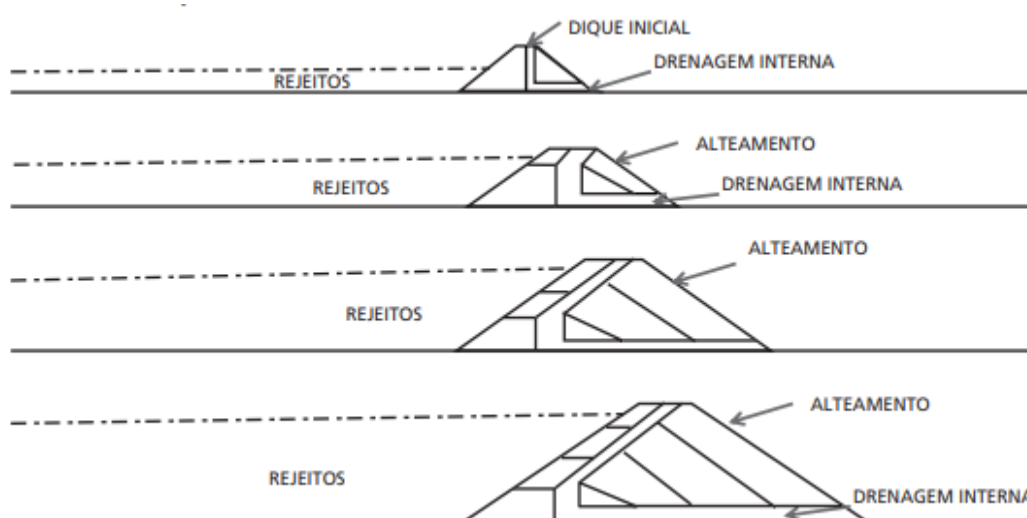


Fonte: Vick, modificado (1983).

3.3.2 Alçamento a jusante

No método de jusante, a etapa inicial envolve a criação de um dique de partida, geralmente construído com solo ou enrocamento compactado. Os sucessivos alçamentos do dique são então realizados para jusante desse ponto inicial. Este processo é repetido de maneira progressiva até que a elevação final, conforme especificada no projeto, seja alcançada (IBRAM, 2016). A Figura 7 ilustra o processo descrito anteriormente.

Figura 7 - Alçamento de barragem de rejeitos pelo método de jusante



Fonte: Vick, modificado (1983).

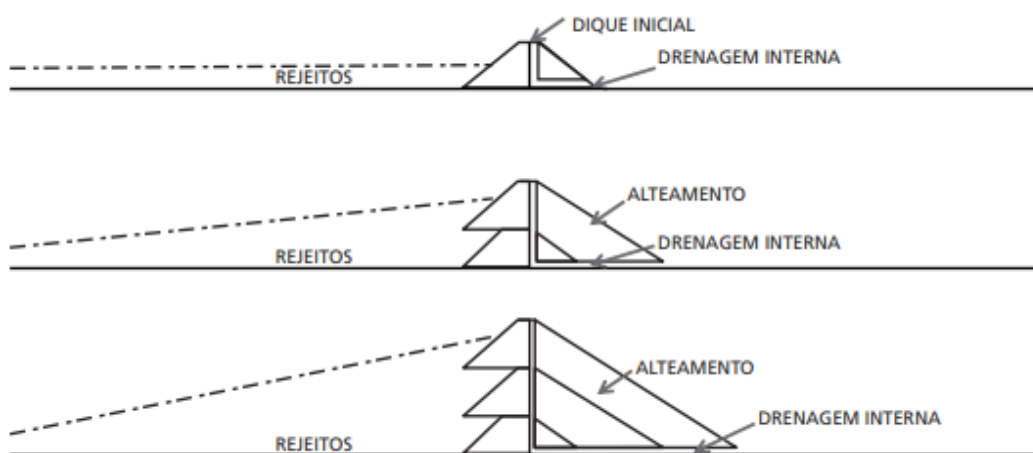
Esse método permite o armazenamento de grandes volumes e possibilita o controle do nível de água interno. Isso resulta no aumento das condições de segurança, uma vez que o material próximo ao talude da barragem não se encontra saturado, reduzindo significativamente os riscos de liquefação. (SILVA et al., 2012).

No entanto, barragens elevadas pelo método de jusante demandam volumes mais substanciais de material para construção, acarretando custos mais elevados associados à ciclonagem ou à obtenção de material de empréstimo. Adicionalmente, nesse método, a área ocupada pelo sistema de contenção de rejeitos é maior devido à expansão da estrutura para jusante em decorrência do aumento da altura. (ARAUJO, 2006).

3.3.3 Linha de centro

O comportamento geotécnico do método de linha de centro se assemelha mais às barragens alteadas para jusante, representando uma variação desse método. Nessa abordagem, o aumento da altura da crista ocorre de maneira vertical, com o eixo dos alteamentos alinhado ao eixo do dique inicial. Esse método permite a implementação de zonas de drenagem internas em todas as fases de elevação, possibilitando o controle da linha de saturação e a dissipação eficaz de poropressões. Essa característica torna o método apropriado mesmo em regiões sujeitas a elevada atividade sísmica. A Figura 8 destaca o processo construtivo de uma barragem alteada pelo método de linha de centro.

Figura 8 - Alteamento de barragem de rejeitos pelo método de linha de centro



Fonte: Vick, modificado (1983).

3.4 Disposição em pilhas

As Pilhas de Disposição de Rejeito (PDR) são estruturas que, de maneira geral, compartilham semelhanças com as Pilhas de Disposição de Estéril (PDE). Embora o método seja mais dispendioso em comparação com as abordagens tradicionais de disposição de rejeitos em barragens, Cooling (2007) destaca que o custo de implementação pode ser justificado devido à possibilidade de obter um depósito com maior densidade. Isso permite armazenar uma quantidade superior de rejeitos no mesmo volume de pilha. Além disso, esse método viabiliza a criação de pilhas com

alturas que não seriam economicamente viáveis em métodos convencionais, resultando em uma redução significativa da área necessária para implantação.

A disposição do rejeito em um local específico deve ser cuidadosamente planejada e controlada, visando assegurar a máxima estabilidade e segurança da pilha, ao mesmo tempo em que minimiza os impactos ambientais (COSTA, 2017). Para o correto funcionamento dessas estruturas, é necessário que haja uma drenagem eficiente no interior do seu maciço, garantindo que o material permaneça em condições não saturadas. A depender da granulometria do material disposto, as pilhas se dividem em dois métodos distintos, sendo eles: empilhamento drenado e rejeitos filtrados.

3.4.1 Empilhamento drenado

Neste método específico, ao invés de empregar uma estrutura impermeável de barramento, opta-se por uma estrutura drenante que não retém a água livre proveniente dos poros dos rejeitos. O empilhamento drenado, ilustrado na Figura 9, permite a liberação eficiente dessa água através de um sistema interno de drenagem, caracterizado por uma alta capacidade de vazão, conectado aos rejeitos do reservatório (IBRAM, 2016).

Figura 9 - Empilhamento drenado



Fonte: IBRAM (2016).

A aplicação do empilhamento drenado é aconselhada para rejeitos que possuam coeficiente de permeabilidade suficiente para viabilizar um fluxo de drenagem estritamente gravitacional e subvertical dentro do aterro. Conseqüentemente, esse método não é indicado para rejeitos finos, mas revela-se altamente eficaz no contexto de rejeitos arenosos (OLIVEIRA-FILHO, 2017).

Essa técnica de disposição a seco também pode ser utilizada de forma compartilhada com outros materiais, como o estéril por exemplo. Dessa forma, as estruturas adquirem geometrias, dimensões e propriedades geotécnicas peculiares, que viabilizam o método do ponto de vista técnico e econômico.

De acordo com Pimenta (2011), as principais vantagens do método são:

- Obtenção de maciço não saturado;
- Maior estabilidade dos rejeitos;
- Menor potencial de danos em eventuais falhas;
- Maior capacidade de armazenamento;
- Período de vida útil mais longo;
- Facilidade de recuperação ambiental;
- Baixo risco de liquefação e ruptura.

Além disso, a camada de rejeitos exibe uma sólida capacidade de carga, possibilitando até mesmo o tráfego de equipamentos e veículos de terraplanagem encarregados pelo processo de alteamento da pilha. Esse alteamento, por sua vez, pode ser realizado utilizando o próprio material rejeitado, destacando a versatilidade e eficiência desse método (PORTES, 2013).

3.4.2 Rejeitos filtrados (*dry stacking*)

Visto que o empilhamento drenado é aconselhado exclusivamente para materiais mais granulares, o método de rejeitos filtrados, também conhecido como *dry stacking*, emerge como uma alternativa viável para a disposição dos rejeitos finos. O rejeito fino, passante na peneira 400, sofre um processo de adensamento em espessadores, equipamentos especializados na filtragem de água, até atingir teores de sólidos superiores a 50%. Em seguida, é bombeado para um reservatório onde a superfície é exposta à evaporação, resultando em teores de sólidos com valores

próximos de 80% (IBRAM, 2016). Os rejeitos são posteriormente dispostos em pilhas, dispensando a construção de barragens.

Além de ser mais seguro, esse método é mais sustentável porque permite a reutilização da água filtrada no processo. Uma vantagem adicional do empilhamento a seco é que essa técnica permite o aproveitamento integral do minério de ferro, ao contrário das barragens, onde parte do minério é perdida na forma de polpa. As estruturas formadas pelos rejeitos filtrados apresentam maior declividade (entre 5% e 30%) e são caracterizadas por sua elevada estabilidade. Isso possibilita uma disposição mais simples, onde em terrenos irregulares, o rejeito tende a se ajustar à topografia local, enquanto em áreas planas, o material tende a formar uma estrutura cônica, com o ponto mais alto correspondendo ao local de lançamento. (PEIXOTO, 2012). Para melhor compreensão, a Figura 10 destaca uma pilha de rejeitos filtrados.

Figura 10 - Pilha de rejeito filtrado (dry stack)



Fonte: Adaptado de Golder Associates (2015).

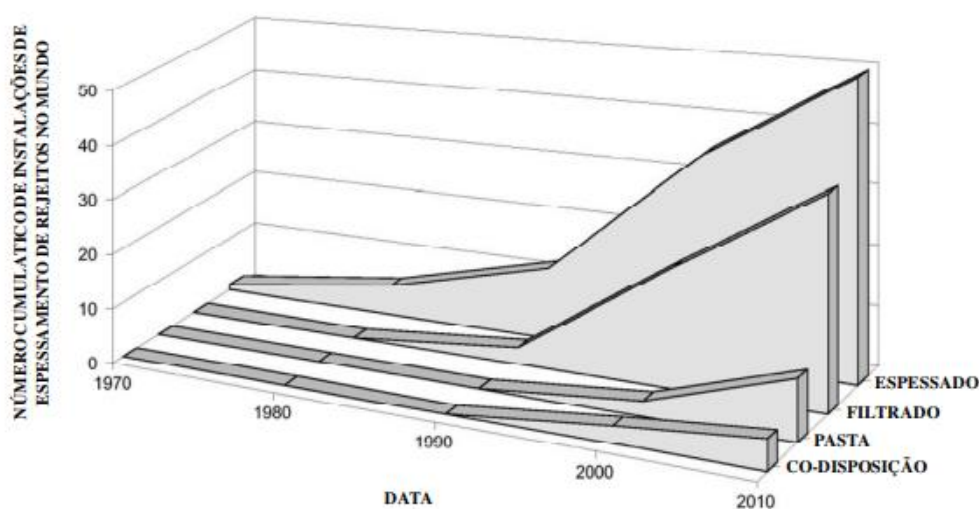
Comparado aos métodos de disposição convencionais, o *Dry Stacking* apresenta maior custo de implantação e operação. Porém, algumas características desse sistema tornam sua aplicação economicamente viável, destacando-se a menor dimensão dos diques de contenção, a não exigência de grandes áreas para deposição e sua facilidade de aplicação (LARA E LEON, 2011).

Davies (2011) afirma que os rejeitos filtrados são mais aplicados em regiões que apresentam pelo menos um dos aspectos destacados a seguir:

- i. Clima árido – locais em que a conservação da água é indispensável;
- ii. Atividades tectônicas – áreas nas quais os abalos sísmicos inviabilizam a utilização de métodos convencionais;
- iii. Frio extremo – regiões onde o manejo da água é dificultado em períodos frios devido, principalmente, ao congelamento;
- iv. Terrenos acidentados – locais de difícil implementação de estruturas convencionais de disposição, dadas as limitações impostas pela topografia.

As informações sobre rejeitos filtrados ainda são limitadas, com poucos documentos contendo estudos relacionados publicados até o momento. No entanto, apesar dessa escassez de dados, o método tem ganhado destaque no cenário mundial, sendo implementado por diversas mineradoras (DAVIES, 2011). A Figura 11 fornece a quantidade de instalações de rejeitos desaguados em escala global. É possível perceber que, dentre as alternativas, rejeitos espessados e filtrados são os mais comuns.

Figura 11 - Tendências de utilização de rejeitos desaguados na mineração



Fonte: Davies et al, 2010.

3.4.3 Impactos locacionais

A locação de uma pilha de rejeitos compreende a avaliação de alternativas considerando os impactos ambientais, sociais e econômicos associados ao empreendimento. A NBR 13029 define os estudos locacionais como a primeira etapa do processo de elaboração e apresentação de projeto para disposição de rejeitos em

pilhas. Nela, as opções locacionais devem ser descritas de forma comparativa, justificando a escolha feita para o projeto executivo.

Lisboa (2002) destaca que, embora se reconheça a interdependência entre os vários elementos que compõem o ambiente, como água, ar, solo, fauna, flora, entre outros, tornando praticamente impossível uma separação concreta entre eles, a abordagem tradicional propõe a divisão de acordo com os meios físicos, biológicos (bióticos) e socioeconômicos (antrópicos). A Resolução CONAMA nº 01/86, em seu artigo 6º, define:

- **Meio físico:** o subsolo, as águas, o ar e o clima, destacando os recursos minerais, a topografia, os tipos e aptidões do solo, os corpos d'água, o regime hidrológico, as correntes marinhas, as correntes atmosféricas;
- **Meio biológico e os ecossistemas naturais:** a fauna e a flora;
- **Meio socioeconômico:** o uso e a ocupação do solo, usos da água, e a socioeconomia, destacando os sítios e monumentos arqueológicos, históricos e culturais das comunidades, as relações de dependência entre a sociedade local, os recursos ambientais e o potencial de utilização futura destes recursos.

3.5 Método de Análise Hierárquica – MAH

A seleção do local para disposição de pilhas de rejeitos abrange diversas variáveis e fatores. Portanto, é essencial empregar um método de análise que considere múltiplos critérios, a fim de facilitar o processo decisório. O Método de Análise Hierárquica (MAH) representa uma ferramenta valiosa para a avaliação comparativa de diversos itens, abrangendo desde marcas de produtos, como tênis, até uma variedade de tipos de investimentos. Essa abordagem utiliza a percepção subjetiva humana como base, empregando uma escala de importância para confrontar cada par de elementos. O processo envolve a ordenação dos itens, considerando tanto o nível de importância quanto seus atributos individuais (CARVALHO; MINGOTI, 2005).

É um procedimento multicriterial ou multiobjetivo concebido pelo matemático Thomas L. Saaty, da Wharton School, Universidade da Pensilvânia (EUA). Seu objetivo é reproduzir um método que se assemelha ao funcionamento da mente humana diante de uma situação complexa que envolve um grande número de elementos, controláveis ou não. Em tal contexto, os elementos são agrupados com

base em propriedades comuns, refletindo uma abordagem que replica a organização cognitiva diante da complexidade (GOMES, 2009). Conforme destacado por Saaty (1980), uma significativa vantagem do MAH reside na capacidade de seus usuários atribuírem intuitivamente pesos relativos a diversos critérios (ou múltiplas alternativas para um critério específico), enquanto simultaneamente realizam comparações paritárias entre eles. Esse processo permite que a mente humana identifique a importância relativa de cada critério, mesmo quando as duas variáveis são consideradas incomparáveis.

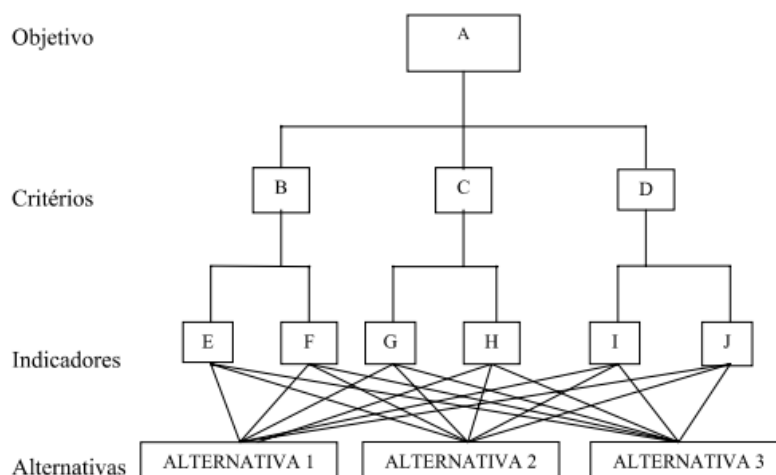
3.5.1 Estrutura da hierarquia

Lisboa (2002) detalha as etapas fundamentais do Método de Análise Hierárquica. O autor destaca que:

No MAH estabelece-se uma relação entre cada nível da hierarquia pela comparação dos critérios/indicadores aos pares. Essa relação representa o impacto relativo dos critérios/indicadores de um dado nível com cada critério/indicador do nível acima mais próximo. Essa comparação par a par é então repetida para todos os critérios/indicadores em cada nível. O resultado desse processo discriminatório é um vetor das prioridades relativas dos pesos dos critérios/indicadores de decisão, em cada nível ou grupo. O último estágio consiste em consolidar as prioridades relativas até o nível das alternativas, ou seja, relacionar todos os pesos, propagando o efeito dos pesos na estrutura até o nível das alternativas. A tomada de decisão é dada pela classificação das alternativas em análise, ordenadas relativamente ao objetivo global (LISBOA, 2002, p.85).

Por questões de praticidade e para melhor visualização, o sistema analisado deve ser estruturado em forma de árvore invertida. No topo, o tomador de decisão deverá definir um objetivo global único a partir do qual saem ramificações referentes aos critérios e indicadores adotados para atingir esse objetivo. O esquema pode ser visualizado na Figura 12, apresentada a seguir:

Figura 12 - Modelo de hierarquização para avaliação de alternativas



Fonte: Morita (1998).

3.5.2 Desenvolvimento do método

Os critérios não compartilham igual importância, razão pela qual é necessário derivar as prioridades relativas (pesos) após a estruturação do problema. A escala de comparação, guiada pela tabela de Saaty, desempenha um papel fundamental no Método de Análise Hierárquica. Utilizando essa tabela, é possível determinar o grau de importância dos critérios sob análise, facilitando a criação da hierarquia e o estabelecimento de relações entre os elementos.

Figura 13 - Escala de julgamento paritário

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Fraca importância de uma sobre a outra	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em relação a outra
5	Essencial ou forte importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática
9	Absoluta importância	A evidência favorecendo uma atividade sobre a outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos sucessivos	Quando se deseja um maior compromisso

Fonte: Saaty (1991).

Como a metodologia utiliza números para representar a variação de julgamentos, utilizam-se matrizes de comparação paritária para organizar as avaliações. Abaixo, segue um modelo desse tipo de matriz:

Tabela 1 - Matriz genérica de comparação paritária

	A	B	C	D
A	1	a_{12}	a_{13}	a_{14}
B	$1/a_{12}$	1	a_{23}	a_{24}
C	$1/a_{13}$	$1/a_{23}$	1	a_{34}
D	$1/a_{14}$	$1/a_{24}$	$1/a_{34}$	1

Fonte: Saaty (1980).

Considere como exemplo a matriz A ilustrada a seguir:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix}$$

De acordo com Saaty (1999), as matrizes de comparação paritária devem ser positivas, idênticas, recíprocas e consistentes; atendendo a três propriedades especiais:

- **Identidade:** todos os elementos da diagonal da matriz são iguais a 1, isto é, se $i = j$, então $a_{ij} = 1$. Isso acontece porque a diagonal principal representa cada elemento comparado a si mesmo, ou seja, têm a mesma importância.
- **Reciprocidade:** cada elemento abaixo da diagonal principal é igual ao inverso do elemento correspondente acima da diagonal principal, isto é, $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Por exemplo, se a comparação do atributo A com o atributo B resultar em um fator comparativo igual a 2, a comparação do atributo B com o atributo A resultará no fator comparativo 1/2.
- **Consistência:** a matriz de comparação deve satisfazer a propriedade de transitividade, o que significa que se i é preferível a j e j é preferível a k , i é preferível a k , ou seja, $a_{ij} a_{jk} = a_{ik}$. Considere, por exemplo, três elementos A, B e C. Se A é julgado como sendo x vezes mais importante que B, e B é considerado como z vezes mais importante que C, então A será xz vezes mais importante que C.

Pela última propriedade descrita acima, as colunas da matriz de comparação paritária são múltiplos escalares entre si, de modo que as colunas normalizadas (obtidas pela divisão de cada célula pela soma da coluna) são idênticas. Cada coluna pode representar, assim, os valores relativos das alternativas. Esse cenário ocorre quando há uma transitividade cardinal perfeita, ou seja, as comparações realizadas são perfeitamente consistentes (SILVA, 2003). Entretanto, segundo Morita (1998), a transitividade cardinal perfeita não ocorre na prática, tornando necessário empregar o método do autovalor para avaliar a consistência das comparações.

3.5.3 Análise de inconsistência

Após o preenchimento de cada matriz de comparação paritária, é necessário analisá-las para avaliar a existência de inconsistências, que ocorrem por erros nos julgamentos de valor. De acordo com Lozano (2006), o MAH utiliza os autovalores para determinar os pesos dos elementos da matriz pareada, a ordem de prioridade, e como medida da consistência do julgamento. Os elementos da matriz de comparação paritária com colunas normalizadas denominam-se pesos. Em casos de consistência perfeita, essa matriz é composta de linhas de elementos iguais, enquanto a soma dos elementos de cada coluna é igual à unidade, podendo ser representada por um vetor \mathbf{W} de n elementos, que são os pesos w_i , $i = 1, \dots, n$. Os pesos são calculados pela equação (1):

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (1)$$

Supondo uma matriz de comparação paritária entre critérios que seja consistente. Dado os pesos para cada critério w_1, \dots, w_n e a_{ij} como o elemento genérico, pode-se escrevê-la como na equação (2):

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Isso ocorre por uma razão simples. Para a consistência perfeita ocorrer, temos que $a_{ik} = a_{ij} a_{jk}$ para $i, j, k \leq n$ onde n é a ordem da matriz. Se acontecer que $a_{ij} = w_i/w_j$ com $i, j = 1, \dots, n$, tem-se pela equação (3):

$$a_{ij}a_{jk} = \frac{w_i w_j}{w_j w_k} = \frac{w_i}{w_k} = a_{ik} \quad (3)$$

Que gera a equação (4),

$$\begin{aligned} a_{ji} &= \frac{w_j}{w_i} = \frac{1}{w_i/w_j} = \\ &= \frac{1}{a_{ij}} \end{aligned} \quad (4)$$

Assim, fica bem caracterizada uma matriz de comparações unitárias consistente.

Considerando uma matriz **A** consistente, é possível escrever a equação (5):

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad e \quad a_{ij} \frac{w_j}{w_i} = 1 \quad (5)$$

Dessa maneira, é possível obter a equação (6):

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \frac{1}{w_i} = n \quad (6)$$

$i = 1, \dots, n$

Por equivalência, tem-se a equação (7):

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = w_i n \quad (7)$$

Isso é equivalente à equação matricial (8):

$$\mathbf{Aw} = \mathbf{nw} \quad (8)$$

Utilizando a álgebra linear, a equação acima indica que **w** é autovetor de **A** que possui autovalor **n**. Essa equação matricial escrita em sua forma total apresenta-se como a equação (9),

$$\begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Portanto, quando se deseja estabelecer pesos a critérios (ou alternativas) por meio de comparações paritárias, é recomendado achar a matriz mais consistente possível pois, dessa maneira, os pesos (determinados por seu autovetor) serão mais corretos.

Entretanto, como já mencionado, a matriz **A** surge através de julgamentos subjetivos, tornando difícil evitar os erros que provocam a sua inconsistência. Sendo assim, é preciso medir esse problema e, para isso, utiliza-se os seguintes resultados:

Se $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ são números que satisfazem a equação matricial (10),

$$\mathbf{Ax} = \lambda \mathbf{x} \quad (10)$$

Então, λ é autovalor da matriz **A**. Se $a_{ij} = 1$ para todo $i = j$, tem-se que a equação (11) é verdadeira:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = n \quad (11)$$

Para o desenvolvimento das ideias, dois princípios são considerados:

- Se a equação matricial $\mathbf{Aw} = \mathbf{nw}$ é válida, somente um dos autovalores será diferente de zero, será **n**, sendo assim o maior autovalor de **A**;
- Se os elementos de uma matriz recíproca positiva **A** sofrerem pequenas variações, então seus autovalores também irão sofrer pequenas variações.

Isso quer dizer que, se a matriz recíproca **A** possuir diagonal principal igual a 1 e for consistente, pequenas variações nos seus elementos a_{ij} farão com que o autovalor máximo $\lambda_{\text{máx}}$ permaneça próximo de **n**, e os demais autovalores se mantenham próximos de zero.

Assim, visando obter o vetor de prioridades, o autovetor da matriz **A** pode ser determinado pela equação (12):

$$\mathbf{Aw} = \lambda_{\text{máx}} \mathbf{w} \quad (12)$$

O autovetor **w** fornecerá a ordenação por nível de importância dos atributos correspondentes à matriz, pois estará estimando os pesos reais dados aos atributos ou itens que estão sendo comparados (CARVALHO E MINGOTI, 2005, p. 6).

O desvio de $\lambda_{\text{máx}}$ em relação a **n** determinará uma medida de consistência, já que pequenas variações em a_{ij} implicarão em pequenas variações em $\lambda_{\text{máx}}$. Assim, o índice de inconsistência é definido pela equação (13):

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (13)$$

Se IC é suficientemente pequeno, as comparações do decisor são provavelmente consistentes para dar estimativas úteis dos pesos da função objetivo. O índice de consistência é comparado com o índice randômico (IR) para o valor **n** (número de ordem da matriz de comparações paritárias) para

determinar se o grau de consistência é satisfatório. O índice randômico representa o valor que seria obtido em uma matriz de comparações paritárias de ordem n que não fossem feitos julgamentos lógicos, preenchendo-se os elementos com valores aleatórios. (LOZANO, 2006, p. 55).

Na Tabela 2, apresenta-se os valores do índice randômico calculados por Saaty (1980) de acordo com a ordem das matrizes de comparação paritária, que serão utilizados posteriormente na análise de inconsistência.

Tabela 2 - Índice randômico de Saaty

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Fonte: Saaty (1980).

4 METODOLOGIA

Esta seção apresenta as fases essenciais para a elaboração deste trabalho. O fluxograma presente na Figura 14 representa de forma visual a sequência das atividades realizadas ao longo do processo de produção.

Figura 14 - Fluxograma de atividades



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1 Delimitação

Durante esta fase, foram identificadas regiões que abrigam barragens construídas utilizando o método de montante. Isso viabilizou a realização de simulações para avaliar a alocação de uma pilha destinada a receber os resíduos provenientes de estruturas sujeitas ao processo de descomissionamento.

4.1.1 Área de estudo

De acordo com Fiúza e Freitas (2022), o município de Ouro Preto, em Minas Gerais, destaca-se como o local com o maior número de barragens (totalizando 9) que aguardam o processo de descaracterização. Diante desse contexto, optou-se por selecionar esse município como foco para identificar uma mina que possua barragens construídas pelo método a montante.

4.1.2 Barragens descomissionadas

A Mina Fábrica, localizada em Ouro Preto, pertencente à empresa Vale Itabiritos, abriga um complexo de barragens, dentre as quais se destacam: Forquilha I, Forquilha II e Forquilha III. Essas estruturas têm um histórico identificado de risco de rompimento e, por esse motivo, foram designadas como objeto deste estudo. A Figura 15, extraída da plataforma Google Earth, apresenta as barragens Forquilha.

Figura 15 - Complexo de barragens (Mina Fábrica)



Fonte: Google Earth (2023).

4.2 Formulação do MAH

Nesta etapa, listou-se todos os elementos que compõem a estrutura do Método de Análise Hierárquica, resultando em quatro níveis distintos dentro da hierarquia.

4.2.1 Problema Decisório / Objetivo

Para o problema decisório, optou-se pela busca da alternativa menos adequada à disposição ou, como definido na análise, o *Local mais crítico*. O motivo da escolha tem a ver com o peso atribuído aos elementos visto que maior peso indica maior impacto (ambiental, social e econômico) e, por consequência, menor viabilidade. A indicação do problema está no topo da hierarquia, sendo este o 1º nível a ser considerado.

4.2.2 Definição dos critérios

Os critérios foram elencados conforme seus impactos perante os aspetos ambiental, social e econômico; no que diz respeito a alocação do projeto. Tendo em vista a complexidade dessa etapa, foi realizada uma análise literária minuciosa que objetivou encontrar critérios relevantes para compor o 2º nível do MAH. Desse modo, as comparações paritárias garantiram maior grau de confiabilidade para alcance do objetivo proposto. Os critérios utilizados foram: *Uso do Solo, Toxicidade dos Rejeitos e Transporte dos Rejeitos*.

4.2.3 Definição dos subcritérios

Os subcritérios representam as consequências associadas aos critérios definidos na etapa anterior. Para cada critério, designou-se dois subcritérios, totalizando seis elementos no 3º nível do MAH. São eles: *Desapropriação, Desmatamento da Vegetação Nativa, Contaminação do Solo, Contaminação da Água, Poluição do Ar e Poluição Sonora*.

4.2.4 Seleção das alternativas

Inicialmente, foi necessário identificar três pontos nas proximidades das barragens para compor as alternativas da hierarquia. A escolha foi baseada na existência de vales ou encostas nesses locais, visando aproveitar o suporte natural do terreno em pelo menos uma das faces da pilha. Dessa forma, busca-se aprimorar as condições de segurança e simplificar tanto a instalação quanto a operação da estrutura.

Então, através da ferramenta de análise geoespacial Google Earth, foram identificadas áreas dentro dos padrões propostos — delimitando-as e destacando-as, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Visão geral das áreas em estudo



Fonte: Google Earth (2023).

Na Tabela 3, apresentam-se as coordenadas geográficas dos locais destacados anteriormente.

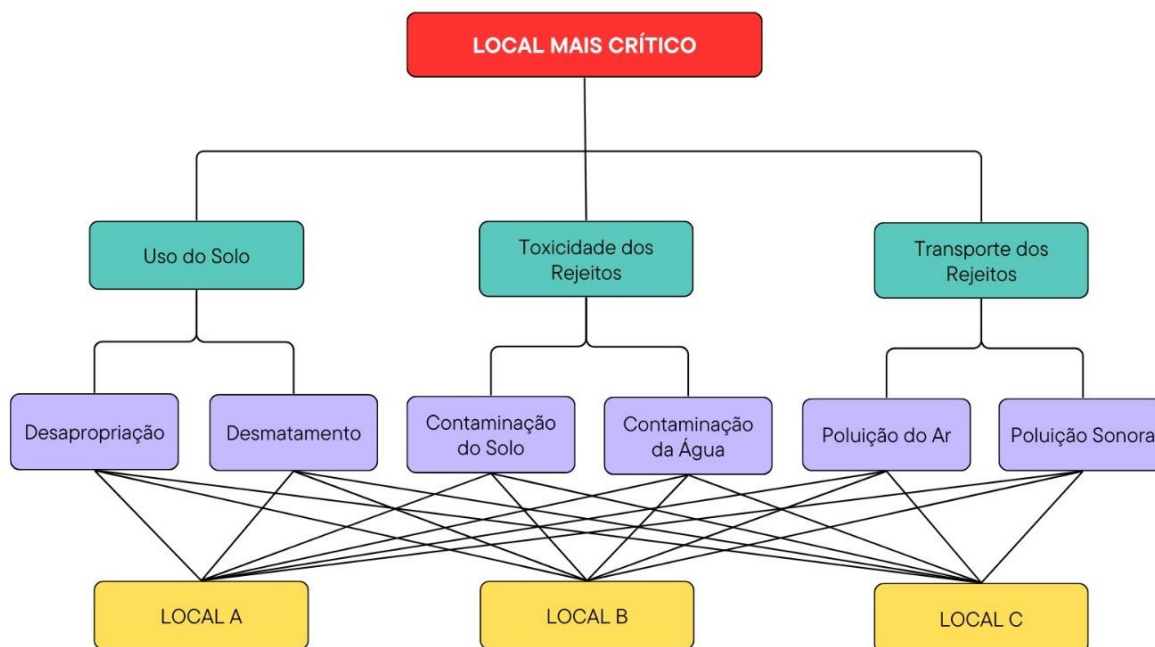
Tabela 3 - Coordenadas geográficas das alternativas locais para a PDR

Locais	Coordenadas
A	20°22'19"S 43°51'25"W
B	20°22'16"S 43°47'07"W
C	20°26'25"S 43°51'40"W

Fonte: A autoria própria (2023).

Assim, o 4º nível da estrutura foi consolidado, estabelecendo as alternativas disponíveis para tomada de decisão e finalizando a etapa de formulação do MAH. A Figura 17 ilustra o modelo de análise hierárquica com todos os elementos definidos.

Figura 17 - Hierarquia para avaliação locacional da pilha de rejeitos



Fonte: Autoria própria (2023).

4.3 Julgamentos

Através de imagens do Google Earth, procedeu-se à comparação das características fisiográficas das áreas em análise, estabelecendo os julgamentos por meio do mecanismo de comparações paritárias do MAH. As imagens de satélite disponibilizadas pela plataforma de análise geoespacial estão destacadas abaixo, oferecendo uma representação mais detalhada do terreno e permitindo a extração de informações mais abrangentes.

- Local A

Figura 18 - Alternativa de disposição: Local A



Fonte: Google Earth (2023).

Tabela 4 - Descrição fisiográfica do Local A

ANÁLISE - LOCAL A	
HABITAÇÕES	Não há
COBERTURA VEGETAL	Baixa
CORPOS HÍDRICOS	Não há
DISTÂNCIA ATÉ A MINA (Km)	3,3

Fonte: Autoria própria (2023).

- **Local B**

Figura 19 - Alternativa de disposição: Local B



Fonte: Google Earth (2023).

Tabela 5 - Descrição fisiográfica do Local B

ANÁLISE - LOCAL B	
HABITAÇÕES	Há, poucas
COBERTURA VEGETAL	Densa
CORPOS HÍDRICOS	Há
DISTÂNCIA ATÉ A MINA (Km)	7,1

Fonte: Autoria própria (2023).

- Local C

Figura 20 - Alternativa de disposição: Local C



Fonte: Google Earth (2023).

Tabela 6 - Descrição fisiográfica do Local C

ANÁLISE - LOCAL C	
HABITAÇÕES	Há, muitas
COBERTURA VEGETAL	Baixa
CORPOS HÍDRICOS	Não há
DISTÂNCIA ATÉ A MINA (Km)	4,7

Fonte: Autoria própria (2023).

4.3.1 Atribuição de Pesos

Os pesos dos elementos foram atribuídos ordenadamente de acordo com os níveis da hierarquia (critérios, subcritérios e alternativas), utilizando as imagens e as observações feitas em suas análises no item 4.2. Com isso, montou-se os quadros ilustrados nas Figuras 21, 22 e 23, que destacam os elementos com maior peso, ou seja, os elementos mais importantes em cada comparação paritária, bem como a intensidade de importância de cada um deles.

- **Critérios**

Figura 21 - Comparações paritárias de critérios

Objetivo	Comparações Par a Par (CRITÉRIOS)		Maior Importância	Intensidade de Importância
LOCAL MAIS CRÍTICO	Uso do Solo	X Toxicidade dos Rejeitos	Toxicidade dos Rejeitos	3
	Uso do Solo	X Transporte dos Rejeitos	Uso do Solo	5
	Toxicidade dos Rejeitos	X Transporte dos Rejeitos	Toxicidade dos Rejeitos	7

Fonte: Autoria própria (2023).

As comparações paritárias dos critérios estão relacionadas a um objetivo comum, que consiste em identificar o local mais crítico para implantação da pilha de rejeitos. Sendo assim, todos os elementos são comparados entre si e os pesos atribuídos anteriormente são justificados seguindo a ordem crescente de importância de cada elemento. Dessa forma, evita-se a redundância de repetir a justificativa de um mesmo peso em duas comparações diferentes.

LOCAL MAIS CRÍTICO

- Transporte dos rejeitos** - O deslocamento dos resíduos demanda o uso de veículos de grande porte, resultando em significativo consumo de combustíveis fósseis e ocasionando desconforto para as comunidades próximas às zonas de transporte. Contudo, é importante observar que esses impactos são temporários, ocorrendo apenas durante o processo de descaracterização das barragens, o que representa um intervalo relativamente curto de tempo. Dessa forma, a esse critério é atribuído uma importância inferior aos demais;

- ii. **Uso do solo** - O uso e cobertura do solo influenciam diretamente no ciclo hidrológico, podendo provocar inundações, secas, alterações no escoamento e redução da qualidade da água. Além disso, problemas associados à ocupação humana também estão relacionados a esse critério, uma vez que desocupar áreas já habitadas pode gerar conflitos de interesse, impasses judiciais e agregação de custos mediante pagamento de indenizações. Portanto, julga-se que o critério *uso do solo* tem essencial importância sobre *transporte dos rejeitos*.
- iii. **Toxicidade dos rejeitos** - Rejeitos tóxicos têm grande capacidade para poluir e contaminar corpos hídricos ou até mesmo o solo, provocando prejuízos à fauna e à flora, escassez de água, risco de doenças aos seres humanos etc. Esses malefícios se manifestam a curto e médio prazo, perdurando por um longo período de tempo e causando impactos significativos nos aspectos ambiental, social e econômico. Por esses motivos, o critério *toxicidade dos rejeitos* apresenta importância muito grande sobre *transporte dos rejeitos* e fraca importância sobre *uso do solo*.

- **Subcritérios**

Figura 22 - Comparações paritárias de subcritérios

Critérios	Comparações Par a Par (SUBCRITÉRIOS)	Maior Importância	Intensidade de Importância
USO DO SOLO	Desapropriação X Desmatamento	Desmatamento	5
TOXICIDADE DOS REJEITOS	Contaminação do Solo X Contaminação da Água	Empate	1
TRANSPORTE DOS REJEITOS	Poluição do Ar X Poluição Sonora	Poluição Sonora	5

Fonte: Autoria própria (2023).

Diferentemente do que acontece no nível anterior, no qual as comparações paritárias são realizadas entre todos os elementos, neste nível, as comparações paritárias ocorrem apenas entre os dois subcritérios definidos para cada critério. Dessa forma, os pesos atribuídos aos subcritérios são justificados a seguir, considerando cada comparação paritária e não os elementos individualmente.

USO DO SOLO

- i. **Desapropriação x Desmatamento** - Um dos principais desdobramentos da desapropriação de habitações reside nos atrasos nas obras, decorrentes de processos judiciais que, por sua vez, podem resultar em gastos relacionados a indenizações. Além disso, há impactos sociais associados a esse subcritério, uma vez que a mudança abrupta dos moradores para outras localidades pode ocasionar prejuízos emocionais significativos. Por outro lado, o desmatamento acarreta uma série de problemas ambientais, como a perda da biodiversidade, degradação do solo e alterações nos padrões climáticos. Adicionalmente, pode levar à escassez de recursos hídricos e alimentos em áreas próximas ao local desmatado ou mesmo em regiões mais distantes. Percebe-se, portanto, que os impactos relacionados a este último subcritério são mais severos, e, conseqüentemente, julga-se o *desmatamento* com importância essencial perante a *desapropriação*;

TOXICIDADE DOS REJEITOS

- ii. **Contaminação do solo x Contaminação da água** - Esses subcritérios apresentam questões ambientais críticas que compartilham diversas semelhanças, representando ameaças significativas para ecossistemas e para a saúde humana. Seus impactos consistem em: prejuízos à fauna e à flora, proliferação de organismos patogênicos, redução da disponibilidade de recursos naturais, entre outros. Além disso, a ocorrência de um pode implicar no surgimento do outro. Dessa forma, esses elementos são julgados com igual importância.

TRANSPORTE DOS REJEITOS

- iii. **Poluição do Ar x Poluição Sonora** – A poluição do ar pode ter impactos significativos na saúde humana e no meio ambiente. Entre os efeitos adversos estão doenças respiratórias, problemas cardiovasculares, danos aos ecossistemas, chuva ácida, entre outros. A queima de combustíveis fósseis, emissões industriais e veiculares são fontes comuns de poluição do ar. Além disso, os gases de efeito estufa liberados contribuem para as mudanças climáticas, tornando a poluição do ar um problema global. A poluição sonora, por outro lado, refere-se à presença de ruídos indesejados no ambiente. A exposição constante a níveis elevados de ruído pode levar a problemas de saúde, como estresse, distúrbios do sono, perda de audição

e até mesmo impactar a cognição. Além disso, a poluição sonora pode perturbar ecossistemas, afetando a comunicação e o comportamento de animais, especialmente em áreas urbanas. Em última análise, a avaliação da importância depende dos fatores avaliados. Se o foco for a extensão geográfica e globalidade dos impactos, a poluição do ar pode ser considerada mais significativa. Se o foco for a experiência cotidiana das comunidades locais, como sugere este estudo, a poluição sonora pode ter um impacto mais imediato e perceptível. Logo, o subcritério *poluição sonora* é considerado como tendo essencial importância sobre *poluição do ar*.

- **Alternativas**

Figura 23 - Comparações paritárias de alternativas

Subcritérios	Comparações Par a Par (ALTERNATIVAS)			Maior Importância	Intensidade de Importância
DESAPROPRIAÇÃO	Local A	X	Local B	Local B	3
	Local A	X	Local C	Local C	9
	Local B	X	Local C	Local C	5
DESMATAMENTO	Local A	X	Local B	Local B	5
	Local A	X	Local C	Local A	3
	Local B	X	Local C	Local B	7
CONTAMINAÇÃO DO SOLO	Local A	X	Local B	Local B	5
	Local A	X	Local C	Local C	7
	Local B	X	Local C	Local C	3
CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA	Local A	X	Local B	Local B	7
	Local A	X	Local C	Local C	5
	Local B	X	Local C	Local B	3
POLUIÇÃO DO AR	Local A	X	Local B	Local B	5
	Local A	X	Local C	Local C	7
	Local B	X	Local C	Local C	3
POLUIÇÃO SONORA	Local A	X	Local B	Local B	5
	Local A	X	Local C	Local C	7
	Local B	X	Local C	Local C	3

Fonte: Autoria própria (2023).

Para as alternativas, assim como ocorre com os critérios, todos os elementos se relacionam a outro no nível anterior que, por sua vez, é composto por mais de um elemento de modo que as comparações paritárias se repetem para cada um deles.

Dessa forma, a importância das alternativas varia dependendo do subcritério que está sendo considerado.

As justificativas são baseadas nas Tabelas 4, 5 e 6, apresentadas no item 4.3 e que fornecem a descrição fisiográfica dos locais selecionados para estudo. Novamente, busca-se evitar repetições, organizando as alternativas por ordem crescente de importância.

DESAPROPRIAÇÃO

- i. **Local A** - Diferente dos demais locais selecionados, não existem habitações próximas, por isso essa alternativa recebe o menor peso;
- ii. **Local B** - Seguindo a mesma lógica, o Local B é avaliado como mais importante que o Local A, pois existem habitações ao seu entorno. No entanto, devido à baixa quantidade de habitações, a importância de B sobre A é considerada fraca;
- iii. **Local C** - Por ser próximo ao distrito de Pires, o Local C está rodeado de habitações, logo, apresenta absoluta importância sobre A e essencial importância sobre B.

DESMATAMENTO

- i. **Local C** - Percebe-se que o terreno já foi bastante explorado, inclusive por atividades mineradoras, restando áreas verdes apenas ao sul da região considerada para estudo. Sendo assim, o Local C tem menos importância que os demais;
- ii. **Local A** - Também apresenta baixa cobertura vegetal, porém, há algumas áreas de mata a jusante da pilha. Portanto, A tem fraca importância sobre C;
- iii. **Local B** - Ao contrário das demais alternativas, o Local B está situado em uma região de densa cobertura vegetal, podendo abrigar grande diversidade de fauna e flora. Por isso, B possui importância muito grande sobre C e essencial importância sobre A.

CONTAMINAÇÃO DO SOLO

- i. **Local A** - Por ser uma região desabitada e com baixa cobertura vegetal, os impactos de uma possível contaminação do solo no Local A são menos notáveis. Por esses motivos, atribui-se o menor peso para A;

- ii. **Local B** – A densa vegetação e a presença de algumas residências, intensificam os impactos da contaminação do solo em relação ao Local A. Portanto, B tem importância essencial sobre A;
- iii. **Local C** - Apesar da baixa cobertura vegetal, trata-se de uma região densamente povoada, o que significa que impactos associados à contaminação do solo se tornam evidentes, podendo prejudicar a população ao entorno da área. Logo, C tem importância muito grande sobre A e fraca importância sobre B.

CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA

- i. **Local A** - A ausência de corpos hídricos superficiais dificulta a contaminação da água. Ainda assim, pode haver contaminação de lençóis freáticos, embora provavelmente com menor impacto devido à falta de pessoas habitando essa região. Logo, o Local A tem menor importância que os demais;
- ii. **Local C** – Assim como em A, não são identificados corpos hídricos na superfície dessa região, o que sugere pouca probabilidade de contaminação da água. Entretanto, a presença de pessoas ao redor da área pode acarretar problemas em caso de contaminação de águas subterrâneas. Portanto, C tem essencial importância sobre A;
- iii. **Local B** - A presença de corpos hídricos semelhantes a pequenas lagoas é notada na região, sugerindo maior possibilidade de contaminação da água. Ademais, deve-se considerar a proximidade entre as lagoas e as residências, fazendo com que a contaminação da água tenha impactos mais significativos no Local B. Dessa forma, B tem importância muito grande sobre A e fraca importância sobre C.

POLUIÇÃO DO AR / POLUIÇÃO SONORA

- i. **Local A** - A falta de habitações na região faz com que os impactos relacionados à poluição do ar e à poluição sonora sejam menos sentidos nesse local. Além disso, por ser mais próximo das barragens (3,3 Km), a distância de traslado e, conseqüentemente, a emissão de poluentes e ruídos ocorrem por período de tempo menor. Assim, o Local A recebe o menor peso;
- ii. **Local B** – A presença de habitações, ainda que poucas, agrava os impactos desses tipos de poluição. Ademais, a maior distância de deslocamento (7,1

Km) contribui para a geração de poluentes provenientes da queima de combustíveis fósseis e aumenta o tempo de exposição da população a ruídos. Portanto, B tem essencial importância sobre A;

- iii. **Local C** – A distância de traslado dos rejeitos (4,7 Km) é menor em relação à alternativa anterior. Entretanto, o grande número de habitações próximas configura maior importância, visto que os efeitos das poluições do ar e sonora podem ser sentidos de forma imediata por quem está próximo aos locais onde ocorrem o transporte e a disposição dos rejeitos. Dessa forma, C apresenta importância muito grande sobre A e fraca importância sobre B.

4.4 Cálculos

A metodologia de cálculo do MAH foi apresentada anteriormente no item 3.5. No entanto, será resumida adiante para melhor entendimento do processo. Os cálculos foram realizados por meio de planilhas no Excel, organizando os pesos atribuídos aos elementos em matrizes de comparações paritárias. Dessa forma, foi possível obter as prioridades e realizar a análise de inconsistência da hierarquia.

4.4.1 Prioridades

Para definir as prioridades, seguiu-se os procedimentos especificados por Lisboa (2002):

- Somar o total de cada coluna da matriz de comparações paritárias;
- Normalizar as matrizes, dividindo cada um de seus elementos pela soma de sua respectiva coluna;
- Calcular a média aritmética de cada linha das matrizes normalizadas para encontrar o vetor de prioridades.

4.4.2 Análise de Inconsistência

A análise de inconsistência divide-se em duas partes, conforme mostrado a seguir.

PARTE I

- Multiplicação da matriz de comparações paritárias **A** por seu autovetor **w**;

- Definição do autovalor da matriz pela equação (12):

$$A \cdot w = \lambda_{m\acute{a}x} \cdot w$$

ou

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{A \cdot w}{w} \quad (14)$$

Onde,

$\lambda_{m\acute{a}x}$ _ autovalor da matriz;
 A _ matriz de comparações paritárias;
 w _ autovetor de prioridade.

PARTE II

- Definição do índice de consistência pela equação (13):

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Onde,

IC _ índice de consistência;
 $\lambda_{m\acute{a}x}$ _ autovalor da matriz;
 n _ ordem da matriz.

- Definição da razão de consistência (RC):

Consiste na razão entre o índice de consistência e o índice randômico de Saaty.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (15)$$

Onde,

RC _ razão de consistência;
 IC _ índice de consistência;
 IR _ índice randômico, apresentado na Tabela 2.

Se $RC < 0,10$, o grau de consistência é admissível. Caso contrário, pode haver sérias inconsistências, fazendo com que o MAH forneça resultados questionáveis.

5 RESULTADOS

Nesta seção, apresenta-se os resultados provenientes da aplicação do MAH, descrita anteriormente na metodologia do trabalho. Os valores obtidos na análise são mostrados em tabelas que estão divididas em três grupos de acordo com os níveis correspondentes na hierarquia.

A disposição dos resultados é basicamente a mesma em todas as tabelas. Primeiramente, destacam-se os elementos que estão sendo comparados e a intensidade de importância entre eles, formando assim a matriz de comparações paritárias. Em seguida, apresenta-se o autovetor de prioridades obtido conforme processo descrito em 4.4.1. As duas últimas colunas mostram os resultados da Parte I da análise de inconsistência descrita em 4.4.2.

5.1 Matriz pareada no 2º nível

Tabela 7 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor dos critérios

2º NÍVEL	Uso do Solo	Toxicidade dos Rejeitos	Transporte dos Rejeitos	Prioridade Autovetor (w)	$A \cdot w$	$\frac{A \cdot w}{w}$
LOCAL MAIS CRÍTICO						
Uso do Solo	1,000	1/3	5,000	0,283	0,866	3,062
Toxicidade dos Rejeitos	3,000	1,000	7,000	0,643	2,008	3,121
Transporte dos Rejeitos	1/5	1/7	1,000	0,074	0,222	3,013
SOMA				1,000	$\lambda_{máx}$	3,066

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 7 descreve o ranqueamento dos critérios, portanto, tem-se que: o critério *toxicidade dos rejeitos* é o mais importante (0,643 ou 64,3% da importância total), seguido do *uso do solo* (0,283 ou 28,3% da importância total) e o *transporte dos rejeitos* que é o menos importante (0,074 ou 7,4% da importância total).

Aplicando o valor $\lambda_{máx} = 3,066$ na equação 13, tem-se:

$$IC = \frac{3,066 - 3}{3 - 1} = 0,033$$

De acordo com a Tabela 2, o índice randômico para matrizes de ordem 3 é, IR = 0,58, logo tem-se pela equação 15:

$$RC = \frac{0,033}{0,58} = 0,06$$

RC = 0,06 < 0,1, significa que os julgamentos foram consistentes. Assim, encerra-se a Parte II da análise de inconsistência para o 2º nível da hierarquia.

5.2 Matrizes pareadas no 3º nível

Tabela 8 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor dos subcritérios I

3º NÍVEL	Desapropriação	Desmatamento	Prioridade Autovetor (w)	A · w	$\frac{A \cdot w}{w}$
USO DO SOLO					
Desapropriação	1,000	1/5	0,167	0,333	2
Desmatamento	5,000	1,000	0,833	1,667	2
SOMA			<i>1,000</i>	$\lambda_{máx}$	2

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 8 descreve o ranqueamento dos subcritérios relacionados ao uso do solo, portanto, tem-se que: o subcritério *desmatamento* é o mais importante (0,833 ou 83,3% da importância total), seguido de *desapropriação* (0,167 ou 16,7% da importância total).

Aplicando o valor $\lambda_{máx} = 2$ na equação 13, tem-se:

$$IC = \frac{2 - 2}{2 - 1} = 0$$

De acordo com a Tabela 2, o índice randômico para matrizes de ordem 2 é, IR = 0. Isso ocorre pelo fato de existir apenas dois elementos sendo comparados, logo não pode haver inconsistência de julgamentos.

As demais comparações do 3º nível da hierarquia também envolvem apenas dois elementos, portanto, para esse nível, não é necessário realizar a análise de inconsistência.

Tabela 9 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor dos subcritérios II

3º NÍVEL	Contaminação do Solo	Contaminação da Água	Prioridade Autovetor (w)	$A \cdot w$	$\frac{A \cdot w}{w}$
TOXICIDADE DOS REJEITOS					
Contaminação do Solo	1,000	1,000	0,500	1,000	2
Contaminação da Água	1,000	1,000	0,500	1,000	2
SOMA			1,000	$\lambda_{máx}$	2

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 9 descreve o ranqueamento dos subcritérios relacionados à toxicidade dos rejeitos, portanto, tem-se que: os subcritérios *contaminação do solo* e *contaminação da água* apresentam a mesma importância.

Tabela 10 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor dos subcritérios III

3º NÍVEL	Poluição do Ar	Poluição Sonora	Prioridade Autovetor (w)	$A \cdot w$	$\frac{A \cdot w}{w}$
TRANSPORTE DOS REJEITOS					
Poluição do Ar	1,000	1/5	0,167	0,333	2
Poluição Sonora	5,000	1,000	0,833	1,667	2
SOMA			1,000	$\lambda_{máx}$	2

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 10 descreve o ranqueamento dos subcritérios relacionados ao transporte dos rejeitos, portanto, tem-se que: o subcritério *poluição sonora* é o mais importante (0,833 ou 83,3% da importância total), seguido de *poluição do ar* (0,167 ou 16,7% da importância total).

5.3 Matrizes pareadas no 4º nível

Tabela 11 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas I

4º NÍVEL	Local A	Local B	Local C	Prioridade Autovetor (w)	$A \cdot w$	$\frac{A \cdot w}{w}$
DESAPROPRIAÇÃO						
Local A	1,000	1/3	1/9	0,071	0,215	3,006
Local B	3,000	1,000	1/5	0,180	0,544	3,017
Local C	9,000	5,000	1,000	0,748	2,293	3,065
SOMA				1,000	$\lambda_{m\acute{a}x}$	3,029

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 11 descreve o ranqueamento das alternativas relacionadas à desapropriação, portanto, tem-se que: a alternativa *Local C* é a mais importante (0,748 ou 74,8% da importância total), seguida do *Local B* (0,180 ou 18,0% da importância total) e o *Local A* que é o menos importante (0,071 ou 7,1% da importância total).

Aplicando o valor $\lambda_{m\acute{a}x} = 3,029$ na equação 13, tem-se:

$$IC = \frac{3,029 - 3}{3 - 1} = 0,015$$

De acordo com a Tabela 2, o índice randômico para matrizes de ordem 3 é, IR = 0,58, logo tem-se pela equação 15:

$$RC = \frac{0,015}{0,58} = 0,03$$

$RC = 0,03 < 0,1$, significa que os julgamentos foram consistentes.

Tabela 12 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas II

4º NÍVEL	Local A	Local B	Local C	Prioridade Autovetor (w)	$A \cdot w$	$\frac{A \cdot w}{w}$
DESMATAMENTO						
Local A	1,000	1/5	3,000	0,193	0,588	3,043
Local B	5,000	1,000	7,000	0,724	2,273	3,141
Local C	1/3	1/7	1,000	0,083	0,251	3,014
SOMA				1,000	$\lambda_{m\acute{a}x}$	3,066

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 12 descreve o ranqueamento das alternativas relacionadas ao desmatamento, portanto, tem-se que: a alternativa *Local B* é a mais importante (0,724 ou 72,4% da importância total), seguida do *Local A* (0,193 ou 19,3% da importância total) e o *Local C* que é o menos importante (0,083 ou 8,3% da importância total).

Aplicando o valor $\lambda_{\text{máx}} = 3,066$ na equação 13, tem-se:

$$IC = \frac{3,066 - 3}{3 - 1} = 0,033$$

De acordo com a Tabela 2, o índice randômico para matrizes de ordem 3 é, IR = 0,58, logo tem-se pela equação 15:

$$RC = \frac{0,033}{0,58} = 0,06$$

RC = 0,06 < 0,1, significa que os julgamentos foram consistentes.

Tabela 13 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas III

4º NÍVEL	Local A	Local B	Local C	Prioridade Autovetor (w)	A · w	$\frac{A \cdot w}{w}$
CONTAMINAÇÃO DO SOLO						
Local A	1,000	1/5	1/7	0,074	0,222	3,013
Local B	5,000	1,000	1/3	0,283	0,866	3,062
Local C	7,000	3,000	1,000	0,643	2,008	3,121
			SOMA	1,000	$\lambda_{\text{máx}}$	3,066

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 13 descreve o ranqueamento das alternativas relacionadas à contaminação do solo, portanto, tem-se que: a alternativa *Local C* é a mais importante (0,643 ou 64,3% da importância total), seguida do *Local B* (0,283 ou 28,3% da importância total) e o *Local A* que é o menos importante (0,074 ou 7,4% da importância total).

Aplicando o valor $\lambda_{\text{máx}} = 3,066$ na equação 13, tem-se:

$$IC = \frac{3,066 - 3}{3 - 1} = 0,033$$

De acordo com a Tabela 2, o índice randômico para matrizes de ordem 3 é, IR = 0,58, logo tem-se pela equação 15:

$$RC = \frac{0,033}{0,58} = 0,06$$

$RC = 0,06 < 0,1$, significa que os julgamentos foram consistentes.

Tabela 14 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas IV

4º NÍVEL	Local A	Local B	Local C	Prioridade Autovetor (w)	A · w	$\frac{A \cdot w}{w}$
CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA						
Local A	1,000	1/7	1/5	0,074	0,222	3,013
Local B	7,000	1,000	3,000	0,643	2,008	3,121
Local C	5,000	1/3	1,000	0,283	0,866	3,062
SOMA				1,000	$\lambda_{m\acute{a}x}$	3,066

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 14 descreve o ranqueamento das alternativas relacionadas à contaminação da água, portanto, tem-se que: a alternativa *Local B* é a mais importante (0,643 ou 64,3% da importância total), seguida do *Local C* (0,283 ou 28,3% da importância total) e o *Local A* que é o menos importante (0,074 ou 7,4% da importância total).

Aplicando o valor $\lambda_{m\acute{a}x} = 3,066$ na equação 13, tem-se:

$$IC = \frac{3,066 - 3}{3 - 1} = 0,033$$

De acordo com a Tabela 2, o índice randômico para matrizes de ordem 3 é, IR = 0,58, logo tem-se pela equação 15:

$$RC = \frac{0,033}{0,58} = 0,06$$

$RC = 0,06 < 0,1$, significa que os julgamentos foram consistentes.

Tabela 15 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas V

4º NÍVEL	Local A	Local B	Local C	Prioridade Autovetor (w)	A · w	$\frac{A \cdot w}{w}$
POLUIÇÃO DO AR						
Local A	1,000	1/5	1/7	0,074	0,222	3,013
Local B	5,000	1,000	1/3	0,283	0,866	3,062
Local C	7,000	3,000	1,000	0,643	2,008	3,121
SOMA				1,000	$\lambda_{m\acute{a}x}$	3,066

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 15 descreve o ranqueamento das alternativas relacionadas à poluição do ar, portanto, tem-se que: a alternativa *Local C* é a mais importante (0,643 ou 64,3% da importância total), seguida do *Local B* (0,283 ou 28,3% da importância total) e o *Local A* que é o menos importante (0,074 ou 7,4% da importância total).

Aplicando o valor $\lambda_{\text{máx}} = 3,066$ na equação 13, tem-se:

$$IC = \frac{3,066 - 3}{3 - 1} = 0,033$$

De acordo com a Tabela 2, o índice randômico para matrizes de ordem 3 é, IR = 0,58, logo tem-se pela equação 15:

$$RC = \frac{0,033}{0,58} = 0,06$$

$RC = 0,06 < 0,1$, significa que os julgamentos foram consistentes.

Tabela 16 - Comparações paritárias, autovetor e autovalor das alternativas VI

4º NÍVEL	Local A	Local B	Local C	Prioridade Autovetor (w)	$A \cdot w$	$\frac{A \cdot w}{w}$
POLUIÇÃO SONORA						
Local A	1,000	1/5	1/7	0,074	0,222	3,013
Local B	5,000	1,000	1/3	0,283	0,866	3,062
Local C	7,000	3,000	1,000	0,643	2,008	3,121
			SOMA	1,000	$\lambda_{\text{máx}}$	3,066

Fonte: Autoria própria (2023).

A coluna de prioridade da Tabela 16 descreve o ranqueamento das alternativas relacionadas à poluição sonora, portanto, tem-se que: a alternativa *Local C* é a mais importante (0,643 ou 64,3% da importância total), seguida do *Local B* (0,283 ou 28,3% da importância total) e o *Local A* que é o menos importante (0,074 ou 7,4% da importância total).

Aplicando o valor $\lambda_{\text{máx}} = 3,066$ na equação 13, tem-se:

$$IC = \frac{3,066 - 3}{3 - 1} = 0,033$$

De acordo com a Tabela 2, o índice randômico para matrizes de ordem 3 é, IR = 0,58, logo tem-se pela equação 15:

$$RC = \frac{0,033}{0,58} = 0,06$$

RC = 0,06 < 0,1, significa que os julgamentos foram consistentes. Assim, encerra-se a Parte II da análise de inconsistência para o 4º nível da hierarquia.

5.4 Agregação de prioridades às alternativas

Ao agrupar os autovetores gerados nas Tabelas 7 a 16, obtém-se um conjunto de matrizes definidas de acordo com seu nível hierárquico.

- **2º nível**

Tabela 17 - Autovetor do 2º nível

Uso do Solo	0,283
Toxicidade dos Rejeitos	0,643
Transporte dos Rejeitos	0,074

Fonte: Autoria própria (2023).

- **3º nível**

Tabela 18 - Autovetores do 3º nível

	Uso do Solo	Toxicidade dos Rejeitos	Transporte dos Rejeitos
Desapropriação	0,167	0	0
Desmatamento	0,833	0	0
Contaminação do Solo	0	0,5	0
Contaminação da Água	0	0,5	0
Poluição do Ar	0	0	0,167
Poluição Sonora	0	0	0,833

Fonte: Autoria própria (2023).

- 4º nível

Tabela 19 - Autovetores do 4º nível

	Desapropriação	Desmatamento	Contaminação do Solo	Contaminação da Água	Poluição do Ar	Poluição Sonora
Local A	0,071	0,193	0,074	0,074	0,074	0,074
Local B	0,180	0,724	0,283	0,643	0,283	0,283
Local C	0,748	0,083	0,643	0,283	0,643	0,643

Fonte: A autoria própria (2023).

Os pesos finais das alternativas são calculados pela multiplicação das matrizes de autovetores ($n_4 \times n_3 \times n_2$). Quanto menor o peso, menor o impacto exercido pela pilha, indicando maior viabilidade do local para disposição. Assim sendo, a ordem de viabilidade é inversamente proporcional aos pesos obtidos. O resultado da multiplicação matricial é apresentado abaixo.

Tabela 20 - Pesos finais das alternativas

ALTERNATIVA	PESO FINAL
Local A	0,1
Local B	0,5
Local C	0,4

Fonte: A autoria própria (2023).

Portanto, a sequência de viabilidade para disposição da pilha de rejeitos é definida como sendo Local A, seguido por Local C e, por fim, Local B.

6 CONCLUSÃO

Este estudo permite enxergar o papel crucial exercido pela experiência na tomada de decisões, visto que a aplicação efetiva do MAH demanda uma análise detalhada dos fatores definidos como mediadores das escolhas. A identificação desses fatores exige a participação ativa do tomador de decisão, que deve envolver-se profundamente no problema, obtendo informações abrangentes por meio de diversos métodos, como revisão bibliográfica, coleta em campo, consultas a especialistas, entre outros.

Na Figura 23, evidenciou-se que os subcritérios *Desapropriação*, *Contaminação do Solo*, *Poluição do Ar* e *Poluição Sonora* apresentaram impactos mais significativos no Local C. Enquanto isso, os subcritérios *Desmatamento* e *Contaminação da Água* exerceram maior influência sobre o Local B. Seria razoável inferir que o Local C seria menos adequado para a disposição da pilha. No entanto, a Tabela 20 revela que, contrariamente a essa suposição, a opção C é uma alternativa melhor que B. Isso se deve ao fato de que a análise hierárquica atribui pesos aos elementos de decisão, de modo que a frequência com que uma alternativa é considerada mais importante não determina necessariamente sua importância final.

O menor peso final encontrado para o Local A era esperado e mostrou que os cálculos foram conduzidos de maneira correta. Esta constatação é respaldada pela observação de que, em nenhum subcritério, essa alternativa demonstrou ter os impactos mais significativos. Além disso, as análises de inconsistência geraram maior confiabilidade aos pesos relativos estabelecidos em cada comparação paritária. Observou-se que os valores de RC permaneceram consistentemente abaixo de 0,1, sugerindo uma adequada coerência nos julgamentos realizados.

A maior dificuldade identificada na utilização do MAH consistiu na construção das hierarquias e na ponderação adequada dos critérios e subcritérios envolvidos. A atribuição dos pesos relativos e a consistência das comparações pairam como desafios adicionais, demandando uma atenção cuidadosa para evitar distorções nos resultados. Portanto, a aplicação bem-sucedida da análise hierárquica requer não apenas competência técnica, mas também uma compreensão profunda do contexto específico, a fim de superar suas complexidades inerentes.

Vale lembrar que, ainda que seja uma alternativa de disposição mais segura, uma pilha de rejeitos gera impactos diversos. Esta pesquisa se propôs a identificar as

alternativas locacionais que minimizam esses impactos, visando estabelecer uma ordem de viabilidade com base nos critérios e subcritérios avaliados no estudo.

Por fim, é importante destacar que a alocação de uma pilha de rejeitos abrange também princípios científicos e objetivos, de modo que a aplicação de análises subjetivas deve ser feita considerando suas limitações. Conclui-se, portanto, que o Método de Análise Hierárquica é útil na seleção de locais destinados à disposição de rejeitos em pilhas. No entanto, não deve ser o único meio utilizado, visto que a subjetividade do método limita a avaliação de outros parâmetros importantes, como por exemplo: resistência do solo, permeabilidade, concentração de minérios, poropressões, custos (implantação, operação, manutenção), escoamento superficial, entre outros.

Para prosseguimento da pesquisa, seria interessante refazer os julgamentos baseados em entrevistas com profissionais da área, calculando uma média aritmética dos valores definidos em cada comparação paritária. Além disso, sugere-se explorar a aplicação de métodos adicionais de análise multicriterial, tais como MAUT, MACBETH, Lógica Difusa, entre outros, comparando os resultados obtidos com o MAH.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, P.C. **Deposição de rejeitos de mineração no Brasil**. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Deposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Anais. p. 333-349. Rio de Janeiro, 1987.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração (SIGBM). Brasília, DF: ANM, 2021. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Mapa>. Acesso em: 20 set. 2023.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

ARAUJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CARVALHO, G. S.; MINGOTI, S. A. **Programas para realização da análise hierárquica**. 2005. 30 f. Manual de uso – Departamento de Estatística, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

COOLING, D.J. **Improving the sustainability of residue management practices** — alcoa world alumina australia. Paste, p. 3–16, 2007.

DAVIES, M. P. **Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals**. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325976393_Filtered_Dry_Stacked_Tailings_The_Fundamentals. Acesso em: 23 set. 2023.

DAVIES, M.P. et al. (2010). **Dewatered Tailings Practice** – Trends and Observations. In proceedings of Tailings and Mine Waste '10, Balkema.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.

FIÚZA, P.; FREITAS, R. **Perto do fim do prazo, mineradoras precisam desativar 49 das 54 barragens a montante em MG**. 2022. TV Globo, Belo Horizonte. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/20/perto-do-fim-do-prazo-mineradoras-precisam-desativar-49-das-54-barragens-a-montante-em-mg.ghtml>. Acesso em: 18 out. 2023.

GALO, D. B. **Análise de riscos em barragens de rejeitos com o uso de técnicas semiprobabilísticas de estabilidade de taludes: um estudo de caso**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

GOMES, A. C. F. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subprodutos da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro**. 2009. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GOMES, R. C. **Caracterização Tecnológica e Sistemas de Disposição de Resíduos de Mineração**. 2004. 185 f. Publicação Técnica - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1.ed. Brasília: IBRAM, 2016. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>. Acesso em: 15 set. 2023.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS – ICOLD. **Tailings dams: risk of dangerous occurrences - Lessons learnt from practical experiences**. Paris: UNEP/ICOLD, 2001. (Bulletin 121).

LARA, J. L.; LEÓN, E. **Design and operational experience of the Cerro Lindo filtered tailings deposit**. Paste 2011, Australian Centre for Geomechanics, Perth, .p. 25-38, 2011.

LISBOA, M. V. **Contribuição para tomada de decisão na classificação e seleção de alternativas de traçado para rodovias em trechos urbanizados**. 2002. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações II, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Introdução ao tratamento de minérios**. In: **Tratamento de minérios**, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.1. p.1-20.

MEND – **Mine environment neutral drainage project**. MEND Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá, 2017.

MORITA, H. **Revisão do método de análise hierárquica – MAH (AHP – Analytic Hierarchy Process)**. 1998. 129 f. + apêndice. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA-FILHO, W. L. **Questões Geotécnicas da Lavra de Barragens de Rejeito de Mineração**. Relatório Técnico de Pós-Doutorado no Exterior. UFOP. 2016.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PIMENTA, J. **The drained stacking of granular tailings: a disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass**. Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC. 11p., 2011.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

REZENDE, V. A. **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante**. 2013. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

SAATY, T. Basic theory of the analytic hierarchy process: how to make a decision. **Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, España**, v. 93, n. 4, p. 395-423, 1999.

SAATY, T. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.

SILVA, A. P. M. *et al.* **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Brasília: Ipea, 2012. 40 p.

SILVA, V. G. **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica**. 2003. 210 f. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. *In*: LUZ, A. B. *et al.* **Tratamento de minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.19. p.829-896.

VENTURIN, A. M. **Análise de percolação de uma pilha de rejeito filtrado**. 2022. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

VICK, S. G. **Planning, design and analysis of tailing dams**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 369 p.