



Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola
Politécnica & Escola de Química Programa de
Engenharia Ambiental

Bruna Cristina Ramos Faustino

Avaliação multicritério utilizando o Método de Análise Hierárquica (AHP) para
análise dos métodos de disposição de rejeitos na mineração de ferro

Rio de Janeiro
2022



UFRJ

Bruna Cristina Ramos Faustino

**AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO UTILIZANDO O MÉTODO DE ANÁLISE
HIERÁRQUICA (AHP) PARA ANÁLISE DOS MÉTODOS DE
DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NA MINERAÇÃO DE FERRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Cláudia do Rosário Vaz Morgado, Prof. D.Sc.

Coorientador: Victor Paulo Peçanha Esteves, D.Sc.

Rio de Janeiro

2022



UFRJ

Faustino, Bruna Cristina Ramos.
Avaliação multicritério utilizando AHP para análise dos métodos de disposição de rejeitos na mineração de ferro. Bruna Cristina Ramos Faustino. – 2022. 144f. il. 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2022.

Orientador: Cláudia do Rosário Vaz Morgado

Coorientador: Victor Paulo Peçanha Esteves, D.Sc.

1.Riscos na mineração; 2. AHP. I. Morgado, Cláudia do Rosário Vaz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Mestrado.



AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO UTILIZANDO O MÉTODO DE ANÁLISE
HIERÁRQUICA (AHP) PARA ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE
REJEITOS NA MINERAÇÃO DE FERRO

Bruna Cristina Ramos Faustino

Orientadora: Cláudia do Rosário Vaz Morgado, Prof. D.Sc.
Coorientador: Victor Paulo Peçanha Esteves, D.Sc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Orientadora: Prof. Cláudia do Rosário Vaz Morgado, D.Sc., UFRJ

Presidente, Coorientador: Prof. Victor Paulo Peçanha Esteves, D.Sc., UFRJ

Prof. Marcos Barreto de Mendonça, D.Sc., UFRJ

Prof. George Victor Brigagão, D.Sc., UFRJ

Prof. Maria do Carmo Reis Cavalcanti, D.Sc., UFRJ

Rio de Janeiro
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força, coragem, perseverança e persistência na busca do meu objetivo.

In memória dos meus queridos pais Conceição e Desidério que sempre me incentivaram, motivaram e apoiaram em toda a minha caminhada e sempre acreditaram nos meus sonhos, que eles possam ver e compartilhar comigo de onde estiver a finalização desse trabalho. Por eles e para eles que busco finalizar esse projeto tão importante na minha vida acadêmica e profissional, mesmo em um momento de tanta dor pela perda deles nesse período difícil de pandemia.

Ao meu esposo Frank pelo seu companheirismo inenarrável, pela confiança, carinho, compreensão, motivação e por acreditar sempre em mim.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro, e a todos os professores pelos ensinamentos e conhecimento transmitidos ao longo do curso.

Aos meus professores orientadores, Prof^o Victor Paulo Peçanha Esteves e Prof^a Cláudia do Rosário Vaz Morgado pela sua contribuição, paciência, incentivo e as inúmeras revisões para com este trabalho.

Aos membros da Banca Avaliadora por terem aceitado o convite e pela presença nesse passo importante da minha carreira.

RESUMO

FAUSTINO, Bruna Cristina Ramos. Avaliação multicritério utilizando o Método de Análise Hierárquica (AHP) para análise dos métodos de disposição de rejeitos na mineração de ferro. Rio de Janeiro, 2022. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A mineração é uma importante fonte econômica para o Brasil, sendo objeto de exportações e utilização no mercado interno. Embora importante para a economia, a mineração pode causar diversos impactos socioambientais, econômicos e de segurança. Um dos principais problemas enfrentados na mineração é o da disposição de rejeitos do processo final da mineração, que na maioria das vezes são colocados em barragens de rejeitos. Os rompimentos de barragens estão entre as maiores causas de desastres no mundo. O objetivo desse estudo é avaliar por meio do Método de Análise Hierárquica (AHP - *Analytic Hierarchy Process*) qual o método de disposição de rejeito, dentre os métodos de disposição convencional (rejeitos em polpa), rejeitos pastosos e rejeitos filtrados, é o mais sustentável para aplicação na mineração de ferro no Brasil. A metodologia utilizada foi de revisão bibliográfica sobre as técnicas de disposição de rejeitos existentes no Brasil e no mundo e aplicação do Método de Análise Hierárquica. Consideram-se três métodos de disposição de rejeitos para a avaliação: (1) Disposição convencional de rejeitos em forma de polpa/disposição hidráulica (barragem alteadas à montante, alteadas à jusante ou de linha de centro); (2) Disposição de rejeitos em forma de pasta (rejeitos pastosos) e (3) Disposição de rejeitos filtrados (empilhamento a seco). Além disso, foi elaborado um questionário no *Google forms* e enviado para 19 especialistas de formações multidisciplinares (Engenheiros de Minas, Ambientais, Cíveis e Geocientistas) julgando os critérios e subcritérios para aplicação do método AHP. Realizou-se também o tratamento dos dados no Excel®, com cálculo das priorizações e da análise da consistência. Foram removidas no tratamento os dados com razões de consistência acima de 0,20 devido à equipe de julgadores ser multidisciplinar. Por fim, foi realizada uma comparação entre a utilização dos métodos de média geométrica e aritmética dos autovetores no AHP, bem como medidas estatísticas de centralidade (moda, mediana e média) para avaliação da distribuição das respostas. Os resultados encontrados no estudo foram a construção de 13 matrizes para cada respondente por meio da comparação par-a-par e um total de 247 matrizes formadas. Observou-se que independentemente do método e da medida de centralidade dos julgamentos ou do método de cálculo de autovetor, todos indicaram a mesma ordem de ranqueamento das alternativas. Portanto, conclui-se que a alternativa de disposição convencional foi considerada como a mais impactante e a de disposição de rejeitos filtrados (empilhamento a seco) como a menos impactante com base nos critérios e subcritérios apresentados, sendo considerada como a mais sustentável para mineração de ferro no Brasil. Além disso, sua utilização poderia reduzir acidentes com rompimentos de barragens. Desse modo, observou-se que a utilização do método AHP é uma importante ferramenta na tomada de decisão para a avaliação do método de disposição de rejeitos, pois utiliza de avaliação multidisciplinar dos especialistas.

Palavras-chave: 1. Disposição de rejeitos; 2. Rejeitos; 3. Mineração; 4. Segurança

ABSTRACT

FAUSTINO, Bruna Cristina Ramos. **Multicriteria evaluation using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to analyze tailings disposal methods in iron mining.** Rio de Janeiro, 2022. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Mining is an important economic source for Brazil, being the object of exports and use in the domestic market. Although important for the economy, mining can cause several socio-environmental, economic, and safety impacts. One of the main problems faced in mining is the disposal of tailings from the final mining process, which are often placed in tailings dams. Dam failures are among the biggest causes of disasters in the world. This study aims to evaluate through the Analytic Hierarchy Process (AHP) which tailings disposal method, among the conventional disposal methods (slurry tailings, paste and filtered tailings), is the most sustainable for application in iron mining in Brazil. The methodology used was a bibliographic review of the existing tailings disposal techniques in Brazil and the world and Analytic Hierarchy Process application. Three tailings disposal methods are considered for the assessment: (1) Conventional tailings disposal in the form of slurry/hydraulic disposal (upstream, downstream, or centerline dam); (2) Disposal of tailings in the form of a paste (pasty tailings) and (3) Disposal of filtered tailings (dry stacking). In addition, a questionnaire was prepared on Google forms and sent to 19 specialists from multidisciplinary training (Mining, Environmental, Civil and Geoscientist Engineers), judging the criteria and sub-criteria for application of the AHP method. Data processing was also carried out in Excel®, with prioritization calculation and consistency analysis. Data with consistency ratios above 0.20 were removed from the treatment due to the multidisciplinary team of judges. Finally, a comparison was made between the use of the geometric mean and arithmetic methods of the eigenvectors in the AHP and statistical measures of centrality (mode, median, and mean) to evaluate the distribution of responses. The results found in the study were the construction of 13 matrices for each respondent through the pair-to-pair comparison and a total of 247 matrices formed. Furthermore, it was observed that regardless of the method and the measure of centrality of judgments or the method of calculating the eigenvector, all indicated the same ranking order of the alternatives. Therefore, it is concluded that the conventional disposal alternative was considered the most impactful and the filtered tailings disposal alternative the least impacting based on the criteria and sub-criteria presented, being considered the most sustainable for iron mining in Brazil and its use. could reduce accidents with dam failures. Thus, it was observed that the use of the AHP method is an essential tool in decision-making for evaluating the tailings disposal method, as it uses a multidisciplinary assessment by specialists.

Keywords: 1. Tailings disposal; 2. Tailings; 3. Mining; 4. Security

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mineração no cotidiano	12
Figura 2: Maiores acidentes com vítimas fatais devido à rompimento de barragens de rejeitos de mineração.	17
Figura 3: Estatísticas dos principais e maiores países minerários do mundo.	20
Figura 4: Etapas do processo de mineração.	23
Figura 5: Processo de desenvolvimento da mina.	25
Figura 6: Processo de lavra e atividades de operação da mina.	26
Figura 7: Fluxograma típico de tratamento de minério	27
Figura 8: Tipos de produtos do minério de ferro	31
Figura 9: Integração dos processos minerários em uma mina.	32
Figura 10: índices de reciclagem/recirculação por tipologia do minério.....	33
Figura 11: Barragem da CSN em Congonhas – Minas Gerais – Método à jusante.....	35
Figura 12: Mina recuperada	36
Figura 13: Diferentes características de rejeitos, seus respectivos aspectos e tipos de depósitos.	39
Figura 14: Esquema comparativo entre formas de disposição de rejeito.....	40
Figura 15: Sistemas de disposição de rejeitos - a) Hidrociclone, b) Spray bars, c) Espigote..	44
Figura 16: Disposição de rejeito em polpa - Espigote	44
Figura 17: Método construtivo de jusante	46
Figura 18: Método construtivo de linha de centro	47
Figura 19: Método construtivo com alteamento de montante	48
Figura 20: Tipos de rejeitos pela respectiva porcentagem de sólidos e mecanismos de espessamento e transporte.....	51
Figura 21: Rejeito espessado	52
Figura 22: Empilhamento Drenado do Xingu.....	53
Figura 23: Consistência da pasta mineral.	54
Figura 24: Área impactada pela disposição em pasta	55
Figura 25: Disposição de rejeito de pasta em torres.	56
Figura 26: Empilhamento superficial de pasta em torre	58
Figura 27: Modelo de filtro-prensa.....	59
Figura 28: Filtro rotativo de rejeitos a vácuo.....	59
Figura 29: Pilha de rejeito filtrado (<i>Dry stack</i>) em operação na Mina Cerro Lindo, Peru.	61
Figura 30 - Disposição em pit.....	64

Figura 31: Disposição compartilhada com rejeitos e estéreis.....	65
Figura 32: Tendências na utilização dos rejeitos desaguados na mineração mundial.	65
Figura 33: Blocos e peças produzidos com rejeito da atividade minerária.....	66
Figura 34: Tripé da sustentabilidade.....	67
Figura 35: Rupturas de barragens ao longo do período de 1915 a 2019.....	72
Figura 36: Registros de acidentes com rompimentos de barragem de rejeitos na mineração brasileira de ferro entre 1986 a 2019. Fonte: (Elaborado pela autora no QGIS 2.18.28, 2019)	73
Figura 37: Rompimento da barragem de rejeitos da empresa Vale em Brumadinho.	74
Figura 38: Método de Decisão Multicritério (MCDM)	82
Figura 39: Estrutura hierárquica utilizado para o método AHP.	84
Figura 40: Índice Randômico.....	89
Figura 41: Fluxograma geral do AHP para os métodos de disposição de rejeitos estudados..	95
Figura 42: Critérios utilizados no método AHP	100
Figura 43: Árvore de Critérios e subcritérios	103
Figura 44: Árvore de estrutura hierárquica exibindo o objetivo, critérios adotados, subcritérios e alternativas	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Tipos de mineral-minério de ferro.	22
Quadro 2: Minas que utilizam a técnica de empilhamento a seco por meio de filtragem.	63
Quadro 3: Custos operacionais (em dólar por tonelada de rejeito) para diferentes técnicas de desaguamento (não estão incluídos os custos de capital e fechamento).....	71
Quadro 4: Estudos realizados utilizando MCDM.....	82
Quadro 5: Escala relativa para comparação paritária	85
Quadro 6: Critérios de comparação de características dos impactos socioambientais utilizados no método AHP.....	96
Quadro 7: Critérios de comparação de características dos impactos técnicos e econômicos utilizados no método AHP	97
Quadro 8: Critérios de comparação de segurança e riscos operacionais utilizados no método AHP.....	99
Quadro 9: Comparação entre os valores de média, mediana e moda dos dados abaixo de 20% de consistência individual.	110
Quadro 10: Matriz geral de comparação dos critérios gerais	114
Quadro 11: Matriz de critérios de Impactos Socioambientais x subcritérios	115
Quadro 12: Matriz de Critérios de técnicos e econômicos x subcritérios.....	115
Quadro 13: Matriz de Critérios de segurança e riscos operacionais x subcritérios	116
Quadro 14: Matriz Avaliação de impactos na água sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.....	117
Quadro 15: Matriz Avaliação de impactos no solo sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.....	117
Quadro 16: Matriz Avaliação de impactos no ar sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.....	118
Quadro 17: Matriz Avaliação do CAPEX sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.	119
Quadro 18: Matriz Avaliação do OPEX sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.	119
Quadro 19: Matriz Avaliação dos aspectos regulatórios sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.	120
Quadro 20: Matriz Avaliação de riscos para as empresas a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.....	121

Quadro 21: Matriz Avaliação de riscos para os trabalhadores a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.....	121
Quadro 22: Matriz Avaliação de riscos para a sociedade sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.....	122
Quadro 23: Matriz de decisão do AHP - Critérios e subcritérios	123
Quadro 24: Matriz de decisão – Subcritérios x Alternativas	124
Quadro 25: Ranqueamento das alternativas usando média aritmética.....	125
Quadro 26: Matriz de decisão para os valores de corte abaixo de 20% individualmente	125
Quadro 27: Matriz de decisão para os valores de corte abaixo de 20% por profissões	126
Quadro 28: Matriz de decisão para os dados brutos utilizando a média aritmética.....	127
Quadro 29: Dados de ranqueamento sem exclusão – Dados brutos do julgamento dos especialistas.....	127

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM – Agência nacional da mineração

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

AHP - *Analytic Hierarchy Process* - Método de Análise Hierárquica

ANP - *Analytic Network Process* - Método de Análise em Redes

CAPEX - *Capital Expenditure* - dispêndio de capital

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

DNPM - Departamento nacional de produção mineral

EIA- Estudo de Impacto Ambiental

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

ICOLD – *International comission on large dam* - Comissão Internacional de Grandes Barragens

LSO - Licença Social para Operar

MCDM - Método de decisão multicritério

OPEX – *Operational Expenditure* - dispêndios operacionais

PAEBM - Plano de Ações de Emergência para Barragens de Mineração

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

PRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RIMA - Relatório de impacto ambiental.

SIOP - Projeto de Minério de Ferro Sangan

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 MINERAÇÃO	19
2.2 O SETOR DE MINERAÇÃO NO BRASIL	20
2.3 O PROCESSO DA MINERAÇÃO	22
2.3.1 Pesquisa Mineral.....	23
2.3.2 Lavra mineral.....	24
2.3.3 Beneficiamento mineral.....	26
2.3.3.1 Britagem.....	27
2.3.3.2 Peneiramento.....	27
2.3.3.3 Moagem	28
2.3.3.4 Classificação	28
2.3.3.5 Concentração.....	29
2.3.3.6 Desaguamento.....	29
2.3.3.7 Produto final.....	30
2.3.3.8 Resíduos da mineração	31
2.3.3.8.1 Estéril.....	31
2.3.3.8.2 Rejeito.....	31
2.3.3.9 Novas tecnologias para diminuição do recurso hídrico.	33
2.3.4 Fechamento da mina.....	36
2.5 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NA MINERAÇÃO.....	36
2.4 BARRAGENS DE MINERAÇÃO.....	41
2.5.1 Barragens de Rejeitos - Disposição de Rejeitos em Forma de Polpa - (disposição convencional).....	42
2.5.1.1 Método a jusante	46
2.5.1.2 Método de Linha de Centro	47

2.5.1.3 Método de montante	48
2.5.2 Rejeitos densificados	49
2.5.2.1 Rejeitos espessados (<i>thickened tailings</i>) - lama espessada	49
2.5.2.2 Empilhamento Drenado	52
2.5.2.3 Rejeitos em pasta (<i>paste tailings</i>)	53
2.5.2.4 Rejeitos filtrados – empilhamento a seco – (<i>dry stacking</i>)	58
2.5.3 Disposição em cava	63
2.5.4 Codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis.....	64
2.5.5 Reprocessamento de rejeitos e sua Reutilização	65
2.6 IMPACTOS DA MINERAÇÃO	66
2.6.1 Desenvolvimento sustentável na mineração	66
2.6.2 Impactos Socioambientais na mineração.....	68
2.6.3 Impactos Técnico-econômicos na mineração	69
2.6.4 Impactos sociais decorrentes de segurança e riscos operacionais	71
2.6.4.1 Acidentes na mineração com barragens de rejeitos	71
2.6.4.2 Riscos da mineração para os trabalhadores, sociedade e para a empresa.....	76
2.7 LEGISLAÇÕES RELATIVAS À GESTÃO DE REJEITOS NA MINERAÇÃO	79
2.8 ANÁLISE MULTICRITÉRIO	81
2.8.1 Método Analítico Hierárquico (AHP).....	83
2.8.1.1 Estrutura hierárquica.....	84
2.8.1.2 Coleta de julgamentos par a par dos especialistas	85
2.8.1.2.1 Escala numérica de Saaty.....	85
2.8.1.2.2 Matrizes paritárias e cálculo dos pesos dos critérios, subcritérios e as alternativas.	85
2.8.1.2.3 Análise da Consistência	88
2.8.1.3 Prioridade global das alternativas/ranqueamento das alternativas.....	90
2.8.1.4 Softwares existentes no mercado para aplicação do método AHP	91
2.8.1.5 Unidades de centralidade	91
3. METODOLOGIA.....	93
3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS	95
3.2 APLICAÇÃO DA MÉTODOLOGIA DO AHP	99
3.2.1 Definição do problema e das alternativas a serem avaliadas.....	99
3.2.2 Definição dos critérios e sub-critérios de avaliação	101
3.2.2.1 Impactos Socioambientais.	101

3.2.2.2 Técnicos e econômicos	101
3.2.2.3 Segurança e riscos operacionais.....	102
4. RESULTADOS	105
4.1 QUESTIONÁRIO E RESULTADOS DA PESQUISA	105
4.2 MATRIZES COMPARATIVAS CRITÉRIOS GERAIS, NORMALIZAÇÃO E CÁLCULO DAS PRIORIZAÇÕES	113
4.3 MATRIZES COMPARATIVAS CRITÉRIOS X SUBCRITÉRIOS, NORMALIZAÇÃO E CÁLCULO DAS PRIORIZAÇÕES	114
4.4 MATRIZES COMPARATIVAS SUBCRITÉRIOS X ALTERNATIVAS, NORMALIZAÇÃO E CÁLCULO DAS PRIORIZAÇÕES	116
4.5 CÁLCULO DA PRIORIDADE GLOBAL DAS ALTERNATIVAS/RANQUEAMENTO DAS ALTERNATIVAS	122
5. CONCLUSÃO	128
REFERÊNCIAS.....	131
APÊNDICE A – LISTA DOS PRINCIPAIS ACIDENTES OCORRIDOS NA MINERAÇÃO DE FERRO BRASILEIRA	145
APÊNDICE B – AVALIAÇÕES DOS ESPECIALISTAS – DADOS BRUTOS	148
APÊNDICE C – GUIA ENVIADO AOS ESPECIALISTAS.....	153
APÊNDICE D – QUESTIONÁRIO APLICADO PARA AVALIAÇÃO DO MÉTODO AHP	163

1. INTRODUÇÃO

A mineração desenvolve-se no Brasil desde o período colonial com a busca por metais preciosos pelos bandeirantes. Desde então novas jazidas foram descobertas e o setor mineral tornou-se uma importante fonte econômica e social para o país.

De acordo com Luz e Lins (2018), um mineral pode ser definido como todo corpo com origem natural, de origem inorgânica, homogêneo, possui composição química e propriedades físicas definidas e que podem ser encontrados na crosta terrestre ou em outros corpos celestes. Já a rocha é denominada como um agregado de minerais, sendo chamado de mineral-minério os minerais que apresentam importância econômica e são denominados de ganga os minerais que não apresentam importância econômica.

De acordo com Mineropar (2013), a importância da mineração pode ser observada no cotidiano de uma casa, onde minerais são utilizados na construção e decoração, conforme exibido na Figura 1.



Elemento Construtivo	Substância Mineral	Elemento Construtivo	Substância Mineral
Tijolo	Argila	Pias	Mármore, Granito, Ferro, Níquel, Cobalto
Bloco	Areia, Brita, Calcário	Encanamento Metálico	Ferro, Cobre
Fiação Elétrica	Cobre, Petróleo	Encanamento PVC	Petróleo, Calcita
Fundações de Concreto	Areia, Brita, Calcário, Ferro	Forro de Gesso	Gipsita
Ferragens	Ferro, Alumínio, Cobre, Zinco, Níquel	Esquadrias	Alumínio, Ligas de Ferro, Manganês
Vidro	Areia, Calcário, Feldspato	Piso	Ardósia, Granito, Mármore
Louça Sanitária	Caulim, Calcário, Feldspato, Talco	Calha	Ligas de Zinco - Níquel - Cobre, Amianto
Azulejo	Caulim, Calcário, Feldspato, Talco	Telha	Argila
Piso Cerâmico	Caulim, Calcário, Feldspato, Talco, Argila	Pregos e Parafusos	Ferro, Níquel
Isolante - Lã de Vidro	Quartzo, Feldspato	Isolante - Agregado	Mica

Figura 1: Mineração no cotidiano
Fonte: (MINEROPAR, 2013)

De acordo com dados do ano base de 2019, a indústria extrativa mineral representa 2,3% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, excluindo petróleo e gás e emprega diretamente em torno de 174.719 mil empregos diretos e mais de 2,2 milhões empregos indiretos trabalhadores. Além disso, o minério de ferro representa 68% de toda produção mineral brasileira exportada (IBRAM, 2020).

O processo de produção mineral inicia-se com a pesquisa e exploração na descoberta das jazidas minerais, seguindo pelas etapas de lavra, beneficiamento do bem mineral e termina com o fechamento da mina. Alguns processos minerais geram resíduos sendo que a lavra gera resíduos sólidos da extração, chamados na mineração de estéril, sendo que esses são armazenados em pilhas de estéril. Já o processo de beneficiamento do minério produz como resíduo, o rejeito mineral que é disposto geralmente em barragens sob a forma de polpa (IBRAM, 2016). Rejeito é definido pela norma NBR 13028 (ABNT, 2017) como “todo e qualquer material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios”. O fluxograma do processo de mineração engloba ainda etapas de adução de água, transporte do produto e do rejeito, tratamento de efluentes e fechamento da mina. Após a etapa de beneficiamento mineral ocorre a fase de comercialização do produto (BOCCAMINO, 2017).

A barragem de rejeitos é uma das opções mais utilizadas para armazenar rejeitos de minas metálicas e não metálicas. O investimento de instalações de rejeitos representa cerca de 5% a 10% do investimento total para a construção da mina (XIN *et al.*, 2011). As barragens de rejeito são geralmente construídas com solo local, enrocamentos que utiliza de blocos com maiores frações granulométricas. Além disso, podem ser utilizados estéreis e o próprio rejeito, existindo nesse último maior riscos de rupturas que ameaçam as instalações e aos moradores a jusante (XIN *et al.*, 2011; IBRAM, 2016).

Segundo dados de 2022 da Agência Nacional da mineração (ANM) existem no Brasil 913 barragens de mineração sendo que apenas 496 (54,33%) delas estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Dentre as 496 barragens existentes no PNSB, a maioria encontra-se localizada no estado de Minas Gerais com 213 barragens (23,33%), em segundo e terceiro lugar encontra-se o estado do Pará empatado com o Mato Grosso com 79 barragens (8,65%) cada um respectivamente. A cidade que mais possui barragens é a de Jaguarari no estado da Bahia com 54 barragens no total. Entretanto, só 2 delas estão inseridas no PNSB. A cidade de Mariana em Minas Gerais possui 17 barragens sendo 12 inseridas na PNSB e 5 que não estão inseridas no PNSB. Entre as 496 barragens inseridas no PNSB, 260 apresentam alto dano potencial, duas estão classificadas como grau de risco alto, 161 de risco médio, e 75 de risco baixo. (ANM, 2022, dados extraídos dia 14/05/22).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNIB) o Dano Potencial Associado (DPA) é o dano que pode ocorrer devido a vazamento, rompimento, mau funcionamento de uma barragem ou infiltração no solo, independente da sua probabilidade de ocorrência. Além disso, pode ser graduado conforme com as perdas de vidas humanas e os seus respectivos impactos sociais, ambientais e econômicos. (SNIB, 2022).

O método construtivo de barragens mais utilizado no Brasil é o de etapa única com 513 barragens, seguido em segundo lugar pelo método de construção de alteamento à jusante com 191 e alteamento por linha de centro com 105 barragens. O alteamento à montante ou desconhecido que é considerado pouco seguro, ainda apresenta um número significativo de barragens no Brasil com 66 barragens, sendo que esse número vem sendo reduzido devido à descaracterização das barragens em decorrência da proibição de sua utilização no Brasil em 2019. Por fim, 38 barragens não apresentam preenchimento do método construtivo. (ANM, 2022, dados extraídos dia 14/05/22). Essa escolha do método depende também do tipo de mineral.

A maioria das falhas que levam ao rompimento de barragens resulta de diversas causas mecânicas que estão relacionados a presença de água na barragem, como por exemplo: incidentes devido ao (*overtopping*) também chamado de galgamento que é quando o aporte de água ao reservatório ultrapassa a capacidade deste ultrapassando a cota do barramento vertendo sobre este último. Infiltração (*seeping*) de água através da barragem, erosão interna/entubamento (*piping*), liquefação que é quando a massa de solo ou rejeitos passa a ter um comportamento de um líquido. Os rejeitos arenosos estão mais sujeitos à liquefação. (TIAN, XUE , 2006; RICO *et al.*, 2008; STRACHAN e GOODWIN, 2015). O método de construção com maior número de acidentes em barragens de rejeitos no mundo é o método com alteamento à montante, representando 76% dos casos. Os métodos de alteamento à jusante e o de centro de linha representaram 15% e 5 % dos casos globais respectivamente (RICO *et al.*, 2008).

Os impactos causados em decorrência do rompimento de barragens de rejeitos podem ser evitados ou minimizados se métodos de disposição de rejeitos desaguados, espessados e/ou filtrados forem utilizados ao invés da utilização da disposição hidráulica. Desse modo os rejeitos são dispostos no meio ambiente na forma de pilhas mais secas, resultando em menores danos ao meio ambiente, sociedade à jusante e em um menor passivo ambiental para as futuras gerações (BOCCAMINO, 2017).

Segundo Liu *et al.*, (2016), os meios tradicionais de disposição de rejeitos como o de barragem de rejeitos estão se tornando obsoletos gradualmente devido ao alto risco e os grandes impactos no meio ambiente. França e Trampus (2018) e Pontes (2013) argumentam que o desaguamento de rejeitos minerais como os rejeitos espessados, pastosos e filtrados são métodos de disposição alternativos às barragens de rejeitos convencionais (aterro hidráulico) de modo a minimizar os riscos e os impactos ambientais, porém apenas quanto à ruptura de barragens. Por fim, Duarte (2019) afirma que a disposição a seco de resíduos da mineração é

uma tendência crescente na área de beneficiamento dos minérios

Caso não adequadamente executadas, as pilhas de rejeitos podem também sofrer instabilização, como a pilha que instabilizou durante as recentes chuvas em Minas Gerais provocando uma onda no reservatório da barragem de rejeitos e podendo causar overtopping dessa. De acordo com Parreiras (2022), o desmoronamento dos detritos de empilhamento a seco na Mina de Pau Branco da Vallourec, em 8 de janeiro de 2022, após as chuvas em Minas Gerais sobre o dique de água denominado de Lisa causou um transbordamento de lama, água, pedras e detritos causando impactos ambientais na mata da região, no solo e interditando por mais de 6 horas a rodovia da BR-040. Essa interrupção causou o impedimento do fluxo da rodovia que liga a cidade de Belo Horizonte a cidade de Ouro Preto e ao estado do Rio de Janeiro.

1.1 OBJETIVO

Os subtópicos a seguir apresentarão os objetivos gerais e específicos do estudo realizado.

1.1.1 Objetivo Geral

O estudo objetiva avaliar por meio do método de Análise Hierárquica (AHP - *Analytic Hierarchy Process*) qual o método de disposição de rejeito, dentre os métodos de disposição convencional (rejeitos em polpa), rejeitos pastosos e rejeitos filtrados, é o mais sustentável para aplicação na mineração de ferro no Brasil

1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir quadro resumo dos critérios, subcritérios relacionados as alternativas possíveis para a disposição dos rejeitos provenientes da mineração de ferro.
- Elaborar o formulário no *google forms*, o guia auxiliar e realizar sua aplicação para o julgamento dos especialistas usando o AHP.
- Comparar a aplicação do AHP usando média aritmética e média geométrica.
- Compilar as respostas dos especialistas, aplicar e analisar o AHP.

1.2 JUSTIFICATIVA

Acidentes com barragens tem ocorrido no mundo inteiro causando diversas mortes. O acidente envolvendo a Barragem de Vajont, na Itália (1963) construída no Vale do Rio Vajont,

na Itália é um dos casos mais danosos envolvendo tais estruturas que se tem registro. A barragem hidrelétrica era utilizada para o armazenamento de água e geração de energia elétrica. O acidente ocorreu devido à onda causada por instabilização e deslizamento da encosta natural a montante da mesma resultando em uma onda que ultrapassou a crista da barragem em mais de 100 m de altura, evento denominado de galgamento (*overtopping*) da barragem, e que causou a morte de mais de 2000 mil pessoas no vale a jusante. (FERLA, 2018).

O Brasil protagonizou em 2015 o maior desastre ambiental do país com o rompimento da barragem de rejeitos na cidade de Mariana (MG), que resultou na morte de 19 pessoas e causou grandes impactos ambientais, levando o rejeito ao mar na costa do Espírito Santo (VORMITTAG *et al.*, 2018). De acordo com Bowker (2015) apud Armada (2021), o desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana em 2015 é o maior do mundo em termos de volume de lama de rejeitos em termos de volume mobilizado (50 a 60 milhões de metros cúbicos) e de lama percorrida.

Segundo Armada (2021, p. 15), o acidente ocorrido na cidade de Mariana no Brasil, corresponde a praticamente, à soma dos outros dois maiores acontecimentos já registrado no mundo, sendo ambos nas Filipinas um em 1982 com 28 milhões de m³; e outro em 1992, com 32,2 milhões de m³ de lama. Já com relação à distância percorrida, Armada (2021) menciona que os rejeitos da Samarco percorreram 600 quilômetros. No histórico de acidente mundial, o segundo lugar com registros ocorridos nesse tipo de acidente aconteceu na Bolívia, em 1996, onde a lama percorreu 300 quilômetros, ou seja, metade da distância percorrida pela lama da Samarco em Mariana-MG.

Além disso, a autora do estudo é natural da cidade de Mariana no estado de Minas Gerais, sendo essa uma grande motivação para que outros métodos de disposição sejam utilizados na mineração, de modo a evitar futuros rompimentos de barragens de rejeitos no Brasil.

Em 2019 o Brasil presenciou um dos maiores acidentes no Brasil com perdas de vidas humanas com o rompimento da barragem na cidade de Brumadinho (MG), onde mais de 260 pessoas morreram e 10 estão desaparecidas (VALE, 2021), além dos impactos ambientais.

De acordo com *Wise uranium Project* (2019) apud Armada (2021) a tragédia de Brumadinho passará para o topo dos maiores acidentes com vítimas fatais no mundo com relação a acidentes com barragens de rejeitos de mineração, ficando em segundo lugar, atrás apenas do acidente em Sgorigrad, Bulgária, com 488 mortes (Figura 2).

	Ano	País	Localidade	Mortes
1	1966	Bulgária	Sgorigrad	488
2	2019	Brasil	Brumadinho	270
3	1995	Itália	Stava	268
4	2008	China	Taoshi	254
5	1968	Chile	El Cobre	Entre 200 e 350
6	1992	Sri Lanka	Kantale	180
7	1966	País de Gales	Aberfan	144
8	1972	EUA	Buffalo Creek	125
9	2015	Mianmar	Hpakant	113
10	1970	Zâmbia	Mufulira	89

Figura 2: Maiores acidentes com vítimas fatais devido à rompimento de barragens de rejeitos de mineração.

Fonte: (WISE URANIUM PROJECT, 2019 apud ARMADA, 2021).

Ambas as barragens que se romperam apresentavam estruturas semelhantes de disposição de rejeitos, sendo o método de construção de disposição hidráulica com alteamento a montante (G1, 2019). Entretanto, a disposição dos rejeitos não foi o fator determinante e sim o método de alteamento para montante no qual a barragem se assenta sobre rejeito não consolidado.

O rompimento da barragem de Brumadinho, fez com que a Agência Nacional de Mineração (ANM) proibisse através da resolução nº 4 de 15 de fevereiro de 2019 a construção e utilização de novas barragens de rejeitos pelo método de alteamento à montante e exigiu que as mineradoras realizassem o descomissionamento das barragens, que ainda utilizam o método devido às essas barragens serem menos seguras e estáveis comparadas aos demais métodos (BRASIL, 2019).

As técnicas de disposição de rejeitos evoluíram muito nos últimos anos no mundo impulsionadas por graves acidentes ocorridos como os de Brumadinho e de Mariana no Brasil e o aumento dos volumes gerados durante a produção mineral, maiores exigências dos órgãos ambientais e a dificuldade de outorgas de água para utilização no processo de beneficiamento mineral. Após esses graves acidentes ocorridos, surge à necessidade urgente no Brasil de implementação de novas tecnologias de disposição de rejeitos a seco, de modo que a exploração mineral continue sendo realizada no país, porém de forma mais segura e sustentável.

Segundo Ávila (2016) o principal objetivo das tecnologias de desaguamento é a eliminação máxima da água usada no processamento mineral, pois causa instabilidade aos reservatórios de rejeitos. A disposição de rejeitos pelos métodos de aterro hidráulico em reservatórios de barragens apresenta maior quantidade de água nas barragens quando comparado aos métodos de tecnologias de rejeitos desaguados. Por outro lado, os métodos de

rejeitos desaguados estão ordenados a seguir em quantidade decrescente de água e crescente de porcentagem de sólidos em suas estruturas de barragens. Rejeitos espessados (*thickened tailings*), rejeitos em pasta (*paste tailings*), rejeitos filtrados a úmido (*wet cake tailings*), rejeitos filtrados a seco (*dry cake tailings*) que podem chegar entre 70% e 85% de sólidos, codisposição de rejeitos e estéreis em superfície (FIGUEIREDO, 2007).

Segundo a Resolução da Agencia Nacional da Mineração (ANM) no 85 de 2021, o estéril de mina é um material in natura descartado diretamente na operação de lavra, antes da etapa de beneficiamento. Já o rejeito é o material descartado durante e/ou após o processo de beneficiamento (ABNT, 2017, BRASIL, 2021). As tecnologias de disposição de rejeitos com menos água são utilizadas em um ritmo/quantidade crescente no exterior. Entretanto, o Brasil caminha em passos mais lentos, sendo necessárias grandes tragédias para que ocorra uma mudança na legislação e obrigue as empresas a mudarem os seus métodos tecnológicos de disposição de rejeitos. Catástrofes continuarão a acontecer enquanto as empresas não melhorarem as práticas de gerenciamento de rejeitos (SCHOENBERGER, 2016).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente estudo está dividido na seguinte ordem: No primeiro capítulo é apresentado uma introdução acerca do tema estudado, bem como os seus objetivos e justificativa da pesquisa.

No segundo capítulo é disposto um referencial teórico onde serão apresentados os principais conceitos relativos ao processo mineral, desde o seu entendimento do que é a mineração, explicação das etapas de tratamento do minério, até os processos de disposição de rejeitos minerais. O referencial teórico apresenta ainda os principais métodos utilizados para a tomada de decisão multicritérios com foco na explicação do método AHP que será utilizado nesse estudo. O terceiro capítulo apresentara a metodologia utilizada no estudo, assim como a metodologia utilizada para a aplicação do método de AHP.

Já no quarto capítulo será apresentado os resultados do estudo da aplicação do método AHP na avaliação dos métodos de disposição de rejeitos da mineração de ferro. Serão apresentados os resultados obtidos por meio da coleta de dados dos questionários respondidos, análise sistemática dos dados e pôr fim a avaliação e ranqueamento das alternativas propostas na aplicação do método AHP. Desse modo, será apresentado o método menos impactante e mais sustentável segundo a pesquisa, para a aplicação na mineração de ferro no Brasil. No último capítulo será apresentada a conclusão do trabalho, limitações do estudo e do método e sugestões para futuros trabalhos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado um referencial teórico sobre a mineração, que será de grande importância para a compreensão e entendimento dos métodos de disposição de rejeitos analisados ao longo desta dissertação. Será feita uma breve definição do conceito da mineração, uma descrição do processo mineral e uma análise dos impactos socioambientais e gestão de risco das barragens bem como as legislações ambientais aplicadas atualmente no Brasil quanto às barragens de mineração.

2.1 MINERAÇÃO

A mineração é uma das atividades mais importantes e antigas da história da civilização humana, pois fornece as matérias primas utilizadas nos processos de transformação. A mineração é uma importante atividade econômica para muitos países, especialmente para os subdesenvolvidos, sendo os seus produtos indispensáveis para a sociedade moderna e o seu desenvolvimento humano (CANDEIAS *et al.*, 2018; ANDERSSON *et al.*, 2014).

A mineração é uma palavra originado do latim medieval - *mineralis* – e está relacionada à mina e os minerais. A mineração pode ser definida de forma genérica como o processo de extração de minerais que existem no solo e/ou nas rochas. A mineração apresenta natureza econômica e é denominada como indústria de produtos minerais ou indústria extrativa mineral. (DNPM, 2020; ENRÍQUEZ; DRUMMOND, 2007).

Segundo Candeias *et al.* (2018), existem diversas definições sobre o conceito de mina. Entretanto, em 1982, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US EPA) definiu uma mina como “uma área de solo sobre ou abaixo da qual minerais ou minérios metálicos são extraídos de depósitos naturais na terra por qualquer método, incluindo a área total sobre a qual tais atividades ocorrem ou perturbam a superfície natural da terra”.

De acordo com o *site* Statista (2020) e os dados de mineração mundial desenvolvidos pelo Ministério de Sustentabilidade e Turismo da Áustria (2019), os maiores países mineradores do mundo são, com base na extração de produtos minerais em 2017, em milhões de toneladas: China, EUA, Rússia, Austrália, Índia, Arábia Saudita, Indonésia e em oitavo lugar o Brasil conforme exibido na Figura 3.

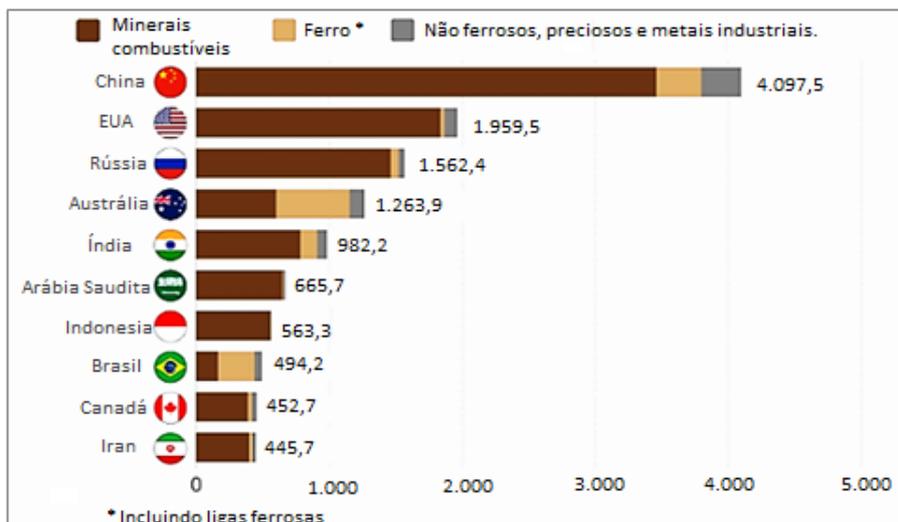


Figura 3: Estatísticas dos principais e maiores países minerários do mundo.

Fonte: (WORLD MINING DATA, 2019 apud STATISTA, 2020).

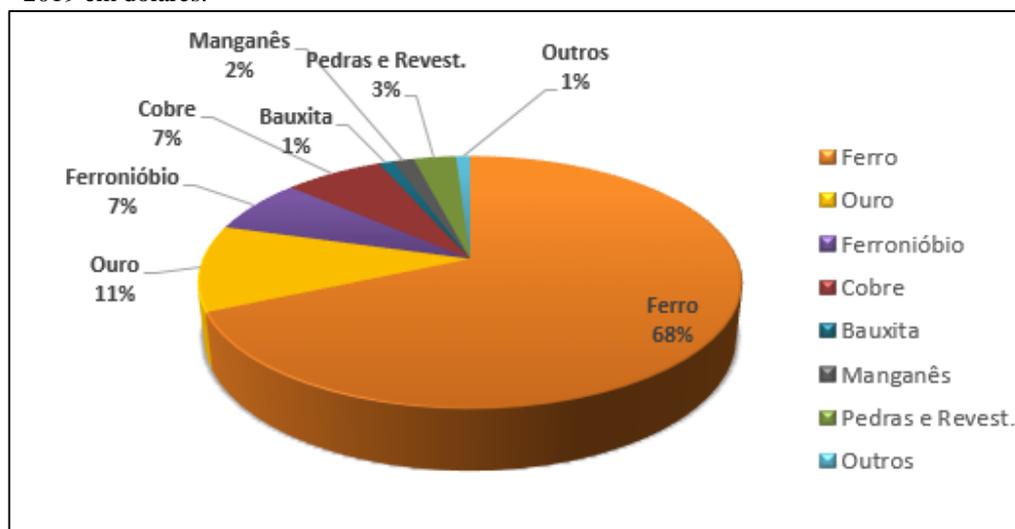
Os três principais países produtores mundiais de minério de ferro em 2018 (em milhões de toneladas) foram: a Austrália com 900 Mt, Brasil com 460 Mt e China com 335 Mt (STATISTA, 2020).

2.2 O SETOR DE MINERAÇÃO NO BRASIL

Dados do Instituto Brasileiro de Mineração em 2017, mostram que o Brasil exportou mais de 403 megatoneladas de bens minerais, o que corresponde a 13% das exportações totais e a 30,5% do saldo comercial. Os principais produtos exportados no Brasil em 2017 foram o minério de ferro e o ouro, sendo que a produção se concentra nos estados de Minas Gerais e Pará. A Vale se destaca como a maior empresa produtora de minério de ferro e com produção de pelotas no Brasil e no mundo sendo o seu produto destinado a indústria siderúrgica. (VALE, 2018).

Ademais, o mineral mais exportado em 2019 foi o minério de ferro com 68%, seguido do ouro com 11% e demais (IBRAM, 2020). O gráfico 1 apresenta os percentuais correspondentes ao valor exportado em 2019 (em dólares) dos diversos tipos de minérios.

Gráfico 1: Distribuição percentual das substâncias minerais nas exportações brasileiras 2019 em dólares.



Fonte: (COMEX STAT, ELABORAÇÃO E METODOLOGIA IBRAM– Adaptado de IBRAM, 2020)

Segundo o Ministério da Economia, em 2019, a soja foi o produto que apresentou maior importância nas exportações brasileiras com 22,1%, seguida pelos óleos brutos de petróleo com 20,31% e o minério de ferro que obteve a terceira posição com 18,77% dos produtos básicos, o demonstra que o ferro possui grande relevância estratégica para a economia do país representando uma *commoditie* que exigem atenção especial do Governo Federal. (IBRAM, 2020).

Quanto à importação, os dois minérios mais importados pelo Brasil são o potássio (42%), seguido do carvão (35%) (IBRAM, 2020). Embora o Brasil possua grandes reservas de carvão, o carvão brasileiro não possui as especificações adequadas para os altos-fornos sendo necessário à sua importação.

De acordo com Duarte (2019), o ferro é o quarto elemento químico que apresenta maior abundância na crosta terrestre com aproximadamente 5% em massa, sendo o oxigênio como o primeiro com 46,6%, seguido do silício com 26,72% e alumínio com 8,13%, entre outros.

O ferro é encontrado na natureza geralmente na forma cristalina de óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos. Os principais tipos de mineral-minério de ferro conhecidos são: magnetita que apresenta maior percentual de ferro (72,36%); hematita (69,96%), limonita (62,82%), goethita e siderita (48,21%) (OMACHI, 2015). Entre os óxidos e hidróxidos de ferro existente na terra a goethita (α - FeOOH) é o mais comum, sendo mais comumente encontrada em regiões de clima, frio e úmido (COSTA *et al.*, 2009).

De acordo Duarte (2019), existem diversos outros minerais de ferro que são encontrados na natureza, mas que não têm interesse econômico para a extração do ferro. Porém em muitas situações, esses minerais podem apresentar interesse científico e tecnológico, mas pode não ser viável a sua extração mineral naquele momento.

O Quadro 1 apresenta as principais características dos tipos de minérios de ferro.

Quadro 1 Tipos de mineral-minério de ferro.

Nome	Magnetita	Hematita	Limonita	Siderita	Goethita
Cor	Cinza escuro	Cinza a vermelho fosco	Amarelo a marrom escuro	Cinza esverdeado	Preto, marrom, amarelo a vermelho-marrom, amarelo.
Composição	Fe_3O_4	Fe_2O_3	$2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	$FeCO_3$	$FeOOH$
%Fe	72,36	69,96	62,85	48,21	48,21
Ocorrência	Rochas ígneas, sedimentares e metamórficas	Rochas sedimentares e metamórficas	Rochas sedimentares.	Rochas sedimentares.	Rochas ígneas, metamórficas, sedimentares e em solos

Fonte: (Adaptado de UFRGS, 2020; BRANCO, 2008 apud OMACHI, 2015)

2.3 O PROCESSO DA MINERAÇÃO

De acordo com o art. 5º do decreto de número 9.406 de 2018 que apresenta regulamentação para o Código da Mineração (decreto-lei nº 227, de 1967), a atividade de mineração abrange as seguintes etapas na mineração: pesquisa, lavra, desenvolvimento da mina, beneficiamento mineral, a comercialização dos minérios, aproveitamento de rejeitos e estéreis e por fim o fechamento da mina. Alguns autores dividem o processo da mineração em três fases: a exploração, exploração e fechamento da mina (Figura 4). A fase de exploração engloba as fases de prospecção e da pesquisa mineral visando a descoberta e avaliação dos corpos mineralizados. A fase da exploração inclui desde a extração, para aproveitamento econômico, dos recursos naturais até o beneficiamento mineral. A fase do fechamento de mina inclui a recomposição natural do local minerado (CRH, 2006; AZNAR-SÁNCHEZ, 2019). A Figura 4 apresenta as etapas do processo de mineração.

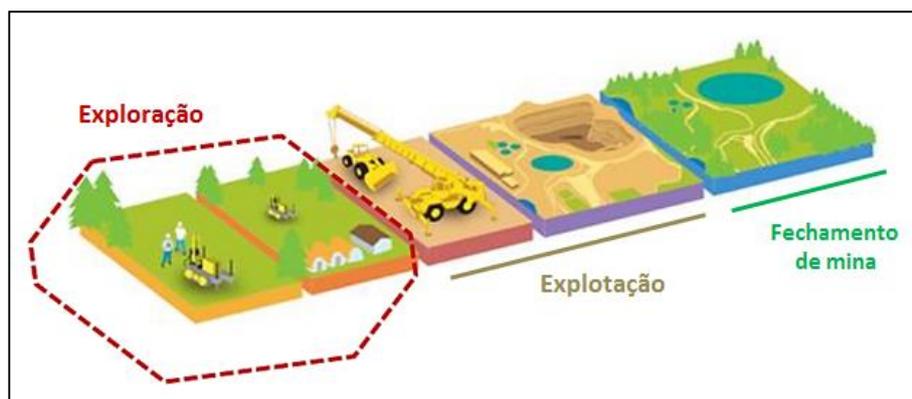


Figura 4: Etapas do processo de mineração.

Fonte: (Adaptado de SALUM, 2018 e AZNAR-SÁNCHEZ, 2019).

2.3.1 Pesquisa Mineral

De acordo com o art. 14 do Código da Mineração (decreto-lei nº 227, de 1967), a pesquisa mineral é a execução dos trabalhos que são necessários para a definição da jazida, sua avaliação e para dimensionar a exequibilidade do aproveitamento econômico mineral. Uma jazida mineral é definida como uma massa individualizada que provem de uma substância mineral ou de um fóssil, existente no interior da terra ou que se encontra de forma aflorada, ou seja, na superfície da terra e este deve possuir um valor econômico para a indústria. (BRASIL, 1967).

Segundo o decreto lei nº 227, em seu art. 14, § 1º de 1967, a pesquisa mineral compreende os trabalhos de campo e de laboratório: Dentro dos trabalhos realizados na pesquisa mineral encontram-se os trabalhos de levantamentos geológicos das áreas que serão pesquisadas, estudos de afloramentos rochosos, ou seja, onde o minério encontra-se na natureza. Além disso, são realizados levantamentos geofísicos e geoquímicos para identificação dos corpos mineralizados e suas análises físicas e químicas. Abertura de escavações para que se possa acessar o corpo mineral que está sendo estudado, realização de campanhas de sondagem, onde será perfurado o corpo mineralizado para que se obtenha uma amostra desse material para futuras análises da identificação mineralógica. Além de testes e ensaios em laboratório para realização do beneficiamento mineral. O beneficiamento mineral é um processo mineral que ocorre na usina para concentração do bem mineral. Na etapa de pesquisa mineral são realizados testes pilotos para análise do comportamento mineral nas etapas de concentração mineral que irá ocorrer na usina de beneficiamento com a finalidade de avaliar se esse mineral irá atender as especificações do mercado.

É importante ressaltar que segundo o código da mineração (1967), os trabalhos relacionados à pesquisa mineral deverão ser realizados mediante a atribuição e responsabilidade do profissional formado como engenheiro de minas, ou geólogo que possua habilitação para o exercício da profissão. Além disso, o profissional deverá solicitar a autorização de pesquisa outorgada pelo Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) atual Agência Nacional de Mineração (ANM).

2.3.2 Lavra mineral

A lavra mineral é definida, segundo o artigo 36 do Decreto-Lei nº 227 do código de mineração (1967), como o conjunto de operações coordenadas que objetiva o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração mineral das substâncias que são consideradas como úteis que contiver, até o processo de beneficiamento das mesmas.

De acordo com o art. 10. § 1º do decreto nº 9.406 (2018), as operações de lavra incluem:

O planejamento e o desenvolvimento da mina, a remoção de estéril, o desmonte de rochas, a extração mineral, o transporte do minério dentro da mina, o beneficiamento e a concentração do minério, a deposição e o aproveitamento econômico do rejeito, do estéril e dos resíduos da mineração e a armazenagem do produto mineral.

De acordo com Macêdo *et al.* (2001) o método de lavra é um dos principais elementos para a análise econômica de uma mina de modo a avaliar a viabilidade do projeto, definir a escolha do método permite a empresa o desenvolvimento da operação. A escolha do método para realização da extração mineral depende do tipo e forma como o minério encontra-se na natureza. Os métodos de lavra são classificados em lavra a céu aberto e lavra subterrânea. De acordo com Curi (2017), a lavra é considerada como lavra a céu aberto quando não existe a necessidade de acesso humano ao meio subterrâneo para realizar o processo de extração mineral. Já a lavra subterrânea é quando se faz necessário o acesso ao corpo mineralizado por meio subterrâneo. Ainda segundo o autor a lavra mineral é chamada de forma alternativa de exploração. A escolha do método para realização da extração mineral depende do tipo e forma como o minério encontra-se na natureza. Entretanto, vale ressaltar que o atual estudo focaliza apenas nos métodos de disposição de rejeitos da lavra a céu aberto e tratamento de minério de ferro.

Segundo Sánchez (2012), o desenvolvimento da mina tanto antecede à lavra como ocorre de forma simultânea e concomitante à extração mineral. Além disso, o desenvolvimento da mina só finaliza quando termina a extração do corpo mineralizado, ou seja, quando a jazida

mineral é exaurida ou fechada. Abrangendo inclusive as etapas de desmatamento, decapeamento, que é a remoção da camada de solo depositada sobre a rocha para a exposição do minério, abertura e manutenção das vias de acesso ao corpo mineralizado.

A Figura 5 apresenta o processo de desenvolvimento de uma mina, sendo apresentado na parte azul da imagem o corpo mineralizado (minério), ou seja, o que tem valor econômico e que será retirado e posteriormente revendido, após o seu tratamento. A parte branca (desenvolvimento) representa a parte do solo que será removida, ou seja, o estéril que até o presente momento não tem valor econômico e que será removido para se alcançar o corpo mineralizado (minério). A seta mais larga exibida na imagem representa o sentido do desenvolvimento da mina, mostrando que a mineração será realizada em cava (a céu aberto) para a retirada do minério. Já a seta menor apontada para o degrau identifica as vias que serão construídas para acesso ao corpo mineralizado.



Figura 5: Processo de desenvolvimento da mina.
Fonte: (Adaptado de SALUM, 2018)

A Figura 6 apresenta o processo de operação da mina a céu aberto, essa etapa é muito importante para a efetiva lavra mineral, ou seja, a retirada do bem mineral de modo a encaminhá-lo para o processamento na usina de beneficiamento mineral.



Figura 6: Processo de lavra e atividades de operação da mina.
Fonte: (SALUM, 2018)

2.3.3 Beneficiamento mineral

De acordo com Luz e Lins (2018), o tratamento ou beneficiamento mineral é considerado como um conjunto de operações que serão aplicadas às rochas, minerais ou minério, de modo a obter os produtos solicitados pelo mercado, sem alterar a identidade física e/ou química dos bens minerais. O beneficiamento de minérios normalmente é responsável pela concentração e aumento do teor do bem mineral. Para fazer a separação seletiva das espécies minerais de um minério, é necessário que se conheça a sua composição mineralógica e a granulometria (tamanho) de liberação física do mineral-minério de sua ganga de modo a realizar a sua caracterização mineral.

Os processos de tratamento mineral envolvem diversas etapas. A Figura 7 exibe um fluxograma típico do processo de tratamento de minérios com a recirculação de água. Entretanto, vale lembrar que os fluxogramas poderão ser diferentes de acordo com o tipo de mineral-minério.

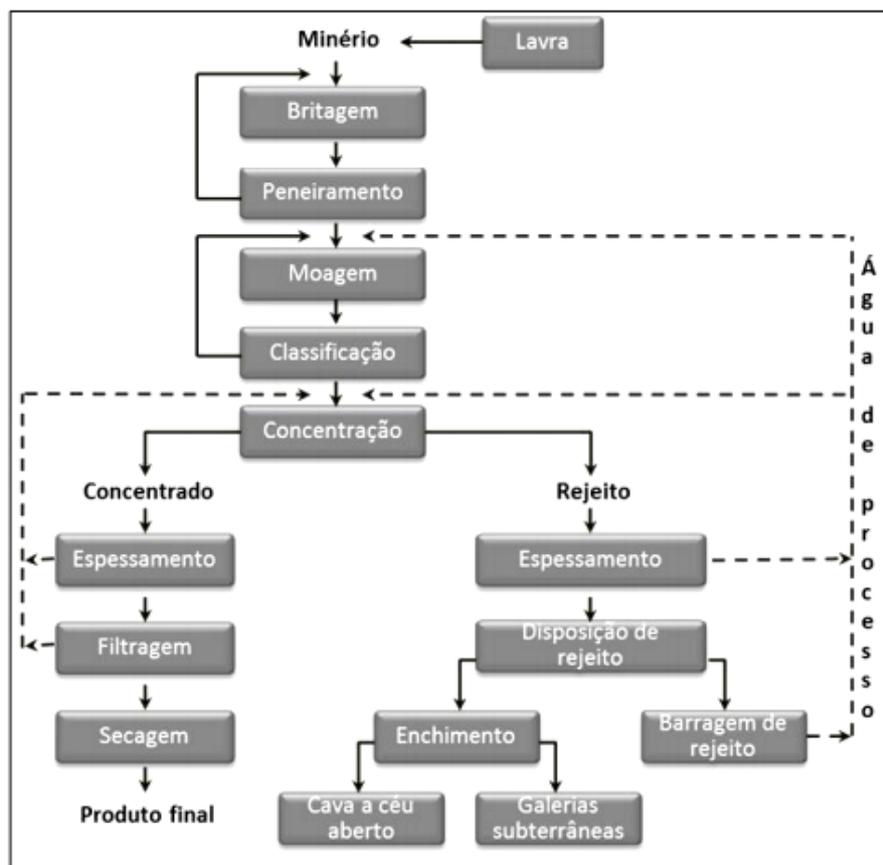


Figura 7: Fluxograma típico de tratamento de minério
 Fonte: (LUZ; LINS, 2018)

2.3.3.1 Britagem

De acordo Balasubramanian (2017) a britagem, faz parte de um processo classificado como de cominuição, e pode ser definida como um conjunto de operações que objetiva a redução e fragmentação de blocos de minérios vindos da mina, de modo a reduzir a sua granulometria e torná-la compatível para utilização direta no processo posterior de processamento, ou para a liberação de minerais valiosos de sua ganga (considerada como material estéril). A britagem é classificada em diversos estágios tais como Britagem primária, secundária, terciária e quaternária e é aplicada a minerais com fragmentos de diferentes tamanhos, desde rochas de 1000 mm até 10 mm utilizando diferentes equipamentos de acordo com o tipo da britagem. (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

2.3.3.2 Peneiramento

De acordo com Correia e Couto (2018) e Dutra (2008), o peneiramento é processo mecânico definido como uma separação de partículas de um material em duas ou mais classes,

sendo estas limitadas uma classe superior e outra inferiormente. No peneiramento pode ser realizado a úmido ou a seco, sendo que no peneiramento a úmido ocorre a adição de água ao material a ser peneirado com o objetivo de facilitar a passagem dos finos por meio da tela de peneiramento. O material retido na tela da peneira é chamado de *oversize* e o material que passa (passante) é chamado de *undersize*. O peneiramento industrial a seco é realizado, normalmente, em frações granulométricas de até 6 mm. Já o peneiramento a úmido, normalmente, aplica-se para frações até 0,4 mm. Os equipamentos tradicionalmente utilizados no processo de peneiramento são as peneiras vibratórias, rotativas e estáticas.

2.3.3.3 Moagem

A moagem é o último estágio no processo de fragmentação mineral no processo de cominuição, onde as partículas minerais são reduzidas com base na combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado de modo a ocorrer a liberação do mineral de interesse que será concentrado nos processos subsequentes. Os equipamentos mais empregados no processo de moagem são: moinho cilíndrico tais como: barras, bolas ou seixos, moinho de martelos entre outros. A britagem e a moagem são operações onerosas que apresentam alto consumo de energia, necessitam de um meio moedor, revestimento entre outros. Desse modo, deve-se reduzir a granulometria do minério somente o necessário à operação seguinte do beneficiamento onde se obtém, nos processos mais simples, um concentrado e um rejeito. (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

2.3.3.4 Classificação

A classificação é um método do tratamento mineral que consiste em separar misturas de minerais em dois ou mais produtos com base na velocidade com que as partículas caem por meio de um meio fluido. (WILLS; FINCH, 2016).

A água e o ar são os fluidos que mais são utilizados nos processos denominados hidroclassificação e arosetração. Um classificador consiste essencialmente de uma coluna separadora, na qual o fluido ascende a uma velocidade uniforme. A classificação a úmido é aplicada, normalmente, para partículas com granulometria muito fina, onde o peneiramento não funciona de uma forma eficiente. São utilizados na classificação: ciclonagem e classificação em espiral com finalidade de separar as espécies minerais, obtendo-se um concentrado e um rejeito. (LUZ; LINS, 2018; DUTRA, 2008).

2.3.3.5 Concentração

De acordo com Duarte (2019), o método de concentração trata-se da operação para separação do mineral desejado que apresenta um valor econômico (mineral-minério), sendo que após o processo de concentração será gerado um concentrado e a ganga constituirá o rejeito oriundo do processo de tratamento mineral. A seleção do método de concentração depende das propriedades dos minerais a serem separados, bem como a natureza do minério em si como, por exemplo: cor, densidade, suscetibilidade magnética entre outros (DUTRA, 2008).

A concentração mineral ocorre na usina de beneficiamento mineral, onde por meio de processos, como por exemplo: separação gravimétrica que separa o bem mineral por meio da diferença de densidade utilizando um meio fluido (água ou ar) para realizar a separação. (WILLS; FINCH, 2016).

Separação Magnética que utiliza a suscetibilidade magnética, onde os minerais são submetidos à um campo magnético (natural ou induzido), ferromagnéticos (forte atração), paramagnéticos (média e fraca atração) e diamagnéticos (nenhuma atração). Os processos de beneficiamento mineral podem ser desenvolvidos via seca ou via úmida. (DUTRA, 2008)

Flotação que é um processo de separação realizado numa suspensão em água (polpa), onde as partículas dos minerais são obrigadas a percorrer um trajeto, sendo que em um determinado momento, as partículas que se deseja flotar são levadas a abandoná-lo, tomando um rumo ascendente. A diferenciação entre as espécies minerais é dada pela capacidade de suas partículas aderirem (ou aderirem a si) a bolhas de gás (geralmente ar). A utilização de reagentes específicos, denominados coletores, depressores e modificadores, permite a recuperação seletiva dos minerais de interesse por adsorção em bolhas de ar. A flotação é um dos métodos aplicados tanto no beneficiamento de minérios com baixo teor, quanto nos que exigem moagem fina para se atingir a liberação do mineral-minério desejada. (CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA, 2018; DUTRA, 2008).

2.3.3.6 Desaguamento

A maioria das operações realizadas no tratamento de minério é realizada por via úmida, entretanto em um determinado momento se faz necessário o desaguamento do concentrado ou do rejeito que é a remoção da água objetivando reduzir a umidade dos produtos e rejeitos. O desaguamento pode ser classificado em três grupos: sedimentação, filtração e secagem térmica. (WILLS & FINCH, 2016; DUTRA, 2008).

De acordo com Dutra (2008), a sedimentação é uma técnica de desaguamento obtida através da concentração de partículas sólidas em suspensão num líquido por ação exclusiva da força da gravidade. Fazem parte desse processo o espessamento que visa uma concentração efetiva de sólidos e a clarificação que remove as partículas sólidas presentes numa suspensão diluída. Já a filtração é o método de desaguamento que ocorre pela passagem forçada por meio de uma suspensão aquosa através de um elemento filtrante que retém as partículas sólidas na sua superfície. A filtração pode ocorrer sob a ação de uma pressão induzida ou por meio do vácuo.

Já a secagem é a retirada da água de um produto sólido particulado por meio da evaporação da mesma por ação do calor de modo a obter um baixo nível de umidade. Entretanto, esse é um processo relativamente caro, pois deve aquecer tanto a água como os sólidos. Os equipamentos mais usados são os secadores rotativos, de bandejas e de leito fluidizado. (DUTRA, 2008).

O processo de desaguamento segue sempre seguido da recuperação de água para reutilização no processo. Após esse processo de desaguamento, o rejeito pode ser disposto em reservatórios criados por diques de contenção ou em barragens de rejeito sob a forma de polpa ou ainda ser colocado pelo método de enchimento que é a colocação do rejeito em cavas de mina na mineração a céu aberto ou em galerias nas minas subterrâneas. (LUZ; LINS, 2018; IBRAM, 2016).

2.3.3.7 Produto final

Após o processo de extração mineral na mina, o minério passa pelas etapas de beneficiamento mineral e é separado por meio de classes de tamanho, entre material fino (<6,3 mm) e granulado (50 mm – 6,3 mm). O minério bruto é chamado de ROM (*Run of Mining*),

O material granulado é obtido após britagens e peneiramentos iniciais e devido ao seu formato naturalmente aglomerado tem aplicação direta nos altos-fornos na siderurgia.

Já o material fino é separado em duas subclasses, *sinter-feed* (6,35 mm - 0,150 mm) e *Pellet-feed* (< 0,150 mm). O *sinter-feed* é o minério de ferro mais utilizado pelas siderúrgicas no mundo e é obtido em fases posteriores do beneficiamento. Para ser aplicado nos equipamentos de alto-fornos deve ser aglomerado em unidades de sinterização. Por fim, o *pellet-feed* possui granulometria inferior a < 0,150 mm, sendo classificado com um minério mais fino e que é obtido após a etapa unitária de flotação no tratamento mineral, sendo destinado a produção de pelotas. Esses produtos são utilizados no mercado interno e enviado para exportação durante os processos de produção de ferro-gusa e de ferro-esponja, onde serão

refinados e transformados em aço nas siderúrgicas. (CSN, 2020).

A figura 8 apresenta exemplos dos tipos de produtos gerados no processo de tratamento do mineral. O primeiro quadrante é apresentado o minério do tipo granulado, o segundo apresenta uma imagem do minério classificado como *Sinter-feed* e no último o *pellet-feed*.



Figura 8: Tipos de produtos do minério de ferro
Fonte: (CSN, 2020)

2.3.3.8 Resíduos da mineração

Os subtópicos a seguir apresentarão os tipos de resíduos da mineração como o estéril e o rejeito, bem como as novas tecnologias para redução dos recursos hídricos.

2.3.3.8.1 Estéril

O processo de lavra mineral gera resíduos sólidos da extração chamados na mineração de estéril e que são comumente armazenados em pilhas próximos a mina. Segundo a NBR 13029 de 2017, o estéril de mina é considerado como todo e qualquer material que não é aproveitável economicamente, porém a sua remoção se torna necessária para que ocorra a lavra do minério. (ABNT, 2017).

2.3.3.8.2 Rejeito

De acordo com Wills e Finch (2016), o descarte de rejeitos provenientes dos processos de tratamento mineral das usinas é um grande problema ambiental, e está se tornando mais sério com o aumento da exploração de metais em depósitos de menor teor. Desse modo, observa-se que quanto menor é o teor do mineral maior é a possibilidade de ter mais rejeito após o beneficiamento mineral.

O beneficiamento do minério bruto (ROM) pode ser realizado por dois procedimentos distintos: a úmido com utilização de água e a seco que não utiliza água e, portanto, não gera rejeitos na mineração (VALE, 2021).

O rejeito é definido pela norma NBR 13028 de 2017 (ABNT, 2017) como “todo e qualquer material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios”. De acordo com Duarte (2008), os rejeitos que apresentam granulometria fina são classificados como lamas. Por outro lado, quando apresentam granulometria grossa (acima de 0,074 mm), são classificados como rejeitos granulares.

De acordo com Duarte (2019) existe a disposição do rejeito em barragens de rejeito, cavas de mina ou galerias subterrânea, esses métodos trata-se de uma etapa crítica para minimizar impactos e riscos ambientais

As barragens ou diques para rejeito podem ser classificadas como barragens alteadas com rejeitos ou barragens convencionais. As barragens convencionais são construídas utilizando-se o solo natural do próprio local, enquanto as barragens alteadas com rejeitos são construídas a partir dos materiais que são rejeitados do processo de beneficiamento. Essas por sua vez, são classificadas como barragens de contenção alteadas com rejeitos e as que utilizam solo natural como barragens convencionais (IBRAM, 2016).

A figura 9 apresenta a integração dos processos minerários existente em uma mina. Pode-se observar no esquema gráfico que o minério retirado da mina segue para a usina de concentração que é a planta de beneficiamento mineral e o estéril para a pilha destinada para colocação de estéril. Na usina de concentração mineral será gerado o produto que será destinado a comercialização e o rejeito que é a polpa com água e que será inserida na barragem de rejeito, caso essa seja a tecnologia adotada pela mineradora.

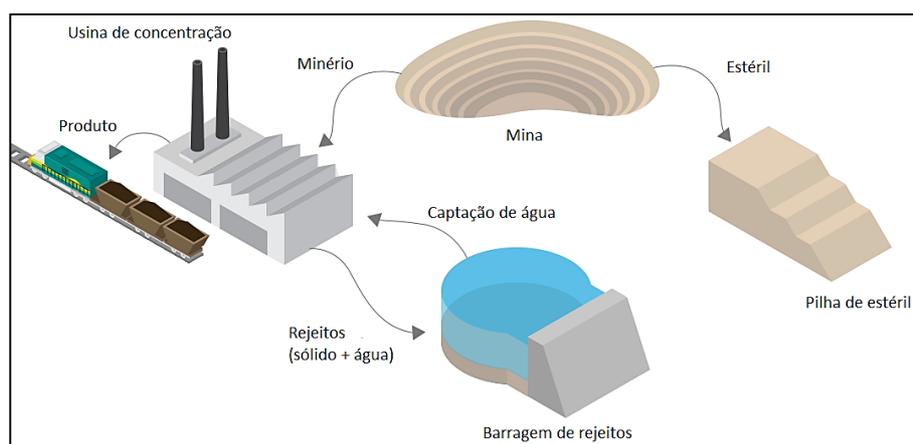


Figura 9: Integração dos processos minerários em uma mina.
Fonte: (ITV DA VALE, 2020)

De acordo com o IBRAM (2015) existe uma relação de interdependência entre os recursos hídricos e a atividade minerária, sendo a água necessária no processo de lavra, nas atividades de beneficiamento e, eventualmente, no transporte de minérios. A instalação de um

empreendimento mineral só irá ocorrer onde há a efetiva disponibilidade de minérios, ou seja, uma jazida mineral. Entretanto, ao iniciar o projeto outros fatores acabam se tornando um desafio para o empreendimento, por exemplo, os recursos hídricos e a infraestrutura local. Esse fator pode mudar até mesmo a concepção do projeto ou inviabilizá-lo.

Segundo o IBRAM (2015), as mineradoras visando participar do mercado mundial de minérios, buscam poupar recursos hídricos de modo que ocorra o reuso, reciclagem e inovações tecnológicas objetivando a redução de custos de produção assim como o compromisso com a sustentabilidade nas suas operações industriais. Entretanto, o grande desafio para as mineradoras é deixar de utilizar água no beneficiamento mineral.

De acordo com o IBRAM (2015) de modo geral cerca de 80% da água é reaproveitada ao fim do processo de tratamento do minério nas plantas de beneficiamento com processos de reutilização da água nas instalações industriais. Por outro lado, observa-se que os índices de reciclagem/recirculação variam de acordo com a tipologia de minério, conforme exibido na Figura 10.

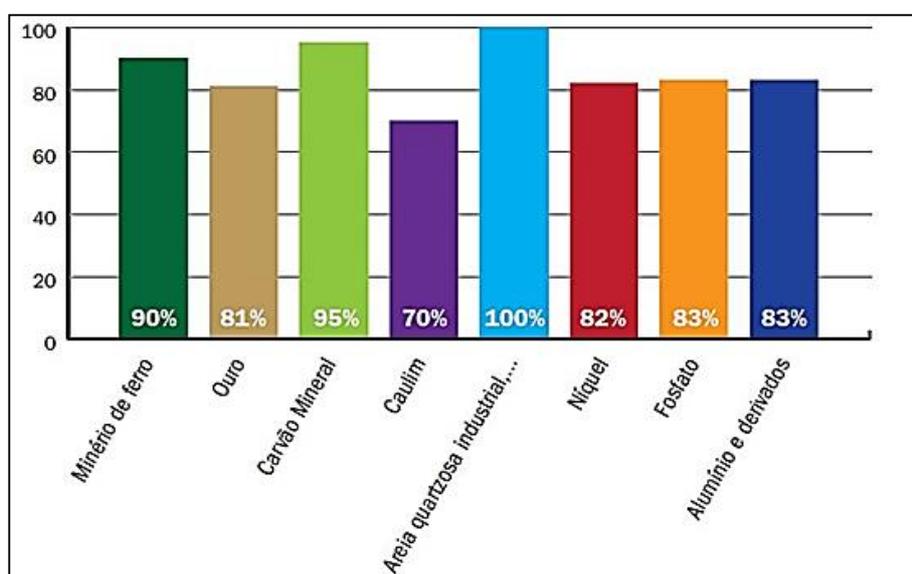


Figura 10: índices de reciclagem/recirculação por tipologia do minério
Fonte: (REVISTA IN THEMINE, 2014 apud IBRAM, 2015)

2.3.3.9 Novas tecnologias para diminuição do recurso hídrico.

As mineradoras objetivando a minimização de perda de água e a geração de efluentes, tem tornado cada vez mais comum à instalação de plantas de beneficiamento de minérios em circuitos fechados. Além da diversificação de fontes de água como a captação de água de chuva; disposição de rejeitos na forma de pasta, com o uso de espessadores de modo a reduzir o consumo de água nos processos; o beneficiamento a seco de minérios, utilizando-se da

umidade natural do ambiente, como os projetos de mineração na região Amazônica (IBRAM, 2015).

A Vale desenvolveu uma técnica utilizada no beneficiamento de minério de ferro para regiões de alto índice pluviométrico, sendo que essa técnica não utiliza água no processo e não necessita da criação de barragens de rejeitos, reduzindo assim os impactos no meio ambiente. A técnica é denominada de beneficiamento a umidade natural ou a seco e começou a ser utilizada em 2008, de forma experimental em Carajás, no estado do Pará. No tratamento mineral a seco, não é adicionado água no processo, sendo que após a etapa unitária da britagem e do peneiramento, o minério já fica disponível para a sua comercialização. (VALE, 2015).

O processamento a umidade natural é usado nas minas de Carajás, Serra Leste e Complexo S11D Eliezer Batista, no Pará, e em diversas plantas em Minas Gerais. No Brasil em 2018, a VALE tinha 60% da produção mineral realizada por meio de processamento a seco, tendo como meta alcançar 70% em 2024. De forma individualizada, observa-se que o sistema norte apresentava em 2018, 80% do processo a seco e Minas Gerais possuía 32%. Entretanto, cabe ressaltar que nem toda mina possui condições de utilizar o processamento mineral a seco devido a tipologia mineral entre outros fatores.

A Vale investe ainda em estudos para utilização da tecnologia de empilhamento de rejeito a seco (*dry stacking*) em Minas Gerais. Essa técnica permite a filtragem e a reutilização da água do rejeito e possibilita que este último seja empilhado, reduzindo assim o uso das barragens. Em 2011, a empresa desenvolveu um projeto piloto na pilha Cianita, em Vargem Grande, com um investimento de R\$ 100 milhões. (VALE, 2018).

Além disso, a VALE estuda também a implementação de uma outra solução para eliminação da água no seu processo de beneficiamento mineral que é a concentração magnética a seco do minério de ferro com base em tecnologia desenvolvida pela New Steel, empresa adquirida pela Vale no fim de 2018. Esta tecnologia dispensa o uso de água no processo de concentração do minério de baixo teor, o que permite que o rejeito gerado seja disposto em pilhas como estéril, semelhante ao que ocorre no empilhamento a seco. Este processo ainda está em fase de desenvolvimento industrial. (VALE, 2018).

A Mina Casa de Pedra da empresa Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) iniciou as suas atividades em 1913 e é uma das mais antigas minas de minério de ferro operadoras no Brasil. A mineração Casa de Pedra está localizada na cidade de Congonhas em Minas Gerais e possui em seu complexo uma das maiores barragens de rejeitos, localizada em área urbana do mundo com capacidade de 50 milhões de m³. (CSN, 2021).

Segundo Silva (2021), devido a grande preocupação da população com a proximidade entre a barragem e a área urbana visível, a CSN iniciou em agosto de 2018 a operação de filtragem de rejeitos para a disposição em pilhas. A CSN investiu 250 milhões de reais, sendo esse o maior empreendimento do tipo no Brasil. Desde 2020 todo o rejeito gerado na empresa CSN passou a ser filtrado e empilhado, sendo que as barragens estão em processo de descaracterização e a barragem Vigia Auxiliar (Pires) assim como a barragem B5 Casa de pedra já foram desativadas. De acordo com o site da empresa Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) de mineração, a empresa realiza desde 2020 o processamento de 100% do minério produzido a seco, de modo a descartar a disposição de rejeito por meio do método convencional em barragens. Desse modo a empresa espera com a tecnologia redução de impactos ambientais, o aprimoramento da segurança nas questões técnicas e o reaproveitamento de grande quantidade da água presente nos rejeitos, que são armazenados a seco. (CSN, 2022). A Figura 11 apresenta a imagem de uma das barragem da CSN em Congonhas – Minas Gerais construída pelo método de disposição convencional com alteamento à jusante. Esse método apresenta uma possibilidade de ruptura muito inferior ao de barragens alteadas para montante como as de Mariana e Brumadinho. Entretanto, essa figura demonstra o quão próximo as barragens encontram-se da sociedade e como se faz importante a descaracterização das barragens de modo a evitar novos rompimentos de barragens de rejeitos.



Figura 11: Barragem da CSN em Congonhas – Minas Gerais – Método à jusante
Fonte: (ESTADO DE MINAS, 2020)

2.3.4 Fechamento da mina

Segundo o art. 5º § 3º do decreto nº 9.406, de 2018, a fase de fechamento da mina cobre todas as operações após o final da vida útil de uma mina como a recuperação ambiental de áreas degradadas e a conclusão de um plano de recuperação; a desmobilização de equipamentos e instalações que integram a infraestrutura do empreendimento; a aptidão e o propósito para a utilização da futura área; o monitoramento dos sistemas de disposição de rejeitos e estéreis, a estabilidade geotécnica das áreas mineradas e de servidão, além do comportamento das redes de drenagem das águas e aquíferos (AZNAR-SÁNCHEZ, 2019).

A Figura 12 exibe o processo de recuperação de uma área degradada em uma mineração, onde é possível observar o processo de retaludamento, revegetação da área impactada e a parte em cinza as estruturas de contenção da área.



Figura 12: Mina recuperada
Fonte: (SALUM, 2018)

2.5 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NA MINERAÇÃO

A disposição de rejeitos decorrente do processo de beneficiamento de minérios pode ser realizada por diversos métodos a depender do tipo de rejeito e da forma de disposição do mesmo. O rejeito na forma de polpa necessita ser disposto em estruturas de barragens obrigatoriamente, podendo ser em barragens de contenção de rejeitos do tipo alteamento à montante, alteamento à jusante ou em linha de centro. Já os rejeitos em forma de pasta podem ser dispostos em pilha de rejeitos espessados ou em barragens por bombeamento. Por fim, os

rejeitos filtrados podem ser dispostos em pilhas por meio de empilhamento a seco (“*dry stacking*”), que poderiam ser armazenados em barragens de contenção com transporte por caminhões ou correias transportadoras. Além disso, existe ainda a codisposição de rejeitos e estéreis que pode ser utilizada e a disposição em cavas exauridas de minas de modo a necessitar de criar novas área para a disposição de rejeitos (ALVES, 2015; IBRAM, 2016). Entretanto, o método de seleção da disposição dos rejeitos irá depender de diversos fatores tais como a natureza do processo de mineração, as condições topográficas e geológicas da região mineralizada, das propriedades mecânicas do bem mineral, da possibilidade de impacto ambiental que poderá ocorrer na contaminação dos rejeitos e por fim das condições climáticas do local da mina (IBRAM, 2016).

O desaguamento está relacionado a fase final do processo de beneficiamento mineral e a utilização de espessadores. Quando esses são instalados próximo à usina de beneficiamento é possível obter uma recuperação parcial e a recirculação de água de processo. Além de diminuir o consumo de reagentes a custos relativamente baixos, diminuindo também a captação de água nova, que gera com isso menores custos operacionais e menores impactos ambientais, principalmente em regiões que apresentam escassez de água (SOARES, 2010; FRANÇA; TRAMPUS, 2018).

Os rejeitos oriundos do processo de beneficiamento mineral podem apresentar rejeitos com variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas e em diferentes estados físicos (polpa, pasta ou massa tipo torta), dependendo do processo de desaguamento (retirada de água da polpa de rejeito fino) e do comportamento geotécnicos (IBRAM, 2016; DUARTE, 2008).

De acordo com Alves (2020), em substituição ao método convencional (em polpa), os rejeitos de mineração podem ser desaguados até as seguintes formas de disposição: espessado, pasta e filtrado. O estado e a conseqüente categoria do rejeito desaguado são, em geral, baseados no teor de sólidos (massa de sólidos em relação à massa total) e na tensão de escoamento.

Dessa forma, diferentes consistências de rejeitos exigem diferentes tipos de depósitos para disposição. Dentre as técnicas de disposição a mais utilizada é as de barragens que armazenam o rejeito após o seu lançamento na consistência de polpa com nenhum ou baixo espessamento. Já a disposição de rejeitos granulares ocorre na forma de pilhas de rejeitos por meio do empilhamento drenado. Os rejeitos com concentração ou consistência de pasta são dispostos em pilhas cônicas que é uma técnica que pode ser utilizada e que permite a formação de praias com ângulos de até 10° de inclinação e são bobeados por deslocamento positivo. Por

fim, os rejeitos filtrados possuem consistência de torta oriunda do filtro prensa e são dispostos por meio do empilhamento a seco (*Dry Stacking*). Esses rejeitos são transportados e armazenados por meio de caminhões ou transportadores de correia e podem ser espalhados com tratores podendo ser armazenado em pilhas ou por disposição compartilhada de rejeitos com estéril da mineração. (RIBEIRO, 2015; MACHADO *et al.*, 2017 apud DIAS, 2017; CHAVES, 2018.).

Segundo Callister (2002) a tensão de escoamento é a tensão máxima que o material pode suportar ainda que apresente um regime elástico de deformação. Já o conteúdo de sólido em massa é o percentual de sólido que é apresentado no material. Além disso, rejeitos em polpa comportam-se como fluidos newtonianos devido à baixa concentração de sólidos. Já com o espessamento, a concentração dos sólidos aumenta e os rejeitos começam a se comportar como fluidos não-newtonianos e apresentam tensão limite de escoamento que aumenta exponencialmente com a concentração de sólidos. (BOGER, 2013 apud DIAS, 2017).

A Figura 13 apresenta de forma esquemática as principais técnicas que serão utilizadas na disposição de rejeitos apresentando uma correlação entre a porcentagem de sólido e a tensão de escoamento. O rejeito espessado apresenta tensão de escoamento abaixo de 0,2 kPa é denominado de lama espessada. Já os rejeitos que possuem tensão de escoamento superior a 0,2kPa, que é o limite operacional das bombas de deslocamento positivo, o rejeito é classificado como torta também chamado de pasta. (ALVES, 2020; OLIVEIRA FILHO e ABRÃO, 2015). Entretanto, Mend (2017) faz uma abordagem esquemática mais detalhada na Figura 13, onde mostra o comportamento da curva entre os métodos de disposição de rejeitos convencional na forma de polpa não espessada que apresenta uma porcentagem de sólidos de 20% e uma tensão de escoamento maior de 10 Pa, espessado onde o percentual de sólido pode chegar até a 60% com tensão de escoamento de 30 Pa. Já o rejeito espessado de alta densidade pode apresentar 70% de sólido, a pasta 75% de sólidos, sendo a tensão de escoamento nessa situação inferior a 0,2 kPa. Por fim, o rejeito filtrado pode apresentar uma porcentagem de sólidos acima de 75% com tensão de escoamento superior a 0,2 kPa.



Figura 13: Diferentes características de rejeitos, seus respectivos aspectos e tipos de depósitos.
Fonte: Adaptado de (MEND, 2017, p.36;94)

A escolha do método de disposição deve levar em consideração algumas variáveis, pois essas podem inviabilizar o projeto caso seja sub ou superestimado, por exemplo, o *Capital Expenditures*/dispêndio de capital (CAPEX) que são os gastos realizados em equipamentos, máquinas e edificações e que se referem ao capital inicial investido objetivando resultados futuros. Outro indicador importante é o *Operational Expenditures*/ dispêndios operacionais (OPEX) que corresponde aos custos e despesas operacionais decorrentes da operação do empreendimento, incluindo a desmobilização da mina e recuperação ambiental, bem como a descaracterização no caso de barragens. (ASSAF NETO, 2014).

A Figura 14 apresenta uma breve descrição das principais características dos tipos de rejeitos e das variáveis que são levadas em consideração na escolha do método de disposição. Analisando-se a figura, observa-se que os rejeitos em polpa, lama espessada e pasta são rejeitos que podem ser bombeados por meio de tubulações que podem ficar fixas desde a usina de beneficiamento até a chegada do rejeito nas barragens. Entretanto devido a tensão de escoamento e por ser um rejeito mais sólido e consistente, o rejeito na forma de torta filtrante não pode ser bombeável, ou seja, só poderá ser transportado por caminhões. Esse fato pode aumentar o custo de aquisição (CAPEX) e o custo operacional (OPEX) do processo, visto que

terá uma demanda maior de caminhões no processo, custos com combustíveis entre outros, embora apresente menores impactos socioambientais.

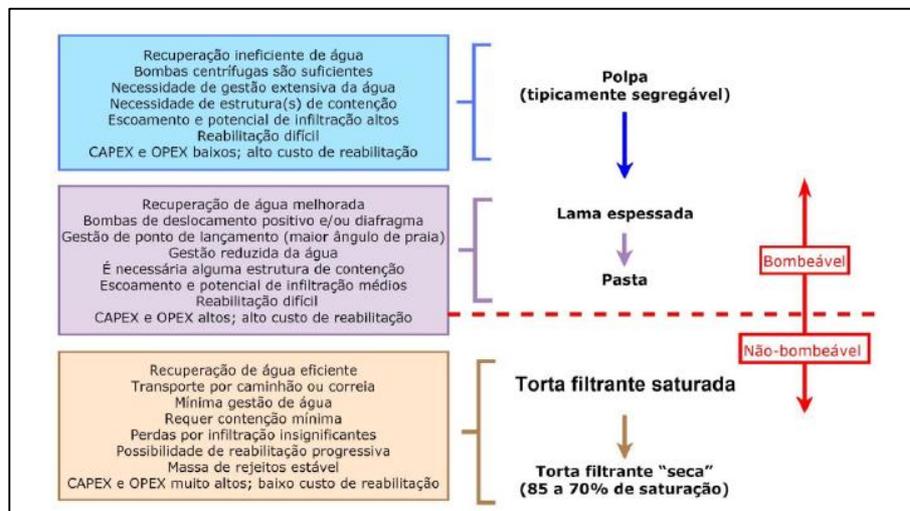


Figura 14: Esquema comparativo entre formas de disposição de rejeito
 Fonte: (ALVES, 2020 Adaptado de AUSTRALIA'S DEPARTMENT OF INDUSTRY, INNOVATION AND SCIENCE, 2016)

Embora, os métodos de espessamento e de rejeito filtrado apresentem grandes percentuais de sólidos em relação às barragens de rejeitos, observa-se ainda a baixa utilização dessas técnicas principalmente devido ao custo alto na implantação do projeto. De acordo com o IBRAM (2016) a disposição de rejeitos em reservatórios criados por meio de diques de contenção ou de barragens na forma de polpa concentrada é o método mais usado no Brasil.

Os rejeitos de minérios de ferro possuem em sua formação partículas ultrafinas que contém ferro, fósforo, alumina e sílica e são classificados, conforme a sua granulometria. O tipo de rejeito influenciará diretamente nas características e no tipo de disposição de rejeitos na barragem (ITV, 2020).

Segundo IBRAM (2016), um sistema de disposição de rejeito deve satisfazer aos requisitos de construção e de segurança, controle de contaminação e capacidade de armazenamento. As principais tecnologias de disposição de rejeitos e que serão abordados neste trabalho são:

- Barragem de contenção de rejeitos (Disposição convencional – polpa não espessada ou espessada)
 - Método de alteamento à jusante
 - Método de linha de centro
 - Método de alteamento à montante

- Rejeitos densificados
 - Disposição de rejeitos espessados
 - Empilhamento drenado
 - Disposição em pasta
 - Disposição por empilhamento a seco - Rejeito Filtrado - método “*dry stacking*”
- Disposição em cava
- Codisposição ou disposição compartilhada de rejeitos e estéreis

2.4 BARRAGENS DE MINERAÇÃO

De acordo com a NBR 13028 (2017) o termo barragem é comumente utilizado pelos operadores de mina para se referir a completa instalação para disposição de rejeitos mineração. A NBR 13028 (2017) define:

“Barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos para fins de contenção acumulação ou decantação de rejeitos de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas”.

Diferente das barragens convencionais, que normalmente barram água, barragens de rejeito são estruturas que são utilizadas para reter, de forma planejada, projetada e controlada, volumes de rejeitos advindos dos processos de beneficiamento de minério (NBR 13028, 2017). Esses rejeitos resultam do beneficiamento do minério, que ocorre com a separação do produto bruto em concentrado (material rico e que possui valor econômico) do rejeito (material sem valor econômico e sem demanda de mercado) (ITV, 2020).

Além disso, as barragens da mineração armazenam rejeitos dos processos minerais que podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas) (ARAUJO, 2006). Segundo KOSSOFF *et al.* (2014), os rejeitos apresentam como característica física: granulometria fina e forma angular; e composição química dependente das características mineralógicas da rocha de origem e dos reagentes utilizados no processamento mineral. Além disso, o projeto de cada estrutura e a metodologia de disposição é específico para cada mineração e levam em conta fatores operacionais e condicionantes locais (FIGUEIREDO, 2007).

De acordo com Santos *et al.* (2010) e Figueiredo (2007), os rejeitos podem ser descartados de duas formas: líquida (polpa de água com sólidos ou lama), através de bombas

ou por gravidade onde o transporte é realizado em tubulações; ou sólida (pasta ou granel), onde o transporte é realizado através de caminhões ou correias transportadoras.

A disposição em superfície é a mais utilizada. O rejeito na forma sólida a seco é armazenado em pilhas nas áreas já lavradas ou abandonadas, ou na forma de polpa, sendo o material disposto em barragens ou diques (SANTOS *et al.*, 2010).

As instalações de armazenamento de rejeitos estão entre os legados mais visíveis de uma operação de mineração. Após o fechamento e a reabilitação, espera-se que eles sejam estáveis e não produzam efeitos prejudiciais ao meio ambiente em perpetuidade (AUSTRALIA GOVERNAMENT, 2007).

2.5.1 Barragens de Rejeitos - Disposição de Rejeitos em Forma de Polpa - (disposição convencional)

Segundo o IBRAM (2016), as barragens de contenção de rejeitos são estruturas que são construídas objetivando a diluição dos custos no processamento de extração mineral, por meio de alteamentos sucessivos, sendo ainda as barragens o método de disposição de rejeitos mais utilizado no Brasil. Esse alteamento é a construção de degraus sobre a barragem podendo em alguns métodos ser utilizado o próprio rejeito na sua construção. Entretanto, os diques dos alteamentos são feitos com estéril ou outro material, mas não só com rejeitos. Já quando é a jusante todo o alteamento jusante não é feito com rejeitos.

De acordo com Mend (2017), disposição de rejeitos de forma convencional é quando o rejeito vem diretamente da instalação de processamento de minério, sem desaguamento adicional e já é colocado diretamente em barragens ou diques de contenção. Geralmente, o conteúdo de sólidos nos métodos de disposição de rejeitos convencionais varia de 20% a 40% na sua porcentagem de sólidos. Ainda segundo o autor, essa técnica de disposição de rejeitos é a mais utilizada no Canadá e é também chamada de disposição convencional de lama. O método de disposição convencional é assim denominado na literatura por ser um método tradicional de disposição de rejeito na forma de polpa não espessada que é a lama e/ou espessada que é uma lama com alguma remoção de água. (ALVES, 2020; MEND, 2017). A construção de barragens por aterro hidráulico na forma de polpa espessada ou não espessada pode ser feita a partir três métodos construtivos de barragens sendo eles de alteamento a montante, alteamento a jusante e método da linha de centro (PORTES, 2013; ALVES, 2020). Todas as formas incluem a construção de um dique de partida. A diferença está na direção em que o alteamento é feito (ITV, 2020). Entretanto, segundo Duarte (2008), para realizar a seleção

do método de disposição dos rejeitos devem ser observadas características da natureza do processo mineral, geológica e topografia da região, propriedades mecânicas dos materiais e os impactos que podem ser causados pelo contaminante em caso de contaminação pelos rejeitos.

De acordo com Portes (2013), na técnica do aterro hidráulico o próprio rejeito é utilizado como material de construção, por meio da técnica de hidromecanização, que consiste no transporte e disposição do rejeito com auxílio da água. O rejeito é transportado por meio de tubulações em meio aquoso (transporte com cerca de 85% de água) nos métodos de disposição convencional, podendo ser bombeados ou fazendo o uso da própria gravidade (SOUZA, 2013). Primeiro, cria-se um dique de partida que será construído com material estéril oriundo de áreas de empréstimo e subsequentemente o rejeito é lançado a partir de sua crista de forma a constituir a fundação e os demais alteamento seguintes durante as etapas da vida útil da mina. O lançamento do rejeito a partir da crista tende a formar uma praia de rejeitos mais grossos junto a barragem, sobre a qual são executados os alteamentos nas alternativas de alteamento à montante e de linha de centro, os alteamentos para jusante não são executados sobre rejeitos. A disposição em barragens de rejeitos em forma de polpa apresenta um percentual entre 25% e 30% de sólidos, o que requer uma área maior para deposição do rejeito (RICO et al., 2008; OLMEDO *et al.*, 2015; PORTES, 2013).

Nesses processos, a operação da barragem de rejeitos e a sua construção ocorrem de forma simultânea e o lançamento do rejeito normalmente é realizado por meio de de hidrociclones. Esses equipamento tem por finalidade separar os rejeitos em diferentes granulometrias sendo: o *underflow* (rejeito grosso) e o *overflow* (rejeito fino ou lama) (MENEZES, 2017). Após o rejeito ser lançado no aterro hidráulico, dá se início dentro do aterro a separação ou segregação do material disposto. As partículas que possuem maior granulometria se depositam próximo do ponto de descarga e os rejeitos que apresentam partículas com frações granulométricas mais finas se depositam de forma mais distante do ponto de descarga. (SOUZA, 2013).

A técnica de disposição de rejeitos com barras aspersoras (spray bars) ocorre com a colocação de tubos que são dispostos longitudinalmente ao longo da praia, com pequenos furos distribuídos ao longo de seu comprimento. Já o sistema de espigotes é um dos mais simples de realizar a sua instalação, porém é o mais complexo de operação, pois pode causar sérios problemas na formação da praia ocasionando por exemplo uniformidade nos pontos de lançamento entre outros. (SILVA, 2010).

De acordo com Silva (2010), o processo de disposição de rejeitos em barragens, na forma de polpa, pode ser realizado por diferentes técnicas que influenciarão na formação da

praia utilizando hidrociclones, spray bars ou espigotes, conforme mostrado na Figura 15.

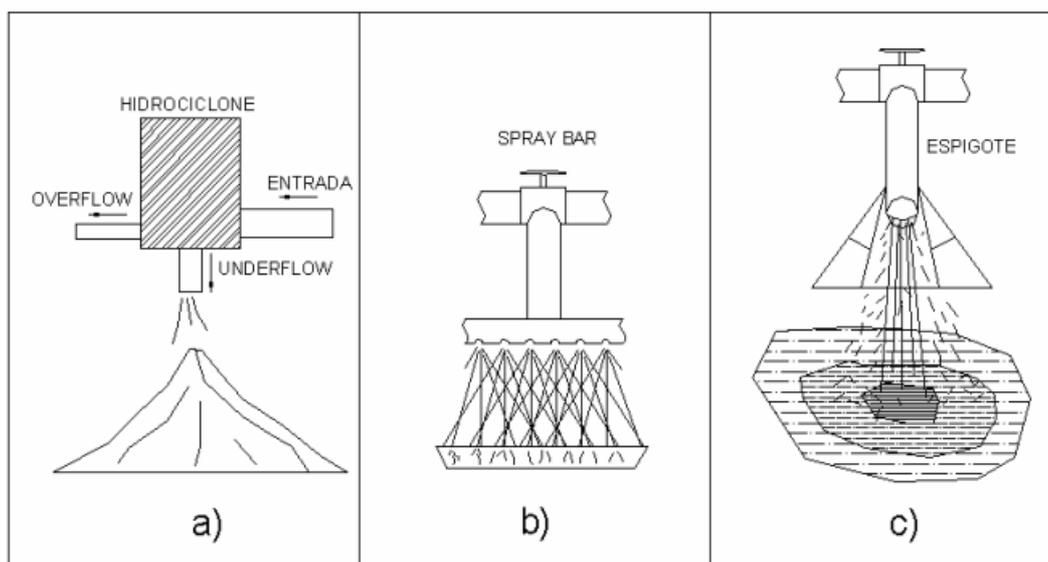


Figura 15: Sistemas de disposição de rejeitos - a) Hidrociclone, b) Spray bars, c) Espigote
 Fonte: (MENDES, 2007 apud SILVA, 2010, p. 57).

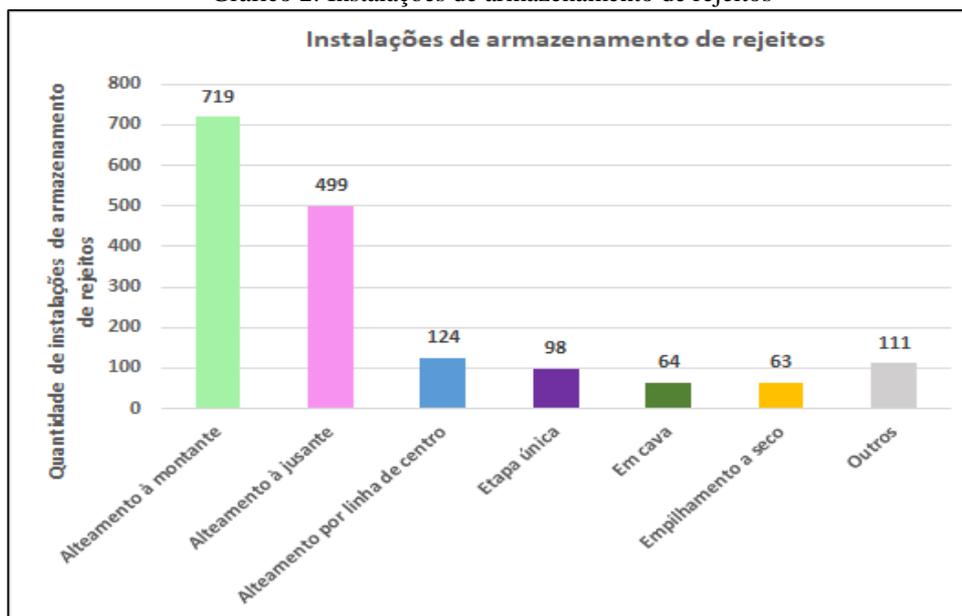
A disposição na forma de polpas, em barragens de rejeitos, apresenta riscos físicos ao meio ambiente, podendo ocasionar perdas econômicas, sociais e ambientais significativas no entorno, no caso de eventuais rompimentos dessas barragens (FRANÇA; TRAMPUS, 2018). A Figura 16 exibe a disposição de rejeitos em polpa pelo método espigote em uma mina de Minas Gerais no Brasil.



Figura 16: Disposição de rejeito em polpa - Espigote
 Fonte: (FRANÇA; TRAMPUS, 2018)

O GRID-Arendal que é uma organização ambiental com o apoio do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, investidores da mineração e outros lançaram em janeiro de 2020 o primeiro banco de dados mundial acessível ao público com informações com instalações de armazenamento de rejeitos da mineração de todo o mundo. O gráfico 2, com dados retirados do portal do GRID-Arendal, apresenta um total de 1678 instalações de armazenamento de diversos rejeitos minerais e que foram cadastradas pelo portal com dados a nível mundial, demonstrando que dentre essas instalações cadastradas o principal método construtivo é o de alteamento à montante.

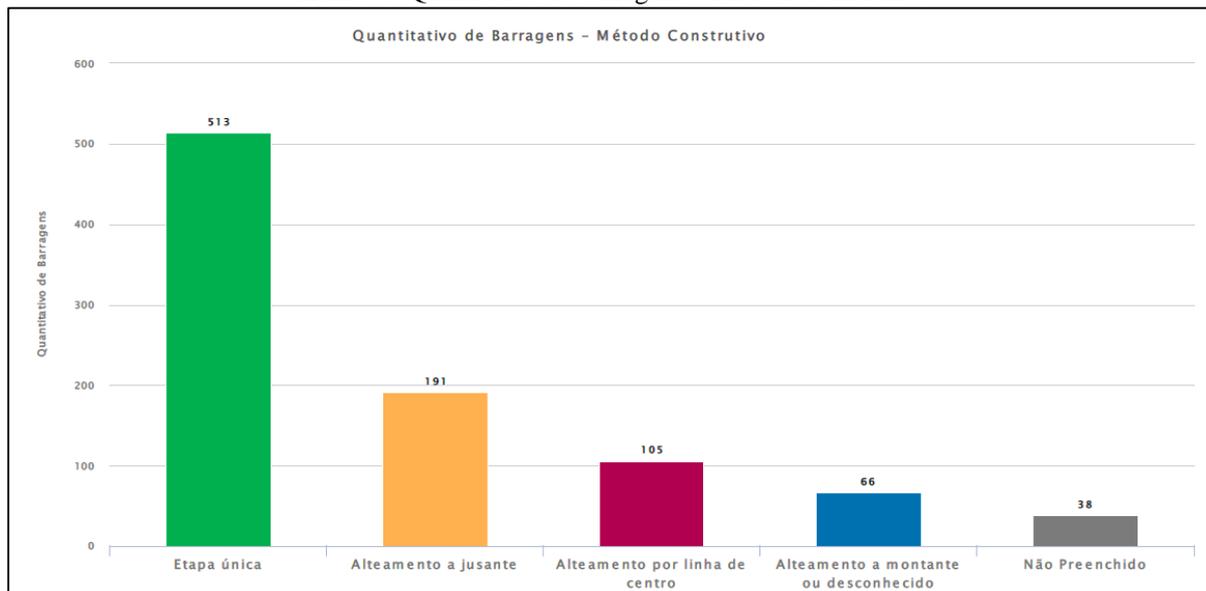
Gráfico 2: Instalações de armazenamento de rejeitos



Fonte: (Adaptado de TAILING.GRIDA, 2022 – Dia 14/05/2022)

Embora o método de alteamento à montante seja um dos mais utilizados no mundo e com maiores indicadores de acidentes e incidentes com rompimento de barragens de rejeitos. Dados da Agência Nacional da Mineração (ANM) demonstram o quantitativo de barragens pelo método construtivo no Brasil, conforme exibido no Gráfico 3. Esses dados demonstram que o principal método utilizado no Brasil é de etapa única com 513 barragens (56,19%), alteamento à jusante com 191 (20,92%), alteamento por linha de centro com 105 (11,50%) e alteamento à montante ou desconhecido com 66 barragens (7,23%) e não preenchido com 38 barragens (4,16%). (ANM, 2022 – Informação extraída do SIGBM: 14/05/2022)

Gráfico 3: Quantitativo de barragens – Método Construtivo



Fonte: (ANM, 2022 – Informação extraída do SIGBM: 14/05/2022)

2.5.1.1 Método a jusante

Segundo Cardozo *et al.* (2016), o método a jusante consiste na construção e alteamento do barramento sempre a jusante, onde a etapa inicial inicia-se na construção de um dique de partida impermeável, normalmente de solo de um material argiloso compactado. Além disso, o dique necessita ser construído com uma drenagem interna (filtro vertical e tapete drenante) (SOARES, 2010). Depois de realizada esta etapa, os subsequentes alteamentos são realizados para jusante do dique de partida da barragem. Este processo de construção continua sucessivamente até que seja alcançada a cota final prevista no projeto (ARAUJO, 2006). A Figura 17 apresenta o método de construção a jusante.

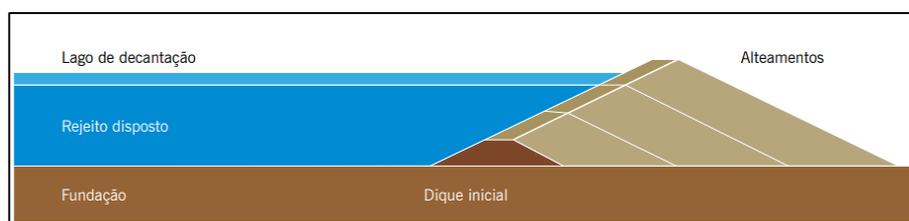


Figura 17: Método construtivo de jusante

Fonte: (IBRAM, 2016)

O método de construção a jusante apresenta como desvantagens a necessidade de grandes volumes de material para construção, o que tornam maiores os custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material e ocupam uma área maior para a contenção de rejeitos devido à estrutura para jusante. Entretanto, o método possui maior

estabilidade do corpo da barragem gerando maior segurança, pois a compactação pode ser realizada adequadamente à medida que a barragem sofre os sucessivos alteamentos (ARAÚJO, 2006).

2.5.1.2 Método de Linha de Centro

De acordo com Cardozo *et al.*, (2016), o método de linha de centro consiste em construir e realizar o alteamento do barramento tanto para a montante quanto para a jusante da barragem, acompanhando um eixo vertical. Esse eixo vertical é chamado de linha de centro, que é construída sobre o rejeito depositado a montante e sobre o próprio barramento a jusante.

A primeira etapa da construção consiste em construir dique inicial, também chamado de dique de partida, e os rejeitos são despejados periféricamente a seu montante, formando assim uma praia. O alteamento subsequente é realizado lançando-se os rejeitos sobre a praia já formada e sobre o talude que se encontra a jusante do dique de partida. Neste processo, o eixo da crista do dique inicial e dos diques coincide sendo o mesmo resultante dos sucessivos alteamentos (SOARES, 2010). Outra vantagem do método de alteamento por linha de centro é a possibilidade de construção de um sistema de drenagem contínuo, o que, em tese, possibilita um controle maior da linha freática. Entretanto, a formação de praia é essencial para este controle da superfície freática, o qual impossibilita que esta estrutura reserve grandes volumes d'água. (SILVA, 2010). A Figura 18 apresenta o método de construção a jusante.

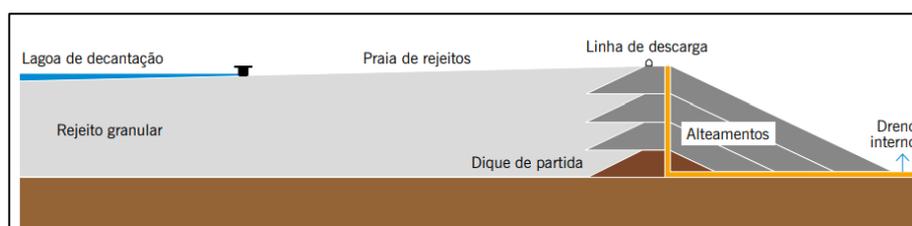


Figura 18: Método construtivo de linha de centro
Fonte: (IBRAM, 2016)

O método de linha de centro possui como desvantagens: necessidade de realização de drenagem eficientes e mecanismos de contenção dos rejeitos a jusante, pois a saturação do rejeito pode comprometer a estabilidade do maciço da barragem. Ademais, o lançamento inadequado do rejeito comprometendo a praia de rejeito grosso pode comprometer o conceito de controle linha freática, o que é monitorado através de piezômetros.

Além disso, existe a complexidade da operação e a necessidade de investimentos globais que podem ser altos. Já como vantagens o método possibilita a utilização de drenagem internas na barragem de rejeitos em todas as fases de alteamento, isso ajuda no controle da

linha que avalia a saturação e promove uma dispersão ou dissipação de poropressões. Essas características fazem com que o método possa ser utilizado em áreas de alta sismicidade (PORTES, 2013; ASSIS; ESPÓSITO, 1995).

2.5.1.3 Método de montante

Consiste em construção e alteamento do barramento sempre a montante sobre o rejeito já consolidado (CARDOZO *et al.*, 2016). A construção inicialmente ocorre com a realização do dique de partida que normalmente possui características de material argiloso ou de enrocamento compactado. Após realizada essa etapa, o rejeito é lançado por meio de canhões na direção a montante da linha de simetria do dique. Assim são formadas as praias de disposição que futuramente se tornarão a fundação e eventualmente proverá material que será utilizado na construção do próximo alteamento (ARAUJO, 2006). A Figura 19 apresenta o método de construção com alteamento de montante.

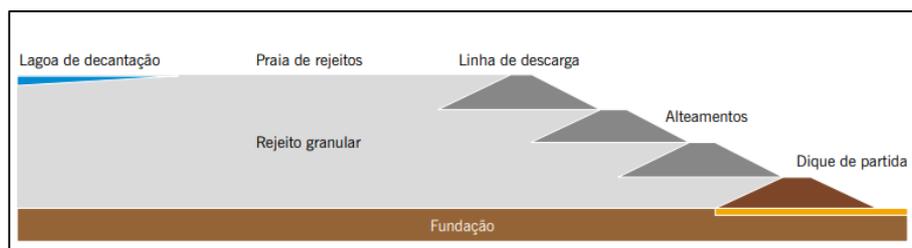


Figura 19: Método construtivo com alteamento de montante
Fonte: (IBRAM, 2016)

O método a montante apresenta como vantagens: o custo baixo para a construção, necessidade de menores quantidades de volume de materiais e simplicidade na realização dos alteamentos (VICK, 1983). Entretanto, o método possui como desvantagens: baixo controle construtivo o que torna a sua segurança crítica, devido os alteamentos serem realizados previamente sobre materiais depositados e que não foram consolidados (FARIAS; PARANHOS, 2013). Além disso, essa metodologia é a que apresenta maiores incertezas quanto à segurança em relação às demais metodologias, tanto que os dois acidentes com rompimento de barragens no Brasil (Brumadinho e Mariana) eram de barragens com alteamento à montante.

2.5.1.4 Método de estágio único

A construção da barragem de rejeito pode ser realizada pelo método de estágio único que é quando a barragem é construída em uma única etapa ou em várias etapas. A vantagem de construir essa estrutura de barragem em várias etapas é que esse método favorece a eliminação de algumas desvantagens que existem no método de etapa única, por exemplo: obrigatoriedade de ter uma área de empréstimo, ter necessidade de disponibilidade de área, utilização de métodos convencionais construtivos, alto investimento inicial, dentre outros (RUSSO, 2007 apud PORTES 2013).

2.5.2 Rejeitos densificados

De acordo com Wills e Finch (2016), as técnicas de rejeitos densificados compreendem os rejeitos espessados, rejeitos em pasta e o empilhamento a seco (ou rejeitos filtrados). Esses métodos melhoram a recuperação de água e dos reagentes utilizados no processo e diminuem os volumes de rejeitos auxiliando na reabilitação do local.

2.5.2.1 Rejeitos espessados (*thickened tailings*) - lama espessada

De acordo com Gomes (2006), os rejeitos espessados (*thickened tailings*) são rejeitos que foram desaguados de forma parcial, mas que ainda apresentam consistência de polpa. Esses rejeitos possuem alto teor de sólidos e ainda são passíveis de serem bombeados por meio de tubulações e bombas. Portes (2013), menciona que o conceito atribuído a disposição de rejeitos espessados foi introduzida pelo Professor Dr. Eli Robinsky em 1968 e aplicada em 1973 na mina de Kidd Creek no Canadá objetivando o desaguamento da polpa e o aumento do teor de sólidos (AUSTRALIAN CENTRE FOR GEOMECHANICS, 2010; PORTES, 2013).

As lamas espessadas e pasta são técnicas de disposição de rejeito alternativas que utilizam uma ou mais fases de espessamento antes da disposição final do rejeito. Além disso, os espessadores são os equipamentos mais utilizados para realizar o desaguamento e a recuperação da água dos rejeitos na mineração, além de proporcionarem maior segurança no depósito final devido a requererem estruturas de disposição menos robustas do que os métodos convencionais (FITTON, 2013 apud ALVES, 2020).

O processo de desaguamento é realizado por meio de espessadores de grande porte gerando um rejeito espessado, e/ou em pasta ou em potentes filtros a vácuo (no caso de rejeitos filtrados), implicando em última instância, em um aumento do teor de sólidos e na melhoria

dos parâmetros de resistência do material (FIGUEIREDO, 2007).

Os espessadores podem ser utilizados em rejeitos de 1% até 50% de teor de sólidos, obtendo polpas espessadas que variam de 10% a 80% de sólidos (MENEZES, 2017). Os espessadores são, usualmente, classificados em quatro tipos: os convencionais, de alta taxa, de alta densidade e, os mais recentes, espessadores de pasta. (FRANÇA; MASSARANI, 2018). Além desses é crescente a utilização de filtros associados com espessadores, pois os filtros permitem um maior desaguamento podendo atingir mais de 80% de sólidos (ALVES, 2020). A Figura 20 exhibe as principais consistências do rejeito, de tecnologias de desaguamento e os meios de transporte utilizados para polpa, lama espessada de alta porcentagem de sólidos, pasta de baixa densidade, pasta de alta densidade e torta filtrante.

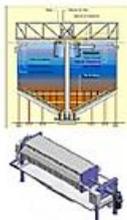
Consistência do rejeito		Tecnologia de desaguamento		Transporte	
Polpa 30 a 58% de sólidos		Espessador convencional		Por gravidade a partir de calhas ou tubulação de baixa pressão. Com ou sem bombas centrífugas	
Lama espessada de alta porcentagem de sólidos (55 a 65%)		Espessador High rate		Bombas centrífugas ou de diafragma	
Pasta de baixa densidade 60 a 70% de sólidos		Espessadores Deep bed ou Deep cone		Bombas de pistão ou diafragma (alta pressão)	
Pasta de alta densidade 65 a 75% de sólidos		Espessador Deep cone ou filtro		Bombas de deslocamento positivo com tubulação de alta pressão	
Torta filtrante > 80% de sólidos		Filtro		Caminhão ou correia	

Figura 20: Tipos de rejeitos pela respectiva porcentagem de sólidos e mecanismos de espessamento e transporte.

Fonte: (ALVES, 2020 adaptado de *GOLDER ASSOCIATES*, 2015)

Segundo Oliveira Filho e Abrão (2015), no método de lama espessada, o transporte pode ser feito por meio de bombas centrífugas ou de deslocamento positivo dependendo do teor de sólidos atingido, sendo que a inclinações (ângulo de repouso) poderá ocorrer na faixa de 1% a 3,5% da área considerável em planta para disposição dos rejeitos após a disposição. Durante a disposição da lama espessada, pode ser liberado um pouco de água por adensamento e a mesma deve ser coletada em área de lagoa de contenção. Ademais, o rejeito será disposto em camadas finas e isso pode causar ressecamento, em situações que se apresentem com características climáticas favoráveis, o que pode ocasionar a formação na superfície do material disposto de trincas. Entretanto, o fluxo de deposição de quando se coloca uma nova camada sobre as já ressecadas preencherá essas trincas, formando uma estrutura com características mais estável (ALVES, 2020). A Figura 21 exhibe a disposição do rejeito espessado.



Figura 21: Rejeito espessado
Fonte: (PIMENTA DE ÁVILA, 2008 apud LARA, 2011)

2.5.2.2 Empilhamento Drenado

De acordo com o IBRAM (2016), no método de empilhamento drenado adota uma estrutura drenante que não retém a água livre, que sai dos poros dos rejeitos ao invés de uma estrutura impermeável de barramento. Nesse método, a liberação da água ocorre por meio de um sistema de drenagem interna, de grande capacidade de vazão que está ligada aos rejeitos do reservatório. Entretanto, um dos fatores determinante para aplicação desse método é a granulometria do rejeito que deve ser maior que de 0,074 mm.

A Figura 22 apresenta o processo de empilhamento drenado de Xingu que foi fechado em 1998 e teve por finalidade estocar os rejeitos gerados pela etapa de flotação da usina de beneficiamento de minério de ferro da Mina de Alegria (ALVES, 2015).



Figura 22: Empilhamento Drenado do Xingu
Fonte: (ALVES, 2015 apud GOMES, 2009b.)

2.5.2.3 Rejeitos em pasta (*paste tailings*)

Uma pasta é definida como uma suspensão homogênea com características de um fluido não-Newtoniano, com elevada concentração de sólidos, em geral acima de 60% (p/p), e sem segregação de fases, não havendo liberação da fase líquida da sua estrutura e que requer maior tensão de cisalhamento à medida que a concentração de sólidos aumenta (FRANÇA; MASSARANI, 2018).

Rejeitos em pasta (*paste tailings*) são rejeitos que foram espessados, ou seja retirada parte da água desse rejeito e após o espessamento é realizado a adição de algum tipo de aditivo químico, como por exemplo o cimento Portland. Essa adição resultará em um material não susceptível a fluir quando se apresenta não confinado e nem permitirá a liberação quantidades significativas de água facilmente durante a sua disposição final (GOMES, 2006).

Segundo Oliveira Filho e Abrão (2015), o transporte do rejeito em forma de pasta é realizado, em geral, utilizando-se bombas de deslocamento positivo e a partir da descarga podem ser alcançados ângulos de praia entre 2% e 10%. Entretanto, Carvalho (2017) argumenta que esse ângulo pode variar de 2 a 6%. Desse modo, observa-se que os ângulos de repouso de 2% a 6 ou 10% indicam a necessidade de uma área considerável para a disposição dos rejeitos.

Segundo Lara (2011), a conformação da pasta assim como a sua consistência podem ser avaliadas por meio de teste de abatimento (*slump test*) para determinar a tensão de escoamento e % de sólidos e de calha (*flume*) que é o ângulo de repouso da disposição final do rejeito.

Segundo Ribeiro (2015) a utilização do *Slump* é importante para determinar a tensão de escoamento de um material e representa um bom ponto de partida para a avaliação reológica de rejeitos de mineração em laboratório devido ao baixo custo financeiro. Desse modo, sua praticidade de execução permite obtenção de uma consistência do rejeito com variados teores de sólidos, sendo possível assim realizar o aprimoramento os resultados obtidos realizando a sua correlação com os dados adquiridos em outros ensaios. O ensaio de abatimento (*Slump Test*) tem sido utilizado em algumas indústrias mineradoras de forma constante para realizar o monitoramento da consistência de rejeitos nas operações de disposição. A altura de Slump é utilizada para avaliação da consistência da pasta como parâmetro de controle. Essa altura é dependente tanto da densidade do material quanto da tensão de escoamento. (BISCO, 2009; RIBEIRO, 2015 apud SANTOS, 2020).

Além dos ensaios supracitados anteriormente, o comportamento reológico de fluidos pode ainda ser determinado utilizando ensaios associados a outros equipamentos, por exemplo, os viscosímetros, como viscosímetros capilares, rotacional de cilindro concêntrico e/ou viscosímetro de tubo e de rotação. Os equipamentos são restritos dependendo da viscosidade do fluido em um número com limitação de condições. Os ensaios realizados por meio de reômetros também são comuns. Ao contrário de um viscosímetro, que possui restrições para o seu uso, o reômetro é capaz de medir a viscosidade e a elasticidade de materiais não newtonianos em uma ampla variedade de condições. (SANTOS, 2020).

De acordo com Osorio (2005) é importante reforçar que, dentre as propriedades de uma pasta ou “*pastefill*” para a disposição dos rejeitos adensados podem ser destacados: tensão de ruptura da pasta; altura de “slump” que pode ser determinada por meio do teste de abatimento ou “*slump*”; ângulo de repouso determinado por meio do teste de calha ou “*flume*”; viscosidade da mistura sólido-líquido.

A consistência dos rejeitos em forma de pasta é exibida na Figura 23.



Figura 23: Consistência da pasta mineral.
Fonte: (OSORIO *et al.*, 2008 apud LARA, 2011)

Segundo Carvalho (2017), a consistência desse material é muito importante para avaliar à disposição do rejeito, pois o aumento do teor de sólidos favorece a obtenção de ângulos de disposição maiores e conseqüentemente maiores volumes a serem dispostos. A Figura 24 exhibe as áreas impactadas pela disposição em pasta.

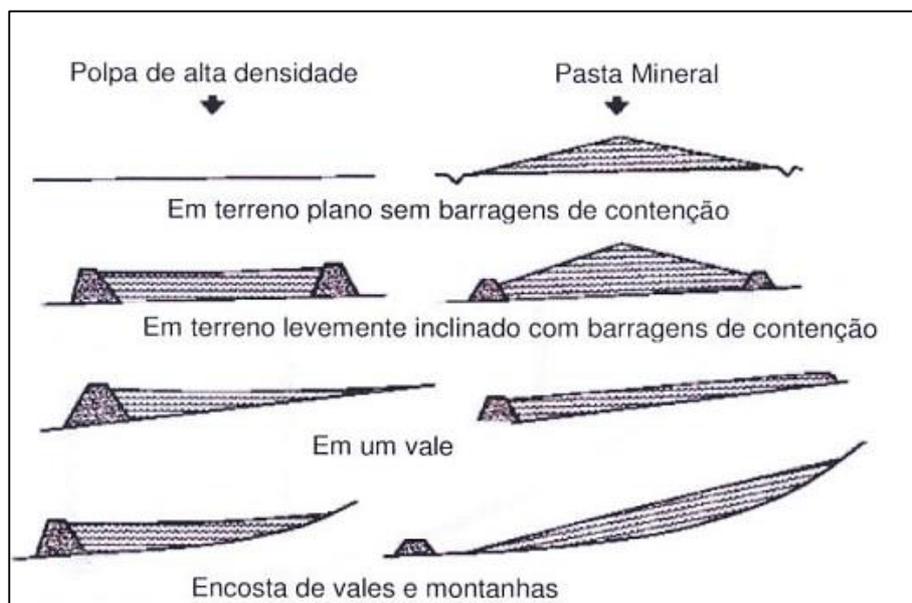


Figura 24: Área impactada pela disposição em pasta
Fonte: (TESSAROTTO, 2015)

A disposição final do rejeito em pasta pode ser realizada em único ponto, sendo que a posição pode ser alterada frequentemente devido a geometria do sistema de disposição. Sendo o transporte do rejeito realizado por meio de “canhões”, “espigotes” ou torres de distribuição, sendo formado diferentes arranjos e combinações de diversos pontos (CARVALHO, 2017). A Figura 25 apresenta a disposição de rejeitos em pasta em torres.



Figura 25: Disposição de rejeito de pasta em torres.

Fonte: (THERIAULT; FROSTIAK; WELCH, 2003 apud PORTES, 2013)

O rejeito, tanto na forma de pasta quanto na forma de lama espessada, sendo disposto de maneira intermitente em finas camadas pode ter como consequência o ressecamento, em situações climáticas favoráveis, o que induz a formação de trincas na superfície do material disposto (OLIVEIRA FILHO E ABRÃO, 2015).

- **Vantagens da utilização da disposição em pasta**

Segundo Portes (2013), Chaves *et al.*, (2013), Ávila (2015) e França e Trampus (2018) os rejeitos dispostos em pasta (espessados) apresentam diversas vantagens quando comparados com a técnica convencional (polpa), sendo que as principais vantagens são:

- I. Recuperação e reuso de um maior volume de água, devido a estarem mais secos do que os rejeitos em polpa que são considerados como convencionais;
- II. Redução da água armazenada no depósito de disposição de rejeitos o que reduz os custos do sistema de disposição, diminuindo os impactos ambientais;
- III. Menores volumes dispostos, devido a menor quantidade de água no rejeito;
- IV. Necessidade de áreas menores para disposição, reduzindo o tempo de reabilitação

futura desta área;

- V. Permite a disposição em cone, o que permite o escoamento das águas de chuva e um menor percentual de infiltração;
- VI. Fluxo de rejeitos seria menor e mais fácil de ser controlado, o que faz com que em caso de ruptura se torne um problema local apenas.
- VII. Redução do custo do empreendimento global considerando os custos de descomissionamento das estruturas de disposição de rejeitos.

- **Desvantagens da utilização da disposição de rejeitos em pasta**

De acordo com Lemos (2017) e França e Trampus (2018) a disposição de rejeitos em pasta também possui desvantagens e limitantes tais como:

- I. Custo elevados para a produção de pastas, pois requer um sistema de transporte/bombeamento adequado devido à reologia da pasta que deve permitir o transporte para a zona de disposição do material;
- II. Maiores custos com infraestrutura, transporte e consumo de energia do material;
- III. Necessidade de análise da pluviometria da região, visto que, o acúmulo de água interfere diretamente nas características da pasta;
- IV. Necessidade de um alto nível de tecnologia e infraestrutura locais;
- V. Necessidade de mão de obra especializada;
- VI. Reologia do rejeito precisa permitir que as técnicas de espessamento sejam aplicadas;
- VII. Necessidade de disposição dos rejeitos em topografias planas em ambientes com intenso índice pluviométrico

Embora ocorra o aumento dos custos, existe uma tendência de redução dos custos dos espessadores e filtros o que contribuirá para a viabilidade do empreendimento desses rejeitos espessados em regiões não desérticas.

- **Equipamentos utilizados**

Segundo França e Trampus (2018), os equipamentos mais utilizados para geração de rejeitos pastosos são: espessadores de alta capacidade, especialmente os deep cone thickeners e os espessadores de pastas. Esses equipamentos possuem uma configuração estrutural com maior altura da zona de clarificação e fundo mais inclinado. Assim, permite que a camada com líquido exerça uma maior pressão sobre os sólidos que estão sedimentados, auxiliando na produção de um *underflow* compactado e que apresenta uma maior densidade (pasta), de modo diferente dos espessadores convencionais. Entretanto, segundo estudos realizados por Torquato *et al.* (2019) em testes de bancada para rejeitos de minérios de ferro, os espessadores de pasta seriam adequados apenas para rejeitos ultrafinos.

A Figura 26 exibe a forma de disposição utilizando uma torre central conectada com o equipamento *deep cone* e o uso de tubulações para a deposição do material.

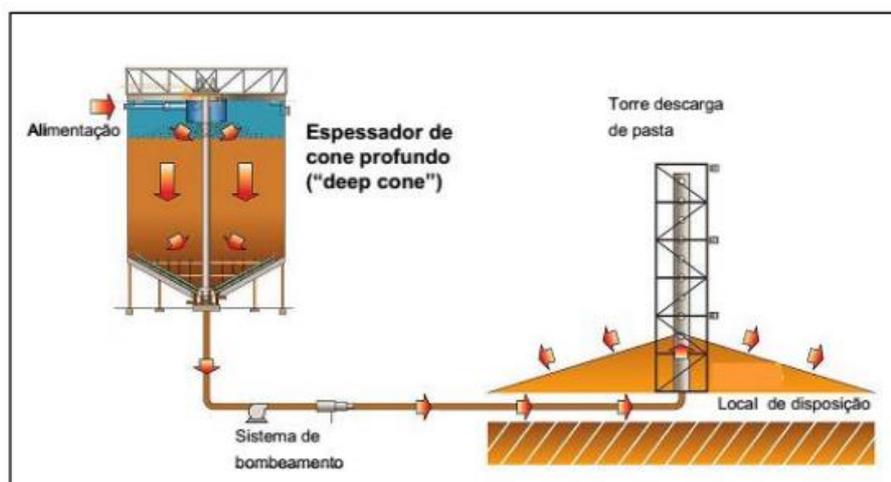


Figura 26: Empilhamento superficial de pasta em torre
 Fonte: (LEMOS, 2017 adaptado de EIMCO, 2010, p.3)

2.5.2.4 Rejeitos filtrados – empilhamento a seco – (*dry stacking*)

Segundo França e Trampus (2018), a filtração é uma operação unitária de separação sólido-líquido, que ocorre por meio da ação de uma força que incide sobre as partículas, podendo ocorrer por meio da gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. O desaguamento de rejeitos por filtração é realizado mediante a formação de uma massa de rejeitos saturada (torta ou cake) que é acumulada na parte externa de um meio filtrante (geralmente um filtro) quando se força a suspensão ‘sólido – líquido’ a passar pelo filtro sob pressão.

Segundo Peixoto (2012) e Guimarães (2011), na mineração de ferro, os filtros mais utilizados para os rejeitos filtrados são os filtros rotativos que operam a vácuo (filtros de discos convencionais e filtros horizontais de correia) ou filtros-prensas (um tipo de filtro de pressão).

Pelo método de filtros-prensas a suspensão escoar no filtro por meio de um mosaico de quadros (câmaras de filtração) e de placas verticais que são separadas entre si por um meio filtrante. O material filtrado percola no filtro, escoar por meio das ranhuras dos quadros e por fim é direcionado para fora do filtro, enquanto a torta fica acumulada no espaço disponível entre as câmaras de filtração. Concluída a capacidade de disposição da torta, essa é lavada, o filtro é aberto e ocorre o descarregamento da torta (PEIXOTO, 2012). A Figura 27 exibe o modelo de filtro-prensa.

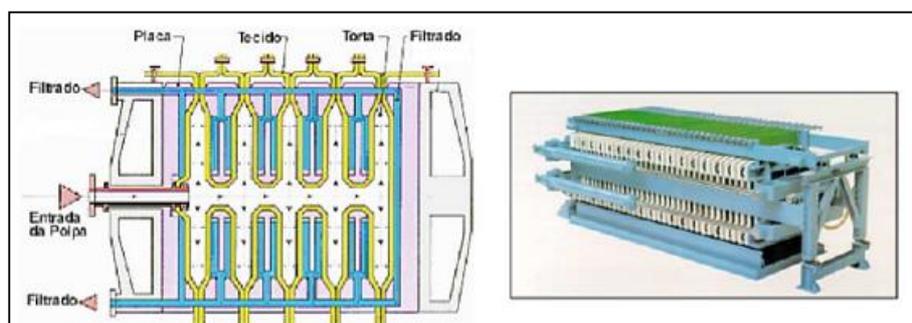


Figura 27: Modelo de filtro-prensa
Fonte: (PEIXOTO, 2012)

De acordo com Peixoto (2012), nos filtros rotativos a vácuo, o meio que filtra o rejeito recobre a superfície cilíndrica do equipamento. Desse modo, o material filtrado alimenta a câmara que se encontra adjacente ao meio filtrante e o rejeito é drenado na região central do filtro por meio de dutos sob vácuo. Após a formação da torta, ocorre a drenagem a vácuo do líquido da torta, ocorre a etapa de lavagem da torta, nova drenagem de líquido e por fim a retirada da torta que se encontra em contato com o meio filtrante por meio de uma lâmina raspadora. A Figura 28 exibe o modelo de filtro rotativo a vácuo.

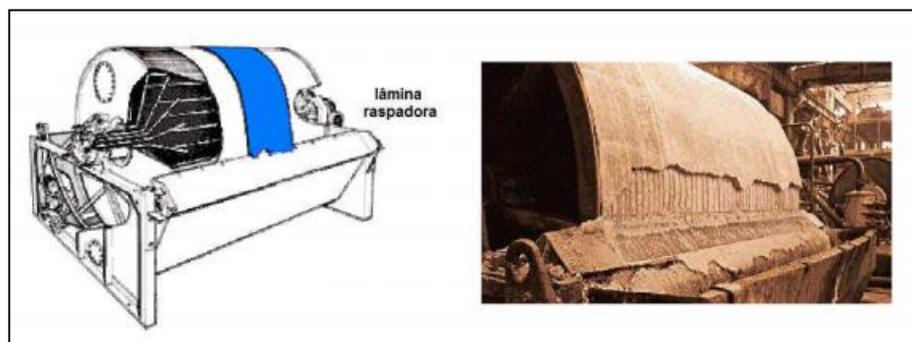


Figura 28: Filtro rotativo de rejeitos a vácuo.
Fonte: (PEIXOTO, 2012)

Diversos estudos apresentam as vantagens entre os métodos de disposição de rejeito filtrado em relação aos de disposição convencional em forma de polpa. Williams *et al.* (2017) afirma que existe uma percepção da indústria de que rejeitos filtrados podem ser um processo caro e de difícil manutenção. Entretanto, os autores apresentam vários exemplos de operações de pequena escala nos EUA, Austrália entre outros que justificaram estes custos com a implementação de instalação e operação de rejeitos filtrados. Esses custos tornam-se menores, diante das vantagens obtidas com a disposição de rejeitos filtrados, inclusive com a possibilidade de agregar valor ao rejeito desaguado e posterior revenda desse novo produto. Mesmo o principal impulsionador do investimento em rejeitos filtrados sendo a eliminação do armazenamento de rejeitos úmidos, a implementação do projeto pode reduzir o consumo de água, além de estar cumprimento com obrigações ambientais locais que se encontram cada vez mais rigorosas. (WILLIAMS *et al.*, 2017)

Segundo Gomes (2006), os rejeitos filtrados a úmido (*wet cake tailings*) são os rejeitos na forma de uma massa de rejeitos que se encontra saturada ou quase saturada. Já os rejeitos filtrados a seco (*dry cake tailings*) são os rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%). Ambos os rejeitos não são passíveis de serem bombeamento. Desse modo, os rejeitos empilhados à seco são aqueles que foram desaguados a ponto de não serem considerados mais saturados.

De acordo com Reinert (2017) o grau de saturação do solo é a relação entre o volume de água e o volume de vazios, sendo representado pela letra S, com valores variando de zero (solos secos, ou seja, não saturados) a 100% para (solos saturados). Desse modo, entende-se que uma massa quase saturada é uma massa de solo que se aproxima de 100% de saturação do solo.

Segundo Caputo (1988), o grau de saturação do solo é a porcentagem de água contida nos seus vazios:

$$S = \frac{V_a}{V_v} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

S= grau de saturação (%);

V_a= volume de água (m³);

V_v= volume de vazios (m³).

O método de disposição denominado de (*dry stacking*) ou empilhamento a seco, é comumente utilizado para disposição de rejeitos em pilhas. O descarte dos rejeitos filtrados oriundos do filtro prensa do processo de beneficiamento mineral podem ser transportados por

meio de caminhões ou correias transportadoras e podem ser espalhados com tratores podendo ser armazenados em pilhas chamadas de empilhamento a seco ou ainda por disposição compartilhada de rejeitos com estéril da mineração. (IBRAM, 2016, DIAS, 2017). Os rejeitos armazenados por empilhamento a seco após a filtragem podem atingir um teor de sólidos de 70% a 80%, em comparação com 30% a 50% para os métodos de armazenamento de rejeitos a úmido. Entretanto, embora os rejeitos sejam sólidos e manipulados com relativa facilidade, eles não são exatamente secos (SCHOENBERGER, 2016). De acordo com Williams e Jones (2005) o uso de filtros de vácuo pode oferecer a chance de descartar rejeitos em uma condição 'seca', com os benefícios resultantes de dimensões reduzidas, sem a necessidade de construção de barragens, sendo o rejeito disposto em pilha de rejeito filtrado gerando facilidade de fechamento e menor impacto ambiental. A Figura 29 apresenta a disposição de rejeitos filtrados na Mina Cerro Lindo no Peru.



Figura 29: Pilha de rejeito filtrado (*Dry stack*) em operação na Mina Cerro Lindo, Peru.
Fonte: (ALVES, 2020) adaptado de *Golder Associates*, 2015)

Segundo Schoenberger (2016), os principais problemas técnicos para armazenamento em pilha seca incluem gerenciamento de superfície e águas subterrâneas, controle de poeira e erosão. A principal desvantagem é o custo operacional. O armazenamento convencional ainda é consideravelmente mais barato. Entretanto, o empilhamento a seco não requer barragens de represamento e manejo em longo prazo de tanques de rejeitos. Isso reduz os possíveis custos de responsabilidade e os riscos para o meio ambiente são substancialmente reduzidos.

Os métodos de empilhamento a seco vêm sendo adotados em regiões áridas, onde a conservação da água é uma grande preocupação e em áreas muito frias, onde o manuseio de água ao ar livre é um grande problema no inverno (WILLIAMS; JONES, 2005).

Segundo Alves (2020), os métodos de rejeito filtrados se aplicam melhor em locais com alta taxa anual de evaporação e/ou com baixa média de precipitação anual, pois a ocorrência de chuvas faz aumentar a umidade do rejeito a ser depositado, o que irá requerer um sistema maior de drenagem. Além disso, maiores precipitações podem diminuir a trafegabilidade das vias da mineração e da própria pilha de rejeitos, sendo que essa dificuldade pode contraindicar o método e torná-lo muito mais caro devido à dificuldade dos caminhões em transitar pela mina em períodos de chuva e a exigência de melhores sistemas de drenagem das pilhas.

No Brasil, existem diversos projetos para aplicação da técnica de empilhamento a seco com rejeito filtrado. Entretanto, muitos projetos ainda são recentes e, portanto, não apresentam dados mais consolidados. Estudos realizados por Alves (2020) mostram a aplicação dessa técnica em minerações de ferro na mina de Pau Branco (iniciado em 2015) e na Mina Casa de Pedra que pertence a empresa Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) (Iniciado em agosto de 2018).

A mineração da CSN denominada de Casa de Pedra possui uma das maiores barragens de rejeito existente em área urbana do mundo, sendo a sua capacidade de 50 milhões de metros cúbicos. A utilização do processo de filtragem de rejeito com disposição em pilhas permitirá a produção, continuidade e expansão do minério sem a existência de barragens para conter o rejeito mineral.

Segundo Alves (2020), atualmente 45% do rejeito gerado na Mina Casa de Pedra está sendo filtrado e empilhado. A empresa possui nove filtros prensas, sendo que cinco deles encontra-se em *ramp-up* (etapa inicial da cadeia de produção). A segunda planta de filtragem de rejeitos apresentava início de funcionamento em 2020 sendo esperado pela empresa que 100% do rejeito gerado fosse filtrado e depositado na pilha. A produção de rejeitos filtrados encontra-se com aproximadamente 20 mil toneladas por dia na empresa. O Quadro 2 exhibe um resumo com informações sobre esses projetos.

Quadro 2: Minas que utilizam a técnica de empilhamento a seco por meio de filtragem.

Mina	Mina de Pau Branco	Mina Casa de Pedra
Local	Minas Gerais	Minas Gerais
Minério	Ferro	Ferro
Taxa de produção de rejeitos (t/h)	300	300 (800 a partir de 2020)
Tipo e quantidade de filtros	3 filtros prensa	9 filtros prensa
Transporte	Caminhões	Correias, empilhadeiras radiais e caminhões.
Existe área para estocagem temporária	Não, secagem na própria pilha.	Sim
Umidade do rejeito atingida	15% a 17%	13% a 16 %
Precipitação anual média (mm)	1.461	1.472
CAPEX (R\$)	Não informado	250 milhões
OPEX (R\$/ t de rejeitos)	Não informado	R\$ 10,00 a R\$12,00
Detalhe interessante da mina	Codisposição em pilha de estéril e lavra de pilha de estéril	Empilhamento em área de antiga barragem de rejeitos.

Fonte: (ALVES, 2020)

2.5.3 Disposição em cava

De acordo com Portes (2013), a disposição de rejeitos em cava, também denominado como “disposição em pit”, corresponde à disposição do rejeito em minas e cavas exauridas ou naquelas em que ainda existe a extração do bem mineral de forma simultanea, conforme exibido na Figura 30.

A disposição em cava apresenta como desvantagem problemas relacionados a necessidade manutenção das estruturas para conter os rejeitos dentro da cava. Além disso, existem ainda problemas de percolação e estabilidade das bancadas da cava (VICK, 1983 apud PORTES, 2013).



Figura 30 - Disposição em pit.
 Fonte: (LOZANO, 2006 apud PORTES, 2013)

2.5.4 Codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis

Segundo Alves (2009) a codisposição pode ser definida como uma situação em são misturados previamente os rejeitos ou o rejeito com o estéril para só depois desse processo dispor. Já na disposição compartilhada ocorre o mesmo processo, porém a disposição já ocorre no mesmo local, mas sem o rejeito ou o rejeito e estéril estar previamente misturados. (PORTES, 2013).

Segundo Figueiredo (2007), existem diversas maneiras de se realizar a disposição compartilhada, entre as quais destacam-se a disposição de rejeito em pontos específicos dentro do depósito de estéril e que geram pequenas camadas. Já a codisposição será realizada durante as atividades paralelas do processamento mineral e transporte ou até mesmo no próprio depósito de estéril. Além disso, pode ser realizado também a injeção de rejeito espessado dentro por meio de furos de injeção no depósito de estéril. Por fim, pode ainda ser realizado a disposição de rejeito por meio de camadas finas no depósito de estéril, sendo que após secas as camadas recebem uma nova cobertura de material estéril. A Figura 31 exibe uma representação de disposição compartilhada de rejeitos e estéreis.

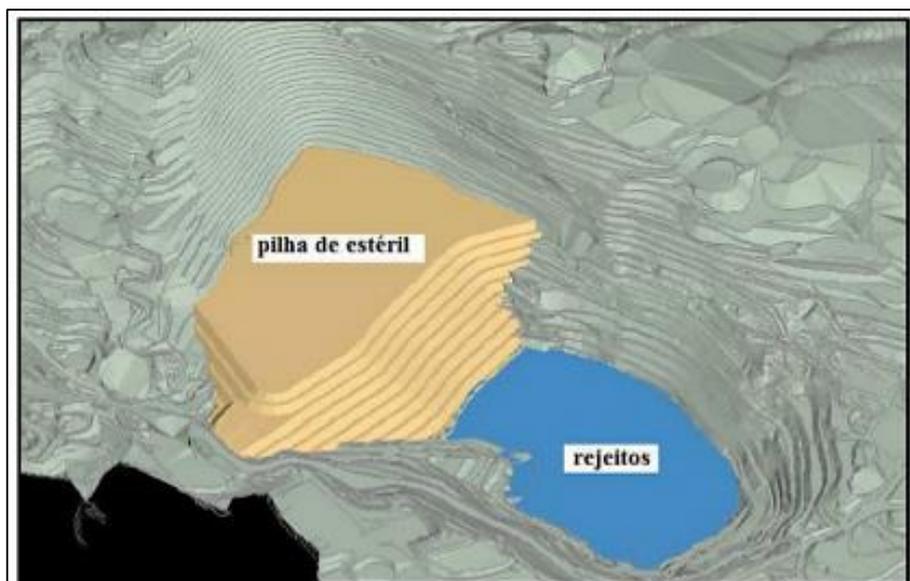


Figura 31: Disposição compartilhada com rejeitos e estéreis.
Fonte: (PAIXÃO, 2019 apud GALBIATTI, 2006)

Diversos estudos têm apresentado nos últimos anos diferentes métodos de disposição de rejeito objetivando uma mineração mais sustentável (SCHOENBERGER, 2016). A figura 30 exibe as tendências de aplicação do uso de rejeitos desaguados mundialmente.

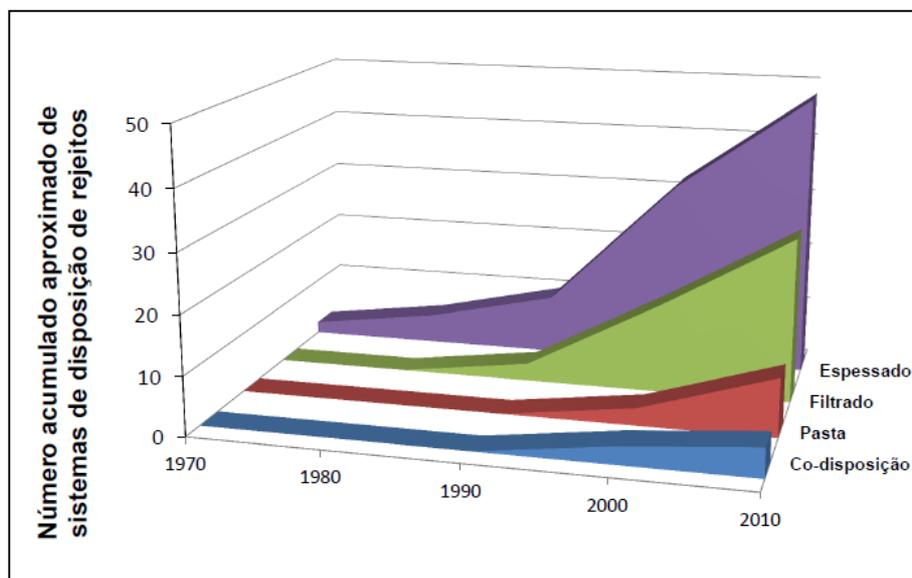


Figura 32: Tendências na utilização dos rejeitos desaguados na mineração mundial.
Fonte: (PORTES, 2013)

2.5.5 Reprocessamento de rejeitos e sua Reutilização

De acordo com Wills e Finch (2016), a melhor forma de lidar com os rejeitos é reutilizando ou os reaproveitando, podendo ser utilizados como componente de argamassa para concreto ou como material de construção de granulação fina. No Brasil, a Vale inaugurou em novembro de 2020, um projeto piloto da sua primeira fábrica de blocos que foi instalada na

mina do Pico na cidade de Itabirito em Minas Gerais. A fábrica será responsável pela produção de produtos para a construção civil onde a matéria-prima principal a ser utilizada será o rejeito dos minérios provenientes da operação de beneficiamento do minério de ferro, conforme exibido na Figura 33 . (VALE, 2020).



Figura 33: Blocos e peças produzidos com rejeito da atividade minerária.
Fonte: (SOU NOTÍCIA, 2020)

Além disso, os reprocessamentos dos rejeitos podem ser economicamente atraentes em alguns casos, especialmente para rejeitos dispostos em barragens mais antigas e que eram produzidos quando os métodos de processamento não eram tão eficientes como os existentes no mercado atualmente. Os autores ainda afirmam que devido à queda global na qualidade e na quantidade dos tipos de minério, os resíduos da mineração podem se tornar os novos recursos de amanhã.

2.6 IMPACTOS DA MINERAÇÃO

Esse capítulo apresentará os conceitos relativos ao desenvolvimento sustentável envolvendo o tripé do desenvolvimento sustentável (Ambiental, econômico e social), bem como a fundamentação teórica que irá ser utilizada para embasar os critérios e subcritérios que serão utilizados no método AHP.

2.6.1 Desenvolvimento sustentável na mineração

De acordo com o Relatório *Brundtland, Our Common Future* (Nosso Futuro Comum) de 1987, o desenvolvimento sustentável é definido como o desenvolvimento que "satisfaça as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às

suas próprias necessidades" (ONU, 1987).

A sustentabilidade é apresentada como um conceito amplo de política no discurso público global e que muitas vezes é concebido em termos de três dimensões ou pilares: ambiental (ou ecológico), econômica e social (PURVIS et al., 2019). De acordo com Guedes (2021), o *Triple Bottom Line*, também conhecido como Tripé da Sustentabilidade, é um conceito criado pelo sociólogo britânico John Elkington em 1994. O conceito relaciona-se a observar a sustentabilidade no âmbito mais macro. A Figura 34 apresenta o tripé da sustentabilidade.



Figura 34: Tripé da sustentabilidade
Fonte: (GUEDES, 2021)

O significado original de sustentabilidade e sustentar refere-se à capacidade de continuar por um longo período de tempo. Um conceito correlacionado é o de desenvolvimento sustentável. De acordo com a Unesco a sustentabilidade é muitas vezes pensada como um objetivo de longo prazo, objetivando um mundo mais sustentável, enquanto o desenvolvimento sustentável refere-se aos muitos processos e caminhos para alcançá-lo (UNESCO, 2015).

De acordo com Salum (2018), a sustentabilidade da mineração pode ser traduzida em termos da contribuição que a atividade mineral pode oferecer para o crescimento econômico, com justiça social e harmonia com a preservação ambiental.

A atividade mineral apresenta potenciais impactos socioeconômicos, riscos para o meio ambiente, para os trabalhadores de seus processos e para a sociedade (Amirshenava; Osanloo, 2019). A mineração sustentável é um dos grandes desafios das empresas do ramo, pois a atividade é de alto risco, altos impactos socioambientais que podem causar tragédias e perdas irreparáveis, por exemplo, mortes de pessoas e paralisação das atividades causando desemprego e impactando fortemente a economia local.

2.6.2 Impactos Socioambientais na mineração

A mineração pode causar poluição do solo e da água devido à migração de contaminantes da mina através de erosão, intemperismo, dispersão química, como drenagem ácida de mina e lixiviação de rejeitos. Um dos grandes problemas ambientais na mineração é a grande utilização de recursos hídricos nos processos minerais. (CANDEIAS *et al.*, 2018).

De acordo com Northey *et al.* (2018), as empresas de mineração aumentaram a divulgação do uso da água em seus relatórios corporativos de sustentabilidade e padrões de contabilidade da água. O uso da água na mineração varia entre 0,34 m³ e 6,27 m³ por tonelada de minério processado em 90% das operações de mineração. No entanto, a eficiência de reutilização da água é de cerca de 56,9%.

Guimarães e Milanez (2017) realizou estudos sobre o município de Itabira próximo a capital mineira sobre a mineração e os seus impactos locais diante os desafios da diversificação. Dentre os principais impactos socioambientais, os autores argumentam que um dos impactos mais visíveis na cidade de Itabira decorre da mudança na paisagem, principalmente com relação à destruição do pico do Cauê. Outro ponto importante apresentado pelos autores refere-se à poluição atmosférica, ou seja, a poeira mineral no ar, que está muitas vezes associada com o desmonte mecânico do minério e do solo causando emissão de material particulado. As medidas adotadas pela mineradora local para a mitigação desse impacto foram a umidificação das estradas de acesso às minas, bem como aspersão de polímeros sobre vagões e taludes. Entretanto, devido a mina ser próxima a área urbana algumas dessas iniciativas não se mostraram eficientes e a saúde da população continuou sendo afetada pela emissão de material particulado na cidade.

Os métodos de disposição de rejeitos irão influenciar diretamente nos impactos socioambientais na mineração, sendo que os métodos convencionais podem apresentar mais de 50% de água na barragem, enquanto os de rejeitos filtrados apresentam valores entre 10 a 30%. Isso ocorre, pois nos métodos de disposição de rejeitos filtrados a água é recuperada na planta. Já na barragem convencional a recuperação de água é pequena, ocorrendo perdas apenas por evaporação e infiltração indesejada da água. (FRANÇA; TRAMPUS, 2018; ALVES, 2020).

Já os impactos no solo são menores na disposição de rejeitos filtrados, pois utiliza-se uma área menor para disposição, ocorrendo desse modo um menor impacto ambiental por eliminar a necessidade de construção de bacias de disposição. Além disso, é baixa a possibilidade de contaminação dos aquíferos, enquanto é possível nas barragens convencionais

(TESSAROTTO, 2015). Ademais, existe um alto risco nas barragens convencionais de aumento na área da mancha de inundação em situações de possível rompimento da barragem, podendo causar maiores impactos ao solo, pois toda a polpa presente no reservatório pode se liquefazer e, neste estado, é capaz de fluir por quilômetros de distância a jusante. (PORTES, 2013, p. 33). Já nos rejeitos filtrados o risco é menor, pois a massa de rejeitos é relativamente estável (ALVES, 2020). O percentual de sólido é um outro aspecto importante para avaliação dos impactos no solo, pois quanto maior é a porcentagem de sólidos em volume de rejeitos maior poderá ser a recuperação de água e menor necessidade de área de armazenamento desse rejeito. Existem variações da estimativa real da porcentagem de sólidos, porém autores como França e Trampus (2018) mencionam que a porcentagem de sólidos nas barragens de rejeitos convencionais varia em torno de 25 a 30 % de sólidos apenas e a de disposição de rejeitos pastosos e filtrados com percentuais acima de 60%. Já para Mend (2017), os métodos de disposição convencionais de rejeitos não espessados apresentam valores em torno de 20% sólidos em barragens convencionais e utilizando técnicas de desaguamento de rejeitos filtrados a porcentagem de sólidos pode ficar acima de 75% de sólidos (MEND, 2017).

Já problemas relacionados a erosão e poeira no ar são os principais impactos no ar e que podem sofrer influência do método de disposição de rejeitos. Segundo Schoenberger, (2016) a disposição de rejeitos filtrados exige alta necessidade de controle de poeira e erosão, enquanto os métodos de disposição de rejeitos em barragens convencionais apresentam menor geração de poeira devido à maior presença de água.

O método de disposição de rejeitos filtrados não se mostra muito adequado para clima chuvoso com grande precipitação, pois a ocorrência de chuvas faz aumentar a umidade do rejeito a ser depositado, requerendo um sistema maior de drenagem, diminuindo a trafegabilidade das vias e sobre os rejeitos o que pode contraindicar o método e torná-lo muito mais caro. (ALVES, 2020, p.44). Já para os rejeitos pastosos podem apresentar melhores condições de disposição em regiões que apresentam intensa atividade pluviométrica e que possuem topografias planas (PORTES, 2013).

2.6.3 Impactos Técnico-econômicos na mineração

A escolha do método de disposição de rejeitos deverá sempre levar em consideração um estudo sobre o investimento que deve ser realizado para a implementação do projeto que é também chamado de *Capital Expenditures*/dispêndio de capital (CAPEX) que são os gastos realizados em equipamentos, máquinas e edificações e que se referem ao capital inicial

investido objetivando resultados futuros. Outro indicador importante é o *Operational Expenditures*/ dispêndios operacionais (OPEX) que corresponde aos custos e despesas operacionais decorrentes da implantação do investimento (ASSAF NETO, 2014).

Enquanto os métodos de disposição de rejeitos convencionais apresentam menores custos de OPEX, o método de rejeitos em pasta e filtrado podem apresentar elevados ou altos custos associados a tecnologia implementada e a infraestrutura local, transporte e consumo de energia do material. (LEMOS, 2017; ALVES, 2020; PORTES, 2013).

Além disso, os métodos de disposição convencionais podem apresentar difícil recuperação da área degradada pelo rejeito, apresentando alto custo com reabilitação da área impactada, o que ocasionará maiores custos de OPEX (ALVES, 2020).

Os métodos tradicionais de disposição de rejeito têm sido alvo de diversas críticas por profissionais da área, ocasionando dificuldades por parte das empresas mineradoras para a obtenção do licenciamento para alteamento ou construção de barragens de rejeitos (GUIMARÃES *et al.*, 2012). Esse fato somado aos últimos acidentes com rompimentos de barragens tem levado muitas empresas a buscarem técnicas mais seguras para a disposição de rejeitos. Entretanto, muitas mineradoras acabam desanimando de seus projetos diante dos altos custos de implantação e manutenção dos métodos alternativos de disposição perante os métodos tradicionais. (ALVES, 2020). Ademais, os métodos de disposição de rejeito filtrado apresentam redução do volume de outorga para água nova, item particularmente sensível em regiões com déficit hídrico o que facilita no processo de licenciamento, facilitando a aprovação do órgão ambiental, por conta da eliminação de barragens (TESSAROTTO, 2015; BATISTA *et al.*, 2019).

Com os rompimentos da barragem de Brumadinho em Minas Gerais em 2019, os métodos de disposição convencionais de alteamento a montante foram proibidos no Brasil (ANM nº 04/2019).

Estudo realizado por Mend (2017) apresenta uma comparação entre os métodos de disposição de rejeitos em termos de custos operacionais (OPEX) baseado no processamento mostrando como as tecnologias de desaguamento de rejeitos filtrados são bem mais caras em comparação aos convencionais. Segundo Alves (2020), informações relacionadas aos custos operacionais são de difíceis de serem disponibilizadas pelas empresas. O quadro 4 apresenta o estudo realizado por Mend (2017) sobre os custos operacionais em dólar por tonelada de rejeito para diferentes técnicas de desaguamento. Entretanto, Mend (2017) e nem Alves (2020) informaram a unidade de tempo dos custos operacionais. Desse modo, infere-se que seja por dia.

Quadro 3: Custos operacionais (em dólar por tonelada de rejeito) para diferentes técnicas de desaguamento (não estão incluídos os custos de capital e fechamento)

Tecnologia de desaguamento	Custo típico de processamento e de transporte (US\$/t)	Custo típico de gestão das estruturas de contenção e da água (US\$/t)	Total (US\$/t)	Margem de custo (US\$/t)
Convencional (não desaguado)	0,20	1,00	1,20	0,50 a 2,50
Espessado	0,30	1,00	1,20	0,50 a 2,50
Espessado de alta densidade	0,50	0,90	1,50	0,75 a 2,50
Pasta	1,50	0,50	2,00	2,00 a 8,00
Filtrado	5,00	0,20	5,20	4,00 a 12,00

Fonte: (MEND, 2017 apud ALVES, 2020);

Outro ponto importante para avaliação da empresa quanto aos aspectos técnicos e econômicos no momento da escolha do método de disposição de rejeitos refere-se ao custo que um acidente envolvendo barragens de rejeitos pode causar. Estudos realizados por Toledo Junior e Ribeiro (2016) em na área de demonstrações financeiras da Samarco S.A., concluíram que os acidentes com a barragem da mineradora destruíram o resultado lucrativo esperado para o período da mineradora, assim como o patrimônio líquido da empresa direto devido ao acidente. Esse fato demonstra que por mais sólida que seja uma empresa no mercado, um acidente envolvendo rompimento de barragem pode destruir o seu capital e fechar as portas da empresa em longo prazo.

2.6.4 Impactos sociais decorrentes de segurança e riscos operacionais

Existem diversos riscos na mineração que podem causar acidentes tanto para os trabalhadores das empresas mineradoras quanto da população que vive nas vizinhanças da mineradora. Desse modo, verifica-se que existem diversos riscos para a empresa, trabalhadores e sociedade. De acordo com o método utilizado para a disposição de rejeitos o risco pode ser maior ou menor.

2.6.4.1 Acidentes na mineração com barragens de rejeitos

O acidente é considerado uma anomalia de grande porte que corresponde à ruptura total ou parcial de uma obra e/ou a sua completa desfuncionalidade, ocasionando graves consequências sociais e econômicas. Já o incidente é um evento físico indesejável, porém de pequeno porte, que prejudica a funcionalidade da obra, podendo ocasionar e gerar eventuais acidentes, ainda que muito pequenos, caso não sejam corrigidos a tempo. (VIEIRA, 2005 apud DUARTE, 2008)

Um dos grandes riscos na mineração é o decorrente da falha na barragem, causando o seu rompimento. Dados coletados por Freitas e Silva (2019) oriundos da base de dados *The World Mine Tailings Failures* (WMTF), mostram que houveram, entre 1915 e 2019, 356 registros de falhas com barragens. Os dados evidenciam que houve um aumento no número de incidentes na década de 1960 e um aumento das falhas muito sérias desde 1980 e que o número de mortes voltou a crescer após a década de 1990, conforme exibido na Figura 35.

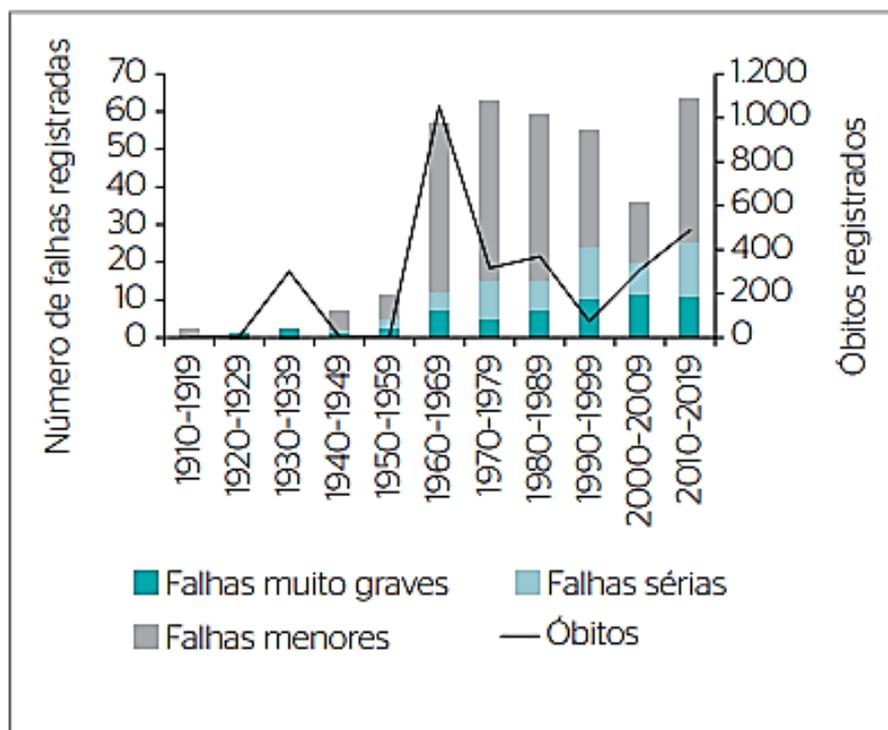


Figura 35: Rupturas de barragens de rejeitos ao longo do período de 1915 a 2019
Fonte: (WORLD MINE TAILINGS FAILURES *apud* FREITAS & SILVA, 2019)

De acordo com Owen *et al.*, (2019) e o WISE *Uranium Project*, no mínimo 2.375 pessoas perderam suas vidas no mundo em decorrência de desastres com barragens de rejeitos entre 1961 e 2019.

Segundo Strachan (2015), os EUA possuem a maior quantidade de acidentes envolvendo rompimentos de barragens, seguido do Chile e Canadá, sendo que a maioria dos acidentes está associada a barragens construídas a montante.

Lyu *et al.*, (2019), apresenta algumas estatísticas sobre os eventos de falhas com rompimento de barragens ao longo dos anos. Os dados demonstram que entre 1910 e 1999 ocorreram mais acidentes na América do Norte (Estados Unidos e Canadá) e Chile. O autor argumenta que o Chile está localizado sobre o limite das placas tectônicas (Nazca e América do Sul), causando terremotos frequentes. Entretanto, observa-se uma mudança nesse cenário

com redução de número de falhas entre 2000 a 2018 nos países que antes ocorriam mais acidentes, porém um aumento de acidentes em países subdesenvolvidos em rápido desenvolvimento como o Brasil, China e México.

A autora desse estudo realizou um mapa temático com base na tese de Menescal (2009) que elencou registros de rompimentos de barragens de rejeitos da mineração no Brasil de diversos tipos de minerais. Desse modo, foram utilizados apenas os registros que apresentavam em seu estudo o uso preponderante como de mineração e uma de uso múltiplo que também correspondia à mineração. Entretanto, como o seu último registro foi de 2008 a autora completou o seu estudo com registros de rompimentos de barragens ocorridos após essa data.

A Figura 36 apresenta o mapa temático elaborado ressaltando que o estado de Minas Gerais apresenta a maior quantidade de acidentes com rompimento de barragens (12), seguido do Pará (3) e São Paulo, Mato Grosso do Sul e Bahia com um registro cada. Os demais estados não apresentaram registros de rompimentos, o que não significa a sua inexistência, mas que não existem evidências desses. O quadro completo desse estudo encontra-se no apêndice A.

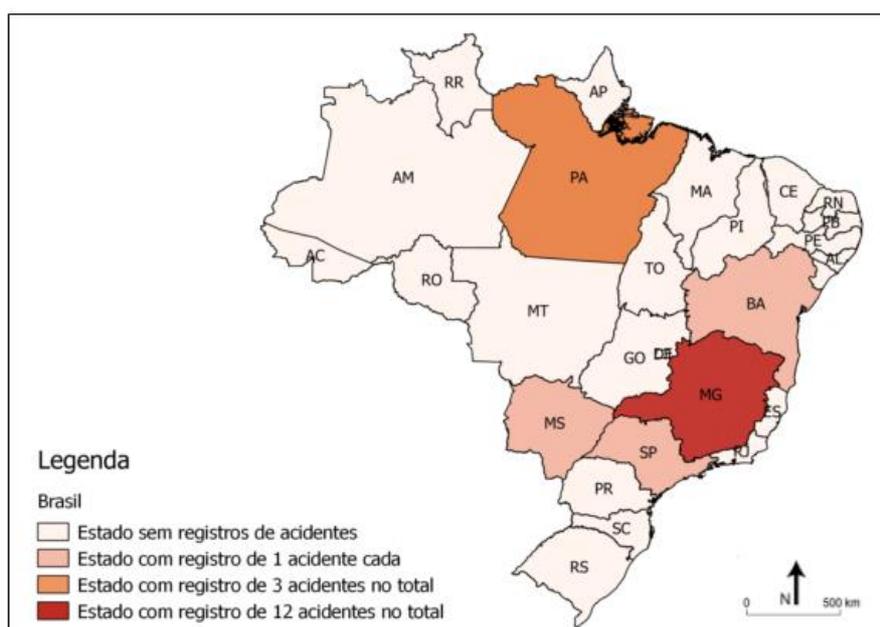


Figura 36: Registros de acidentes com rompimentos de barragem de rejeitos da mineração brasileira de ferro entre 1986 a 2019. Fonte: (Elaborado pela autora no QGIS 2.18.28, 2019)

Dentre os principais acidentes ocorridos nos últimos anos no Brasil, os que geraram maiores impactos ambientais, econômicos e sociais foram o rompimento das barragens da Samarco em Mariana e o da Mina da Vale em Brumadinho.

Em 2015 no Brasil, na cidade de Mariana no estado de Minas Gerais, a barragem de rejeitos de uma mina de minério de ferro rompeu contendo aproximadamente 50 milhões de

m³ de rejeitos, sendo que 34 milhões de m³ vazaram com o rompimento liberando água e rejeitos ao longo de 600 km do rio Doce e causando 19 mortes (BRASIL, 2015).

Em 2019, outra falha de barragem ocorreu na cidade de Brumadinho, também em Minas Gerais, causando 259 mortes entre mineiros e cidadãos locais (VALE, 2020). A Figura 37 exhibe o momento da ruptura da barragem de rejeitos em Brumadinho no estado de Minas Gerais.



Figura 37: Rompimento da barragem de rejeitos da empresa Vale em Brumadinho. Fonte: (PAES, 2019)

De acordo Lyu *et al.* (2019), em estudos realizados em 306 falhas analisadas, as principais causas das falhas com barragens de rejeitos foram: percolação (*seepage* - 21,6%), galgamento (*overtopping* - 20,6%), falhas de fundação (17,3%), terremotos – *earthquake* (17,0%), e outras causas com 23,5%.

A percolação (*Seepage*) é um movimento intersticial de água, ou seja, habita os espaços vazios dos poros de uma barragem, suas fundações ou ombreiras que são as laterais do vale onde a barragem se apoia, estabelecendo a rede de fluxo. Além disso afeta a estabilidade do talude ou pode propagar a erosão. (ANA, 2019).

De acordo com Schoenberger (2016), a principal causa geotécnica relacionados as falhas das instalações de armazenamento de rejeito está associado a água estar no local errado, causando galgamento (*overtopping*) do talude ou falha de fundação. O galgamento ocorre quando a água da barragem ultrapassa a cota da crista da barragem. A crista é a parte mais alta da barragem e a atravessa toda. O elevado nível de água passa por cima do topo da estrutura, ou seja, da crista da barragem, em direção a jusante. O galgamento ocorre ainda devido a ondas que se desenvolvem dentro do reservatório da barragem por causa das cheias que ultrapassam

a capacidade do extravasor da barragem, problemas operacionais nas barragens nas suas comportas ou despreparo dos operadores, eventos de sismos, obstruções da seção hidráulica do sistema extravasor. (SAM, 2021; SCHOENBERGER, 2016).

Outra causa comum de rompimento de barragem é relacionada ao entubamento (*piping*), que é um processo progressivo de erosão tubular interna onde se forma um tubo de escoamento e é causado pela percolação da água. O tubo expande gradativamente o seu diâmetro fazendo com que a água percorre o solo compactado causando o colapso da estrutura (SAM, 2021; WILLINGHOEFER, 2015).

Além disso a liquefação é também mais uma causa recorrente de rompimentos de barragens de rejeitos. De acordo com Sam (2021) a liquefação ocorre em decorrência da:

Solicitação estática ou dinâmica de maciço poroso parcial ou totalmente saturado, no qual, por baixa permeabilidade e compactação, a carga passa a ser suportada pela fração líquida produzindo levitação dos sólidos e, desta forma, a massa toda passa a se comportar por período de tempo limitado como um líquido.

Ademais, falhas humanas podem ocorrer, como por exemplo falhas nos procedimentos operacionais e condições de terremotos induzidos, que podem ser causados em decorrência de eventos isolados ou devido à combinação de mais de um fator. (WILLINGHOEFER, 2015).

Rico *et al.*, (2007) analisou 145 desastres com barragens de rejeitos e identificou que em 55.9% dos casos envolviam barragens acima de 15 metros de altura e 22% acima de 30 metros. Além disso, 83% das falhas ocorreram quando as barragens estavam ativas, 15% inativas e abandonadas e apenas 2% inativas, mas com manutenções. Ademais, o método de construção de barragens que apresentou o maior número de incidentes está associado ao método de elevação a montante, representando 76% dos casos; as barragens de rejeitos elevados a jusante representaram 15% e os de linha central 5% dos casos globais.

De acordo com Duarte (2008), o método de alteamento à montante apresenta um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em relação à fatores de segurança. Isso ocorre em decorrência dos alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Por fim, existem ainda dificuldades na implantação de um sistema interno de drenagem que seja eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem de rejeitos o que pode ocasionar problemas adicionais que apresentam reflexos na condição de estabilidade da estrutura (ARAUJO, 2006). Entretanto, após os eventos de rompimento de barragem no Brasil, a Resolução da Agência Nacional de Mineração de 4 de fevereiro de 2019 determinou a substituição de todas as barragens de rejeitos construídas pelo método a montante (ANM, 2019).

Embora os rejeitos sejam sólidos e relativamente fáceis de manusear, eles não são exatamente secos. Os principais problemas técnicos, de acordo com Schoenberger (2016), para empilhamento a seco incluem gerenciamento de águas superficiais e subterrâneas e controle de poeira e erosão. Além disso, os métodos de armazenamento a seco são mais caros que os métodos de armazenamento tradicionais.

No entanto, segundo Hällevall (2019), o uso de rejeitos desidratados ainda é limitado a algumas áreas do mundo. Apenas cerca de 5% dos rejeitos da mineração gerados em 2018 foram desidratados em pasta, espessados em rejeitos secos, com previsão de aumento para apenas 13% em 2025.

Schoenberger (2016) acredita que a persistência do uso de práticas insustentáveis e falhas no armazenamento de rejeitos ocorrem mais devido à diferença entre as técnicas e quem toma a decisão final, embora haja desafios para a construção de instalações de armazenamento de rejeitos. Por esse motivo, muitas das melhores práticas de tecnologia não são implementadas. Portanto, é provável que mais desastres ocorram até que as empresas melhorem as práticas de gerenciamento de rejeitos.

2.6.4.2 Riscos da mineração para os trabalhadores, sociedade e para a empresa.

A mineração representa 1% da força de trabalho em todo o mundo. No entanto, é responsável por cerca de 8% dos acidentes fatais relacionados ao trabalho (OIT, 2015). As principais causas de morte são atribuídas ao uso de equipamentos móveis (como caminhões e transportadores), quedas de rochas e trabalho em altura (ICMM, 2018; DUARTE *et al.*, 2019).

De acordo com o Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM), os dados de desempenho de segurança de suas 27 empresas mineradoras membros revelam que entre 2012 e 2018, 461 trabalhadores de minas morreram desempenhando funções profissionais. Entretanto, esses números não levam em consideração as mortes ocorridas no rompimento da barragem de rejeitos de brumadinho no Brasil. (ICMM, 2018).

Um dos principais riscos relacionados a barragens de rejeitos é para o trabalhador que se encontra na área que pode ser atingida pela lama, podendo causar mortes nos trabalhadores e da sociedade que vive nas vizinhanças da mineradora. Para evitar mortes devido a rompimentos de barragem tanto para os trabalhadores quanto para a população das cidades locais, as empresas de mineração devem desenvolver o Programa de Ações Emergenciais (PAE) contendo o estudo de *dam-break*, modelagem matemática de simulações da ruptura da barragem, quando existirem barragens e população a jusante. Além disso, dentro do estudo é

realizado o mapeamento da mancha de inundação que são áreas que podem ser inundáveis para o vale a jusante do barramento, podendo afetar as áreas residências com os rejeitos. Além de plano de ações emergenciais, quantificação de possíveis danos e riscos em caso de rompimento da barragem, classificação do dano potencial que está associado e os requisitos legais e de responsabilidade social. Entretanto, observa-se que muitas vezes a população de modo geral não tem acesso a esses estudos, o que as impossibilita de terem conhecimentos se estão construindo ou não em uma área de risco em caso de um rompimento de barragem de rejeitos. Desse modo, competem as prefeituras um maior acompanhamento desses estudos de *dam-break*, quanto à fiscalização junto à população de construções que se encontram em áreas consideradas de risco. (IBRAM, 2017).

Além disso, a região atingida pelo rompimento pode causar desemprego devido ao rompimento da barragem. Segundo dados do Sistema Nacional de Emprego (SINE), o desemprego na cidade de Mariana em Minas Gerais após o rompimento da barragem da Samarco era de 22,7% em 2019. Antes do rompimento em novembro de 2015, a taxa de desemprego não passava de 6%. Essa mesma situação se repete em municípios que dependem diretamente da receita gerada pela mineração ao município. (R7, 2019).

Estudos realizados por Guimarães e Milanez (2017) na cidade de Itabira mostram que a mineração apresenta dois grandes inconvenientes do ponto de vista econômico: os recursos tendem a se esgotar com o tempo por ser finito e o mercado internacional das commodities minerais possui grandes oscilações de preços como variações cambiais do dólar. Esses fatores impactam muito as economias das cidades que são dependentes do setor mineral.

Outro ponto importante que impacta a segurança para a sociedade local, refere-se à poluição atmosférica, ou seja, a poeira mineral no ar. Mesmo sendo adotados métodos de diminuição desses impactos, conforme visto nos impactos socioambientais, essas medidas nem sempre se mostram totalmente eficientes e a saúde da população continuou sendo afetada no caso de Itabira pela emissão de material particulado na cidade proveniente da mineração. (GUIMARÃES; MILANEZ, 2017). Estudos realizados por Braga *et al.* (2007) concluíram que a poluição do ar na cidade de Itabira em Minas Gerais se equiparava à dos grandes centros urbanos e analisaram que o aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado no ar, poderia causar diversos impactos na saúde da população como um aumento em torno de 4% no número de atendimentos de adolescentes e de crianças em decorrência de doenças respiratórias. (GUIMARÃES; MILANEZ, 2017).

Desse modo, observa-se uma maior necessidade de controle de poeira e que podem causar problemas respiratórios na sociedade (SCHOENBERGER, 2016). Esse fator agravante

poderia comprometer a aplicabilidade do método de disposição de rejeito filtrado na cidade devido ao método apresentar grande geração de poeira.

Além disso, outro fator importante que afeta a população das cidades mineradoras e que podem causar riscos a sociedade, como na cidade de Itabira, são os altos índices de suicídio que muitas vezes estão relacionados a situação econômico do momento na cidade. Momentos de baixa instabilidade econômica da mineração prejudica a cidade causando redução dos salários e demissões, causando apreensão entre os trabalhadores e consequentemente na população local podendo causar aumento nos índices de suicídio (SOUZA, 2007 apud GUIMARÃES; MILANEZ, 2017).

O risco para a empresa está relacionado com a possibilidade de rompimento da barragem, pois caso a barragem se rompa a empresa poderá ser fechada como ocorreu com a Samarco em Mariana causando diversos prejuízos financeiros para os acionistas. Além disso, existe ainda o risco associado a indenização pelos danos provocados em um possível rompimento da barragem de rejeitos. De acordo com a repórter Brasil da Agencia Brasil (2022), as indenizações e auxílios financeiros pagos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão na cidade de Mariana, no estado de Minas Gerais, atingiram R\$ 8,71 bilhões de reais em 2021. Segundo a Fundação Renova, empresa criada para gerir e executar os programas e ações de reparação e compensação dos danos causados pelo rompimento da barragem de Fundão, esse valor supera em 182% as previsões iniciais da empresa.

O Relatório de sustentabilidade socioambiental elaborado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) mostra que é importante as empresas reconheçam que precisam da aceitação social e que a sociedade pode dar ou recusar apoio a um empreendimento, conforme o conceito de Licença Social para Operar (LSO), aplicado à discussão sobre a sustentabilidade de empreendimentos minerais (CARVALHO *et al.*, 2018). Portanto, métodos com maiores riscos para a sociedade podem levá-la a não aceitar o empreendimento mineral. Diante do que foi exposto, observa-se que os processos de mineração industrial precisam ser bem gerenciados para mitigar os riscos existentes e reduzir os impactos decorrentes da atividade mineral.

2.7 LEGISLAÇÕES RELATIVAS À GESTÃO DE REJEITOS NA MINERAÇÃO

A legislação mineral apresenta diversas evoluções ao longo dos tempos, sendo criados dispositivos legislativos objetivando a realização e a gestão da mineração e a segurança das barragens de rejeitos.

De acordo com Neves (2018), a inserção da temática de legislação em Segurança de Barragens ocorreu no Brasil, com a promulgação da Lei n.º 12.334 de 20 de setembro de 2010. Nessa lei foram inseridos diversos órgãos fiscalizadores de modo a auxiliar na execução do tema como: Agência Nacional de Águas e Saneamento básico (ANA), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), bem como seus órgãos descentralizados e o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Os órgãos fiscalizadores citados na Lei 12.334/2010 tiveram que criar portarias e resoluções objetivando regulamentar alguns artigos da citada lei federal.

A legislação brasileira criou a Lei nº 12.305 de 2010 que instituiu “a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)” e os dispositivos relacionados a Lei nº 12.334, de 2010 estabeleceu “a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)” criando também o “o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB)” (IBRAM, 2016).

Ainda em 2010, o Ministério do Meio Ambiente por meio do Conselho Nacional de Recursos Hídricos criou a Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012 estabelecendo critérios gerais para a classificação de barragens por meio da categoria de risco, considerando dano potencial associado e as características do seu volume. De modo complementar e a corroborar com a Lei nº 12.334/2010, criou-se a Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012, implementada pelos mesmos órgãos e estabelecendo as diretrizes para implantação do PNSB, aplicação de seus instrumentos e atuação do SNISB.

De modo a atender a Lei nº 12.334 de 2010, a legislação brasileira criou por meio de uma Portaria do DNPM de nº 416, de 2012, o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração que apresenta as diretrizes do Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração.

A Comissão Internacional de Grandes Barragens - *International Commission on Large Dams* (ICOLD) é uma organização não governamental internacional que se dedica a compartilhar conhecimentos e informações profissionais sobre o design, construção, manutenção e impacto de grandes barragens. (ICOLD, 2022).

A resolução da ANA de nº 236, de 30 de janeiro de 2017 foi muito importante, pois estabelece a periodicidade para a execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis

técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência. O PNSB é muito importante para o cadastramento, aquisição de dados e a fiscalização das barragens. Entretanto, não são apresentadas informações complementares como qual o método de disposição de rejeitos (convencional/aterro hidráulico, espessado ou filtrado), sendo essa uma informação difícil de ser encontrada pela sociedade de modo geral.

Em 2017, a Portaria do DNPM de nº 70.389, de 17 de maio de 2017, criou o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispôs sobre o Plano de Segurança, a Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração e o Plano de Ações de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). O PAEBM é um documento técnico na qual constam as situações em emergências, as ações a serem executadas e os agentes a serem notificados em caso de emergência, objetivando minimizar o risco de perda de vidas humanas em caso de uma ruptura da barragem.

O método de construção também denominado como de alteamento de barragens de rejeitos de mineração à montante é um dos principais métodos utilizados na mineração brasileira. Entretanto, após o rompimento da barragem de Brumadinho, a ANM, determinou por meio da Resolução ANM nº 04, de 15 de fevereiro de 2019 a proibição da utilização desse método em todo território brasileiro. Entretanto, a lei de 2010 já previa documento análogo para todas as barragens, chamado PAE, sendo que essa resolução ANM nº 04 detalha apenas para barragens de mineração. A resolução determinou também que fosse descomissionada ou descaracterizada todas as barragens construídas por esse método. A resolução nº 04/2019 no art. 12 determinou ainda que os empreendedores com barragens de mineração, em operação, para a realização da disposição de rejeitos, independentemente do método construtivo utilizado, deverão concluir os estudos com vistas à identificação e implementação de soluções voltados à redução do aporte de água nas barragens até a data de 15 de agosto de 2019. Desse modo, ressalta que a utilização dos métodos de disposição de rejeitos alternativos poderá ser uma forma de atendimento da legislação nesse requisito.

Além disso, a Resolução CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) de 1986 é uma importante legislação ambiental que deve ser aplicada no setor minerário e que se encontra ainda vigente no Brasil. A resolução menciona em seu artigo 2º, que para ser realizada a extração mineral será necessário a elaboração de estudos sobre os possíveis impactos ambientais decorrentes da atividade mineral, assim como o relatório de impacto ambiental (RIMA). Esses estudos serão submetidos à aprovação do órgão competente de âmbito estadual,

e do IBAMA, sendo necessário em caráter supletivo a realização de licenciamento das atividades que podem modificar o meio ambiente. O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) deve contemplar todas as alternativas tecnológicas do projeto, apresentando as hipóteses de não execução do projeto (BRASIL, 1986). Além disso, devem ser analisados todos os impactos ambientais e suas alternativas, recomendando a mais favorável do ponto de vista da viabilidade ambiental (PAIXÃO, 2019; SÁNCHEZ, 2013). Portanto, os métodos de disposição de rejeitos alternativos e mais modernos são mecanismos de minimização dos riscos ambientais que podem inviabilizar um projeto caso esse não seja autorizado pelo órgão estadual competente ou IBAMA.

2.8 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

De acordo com Saaty (2008), a tomada de decisão por múltiplos critérios (MCDM – *Multiple Criteria Decision Making*) relaciona-se ao conhecimento da problemática, da necessidade e da finalidade da decisão, dos critérios e subcritérios da decisão, das partes interessadas e dos grupos afetados. Ademais, é preciso definir as alternativas de ações a fim de determinar qual seria a melhor alternativa, além de realizar uma priorização entre elas. Já Sitorus *et al.* (2019) define o MCDM como uma parte da pesquisa operacional que apoia o tomador de decisão na resolução de problemas quando vários critérios conflitantes estão envolvidos e precisam ser avaliados. Entretanto, para Gomes *et al.* (2002), o MCDM não objetiva apresentar uma solução única para um problema, mas apresentar um apoio às pessoas e organizações no processo decisório assim como auxiliar nas recomendações.

De acordo com Sitorus *et al.* (2019), o MCDM apresenta diversos métodos e técnicas existentes, sendo as mais utilizadas o *Analytic Hierarchy Process* -AHP (Método de Análise Hierárquica), *Analytic Network Process* – ANP (Método de Análise em Redes), *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* – TOPSIS (Técnica de Ordem de Preferência por Semelhança com a Solução Ideal), *Elimination Et Choix Traduisant la Realit* – ELECTRE (Eliminação e escolha refletindo a realidade) e *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation* – PROMETHEE (Método de Organização de Classificação de Preferência para Enriquecimento de Avaliações), teoria Grey entre outros desenvolvidos constantemente ou suas combinações e variações. A Figura 38 apresenta uma visão hierárquica dos diversos métodos MCDM e seus tipos.

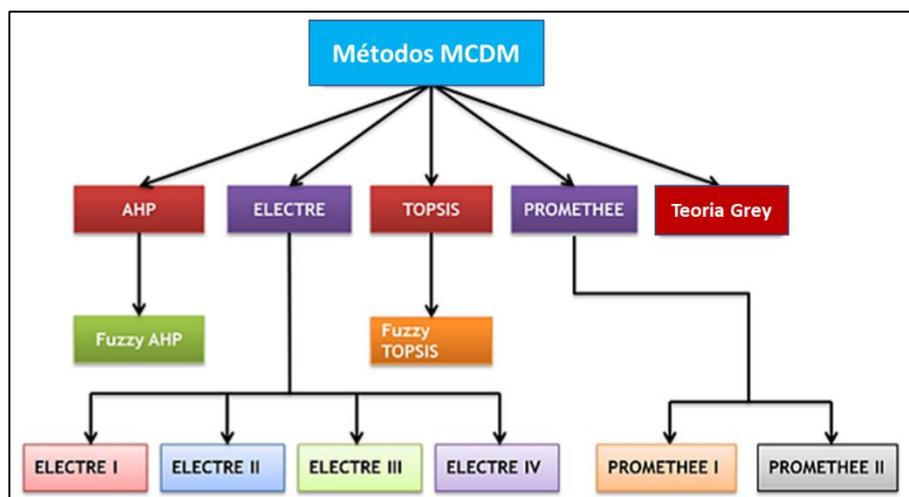


Figura 38: Método de Decisão Multicritério (MCDM)
 Fonte: (Adaptado de ARULDOSS *et al.*, 2013)

As técnicas MCDM têm apresentado diversas aplicações em estudos na mineração como pode ser visto no Quadro 4.

Quadro 4: Estudos realizados utilizando MCDM

Método	Área de aplicação na mineração	Autores
AHP e TOPSIS	Gestão dos resíduos da mineração	(SHAHBA <i>et al.</i> , 2017)
AHP	Seleção do local da barragem de rejeitos	(DEHKHARGHANI;HAMIDIAN, 2018)
Fuzzy AHP	Seleção do melhor método de disposição de rejeito para o Projeto de Minério de Ferro Sangan (SIOP) no Iran	(NARAGHI; MASOUMI; RASHIDINEJAD, 2019)
AHP	Gerenciamento sustentável da água	(FREITAS; MAGRINI, 2013)
AHP e TOPSIS	Seleção do método de processamento de alumínio	(ALIZADEH; SALARI RAD; BAZZAZI, 2016)
Fuzzy TOPSIS	Gerenciamento de riscos à saúde e segurança humana	(MAHDEVARI; SHAHRIAR; ESFAHANIPOUR, 2014)
Fuzzy AHP-TOPSIS	Análise comparativa de métodos hidrometalúrgicos para a recuperação de Cobre	(YOUSEFZADEH <i>et al.</i> , 2019)
AHP-DEA	Modelo de Transporte sustentável na indústria de mineração	(GUPTA <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: (ELABORADO PELA AUTORA, 2020)

De acordo com Sitorus *et al.* (2019) apud Roy (1996), o MCDM foi projetado para lidar com quatro tipos de problemas:

1. A escolha problemática, na qual o MCDM é usado para selecionar a melhor opção dentre um conjunto de alternativas.
2. A problemática de classificação, na qual o MCDM é usado para atribuir um conjunto de alternativas às categorias que foram projetadas a priori.
3. A classificação problemática, na qual o MCDM é usado para ordenar as alternativas parcial ou completamente.
4. A descrição problemática, na qual o MCDM é usado para elaborar as alternativas, cria um conjunto de critérios e determina o desempenho de todas ou algumas alternativas, levando em consideração informações adicionais.

De acordo com Sitorus *et al.*, (2019), uma decisão incorreta durante o processo de seleção da melhor alternativa no setor de mineração pode resultar em perdas consideráveis durante a operação o que pode ser irreparável.

Alguns estudos abordam a avaliação multicritério como uma forma de seleção dos melhores métodos de disposição de rejeitos como o de Naraghi *et al.*, (2019) que usou o processo de hierarquia analítica usando a lógica *fuzzy* aplicado ao Projeto de Minério de Ferro Sangan (SIOP) no Irã. Já Freitas e Magrini (2013), aplicaram a matriz multicritérios (AHP) na tomada de decisão para avaliar o gerenciamento sustentável da água em um complexo de mineração no sudeste do Brasil. Entretanto, observa-se a existência de poucos estudos na seleção de métodos de disposição de rejeito.

Desse modo, escolheu-se o método AHP devido a sua maior consolidação no meio científico e empresarial, além da ampla aplicação de estudos relacionados à tomada de decisão na seleção de métodos do processo mineral.

2.8.1 Método Analítico Hierárquico (AHP)

Gomes (2007) afirma que o Método da Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process* /AHP) foi um dos primeiros métodos de tomada de decisão baseado em múltiplos critérios desenvolvidos. O método AHP foi desenvolvido por Saaty na década de 1970, nos EUA e fornece um processo sistemático para incorporar fatores como lógica, experiência, emoção e um senso de otimização em um processo metodológico de tomada de decisão (SHIMIZU, 2010). A técnica AHP é a mais utilizada desde os anos 1970 e apresenta diversos benefícios tais como: valores de julgamentos das comparações paritárias baseadas em experiência, dados físicos e intuição, o que torna mais claro e com mais credibilidade o processo decisório. Além disso, o método AHP pode trabalhar com aspectos quantitativos e qualitativos de um determinado problema de decisão (SAATY, 1994; GOMES, 2007). Entretanto, apresenta limitações devido a grandes quantidades de alternativas e critérios. Além disso, pode incorporar tendenciosidade dos decisores durante a tomada de decisão

(MARANHÃO, 2016).

O método busca simplificar um problema complexo que apresenta vários critérios em uma estrutura hierárquica (SITORUS *et al.*, 2019). Essa hierarquia desencadeará em uma estrutura multinível, onde o primeiro nível é a meta/objetivo, seguido por subníveis, critérios e subcritérios, e até o último nível das alternativas. Desse modo, o problema será desconstruído e colocado de forma mais estruturada e sistemática (SAATY; VARGAS, 2001). De acordo com os trabalhos de Saaty (1990) e Castelo Branco *et al.* (2012), a metodologia AHP pode ser dividida em três passos:

1. Estruturar o problema como uma hierarquia;
2. Obter julgamentos de comparações paritárias;
3. Estabelecer as prioridades globais.

2.8.1.1 Estrutura hierárquica

A criação da estrutura da hierarquia deverá ser realizada por meio de uma árvore, onde se objetiva a identificação do objetivo principal, os critérios adotados, subcritérios utilizados e alternativas que contribuem para a solução do problema determinado (SAATY, 1990). Desse modo, caberá aos especialistas realizar a comparação entre as alternativas e critérios, sendo necessária uma definição consistente desses critérios para que se obtenham resultados mais coerentes. A Figura 39 exibe um modelo básico da hierarquia existente no método AHP.

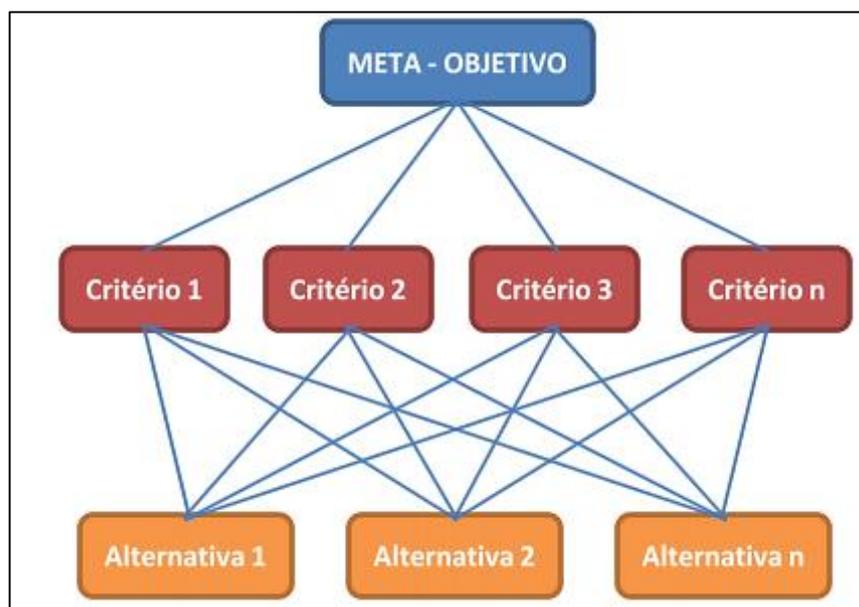


Figura 39: Estrutura hierárquica utilizado para o método AHP.
Fonte: Modificado de (ARUEIRA, 2014 apud SAATY, 1991)

2.8.1.2 Coleta de julgamentos par a par dos especialistas

Esse tópico abordará os principais passos utilizados para a coleta de dados com base nas respostas dos especialistas, cálculos dos pesos locais.

2.8.1.2.1 Escala numérica de Saaty

Essa etapa constitui-se da coleta de julgamentos par a par utilizando-se de formulários para entrevistar os especialistas e coletar informações sobre os critérios com base na escala proposta por Saaty (1991).

Saaty (1991) propõe para a realização do método AHP uma escala de julgamento para a comparação par a par, onde cada comparação possui um grau de importância. O Quadro 5 apresenta a escala proposta por Saaty em 1991.

Quadro 5: Escala relativa para comparação paritária

Intensidade de importância	Escala verbal	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra/moderada	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação a outra.
5	Importância grande ou essencial/forte	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande/muito forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida e relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta/extrema.	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
2,4,6 e 8	Valores para julgamentos intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
1/3, 1/5, 1/7 e 1/9	Valores para comparação inversa	

Fonte: Adaptado de (SAATY, 1991)

2.8.1.2.2 Matrizes paritárias e cálculo dos pesos dos critérios, subcritérios e as alternativas.

A avaliação dos critérios é realizada pelo especialista avaliando se o elemento A tem preferência X sobre um elemento B, e se o elemento B tem preferência 1/X sobre o elemento A, o que passa a ser chamado de valor recíproco (SAATY, 1990). Desse modo, é realizada uma matriz de julgamento utilizando todos os critérios definidos para a comparação par a par. Entretanto quanto mais critérios, maiores serão as análises a serem realizadas. A Equação 2 apresenta as comparações entre os pares de critérios e indicadores em forma de matriz quadrada $n \times n$.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2}$$

O fator a_{ij} representa o critério de julgamento para o par ij , sendo que a elaboração da matriz apresenta as seguintes regras: $a_{ji} = 1/a_{ij}$, $a_{ij} > 0$; se A_i apresentar a mesma importância que A_j então $a_{ij} = a_{ji} = 1$.

De acordo com Saaty (1990) e Mendonza *et al.* (2009), após ser elaborada a matriz recíproca de julgamento faz-se necessário a normalização da matriz e posteriormente realizar o cálculo do autovetor normalizado obtendo o peso ou prioridades locais das alternativas comparadas. Para isso faz-se necessário:

- (i) - Realizar a soma de cada coluna da matriz paritária (Eq. 3).

$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \forall j = 1 \dots n \quad \text{Eq. 3}$$

Onde S_j é a soma dos elementos ao longo da coluna j da matriz recíproca escrita na Eq. 2.

- (ii) - Dividir cada fator de importância que foi inserido na matriz paritária pela soma da coluna à qual a mesma pertence, objetivando achar seu valor relativo dentro da coluna (Eq. 4).

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \dots & \bar{a}_{1n} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \dots & \bar{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{a}_{n1} & \bar{a}_{n2} & \dots & \bar{a}_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde \bar{A} é a matriz A normalizada e cada elemento \bar{a}_{ij} é dado pela Eq. 5

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} = \frac{a_{ij}}{S_j} \quad \text{Eq.5}$$

- (iii)- Realizar o cálculo da média aritmética relacionada a cada linha da matriz normalizada, conforme introduzido por Saaty (1980) na versão original do AHP. De acordo com o método autovetor, as prioridades dos objetivos são derivadas das componentes do autovetor, conforme os trabalhos de Saaty (1980; 1990), Viegas (2010), Barreto (2019) e apresentado na Equação 6.

$$V_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \overline{a_{ij}}, \quad \forall i = 1 \dots n \quad \text{Eq.6}$$

Onde:

i, j = são os índices da posição de linha e coluna da matriz recíproca, respectivamente

V_i = componente do autovetor na linha “i”;

n = ordem da matriz de julgamento.

Entretanto, alguns autores como Krejčí e Stoklasa (2018), Mendonza *et al.* (2009) utilizam a média geométrica e afirmam que ela é mais assertiva para o cálculo do autovetor.

Krejčí e Stoklasa (2018) afirmam que quando a média aritmética é utilizada pode ocorrer uma reversão da classificação dependendo unicamente da escolha da técnica de normalização, que segundo os autores não ocorre utilizando a média geométrica, pois não é preciso normalizar a matriz. De acordo com o método da média geométrica, proposto por Barzilai *et al.* (1987), as prioridades (autovetor) são calculadas pela média geométrica para cada linha da matriz recíproca da comparação paritária, conforme exibido na Equação 7.

$$V_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}^{\frac{1}{n}} \quad \text{Eq.7}$$

Onde:

ij = são os índices da posição de linha e coluna da matriz recíproca, respectivamente

V_i = componente do autovetor na linha “i”;

n = ordem da matriz de julgamento.

Após o processo de cálculo do autovetor será realizado a normalização dos seus valores através da divisão dos elementos de cada coluna pela soma da coluna, gerando desse modo o autovetor normalizado (MENDONZA *et al.*, 2009).

Após realizar os cálculos de média referentes a cada linha da matriz, seja usando média aritmética ou geométrica, obtém-se o peso ou prioridade local de cada critério. Esse peso é a pontuação normalizada do critério ou subcritério que foi analisado e indica a preferência relativa das alternativas do tomador de decisão com relação a um critério definido de forma específica (MORAES & SANTALIESTRA, 2007).

2.8.1.2.3 Análise da Consistência

A análise de consistência tem como objetivo avaliar se os julgamentos realizados pelos analisadores estão coerentes logicamente, através do cálculo do Índice de Consistência (IC). Consequentemente, busca-se diminuir as incertezas e analisar os desvios do método (CASTELO BRANCO *et al.*, 2012)

A análise da consistência está baseada nas seguintes etapas: gerar os autovetores para a definição da prioridade de julgamento, obtenção do autovalor máximo que irá definir a consistência dos valores apresentados, realizar o cálculo do índice de consistência e calcular a razão de consistência (SAATY, 1991; FRANCO *et al.*, 2017)

O autovalor máximo (λ_{max}) no caso da média aritmética será calculado pela multiplicação da matriz recíproca de julgamentos pelo vetor da coluna de prioridades locais computado w , seguido da divisão desse novo vetor encontrado, Aw , pelo primeiro vetor w , chegando-se ao valor de λ_{max} (SILVA, 2007). Para o cálculo de λ_{max} , utiliza-se a equação 8.

$$\lambda_{max}w = \text{média}(Aw) \quad \text{Eq. 8}$$

Em outros termos, reescrevendo a Equação 8 tem-se a Equação 9:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} \cdot V_j), \quad \forall i = 1 \dots n \quad \text{Eq. 9}$$

Onde λ_i é o i -ésimo autovalor que é calculado pela soma do produto de cada linha da matriz recíproca com o respectivo do autovetor. O autovalor máximo λ_{max} é definido pela média aritmética dos autovalores λ_i (Eq. 10).

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad \text{Eq. 10}$$

No caso da média geométrica definida por Barzilai *et al.* (1987) e descrito no trabalho de Neves *et al.* (2011), λ_{max} é calculado pela soma do produto dos elementos do autovetor normalizado pelos elementos das somas de cada coluna da matriz recíproca S_j (Eq. 11)

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n (S_j \cdot V_j) \quad \text{Eq. 11}$$

Segundo Saaty (1990), o índice de consistência das matrizes deve ser realizado utilizando a Equação 12.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

IC= índice de consistência

λ_{max} = Autovalor máximo;

n = ordem da matriz de julgamento.

De acordo com Saaty (1991) deve ser utilizado também no método AHP o uso da Razão de Consistência que considera o IC. Saaty (1991) propõe ainda uma tabela com os índices randômicos (IR), que variam com o tamanho n da amostra par matrizes de ordem 1 a 15 calculados em laboratório conforme apresentado na Figura 40.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Figura 40: Índice Randômico
Fonte: (SAATY, 1991)

A fórmula utilizada para a razão de consistência (RC) proposta por Saaty (1991) é apresentada na Equação 13 (SILVA, 2007).

$$RC = \frac{IC}{\text{índice Randômico (IR) para n}} \quad \text{Eq. 13}$$

De acordo com Saaty (1991), para que uma matriz de julgamento seja aceita como consistente a razão de consistência deve apresentar valores menores que 0,1 (10%), segundo o autor caso seja superior é recomendável que os julgamentos sejam revisados pelos pares, reescrevendo as questões do questionário ou recategorizando os elementos. Entretanto o próprio artigo do Saaty (1990) apresenta razões de consistência acima de 10%, o que demonstra o quão difícil é apresentar razão de consistência baixa.

Apotolou e Hassell (1993) argumentam que poderiam ser utilizados respostas com valores de razão de consistência maiores que 0,1 (10%) sem afetar os resultados globais. Goepel (2013) também recomenda que poderiam ser aceitas respostas com $RC > 10\%$,

praticamente até 20%, dependendo da natureza e do objetivo do projeto.

Fogliatto e Albin (2003) corroboram com essa afirmativa e mencionam sobre a utilização de razão de consistência de 20% até 30%. Estudos realizados por Kumar *et al.*, (2009) apresentaram valores de razão de consistência de até 30% para grupos com especialistas de vários campos de conhecimento. Conforme relatado por Goepel (2013), seus projetos e pesquisas mostram que, fazendo as comparações par-a-par, a razão de consistência para muitos respondentes acaba sendo maior do que 0,1 ou seja maior que 10%. Segundo Goepel (2013) com base em uma amostra de 80 entrevistados em seus projetos AHP, o valor médio da razão de consistência obtida é de 16%, ou seja, apenas metade dos participantes alcançou um RC abaixo de 16% em seus projetos; O autor observou que 80% (oitenta por cento) das matrizes recaem em uma razão de consistência de até 0,36, ou seja, 36%.

Goepel (2013) relata que seus projetos mostraram que um limite estrito de 0,1 para a razão de consistência (RC) não é praticável com múltiplas entradas (*inputs*). Segundo o autor, seriam razoáveis pesos de RC de 0,15 a 0,30, dependendo do número de critérios. A aceitação de um RC mais alto também depende do tipo de projeto das prioridades de saída e da precisão necessária. De acordo com Lima *et al.* (2015), uma razão de consistência muito alta, em torno de 90%, significaria que os julgamentos par-a-par são totalmente aleatórios e não são confiáveis.

Segundo Kumar *et al.*, (2009), pesquisas realizadas com grupos heterogêneos e multidisciplinar de especialistas são difíceis de apresentarem todas as respostas com consistência devido a heterogeneidade do grupo de especialistas. Segundo Saaty (2004) e Miller (1956), existe um limite humano da capacidade de processar informações mantendo a precisão e validade. Desse modo, para manter-se o número de inconsistências baixo, o número de critérios preferencialmente deve ser de no máximo 7.

2.8.1.3 Prioridade global das alternativas/ranqueamento das alternativas

De acordo com Oliveira *et al.*, (2020), após a verificação da consistência dos julgamentos, realiza-se o cálculo das prioridades globais das alternativas.

Os passos apresentados nas etapas da matriz paritárias devem ser repetidos para todas as avaliações das alternativas com relação aos subcritérios que foram definidos. O conjunto de subcritérios também deve ser submetido ao mesmo passo em relação aos critérios definidos. O mesmo deve ser realizado observando os critérios em relação ao objetivo final (MORAES & SANTALIESTRA, 2007).

Segundo Saaty (1991), considerando a estrutura hierárquica do AHP, as prioridades globais que são calculadas para cada critério adotado correspondem à importância dada para cada critério com relação ao objetivo principal estabelecido. Finalmente, para obter a prioridade global das alternativas, deve-se multiplicar as prioridades locais das alternativas calculadas em cada critério pelas prioridades dos critérios, sendo que essa prioridade determinará a contribuição que cada alternativa apresentará com relação ao objetivo principal.

Quando obtidas todas as planilhas/matrizes de comparação paritária, deve-se sumarizar os resultados, realizar o cálculo da média ponderada relacionada a cada alternativa analisada. A média ponderada corresponde a soma dos produtos entre: (i) o peso de cada alternativa para um determinado critério (também chamado de peso normalizado, calculado no segundo passo) e; (ii) o peso local de cada critério com relação ao outro, esse será calculado na comparação paritária entre os próprios critérios. Quanto mais complexa a estrutura hierárquica se apresentar, maior será o número de matrizes. O resultado final é o qual apresenta menor média ponderada, ou seja, o menos impactante.

2.8.1.4 Softwares existentes no mercado para aplicação do método AHP

A forma mais habitual de utilizar o método AHP ainda é por meio manual utilizando a ferramenta Excel® da Microsoft®. De acordo com Favretto e Nottar (2016) o cálculo manual pode se tornar fatigante, complexo e demorado em situações que necessitam da utilização de muitos critérios e/ou alternativas. Entretanto, já existem no mercado softwares para aplicação direta do método AHP proposto por Saaty (1991), como por exemplo, o *software* da empresa Aspicelogic que possui o produto *Analytic Hierarchy Process Software 3.1*, o *SuperDecisions v.3.2*, o *Web-HIPRE* e o *software EXPERT CHOICE 11.1®*, de modo a facilitar a modelagem dos dados, inserir seus julgamentos, obter resultados e realizar análises de sensibilidade nos resultados com maior rapidez na apuração dos resultados e precisão.

2.8.1.5 Unidades de centralidade

A moda é a resposta mais frequente do conjunto de valores obtidas de cada pergunta. A mediana é a realização que ocupa a posição central da série de observações, quando ordenadas em ordem crescente. A média aritmética a soma das respostas dividida pelo número de respostas. A utilização dessas medidas estatísticas dá uma visão mais robusta do conjunto de respostas obtida. A mediana é uma medida que apresenta maior robustez quando comparada com a média, pois não é tão sensível aos dados. Entretanto, a média reflete o valor

correspondente a todas as observações e é uma medida que é muito influenciada pela presença de valores muito grandes ou de valores muito pequenos. Caso as três medidas estatísticas das respostas indiquem respostas semelhante reforça a robustez dos critérios definidos e que os especialistas responderam os questionários sem ter grande disparidade de respostas (LANDIM, 2013).

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no estudo foi de revisão bibliográfica sobre as técnicas de disposição de rejeitos existentes no Brasil e no mundo na mineração por meio de portais de busca como por exemplo, *Scopus*, *Science Direct* de periódicos, legislações, dissertações e teses. Após essa etapa será apresentada as alternativas a serem avaliadas para a disposição de rejeitos, assim como os critérios a serem aplicados no Método de Análise Hierárquica (AHP). Os critérios, subcritérios e alternativas serão escolhidos de modo a tentar abranger os aspectos do desenvolvimento socioambiental do projeto para torná-lo mais sustentável.

Consideram-se três métodos de disposição de rejeitos para a avaliação: (1) Disposição convencional de rejeitos em forma de polpa/disposição hidráulica (barragem alteadas à montante, alteadas à jusante ou de linha de centro); (2) Disposição de rejeitos em forma de pasta (rejeitos pastosos) e (3) Disposição de rejeitos filtrados (empilhamento a seco). Os métodos foram escolhidos devido à disposição convencional ser a mais utilizada e mais tradicional na mineração. Já os rejeitos pastosos e filtrados são tecnologias de desaguamento que vem sendo mais utilizada recentemente na mineração de ferro e que apresenta potencial de mitigar os riscos de acidentes com rompimento de barragens no futuro.

Para o estudo será utilizado o método AHP utilizando um questionário no *Google forms* que será enviado para 40 especialistas com a seguinte formação acadêmica e experiência: Engenheiro de Minas; Engenheiro Ambiental; Geocientistas (Geólogo e Geofísicos) e Engenheiro civil de modo que eles serão os julgadores dos critérios, subcritérios e alternativas para aplicação do método AHP. Estudos de Mohsen *et al.*, (2009) mostram a utilização do método AHP com 19 especialistas selecionados de diferentes áreas envolvidos no planejamento da mina e processo de design utilizando o método AHP para seleção do método de mineração. Entretanto, não existe uma quantidade mínima de especialistas para responder o questionário, porém objetivando uma análise multidisciplinar é importante que o estudo apresente a maior quantidade de respondentes possível. Muitas vezes o aumento da quantidade de respondentes se torna difícil em função do tamanho da quantidade de critérios, subcritérios e alternativas influenciando no tamanho do questionário, o tornando cansativo para os respondentes. As especialidades foram escolhidas devido à abrangência do estudo no âmbito de projeto, porém podendo ser utilizados mais especialistas que possam apresentar pontos de vistas diferentes como por exemplo representantes da sociedade civil.

A avaliação multicritério será realizada utilizando o método AHP proposto por Saaty (1991) para a avaliação da sustentabilidade dos métodos de disposição de rejeitos. Será

realizado uma avaliação com os especialistas sobre as alternativas e os critérios propostos por meio de questionário elaborado no *Google forms*, e enviado para especialistas que possuem formações correlacionadas a área de estudo ou que trabalharam na área de mineração. Junto ao questionário foi enviado também um guia elaborado por meio de revisão bibliográfica sobre os critérios, subcritérios e alternativas para auxílio dos especialistas. Por fim, serão analisadas as informações coletadas nos questionários por meio do AHP realizando um cálculo das prioridades e da análise da consistência para a escolha do método mais adequado para a disposição do rejeito de minério de ferro.

Embora existam esses *softwares* no mercado, a maioria deles são pagos ou possuem versão gratuita apenas na sua demonstração. Além disso, o fato de o julgador ter que baixar um *software* em seu computador poderia fazer com que ele desistisse de responder a pesquisa. Por essa razão, a pesquisa atual utilizou a coleta de dados em formulário do *Google forms* e os dados foram modelados e tratados em planilha de Excel® com cálculo das prioridades e da análise da consistência.

Conforme estudos de Apotolou e Hassell (1993) e Goepel (2013) utilizou-se para o estudo a razão de consistência de até 20% devido à natureza do projeto que requerer uma equipe multidisciplinar com visões diferentes sobre um mesmo objetivo.

Por fim, será realizado uma comparação entre a utilização dos métodos de média geométrica e aritmética dos autovetores no AHP, bem como medidas estatísticas de centralidade (moda, mediana e média) para avaliação da distribuição das respostas.

Jamshidi *et al.*, (2009) elaborou um fluxograma geral para aplicação do método AHP. Esse fluxograma foi adaptado pela autora para a identificação do método de barragem de rejeito mais impactante na mineração utilizando o método AHP. A Figura 41 exhibe o fluxograma.

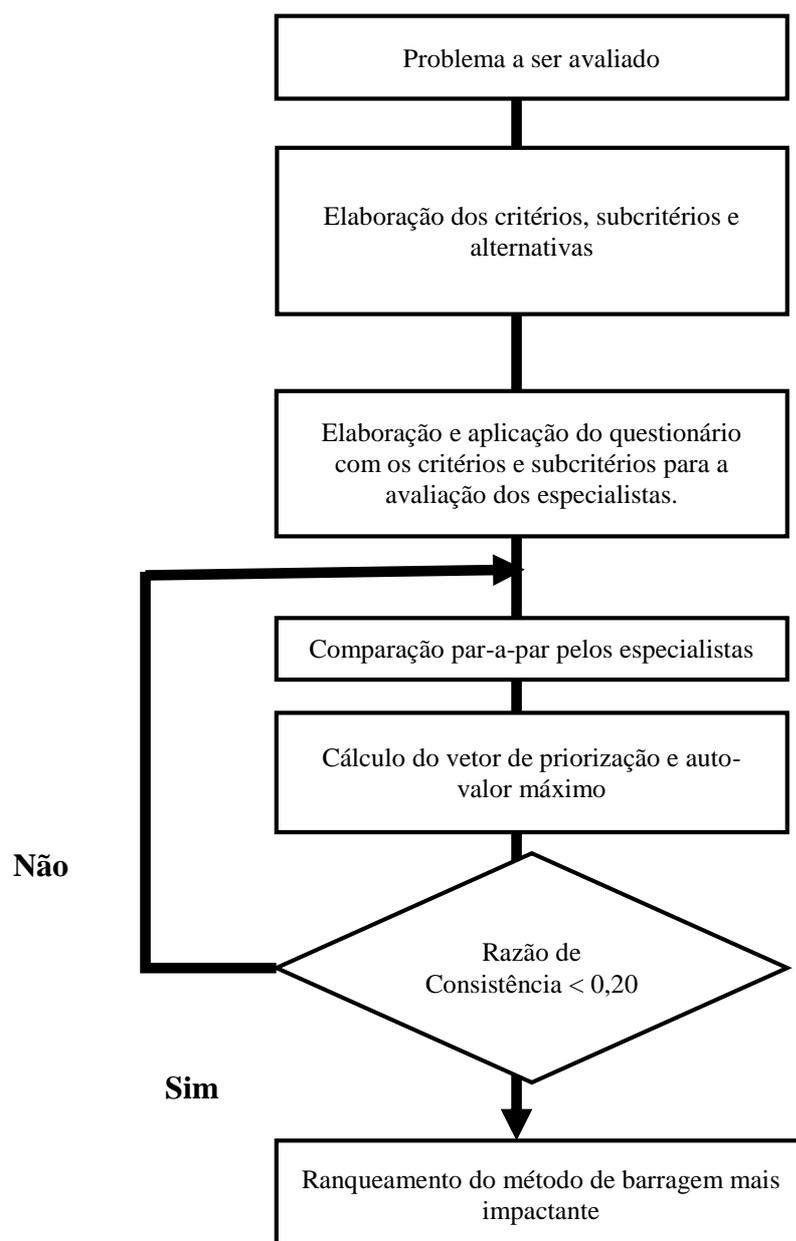


Figura 41: Fluxograma geral do AHP para os métodos de disposição de rejeitos estudados
 Fonte: Adaptado de (JAMSHIDI *et al.*, 2009)

3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS

O Quadro 6 apresenta uma comparação das características dos impactos socioambientais. Esse quadro assim como os seguintes foram elaborados pela autora com base em pesquisas de diversos artigos de modo a compilar dados importantes para a análise dos critérios e subcritérios a serem utilizados no método AHP. Ao analisar os dados observa-se que os impactos socioambientais possuem uma relação direta com o método de disposição de

rejeitos e que quanto mais seco for o rejeito, de forma geral, menores serão os impactos no solo e na água, tendo em vista que menores serão as áreas de deposição do rejeito e que a água poderá ser mais recuperada, de modo a mitigar diversos riscos subsequentes ao meio ambiente e a população. Entretanto, observa-se que os impactos no ar acabam sendo maiores nos rejeitos mais secos em decorrência da poeira, já que não possuem tanta água e um maior percentual de sólidos no rejeito. Desse modo, faz-se necessário um maior controle da poeira nesse método.

Quadro 6: Critérios de comparação de características dos impactos socioambientais utilizados no método AHP

SubCritérios do AHP	Características	Métodos de disposição de rejeitos		
		Barragens de rejeitos convencionais (disposição hidráulica em barragens/polpa)	Disposição de rejeitos Espessados/pastosos	Disposição de rejeito filtrado
Impactos à água	Presença de água na disposição	Mais de 50% (p/p)	Em torno de 30% (p/p)	Entre 10 a 30% (p/p)
	Recuperação de água	Pequena, perdas por evaporação e infiltração (indesejada).	Alta recuperação durante o processo (MEND, 2017)	Elevada, água recuperada na planta antes da disposição. (ALVES, 2020)
	Contaminação de aquíferos	Ocorrência possível (Moderada)	Baixa ou nula	Baixa ou nula
Impacto no solo	Área utilizada	Utilização de grandes áreas para disposição do rejeito.	1- Redução da área da planta necessária para a disposição de rejeitos, reduzindo o tempo da área PONTES, 2013,p.31) 2- As pastas são dispostas em forma de cone, o que permite o escoamento da água das chuvas sobre o mesmo e apenas um pequeno percentual de infiltração (CHAVEZ et al, 2013 apud FRANÇA e TRAMPUS, 2018)	Menor área utilizada para disposição; Mínimo impacto ambiental por eliminar bacias de disposição TESSAROTTO, 2015) Dependendo das condições topográficas, o ganho de área pode ser tornar inexpressivo (PONTES, 2013,p.124)
	Mancha de dispersão	Risco alto maior para o alteamento à montante, pois toda a polpa presente no reservatório de rejeitos pode se liquefazer, sendo capaz de fluir por quilômetros de distância à jusante. (PORTES, 2013, p. 33)	O fluxo de rejeitos seria menor e mais facilmente controlado, tornando-se um problema local. (PORTES, 2013, p. 33)	Massa de rejeitos mais estável (ALVES, 2020)
	Porcentagem de sólidos no rejeito	Pequena com 30 a 58% de sólidos.	Entre 60 a 75% de sólidos	>80 % de sólidos
	Reabilitação da área degradada pela disposição de rejeitos	Após algum tempo (LIMA, 2006, p. 21)	Imediata (LIMA, 2006, p. 21)	-
Impactos no ar	Poeira no ar	Menor geração de poeira devido a maior presença de água	Geração de poeira acima da gerada nas barragens convencionais.	Alta necessidade de controle de poeira (SCHOENBERGER, 2016).

Fonte: Adaptado de (FRANÇA; TRAMPUS, 2018; PORTES, 2013; OLMEDO *et al.*, 2015, VALE, 2019.)

Já o Quadro 7 apresenta uma comparação das características dos impactos técnicos e econômicos que serão utilizados no método AHP.

Observam-se nos dados que os métodos de disposição de rejeitos filtrados e que apresentam maiores percentuais de sólidos são mais caros, embora podem não exigir a construção de barragens de rejeitos. Esse fator em muitos casos acaba inviabilizando a utilização do método dependendo do *payback* (período de retorno) do empreendimento, que é o período que a empresa necessita para recuperar todos os investimentos realizados de forma original no projeto (VARGAS, 2010).

Quadro 7: Critérios de comparação de características dos impactos técnicos e econômicos utilizados no método AHP

Subcritérios do AHP	Características	Métodos de disposição de rejeitos		
		Barragens de rejeitos convencionais (disposição hidráulica em barragens/polpa)	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeito filtrado
Custos CAPEX	Reabilitação da área de disposição de rejeitos	Difícil recuperação da área impactada com alto custo na sua reabilitação (ALVES, 2020)	Passível de recuperação e reuso. Alto custo de reabilitação (ALVES, 2020)	Passível de recuperação e reuso. Baixo custo de reabilitação (ALVES, 2020)
	Geologia e reologia dos rejeitos.	A disposição convencional requer topografia natural e condições geológicas para minimizar o tamanho do aterro e maximizar o volume de armazenamento de rejeitos (WATSON <i>et al</i> , 2010).	Necessidade de estudos aprofundados sobre a reologia de modo a prever o comportamento do rejeito perante o bombeamento e empilhamento nas barragens ou áreas de disposição (FRANÇA; TRAMPUS, 2018) Melhores em topografias planas, geralmente não são viáveis (sem suporte de aterro) em locais com declives moderados de terreno (WATSON <i>et al</i> , 2010).	Pode ser implementada em uma variedade de terrenos, desde que haja estabilidade, requisitos operacionais e de fechamento são levados em consideração (WATSON <i>et al</i> , 2010).
	Custo para instalação do projeto	Menores custos de capital (MEND, 2017)	Alto em comparação ao convencional (LIMA, 2006, p. 21) e (MEND, 2017)	Muito alto (ALVES, 2020)
		Requer atenção, bom desenho e boas práticas de construção da barragem (MEND, 2017)	Sistemas mais complexos de transporte dos rejeitos (MEND, 2017)	Sistemas mais complexos de transporte dos rejeitos (MEND, 2017)

Custos OPEX	Custos OPEX (Incluindo custos de implantação e descomissionamento)	Menores custos de operação e transporte a longas distâncias (MEND, 2017). Rejeito vai para a barragem por gravidade ou partir de calhas ou tubulações de baixa pressão. (ALVES, 2020)	Os custos associados à infraestrutura, transporte e consumo de energia do material são mais elevados (LEMOS, 2017). Alto (MEND, 2017) Bombas de deslocamento positivo com tubulação de alta pressão (ALVES, 2020)	Muito alto (ALVES, 2020) Transporte por correias ou caminhões.
Aspectos regulatórios	Legislações	Proibição de construção do método de alteamento a montante. (ANM nº 04/2019) As empresas de mineração têm dificuldade na aquisição de novos licenciamentos devido a quantidade de impactos ambientais (GUIMARÃES et al., 2012).	-	1- Redução do volume de outorga para água nova, item particularmente sensível em regiões com déficit hídrico; 2- Maior facilidade para obter aprovação do órgão ambiental, por conta da eliminação de barragens; (TESSAROTTO, 2015)

Fonte: Adaptado de (FRANÇA; TRAMPUS, 2018; PORTES, 2013; OLMEDO *et al*, 2015; ALVES, 2020 adaptado de GOLDER ASSOCIATES, 2015)

O Quadro 8 apresenta uma comparação das características de segurança e riscos operacionais utilizados no método AHP. Verifica-se que os riscos para a empresa são maiores nos métodos de disposição convencionais, pois mesmo que a probabilidade de rompimento seja baixa, a severidade será alta a depender do porte da barragem, o que poderá causar mortes para os trabalhadores e a sociedade. Além disso, as empresas perdem credibilidade quando ocorrem acidentes, podendo ser interditadas pelos órgãos fiscalizadores, o que comprometerá todo o investimento realizado. Os riscos para a sociedade também são bem significantes, pois a população poderá ser atingida de diversos modos, seja decorrente dos impactos ambientais, sociais e econômicos, além dos riscos oriundos do processo.

Quadro 8: Critérios de comparação de segurança e riscos operacionais utilizados no método AHP

Subcritérios do AHP	Características	Métodos de disposição de rejeitos		
		Barragens de rejeitos convencionais (disposição hidráulica em barragens/polpa)	Disposição de rejeitos Espessados/pastosos	Disposição de rejeito filtrado
Risco para a empresa	Riscos de falha na contenção e de liquefação	Possível ou alta	Baixo ou mínimo	
Riscos para os trabalhadores.	Acidentes e facilidade de execução da atividade	Possibilidade de rompimento das barragens e instalações de rejeitos com morte de trabalhadores.	-	O sistema de filtração/centrifugação é totalmente automatizado, exigindo apenas supervisão por parte dos trabalhadores; (TESSAROTTO, 2015)
Riscos para a sociedade	Acidentes e doenças decorrentes dos impactos ambientais e econômicos	Possibilidade de rompimento das barragens e instalações de rejeitos com morte de residentes. Desemprego devido à interrupção/paralisação da operação da exploração do minério	Menores riscos em comparação com o método de disposição convencional. Por ter um comportamento mais viscoso e com menor volume em caso de ruptura a mancha de espalhamento é mais reduzida.	Necessidade de controle de poeira e erosão (SCHOENBERGER, 2016), podendo causar problemas respiratórios na sociedade. Maior facilidade de aceitação por parte da sociedade.

Fonte: Adaptado de (FRANÇA; TRAMPUS, 2018); PORTES, 2013; OLMEDO *et al.*, 2015; DE CARVALHO *et al.*, 2018).

3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO AHP

O Método de Análise Hierárquica (AHP) foi aplicado no estudo de avaliação da sustentabilidade e dos impactos dos métodos de disposição de rejeitos. Serão apresentados a aplicação da metodologia adotada e dos resultados obtidos.

3.2.1 Definição do problema e das alternativas a serem avaliadas

Dentre os diversos métodos de disposição de rejeitos, serão apresentados e avaliados usando o método AHP apenas os aplicáveis para as tecnologias de disposição de rejeito do minério de ferro. Desse modo, escolheram-se como alternativas para a disposição de rejeitos

os seguintes métodos devido à disposição convencional ser um método tradicional e os rejeitos pastosos e filtrados serem tecnologias de desaguamento mais modernas que poderão reduzir os impactos na mineração.

- 1 Disposição convencional de rejeitos (polpa) (Aterro hidráulico)
- 2 Disposição de rejeitos pastosos (pasta) (Pilhas cônicas)
- 4 Disposição de rejeitos filtrados (Torta) (Empilhamento a seco)

Para avaliar os critérios para uma mineração sustentável serão utilizados três grandes grupos de critérios: Impactos Socioambientais, Técnicos e econômicos e Segurança & Riscos Operacionais. Esses critérios foram escolhidos devido a apresentar uma abrangência dentro do contexto do tripé da sustentabilidade (Econômico, social e ambiental) apresentado no subitem 2.6.1 e de modo a realizar uma análise da disposição dos rejeitos no âmbito do desenvolvimento sustentável. A Figura 42 apresenta os critérios que serão utilizados no método AHP.

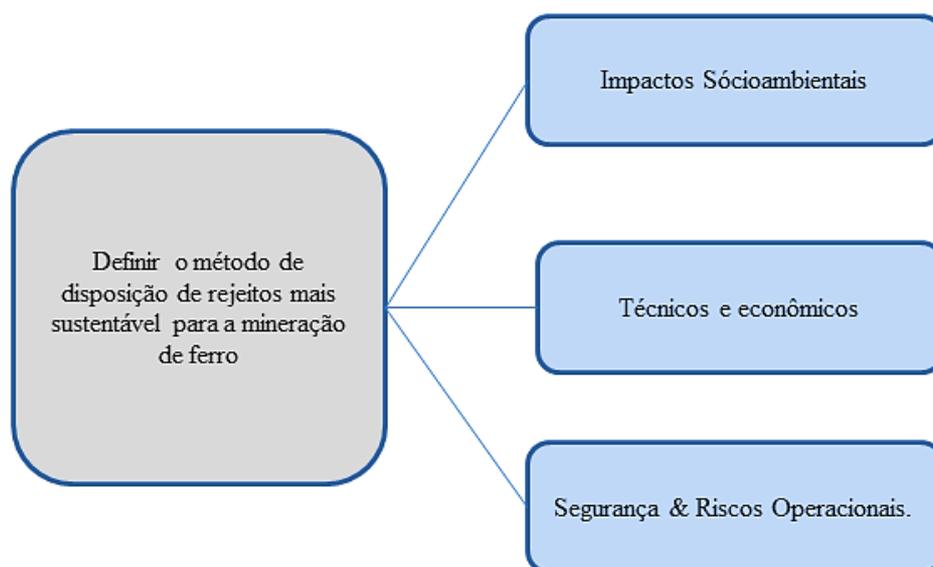


Figura 42: Critérios utilizados no método AHP
Fonte: (A AUTORA, 2020)

Após a definição das alternativas e dos critérios gerais, definem-se os objetivos comparáveis entre si para a realização da análise dos especialistas.

3.2.2 Definição dos critérios e sub-critérios de avaliação

3.2.2.1 Impactos Socioambientais.

- **Impactos na água:** Os métodos que possuem maiores tecnologias para a disposição de rejeitos apresentam uma maior economia de água, tendo em vista que quanto maior o percentual de sólido, maior será o reaproveitamento e reutilização da água no próprio processo mineral. Além disso, será necessária a retirada de uma menor quantidade de água dos rios para alimentação do tratamento do minério.
- **Impactos no solo:** A disposição de rejeitos provenientes da mineração de ferro pode ocasionar impactos ao solo devido à ocupação de uma área maior para a inserção do rejeito no solo. Ademais, os diversos métodos de disposição de rejeitos podem apresentar diversas manchas de inundação em caso de um rompimento da barragem de rejeitos. Portanto, torna-se importante o seu estudo para avaliar qual dos métodos apresentará a utilização de uma menor área impactada.
- **Impactos no ar:** Os métodos de disposição de rejeitos que possuem maiores percentuais de sólidos possuem maiores quantidade de poeira o que podem causar problemas respiratório na população local, enquanto os que possuem maiores quantidade de água, estão sujeitos a rompimento das barragens. Portanto, espera-se avaliar qual método de disposição pode causar maiores impactos no que tange a qualidade do ar.

3.2.2.2 Técnicos e econômicos

- **Custo de aquisição (CAPEX):** Esse subcritério está relacionado às despesas de capital ou investimento em bens de capital e do dinheiro despendido na aquisição de equipamentos para a realização dos processos de disposição de rejeitos. Incluem-se dentro desse os custos com a implantação e o descomissionamento e/ou descaracterização das instalações de armazenamento de rejeitos. Objetiva-se a avaliação das alternativas estudadas de acordo com o custo gasto para aquisição dos equipamentos em cada alternativa.
- **Custo Operacional (OPEX):** Esse subcritério relaciona-se aos custos para a manutenção dos métodos de disposição de rejeito. Desse modo, espera-se avaliar a

viabilidade financeira para as alternativas propostas.

- **Aspectos Regulatórios:** As legislações minerais são diferentes de acordo com o país. Desse modo, busca-se avaliar as alternativas levando-se em consideração as legislações aplicáveis no Brasil e o seu impacto nos métodos de disposição e rejeitos estudados.

3.2.2.3 Segurança e riscos operacionais

- **Riscos para a empresa:** Esse subcritério apresentará uma relação direta com a probabilidade de rompimentos de barragem de acordo com a tecnologia de disposição utilizada e com as consequências e impactos causados de acordo com as alternativas propostas. Desse modo, objetiva-se avaliar qual método poderia minimizar o risco de acidentes com rompimento de barragens e conseqüentemente uma melhoria de imagem da empresa perante a sociedade.
- **Riscos para os trabalhadores:** O risco para os trabalhadores será maior quanto maior for o risco de acidentes de rompimento de barragens. Os trabalhadores das mineradoras poderão sofrer abalos psíquicos em sua saúde emocional em caso de um possível rompimento. Portanto, espera-se avaliar as alternativas que poderiam diminuir esses riscos.
- **Riscos para a sociedade:** A sociedade ao entorno de uma mineradora se torna em muitos casos dependente dela, sendo a economia prejudicada em caso de rompimento. Além disso, poderá ocorrer diminuição de empregos, diminuição da população flutuante, perda de *royalties* bem como o do turismo local.

Outro aspecto importante relaciona-se ao fato de existirem populações que residem ao entorno de muitas barragens o que pode aumentara a gravidade no caso de um rompimento da barragem. Ademais, problemas de saúde podem ser causados por métodos de disposição de rejeitos que gerem impactos no ar, água e solo, ocasionando sobrecarga no sistema de saúde local. Além disso, a sociedade poderá sofrer com fatores de riscos relacionados a adoecimento mental decorrente de um rompimento de uma barragem ou da perda da economia local. Desse modo, espera-se avaliar qual dos métodos poderá mitigar os riscos para a sociedade residente próxima as mineradoras. A Figura 43 apresenta a árvore de critérios criada com base nos critérios definidos para a resolução do problema proposto. Já a Figura 44 exhibe os subcritérios que serão analisados conforme as alternativas elencadas.

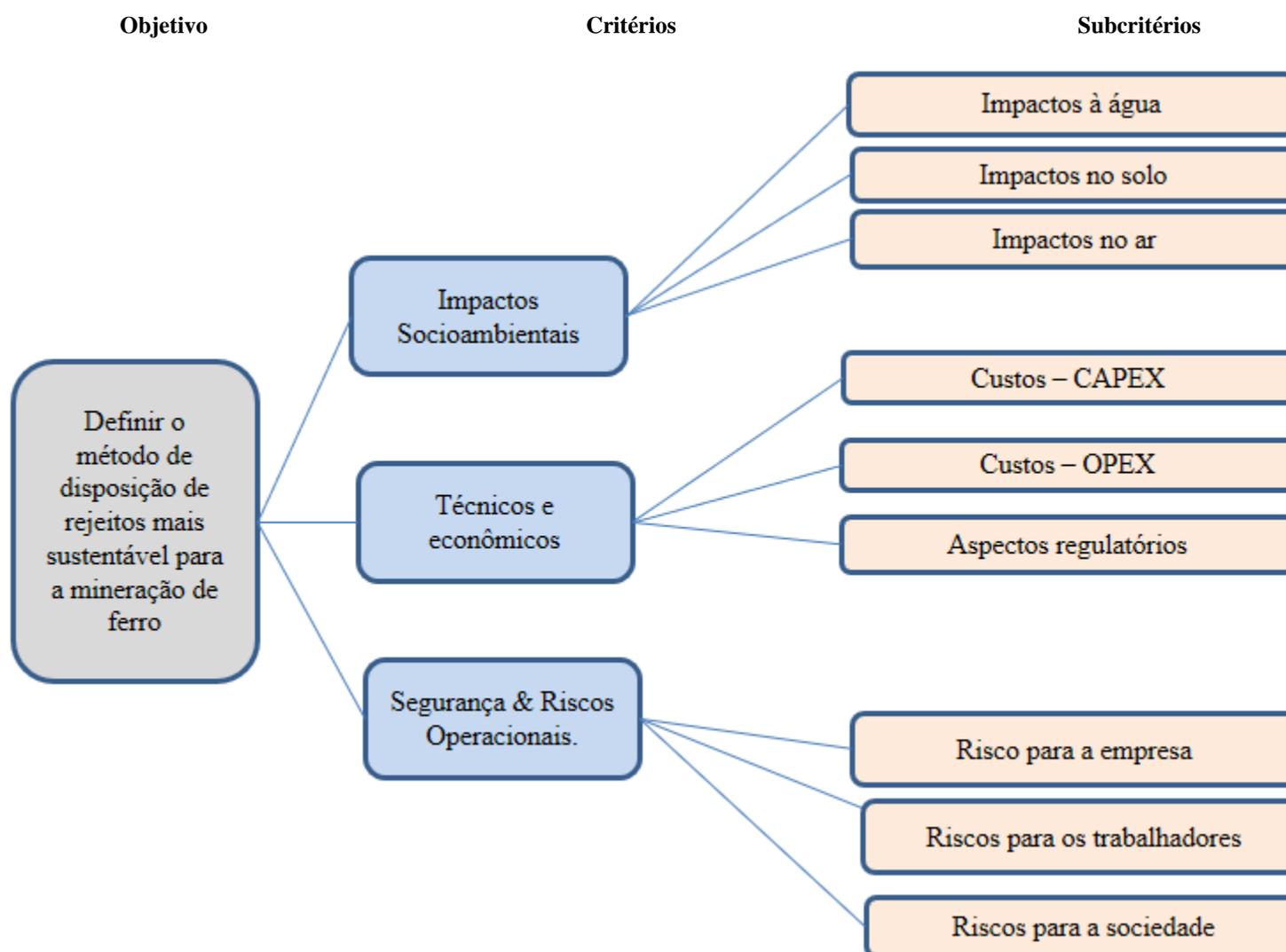


Figura 43: Árvore de Critérios e subcritérios
Fonte: (A AUTORA, 2021)

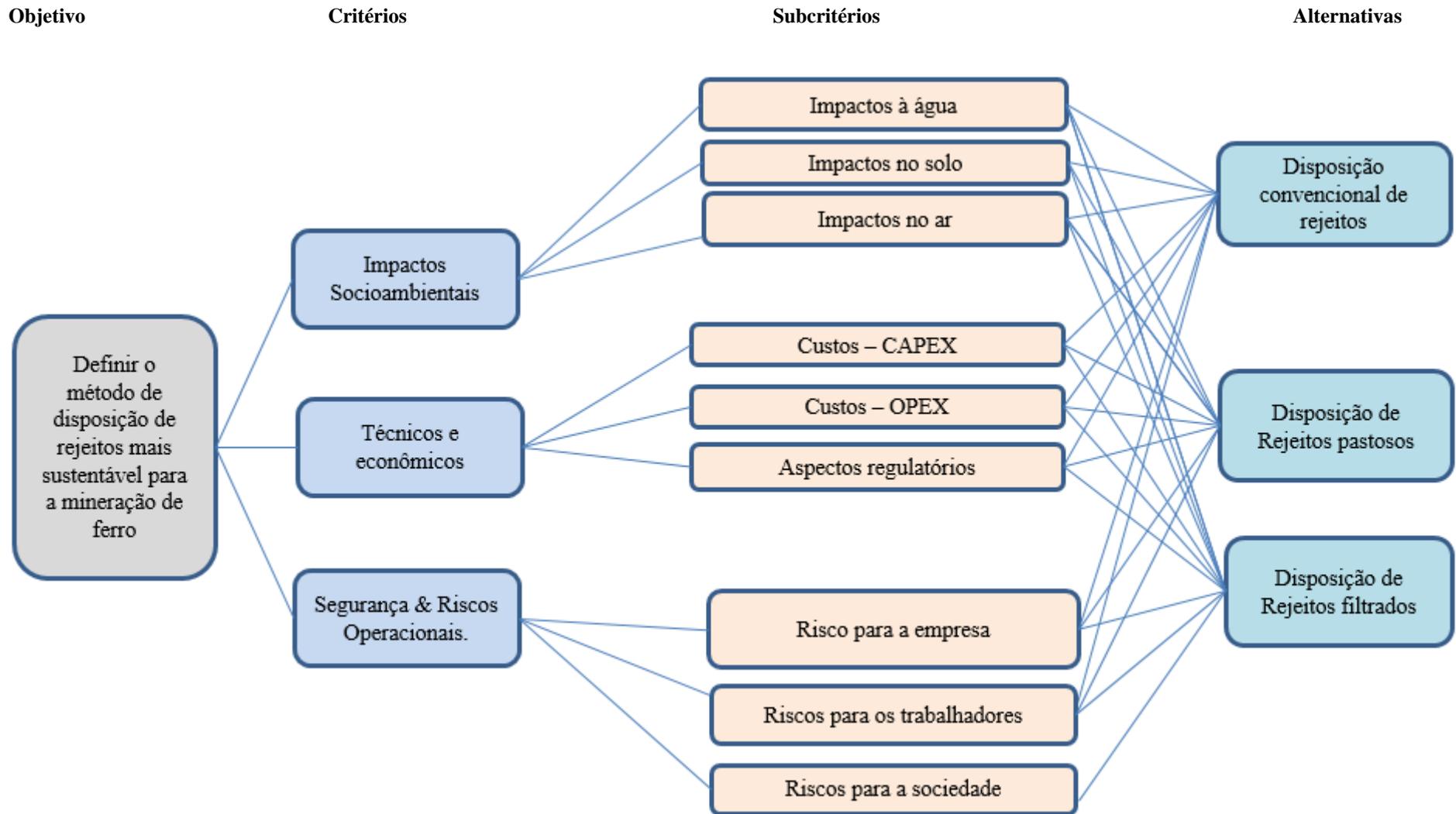


Figura 44: Árvore de estrutura hierárquica exibindo o objetivo, critérios adotados, subcritérios e alternativas
 Fonte: (A AUTORA, 2021)

4. RESULTADOS

O capítulo 4 apresentará o resultado da avaliação dos julgamentos dos especialistas utilizando o método AHP. Será apresentado a avaliação da população de respondentes, as respostas obtidas por meio do questionário, a elaboração das matrizes paritárias com realização dos cálculos de normalização e das prioridades individuais, assim como a razão de consistência dos julgamentos. Por fim, será apresentado a prioridade global que é o ranqueamento dos métodos de disposição de rejeitos.

4.1 QUESTIONÁRIO E RESULTADOS DA PESQUISA

O questionário foi enviado para 40 especialistas das áreas de Engenharia de Minas, Engenharia Ambiental, Engenharia civil e Geociências (Geofísicos e Geólogos) por meio do *Google forms* para os especialistas entre dezembro de 2020 e março de 2021. A seleção foi realizada com base nas formações de abrangência do estudo e suas experiências na área de mineração e AHP para avaliação dos métodos de disposição de rejeito.

Esse grupo de profissionais foi escolhido, pois representa uma equipe técnica multiprofissional que integram e estão entre os responsáveis pela elaboração dos projetos de implantação das instalações de disposição de rejeitos nas mineradoras. O Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA) de 2019, em sua proposta aprovada pelos Coordenadores e Representantes de Plenário da Coordenadoria de Câmaras Especializadas de Geologia e Minas (CCEGM) N° 5/2019, menciona que a responsabilidade técnica das barragens de rejeitos de mineração de média e grande porte deverá ser de responsabilidade de uma equipe de natureza multiprofissional tripartite composta pelos seguintes profissionais: Engenheiro de Minas, Engenheiro Civil e Geólogo ou Engenheiro Geólogo. Afirma ainda que um único profissional poderá não ter condições técnico-operacionais de acompanhar o desenvolvimento e a evolução das barragens ao longo da sua vida útil, o que poderá ser fatal para as pessoas e o meio ambiente, como o que ocorreu com a mina de ferro da cidade de Mariana e Brumadinho em Minas Gerais.

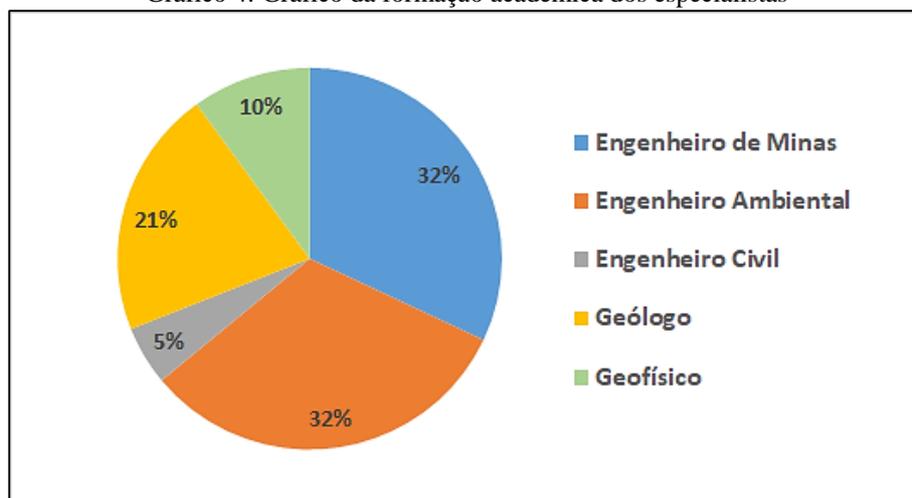
A justificativa para a escolha do Engenheiro de Minas é devido ao mesmo ser responsável pela lavra em médias e grandes minas e participar de modo direto ou indireto de todo o processo mineral. Já o geólogo ou engenheiro geólogo justifica-se devido as barragens de rejeito de mineração poderem sofrer ocorrências de fenômenos geotécnicos e/ou geológicos que podem ser danosos e comprometer à estabilidade destas barragens, fazendo-se necessário

a realização de trabalhos sistemáticos de mapeamentos geológicos e/ou geotécnicos, além de geofísicos. O engenheiro civil justifica-se pelo fato deste profissional ser aquele que se relaciona tecnicamente com a construção de qualquer tipo de barragem. Por fim, o Engenheiro Ambiental se faz importante para a análise dos impactos ambientais do processo mineral e da recuperação da área degradada.

Dos 40 questionários enviados foram obtidas 19 respostas dos especialistas sobre a pesquisa realizando avaliações par-a-par entre alternativas e à luz dos critérios e subcritérios estabelecidos.

O Gráfico 4 demonstra que das 19 respostas, 32% dos respondentes são engenheiros de minas, 32% engenheiros ambientais, 21% geólogos, 10% geofísicos e 5% engenheiro civil. Esse dado demonstra a boa distribuição de respostas entre os grupos de especialistas.

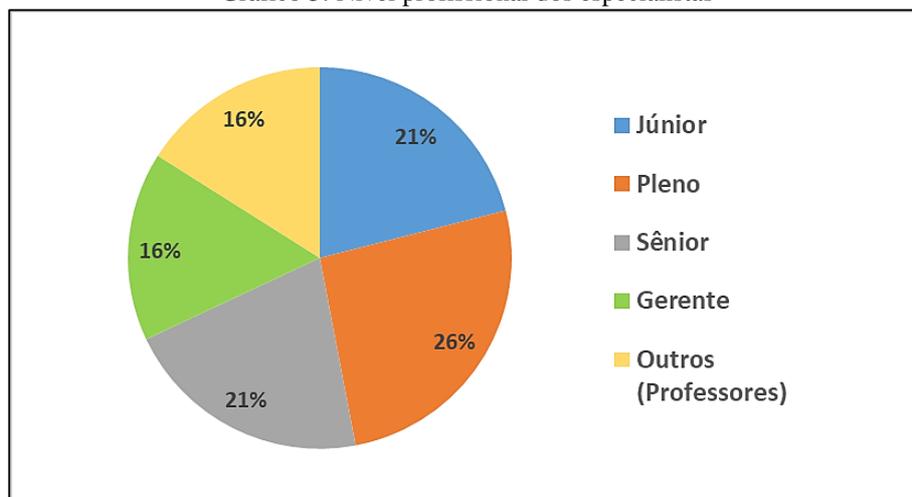
Gráfico 4: Gráfico da formação acadêmica dos especialistas



Fonte: (A AUTORA, 2021)

O nível de experiência dessas profissões variou entre profissões de nível júnior ao de gerente, conforme exibido no Gráfico 5. Os profissionais respondentes da pesquisa são profissionais que trabalham ou que já trabalharam como profissionais de empresa de mineração em suas respectivas áreas de abrangência do estudo ou de consultoria, além de Professores de universidades na área de mineração. Embora o estudo apresente 21% de profissionais respondentes de nível júnior, esses são profissionais que realizaram estágios em empresas de mineração e/ou que trabalharam em empresas júnior durante a sua graduação. A opção outros representa professores e pesquisadores universitários com especialização, mestrado e/ou doutorado e que não estão classificados/enquadrados em cargos e funções do meio empresarial/industrial.

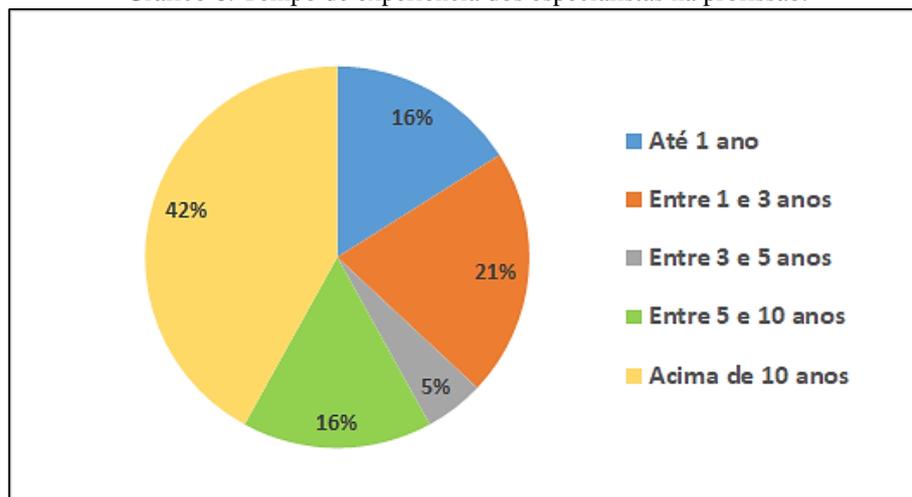
Gráfico 5: Nível profissional dos especialistas



Fonte: (A AUTORA, 2021)

Já o Gráfico 6 apresenta a distribuição do tempo de experiência dos especialistas na profissão e demonstra que a maioria dos respondentes (42%) possuem acima de 10 anos de profissão, sendo que no acumulado 58% dos especialistas possuem acima de 5 anos de experiência.

Gráfico 6: Tempo de experiência dos especialistas na profissão.



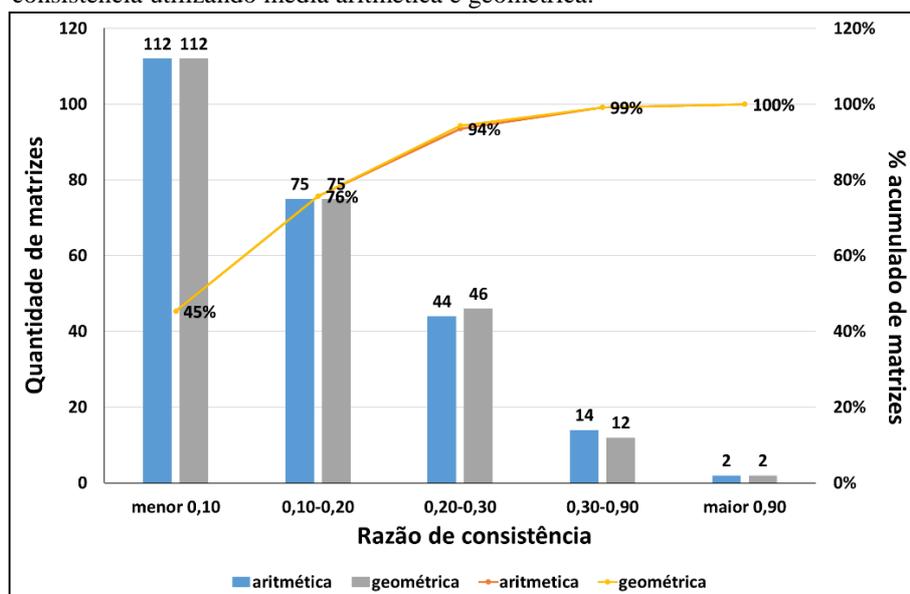
Fonte: (A AUTORA, 2021)

Utilizou-se a Escala Fundamental de Saaty (1991), na qual os valores foram introduzidos nas matrizes paritárias. O questionário foi enviado junto com um guia para auxílio dos especialistas na sua tomada de decisão. O guia foi elaborado com base em referências da literatura sobre as temáticas apresentadas no estudo. O guia elaborado é apresentado no apêndice C desse estudo e o questionário do apêndice D.

O estudo obteve 19 respondentes, sendo construídas 13 matrizes para cada respondente. A matriz comparativa dos critérios buscou comparar os critérios gerais para-a-par com base nas avaliações dos especialistas. Desse modo, obteve um total de 247 matrizes formadas, analisando-se as razões de consistências dessas matrizes por distribuição por faixas de valores (menor que 0,10, entre 0,10 e 0,20, entre 0,20 e 0,30, 0,30 e 0,90 e maior que 0,90) tanto por média aritmética como média geométrica.

A representação gráfica dessa distribuição dos dados brutos é exibida no Gráfico 7, onde observa-se que ao utilizar-se média aritmética, 45% das matrizes apresentaram razão de consistência até 0,10, igual à quantidade utilizando-se média geométrica. Considerando-se a razão de consistência de até 0,20, a quantidade de matrizes corresponde a 75% para a média aritmética, de forma também igual à média geométrica.

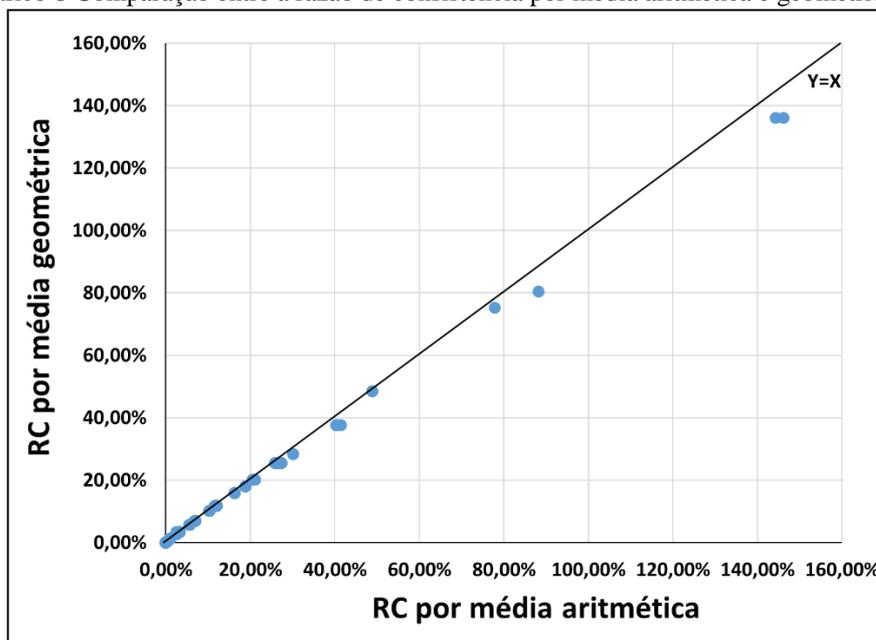
Gráfico 7: Representação gráfica da quantidade de matrizes por faixa de razão de consistência utilizando média aritmética e geométrica.



Fonte: (A AUTORA, 2021)

O Gráfico 8 apresenta uma comparação das razões de consistência dos dados brutos pelas médias aritmética e geométrica, onde observa-se que os valores da distribuição da média geométrica são menores que os da média aritmética.

Gráfico 8 Comparação entre a razão de consistência por média aritmética e geométrica.



Saaty (1990) recomenda que os valores de razão de consistência fiquem igual ou abaixo de 10%. De acordo com Saaty (1990) caso esses valores fiquem acima, os especialistas devem rever as suas respostas, pois os julgamentos podem estar inconsistentes dentro da matriz. Entretanto, observa-se que essa revisão das respostas pelos especialistas poderia comprometer o resultado da pesquisa e influenciar na resposta dos especialistas, pois as respostas poderiam ficar consistentes matematicamente, porém inconsistentes tecnicamente com o tema proposto ou percepção inicial do especialista.

Das 19 respostas obtidas foram analisadas três medidas estatísticas das respostas, a média, mediana (termo do meio), moda (mais frequente), das respostas excluindo as de quem apresentou valores individuais acima de 20% de razão de consistência em cada conjunto de critérios ou subcritérios. Foram considerados apenas valores abaixo de 20% de razão de consistência devido a alguns autores como Apotolou e Hassell (1993) e Goepel (2013) entenderem que poderiam ser utilizadas razões de consistência de até 20% para equipes multidisciplinaridade de profissionais dependendo do objetivo do trabalho. Além disso, o próprio artigo do Saaty (1990), apresenta algumas matrizes paritárias com razões de consistência maiores que 10%, o que demonstra o quão difícil é manter a consistência baixa mesmo para o próprio autor do método.

Utilizando esse modo de corte, podem ser aproveitadas as respostas de até 75% dos especialistas quando se avalia por média aritmética e média geométrica. Conforme mencionado na revisão bibliográfica, pesquisas envolvendo grupos multidisciplinares de especialistas

apresentam maiores dificuldades na obtenção de todas as respostas consistentes devido a heterogeneidade do grupo de especialistas. A avaliação completa com os dados brutos das respostas dos especialistas é apresentada no apêndice B desse estudo.

O Quadro 9 apresenta uma comparação da média, mediana e da moda dos julgamentos realizados pelos especialistas levando em consideração os critérios, subcritérios e alternativas. Desse modo, a razão de consistência ficou abaixo de 20% no cálculo de autovetor normalizado (A.V.N) para as três medidas de centralidade utilizadas tanto por meio da média aritmética quanto da média geométrica. Para a constituição das matrizes paritárias no estudo completo, a média aritmética foi escolhida devido à maioria dos artigos da literatura a utilizarem como medida de centralidade como por exemplo o Kumar *et al.*, (2009) e o próprio Saaty. Além da mesma apresentar razão de consistência abaixo de 10% em todas as matrizes paritárias do quadro supracitado. Além disso, o estudo não utilizou a moda pela possibilidade de a distribuição das respostas ter mais de uma moda (bimodal, trimodal, etc).

Quadro 9: Comparação entre os valores de média, mediana e moda dos dados abaixo de 20% de consistência individual.

Critérios	Perguntas	Média	Desvio Padrão	Mediana	Moda (Mais frequente)
Gerais	P1 (impactos socioambientais x técnicos e econômicos)	2,82	2,81	1,00	1,00
	P2 (Impactos socioambientais x segurança e riscos operacionais)	1,30	1,30	1,00	1,00
	P3 (Aspectos técnicos e econômicos x segurança e riscos operacionais)	0,61	0,37	0,33	1,00
	Razão de Consistência (M.A)	0,75%		11,96%	0,00%
	Razão de Consistência (M.G)	0,75%		11,91%	0,00%
Socioambientais	P4 (impacto na água x solo)	3,00	1,41	3,00	3,00
	P5 (impacto na água x ar)	4,50	1,85	5,00	5,00
	P6 (impacto no solo x ar)	3,21	1,97	3,00	3,00
	Razão de Consistência (M.A)	5,62%		3,34%	3,34%
	Razão de Consistência (M.G)	5,57%		3,32%	3,32%

Técnicos e Econômicos	P7 (CAPEX x OPEX)	1,10	0,86	1,00	1,00
	P8 (CAPEX x Regulatórios)	0,99	0,92	1,00	0,33
	P9 (OPEX x Regulatórios)	0,85	0,70	1,00	0,33
	Razão de Consistência (M.A)	0,03%		0,00%	0,00%
	Razão de Consistência (M.G)	0,03%		0,00%	0,00%
Segurança e riscos operacionais	P10 (Risco empresa x trabalhador)	0,38	0,36	0,20	0,11
	P11 (Risco empresa x sociedade)	0,36	0,32	0,27	0,11
	P12 (Risco trabalhadores x sociedade)	0,99	0,59	1,00	1,00
	Razão de Consistência (M.A)	0,02%		0,86%	0,00%
	Razão de Consistência (M.G)	0,02%		0,86%	0,00%
Critérios Socioambientais Água - Alternativas	P13 (Convencional x pastoso)	4,49	2,19	5,00	3,00
	P14 (Convencional x filtrado)	6,69	1,90	7,00	9,00
	P15 (Pastoso x filtrado)	3,55	1,57	3,00	5,00
	Razão de Consistência (M.A)	7,39%		5,67%	2,52%
	Razão de Consistência (M.G)	7,27%		5,59%	2,51%
Critérios Socioambientais Solo - Alternativas	P16 (Convencional x pastoso)	3,52	1,84	3,00	3,00
	P17 (Convencional x filtrado)	5,22	2,81	6,00	7,00
	P18 (Pastoso x filtrado)	2,47	1,49	3,00	3,00
	Razão de Consistência (M.A)	2,51%		1,58%	0,61%
	Razão de Consistência (M.G)	2,50%		1,58%	0,61%

Critérios Socioambientais Ar - Alternativas	P19 (Convencional x pastoso)	0,76	0,68	0,67	1,00
	P20 (Convencional x filtrado)	1,08	1,78	0,27	0,14
	P21 (Pastoso x filtrado)	0,98	1,24	0,33	0,33
	Razão de Consistência (M.A)	1,32%		0,38%	7,21%
	Razão de Consistência (M.G)	1,32%		0,38%	7,09%
Critérios Técnicos e Econômicos CAPEX - Alternativas	P22 (Convencional x pastoso)	0,72	1,29	0,27	0,20
	P23 (Convencional x filtrado)	0,66	1,31	0,20	0,20
	P24 (Pastoso x filtrado)	1,02	1,36	0,33	0,33
	Razão de Consistência (M.A)	0,11%		6,36%	12,10%
	Razão de Consistência (M.G)	0,11%		6,30%	11,91%
Critérios Técnicos e Econômicos OPEX - Alternativas	P25 (Convencional x pastoso)	0,70	1,22	0,27	0,20
	P26 (Convencional x filtrado)	0,53	1,24	0,20	0,20
	P27 (Pastoso x filtrado)	0,53	0,71	0,33	0,33
	Razão de Consistência (M.A)	1,22%		6,36%	12,10%
	Razão de Consistência (M.G)	1,22%		6,30%	11,91%
Critérios Técnicos e Econômicos Regulatórios- Alternativas	P28 (Convencional x pastoso)	3,09	1,92	3,00	5,00
	P29 (Convencional x filtrado)	4,17	2,86	5,00	5,00
	P30 (Pastoso x filtrado)	2,33	1,69	1,00	1,00
	Razão de Consistência (M.A)	2,88%		2,52%	0,00%
	Razão de Consistência (M.G)	2,86%		2,51%	0,00%
Critérios Segurança e riscos operacionais Risco à empresa- Alternativas	P31 (Convencional x pastoso)	5,08	1,85	5,00	5,00
	P32 (Convencional x filtrado)	6,68	2,09	7,00	7,00
	P33 (Pastoso x filtrado)	3,36	1,58	3,00	3,00
	Razão de Consistência (M.A)	8,67%		5,67%	5,67%
	Razão de Consistência (M.G)	8,50%		5,59%	5,59%

Critérios Segurança e riscos operacionais	P34 (Convencional x pastoso)	3,93	2,17	3,00	3,00	
	P35 (Convencional x filtrado)	5,09	2,75	5,00	5,00	
	Risco ao trabalhador	P36 (Pastoso x filtrado)	2,10	1,79	1,00	3,00
	Alternativas	Razão de Consistência (M.A)	2,25%		2,52%	3,34%
		Razão de Consistência (M.G)	2,24%		2,51%	3,32%
Critérios Segurança e riscos operacionais	P37 (Convencional x pastoso)	5,00	1,93	5,00	5,00	
	P38 (Convencional x filtrado)	6,47	2,00	7,00	7,00	
	Risco à sociedade-	P39 (Pastoso x filtrado)	2,59	1,62	3,00	3,00
	Alternativas	Razão de Consistência (M.A)	4,69%		5,67%	5,67%
		Razão de Consistência (M.G)	4,63%		5,59%	5,59%

Fonte: (A AUTORA, 2021)

4.2 MATRIZES COMPARATIVAS CRITÉRIOS GERAIS, NORMALIZAÇÃO E CÁLCULO DAS PRIORIZAÇÕES

Desse modo, utilizou-se a média aritmética dos dados coletados de 19 respostas de especialistas com avaliações par a par do critério geral para avaliação dos Impactos Socioambientais (ISAMB); Técnicos e Econômicos (TECON); Segurança e Riscos Operacionais (SEGOP). Além disso, serão utilizadas as demais siglas para avaliação da consistência, conforme referencial teórico, Índice randômico (IR), Índice de consistência (IC), Autovalor máximo = λ_{max} , Razão de consistência (RC).

Inicia-se o processo de avaliação realizando a matriz recíproca para cada critério, subcritério e análise das alternativas. Nessa matriz recíproca são colocados os valores de média aritmética retirados da planilha com as respostas dos especialistas.

Após essa etapa é realizada a normalização da matriz utilizando a média aritmética como parte do cálculo para encontrar o autovetor normalizado. O cálculo de priorizações por meio do autovetor normalizado é realizado após as avaliações e atribuições dos pesos para as matrizes normalizadas. Realizou-se de modo comparativo a avaliação do método AHP utilizando a média geométrica de forma a avaliar se existia diferenças nos resultados de média aritmética e geométrica, conforme mostrado nos quadros apresentados no estudo.

O

Quadro 10 exibe a primeira matriz elaborada para a avaliação dos critérios gerais utilizados nos estudos do método AHP. De acordo com a matriz, observa-se que o critério de impactos socioambientais apresenta maior peso na avaliação dos julgadores tanto na média aritmética como geométrica e apresenta razão de consistência abaixo de 10%.

Quadro 10: Matriz geral de comparação dos critérios gerais

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz (Média geométrica)	
	ISAMB	TECON	SEGOP	ISAMB	TECON	SEGOP	Autovetor normalizado	Auto- vetor	Autovetor normalizado
ISAMB	1,00	2,82	1,30	0,47	0,52	0,45	47,80%	1,54	47,85%
TECON	0,35	1,00	0,61	0,17	0,18	0,21	18,66%	0,60	18,63%
SEGOP	0,77	1,64	1,00	0,36	0,30	0,34	33,54%	1,08	33,53%
Soma Σ_j	2,12	5,46	2,91	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,22	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,01$; IC = 0,44%; IR=0,58; RC = 0,75% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,01$; IC = 0,44%; IR=0,58; RC = 0,75% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

4.3 MATRIZES COMPARATIVAS CRITÉRIOS X SUBCRITÉRIOS, NORMALIZAÇÃO E CÁLCULO DAS PRIORIZAÇÕES

Após ser realizada a avaliação da matriz geral comparativa dos critérios, devem ser avaliadas todas as matrizes relativas a cada grupo de subcritérios. O Quadro 11 exibe as comparações pelos especialistas dos critérios de impactos socioambientais com os seus respectivos subcritérios. Observa-se na matriz que o subcritério de impacto a água apresenta maior peso na avaliação dos julgadores tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%.

Quadro 11: Matriz de critérios de Impactos Socioambientais x subcritérios

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz normalizada (Média geométrica)	
	Impacto à água	Impacto no solo	Impacto no ar	Impacto à água	Impacto no solo	Impacto no ar	Auto-vetor normalizado	Auto-vetor	Autovetor normalizado
Impacto à água	1,00	3,00	4,50	0,64	0,70	0,52	61,84%	2,38	62,42%
Impacto no solo	0,33	1,00	3,21	0,21	0,23	0,37	27,16%	1,02	26,81%
Impacto no ar	0,22	0,31	1,00	0,14	0,07	0,11	11,00%	0,41	10,76%
Soma Σj	1,56	4,31	8,71	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,81	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\text{máx}} = 3,07$; IC = 3,26%; IR=0,58; RC = 5,62% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\text{máx}} = 3,07$; IC = 3,23%; IR=0,58; RC = 5,57% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Já o Quadro 12 apresenta a mesma avaliação, porém para o critério técnico e econômico com relação aos seus respectivos subcritérios. Nesse quadro serão utilizadas as seguintes siglas: CAPEX e OPEX. Observa-se na matriz que o subcritério de aspectos regulatórios apresenta maior peso na avaliação dos julgadores tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%.

Quadro 12: Matriz de Critérios de técnicos e econômicos x subcritérios

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz normalizada (Média geométrica)	
	CAPEX	OPEX	Aspectos Regulatórios	CAPEX	OPEX	Aspectos Regulatórios	Autovetor normalizado	Auto-vetor	Autovetor normalizado
CAPEX	1,00	1,10	0,99	0,34	0,34	0,35	34,23%	1,03	34,23%
OPEX	0,91	1,00	0,85	0,31	0,31	0,30	30,53%	0,92	30,53%
Aspectos Regulatórios	1,01	1,18	1,00	0,35	0,36	0,35	35,24%	1,06	35,24%
Soma Σj	2,92	3,28	2,84	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,01	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\text{máx}} = 3,00$; IC = 0,02%; IR=0,58; RC = 0,03% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\text{máx}} = 3,00$; IC = 0,02%; IR=0,58; RC = 0,03% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Já o

Quadro 13 apresenta a avaliação dos critérios de segurança e riscos operacionais sob a ótica das alternativas disposições de rejeitos de minério de ferro. Nesse quadro serão utilizadas as seguintes siglas: Risco para a empresa (REMP); Riscos para o trabalhador – (RTRAB); Risco para a sociedade (RSOCIE). Observa-se na matriz que o subcritério de risco para a sociedade apresenta maior peso na avaliação dos julgadores tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%. Entretanto, nota-se uma aproximação com o subcritério de riscos para os trabalhadores.

Quadro 13: Matriz de Critérios de segurança e riscos operacionais x subcritérios

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz normalizada (Média geométrica)	
	REMP	RTRAB	RSOCIE	REMP	RTRAB	RSOCIE	Autovetor normalizado	Auto- vetor	Autovetor normalizado
REMP	1,00	0,38	0,36	0,16	0,16	0,15	15,61%	0,52	15,61%
RTRAB	2,63	1,00	0,99	0,41	0,42	0,42	41,68%	1,38	41,68%
RSOCIE	2,78	1,01	1,00	0,43	0,42	0,43	42,72%	1,41	42,72%
Soma Σ_j	6,41	2,39	2,35	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,30	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{máx} = 3,00$; IC = 0,01%; IR=0,58; RC = 0,02% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{máx} = 3,00$; IC = 0,01%; IR=0,58; RC = 0,02% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

4.4 MATRIZES COMPARATIVAS SUBCRITÉRIOS X ALTERNATIVAS, NORMALIZAÇÃO E CÁLCULO DAS PRIORIZAÇÕES

Após essa etapa são realizadas avaliações dos subcritérios elencados sobre as alternativas para o problema proposto. O Quadro 14 apresenta a matriz de avaliação para o subcritério de impactos na água analisado sob os tipos de disposição de rejeito existentes. Busca-se avaliar os critérios de impactos socioambientais sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos e objetivando identificar qual método propiciará menores impactos.

Observa-se na matriz que o subcritério de impacto a água apresenta-se como mais impactante e apresenta maior peso na avaliação dos julgadores na alternativa de disposição convencional de rejeitos, tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se

que a razão de consistência está abaixo de 10%.

Quadro 14: Matriz Avaliação de impactos na água sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz normalizada (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto vetor normalizado	Auto vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	4,49	6,69	0,73	0,78	0,60	70,06%	3,11	70,95%
Disposição de rejeitos pastosos	0,22	1,00	3,55	0,16	0,17	0,32	21,71%	0,92	21,11%
Disposição de rejeitos filtrados	0,15	0,28	1,00	0,11	0,05	0,09	8,22%	0,35	7,94%
Soma \sum_j	1,37	5,77	11,24	1,00	1,00	1,00	100,00%	4,38	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,09$; IC = 4,29%; IR=0,58; RC = 7,39% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,08$; IC = 4,22%; IR=0,58; RC = 7,27% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

O Quadro 15 apresenta a matriz de avaliação de impactos no solo sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos existentes. Observa-se na matriz que o subcritério de impacto ao solo apresenta-se como mais impactante e apresenta maior peso na avaliação dos julgadores na alternativa de disposição convencional de rejeitos, tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%.

Quadro 15: Matriz Avaliação de impactos no solo sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto vetor normalizado	Auto vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	3,52	5,22	0,68	0,71	0,60	66,44%	2,64	66,74%
Disposição de rejeitos pastosos	0,28	1,00	2,47	0,19	0,20	0,28	22,66%	0,89	22,47%
Disposição de rejeitos filtrados	0,19	0,40	1,00	0,13	0,08	0,12	10,90%	0,43	10,79%
Soma \sum_j	1,48	4,92	8,69	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,95	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,03$; IC = 1,46%; IR=0,58; RC = 2,51% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,03$; IC = 1,45%; IR=0,58; RC = 2,50% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Já Quadro 16 apresenta a matriz de avaliação de impactos no ar sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos existentes. Observa-se na matriz que o subcritério de impacto no ar apresenta-se como mais impactante e apresenta maior peso na avaliação dos julgadores na alternativa de disposição de rejeitos pastosos, tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%. Infere-se que esse maior peso do rejeito pastoso como mais impactante para o ar pode ser devido ao maior conhecimento dos especialistas pelos métodos de rejeitos pastosos do que do rejeito filtrado, pois o pastoso já vem sendo muito utilizado na mineração de ouro. Enquanto que o rejeito filtrado é ainda um tema recente na mineração de ferro.

Quadro 16: Matriz Avaliação de impactos no ar sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz normalizada (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto vetor normalizado	Auto vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	0,76	1,08	0,31	0,27	0,35	31,16%	0,94	31,15%
Disposição de rejeitos pastosos	1,32	1,00	0,98	0,41	0,36	0,32	36,19%	1,09	36,21%
Disposição de rejeitos filtrados	0,93	1,02	1,00	0,29	0,37	0,33	32,65%	0,98	32,64%
Soma \sum_j	3,24	2,78	3,06	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,01	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,012$; IC = 0,006%; IR=0,58; RC = 1,08% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,012$; IC = 0,006%; IR=0,58; RC = 1,08% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Os quadros 17, 18 e 19 apresentam uma avaliação dos critérios Técnicos e econômicos sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos. Desse modo, o Quadro 17 apresenta a matriz de avaliação do CAPEX sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos. Observa-se na matriz que o subcritério CAPEX apresenta-se como mais impactante e apresenta maior peso na avaliação dos julgadores na alternativa de disposição de rejeitos filtrados, tanto na média aritmética como geométrica devido ao alto custo de implantação do projeto de rejeitos filtrados. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%.

Quadro 17: Matriz Avaliação do CAPEX sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz normalizada (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto vetor normalizado	Auto vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	0,72	0,66	0,26	0,27	0,25	25,63%	0,78	25,63%
Disposição de rejeitos pastosos	1,39	1,00	1,02	0,36	0,37	0,38	36,89%	1,12	36,89%
Disposição de rejeitos filtrados	1,52	0,98	1,00	0,39	0,36	0,37	37,48%	1,14	37,48%
Soma \sum_j	3,90	2,70	2,68	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,04	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,00$; IC = 0,06%; IR=0,58; RC = 0,11% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,00$; IC = 0,06%; IR=0,58; RC = 0,11% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

O Quadro 18 apresenta a matriz de avaliação do OPEX sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos. Observa-se na matriz que o subcritério OPEX apresenta-se como mais impactante e apresenta maior peso na avaliação dos julgadores na alternativa de disposição de rejeitos filtrados, tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%.

Quadro 18: Matriz Avaliação do OPEX sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz normalizada (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto vetor normalizado	Auto vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	0,70	0,53	0,23	0,20	0,26	22,81%	0,72	22,76%
Disposição de rejeitos pastosos	1,43	1,00	0,53	0,33	0,28	0,26	28,90%	0,91	28,87%
Disposição de rejeitos filtrados	1,89	1,89	1,00	0,44	0,53	0,49	48,29%	1,53	48,37%
Soma \sum_j	4,32	3,59	2,06	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,16	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,01$; IC = 0,71%; IR=0,58; RC = 1,22% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,01$; IC = 0,71%; IR=0,58; RC = 1,22% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Já o Quadro 19 apresenta a matriz a avaliação dos aspectos regulatórios sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos. Observa-se na matriz que o subcritério de aspectos regulatórios se apresenta como mais impactante e apresenta maior peso na avaliação dos julgadores na alternativa de disposição convencional de rejeitos, tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%.

Quadro 19: Matriz Avaliação dos aspectos regulatórios sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz normalizada (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto vetor normalizado	Auto vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	3,09	4,17	0,64	0,68	0,56	62,65%	2,34	62,97%
Disposição de rejeitos pastosos	0,32	1,00	2,33	0,21	0,22	0,31	24,63%	0,91	24,45%
Disposição de rejeitos filtrados	0,24	0,43	1,00	0,15	0,09	0,13	12,72%	0,47	12,59%
Soma \sum_j	1,56	4,52	7,50	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,72	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,03$; IC = 1,67%; IR=0,58; RC = 2,88% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,03$; IC = 1,66%; IR=0,58; RC = 2,86% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Os quadros 20, 21 e 22 apresentam uma avaliação dos critérios de segurança e riscos operacionais sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos. Desse modo, o Quadro 20 apresenta a matriz de avaliação dos riscos para a empresa sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos. Observa-se na matriz que o subcritério de riscos para as empresas apresenta-se como mais impactante e com maior peso na avaliação dos julgadores na alternativa de disposição de rejeitos convencionais, tanto na média aritmética como geométrica. Além disso, verifica-se que a razão de consistência está abaixo de 10%.

Quadro 20: Matriz Avaliação de riscos para as empresas a ótica dos métodos de disposição de rejeitos..

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto vetor normalizado	Auto vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	5,08	6,68	0,74	0,80	0,61	71,47%	3,24	72,54%
Disposição de rejeitos pastosos	0,20	1,00	3,36	0,15	0,16	0,30	20,24%	0,87	19,52%
Disposição de rejeitos filtrados	0,15	0,30	1,00	0,11	0,05	0,09	8,28%	0,35	7,94%
Soma \sum_j	1,35	6,38	11,04	1,00	1,00	1,00	100,00%	4,46	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,10$; IC = 5,03%; IR=0,58; RC = 8,67% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,10$; IC = 4,93%; IR=0,58; RC = 8,50% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

O Quadro 21 apresenta a matriz de avaliação dos riscos para os trabalhadores sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos, onde observa-se que na avaliação dos julgadores a alternativa mais impactante e com maior peso é a disposição de rejeitos convencionais, tanto na média aritmética como geométrica e com uma razão de consistência abaixo de 10%.

Quadro 21: Matriz Avaliação de riscos para os trabalhadores a ótica dos métodos de disposição de rejeitos.

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto vetor normalizado	Auto vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	3,93	5,09	0,69	0,73	0,62	67,92%	2,71	68,21%
Disposição de rejeitos pastosos	0,25	1,00	2,10	0,18	0,18	0,26	20,56%	0,81	20,39%
Disposição de rejeitos filtrados	0,20	0,48	1,00	0,14	0,09	0,12	11,52%	0,45	11,41%
Soma \sum_j	1,45	5,41	8,19	1,00	1,00	1,00	100,00%	3,98	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\max} = 3,03$; IC = 1,31%; IR=0,58; RC = 2,25% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\max} = 3,03$; IC = 1,30%; IR=0,58; RC = 2,24% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

O Quadro 22 apresenta a matriz de avaliação dos riscos para a sociedade sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos, onde observa-se que na avaliação dos julgadores a alternativa mais impactante com maior peso é a disposição de rejeitos convencionais, tanto na média aritmética como geométrica e com uma razão de consistência abaixo de 10%.

Quadro 22: Matriz Avaliação de riscos para a sociedade sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos..

Matriz recíproca				Matriz normalizada (Média aritmética)				Matriz (Média geométrica)	
	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Disposição convencional de rejeitos	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeitos filtrados	Auto-vetor normalizado	Auto-vetor	Autovetor normalizado
Disposição convencional de rejeitos	1,00	5,00	6,47	0,74	0,78	0,64	72,14%	3,19	72,74%
Disposição de rejeitos pastosos	0,20	1,00	2,59	0,15	0,16	0,26	18,72%	0,80	18,33%
Disposição de rejeitos filtrados	0,15	0,39	1,00	0,11	0,06	0,10	9,13%	0,39	8,92%
Soma \sum_j	1,35	6,39	10,06	1,00	1,00	1,00	100,00%	4,38	100,00%
Média aritmética				$\lambda_{\text{máx}} = 3,05$; IC = 2,72%; IR=0,58; RC = 4,69% ou seja <10%					
Média geométrica				$\lambda_{\text{máx}} = 3,05$; IC = 2,69%; IR=0,58; RC = 4,63% ou seja <10%					

Fonte: (A AUTORA, 2021)

4.5 CÁLCULO DA PRIORIDADE GLOBAL DAS ALTERNATIVAS/RANQUEAMENTO DAS ALTERNATIVAS

Para a elaboração da matriz de decisão foi elaborado uma matriz onde se importou o peso do autovetor normalizado oriundo de cada matriz normalizada para cada critério, subcritério e alternativas adotadas.

Desse modo, foi importado os pesos do autovetor normalizado da matriz dos critérios gerais para a matriz de decisão, ou seja, impacto socioambiental, técnico e econômico e de segurança e riscos operacionais.

Após essa etapa foi obtido da matriz normalizada os pesos do autovetor normalizado realizados na comparação par a par dos subcritérios em relação aos critérios gerais. Por fim, realizou-se um quadro resumo com informações que foram apresentadas anteriormente oriundas do quadro de origem dos dados de média aritmética. Realizou-se também a multiplicação normalizada entre os pesos dos critérios gerais com os pesos dos subcritérios, conforme exibido no Quadro 23. Após a construção dessa primeira etapa de estruturação dos dados, tem-se o percentual da árvore de critérios que é a multiplicação normalizada. Em seguida, foi construída

uma nova planilha para o agrupamento dos dados de comparação par a par dos subcritérios com relação as alternativas importando os seus respectivos autovetor normalizado, conforme exibido no Quadro 24.

Quadro 23: Matriz de decisão do AHP - Critérios e subcritérios

		AHP - Média Aritmética		
	CRITÉRIOS GERAIS Autovetor normalizado	MÉDIA (Autovetor normalizado SUBCRITÉRIOS)		MULTIPLICAÇÃO Normalização % árvore de critérios
Impacto Socioambiental	47,80%	Impactos à água	61,84%	29,56%
		Impacto no solo	27,16%	12,98%
		Impactos no ar	11,00%	5,26%
Técnico Econômico	18,66%	Custo de aquisição (CAPEX)	34,23%	6,39%
		Custo Operacional (OPEX)	30,53%	5,70%
		Aspectos Regulatórios	35,24%	6,58%
Segurança & Risco Operacional	33,54%	Risco de acidentes para empresa	15,61%	5,23%
		Risco para o trabalhador	41,68%	13,98%
		Risco para a sociedade	42,72%	14,33%
TOTAL (SOMA)	100,00%	TOTAL (SOMA)	300,00%	100,00%

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Quadro 24: Matriz de decisão – Subcritérios x Alternativas

AHP - Média Aritmética									
Subcritérios/ Alternativas	Impactos à água	Impacto no solo	Impactos no ar	Custo de aquisição (CAPEX)	Custo Operacional (OPEX)	Aspectos Regulatórios	Risco de acidentes para empresa	Risco para o trabalhador	Risco para a sociedade
Disposição convencional de rejeitos	70,06%	66,44%	31,16%	25,63%	22,81%	62,65%	71,47%	67,92%	72,14%
Disposição de rejeitos pastosos	21,71%	22,66%	36,19%	36,89%	28,90%	24,63%	20,24%	20,56%	18,72%
Disposição de rejeitos filtrados	8,22%	10,90%	32,65%	37,48%	48,29%	12,72%	8,28%	11,52%	9,13%
SOMA	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
% Árvore de Critérios	29,56%	12,98%	5,26%	6,39%	5,70%	6,58%	5,23%	13,98%	14,33%

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Por fim, o ranqueamento das alternativas foi realizado com a multiplicação entre matrizes (somar produtos) obtida por cada linha da comparação par a par dos subcritérios com relação as alternativas. Desse modo, tem-se o ranqueamento dos métodos de disposição de rejeitos mais impactantes com base na média aritmética. O Quadro 25 apresenta esse ranqueamento final.

Quadro 25: Ranqueamento das alternativas usando média aritmética

Ranqueamento das alternativas	Disposição convencional de rejeitos	61,60%
	Disposição de rejeitos pastosos	23,50%
	Disposição de rejeitos filtrados	14,90%
		100,00%

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Com base no produto da matriz entre as prioridades relativas das alternativas e o grau de importância atribuído a cada critério, é calculado a prioridade global das alternativas. O Quadro 26 apresenta a matriz de decisão realizada com base nos julgamentos dos engenheiros ambientais, engenheiros de minas, geocientistas e de um engenheiro civil. Desse modo, apresenta-se a classificação composta dos métodos em forma de quadro, onde pode ser visto a alternativa de disposição convencional que se apresenta como mais impactante em todos os tipos de centralidade, como por exemplo a média que apresenta uma classificação de 61,61%, seguido pelos métodos de disposição de rejeitos pastosos com 23,50%. Portanto, observa-se que o método menos impactante é a disposição de rejeitos filtrados com 14,89% utilizando a média aritmética. Observa-se que existe uma flutuabilidade até 7% entre os valores quando se utiliza mediana ou moda, porém nenhum deles alterou o ranqueamento final das alternativas.

Quadro 26: Matriz de decisão para os valores de corte abaixo de 20% individualmente

Matriz de decisão						
	Dados abaixo de 20% de consistência					
	Média geral MA	Média geral MG	Mediana geral - MA	Mediana geral - MG	Moda geral - MA	Moda geral - MG
Disposição convencional de rejeitos	61,61%	62,17%	58,48%	58,65%	58,58%	58,79%
Disposição de rejeitos pastosos	23,50%	23,14%	21,00%	21,10%	22,79%	22,53%
Disposição de rejeitos filtrados	14,89%	14,69%	20,52%	20,25%	18,62%	18,68%

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Conforme exibido no Quadro 27, foi elaborado uma avaliação individualizada entre os respondentes da pesquisa. Foi realizado a média aritmética dos julgamentos com razão de consistência inferiores a 20%, realizando um ranqueamento das alternativas apresentadas no estudo com especialistas avaliados em grupos de Engenheiros de Minas, Engenheiros ambientais e geocientistas. Essa avaliação não considerou os julgamentos individualizados para o ranqueamento apenas do Engenheiro civil devido ao estudo possuir apenas uma resposta dessa categoria profissional e a mesma não apresentar razão de consistência integralmente abaixo de 20% para realização do ranqueamento.

Dentre os grupos avaliados, todos mantiveram individualmente o ranqueamento dos métodos de disposição de rejeito, considerando o método de disposição de rejeitos filtrados como o menos impactante. Realizou-se a avaliação observando as diferentes categorias profissionais envolvidas na análise abordada. Além disso, realizou-se uma avaliação da autora do estudo de modo a observar se a razão de consistência inteiramente abaixo de 10%, conforme proposto por Saaty, poderia apresentar resultados diferentes. Desse modo, verificou-se que o ranqueamento se mantém igual aos dos demais profissionais, quando realizada de forma individual pela autora do estudo apresentando.

Quadro 27: Matriz de decisão para os valores de corte abaixo de 20% por profissões

	Eng de Minas		Eng de Amb		Geocientistas		<10% Autora	
	Média geral MA	Média geral MG						
Disposição convencional de rejeitos	62,69%	63,24%	59,98%	60,51%	57,19%	57,75%	62,41%	62,79%
Disposição de rejeitos pastosos	23,84%	23,50%	23,40%	23,07%	23,05%	22,66%	21,16%	20,90%
Disposição de rejeitos filtrados	13,47%	13,26%	16,63%	16,42%	19,76%	19,60%	16,43%	16,31%

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Conforme exibido no Quadro 28, observa-se que tanto utilizando a média aritmética, quanto a mediana ou a moda dos dados brutos o ranqueamento do método de disposição de rejeitos não foi alterado, o que demonstra a confiabilidade do dado, embora individualmente algumas matrizes paritárias apresentassem razão de consistência superior a 20% a média aritmética ficou abaixo desse valor em todos os critérios e subcritérios adotados quando realizada a análise no dado bruto sem a exclusão. Analisando os dados, observa-se que os percentuais de diferença ficam próximos e com variação de até 3%.

Quadro 28: Matriz de decisão para os dados brutos utilizando a média aritmética

	Dados brutos sem exclusão					
	Média geral MA	Média geral MG	Mediana geral – MA	Mediana geral – MG	Moda geral – MA	Moda geral – MG
Disposição convencional de rejeitos	62,72%	63,53%	63,65%	64,08%	61,75%	62,49%
Disposição de rejeitos pastosos	22,62%	22,12%	20,18%	19,85%	20,34%	19,79%
Disposição de rejeitos filtrados	14,66%	14,35%	16,16%	16,07%	17,92%	17,73%

Fonte: (A AUTORA, 2021)

Já os dados de ranqueamento por categoria profissional utilizando os dados brutos são mostrados no Quadro 29, e mostrou que o ranqueamento permanece o mesmo da análise do Quadro 27. Entretanto, observa-se que existe uma diferença nos valores percentuais do ranqueamento, o que demonstra que os engenheiros ambientais e geocientistas, embora achem o método de disposição de rejeitos filtrados menos impactante, eles divergem no percentual dos outros profissionais. O que pode ser devido à existência de impactos ambientais e da existência de riscos de acidentes também pelo empilhamento de rejeito à seco no método de disposição de rejeito filtrado.

Quadro 29: Dados de ranqueamento sem exclusão – Dados brutos do julgamento dos especialistas.

	Dados brutos sem exclusão							
	Eng de Minas		Eng de Amb		Geocientistas		<10% Autora	
	Média geral MA	Média geral MG	Média geral MA	Média geral MG	Média geral MA	Média geral MG	Média geral MA	Média geral MG
Disposição convencional de rejeitos	64,48%	65,64%	58,45%	59,31%	60,15%	60,88%	62,41%	62,79%
Disposição de rejeitos pastosos	23,74%	22,98%	22,59%	22,13%	20,93%	20,40%	21,16%	20,90%
Disposição de rejeitos filtrados	11,78%	11,38%	18,97%	18,56%	18,92%	18,72%	16,43%	16,31%

Fonte: (A AUTORA, 2021)

5. CONCLUSÃO

O estudo objetivou avaliar por meio do método de *Analytic Hierarchy Process* (AHP), utilizando-se de levantamento de julgamento de profissionais do setor, para verificação de qual é o método de disposição de rejeito mais sustentável para aplicação na mineração de ferro no Brasil.

Desse modo, consideram-se três cenários de métodos de disposição de rejeitos para a avaliação, sendo eles: (1) Disposição convencional de rejeitos em forma de polpa/disposição hidráulica (Barragem a montante, a jusante ou de linha de centro); (2) Disposição de rejeitos em forma de pasta (Rejeitos pastosos) e (3) Disposição de rejeitos filtrados (empilhamento a seco).

Os critérios para comparação par a par foram elaborados com base na revisão bibliográfica sobre o tema, sendo abordados critérios de impactos sócio-ambientais, técnicos e econômicos e de segurança e riscos operacionais. Não foram abordados com mais detalhes critérios geológicos devido à abrangência do estudo e devido às características geológicas mudarem dependendo da região que se encontra localização o corpo mineralizado.

As opiniões dos especialistas foram obtidas por meio do questionário do *Google Forms* e foram importantes para quantificação e obtenção de visões subjetivas utilizando-se do método AHP. Os dados foram tratados em uma planilha de Excel®, onde foram removidos os julgamentos que apresentaram individualmente o conjunto de critérios ou subcritérios com razão de consistência acima de 20%. Desse modo, foi exibido no estudo a análise e ranqueamento utilizando a média aritmética. Estudou-se os dados para avaliação da mediana e também da moda. Entretanto, a média aritmética foi escolhida devido a maioria dos artigos da literatura a utilizarem como medida de centralidade, incluindo o próprio Saaty. Além disso, avaliou-se se o ranqueamento alterava com base no julgamento de profissionais de áreas de especialidades diferentes, mas que fazem parte do projeto multidisciplinar.

Com base nesse estudo conclui-se que independentemente do método e da medida de centralidade dos julgamentos como média, mediana ou moda e se é média aritmética ou geométrica todas os métodos indicaram a mesma ordem de ranqueamento das alternativas. Desse modo, a alternativa de disposição convencional foi considerada como a mais impactante e o de disposição por meio do empilhamento a seco (rejeito filtrado) a menos impactante com base nos critérios e subcritérios apresentados e foi considerada como a mais sustentável para mineração de ferro no Brasil.

Nota-se que mesmo apresentando julgamentos individuais inconsistentes em determinados critérios pelos especialistas, a média aritmética apresentou resultados abaixo dos 10% de razão de consistência, conforme proposto por Saaty. Além disso, observou-se que a razão de consistência da média aritmética é sempre menor ou igual a da média geométrica.

Outro aspecto observado é que mesmo com formações diversas, ou seja, multidisciplinar existiu um ranqueamento similar com flutuações dentro da margem de sensibilidade do próprio método. É importante, observar que a avaliação multidisciplinar em pesquisas utilizando o método AHP é extremamente importante, pois em um projeto empresarial devem ser ouvidas e consideradas opiniões de diversos profissionais, de modo a entender a magnitude da análise. Isso demonstra que os critérios utilizados, as perguntas formuladas por meio da comparação par a par e o guia de auxílio enviado para os especialistas que se dispuseram a responder a pesquisa, mostraram-se eficazes para o estudo.

Foi observado também que os métodos de disposição de empilhamento a seco utilizando os rejeitos filtrados são promissores para a redução e até eliminação de barragens tanto no Brasil quanto no mundo. Embora apresentem maiores custos, a sua utilização se torna mais segura para os trabalhadores e a população que vive próxima as mineradoras, o que pode tornar o método mais atrativo no contexto geral por diminuir a probabilidade de ocorrência de acidentes de grande magnitude.

Conclui-se que os processos de mineração precisam ser mais bem gerenciados para mitigar os riscos para os trabalhadores, comunidade local e o para o meio ambiente. Assim, a mineração poderá ser tornar mais sustentável e com menores riscos de acidentes com barragens de rejeitos. Além disso, é de suma importância que a tomada de decisão sobre qualquer projeto envolva uma equipe multidisciplinar para a tomada de decisão de modo a garantir a segurança, produtividade e a competitividade da empresa.

As limitações do estudo e do método AHP foram a quantidade de amostras de profissionais que poderia ser maior, objetivando uma análise ainda mais multidisciplinar com maior abrangência e representatividade. Observou-se ainda dificuldades para obtenção das respostas consistentes individualmente entre si, ou seja, com razão de consistência abaixo de 10%, conforme propõe o autor do método AHP (Saaty). Esse fato pode ter ocorrido devido ao tamanho do questionário que é inerente ao método AHP, e sem que os julgamentos fossem revisitados pelos especialistas. A alteração das respostas pelos especialistas não foi realizada, pois esse processo de revisão poderia alterar a percepção inicial que os mesmos possuem, além de ser mais cansativo para os especialistas devido ao tamanho do questionário e sua aplicação não ser presencial.

Além disso, observou-se como limitação a necessidade de elaboração do AHP com um número de critérios de no máximo 7 para que a avaliação apresente uma inconsistência baixa, ou seja até 10%. O atual estudo apresentou 12 critérios e subcritérios, o que pode ter aumentado a inconsistência individual das respostas dos especialistas, pois quanto mais critério mais cansativo se torna responder a pesquisa.

Desse modo, recomenda-se para trabalhos futuros realizar um estudo de caso utilizando o AHP em uma mina específica e com a inclusão dos critérios geológicos, que são muito importantes para a escolha exata do método de disposição de rejeitos. Além disso, recomenda-se a utilização de softwares que possibilitem a diminuição da razão de consistência e a ampliação da quantidade de respostas pelos especialistas. Poderia ser incluído representantes da sociedade civil como moradores de cidades em que os projetos de instalações de armazenamento de rejeitos fossem implantados e criação de um conjunto de critérios ligados a gestão empresarial. Além disso, poderia ser realizado um estudo de sensibilidade, pois o método AHP apresenta grande sensibilidade até mesmo devido a questões de arredondamento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13029: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Rio de Janeiro, p. 7. 2017.

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

ALIZADEH, S.; SALARI RAD, M. M.; BAZZAZI, A. A. Alunite processing method selection using the AHP and TOPSIS approaches under fuzzy environment. *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 26, n. 6, p. 1017–1023, 2016.

ALVES, H. O. **Estudo comparativo de duas técnicas de lavra em barragem de rejeito sob o ponto de vista geotécnico**. 2015, 153 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

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

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUA E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de segurança de barragens**. 2020. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019/rsb19-v0.pdf>. Acesso em 14 de fev. 2022.

AGENCIA NACIONAL DE MINERALÇÃO - ANM. **Classificação de Barragens de Mineração**. 2019. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-classificacao-de-barragens-de-mineracao/plano-de-seguranca-de-barragens>. Acesso em 14 de fev. 2022.

AGENCIA NACIONAL DE MINERALÇÃO - ANM. **Relatório Quantitativo**. 2022. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>. Acesso em 14 de maio. 2022.

APOSTOLOU, B; HASSELL, J. M. An empirical examination of the sensitivity of the analytic hierarchy process to departures from recommended consistency ratios. *Mathl. Comput. Modelling* Vol. 17, No. 415, pp. 163-170, 1993.

ARAUJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006.

ARUEIRA, A. DE B. Aplicação do Método AHP para Avaliação de Transportadores. **Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro**, p. 71, 2014.

ARULDOSS, M. A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems*, v. 1, n. 1, p. 31–43, 2013.

ARMADA, C. A. S. Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho em face ao estado socioambiental brasileiro. **Territorium**, n. 28, p.13-22. Jan. 2021. https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-1_1.

ASSIS, A; ESPÓSITO, T. **Construção de barragens de rejeitos sob uma visão geotécnica**. In: **Anais do simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos - REGEO**, Ouro Preto, 1995.

AUSTRALIA GOVERNAMENT. **Tailings management**. p. 88, 2007.

AUSTRALIAN CENTRE FOR GEOMECHANICS. Tailings-based mine backfill and geotechnical considerations. **Centre, Australian Geomechanics, FOR**, n.35 December, p. 7–15, 2010.

ÁVILA, J. **Acidentes em barragens de rejeitos no Brasil**. 2016. Disponível em: http://www.energia.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/07/ACIDENTES_EMBARRAGENS-Joaquim-Pimenta-Pimenta-de-%C3%81vila-Engenharia.pdf. Acesso em: 17-05-2019.

ÁVILA, J.P. **Acidentes em barragens de rejeitos no Brasil**. 2015. <http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/871.pdf>, 2015. Acesso em: 20 fevereiro 2021.

AZNAR-SÁNCHEZ, J. A; ELASCO-MUÑOZ, J. F; BELMONTE-UREÑA L. J; MANZANO-AGUGLIARO F. Innovation and technology for sustainable mining activity: a worldwide research assessment, **Journal of Cleaner Production**, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.243

BALASUBRAMANIAN, A. **Size reduction by crushing methods**. University of Mysore, Mysore, 2017, p.10. Disponível em: https://magadhuniversity.ac.in/download/econtent/pdf/size%20reduction%20by%20crushing%20methods_Pharm%20Eng%20I.pdf. Acesso em jul. 2021.

BARRETO, B. D. F. S. S. M. **Avaliação das alternativas de descomissionamento de estruturas offshore com aplicação de AHP baseado em aspectos de sustentabilidade**. UFRJ, 2019, 113 f. Monografia (Graduação em Engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019

BARZILAI, J., COOK, W.D., GOLANY, B. **Consistent weights for judgements matrices of the relative importance of alternatives**. Operations Research Letters, Volume 6, Issue 3, 1987, Pages 131-134, ISSN 0167-6377, [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(87\)90026-5](https://doi.org/10.1016/0167-6377(87)90026-5).

BOCCAMINO, G. D. **Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeitos desaguados de minério de ferro. Estudo de caso para os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minérios itabiríticos (itm-i) em operação na mina do Pico**. 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas / Coord. Geral**. Brasília: ANM, 2019. 34 p. Disponível em:

http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf. Acessado dia 17-05-2019.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 4, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2019. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. **Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração**. 2019.

BRASIL. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. In: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Minas Gerais, 2015. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf. Acesso em: 07 de dez. 2015.

BRASIL. Decreto-Lei Nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, Dá nova redação ao Decreto-lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940. (Código de Minas), 1967. **Casa Civil**, Brasília, DF. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/Del0227compilado.htm >. Acesso em 09 jul.2021.

BRASIL. DECRETO Nº 9.406, DE 12 DE JUNHO DE 2018, Regulamenta o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, a Lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, a Lei nº 7.805, de 18 de julho de 1989, e a Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. **Diário oficial** [da União], Brasília, DF, 13 jun. 2018. n. 112, p.1. Disponível em: < https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/25406081/do1-2018-06-13-decreto-n-9-406-de-12-de-junho-de-2018-25405926 >. Acesso em 03 jul.2021.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Resolução ANM Nº 85, de 2 de dezembro de 2021. **Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-85-de-2-de-dezembro-de-2021-365053336>. Acesso em 20 maio de 2022.

BRASIL, C. I do. **Indenizações por tragédia em Mariana atingiram R\$ 8,71 bilhões em 2021**. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-01/indenizacoes-por-tragedia-em-mariana-atingiram-r-871-bilhoes-em-2021>. Acesso em 22 maio de 2022.

CALLISTER, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

ANA. Agencia Nacional de águas. **Curso: Inspeção e Segurança em Barragens de Usos Múltiplos**. 2019. Disponível em: https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2552/2/Enap19_1Un1R.pdf. Acessado em 30 de Set. 2021.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos editora S.A. 1988. Disponível em: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/05/mecanica-solos-fundamentos-vol1-6ed-caputo.pdf>. Acesso em 15 maio de 2022.

CARVALHO, P. S. L; MESQUITA, P.P.D; REGIS, R.D.D; MEIRELLIS, T.L.

Sustentabilidade socioambiental da mineração. *Mineração. BNDES Setorial*. V. 47, p. 333-390. 2018.

CASTELO BRANCO, D. A. et al. A multicriteria approach for measuring the carbon-risk of oil companies. *Energy Strategy Reviews*, v. 1, n. 2, p. 122–129, 2012.

CHAVES, A.P. e Colaboradores. **Desaguamento, espessamento e filtragem. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**, v. 2, 4a Ed. revisada e aprimorada, Oficina de Textos, São paulo-SP, 240p., 2013.

CHAVES, A.P; LEAL FILHO, L. S; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B; FRANÇA, S. C. A; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**. 6ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018, p. 405-459. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2018/capitulo10.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2021.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA – CONFEA. **Proposta CCEGM N° 5/2019**. 2019. Disponível em: <https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/Proposta%20005%202019%20CCEGM%20-%20Responsabilidade%20t%C3%A9cnica%20sobre%20barragens%20de%20minera%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em 21 maio 2022.

CORREIA, J. C. G.C; COUTO, H. J. B. Classificação e Peneiramento. In: LUZ, A. B; FRANÇA, S. C. A; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**. 6ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018, p. 225-272. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2018/capitulo5.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2021.

CSN. **Mineração**. 2021. Disponível em: <<https://www.csn.com.br/mineracao/>>. Acesso em: 06 jul. 2021.

CSN. **Minério de ferro**. 2020. Disponível em: <https://www.csn.com.br/homepage/minerio-de-ferro/>. Acesso em: 06 jul. 2021.

DAVIES, M. *Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. Proceedings Tailings and Mine Waste 2011*, Vancouver-BC, Canada, 2011.

DEHKHARGHANI, A. A.; BRANCH, T. C. *Suggested method for tailing dam site selection with analytical hierarchy processing (AHP): case study in coal washery tailing dam of anjirtange plant , savadkoooh , iran*. Afshin Akbari Islamic Azad University , IRAN Morteza Osanloo , H . Hamidian. n. September, p. 95, 2018. Acessado dia 22-08-20.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Índice de Geologia e Mineração**. 4º Distrito do DNPM - Pernambuco. 2020. Disponível em: <http://www.dnpm-pe.gov.br/Geologia/Mineracao.php>. Acessado dia 22-08-20.

DIAS, N. A. **Determinação de Propriedades Reológicas de Rejeito de Mineração por meio de Reômetro Rotacional**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico. Vitória, 2017.

DUARTE, A.P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco.** 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.). Departamento de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2008.

DUARTE, H. A; Ferro - um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. **Quim. Nova**, Vol. 42, No. 10, 1146-1153, 2019. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/quimicanova.s bq.org.br/pdf/AR20190244.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2021.

DUTRA, R; Beneficiamento de Minerais Industriais. In: 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais; 14 a 18 de agosto de 2008.

ENRÍQUEZ, M.A.R. & DRUMMOND, J.A. **Mineração e Desenvolvimento Sustentável: dimensões, critérios e propostas de instrumentos.** In: FERNANDES, F. R. C. *et al.* (Org.). Tendências Tecnológicas Brasil 2015 - Geociências e Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM, 2007, v. 01, p. 245-272. Cap. 2.

EXPERT CHOICE. ***The Analytic Hierarchy Process: Structured Decisions.*** 2021. Disponível em: <https://www.expertchoice.com/2021>. Acesso em 23 de set. 2021.

ESTADO DE MINAS. **Prefeitura de Congonhas lança plano para garantir segurança de barragens.** 2020. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2020/02/14/interna_gerais,1122021/congonhas-prefeitura-lanca-plano-para-garantir-seguranca-de-barragens.shtml. Acesso em 14 de fev. 2022.

FARIAS, Rideci; PARANHOS, Haroldo. **Geotecnia Ambiental: Barragens de rejeito.** 1º semestre, 2013. 10 p. Notas de Aula. UnB. Brasília, DF.

FAVRETTO, J. ., & NOTTAR, L. A. (2016). Utilização da metodologia Analytic Hierarchy Process (AHP) na definição de um software acadêmico para uma Instituição de Ensino Superior do Oeste Catarinense. *Sistemas & Gestão*, 11(2), 183–91. <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2016.v11n2.881>

FERLA, R. **Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens.** 2018. 223 f. Dissertação (Mestrado em Recursos hídricos e Saneamento) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

FIGUEIREDO, Marcelo marques. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração casa de pedra – Congonhas/MG.** 2007. 100 f Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. 2007.

FRANÇA, S. C. A.; TRAMPUS, B. C. **Missão Institucional Tecnologia Ambiental: Série Desaguamento de Rejeitos Minerais para Aplicação de Métodos de Disposição Alternativos às Barragens de Rejeito Convencionais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC. 59p. 2018.

FRANÇA, S.; MASSARANI, G. **Separação Sólido-Líquido**. In: LUZ, A. B; FRANÇA, S. C. A; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**. 6ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018, p. 597-647. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2018/capitulo1.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2021.

FIGUEIRA, H.V.O; LUZ, A. B; SALVADOR, L. M. A. Britagem e Moagem. LUZ, A. B; SAMPAIO, J.A; FRANÇA, S. C. A. In: **CETEM Tratamento de Minérios**. 5.ed. c.4. Rio de Janeiro: 2010. p. 143- 211.

FOGLIATTO, F. S; ALBIN, S. L. An AHP-based procedure for sensory data collection and analysis in quality and reliability applications. *Food Quality and Preference*, v. 14. n. 5-6, 2003. p. 375–385. doi:10.1016/s0950-3293(03)00006-5

FRANCO, M. M; MONEGA, A.D.R; DE LIMA, D; CORSO, L.L.Aplicação do método ahp na tomada de decisão do processo de terceirização de componentes usinados em uma empresa multinacional. **XXXVII Encontro nacional de engenharia de producao**, Joinville, SC, 17.p. 2017. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_243_408_33486.pdf. Acessado dia 20-06-20.

FREITAS, A. H. A.; MAGRINI, A. Multi-criteria decision-making to support sustainable water management in a mining complex in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 47, p. 118–128, 2013.

FREITAS, C.M; SILVA, M,A. **Acidentes de trabalho que se tornam desastres: os casos dos rompimentos em barragens de mineração no Brasil**. Rev Bras Med Trab. 2019;17(1) p. 21-29. Disponível em: <https://cdn.publisher.gn1.link/rbmt.org.br/pdf/v17n1a04.pdf>. Acessado dia 26-08-20.

GOEPEL, K.D. Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making In Corporate Enterprises—A New AHP Excel Template with Multiple Inputs. *Proceedings of International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*, Kuala Lumpur, jun. 2013, 1-10.

G1. 2019. **O que se sabe até agora sobre o rompimento da barragem em Brumadinho**. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minasgerais/noticia/2019/01/25/veja-o-que-se-sabe-ateagora-sobre-o-rompimento-da-barragem-da-valem-brumadinho.ghtml>.

GOMES, L. F.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA A. T. Tomada de decisão gerencial: **enfoque multicritério**, São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, R.C. Notas de Aula. **Disposição de Rejeitos de Mineração - Caracterização Tecnológica de Rejeitos**. 2006.

GOMES, L. F. A. M. **Teoria da Decisão - Coleção Debates em Administração**. São Paulo: ed. Thomson Learning, 2007.

GUEDES, I. **Triple bottom line**: entenda o que é e como funciona o Tripé da Sustentabilidade. 2021. Disponível em: <https://meiosustentavel.com.br/triple-bottom-line/>. Acesso em 14 maio de 2022.

GUIMARÃES, N.C.; VALADÃO, G.E.S.; PERES, A.E.C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. **Revista da Escola de Minas**. V. 65. n. 4. p.453-458. Dezembro, 2012.

GUPTA, P. et al. *An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry*. **Resources Policy**, n. 01, p. 0–1, 2018.

ICM. International Council on Mining and Metals. **Benchmarking 2018 safety data: progress of ICMM members**. 2018. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/research/health-safety/benchmarking-2018-safety-data#2>. Acessado em: 22 maio de 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Água e Mineração: fatos e verdades**. 2015. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/agua-e-mineracao-fatos-e-verdades/>. Acesso em 04 de dez. de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed, Brasília: IBRAM, 2016. 128 p. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acessado dia 22 jul.21.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Anuário mineral brasileiro principais substâncias metálicas**. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2018. 34 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral brasileira 2020 – Ano base 2019**. Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2020. 80p.

JAMSHIDI, M; ATAIEI, M; SERESHKI, FARHANG, S; JALALI, S.E. *The Application of AHP Approach to Selection of Optimum Underground Mining Method, Case Study: JAJARM Bauxite Mine (IRAN)*. Arch. Min. Sci., Vol. 54, No 1, 2009. p. 103–117.

JÓNATAS, R. J. L. Rotura de barragens de aterro por galgamento: Ensaios experimentais com aterros homogêneos. 2013. 96p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Lisboa. 2013.

KREJČÍ, J., & STOKLASA, J. Aggregation in the analytic hierarchy process: Why weighted geometric mean should be used instead of weighted arithmetic mean. **Expert Systems with Applications**, 114, 97–106. 2018. doi:10.1016/j.eswa.2018.06.060

KOSSOFF, D., DUBBIN, W. E., ALFREDSSON, M., EDWARDS, S. J., MACKLIN, M. G., & HUDSON-EDWARDS, K. A. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, 2014. p. 229-245.

KUMAR, S; PARASHAR, N; HALEEM, A. *Analytical Hierarchy Process Applied to Vendor Selection Problem: Small Scale, Medium Scale and Large Scale Industries*. **Business Intelligence Journal**. v. 2, n. 2. p.355 a 362. 2009. Disponível em:https://www.researchgate.net/publication/26844795_Analytical_Hierarchy_Process_Applied_to_Vendor_Selection_Problem_Small_Scale_Medium_Scale_and_Large_Scale_Industries Acessado dia 03 de maio de 2021.

LANDIM, F. M. P. F. Notas de Aula de Estatística Aplicada II. Departamento de Métodos Estatísticos. Instituto de Matemática da UFRJ. Agosto de 2013. Disponível em <http://www.im.ufrj.br/flavia/mad342/mad342a1.pdf>. Acessado em 19 de março de 2022.

LARA, A, F, M. **Espessamento e transporte de pasta mineral**. 2011. 76 f. Curso de especialização em engenharia de recursos minerais – CEERMIN. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

LEMOS, A. M. D. Á. **Efeito da adição de reagentes agregantes sobre características de pastas de minério de ferro**. 13ª Semana de ciência & tecnologia 2017. Centro federal de educação tecnológica de minas gerais unidade CEFET Araxá, 2017. Disponível em: <https://www.conferencias.cefetmg.br/index.php/13CET/13CET/paper/view/3810>. Acesso em 07 jul. 2021.

LIU, Q., LIU, D., LIU, X., GAO, F., & LI, S. Research and application of surface paste disposal for clay-sized tailings in tropical rainy climate. *International Journal of Mineral Processing*, 157, 227–235. 2016. doi:10.1016/j.minpro.2016.11.014

LIMA, T.J.B; MARTINS, C. B; VIANNA, D.S; VIANNA,M.F.D; COSTA, S,O. **Utilização do método de análise hierárquica (AHP) para Definição dos pesos de restrições fracas na resolução de problemas de programação de horários para uma Instituição federal de ensino superior**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). p.11. 2015. Disponível em: <<http://cdsid.org.br/sbpo2015/wp-content/uploads/2015/08/142973.pdf>> Acessado dia 10-05.2021.

LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. 2006. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

LUPO, J; MUSSÉ, M. *Converting slurry tailings facilities to filtered dry stacks – a case history*. 2014. Disponível em: http://www.paste2014.com/wpcontent/uploads/2014/06/JohnLupo_MarceloMusse_Paste2014_Presentation.pdf. Acesso em 08 jun. 2021.

LUZ, A. B; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ, A. B; FRANÇA, S. C. A; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**. 6ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018, p. 1-23. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2018/capitulo1.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2021.

LUZ, A. B. e LINS, F. F. (editores). Introdução ao Tratamento de Minérios. 5ª Edição, CETEM, 2010

LYU, Z; CHAI, J; XU, Z; QIN, Y; CAO J. *A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History*. V Hindawi. *Advances in Civil Engineering*. v. 2019, p. 18. Disponível em <http://downloads.hindawi.com/journals/ace/2019/4159306.pdf>. Acessado dia 26-08-20.

MAHDEVARI, S.; SHAHRIAR, K.; ESFAHANIPOUR, A. *Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS*. *Science of the Total Environment*, v. 488–489, n. 1, p. 85–99, 2014.

MENESCAL, R. **Gestão da segurança de barragens no Brasil**: proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. 2009. 769 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MENEZES, A. C. C. **Análise do comportamento de rejeitos de mineração de ferro submetidos ao ensaio HCT**. 2017. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

MILLER, G. A; *The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information*. v. 63, n.2, p. 81-97, 1956.
<https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/h0043158>

MINEROPAR - Importância dos Recursos Minerais, disponível em Mineropar. 2013. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/>. Acesso em 10 de Junho de 2021.

MOHSEN, J; MOHAMMAD, A; FARHANG, S; ESMAEIL, J.S.M. *The application of ahp approach to selection of optimum underground mining method, case study: jajarm bauxite mine (iran)*. *Arch. Min. Sci.*, v. 54, n. 1, 2009. p. 103–117.

MORAES, E. A.; SANTALIESTRA, R. **Modelo de decisão com múltiplos critérios para escolha de software de código aberto e software de código fechado**. In: XXXI Encontro da ANPAD. Rio de Janeiro, setembro de 2007. Disponível em <http://www.anpad.org.br/admin/pdf/ADI-D3299.pdf>. Acesso em 19 de fev. 2022.

NARAGHI, S.; MASOUMI, I.; RASHIDINEJAD, F. Optimization of tailings disposal method using fuzzy analytic hierarchy process. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 19, n. 5, p. 1563–1571, 2019.

NEVES, S. M; DA SILVA, C. E. S; DA SILVA, A. F; D Oliveira, C. R; SOTOMONTE, B. E. P. (2011). Analytic Hierarchy Process applied to the selection of knowledge management approach in technology-based companies. *Product Management & Development*, 9(1), 13–22. doi:10.4322/pmd.2011.002

OMACHI, Geraldo Yasujiro. **Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**, MG. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. (ONU). Assembleia Geral das Nações Unidas. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. United Nations General Assembly. 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em jan de 2022.

OLMEDO, C.G., MUÑOZ, J.A.B., GÓMEZ, A.R., GALINDO, D.G.L. Review of equipment for mine waste: from the conventional thickener to the deep cone for paste production. *DYNA Ingeniería e Industria (Bilbao)*, v. 90 (4), p. 359-365, 2015.

OSORIO, C. A. H. **Caracterização de pastas minerais**. 2005. 117 f. Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

OWEN, J. R., Kemp, D., Lèbre, É., Svobodova, K., & Pérez Murillo, G. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, p.39, 2019. doi:10.1016/j.ijdrr.2019.101361 .

PARREIRAS, M. **Substituto das barragens de rejeitos, empilhamento a seco tem seus riscos.** 2022. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2022/02/08/interna_gerais,1343238/substituto-das-barragens-de-rejeitos-empilhamento-a-seco-tem-seus-riscos.shtml. Acesso em 22 maio de 2022.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta De Nova Metodologia De Desaguamento De Rejeitos Em Polpa.** p. 93, 2012.

PEREIRA, J. C. **Médias: aritmética, geométrica e harmônica.** 2014. 38 f. Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Matemática Estatística e Computação Científica, Campinas, SP.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado Geotécnia e Transportes). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013

PURVIS, B; MAO, Y; ROBINSON, D. *Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins.* *Sustainability Science*. 2018. doi:10.1007/s11625-018-0627-5

REINERT. J. **Notas de aula. Mecânica dos solos e fundações.** Centro Federal de Educação tecnológica de Minas Gerais – Unidade de Curvelo. 2017. Disponível em: https://www.curvelo.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/13/2018/01/Apostila-Teoria-Mec-Solos-Tecnico_Rev-1.pdf. Acesso em 16 de fev. 2022.

RICO, A. M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, A. Floods from Tailings Dam Failures. *Journal of Hazardous Materials*, v. 154, n 2, p. 79-87, 2008.

R7. **Três anos após tragédia, região de Mariana ainda tem desemprego alto.** 2019. Disponível em: <https://noticias.r7.com/economia/tres-anos-apos-tragedia-regiao-de-mariana-ainda-tem-desemprego-alto-19022019>. Acesso em 30 de Set. 2021.

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.

SAATY. T. L. **Método de Análise Hierárquica.** São Paulo: ed. McGrawHill, Makron, 1991. 367 p.

_____. *How to make a decision: the Analythic Hierarquy Process.* *Interfaces*, v. 24, n. 6, p. 19-43, 1994.

_____. Decision Making – the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, v. 13, n. 1, p.1-34, 2004.

_____. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise

em 16 de fev. 2022.

SILVA, W. P. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001)**. Ouro Preto, 120 p. Dissertação de Mestrado - UFOP, 2010.

SITORUS, F.; CILLIERS, J. J.; BRITO-PARADA, P. R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends. *Expert Systems with Applications*, v. 121, p. 393–417, 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS - SNISB. Agência nacional de águas e saneamento básico. **Perguntas Frequentes**. 2022. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/perguntas-frequentes#:~:text=J%C3%A1%20o%20Dano%20Potencial%20Associado,impactos%20sociais%2C%20econ%C3%B4micos%20e%20ambientais>. Acesso em 14 maio de 2022.

SPICELOGIC. *Analytic Hierarchy Process Software 3.1*. 2021. Disponível em: <https://www.spicelogic.com/Products/ahp-software-30>. Acesso em 23 de set. 2021.

SLOTTEE, S., JOHNSON, J., CROZIER, M. Paste thickening iron ore tailings. In: Proceedings of the XXXV Ironmaking and Raw Materials Seminar, VI *Brazilian Symposium on Iron Ore*, Florianópolis-Santa Catarina, 2005.

SOARES, Lindolfo. **Barragem de rejeito**. In: Luz, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 831-896.

SOU NÓTICIA. **Itabirito: mineradora Vale inaugura fábrica que vai produzir blocos na Mina do Pico**. 2020. Disponível em: <https://sounoticia.com.br/noticia/77593/geral/itabirito-mineradora-vale-inaugura-fabrica-que-vai-produzir-blocos-na-mina-do-pico-20112020>. Acesso em 27 de set. 2021.

STRACHAN, C. GOODWIN, S. *The role of water management in tailings dam incidentes*. **Proceedings Tailings and Mine Waste**. 2015. Vancouver, BC, October 26 to 28, 2015.

STATISTICS. Buchholz, k. **The Countries That Are the Biggest Miners in the World**. 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/chart/19839/biggest-miners-among-countries/>. Acessado em 28-08-20.

TAILING GRIDA. **Dashboard - Tailing storage facility**. 2022. Disponível em: <https://tailing.grida.no/map/data/>. Acesso em 14 maio 2022.

TESSAROTTO, C., **Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (dry stacking)**. In: Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas-MG, v. 3, p. 430-437, 2015.

TIAN W Q; XUE J G. **Tailings pond safety technology and management [M]**. Beijing: Coal Industry Press; 2006.

UFRGS. **GOETHITA – FeO(OH)**. 2020. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/minmicro/Goethita.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2021.

Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO). *Sustainable Development*. 2015. Disponível em: <https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development/what-is-esd/sd>. Acesso em dez. 2021.

VALE a. **Listagem de pessoas sem contato até o momento**. Última atualização em 17/05/19 às 12:00. 2019. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/listagem-pessoas-sem-contato.aspx.

VALE b. **Óbitos identificados**. Última atualização em 06/08/21 às 10:20. 2021. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/obitos-identificados.aspx.

VALE. **Dia Mundial da Água**. 2015. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/dia-mundial-agua-2015.aspx>. Acesso em: 04 jul. 2021.

VALE. **Processamento a seco de minério de ferro**. 2018. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/paginas/processamento-a-seco.aspx. Acesso em: 04 jul. 2021.

VALE. **Vale inaugura fábrica que transforma rejeitos da mineração em produtos para a construção civil**. 2020. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-inaugura-fabrica-que-transforma-rejeitos-da-mineracao-em-produtos-para-a-construcao-civil.aspx>. Acesso em 06 de jul. 2021.

VIEGAS, R. **Utilizando a programação multicritério (AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio**. PMI Global Congress 2010 – North América. Washington - DC. EUA, p. 23. 2010.

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

VORMITTAG, E, M, P, A, A; OLIVEIRA, M, A; GLERIANO, J, S. Avaliação de saúde da população de barra longa afetada pelo desastre de mariana, Brasil. *Ambient. soc.*, São Paulo , v. 21, e01222, 2018 .<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc0122r2vu1811ao>.

YOUSEFZADEH, S. et al. Comparative analysis of hydrometallurgical methods for the recovery of Cu from circuit boards: Optimization using response surface and selection of the best technique by two-step fuzzy AHP-TOPSIS method. *Journal of Cleaner Production*, 2019, p. 119401.

WILLINGHOEFER. M. **Avaliação do risco de rompimento da barragem de uma pequena central hidrelétrica na bacia do rio do peixe**. 2015, 86 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

WILLIAMS, D. A.; JONES, H. Tailings storage facilities. *Developments in Mineral Processing*, v. 15, n. C, p. 729–751, 2005.

WILLIAMS, R., ZINK, D., O'BREIN, S. Filtered tailings adds value in cost competitive industries. *Proceedings of the Paste*, 2017, p.363-370.

WILLS, B. A., & FINCH, J. A. *Dewatering. Wills' Mineral Processing Technology*, p. 417–438. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780080970530/wills-mineral-processing-technology>. Acesso em 06 de jul. 2021.

ZORZAN, L. G. STRESSER, C; DIAS, D; BOSZCZOWSKI, R. B; PASSINI, L.B. **Propriedades e índices físicos de solos.** Apostila da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2020/01/APOSTILA-PROPRIEDADES-E-%C3%8DNDICES-F%C3%8DSICOS-DE-SOLOS.pdf>. Acesso em 16 de fev. 2022.

APÊNDICE A – LISTA DOS PRINCIPAIS ACIDENTES OCORRIDOS NA MINERAÇÃO DE FERRO BRASILEIRA

Qnt	Barragem / Açude	Localização	UF	Uso Preponderante	Anomalia Observada	Causa Provável	Danos Causados (humanos, financeiros, material, etc.)	Fase da Vida	Data	Fonte
1	Mineração de Fernadinho	Itabirito	MG	Mineração	ruptura	instabilidade do maciço	Deslizamento de parte do maciço (200m) da barragem de 40m de altura. Provocou o escoamento de 350mil m ³ de rejeitos de beneficiamento de minério de ferro, provocando a ruptura de mais 3 barragens para decantação de finos e abastecimento de água, localizadas a jusante. Destruição de tubulações e rede elétrica e outras estruturas da própria mineradora. Provocou sérios danos ambientais ao longo do córrego da Fazenda Velha, com a destruição e assoreamento da mata ciliar ao longo de 10km, atingindo também as cabeceiras do Córrego do s Andaimés e do Rio das Velhas. Provocou ainda a morte de 7 operários que trabalhavam na área da barragem.	operação	maio/1986	FEAM (2008)
2	Mineração do Pico São Luis		MG	Mineração			Danos Ambientais		1986	A confirmar
3	Rio das pedras	Rio acima	MG	Mineração			82 km de destruição do rio das velhas e comunidade devastada		1997	
4	Rio Pomba Mineração	Mercês	MG	Mineração	ruptura	liquefação da fundação	não causou danos à população	construção	2000	Mafra (2007)
5	Mineração Rio Verde	São Sebastião das Águas Claras	MG	Mineração	ruptura	instabilidade do maciço	Deslizamento de parte do maciço (300m). Soterramento com lama e rejeito de minério ao longo de 6km dos córregos Taquara e Fechos e de parte da mata atlântica (43ha) e da principal estrada de acesso à cidade de São Sebastião de Águas Claras, além de uma adutora da COPASA. Provocou a morte de 5 operários.	operação	junho/2001	FEAM (2008)
6	Alunorte	Barcarena	PA	Mineração	vazamento de rejeito, composto de bauxita, soda cáustica e ácido sulfúrico	falha no sistema de tratamento de rejeitos da empresa	danos ambientais causados ao rio Murucupi e ao igarapé Pramajorzinho	operação	maio/2003	O Liberal (PA)

Qnt	Barragem / Açude	Localização	UF	Uso Preponderante	Anomalia Observada	Causa Provável	Danos Causados (humanos, financeiros, material, etc.)	Fase da Vida	Data	Fonte
7	Barragem mineradora Imerys Rio Capim Caulim	Barcarena	PA	Mineração	derramamento de rejeitos químicos	Falha no sistema de bombeamento dos rejeitos de beneficiamento de caulim	Segundo os ribeirinhos, a Imerys Rio Capim Caulim teria derramado rejeitos químicos nas águas dos rios Curuperê e Dendê, provocando mortandade de peixes e mudanças na coloração dos recursos hídricos, além de outros sintomas verificados na própria saúde de alguns dos moradores. A denúncia também foi feita à Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Barcarena pelo vereador Mário Brandão.	operação	junho/2004	O Liberal (PA)
8	INB - Mineração de Urânio	Caetité	BA	Mineração	vazamento de resíduo	dimensionamento inadequado das estruturas	Vazamento de material de mineração de urânio	operação	dez/2004	Folha de São Paulo (SP)
9	São Francisco (Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda.)	Miraf	MG	Mineração	deslocamento/ rompimento de placas de concreto do vertedouro	problemas no vertedouro da barragem de rejeitos de lavagem de bauxita	morte dos peixes, inundação de áreas ribeirinhas, destruição de áreas de pastagem e de agricultura, com grande deposição de sedimentos, excesso de turbidez (presença de sedimentos) das águas do córrego Bom Jardim e ribeirão Fubá, alguns municípios de Minas Gerais e Rio de Janeiro tiveram o abastecimento de água interrompido temporariamente	operação	março/2006	Estado de Minas (MG)
10	São Francisco (Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda.)	Miraf	MG	Mineração	galgamento e consequente ruptura	cheia superior à capacidade do vertedouro associado com erro no nivelamento da crista	cerca de 2 milhões de m3 de lama (água e argila) foram derramados no rio Fubá, afluente do rio Muriaé; de 3 a 5 mil pessoas ficaram desabrigadas e ocasionou danos ambientais	operação	janeiro/2007	Jornal Hoje em Dia (MG)
11	Mineração Bom Retiro	Leme	SP	Mineração	ruptura	precipitação intensa e infiltrações	destruição da mata ciliar, erosão nas propriedades vizinhas, falta de energia elétrica e destruição de duas pequenas pontes. Três mil moradores da zona rural ficaram sem energia elétrica.	operação	janeiro/2007	EPTV Central (SP)
12	Baixo João Pereira	Congonhas	MG	Uso múltiplo	vazamento de rejeito de mineração		Um vazamento de resíduos de minério de ferro causou transtornos em Congonhas. O fato aconteceu na primeira semana de fevereiro, quando o material transbordou da barragem Baixo João Pereira, caindo no rio Santo Antônio, que forma uma piscina natural no Parque da Cachoeira. Foram cerca de 100 toneladas de resíduos, provenientes de uma barragem da empresa Vale do Rio Doce. De acordo com a Feam (agência ambiental mineira), o material não é tóxico. Para a Prefeitura de Congonhas e a Vale do Rio Doce, o transbordamento ocorreu por causa das chuvas constantes. A Feam já determinou a fiscalização nas barragens da bacia do rio Santo Antônio, para apurar as causas do acidente.	operação	fev/2007	Jornal Correio da Cidade (MG)

Qnt	Barragem / Açude	Localização	UF	Uso Preponderante	Anomalia Observada	Causa Provável	Danos Causados (humanos, financeiros, material, etc.)	Fase da Vida	Data	Fonte
13	Barragem mineradora Imerys Rio Capim Caulim	Barcarena	PA	Mineração	derramamento de rejeitos químicos	Falha no sistema de bombeamento dos rejeitos de beneficiamento de caulim	O caulim é um minério argiloso que é utilizado na fabricação de papéis, tinta, na indústria farmacêutica. A empresa estimou que 20 mil metros cúbicos do produto tenham vazado. Os ribeirinhos ficaram assustados. Dezoito famílias necessitaram de ser remanejadas para uma escola como medida de segurança.	operação	junho/2007	O Liberal (PA)
14	Mineração em Corumbá	Corumbá	MS	Mineração	Ruptura		Danos em balneário a jusante	Operação	outubro/2007	Jornal Midia max
15	Mineração Casa de Pedra	Congonhas	MG	Mineração	Ruptura	piping no contato do vertedouro e maciço	A inundação que atingiu nove bairros e deixou 40 famílias desalojadas foi agravada pela ruptura da barragem.	Operação	março/2008	Jornais O Globo e Uai
16	Herculano Mineração	Itabirito	MG	Mineração			3 mortes		2014	
17	Barragem do fundão - Samarco	Mariana	MG	Mineração		Liquefação de efluentes	Destrução da comunidade, 39 municípios afetados, atingiu o rio Doce, Gualaxo do Norte e Carmo e matando 19 pessoas.		2015	Samarco
18	BARRAGEM I (Córrego Feijão)	Brumadinho	MG	Mineração			12 million m3 atingiu o rio Rio Paraopeba e matando 260 mortes.		2019	Vale

Fonte: Adaptado pela autora de Menescal (2009)

APÊNDICE B – AVALIAÇÕES DOS ESPECIALISTAS – DADOS BRUTOS

0% - 10% 10% - 20% 20% - 30% 30% - 90% acima 90%

Critérios	Perguntas	R1- Geólogo	R2- Geofísico	R3- Eng. Minas	R4- Eng. Minas	R5- Geofísico	R6-Eng. Minas	R7- Geólogo	R8- Eng. Minas	R9-Eng. Amb.	R10- Eng. Minas	R11- Eng. Civil	R12 – Eng. Amb.	R13 – Eng. Amb.	R14- Eng. Amb.	R-15- Eng. de Minas e Seg.	R16- Eng. Amb.	R17- Eng. Amb	R18- Geologo	R19- Geologo	Média Aritmé- tica
		Sênior	Sênior	Pleno	Outro	Pleno	Outro	Sênior	Outros	Júnior	Júnior	Pleno	Gerente	Gerente	Pleno	Junior	Pleno	Gerente	Seniro	Junior	
		Acima de 10 anos.	Acima de 10 anos.	Entre 1 e 3 anos	Entre 1 e 3 anos	Entre 5 e 10 anos	Até 1 ano	Acima de 10 anos.	Acima de 10 anos.	Até 1 ano	Até 1 ano	Entre 3 e 5 anos	Acima de 10 anos.	Acima de 10 anos.	Entre 5 e 10 anos	Entre 1 a 3 anos	Entre 5 e 10 anos	Acima de 10 anos.	Acima de 10 anos.	Entre 1 a 3 anos	
Gerais	P1 (impactos socioambientais x técnicos e econômicos)	9	1	1	1	1/3	7	5	7	7	1	5	1	1	7	1	1	5	7	1	3,60
	P2 (Impactos socioambientais x segurança e riscos operacionais)	1	1	1	1	1/3	1/3	5	7	1	1/3	3	1/3	1/9	1	1/3	1	1/3	3	1	1,48
	P3 (Aspectos técnicos e econômicos x segurança e riscos operacionais)	1/5	1	1	1	1	1/5	1	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1/9	5	1/3	1	1/3	1/3	1	0,78
	Razão de Consistência (M.A)	3,33%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	20,61%	0,00%	27,01%	1,09%	0,00%	3,34%	0,00%	0,00%	146,20%	0,00%	0,00%	26,01%	0,61%	0,00%	4,02%
	Razão de Consistência (M.G)	3,32%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	20,11%	0,00%	25,41%	1,09%	0,00%	3,32%	0,00%	0,00%	135,93%	0,00%	0,00%	25,41%	0,61%	0,00%	4,01%

Critérios Socioambientais	P4 (impacto na água x solo)	5	3	1/3	5	5	3	5	9	1	3	3	5	1	3	3	1	5	5	5	3,70
	P5 (impacto na água x ar)	1	5	5	5	7	7	1	9	3	5	5	7	3	3	7	5	5	3	7	4,89
	P6 (impacto no solo x ar)	1/3	1	3	5	1/3	7	1	7	3	3	5	5	3	3	3	5	1/5	1/5	1/5	2,91
	Razão de Consistência (M.A)	2,51%	2,52%	26,01%	26,53%	21,11%	11,90%	25,90%	41,42%	0,00%	3,34%	11,88%	16,29%	0,00%	11,83%	0,61%	0,00%	26,53%	11,88%	40,43%	6,05%
	Razão de Consistência (M.G)	2,51%	2,51%	25,41%	25,41%	20,11%	11,69%	25,41%	37,56%	0,00%	3,32%	11,69%	15,76%	0,00%	11,69%	0,61%	0,00%	25,41%	11,69%	37,56%	5,99%

Critérios Técnicos e Econômicos	P7 (CAPEX x OPEX)	1	1	1/3	1/5	3	5	1	3	1/3	5	1	1	1/5	3	1/3	1	1/3	1/3	1	1,48
	P8 (CAPEX x Regulatórios)	1/3	1	1/3	1/3	1/5	1/7	1	3	1	1/7	1	3	1/5	1/3	1/7	1	1/3	1/3	1	0,78
	P9 (OPEX x Regulatórios)	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/7	1	3	1/5	1/7	1	1	1/5	1/3	1/3	1	1	1/3	1	0,65
	Razão de Consistência (M.A)	0,00%	11,74%	11,83%	26,01%	26,35%	27,01%	0,00%	11,83%	77,89%	27,01%	0,00%	11,74%	26,53%	11,83%	0,61%	0,00%	0,00%	11,83%	0,00%	0,41%
	Razão de Consistência (M.G)	0,00%	11,69%	11,69%	25,41%	25,41%	25,41%	0,00%	11,69%	75,15%	25,41%	0,00%	11,69%	25,41%	11,69%	0,61%	0,00%	0,00%	11,69%	0,00%	0,41%

Critérios Segurança e riscos operacionais	P10 (Risco empresa x trabalhador)	1/9	1/5	1	1/5	1	1/9	1/9	1/9	1/7	1/7	1/3	1/3	1	1/5	1/5	1	1	1/7	1	0,44
	P11 (Risco empresa x sociedade)	1/9	1/3	1	1/5	1	1/9	1/9	1/9	1/3	1/7	1/3	1/3	1/5	1/5	1/3	1	1	1/7	1/9	0,37
	P12 (Risco trabalhadores x sociedade)	1	1	1	1	1/3	1/3	1	1	1	1	1	1	1	5	3	5	1	1	1/5	1,41
	Razão de Consistência (M.A)	0,00%	2,51%	0,00%	0,00%	11,74%	11,91%	0,00%	0,00%	6,98%	0,00%	0,00%	0,00%	25,90%	26,53%	3,34%	25,90%	0,00%	0,00%	3,36%	2,46%
	Razão de Consistência (M.G)	0,00%	2,51%	0,00%	0,00%	11,69%	11,69%	0,00%	0,00%	6,92%	0,00%	0,00%	0,00%	25,41%	25,41%	3,32%	25,41%	0,00%	0,00%	3,32%	2,46%

Crítérios Socioambientais Subcritérios Água x Alternativas	P13 Convencional x pastoso	5	3	3	5	5	7	9	1	1/3	5	7	5	9	5	3	5	3	3	7	4,75
	P14 Convencional x filtrado	9	5	7	7	7	5	9	3	3	7	5	1/7	9	1/3	5	9	7	5	9	5,87
	P15 (Pastoso x filtrado)	5	3	5	5	1/5	3	5	1/3	3	5	1/5	1/5	1	1/3	3	5	3	3	5	2,91
	Razão de Consistência (M.A)	10,35%	3,34%	5,65%	16,29%	40,43%	21,11%	27,42%	48,96%	11,83%	16,29%	16,29%	40,43%	0,00%	26,01%	0,00%	10,35%	0,61%	3,34%	18,89%	7,20%
	Razão de Consistência (M.G)	10,09%	3,32%	5,59%	15,76%	37,56%	20,11%	25,41%	48,35%	11,69%	15,76%	15,76%	37,56%	0,00%	25,41%	0,00%	10,09%	0,61%	3,32%	17,97%	7,09%

Crítérios Socioambientais Subcritérios Solo x Alternativas	P16 (Convencional x pastoso)	1	3	5	5	5	7	9	3	1/3	5	5	5	7	3	3	5	1	3	5	4,23
	P17 (Convencional x filtrado)	1	7	5	7	7	7	9	3	1/7	7	5	5	5	5	7	9	1	5	9	5,48
	P18 (Pastoso x filtrado)	3	3	5	5	3	5	5	1/3	1/5	3	1/5	1/5	1	1	3	5	1	3	3	2,63
	Razão de Consistência (M.A)	11,74%	0,61%	26,53%	16,29%	5,67%	27,01%	27,42%	11,83%	5,67%	5,67%	26,53%	26,53%	1,09%	2,52%	0,61%	10,35%	0,00%	3,34%	2,52%	4,85%
	Razão de Consistência (M.G)	11,69%	0,61%	25,41%	15,76%	5,59%	25,41%	25,41%	11,69%	5,59%	5,59%	25,41%	25,41%	1,09%	2,51%	0,61%	10,09%	0,00%	3,32%	2,51%	4,81%

Crítérios Socioambientais Subcritérios Ar x Alternativas	P19 (Convencional x pastoso)	1/3	1/3	1	1/5	1/5	1	5	3	1/3	1/5	5	3	1	1	1/5	1	1/3	1	1	1,32
	P20 (Convencional x filtrado)	1/5	1/7	7	1/7	1/5	3	1/3	3	1/7	1/7	1/5	1/3	1/3	1/3	1/9	1	1/5	1/3	1	0,96
	P21 (Pastoso x filtrado)	1/3	1	5	1/5	1/3	3	1/3	1	1/5	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1/5	1/3	1	0,90
	Razão de Consistência (M.A)	3,34%	6,98%	1,09%	16,29%	11,88%	0,00%	26,01%	0,00%	5,67%	5,65%	26,53%	48,96%	0,00%	11,74%	2,52%	0,00%	11,98%	0,00%	0,00%	0,47%
	Razão de Consistência (M.G)	3,32%	6,92%	1,09%	15,76%	11,69%	0,00%	25,41%	0,00%	5,59%	5,59%	25,41%	48,35%	0,00%	11,69%	2,51%	0,00%	11,69%	0,00%	0,00%	0,47%

Critérios Técnicos e Econômicos	P22 Convencional x pastoso	1/5	1/3	1/5	5	1/3	1/7	1/5	1/3	3	5	1/3	1/5	1/5	1/3	1/5	1/5	1/3	1/5	0,89	
	P23 Convencional x filtrado	1/7	1/9	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	3	5	1/3	1/7	1/5	1/7	1/9	1/9	1/5	1/5	1/9	0,59
	P24 (Pastoso x filtrado)	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	5	1/3	1/3	1/3	3	3	1	1	1/3	1/3	1/5	1/5	1/3	1/5	0,88
CAPEX x Alternativas.	Razão de Consistência (M.A)	16,29%	0,00%	40,43%	26,53%	3,34%	16,29%	11,88%	11,83%	11,83%	11,98%	11,83%	1,09%	0,00%	0,61%	2,52%	10,35%	26,53%	3,34%	10,35%	0,84%
	Razão de Consistência (M.G)	15,76%	0,00%	37,56%	25,41%	3,32%	15,76%	11,69%	11,69%	11,69%	11,69%	11,69%	1,09%	0,00%	0,61%	2,51%	10,09%	25,41%	3,32%	10,09%	0,84%

Técnicos e Econômicos	P25 Convencional x pastoso	1/5	1/3	1/5	1/5	1/3	1/7	1/5	1	1	5	1/3	1/7	1/3	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/5	0,57
	P26 Convencional x filtrado	1/7	1/7	1/9	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1/3	5	1/3	1/5	1/3	1/5	1/9	1/7	1/5	1/5	1/7	0,45
	P27 (Pastoso x filtrado)	1/5	1/3	1/7	1/7	1	1/7	1/3	1/3	1/3	3	5	1/3	1/5	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/5	0,70
OPEX x Alternativas.	Razão de Consistência (M.A)	16,29%	0,61%	18,89%	27,01%	2,51%	40,59%	11,88%	0,00%	0,00%	11,98%	26,35%	20,61%	26,35%	11,88%	2,52%	16,29%	3,34%	3,34%	16,29%	0,16%
	Razão de Consistência (M.G)	15,76%	0,61%	17,97%	25,41%	2,51%	37,56%	11,69%	0,00%	0,00%	11,69%	25,41%	20,11%	25,41%	11,69%	2,51%	15,76%	3,32%	3,32%	15,76%	0,16%

Critérios Técnicos e Econômicos	P28 Convencional x pastoso	5	5	7	5	5	5	1/5	1	1	9	5	5	1/5	1	5	7	3	3	1	3,86
	P29 Convencional x filtrado	9	7	3	7	5	5	1/5	1	1	9	5	5	1/5	1	7	9	5	5	1	4,49
	P30 Pastoso x filtrado	5	1	7	5	1/3	1/5	1/5	1	1	5	1/5	3	1	1	3	7	5	3	1	2,63
Regulatórios Alternativas.	Razão de Consistência (M.A)	10,35%	1,09%	88,25%	16,29%	11,98%	26,53%	26,53%	0,00%	0,00%	27,42%	26,53%	11,98%	0,00%	0,00%	5,67%	30,22%	11,88%	3,34%	0,00%	6,47%
	Razão de Consistência (M.G)	10,09%	1,09%	80,29%	15,76%	11,69%	25,41%	25,41%	0,00%	0,00%	25,41%	25,41%	11,69%	0,00%	0,00%	5,59%	28,25%	11,69%	3,32%	0,00%	6,40%

Critérios Segurança e riscos operacionais	P31 Convencional x pastoso	7	5	7	5	7	9	5	5	5	5	5	7	1/7	7	3	5	3	5	7	5,38
	P32 Convencional x filtrado	9	7	5	7	7	9	5	1	7	7	5	7	1/7	7	7	9	5	7	9	6,32
	P33 Pastoso x filtrado	3	1	5	5	3	5	5	1	3	5	1/3	3	1	3	3	5	5	5	5	3,49
Risco à empresa x Alternativas.	Razão de Consistência (M.A)	7,08%	1,09%	40,43%	16,29%	12,09%	27,42%	26,53%	25,90%	5,67%	16,29%	11,98%	12,09%	0,00%	12,09%	0,61%	10,35%	11,88%	16,29%	18,89%	11,78%
	Razão de Consistência (M.G)	6,92%	1,09%	37,56%	15,76%	11,69%	25,41%	25,41%	25,41%	5,59%	15,76%	11,69%	11,69%	0,00%	11,69%	0,61%	10,09%	11,69%	15,76%	17,97%	11,46%

Critérios Segurança e riscos operacionais	P34 Convencional x pastoso	7	3	5	5	3	9	5	1	1	5	5	5	1/5	9	3	5	1	3	3	4,12
	P35 Convencional x filtrado	9	5	9	7	5	7	3	1	1	3	5	5	7	9	5	9	5	1/3	9	5,49
	P36 Pastoso x filtrado	3	1	9	5	3	1/5	1/3	1/3	1	3	1/3	3	1	5	1	5	3	1/3	5	2,61
Risco ao trabalhador x Alternativas	Razão de Consistência (M.A)	7,08%	2,52%	26,67%	16,29%	3,34%	18,89%	3,34%	11,74%	0,00%	26,35%	11,98%	11,98%	144,31%	27,42%	2,52%	10,35%	2,51%	11,83%	18,89%	4,36%
	Razão de Consistência (M.G)	6,92%	2,51%	25,41%	15,76%	3,32%	17,97%	3,32%	11,69%	0,00%	25,41%	11,69%	11,69%	135,93%	25,41%	3,32%	10,09%	2,51%	11,69%	17,97%	4,32%

Critérios Segurança e riscos operacionais	P37 Convencional x pastoso)	7	3	5	5	7	9	5	1	5	9	5	5	7	9	5	5	3	3	7	5,53
	P38 Convencional x filtrado)	9	7	9	7	7	7	5	1	9	9	5	5	7	9	7	9	5	7	9	7,00
	P39 (Pastoso x filtrado)	3	3	9	5	3	1/5	1/3	1	5	5	1/3	3	1	7	3	5	3	3	7	3,52
Subcritérios Risco à sociedade x Alternativas	Razão de Consistência (M.A)	7,08%	0,61%	26,67%	16,29%	12,09%	18,89%	11,98%	0,00%	10,35%	27,42%	11,98%	11,98%	0,00%	41,42%	5,67%	10,35%	3,34%	0,61%	30,22%	10,36%
	Razão de Consistência (M.G)	6,92%	0,61%	25,41%	15,76%	11,69%	17,97%	11,69%	0,00%	10,09%	25,41%	11,69%	11,69%	0,00%	37,56%	5,59%	10,09%	3,32%	0,61%	28,25%	10,10%

APÊNDICE C – GUIA ENVIADO AOS ESPECIALISTAS

Guia para auxílio nas respostas do questionário: Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

Caro (a) participante, esta pesquisa faz parte da dissertação de mestrado de Bruna Ramos e vinculada à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O estudo objetiva avaliar por meio da *Analytic Hierarchy Process* (AHP) qual método de disposição de rejeito é o mais sustentável para aplicação na mineração de ferro no Brasil.

O método da Análise Hierárquica (AHP) busca simplificar um problema complexo que apresenta vários critérios em uma estrutura hierárquica (SITORUS *et al.*, 2019). Essa hierarquia possui uma estrutura multinível, onde o primeiro nível é a meta/objetivo, seguido por subníveis, critérios e subcritérios, e até o último nível das alternativas.

Desse modo, consideram-se três cenários de métodos de disposição de rejeitos para a avaliação, sendo eles: (1) Disposição convencional (hidráulica) de rejeitos em barragens (montante, jusante e de linha de centro); (2) Disposição de rejeitos espessados/pastosos; e (3) Disposição de rejeitos filtrados. Embora, os métodos (2) e (3) estejam ainda em processo de implantação por muitas empresas, busca-se avaliar o quão vantajoso seria a sua aplicação frente ao método convencional (1) que é os mais utilizados hoje no Brasil. Gostaria de solicitar a sua colaboração para responder ao questionário de forma anônima e desde já agradeço a sua participação e contribuição com o estudo.

- **1º Parte da pesquisa:**

Objetiva coletar dados do perfil profissional dos respondentes objetivando a análise do perfil dos especialistas.

- **2º Parte da pesquisa:**

Objetiva realizar a comparação par a par dos critérios. Para isso, serão atribuídos pelos especialistas pesos para cada critério e subcritério apresentado. O Quadro C1 apresenta a escala de peso para o julgamento dos especialistas.

Quadro C1: Intensidade do julgamento

Intensidade de importância	Escala verbal	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra/moderada	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação a outra.
5	Importância grande ou essencial/forte	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande/muito forte	Uma atividade é muito fortemente favorecida e relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta/extrema.	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
1/3, 1/5, 1/7 e 1/9	Valores para comparação inversa	

Fonte: Adaptado de (SAATY, 1991)

Esse estudo avaliará três categorias de critérios:

1. Impactos Socioambientais.
2. Critério técnico e econômico.
3. Segurança e riscos operacionais.

- **3º Parte da pesquisa:**

Objetiva realizar a comparação par a par dos subcritérios com relação a cada critério.

Impactos Socioambientais

O critério de impactos socioambientais está subdividido em 3 subcritérios, a saber:

1.1 Impactos na água: Os métodos que possuem maiores tecnologias para a disposição de rejeitos apresentam uma maior economia de água, tendo em vista que quanto maior o percentual de sólido, maior será o reaproveitamento e reutilização da água no próprio processo mineral. Além disso, será necessária a retirada de uma menor quantidade de água dos rios para alimentar o tratamento do minério.

1.2 Impactos no solo: A disposição de rejeitos provenientes da mineração de ferro ocasiona impactos ao solo principalmente devido à ocupação de áreas para a disposição do rejeito. Ademais, os diversos métodos de disposição de rejeitos podem apresentar diversas manchas de dispersão dos rejeitos em caso de uma falha na sua contenção.

1.3 Impactos no ar: Os métodos de disposição de rejeitos que possuem maiores percentuais de sólidos geram maior quantidade de poeira, que podem causar problemas respiratório na população local. Enquanto isso os métodos que possuem maiores quantidade de água, estão sujeitos a infiltrações que podem levar a problemas no sistema de contenção dos rejeitos.

Técnico e econômico

O critério técnico e econômico está subdividido em 3 subcritérios, a saber:

2.1 Custo de aquisição (CAPEX): Esse subcritério está relacionado às despesas de capital ou investimento em bens de capital e do dinheiro despendido na aquisição de equipamentos para a implantação dos processos de disposição de rejeitos.

2.2 Custo Operacional (OPEX): Esse subcritério relaciona-se aos custos para a manutenção dos métodos de disposição de rejeito.

2.3 Aspectos Regulatórios: As legislações minerais são diferentes de acordo com o país. Desse modo, busca-se avaliar as alternativas de disposição e rejeitos levando-se em consideração as legislações aplicáveis no Brasil,

Segurança e riscos operacionais

O critério de segurança e riscos operacionais está subdividido em 3 subcritérios, a saber:

3.1 Riscos para a empresa: Esse subcritério apresentará uma relação direta com a probabilidade de problemas no sistema de contenção dos rejeitos de acordo com a tecnologia de disposição utilizada e com as consequências e impactos causados de acordo com as alternativas propostas.

3.2 Riscos para os trabalhadores: O risco para os trabalhadores será maior quanto maior for o risco de acidentes de operação da contenção dos rejeitos. Os trabalhadores das mineradoras poderão sofrer abalos psíquicos em sua saúde emocional em caso de um possível evento catastrófico.

3.3 Riscos para a sociedade: A sociedade ao entorno de uma mineradora se torna em muitos casos dependente dela, sendo a economia prejudicada em caso de evento catastrófico que paralise o funcionamento do empreendimento. Além disso, poderá ocorrer diminuição de empregos, diminuição da população flutuante, perda de *royalties*. Outro aspecto importante relaciona-se ao fato de existirem populações que residem ao entorno de muitas áreas de disposição de rejeitos, o que pode aumentar a gravidade no caso de um rompimento da contenção. Além disso, a sociedade poderá sofrer com fatores de riscos relacionados a adoecimento mental decorrente de eventos catastróficos ou da perda da economia local.

- **4º Parte da pesquisa:**

Busca-se avaliar os subcritérios sob a ótica dos métodos de disposição de rejeitos, que são as alternativas apresentadas, objetivando identificar qual método propiciará menores impactos ambientais, custos e riscos, conforme exibido na figura 1.

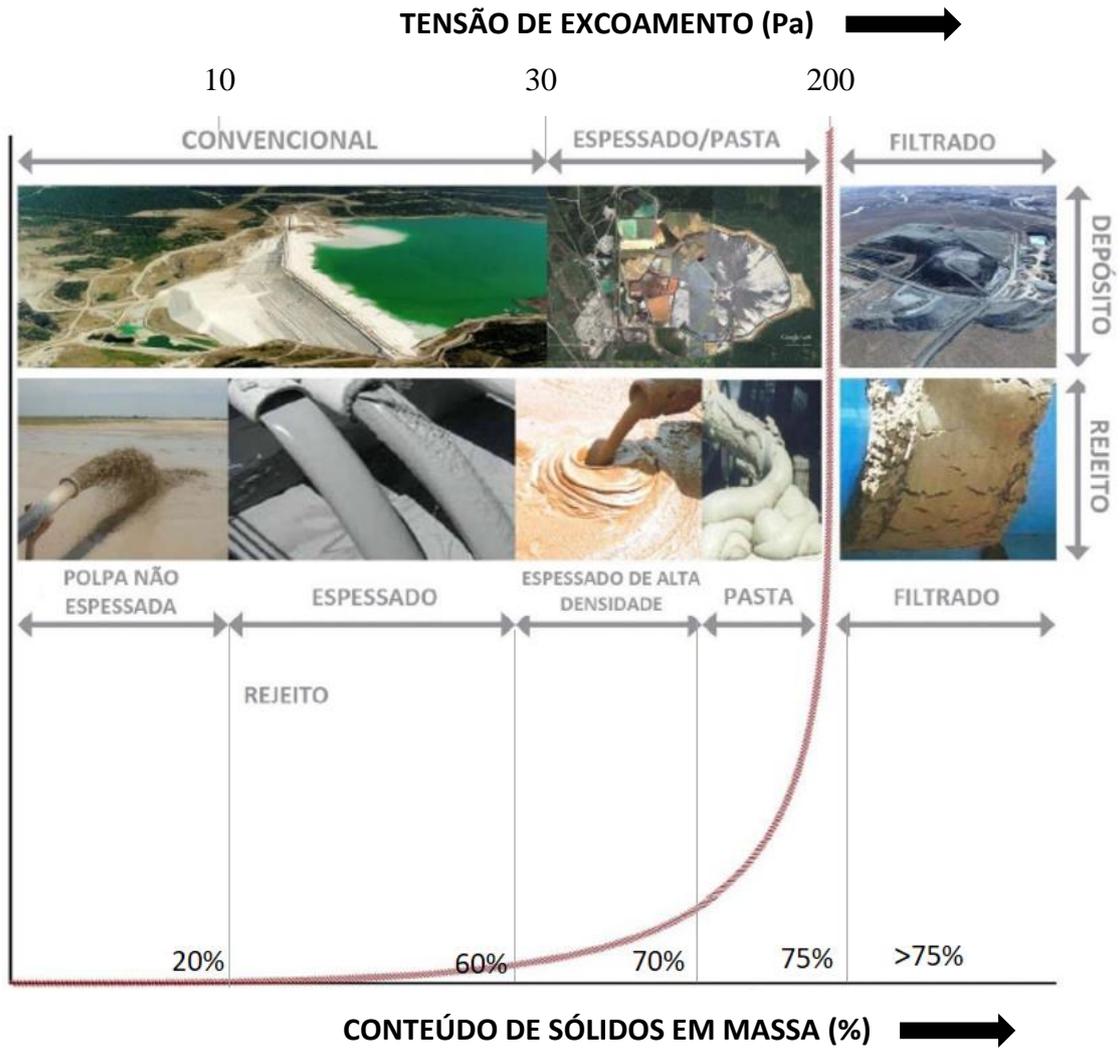


Figura C1: Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósitos.
 Fonte: Adaptado de (MEND, 2017, p.36;94)

A figura C2 apresenta a árvore da estrutura hierárquica do estudo para o método AHP.

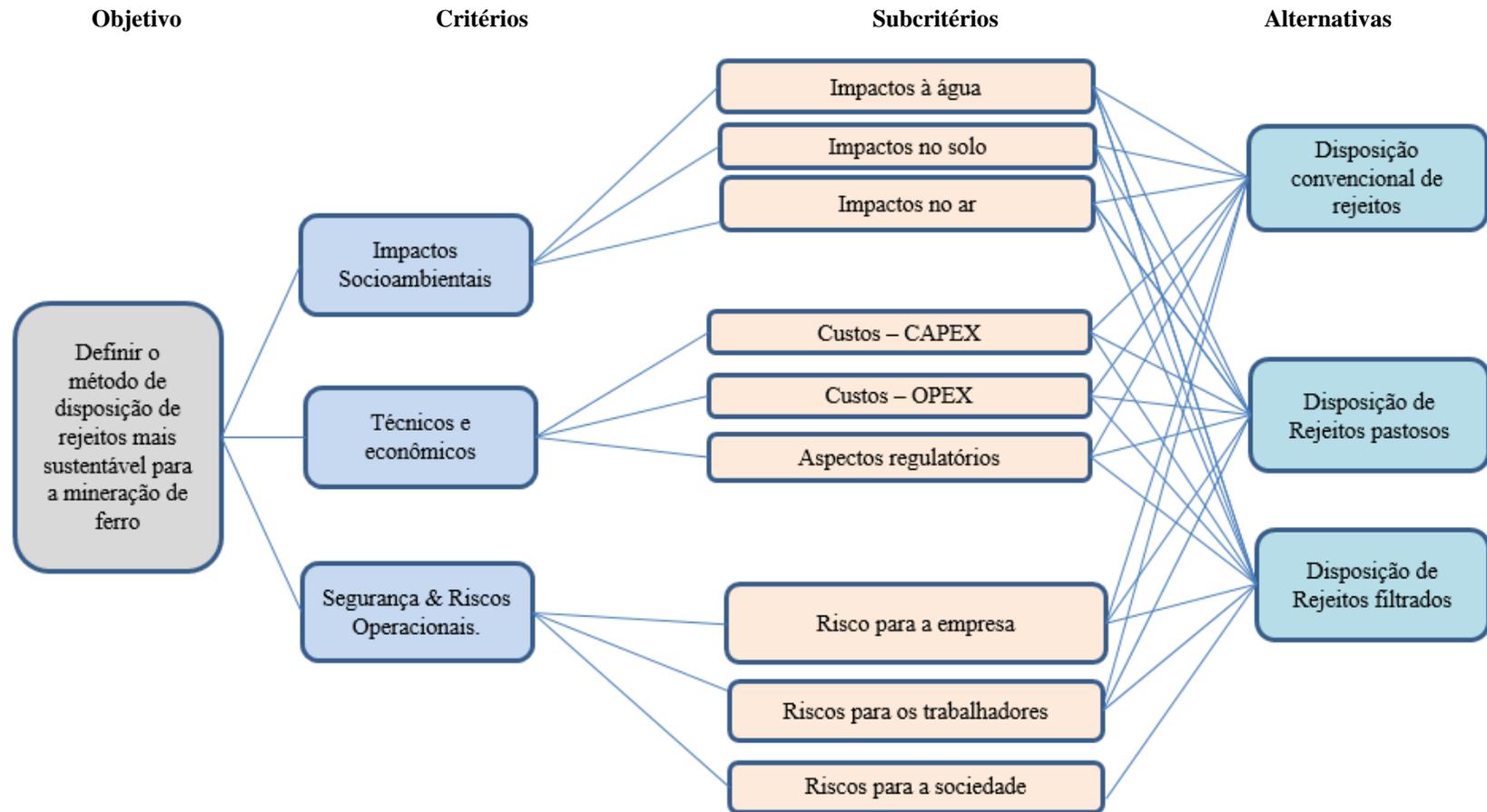


Figura C2: Estrutura hierárquica com os critérios, subcritérios e alternativas
 Fonte: (A AUTORA, 2020)

Nos quadros C2, C3 e C4 são apresentados resumos de informações encontradas na literatura para auxiliar e corroborar na tomada de decisão dos especialistas sobre os pesos atribuídos no método AHP para as alternativas propostas.

Quadro C2: Critérios de comparação de características dos impactos socioambientais utilizados no método AHP

SubCritérios do AHP	Características	Métodos de disposição de rejeitos		
		Barragens de rejeitos convencionais (disposição hidráulica em barragens/polpa)	Disposição de rejeitos Espessados/pastosos	Disposição de rejeito filtrado
Impactos à água	Presença de água na disposição	Mais de 50% (p/p)	Em torno de 30% (p/p)	Entre 10 a 30% (p/p)
	Recuperação de água	Pequena, perdas por evaporação e infiltração (indesejada).	Alta recuperação durante o processo (MEND, 2017)	Elevada, água recuperada na planta antes da disposição. (ALVES, 2020)
	Contaminação de aquíferos	Ocorrência possível (Moderada)	Baixa ou nula	Baixa ou nula
Impacto no solo	Área utilizada	Utilização de grandes áreas para disposição do rejeito.	1- Redução da área da planta necessária para a disposição de rejeitos, reduzindo o tempo da área PONTES, 2013,p.31) 2- As pastas são dispostas em forma de cone, o que permite o escoamento da água das chuvas sobre o mesmo e apenas um pequeno percentual de infiltração (CHAVEZ et al, 2013 apud FRANÇA e TRAMPUS, 2018)	Menor área utilizada para disposição; Mínimo impacto ambiental por eliminar bacias de disposição TESSAROTTO, 2015) Dependendo das condições topográficas, o ganho de área pode ser tornar inexpressivo (PONTES, 2013,p.124)
	Mancha de dispersão	Risco alto maior para o alteamento à montante, pois toda a polpa presente no reservatório de rejeitos pode se liquefazer, sendo capaz de fluir por quilômetros de distância à jusante. (PORTES, 2013, p. 33)	O fluxo de rejeitos seria menor e mais facilmente controlado, tornando-se um problema local. (PORTES, 2013, p. 33)	Massa de rejeitos mais estável (ALVES, 2020)
	Porcentagem de sólidos no rejeito	Pequena com 30 a 58% de sólidos.	Entre 60 a 75% de sólidos	>80 % de sólidos
	Reabilitação da área degradada pela disposição de rejeitos	Após algum tempo (LIMA, 2006, p. 21)	Imediata (LIMA, 2006, p. 21)	-
Impactos no ar	Poeira no ar	Menor geração de poeira devido a maior presença de água	Geração de poeira acima da gerada nas barragens convencionais.	Alta necessidade de controle de poeira (SCHOENBERGER, 2016).

Fonte: Adaptado de (FRANÇA; TRAMPUS, 2018; PORTES, 2013; OLMEDO *et al*, 2015)

Quadro C3: Critérios de comparação de características dos impactos técnicos e econômicos utilizados no método AHP

Subcritérios do AHP	Características	Métodos de disposição de rejeitos		
		Barragens de rejeitos convencionais (disposição hidráulica em barragens/polpa)	Disposição de rejeitos pastosos	Disposição de rejeito filtrado
Custos CAPEX	Reabilitação da área de disposição de rejeitos	Difícil recuperação da área impactada com alto custo na sua reabilitação (ALVES, 2020)	Passível de recuperação e reuso. Alto custo de reabilitação (ALVES, 2020)	Passível de recuperação e reuso. Baixo custo de reabilitação (ALVES, 2020)
	Geologia e reologia dos rejeitos.	A disposição convencional requer topografia natural e condições geológicas para minimizar o tamanho do aterro e maximizar o volume de armazenamento de rejeitos (WATSON <i>et al.</i> , 2010).	Necessidade de estudos aprofundados sobre a reologia de modo a prever o comportamento do rejeito perante o bombeamento e empilhamento nas barragens ou áreas de disposição (FRANÇA; TRAMPUS, 2018) Melhores em topografias planas, geralmente não são viáveis (sem suporte de aterro) em locais com declives moderados de terreno (WATSON <i>et al.</i> , 2010).	Pode ser implementada em uma variedade de terrenos, desde que haja estabilidade, requisitos operacionais e de fechamento são levados em consideração (WATSON <i>et al.</i> , 2010).
	Custo para instalação do projeto	Menores custos de capital (MEND, 2017)	Alto em comparação ao convencional (LIMA, 2006, p. 21) e (MEND, 2017)	Muito alto (ALVES, 2020)
		Requer atenção, bom desenho e boas práticas de construção da barragem (MEND, 2017)	Sistemas mais complexos de transporte dos rejeitos (MEND, 2017)	Sistemas mais complexos de transporte dos rejeitos (MEND, 2017)
Custos OPEX	Custos OPEX (Incluindo custos de implantação e descomissionamento)	Menores custos de operação e transporte a longas distâncias (MEND, 2017). Rejeito vai para a barragem por gravidade ou partir de calhas ou tubulações de baixa pressão. (ALVES, 2020)	Os custos associados à infraestrutura, transporte e consumo de energia do material são mais elevados (LEMOS, 2017). Alto (MEND, 2017) Bombas de deslocamento positivo com tubulação de alta pressão (ALVES, 2020)	Muito alto (ALVES, 2020) Transporte por correias ou caminhões.
Aspectos regulatórios	Legislações	Proibição de construção do método de alteamento a montante. (ANM nº 04/2019) As empresas de mineração têm dificuldade na aquisição de novos licenciamentos devido a quantidade de impactos ambientais (GUIMARÃES <i>et al.</i> , 2012).	-	1- Redução do volume de outorga para água nova, item particularmente sensível em regiões com déficit hídrico; 2- Maior facilidade para obter aprovação do órgão ambiental, por conta da eliminação de barragens; (TESSAROTTO, 2015)

Fonte: Adaptado de (FRANÇA; TRAMPUS, 2018; PORTES, 2013; OLMEDO *et al.*, 2015; ALVES, 2020 adaptado de GOLDR ASSOCIATES, 2015)

Quadro C4: Critérios de comparação de segurança e riscos operacionais utilizados no método AHP

Subcritérios do AHP	Características	Métodos de disposição de rejeitos		
		Barragens de rejeitos convencionais (disposição hidráulica em barragens/polpa)	Disposição de rejeitos Espessados/pastosos	Disposição de rejeito filtrado
Risco para a empresa	Riscos de falha na contenção e de liquefação	Possível ou alta	Baixo ou mínimo	
Riscos para os trabalhadores.	Acidentes e facilidade de execução da atividade	Possibilidade de rompimento das barragens e instalações de rejeitos com morte de trabalhadores.	-	O sistema de filtração/centrifugação é totalmente automatizado, exigindo apenas supervisão por parte dos trabalhadores; (TESSAROTTO, 2015)
Riscos para a sociedade	Acidentes e doenças decorrentes dos impactos ambientais e econômicos	Possibilidade de rompimento das barragens e instalações de rejeitos com morte de residentes. Desemprego devido à interrupção/paralisação da operação da exploração do minério	Menores riscos em comparação com o método de disposição convencional. Por ter um comportamento mais viscoso e com menor volume em caso de ruptura a mancha de espalhamento é mais reduzida.	Necessidade de controle de poeira e erosão (SCHOENBERGER, 2016), podendo causar problemas respiratórios na sociedade. Maior facilidade de aceitação por parte da sociedade.

Fonte: Adaptado de (FRANÇA; TRAMPUS, 2018); PORTES, 2013; OLMEDO *et al.*, 2015; DE CARVALHO *et al.*, 2018).

REFERÊNCIAS

- ALVES, P.I.A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens.** 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 4, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2019. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. **Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração.** 2019.
- DE CARVALHO, P. S. L; MESQUITA, P.P.D; REGIS, R.D.D; MEIRELLIS, T.L. Sustentabilidade socioambiental da mineração. Mineração. **BNDES Setorial.** V. 47, p. 333-390. 2018.
- FRANÇA, S. C. A.; TRAMPUS, B. C. **Missão Institucional Tecnologia Ambiental: Série Desaguamento de Rejeitos Mineraiis para Aplicação de Métodos de Disposição Alternativos às Barragens de Rejeito Convencionais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC. 59p. 2018.
- GUIMARÃES, N.C., Valadão, G.E.S e Peres, A.E.C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. **REM: R. Esc. Minas,** Ouro Preto, 65(4), 543-548 pp. 2012.
- LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo.** 2006. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- LEMOS, A. M. D. Á. **Efeito da adição de reagentes agregantes sobre características de pastas de minério de ferro.** Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Minas. 2017. 56 f. Centro federal de educação tecnológica de minas gerais unidade CEFET Araxá, 2017.
- 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.
- PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** 2013. 154 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.
- OLMEDO, C.G., MUÑOZ, J.A.B., GÓMEZ, A.R., GALINDO, D.G.L. Review of equipment for mine waste: from the conventional thickener to the deep cone for paste production. **DYNA Ingeniería e Industria (Bilbao),** v. 90, n. 4, p. 359-365, 2015.
- SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research,* v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.
- SAATY. T. L. **Método de Análise Hierárquica.** São Paulo: ed. McGrawHill, Makron, 1991. 367 p.

SCHOENBERGER, E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. *Resources Policy*, v. 49, p. 119–128, 2016.

SITORUS, F.; CILLIERS, J. J.; BRITO-PARADA, P. R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends. *Expert Systems with Applications*, v. 121, p. 393–417, 2019.

TESSAROTTO, C., **Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (*dry stacking*)**. In: Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas-MG, v. 3, p. 430-437, 2015.

WATSON et al, 2010. *A comparison of alternative tailings disposal methods — the promises and realities*. Mine Waste 2010 — A.B. Fourie and R.J. Jewell (eds). Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2010. ISBN 978-0-9806154-2-5.
https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1008_41_Watson

APÊNDICE D – QUESTIONÁRIO APLICADO PARA AVALIAÇÃO DO MÉTODO AHP

03/05/2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

Caro (a) participante, esta pesquisa faz parte da dissertação de mestrado de Bruna Ramos e é vinculada à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O estudo objetiva avaliar por meio do método de Analytic Hierarchy Process (AHP) qual é o método de disposição de rejeito mais sustentável para aplicação na mineração de ferro no Brasil.

Desse modo, consideram-se três cenários de métodos de disposição de rejeitos para a avaliação, sendo eles: (1) Disposição convencional de rejeitos em forma de polpa/disposição hidráulica (Barragem a montante, a jusante ou de linha de centro); (2) Disposição de rejeitos em forma de pasta (Rejeitos pastosos) e (3) Disposição de rejeitos filtrados (empilhamento a seco).

Portanto, gostaria de solicitar e agradecer a sua colaboração para responder ao questionário que será realizado de forma anônima.

***Obrigatório**

1. E-mail *

2. Termo de Consentimento Livre e Esclarecido *

Marque todas que se aplicam.

Diante do exposto, declaro que fui devidamente esclarecido (a) sobre a pesquisa e concedo a minha autorização na participação e publicação dos resultados obtidos por meio do questionário.

Pular para a pergunta 3

Formação

3. Qual é a sua formação? *

Marcar apenas uma oval.

- Engenheiro de Minas *Pular para a pergunta 5*
- Engenheiro Ambiental *Pular para a pergunta 5*
- Engenheiro Civil *Pular para a pergunta 5*
- Geólogo *Pular para a pergunta 5*
- Geofísico *Pular para a pergunta 5*
- Outros *Pular para a pergunta 4*

Formação

4. (Outros) Especifique: Qual é a sua formação? *

Experiência

5. Qual é o seu nível profissional? *

Marcar apenas uma oval.

- Júnior *Pular para a pergunta 7*
- Pleno *Pular para a pergunta 7*
- Sênior *Pular para a pergunta 7*
- Técnico *Pular para a pergunta 7*
- Supervisor *Pular para a pergunta 7*
- Gerente *Pular para a pergunta 7*
- Outros

Experiência

6. (Outros) Especifique: Qual é o seu nível profissional? *

Experiência

7. Qual é o seu tempo de experiência na profissão? *

Marcar apenas uma oval.

- Até 1 ano
- Entre 1 e 3 anos
- Entre 3 e 5 anos
- Entre 5 e 10 anos
- Acima de 10 anos.

Avaliação dos métodos de
disposição de rejeitos na
mineração de ferro

Objetivando identificar qual é o método de disposição de rejeitos mais sustentável para a mineração de ferro, julgue:

8. Para avaliação dos métodos de disposição de rejeitos, os critérios de impactos socioambientais são menos ou mais importantes do que os técnicos e econômicos? *

Marcar apenas uma oval.

- Os impactos socioambientais são **extremamente menos importantes** do que os técnicos e econômicos - 1/9
- Os impactos socioambientais são **muito fortemente menos importantes** do que os técnicos e econômicos- 1/7
- Os impactos socioambientais são **fortemente menos importantes** do que os técnicos e econômicos - 1/5
- Os impactos socioambientais são **levemente menos importantes** do que os técnicos e econômicos - 1/3
- Os impactos socioambientais **apresenta a mesma importantes** do que os técnicos e econômicos- 1/1
- Os impactos socioambientais são **levemente mais importantes** do que os técnicos e econômicos - 3/1
- Os impactos socioambientais são **fortementemais importantes** do que os técnicos e econômicos- 5/1
- Os impactos socioambientais são **muito fortemente mais importantes** do que os técnicos e econômicos 7/1
- Os impactos socioambientais são **extremamente mais importantes** do que os técnicos e econômicos - 9/1

9. Para avaliação dos métodos de disposição de rejeitos, os critérios de impactos socioambientais são menos ou mais importantes do que os aspectos de segurança e riscos operacionais? *

Marcar apenas uma oval.

- Os impactos socioambientais são **extremamente menos importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/9
- Os impactos socioambientais são **muito fortemente menos importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/7
- Os impactos socioambientais são **fortemente menos importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/5
- Os impactos socioambientais são **levemente menos importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/3
- Os impactos socioambientais **apresenta a mesma importantes** do que os de segurança e riscos operacionais- 1/1
- Os impactos socioambientais são **levemente mais importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 3/1
- Os impactos socioambientais são **fortemente mais importantes** do que os de segurança e riscos operacionais- 5/1
- Os impactos socioambientais são **muito fortemente mais importantes** do que os de segurança e riscos operacionais 7/1
- Os impactos socioambientais são **extremamente mais importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 9/1

10. Para avaliação dos métodos de disposição de rejeitos, os aspectos técnicos e econômicos são menos ou mais importantes do que os aspectos de segurança e riscos operacionais? *

Marcar apenas uma oval.

- Os aspectos técnicos e econômicos são **extremamente menos importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/9
- Os aspectos técnicos e econômicos são **muito fortemente menos importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/7
- Os aspectos técnicos e econômicos são **fortemente menos importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/5
- Os aspectos técnicos e econômicos são **levemente menos importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/3
- Os aspectos técnicos e econômicos **apresenta a mesma importância** do que os de segurança e riscos operacionais - 1/1
- Os aspectos técnicos e econômicos são **levemente mais importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 3/1
- Os aspectos técnicos e econômicos são **fortemente mais importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 5/1
- Os aspectos técnicos e econômicos são **muito fortemente mais importantes** do que os de segurança e riscos operacionais 7/1
- Os aspectos técnicos e econômicos são **extremamente mais importantes** do que os de segurança e riscos operacionais - 9/1

Avaliação dos critérios de impactos socioambientais nos métodos de disposição de rejeito

11. Para avaliação dos critérios de Impactos Socioambientais nos métodos de disposição de rejeito, **o impacto na água é menos ou mais importante do que o impacto no solo? ***

Marcar apenas uma oval.

- O impacto na água é **extremamente menos importante** que o impacto no solo - 1/9
- O impacto na água é **muito fortemente menos importantes** que o impacto no solo - 1/7
- O impacto na água é **fortemente menos importantes** que o impacto no solo - 1/5
- O impacto na água é **levemente menos importantes** que o impacto no solo - 1/3
- O impacto na água é **apresenta a mesma importância** que o impacto no solo - 1/1
- O impacto na água é **levemente mais importantes** que o impacto no solo - 3/1
- O impacto na água é **fortemente mais importantes** que o impacto no solo - 5/1
- O impacto na água é **muito fortemente mais importantes** que o impacto no solo - 7/1
- O impacto na água é **extremamente mais importantes** que o impacto no solo - 9/1

12. Para avaliação dos critérios de Impactos Socioambientais nos métodos de disposição de rejeito, **o impacto na água é menos ou mais importante do que os impactos no ar? ***

Marcar apenas uma oval.

- O impacto na água é **extremamente menos importante** do que o impacto no ar - 1/9
- O impacto na água é **muito fortemente menos importante** do que o impacto no ar - 1/7
- O impacto na água é **fortemente menos importante** do que o impacto no ar - 1/5
- O impacto na água é **levemente menos importante** do que o impacto no ar - 1/3
- O impacto na água é **apresenta a mesma importância** do que o impacto no ar - 1/1
- O impacto na água é **levemente mais importante** do que o impacto no ar - 3/1
- O impacto na água é **fortemente mais importante** do que o impacto no ar - 5/1
- O impacto na água é **muito fortemente mais importante** do que o impacto no ar - 7/1
- O impacto na água é **extremamente mais importante** do que o impacto no ar - 9/1

13. Para avaliação dos critérios de impactos socioambientais nos métodos de disposição de rejeito, **o impacto no solo é menos ou mais importante do que os impactos no ar?** *

Marcar apenas uma oval.

- O impacto no solo é **extremamente menos importante** do que o impacto no ar - 1/9
- O impacto no solo é **muito fortemente menos importante** do que o impacto no ar - 1/7
- O impacto no solo é **fortemente menos importante** do que o impacto no ar - 1/5
- O impacto no solo é **levemente menos importante** do que o impacto no ar - 1/3
- O impacto no solo é **apresenta a mesma importância** do que o impacto no ar - 1/1
- O impacto no solo é **levemente mais importante** do que o impacto no ar - 3/1
- O impacto no solo é **fortemente mais importante** do que o impacto no ar - 5/1
- O impacto no solo é **muito fortemente mais importante** do que o impacto no ar - 7/1
- O impacto no solo é **extremamente mais importante** do que o impacto no ar - 9/1

Avaliação dos critérios técnicos e econômicos

14. Na avaliação dos critérios técnicos e econômicos nos método de disposição de rejeitos, **o custo para implantação/investimento inicial (CAPEX) é menos ou mais importante do que o custo operacional (OPEX)?** *

Marcar apenas uma oval.

- O CAPEX é **extremamente menos importante** do que o custo OPEX - 1/9
- O CAPEX é **muito fortemente menos importante** do que o custo OPEX - 1/7
- O CAPEX é **fortemente menos importante** do que o custo OPEX - 1/5
- O CAPEX é **levemente menos importante** do que o custo OPEX - 1/3
- O CAPEX é **apresenta a mesma importância** que o custo OPEX- 1/1
- O CAPEX é **levemente mais importante** do que o custo OPEX - 3/1
- O CAPEX é **fortemente mais importante** do que o custo OPEX - 5/1
- O CAPEX é **muito fortemente mais importante** do que o custo OPEX -7/1
- O CAPEX é **extremamente mais importante** do que o custo OPEX - 9/1

15. Na avaliação dos critérios técnicos e econômicos, os **custo para implantação (CAPEX)** de um método de disposição de rejeito é menos ou mais importante do que os **aspectos regulatórios (Legislações)**? *

Marcar apenas uma oval.

- O CAPEX é **extremamente menos importante** do que os aspectos regulatórios - 1/9
- O CAPEX é **muito fortemente menos importante** do que os aspectos regulatórios- 1/7
- O CAPEX é **fortemente menos importante** do que os aspectos regulatórios - 1/5
- O CAPEX é **levemente menos importante** do que os aspectos regulatórios - 1/3
- O CAPEX é **apresenta a mesma importância** do que os aspectos regulatórios- 1/1
- O CAPEX é **levemente mais importante** do que os aspectos regulatórios- 3/1
- O CAPEX é **fortemente mais importante** do que os aspectos regulatórios - 5/1
- O CAPEX é **muito fortemente mais importante** do que os aspectos regulatórios -7/1
- O CAPEX é **extremamente mais importante** do que os aspectos regulatórios- 9/1

16. Na avaliação dos critérios técnicos e econômicos, o **custo operacional (OPEX)** para manutenção dos métodos de disposição de rejeitos é menos ou mais importante do que os **aspectos regulatórios (Legislações)**? *

Marcar apenas uma oval.

- O custo OPEX é **extremamente menos importante** que os aspectos regulatórios - 1/9
- O custo OPEX é **muito fortemente menos importante** que os aspectos regulatórios- 1/7
- O custo OPEX é **fortemente menos importante** que os aspectos regulatórios - 1/5
- O custo OPEX é **levemente menos importante** que os aspectos regulatórios - 1/3
- O custo OPEX **apresenta a mesma importância** os aspectos regulatórios- 1/1
- O custo OPEX é **levemente mais importante** que os aspectos regulatórios- 3/1
- O custo OPEX é **fortemente mais importante** que os aspectos regulatórios - 5/1
- O custo OPEX é **muito fortemente mais importante** que os aspectos regulatórios -7/1
- O custo OPEX é **extremamente mais importante** que os aspectos regulatórios- 9/1

Avaliação dos critérios de segurança e riscos operacionais

17. Na avaliação dos critérios de segurança e riscos operacionais da disposição de rejeitos, **os riscos para a empresa** são menos ou mais importantes do que os **riscos para os trabalhadores?** *

Marcar apenas uma oval.

- Os riscos para a empresa são **extremamente menos importantes** do que para os trabalhadores 1/9
- Os riscos para a empresa são **muito fortemente menos importante** do que para os trabalhadores - 1/7
- Os riscos para a empresa são **fortemente menos importante** do que para os trabalhadores - 1/5
- Os riscos para a empresa são **levemente menos importante** do que para os trabalhadores - 1/3
- Os riscos para a empresa **apresentam a mesma importância** do que para os trabalhadores - 1/1
- Os riscos para a empresa são **levemente mais importante** do que para os trabalhadores - 3/1
- Os riscos para a empresa são **fortemente mais importante** do que para os trabalhadores - 5/1
- Os riscos para a empresa são **muito fortemente mais importante** do que para os trabalhadores - 7/1
- Os riscos para a empresa são **extremamente mais importante** do que para os trabalhadores - 9/1

18. Na avaliação de segurança e riscos operacionais, **os riscos para a empresa** são menos ou mais importantes do que os **riscos para a sociedade**? *

Marcar apenas uma oval.

- Os riscos para a empresa são **extremamente menos importantes** que para a sociedade 1/9
- Os riscos para a empresa são **muito fortemente menos importante** do que para a sociedade - 1/7
- Os riscos para a empresa são **fortemente menos importante** do que para a sociedade - 1/5
- Os riscos para a empresa são **levemente menos importante** do que para a sociedade - 1/3
- Os riscos para a empresa **apresentam a mesma importância** do que para a sociedade - 1/1
- Os riscos para a empresa são **levemente mais importante** do que para a sociedade - 3/1
- Os riscos para a empresa são **fortemente mais importante** do que para a sociedade - 5/1
- Os riscos para a empresa são **muito fortemente mais importante** do que para a sociedade - 7/1
- Os riscos para a empresa são **extremamente mais importante** do que para a sociedade - 9/1

19. Na avaliação de segurança e riscos operacionais, **os riscos para os trabalhadores** são menos ou mais importantes do que **os riscos para a sociedade?** *

Marcar apenas uma oval.

- Os riscos para os trabalhadores são **extremamente menos importantes** do que para a sociedade 1/9
- Os riscos para os trabalhadores são **muito fortemente menos importante** do que para a sociedade - 1/7
- Os riscos para os trabalhadores são **fortemente menos importante** do que para a sociedade - 1/5
- Os riscos para os trabalhadores são **levemente menos importante** do que para a sociedade - 1/3
- Os riscos para os trabalhadores **apresentam a mesma importância** do que para a sociedade - 1/1
- Os riscos para os trabalhadores são **levemente mais importante** do que para a sociedade - 3/1
- Os riscos para os trabalhadores são **fortemente mais importante** do que para a sociedade - 5/1
- Os riscos para os trabalhadores são **muito fortemente mais importante** do que para a sociedade - 7/1
- Os riscos para os trabalhadores são **extremamente mais importante** do que para a sociedade - 9/1

Avaliação dos subcritérios de impactos socioambientais em relação as alternativas dos métodos de disposição de rejeitos

20. Comparando os métodos de disposição convencional de rejeitos em forma de polpa (Barragem convencional) e disposição de rejeitos pastosos, **o impacto à água é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** à água do que o de rejeitos pastosos- 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** à água do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** à água do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** à água do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** à água que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** à água do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** à água do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** à água do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** à água que o de rejeitos pastosos- 9/1

21. Comparando os métodos de disposição de rejeitos convencionais (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **o impacto à água é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** à água do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** à água que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** à água do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** à água que o de rejeitos filtrados - 9/1

22. Comparando os métodos de disposição de rejeitos pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **o impacto à água é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastosos é **extremamente menos impactante** à água do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito pastosos é **muito fortemente menos impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastosos é **fortemente menos impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastosos é **levemente menos impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastosos possui a **mesma importância de impactos** à água que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito pastosos é **levemente mais impactante** à água do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito pastosos é **fortemente mais impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastosos é **muito fortemente mais impactante** à água do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastosos é **extremamente mais impactante** à água que o de rejeitos filtrados - 9/1

121

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

23. Comparando os método de disposição de rejeitos convencional (polpa) e disposição de rejeitos pastosos, **o impacto no solo é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos pastosos- 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** ao solo que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** ao solo que o de rejeitos pastosos - 9/1

121

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

24. Comparando os método de disposição de rejeitos convencional (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **o impacto no solo é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** ao solo que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** ao solo que o de rejeitos filtrados - 9/1

25. Comparando os métodos de disposição de rejeitos pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **o impacto no solo é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente menos impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastoso possui a **mesma importância de impactos** ao solo que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente mais impactante** ao solo do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente mais impactante** ao solo que o de rejeitos filtrados - 9/1

26. Comparando os métodos de disposição de rejeitos convencional (polpa) e disposição de rejeitos pastosos, **o impacto no ar é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** ao ar do que o de rejeitos pastosos - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** ao ar do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** ao ar do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** ao ar do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** ao ar que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** ao ar do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** ao ar do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** ao ar do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** ao ar que o de rejeitos pastosos - 9/1

27. Comparando os métodos de disposição de rejeitos convencionais (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **o impacto no ar é: ***

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** no ar que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente mais impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 9/1

28. Comparando os métodos de disposição de rejeitos pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **o impacto no ar é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente menos impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente menos impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente menos impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente menos impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastoso possui a **mesma importância de impactos** no ar que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente mais impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente mais impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente mais impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente mais impactante** no ar do que o de rejeitos filtrados - 9/1

Avaliação dos subcritérios técnicos e econômicos em relação as alternativas dos métodos de disposição de rejeitos.

121

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

29. Comparando os métodos de disposição de rejeitos convencional (polpa) e disposição de rejeitos pastosos, **o custo de implantação (CAPEX) é: ***

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos pastosos - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** ao CAPEX que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** ao CAPEX que o de rejeitos pastosos - 9/1

121

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

30. Comparando os métodos de disposição de rejeitos convencional (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **o custo de implantação (CAPEX) é: ***

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** ao CAPEX que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** ao CAPEX que o de rejeitos filtrados - 9/1

121

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

31. Comparando os métodos de disposição de rejeitos pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **o custo de implantação (CAPEX) é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente menos impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastoso possui a **mesma importância de impactos** ao CAPEX que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente mais impactante** ao CAPEX do que o de rejeitos filtrados - 9/1

121

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

32. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos pastosos, **o custo operacional (OPEX) para manutenção dos processos é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos pastosos- 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** ao OPEX que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** ao OPEX que o de rejeitos pastosos - 9/1

121

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

33. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **o custo operacional (OPEX) para manutenção dos processos é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** ao OPEX que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** ao OPEX que o de rejeitos filtrados - 9/1

121

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

34. Comparando os métodos de disposição de rejeito pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **o custo operacional (OPEX) para manutenção dos processos é:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente menos impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastoso possui a **mesma importância de impactos** ao OPEX que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente mais impactante** ao OPEX do que o de rejeitos filtrados - 9/1

35. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos pastosos, **os aspectos regulatórios (legislações) para implantação e manutenção são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos pastosos - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** quanto aos aspectos regulatórios que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios que o de rejeitos pastosos - 9/1

36. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **os aspectos regulatórios (legislações) para implantação e manutenção são: ***

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** quanto aos aspectos regulatórios que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios que o de rejeitos filtrados - 9/1

37. Comparando os métodos de disposição de rejeitos pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **os aspectos regulatórios (legislações) para implantação e manutenção são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente menos impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastoso possui a **mesma importância de impactos** quanto aos aspectos regulatórios que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente mais impactante** quanto aos aspectos regulatórios do que o de rejeitos filtrados - 9/1

Avaliação dos subcritérios de segurança e riscos em relação as alternativas dos métodos de disposição de rejeitos.

03/05/2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

38. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos pastosos, **os riscos à empresa são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos pastosos - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** em relação ao riscos à empresa que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** em relação ao riscos à empresa que o de rejeitos pastosos - 9/1

03/05/2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

39. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **os riscos à empresa são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** em relação ao riscos à empresa que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** em relação ao riscos à empresa que o de rejeitos filtrados - 9/1

2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

40. Comparando os métodos de disposição de rejeitos pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **os riscos à empresa são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente menos impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastoso possui a **mesma importância de impactos** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente mais impactante** em relação ao riscos à empresa do que o de rejeitos filtrados - 9/1

2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

41. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos pastosos, **os riscos para os trabalhadores são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos pastosos - 9/1

5/2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

42. Comparando os método de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **os riscos para os trabalhadores são: ***

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** em relação ao riscos para os trabalhadores que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores que o de rejeitos filtrados - 9/1

/2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

43. Comparando os método de disposição de rejeitos pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **os riscos para os trabalhadores são: ***

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados- 1/9
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente menos impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastoso possui a **mesma importância de impactos** em relação ao riscos para os trabalhadores que o de rejeitos filtrados- 1/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados- 3/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortementemais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente mais impactante** em relação ao riscos para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 9/1

/2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

44. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos pastosos, **os riscos para a sociedade são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos pastosos - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos pastosos - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos pastosos - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos pastosos - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** para a sociedade que o de rejeitos pastosos - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos pastosos - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos pastosos - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos pastosos - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** para a sociedade que o de rejeitos pastosos - 9/1

/2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

45. Comparando os métodos de disposição de rejeito convencional (polpa) e disposição de rejeitos filtrados, **os riscos para a sociedade são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito convencional é **extremamente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito convencional possui a **mesma importância de impactos** para a sociedade que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **levemente mais impactante** para a sociedade para os trabalhadores do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **fortemente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito convencional é **muito fortemente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito convencional **extremamente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 9/1

03/05/2021

Avaliação dos métodos de disposição de rejeito no setor da mineração de ferro no Brasil.

46. Comparando os métodos de disposição de rejeitos pastosos e disposição de rejeitos filtrados, **os riscos para a sociedade são:** *

Marcar apenas uma oval.

- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/9
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/7
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/5
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente menos impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/3
- O método de disposição de rejeito pastoso possui a **mesma importância de impactos** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 1/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **levemente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 3/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **fortemente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 5/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **muito fortemente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 7/1
- O método de disposição de rejeito pastoso é **extremamente mais impactante** para a sociedade do que o de rejeitos filtrados - 9/1

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários