

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
ENGENHARIA DE MINAS

LARISSA CAROLINE SILVA

**DISPOSIÇÃO DE REJEITOS GRANULARES VIA DRY STACKING: UMA
ALTERNATIVA À DISPOSIÇÃO EM BARRAGENS**

ARAXÁ-MG

2021

LARISSA CAROLINE SILVA

**DISPOSIÇÃO DE REJEITOS GRANULARES VIA DRY STACKING: UMA
ALTERNATIVA À DISPOSIÇÃO EM BARRAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador(a): M.Sc. Leonardo Vinícius Paixão Daciolo.

Coorientador(a): Dr.(a) Michelly dos Santos Oliveira.

ARAXÁ-MG

2021

RESUMO

O crescente aumento da demanda advinda da indústria mineira, tem como consequência a geração de grandes quantidades de rejeitos provenientes do processo de beneficiamento mineral. A disposição de tais materiais é uma questão muito discutida nos dias de hoje, visto que o método comumente utilizado é o convencional, onde os rejeitos são dispostos em barragens de contenção. Porém, tais estruturas são altamente complexas, e demandam monitoramentos constantes, durante a sua fase de construção, operação e descaracterização. O Brasil presenciou nos últimos anos, dois grandes desastres envolvendo barragens de rejeitos, nas cidades de Mariana MG e Brumadinho MG, que causaram danos irreparáveis, como a morte de centenas de pessoas e impactos ambientais, sociais e econômicos incalculáveis. Visto isso, o rigor para a construção e monitoramento de barragens se mostra crescente no país, visando evitar possíveis novos desastres. Métodos alternativos para a disposição de rejeitos estão sendo cada vez mais estudados, onde tem se destacado a filtragem dos rejeitos logo após a etapa de espessamento e construção de pilhas a seco para a alocação desses materiais (*dry stacking*). Considerando a relevância do tema na atualidade, o presente trabalho objetiva realizar um estudo conceitual acerca da construção de pilhas de disposição de rejeitos filtrados, abordando características construtivas, projetivas e operacionais, frente aos diferentes métodos de disposição e exemplos de caso de sua aplicação, através de informações presentes na literatura. A partir dos resultados observados, destacam-se as diferentes características dos métodos de disposição de rejeitos, quanto a área de ocupação, características dos rejeitos, processos executivos e operacionais. Quanto à filtragem de rejeitos, esta possui como principais vantagens o reaproveitamento da água utilizada no processo, menor área de disposição, maior segurança e controle no processo de implantação e operação e menor impacto ambiental quando comparados ao método convencional. Empresas como a Nexa Resources, AngloGold, Ashanti, Hindalco e CBMM já adotaram ou tem projetos para em breve estocar rejeitos em pilhas a seco, cujas experiências evidenciam a potencialidade e avanço deste método no meio técnico.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração. Filtragem de rejeito. Pilhas de rejeito. Projeto e operação. Geotecnia.

ABSTRACT

The increasing demand arising from the mining industry has resulted in the generation of large amounts of tailings from the mineral processing process. The disposal of such materials is a much-discussed issue nowadays since the method commonly used is the conventional one, where the tailings are disposed of in containment dams. However, such structures are highly complex, and require constant monitoring, during their construction, operation, and de-characterization phase. In recent years, Brazil has witnessed two major disasters involving tailings dams, in the cities of Mariana MG and Brumadinho MG, which caused irreparable damage, such as the death of hundreds of people and incalculable environmental, social and economic impacts. Because of this, the rigor for the construction and monitoring of dams is increasing in the country to avoid possible new disasters. Alternative methods for the disposal of tailings are being studied more and more, where tailings filtering has been highlighted right after the thickening stage and construction of dry piles for the allocation of these materials (dry stacking). Considering the relevance of the topic today, this work aims to carry out a conceptual study about the construction of filtered tailings disposal piles, addressing constructive, projective, and operational characteristics, because of the different disposal methods and case examples of their application, through of information present in the literature. From the observed results, the different characteristics of the tailings disposal methods stand out, such as the occupation area, tailings characteristics, executive and operational processes. As for the filtering of tailings, this has its main advantages: the reuse of the water used in the process, smaller disposal area, greater safety and control in the implementation and operation process, and less environmental impact compared to the conventional method. Companies such as Nexa Resources, AngloGold, Ashanti, Hindalco, and CBMM have already adopted or had projects to soon store tailings in dry piles, whose experiences show the potential and advancement of this method in the technical environment.

KEYWORDS: Mining. tailings filtration. Tailing piles. Design and operation. Geotechnics.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente á Deus, por ter me concedido a oportunidade da realização de um sonho, que hoje se concretiza. Agradeço pela dádiva de poder viver momentos incríveis, ao longo desses 5 anos passados e pela força e superação de desafios ao longo da minha caminhada.

Agradeço a minha família, por todo amor e incentivo, ao meu pai Antônio, meu irmão Tiago, meu namorado Vitor e de forma muito especial a minha mãe Belmira, que sempre acreditou nos meus sonhos, lutou minhas lutas ao meu lado, e hoje celebra essa vitória comigo. Sem ela, nada disso teria sentido. Obrigado mãe, por em todos os momentos de minha vida, enxergar o melhor de mim e me apoiar na conquista dos meus objetivos, te amo incondicionalmente.

A todos os professores do CEFET-MG unidade Araxá, por todos os conhecimentos repassados ao longo do curso, por toda dedicação e exemplo, que com certeza irei levar para sempre em minha trajetória profissional e pessoal. Agradeço em especial a professora Michelly e ao professor Francisco, os quais me acompanham há muito tempo, desde o ensino técnico. Professores como vocês nos motivam a seguir a caminhada acadêmica, como foi o meu caso, e de muitos outros alunos.

Agradeço ao meu professor orientador Leonardo, por todo apoio e dedicação durante a realização deste trabalho, por se fazer sempre presente e disposto a me ajudar. Gostaria de expressar minha gratidão por todos os conhecimentos repassados e por toda compreensão.

Por fim, agradeço aos meus amigos, presentes que o CEFET me deu, em especial a Amanda, Bárbara, Daiane, Hênila, Guilherme e Milena que embarcaram junto comigo nessa jornada. Sonhamos juntos, por 5 anos, o mesmo sonho. Superamos, juntos muitos desafios, e hoje, alcançamos juntos, mais essa vitória. Minha sincera gratidão por todo companheirismo e amizade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuições granulométricas de rejeitos provenientes do Quadrilátero Ferrífero.	15
Figura 2.3: Esquema ilustrativo de um filtro prensa	18
Figura 2.4: Desenho esquemático de um filtro de disco.....	20
Figura 2.5: Filtro de tambor rotativo	21
Figura 2.6: Representação esquemática de um filtro plano.....	22
Figura 2.7: Filtro do tipo correia em operação	23
Figura 3.1: Pesquisas sobre o tema Dry Stacking - Scopus	26
Figura 3.2: Áreas mais pesquisadas - Science Direct.....	27
Figura 4.1: Tipos de rejeito, tensão de escoamento e tipos de depósitos usados para disposição	29
Figura 4.2: Tipos de rejeito, de acordo com o equipamento utilizado para desaguamento e meio de transporte dos mesmos.....	30
Figura 4.3: Elementos construtivos de uma barragem de rejeitos.....	31
Figura 4.4: Represamento em anel, (a) simples, (b) múltiplos.....	32
Figura 4.5: Método de alteamento a montante	33
Figura 4.6: Desvantagens do método de alteamento a montante (a) linha freática elevada; (b) superfície provável de ruptura passa pelo reservatório; (c) risco de ruptura por piping	34
Figura 4.7: Método de alteamento a jusante.....	35
Figura 4.8: Método de alteamento por linha de centro.....	36
Figura 4.9: Disposição de rejeitos de forma concomitante à extração de minério.....	37
Figura 4.10: Disposição de rejeitos em mina já exaurida.....	37
Figura 4.11: Preenchimento de abertura subterrânea com backfill	38
Figura 4.12: Bacias de rejeitos construídas no depósito de estéril	40
Figura 4.13: Disposição de rejeito em camadas finas no depósito.....	40
Figura 4.14: Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril.....	41
Figura 4.15: Fases do método de disposição subaérea. a) Período de enchimento: sedimentação e adensamento, b) Período de espera: adensamento e ressecamento	42
Figura 4.16: Empilhamento Drenado do Xingu	44
Figura 4.17: Pilha de rejeitos filtrados (Dry Stack).....	45
Figura 5.1: Zonas de pilha de rejeitos.....	48
Figura 5.2: Porcentagem de sólidos x Tensão de cisalhamento de rejeitos.....	52

Figura 5.3: Linha do índice de vazios críticos.....	55
Figura 5.4: Relação entre a porosidade e a compressibilidade de rejeitos	56
Figura 5.5: (a) Pilhas em vale, (b) Pilhas transversais a um vale	59
Figura 5.6: (c) Pilhas de encosta; (d) Pilhas de crista.....	60
Figura 5.7: Pilha do tipo “Bolo de noiva”	60
Figura 5.8: Desenho esquemática de dreno de nascente	62
Figura 5.9: (a) Valetas de proteção de corte, Valeta de proteção de aterro.....	63
Figura 5.10: Descida d’água (a) corte, (b) aterro	64
Figura 5.11: Elementos dissipadores de energia	64
Figura 5.12: Croqui sem escala de sistemas de drenagem	66
Figura 5.13: (a) Esquema de instalação de um marco superficial, (b) Esquema de instalação de um inclinômetro.....	73
Figura 5.14: Desenho esquemático de um piezômetro do tipo “Casa Grande”	74
Figura 6.1: Rota de beneficiamento ITM I.....	78
Figura 6.2: Planta de filtragem da mina de Pau Branco	79
Figura 6.3: Baias onde o rejeito filtrado é descarregado	80
Figura 6.4: Vista aérea das estruturas de disposição de rejeitos na Vallourec	80
Figura 6.5: Bacia de contenção de finos próximo a pilha	81
Figura 6.6: Vista aérea das barragens da CSN na cidade de Congonhas MG.....	83
Figura 6.7: Cronograma de descaracterização das barragens pertencentes à CSN mineração nos próximos anos.....	83
Figura 6.8: Distribuição granulométrica do rejeito na alimentação da filtragem.....	84
Figura 6.9: Barragem Aroeira da Nexa Resources em Vazante MG.....	86
Figura 6.10: Pilha de disposição de rejeitos garrote.....	86
Figura 6.11: <i>Layout</i> final em 3D da pilha de rejeitos filtrados.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Principais classes de rejeito.....	14
Tabela 2.2: Classificação geoquímica de rejeitos.....	16
Tabela 2.3: Mecanismos de filtração.....	17
Tabela 2.4: Variáveis que interferem na taxa de filtração.....	24
Tabela 4.1: Relação estéril/rejeito x viabilidade da técnica de codisposição.....	39
Tabela 5.1: Ângulos de atrito de acordo com cada material.....	54
Tabela 5.2: Custos operacionais para diferentes técnicas de disposição de rejeitos.....	76
Tabela 5.3 - Custos operacional de uma pilha da empresa Nexa Resources - Unidade VazantCusto Variável.....	76
Tabela 6.1: Distribuição granulométrica dos rejeitos de flotação.....	87

SUMÁRIO

1	<i>Introdução</i>	11
1.1	Rejeitos de Mineração	11
1.2	Objetivos	12
2	<i>Revisão bibliográfica</i>	13
2.1	Rejeitos de mineração	13
2.1.1	Propriedades físicas	13
2.1.2	Propriedades geoquímicas	15
2.2	Filtragem de rejeitos	17
2.2.1	Filtros tipo prensa	18
2.2.2	Filtros a vácuo	19
2.2.3	Filtros de disco	19
2.2.4	Filtros de tambor	20
2.2.5	Filtro plano	21
2.2.6	Filtros de correias	22
2.3	Filtrabilidade	23
3	<i>Metodologia</i>	26
4	<i>Métodos de disposição de rejeitos</i>	28
4.1	Disposição convencional	30
4.2	Represamento	31
4.3	Métodos de alteamento	32
4.3.1	Método de montante	33
4.3.2	Método de jusante	34
4.3.3	Método de linha de centro	35
4.4	Disposição em cava à céu aberto	37
4.5	Codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis	39
4.6	Disposição subaérea	41
4.7	Empilhamento drenado	43
4.8	Empilhamento de rejeitos filtrados	44
4.9	Quadro comparativo	45
5	<i>Disposição de rejeitos filtrados</i>	47

5.1	Empilhamento e transporte de rejeitos filtrados	47
5.2	Caracterização do rejeito	48
5.2.1	Teor de umidade	49
5.2.2	Granulometria	52
5.2.3	Parâmetros de resistência	53
5.2.4	Estrutura física	54
5.3	Aspectos de projeto	56
5.3.1	Elementos integrantes	56
5.3.2	Geometria de pilhas	59
5.3.3	Sistemas de drenagem	61
5.4	Avaliação da estabilidade de taludes	66
5.4.1	Fatores causadores de instabilidade	68
5.4.2	Métodos de análise	69
5.5	Monitoramento e inspeção	72
5.6	Aspectos econômicos do rejeito filtrado	75
6	<i>Estudos de casos nacionais</i>	77
6.1.1	Mina Pau Branco	77
6.1.2	Mina Casa de Pedra	82
6.1.3	Nexa Resources - Unidade Vazante	85
7	<i>Conclusões</i>	89
8	<i>Referências bibliográficas</i>	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 REJEITOS DE MINERAÇÃO

A geração de resíduos é algo inerente ao processo de mineração como um todo, mais especificamente durante o beneficiamento mineral. Essa fase compreende a separação de minerais que possuem valor econômico agregado, daqueles que não são aproveitáveis no momento. Esse último material deve ser descartado ou depositado em locais adequados. A partir do século XX, diversos dispositivos legais em regiões do mundo inteiro, passaram a regulamentar por meio de legislações a gestão e manejo dos rejeitos gerados nas empresas mineradoras. Nesse contexto, a lei nº 12.305, implementada no Brasil em 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que define rejeitos como sendo: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010). Os rejeitos da mineração foram apresentados como sendo uma categoria de resíduo (art.13 inciso I, K da PNRS), devendo ter uma disposição final ambientalmente adequada esgotadas as possibilidades de reaproveitamento. Ademais, a PNRS prevê programas de prevenção e redução na geração de resíduos, além da destinação ambientalmente adequada para tais materiais gerados nas empresas mineradoras.

A disposição de rejeitos advindos da indústria mineral tem sido uma das questões mais discutidas nos dias de hoje no país. Atualmente, o método de disposição de rejeitos mais utilizado é o conhecido como método convencional, que consiste em construir grandes estruturas de terra denominadas barragens e tem como objetivo reter água e partículas sólidas. Essa opção de represamento exige a manutenção da integridade construtiva e geotécnica das estruturas, além do gerenciamento das grandes quantidades de água que são dispostas nas mesmas. Visto as duas grandes catástrofes envolvendo barragens de rejeitos que ocorreram nas cidades de Mariana (MG) e Brumadinho (MG) que causaram danos imensuráveis a todo o ecossistema que as cercavam, estão sendo cada vez mais estudados métodos alternativos para a disposição dos dejetos advindos das usinas de beneficiamento mineral.

Uma das alternativas que substitui o uso de barragens é a disposição de rejeito a seco (*dry stacking*), que consiste em receber o material filtrado com um teor de umidade pré determinado, de modo que o mesmo possa ser transportado via caminhões ou correia

transportadora. Após o transporte o material é depositado e compactado em pilhas densas e não saturadas (DAVIES, 2011). Essa pilha, em geral é autoportante, ou seja, não necessita da construção de uma estrutura com a função de retenção do material da pilha. São construídos sistemas de drenagem superficiais, de modo a garantir a segurança e estabilidade da pilha.

Atualmente a legislação de barragens vêm se tornando cada vez mais robusta, visto a complexidade de tais estruturas e os danos potenciais que as mesmas podem causar ao meio ambiente e a sociedade que a cerca. Visto isso, no âmbito ambiental, o empilhamento de rejeitos à seco traz ganhos no que tange aos padrões de segurança, conforto das comunidades vizinhas e melhor aproveitamento de áreas de disposição. Ainda segundo Guimarães et al. (2012) e *Mining Magazine* (2017) um dos grandes benefícios da filtragem de rejeitos para a disposição dos mesmos em pilhas é a promoção do aumento de recuperação de água de processo da planta de beneficiamento, reduzindo, assim, o consumo de água nova.

Apesar de o tema de empilhamento de rejeito ser relativamente atual, alguns trabalhos datam da década de 1990. Porém, o tema vem tomando relevância nacional de maneira muito rápida, uma vez que empresas que são referência em mineração no país como a Usiminas, CBMM e Nexa Resources estão adotando essa técnica. O objetivo principal do presente trabalho é discutir os principais parâmetros que devem ser considerados para o projeto de uma pilha de rejeitos, como a metodologia construtiva, sistema de drenagem, zonas estruturais, estudos geotécnicos, análises de estabilidade e rotinas de operação das estruturas.

1.2 OBJETIVOS

Considerando a necessidade da difusão de técnicas alternativas às disposições finais de rejeitos, este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo conceitual da técnica de disposição de rejeitos granulares filtrados. São objetivos específicos deste trabalho:

- Compreender as diferenças executivas e conceituais dos diferentes métodos de disposição de rejeitos;
- Identificar as características, potencialidades, desafios e custos deste método;
- Realizar estudo conceitual do dimensionamento de uma pilha de rejeitos a seco, escolhendo a melhor metodologia construtiva, sistema de drenagem e zonas estruturais;
- Observar sua difusão no meio técnico e experiências atuais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REJEITOS DE MINERAÇÃO

O processo de beneficiamento de minérios consiste em concentrar um ou mais minerais de interesse chamados de minerais-minérios, separando-os dos materiais que não possuem comercialização. Tais materiais ditos sem aproveitamento comercial, são chamados de rejeitos e saem da planta de processamento mineral, quase sempre, em forma de polpa, exceto naqueles processos que não é utilizada água durante a concentração, que basicamente constituem a minoria (CHAVES, 2013). Devido à grande quantidade de água que os rejeitos em forma de polpa apresentam, esse material possui grande mobilidade e baixa ou inexistente resistência ao cisalhamento, o que impacta diretamente nas características de estabilidade e na escolha do método de disposição final.

A metodologia convencional e mais usual para a disposição de rejeitos são as barragens (ALVES, 2020). Tais estruturas exigem grandes áreas de construção e apresentam elevados índices de impactos ambientais. Por isso, as empresas que são adeptas a essa metodologia apresentam maiores dificuldades no que tange a liberação de licenciamentos ambientais de implantação e operação de barragens (SOUSA; SAMPAIO, 2017). Além disso, a proximidade das mesmas com áreas urbanas tem evidenciado a necessidade de se buscarem outras alternativas para a disposição de rejeitos (GUIMARÃES et al., 2012).

A disposição de rejeitos deve apresentar condições satisfatórias de segurança, tanto ambiental como pessoal, viabilidade econômica e seguimento leis e normas estabelecidas pelos órgãos competentes. Segundo Nunes (2014), fatores técnicos e de segurança devem ser analisados da mesma forma que os fatores econômicos na hora da escolha do método de disposição de rejeitos, pois caso isso não ocorra, além dos custos se tornarem demasiadamente altos, a segurança pode se tornar comprometida. O método convencional de disposição de rejeitos tem estado em questionamento na atualidade, sobretudo decorrente da ruptura de duas grandes barragens de rejeitos de mineração, nas cidades de Brumadinho e Mariana, nos últimos 5 anos, que causaram danos incalculáveis ao meio ambiente, sociedade e economia, além de terem provocado a morte de centenas de pessoas (BITTENCOURT, 2020).

2.1.1 Propriedades físicas

Enquanto material de engenharia, os rejeitos necessitam de caracterização de suas propriedades a fim de melhor identificar o comportamento e as características que estes

materiais apresentarão. Dependendo do tipo de minério que é alimentado na usina e do processamento que o mesmo passa, durante as operações de beneficiamento, os rejeitos podem variar desde materiais arenosos, até granulometrias mais finas como das argilas. Além disso, esse material pode apresentar um comportamento plástico, ou não plástico (ARAÚJO, 2006). Portanto, para se selecionar a melhor forma de disposição de rejeitos, é necessária a realização de uma análise completa do processamento do material e das propriedades físicas do mesmo. Segundo Alves (2020), as propriedades mais relevantes dentro desse tema são a distribuição granulométrica, a massa específica, a reologia, a plasticidade, a consolidação, e a condutividade hidráulica. A Tabela 2.1 apresenta a classificação granulométrica de rejeitos (MEND, 2017).

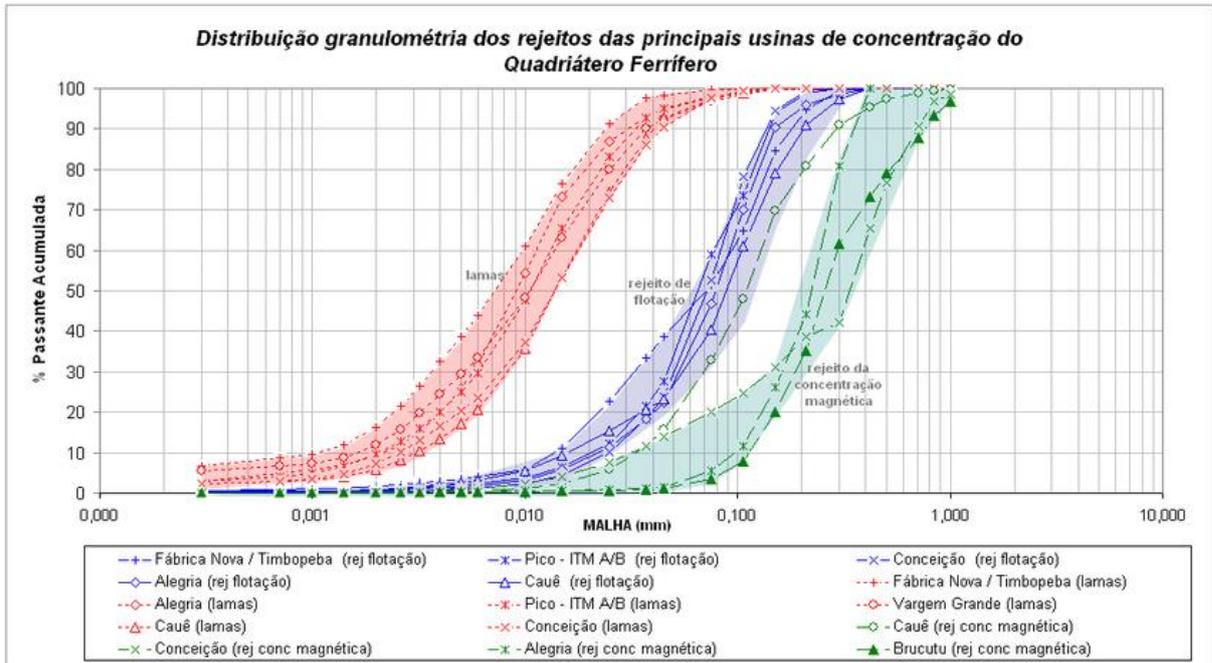
Tabela 2.1- Principais classes de rejeito

Classes de rejeitos	Símbolo	Descrição	Exemplos
Rejeitos granulares (<i>Coarse tailings</i>)	CT	Areia siltosa, não plástica	Sal, areias minerais, rejeito grosseiro de carvão mineral, material arenoso de minério de ferro
Rejeitos de rocha dura (<i>Hard rock tailings</i>)	HRT	Silte arenoso	Cobre, sulfeto, níquel, ouro
Rejeitos de rochas alteradas (<i>Altered rock tailings</i>)	ART	Silte arenoso, vestígio de partículas de argila	Cobre pórfiro com alteração hidrotermal, rocha oxidada
Rejeitos Finos (<i>Fine tailings</i>)	FT	Silte, com vestígio de partículas de argila	Rejeitos finos de carvão, resíduo de bauxita (lama vermelha)
Rejeitos ultrafinos (<i>Ultra fine tailings</i>)	UFT	Argila siltosa, alta plasticidade, densidade e condutividade hidráulica muito baixas	Areia betuminosa (<i>mature fine tailings</i> -MFT), finos de fosfato, alguns finos de kimberlito e de carvão

Fonte: Mend, 2017

A distribuição granulométrica de um rejeito é influenciada pela mineralogia do minério que foi beneficiado, bem como pelo grau de cominuição que o mesmo foi submetido e a presença de partículas finas em sua composição. Quando os rejeitos possuem granulometria abaixo de 0,074 mm, são denominados de lama e quando possuem granulometria acima dessa faixa, são chamados de rejeitos granulares (PORTES, 2013). A Figura 2.1 mostra as faixas granulométricas de diferentes tipos de rejeitos do quadrilátero ferrífero, como lamas, rejeitos de flotação e da concentração magnética.

Figura 2.1 - Distribuições granulométricas de rejeitos provenientes do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Guimarães, 2011

2.1.2 Propriedades geoquímicas

De acordo com Mend (2017), as propriedades geoquímicas dos rejeitos e da água presente nos poros, influenciam nos requisitos necessários para a gestão e tratamento de águas dos depósitos. Alguns fatores devem ser levados em conta, no momento de se fazer a classificação geoquímica de rejeitos, sendo eles: tipos e concentração de sulfetos e minerais com potencial para contaminação da água; composição química do minério, tipo do depósito, geologia local; rotas de processamento e tratamento mineral na planta de beneficiamento, assim como reagentes utilizados nesse processo; método de disposição de rejeitos, tamanho de partículas e segregação mineral; mudanças potenciais nas propriedades biogeoquímicas e físicas do rejeito por meio de interações com a atmosfera e agentes biológicos, que podem causar por exemplo a dissolução de minerais e o desenvolvimento de camadas duras e drenagem de rejeitos associada ao longo tempo. A tabela 2 apresenta uma classificação geoquímica geral de rejeitos, através exemplos de minas que contém os respectivos tipos de rejeitos descrito.

Tabela 2.2 - Classificação geoquímica de rejeitos

Tipo de rejeito	Descrição	Exemplos
Ácido	Os rejeitos já são ácidos e produzem drenagem ácida e elevada lixiviação de metais	Copper Cliff Central Tailings, Kidd Creek Mine (cobre-zinco)
Potencialmente Ácido	Os rejeitos contêm sulfetos, são potencialmente ácidos e prevê-se que gerem drenagem ácida e lixiviação de metais caso sejam expostos a condições meteorológicas aeróbicas. Esta classificação também se aplica aos casos em que o início da lixiviação é incerto	Kemess South Mine (ouro-cobre); Canadian Malartic Mine (ouro); Suncor (areia betuminosa); Green's Creek Mine (polimetálica)
Quase neutro ou pH básico com alta lixiviação metálica (Lixiviação metálica sulfúrica)	Os rejeitos contêm sulfetos, mas prevê-se que produzam drenagem de pH quase neutro ou básico (acontece neutralização suficiente). Espera-se a ocorrência de lixiviação metálica ou não-metálica, por reações de oxidação, em níveis acima dos limites regulatórios.	Snap Lake Mine (diamantes)
Quase neutro ou pH básico com alta lixiviação metálica (Lixiviação não sulfúrica)	Os rejeitos contêm pouco ou nenhum sulfeto e existe a previsão de que produzam drenagem de pH quase neutro ou básico. Espera-se a ocorrência de lixiviação metálica ou não-metálica a partir da dissolução mineral em nível acima dos limites regulatórios.	Colonsay Mine (potássio)
Baixa reatividade	Os rejeitos não produzem ou não existe a previsão de que produzam drenagem ácida ou lixiviação de metais em nível acima dos limites regulatórios.	

Fonte: Alves, 2020

2.2 FILTRAGEM DE REJEITOS

A filtragem é um processo de separação sólido-líquido que acontece por meio da passagem dos sólidos contidos em uma polpa mineral através de um meio filtrante que é um material poroso, como um tecido. Essa passagem é feita por meio da aplicação de uma força externa ao sistema, que pode ser de diversas naturezas como: gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação, dependendo do tipo de filtro utilizado. A tabela 3 apresenta os principais mecanismos de filtragem, bem como suas especificações e os modelos de filtros associados a cada tipo.

Tabela 2.3 - Mecanismos de filtragem

Tipo de rejeito	Características	Modelos de filtros
Filtragem á vácuo	Criada uma pressão negativa abaixo do meio filtrante	Filtro de tambor, filtro de disco convencional, filtro horizontal de mesa, filtro horizontal de esteira
Filtragem sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, Filtro prensa vertical
Filtragem centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters
Filtragem Hiperbárica	A partir da combinação de vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico
Filtragem capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec

Fonte: Guimarães, 2011

No caso da filtragem a vácuo é aplicada uma pressão negativa abaixo do meio filtrante, enquanto na filtragem sob pressão a polpa é forçada a ir de encontro com o meio filtrante, através de uma pressão positiva que age na polpa. Alguns processos de filtragem combinam as forças de vácuo e de pressão, chamada de filtragem hiperbárica. Já em outros casos a filtragem pode acontecer a partir da ação dos capilares de meios cerâmicos porosos combinados com a aplicação de vácuo, conhecida como filtragem capilar (GUIMARÃES, 2011).

A escolha do equipamento de filtragem a ser utilizado depende de fatores econômicos do processo e também de características do material a ser filtrado, como viscosidade, densidade e reatividade química do fluído; distribuição granulométrica, dimensões e formas das partículas sólidas; tendência a deformabilidade e tendência a floculação; concentração da suspensão de

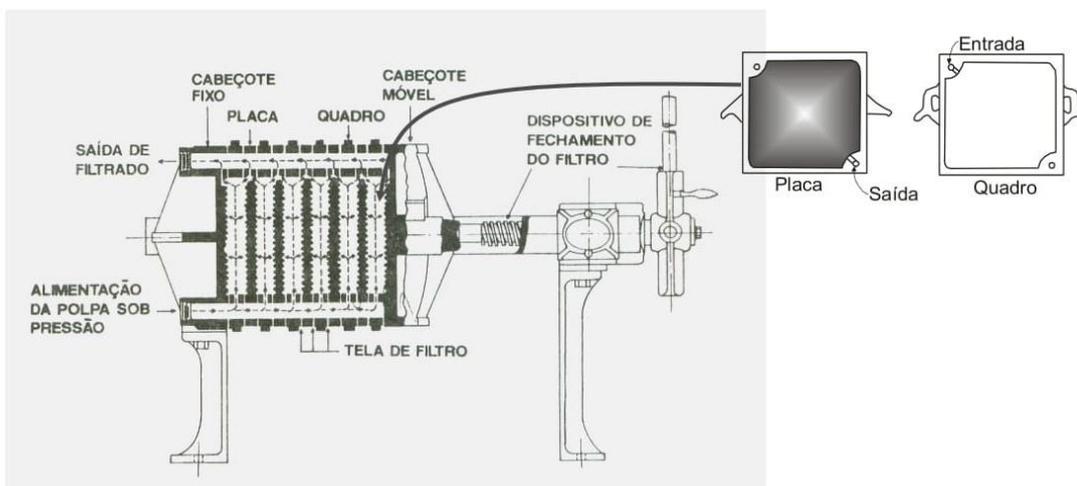
alimentação; quantidade de material que deve ser operado; grau de separação do material (LUZ, SAMPAIO, FRANÇA, 2010).

Em empresas de mineração existem vários tipos de filtros utilizados, cada qual com suas especificações como modo de se operar, parâmetros operacionais, taxas de filtragem, etc. É recomendável o uso de espessadores anteriormente a etapa de filtragem visando reduzir o número de equipamentos utilizados e evitar possíveis mudanças bruscas em características de polpas que alimentam o filtro (OLIVEIRA et. al; 2004).

2.2.1 Filtros tipo prensa

Os filtros do tipo prensa ou de pressão, geralmente são operados em lotes e trabalham com uma pressão positiva acima do meio filtrante (Figura 2). Essa pressão é responsável por remover o líquido da polpa e reter os sólidos que constituem a torta. Esses equipamentos são usados em indústrias químicas, mineradoras e também no tratamento de águas e efluentes. Geralmente, são aplicados a suspensões que contém partículas finas e que assentam lentamente e apresentam baixa capacidade de filtragem (WAKEMAN; TARLETON, 2007).

Figura 2.2 - Esquema ilustrativo de um filtro prensa



Fonte: Oliveira et. al., 2004

Esses equipamentos são constituídos por um conjunto de placas que, quando estão reunidas, formam câmaras entre as placas vizinhas. Cada placa possui sua superfície revestida com tecido filtrante. As mesmas são agrupadas e prensadas a partir da ação de pistões, então a polpa de rejeito é bombeada com alta pressão para o interior das câmaras, forçando o encontro da mesma com as placas. O líquido atravessa o tecido filtrante, sendo chamado de filtrado,

depois é direcionado ao interior da moldura das placas e flui por gravidade até os poros presentes na base de cada placa, sendo recolhido posteriormente por meio de canaletas. As partículas que ficam retidas no meio filtrante são chamadas de torta, que são descarregadas a partir da separação entre as placas. Atualmente, os fabricantes de filtros tipo prensa têm investido cada vez mais em sistemas automatizados, buscando maximizar o desempenho e a taxa de produção do equipamento (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

2.2.2 Filtros a vácuo

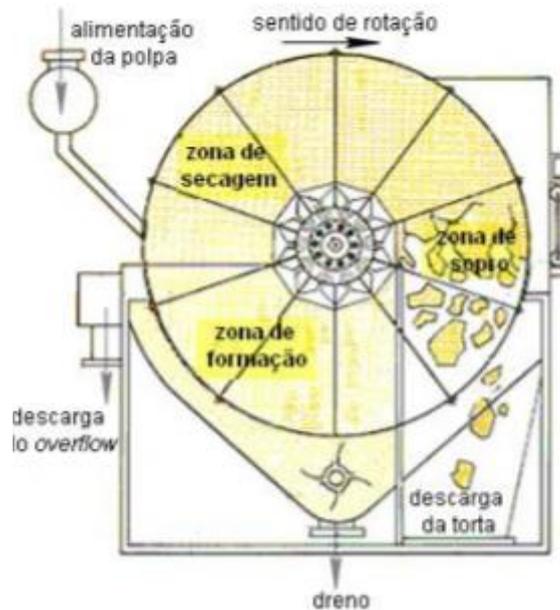
Os filtros a vácuo utilizam forças motrizes induzidas por vácuo e meios filtrantes semipermeáveis de modo a facilitar a separação das partículas sólidas presentes na polpa que alimenta o aparelho (WAKEMAN; TARLETON, 2007). Segundo Chaves (2013), a maioria dos equipamentos são capazes de processar uma vasta variedade de materiais de maneira contínua, embora as diferenças de pressão no filtro estejam limitadas a menos de 1 bar (100 kPa). Existem 4 principais tipos de filtros a vácuo: disco, tambor, plano ou mesa e de correia. Os três primeiros são capazes de produzir tortas com umidade variando entre 12% e 18%, enquanto no caso dos filtros de correia, os valores de umidade variam de 8% a 10%, se o equipamento for bem configurado (CONCHA, 2014).

2.2.3 Filtros de disco

Os filtros de disco possuem discos verticais conectados pelo centro a um mesmo eixo, que é perpendicular aos planos dos discos (figura 3). Os mesmos são revestidos com meios filtrantes em ambos os lados. Tais discos são imersos em um recipiente no qual está depositada a polpa, o eixo central produz uma rotação que permite que enquanto um setor dos discos é imerso na polpa, a outra parte se mantém do lado externo. A polpa é mantida em suspensão pela ação de agitação constante, evitando que as partículas sólidas venham a se depositar. No primeiro setor do disco é que são formadas as tortas, através da aspiração contínua, também conhecida como zona de formação. Na parte que fica externa ao tanque há um sistema de sucção responsável por retirar mais umidade do material retido e encaminhar o filtrado para um sistema de drenagem, denominado zona de secagem. Logo depois, a torta é descarregada pela ação de um sopro de ar comprimido com o auxílio de um objeto que raspa o meio filtrante, no setor seguinte dos discos, também chamado de zona de sopro. Por fim, a torta é direcionada a correias transportadoras por meio de calhas, que são instaladas abaixo do filtro. Em alguns modelos existe um setor de sopragem submersa que promove a limpeza do meio filtrante a partir da

liberação de partículas que por acaso venham a se prender no meio filtrante (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Figura 2.3 - Desenho esquemático de um filtro de disco



Fonte: Guimarães, 2011

2.2.4 Filtros de tambor

Os filtros de tambor, como ilustrado na figura 4, consistem em um tambor giratório em que a parte inferior do equipamento fica submersa em um tanque contendo a polpa a ser filtrada. A superfície do tambor é envolta por um meio filtrante que pode ser composto de diversos materiais. No interior do tambor existe uma fonte de vácuo que suga a suspensão enquanto o tambor realiza o movimento de rotação. O filtrado é então aspirado para o interior da carcaça do equipamento, e o sólido retido em superfície formando a chamada torta na superfície submersa do meio filtrante. Quando essa superfície emerge do tanque, o ar é aspirado através da torta, deslocando a água presente nos poros. Durante a rotação do tambor é possível fazer a lavagem e secagem da torta, depois um sistema de remoção descarrega a torta em um chute, separando-a do meio filtrante (CARDOSO, 2018). O processo é feito em ciclos, sendo que a duração de cada ciclo é função da rotação do tambor, profundidade de submersão e arranjo das válvulas.

Figura 2.4 - Filtro de tambor rotativo



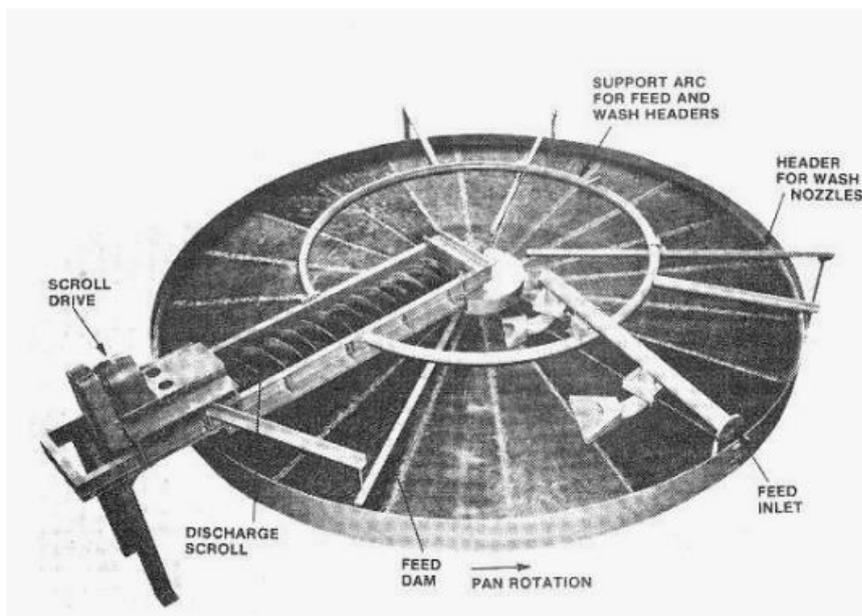
Fonte: Oliveira et. al., 2004

Os filtros de tambor são equipamentos muito versáteis, em relação ao carregamento de polpa, descarregamento da torta e lavagem da tela. O mesmo permite o desaguamento de polpas ditas “problemáticas”, impossíveis de serem tratadas de outra maneira. Algumas variações dos filtros de tambor permitem sua utilização para materiais com granulometria grosseira ou com elevada taxa de sedimentação. Os filtros de tambor possuem aplicações também em outros ramos a não ser o setor mineral, como na área da engenharia sanitária, fazendo o tratamento de esgotos urbanos e domésticos.

2.2.5 Filtro plano

Os filtros planos são equipamentos utilizados para filtragem de polpas heterogêneas constituídas por partículas sólidas que não podem ser mantidas em suspensão somente pela ação de agitadores. Os mesmos são constituídos basicamente de uma superfície circular horizontal, que gira em torno de um eixo vertical e é apoiada na tela onde a polpa a ser filtrada é alimentada. A superfície circular é composta por diversos setores, que estão ligados a câmara de vácuo do filtro, e na posição de descarga, com a câmara de ar comprimido. A figura 5 apresenta a representação de um filtro plano.

Figura 2.5 - Representação esquemática de um filtro plano



Fonte: Oliveira, et. al., 2004

No caso dos filtros do tipo plano, a polpa é alimentada no equipamento por meio de um distribuidor sobre o meio filtrante. Enquanto o filtro está girando, o filtrado transpassa a tela e a torta vai sendo formada. Esse tipo de filtro permite a lavagem da torta quantas vezes for necessária. A torta então atinge a posição de descarga, na qual o setor desconecta-se da câmara de vácuo e conecta-se com a câmara de ar comprimido. O mesmo atravessa os poros da tela, fazendo seu desentupimento e soltando a torta formada. Existem diversas maneiras de se fazer a descarga da torta, sendo que uma das mais comuns é utilizar um transportador helicoidal, que é instalado sobre o filtro, sem qualquer contato com a tela, estando afastado alguns centímetros (OLIVEIRA et. al; 2004).

2.2.6 Filtros de correias

O filtro de correia, apresentado na figura 6, consiste em um transportador de correia com um projeto especial. A correia que serve como suporte para instalação do meio filtrante é perfurada, de modo a permitir a ação do vácuo advindo de uma câmara localizada na parte inferior da correia. O filtrado que atravessa a correia é conduzido através de tubulações para os tanques de recepção. A torta formada é desaguada e descarregada no instante em que a correia muda de sentido no rolo final do equipamento. Podem ser feitos diversos estágios de lavagem da torta, instalados ao longo do comprimento da correia. Antes de retornar à seção de

alimentação do equipamento, o meio filtrante passa por um sistema esticador, para garantir que toda a superfície do mesmo, irá efetuar a filtragem da polpa de forma eficiente.

Figura 2.6 - Filtro do tipo correia em operação



Fonte: Oliveira et. al., 2004

Os filtros do tipo correia são eficientes no processamento de grandes vazões de sólidos em polpas ditas heterogêneas, além de permitir a lavagem da tela, garantindo que a mesma permaneça sempre desobstruída. A operação possui alta flexibilidade de utilização, uma vez que o comprimento da correia pode ser ajustado de acordo com a necessidade da operação. Esses equipamentos possuem vasta aplicação na indústria metalúrgica, em circuitos nos quais os metais encontram-se dissolvidos em ácidos ou em outras soluções diversas.

2.3 FILTRABILIDADE

Segundo Crysstal et. al. (2018), a maioria dos rejeitos de mineração são considerados filtráveis, sendo que apenas os materiais que contêm quantidades significantes de gesso resultam em materiais ditos infiltráveis. A grande questão para a filtragem de rejeitos é a eficiência do processo e os custos de investimento necessários para que o material atinja a umidade requerida para a sua disposição final. Ainda de acordo com os mesmos autores, quanto

maior a quantidade de partículas finas, como silte e argilas, mais difícil será alcançar valores ótimos de eficiência de filtragem, tempos de ciclo e teor de umidade. Por isso, devem ser feitos estudos preliminares acerca da distribuição granulométrica do material, de modo a antecipar a variabilidade da mesma e a porcentagem de sólidos na alimentação do equipamento de filtragem.

Segundo Guimarães (2011), as principais variáveis que influenciam diretamente a taxa de filtragem são subdivididas em características dos sólidos, da torta/filtrado, da polpa e do equipamento, como mostrado na tabela 4.

Tabela 2.4 - Variáveis que interferem na taxa de filtragem

Sólido	Torta/Filtrado	Polpa	Equipamento
Área superficial específica	Espessura da torta	Taxa de alimentação	Ciclo
Distribuição granulométrica	Porosidade do leito	Porcentagem de sólidos	Nível de vácuo e/ou sopro e/ou pressão
Forma geométrica	Permeabilidade do leito	Temperatura	Viscosidade
Propriedades de superfície	Viscosidade do filtrado	Ph	Meio filtrante
Massa específica		Adição de reagentes auxiliares	Nível de agitação

Fonte: Alves, 2020

Observando a tabela 4, podemos concluir que a taxa de filtragem aumenta com a redução no tempo do ciclo de filtragem, porém tal redução pode resultar em tortas com teor de umidade acima do requerido ou em tortas extremamente finas, o que pode prejudicar a operação de descarga (GUIMARÃES, 2011).

Polpas com maiores porcentagem de sólidos favorecem a filtragem, sendo que a maioria dos filtros usados em escala industrial exigem uma concentração de sólidos mínima na sua alimentação para garantir seu desempenho, principalmente os equipamentos que operam a vácuo. Por isso, usualmente o material passa por uma etapa de espessamento antes de adentrar a planta de filtragem. Rejeitos com granulometria mais grosseira formam tortas com maiores interstícios, permitindo que o líquido atravesse o meio filtrante com maior eficácia, favorecendo a redução no tempo de filtragem e na umidade da torta.

O valor de pH da polpa está relacionado ao potencial zeta das partículas, que determina como a mesma irá se comportar, em relação ao estado de dispersão ou aglomeração. Em geral,

polpas mais dispersas causam a redução na eficiência do processo, pois geram tortas mais úmidas e menor fluxo de filtrado. Por isso podem ser usados reagentes auxiliares de filtração, chamados floculantes, coagulantes ou surfatantes, que irão auxiliar no agrupamento das partículas sólidas presentes na polpa. A presença de lamas na etapa de filtração causa um efeito negativo ao processo uma vez que as mesmas podem causar o entupimento do meio filtrante. Dessa forma, reagentes como floculantes podem reduzir o efeito das lamas e aumentar a taxa de filtração.

Cada rejeito a ser filtrado possui características únicas de granulometria e mineralogia, portanto na fase de projeto da instalação da planta de filtração, devem ser feitos estudos de caracterização do material, visando flexibilizar a operação de modo a atender possíveis variações futuras e reduzir custos com desperdícios e otimizar o processo. Segundo Davies (2011), polpas com distribuições granulométricas abaixo de 74 micrômetros, contendo argilominerais ou betume residual podem dificultar a filtração ou até mesmo torná-la inviável. Um estudo conceitual na fase inicial do projeto deve contemplar as seguintes informações (WILLIAMNS et. al; 2017): distribuição granulométrica do material, mineralogia, concentração de sólidos na alimentação, massa específica dos sólidos, pH da alimentação, testes de sedimentação, testes de filtração, avaliação da espessura da torta obtida, pressão necessária do equipamento de filtração, teor de umidade da torta e tempo de ciclo.

Segundo Crysall et. al. (2018), a umidade alvo que a torta deve alcançar após deixar a planta de filtração depende do empreendimento em termos de critérios de projeto, plano de empilhamento, localização, clima, geometria da pilha, entre outros fatores. Os autores citam o exemplo da empresa Alcoa Operations em Kwinana, Western Austrália, onde o teor de umidade alvo do rejeito filtrado é de 30% (em termos gravimétricos), uma vez que o plano de empilhamento da empresa leva em consideração o clima árido da região.

Como observado, a filtrabilidade do material dependerá das características físicas, geoquímicas e reológicas do rejeito, bem como da limitação técnica do sistema adotado. Contudo, diversas técnicas de filtração podem ser aplicadas em processos de beneficiamento para reduzir o teor de umidade dos rejeitos de mineração. Desta forma, diferentes métodos de disposição tornam-se promissores, em contrapartida aos convencionais (barragens).

3 METODOLOGIA

A fim de se obter os objetivos propostos, este trabalho de caráter exploratório e aspecto qualitativo se baseou na coleta e análise de informações a partir de pesquisas bibliográficas acerca do tema em questão. Para o desenvolvimento da pesquisa foram coletadas informações na literatura nacional e internacional, sendo consultados artigos científicos de jornais e congressos, documentos acadêmicos como teses, dissertações e monografias, livros, sites e reportagens.

Para a identificação de termos-chave foram consultadas referências básicas disponíveis em diferentes bases de dados científicos (Scopus, Web of Science, Google Scholar, Science Direct, Scielo, Jornais/Reportagens, Relatórios técnicos). A figura 7 mostra o resultado de trabalhos científicos identificados na base de dados Scopus com a busca “*dry stacking mining*”. É possível verificar que as publicações científicas datam da década de 70, mas tem ganhado notoriedade nos últimos 10 anos no meio técnico científico. As áreas de destaque onde este mesmo termo apareceu nos resultados de busca da base Science Direct são apresentadas na figura 8, evidenciando as áreas de mineração e engenharia.

Figura 3.1- Pesquisas sobre o tema Dry Stacking - Scopus

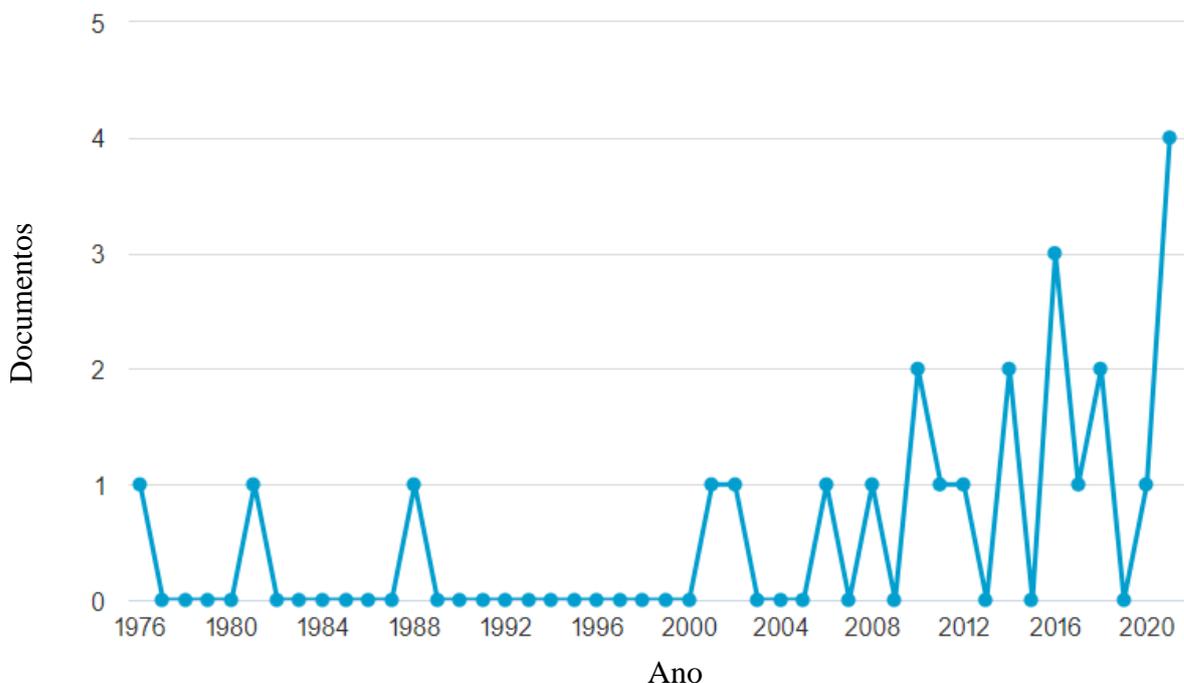


Figura 3.2 - Áreas mais pesquisadas - Science Direct



As fontes de informação coletadas foram analisadas e classificadas em três grupos de resultados: métodos de disposição de resíduos; empilhamento drenado e estudos de casos. Cada grupo foi interpretado como um potencial resultado desta abordagem teórica, sendo descritos nos capítulos seguintes.

A partir dos resultados coletados, tabelas comparativas, orientações técnicas e informações apresentadas poderão ser utilizadas para fomentar discussões e abordagens de disposição de rejeitos via empilhamento drenado.

4 MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

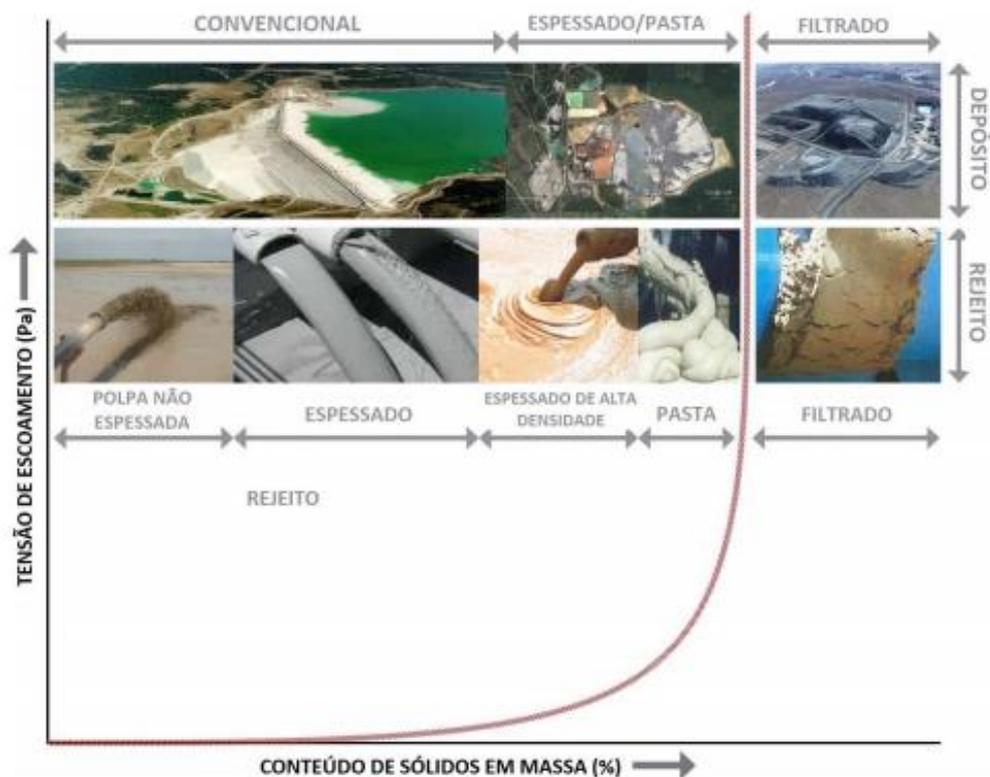
Os rejeitos provenientes da mineração, em geral, não possuem valor econômico agregado, ou ainda não possuem tecnologias capazes de fazerem o tratamento do material naquele momento. Visto isso, é necessário dispor de um local para o armazenamento temporário ou permanente de rejeitos. O método mais comum e mais utilizado ainda são as barragens (ALVES, 2020). As mesmas são construídas a partir da criação de reservatórios em superfície para fazer a contenção dos rejeitos em forma de polpa, geralmente lançado em tais estruturas após a etapa de espessamento na usina de beneficiamento.

Existem outros métodos alternativos usados para a disposição de rejeitos, como o empilhamento drenado, lama espessada, pasta, disposição subaérea e disposição de rejeitos filtrados (*dry stacking*) (PORTES, 2013). Outro método que pode ser utilizado é a disposição mútua de rejeitos e estéril em determinado local da mina. Segundo Gomes, (2009), os rejeitos podem obter 5 classificações, de acordo com a porcentagem de sólidos presente no mesmo e sua consistência, são elas:

- Rejeito em polpa (*slurry*): material com baixo teor de sólidos, contendo grande quantidade de água. O transporte do mesmo é feito via gravidade ou bombeamento;
- Rejeito espessado (*thickened tailings*): rejeito parcialmente desaguado e com consistência semelhante à de uma polpa, possibilitando seu transporte por bombeamento;
- Rejeito em pasta (*paste tailings*): rejeito espessado com pouca quantidade de água, que apresenta consistência de pasta que não flui naturalmente e não drena grande quantidade de água quando disposto no depósito em que é destinado;
- Rejeito filtrado úmido (*wet cake tailings*): rejeito que passa por operações de filtração e possui aspecto de uma massa saturada ou quase saturada, não permitindo seu transporte via bombeamento;
- Rejeito filtrado seco (*dry cake tailings*): material que também passa por operações de filtração, não bombeável, e apresenta aspecto de uma massa não saturada, contendo baixa umidade e alta porcentagem de sólidos.

A figura 9 apresenta os principais tipos de rejeitos de acordo com sua porcentagem de sólidos, de acordo com sua tensão de escoamento e os tipos de depósitos utilizados para estocar esse material.

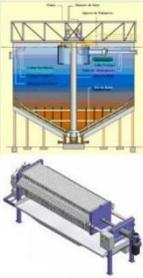
Figura 4.1 - Tipos de rejeito, tensão de escoamento e tipos de depósitos usados para disposição



Fonte: Alves, 2020

Atualmente, grande parte dos rejeitos antes de serem encaminhados para seu destino final, passam por etapas de espessamento. Segundo Portes (2013), o espessamento de rejeitos visa o desaguamento da polpa e conseqüentemente o aumento na concentração de sólidos. Rejeitos com maior consistência contribuem com o aumento da capacidade de armazenamento do reservatório e permitem que não seja necessário aguardar longos períodos para que o local de disposição seja preparado e reabilitado. Existem diversos tipos de espessadores, como o convencional, de alta capacidade, de alta densidade e o *deep cone*, cada qual é utilizado de acordo com o nível de desaguamento e com a consistência do rejeito que se pretende atingir (CHAVES, 2013) No caso de rejeitos filtrados, após a etapa de espessamento, o rejeito é enviado a planta de filtragem, na qual o material é submetido a um meio filtrante, capaz de separar a porção sólida da porção líquida da polpa (PORTES, 2013). A escolha do equipamento de filtragem adequado depende do projeto operacional do empreendimento. A figura 10 mostra os tipos de rejeito de acordo com a sua concentração de sólidos, o equipamento utilizado para seu espessamento ou filtragem e o meio de transporte do mesmo até seu destino final (ALVES, 2020).

Figura 4.2 - Tipos de rejeito, de acordo com o equipamento utilizado para desaguamento e meio de transporte dos mesmos

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 <i>High rate</i>		Bombas centrífugas ou de diafragma	
Pasta de baixa densidade 60 a 70% de sólidos		Espessadores <i>Deep bed</i> ou <i>Deep cone</i>		Bombas de pistão ou diafragma (alta pressão)	
Pasta de alta densidade 65 a 75% de sólidos		Espessador <i>Deep cone</i> ou filtro		Bombas de deslocamento positivo com tubulação de alta pressão	
Torta filtrante > 80% de sólidos		Filtro		Caminhão ou correia	

Fonte: Alves, 2020

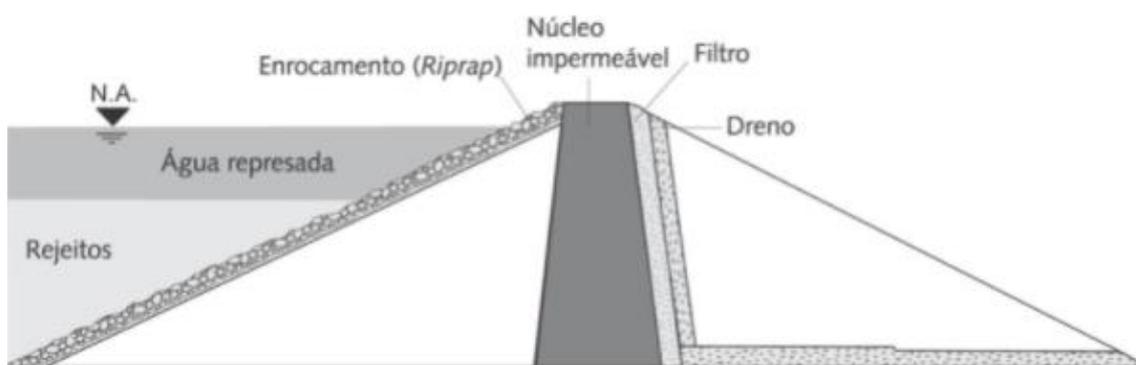
4.1 DISPOSIÇÃO CONVENCIONAL

O método de disposição mais utilizado durante os dias atuais ainda é o método chamado de convencional, o qual utiliza a disposição de rejeitos na forma de polpa com a construção de estruturas de contenção, também chamadas de barragens de rejeito. Fernandes (2017) define

barragens como sendo obstáculos artificiais construídos com o propósito de reter água, rejeitos ou sedimentos com fins de armazenamento ou controle dos mesmos.

As barragens de rejeitos podem ser construídas com materiais de áreas de empréstimo ou com os próprios rejeitos gerados. Usualmente no caso do uso de rejeitos como material para construção, são realizadas operações de ciclonagem, que visam separar o material de granulometria mais fina (*overflow*) daquele de granulometria mais grossa (*underflow*). Esse último material deverá formar o maciço a jusante da barragem enquanto o que o material mais fino deve situar-se na parte de montante da barragem, formando a praia de rejeitos (SOUSA, 2020). Já as barragens construídas com materiais de empréstimo, em nada diferem das barragens tradicionais de terra usadas para outras finalidades a não ser a contenção de rejeitos, como mostrado na figura 11. A utilização de estéreis apenas visa substituir o material granular de maiores dimensões que são geralmente empregados nas barragens tradicionais.

Figura 4.3 - Elementos construtivos de uma barragem de rejeitos



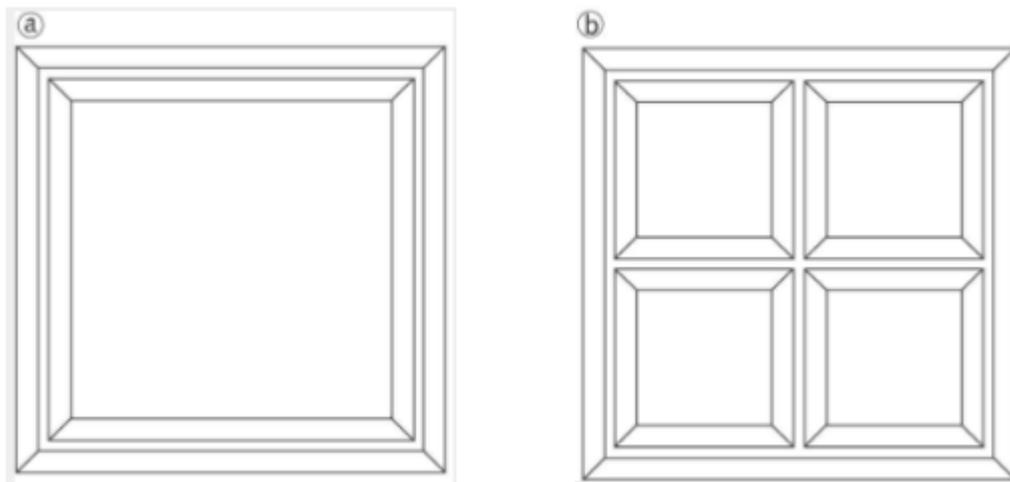
Fonte: Boscov, 2008

4.2 REPRESAMENTO

A configuração do represamento depende da topografia local, sendo que os tipos mais comuns são de: anel, bacia, meia encosta e vale.

O represamento em anel simples (figura 12 (a)) ou múltiplos (figura 12 (b)), é indicado para terrenos planos, onde são escassas depressões topográficas naturais. Esse tipo de represamento exige um grande volume de aterro em relação ao volume represado. São eliminadas as contribuições externas da bacia hidrográfica, uma vez que o perímetro do reservatório é fechado, acumulando-se apenas a água da polpa lançada na barragem.

Figura 4.4 - Represamento em anel, (a) simples, (b) múltiplos



Fonte: Vick, 1983 apud Boscov, 2008

No represamento por bacia, os rejeitos são confinados por uma barragem perpendicular ao fluxo da bacia, localizada em uma depressão topográfica. São construídas obras adicionais de drenagem a montante, visando impedir a entrada de água na bacia do reservatório e garantindo a estabilidade estrutural da barragem.

O represamento a meia encosta pode ser usado quando não há drenagem natural na zona de deposição dos rejeitos e os taludes mais íngremes da encosta possuem inclinação inferior a 10%. Por fim, o represamento em vale é uma combinação dos métodos em bacia e a meia encosta. O mesmo é utilizado em vales muito largos, quando existem, nas margens, áreas que sejam adequadas para a construção da barragem, que não interfiram com a drenagem natural. Devem ser projetadas obras de proteção no pé da barragem, uma vez que o período de cheias de rios próximos a estrutura pode causar erosão e afetar a estabilidade da obra (BOSCOV, 2008).

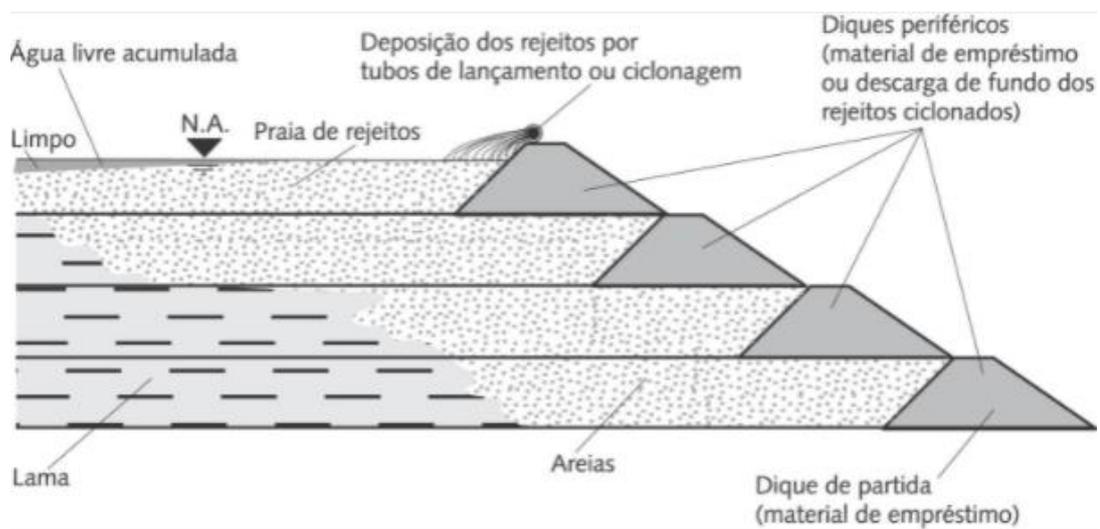
4.3 MÉTODOS DE ALTEAMENTO

Os métodos construtivos de barragens podem ser divididos em três classes: método de montante, método de jusante e método de linha de centro. Tais métodos são nomeados em relação à direção em que os alteamentos são feitos em relação ao dique de partida inicial.

4.3.1 Método de montante

Esse método caracteriza-se pela construção dos alteamentos subsequentes ao dique de partida com eixo da barragem se deslocando para montante da estrutura como mostrado na figura 13. Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015), o método de alteamento a montante é limitado a rejeitos com cerca de 40% a 60% de fração do tamanho areia. A praia de rejeitos deve também se encontrar na condição drenada para que a mesma apresente competência suficiente para a construção e suporte do dique de alteamento. A principal vantagem do uso desse método é o menor volume de material necessário para os alteamentos, reduzindo dessa forma o custo de construção. Além disso, não é necessária área a jusante do barramento, uma vez que o crescimento do reservatório se dá em sentido ao material previamente depositado.

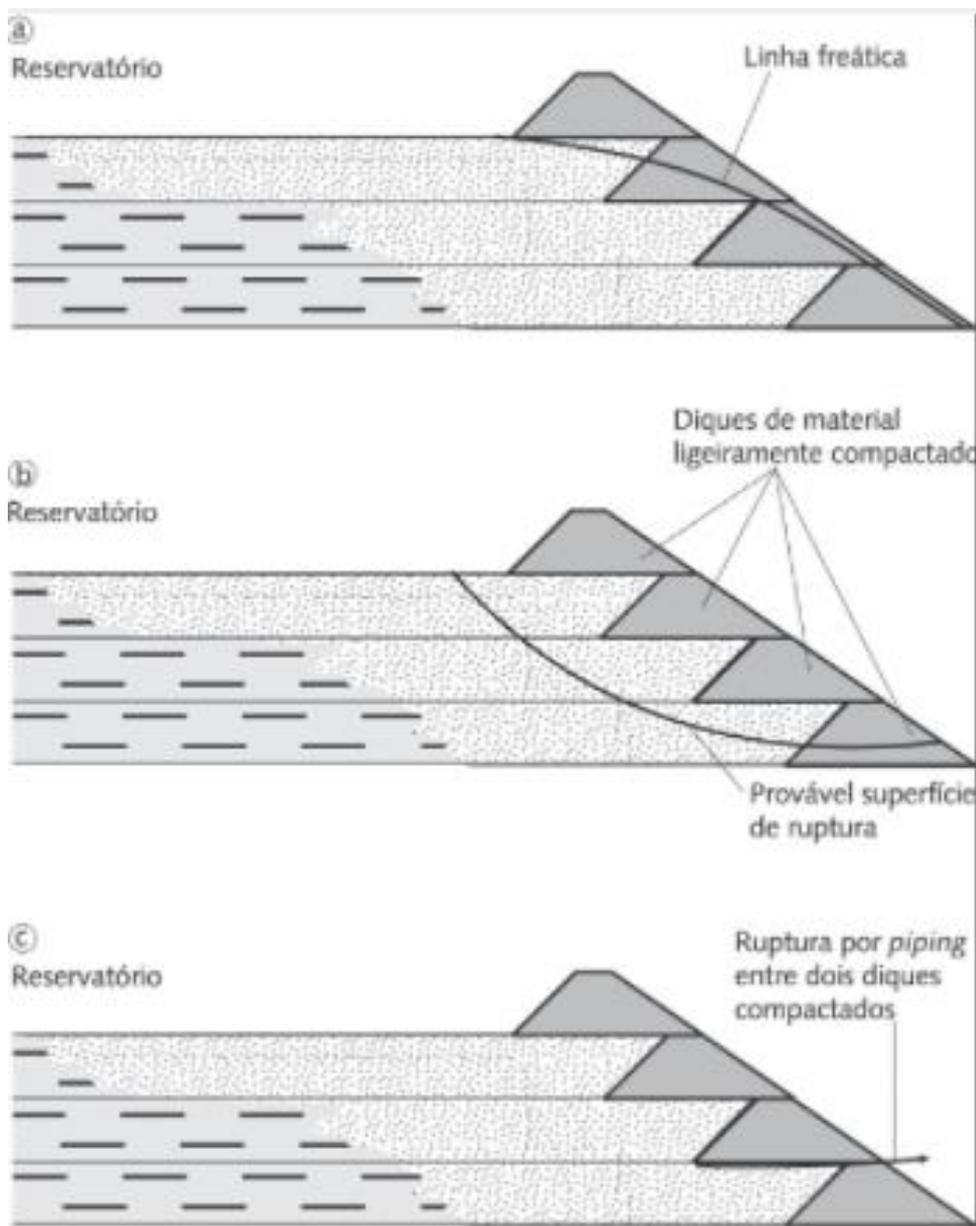
Figura 4.5 - Método de alteamento a montante



Fonte: Boscov, 2008

Entretanto, as principais restrições da aplicação desse método estão no que dizem respeito a segurança da estrutura uma vez que a fundação base dos alteamentos é a própria praia de rejeitos, que é constituída por um material heterogêneo e com elevado índice de vazios. Existe ainda grande susceptibilidade à liquefação e ocorrência do fenômeno de *piping* por sismos naturais ou por vibrações provenientes de equipamentos, uma vez que a linha freática fica muito próxima ao talude de jusante como mostrado na figura 14. Devido a esses fatores e a ocorrência de dois grandes desastres envolvendo barragens de rejeitos alteadas a montante, nas cidades de Mariana e Brumadinho, o método de alteamento a montante está atualmente proibido no Brasil, após a publicação da Lei Federal nº 14.066 de 30 de setembro de 2020, pela presidência da república.

Figura 4.6 - Desvantagens do método de alteamento a montante (a) linha freática elevada; (b) superfície provável de ruptura passa pelo reservatório; (c) risco de ruptura por piping



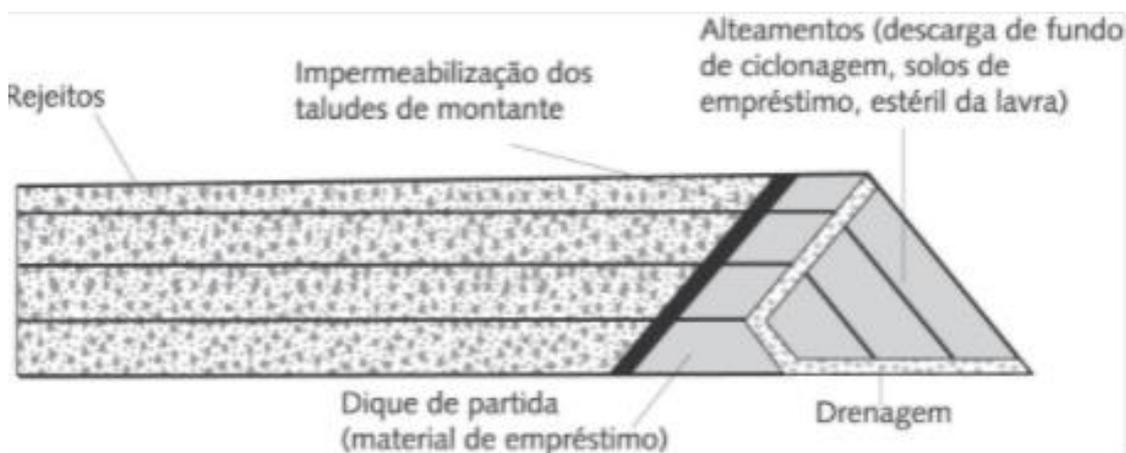
Fonte: Silveira e Reades, 1973 apud Boscov, 2008

4.3.2 Método de jusante

No alteamento pelo método de jusante, ocorre a compactação do aterro sobre o talude de jusante anterior, ou seja, para o sentido de fora do depósito (figura 15). O dique inicial ou dique de partida deve ser pouco permeável ou possuir talude de montante impermeabilizado e sistema de drenagem interna, que possibilite a coleta de água que porventura se infiltre na barragem. A linha freática é controlada, uma vez que existe um sistema contínuo de drenagem, além do fato de que toda o corpo da barragem é compactado por meio de equipamentos

específicos quando as condições climáticas são adequadas. Com isso, os riscos de ruptura por *piping* e liquefação são muito menores quando comparados ao método de alteamento a montante.

Figura 4.7 - Método de alteamento a jusante



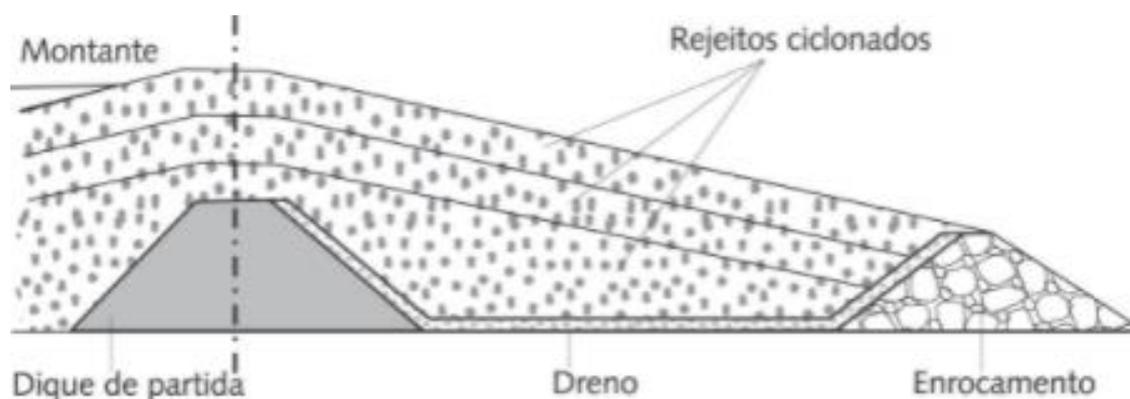
Fonte: Vick, 1983 apud Boscov, 2008

As desvantagens desse método dizem respeito a: necessidade de grandes quantidades de material nas primeiras etapas de construção; altos investimentos; dependência de fatores climáticos para a compactação do material; não possibilita drenagem superficial durante a etapa construtiva e exige a necessidade de medidas de controle de erosão do talude a jusante. Além disso, deve ser feito um planejamento prévio adequado e detalhado da localização da área de construção da barragem, uma vez que o avanço do pé do talude pode interferir em outras estruturas adjacentes.

4.3.3 Método de linha de centro

No alteamento por linha de centro, o método construtivo acontece de forma que as cristas dos sucessivos alteamentos estejam alinhadas verticalmente, como mostrado na figura 16. O mesmo compreende uma solução intermediária dos métodos de alteamento a montante e a jusante, inclusive em termos de custos. Porém o seu comportamento estrutural se aproxima mais do método a jusante. Há uma pequena redução do volume de material utilizado na construção quando comparado ao método de montante, porém existe a necessidade de sistemas de drenagem eficientes, sistemas de contenção a jusante e equipamento para deposição mecânica a jusante, o que pode tornar os custos globais elevados.

Figura 4.8 - Método de alteamento por linha de centro



Fonte: Nieble, 1986 apud Boscov, 2008

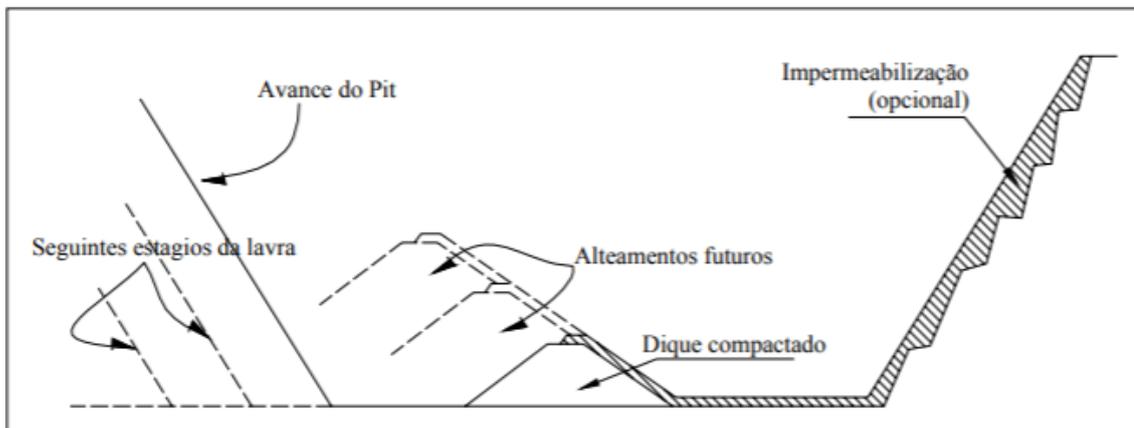
O *International Congress on Large Dams* (ICOLD) no ano de 2001 estabeleceu recomendações para as barragens construídas pelos métodos linha de centro e a montante, durante toda a fase de vida útil da barragem, como sua construção, operação e fechamento (SOUSA, 2020). Boa parte dos critérios recomendados, listados abaixo, foram incorporados à Lei Federal nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

- Investigação detalhada por geólogos experientes e engenheiros geotécnicos para determinar possível potencial de falha, com ensaios de campo e laboratório para determinar as propriedades dos materiais de fundação;
- Aplicação dos procedimentos existentes no estado da arte para projetos de barragens de rejeitos;
- Supervisão da construção e inspeção por especialistas;
- Realização de ensaios de laboratório para as condições "As Built";
- Rotina de monitoramento;
- A avaliação da segurança para as condições observadas, incluindo "As Built"; da geometria e resistência ao cisalhamento dos materiais. Observações e avaliações das condições piezométricas;
- Estudos de ruptura de barragens (*Dam Break*);
- Planos de contingência;
- Auditorias de segurança periódica

4.4 DISPOSIÇÃO EM CAVA À CÉU ABERTO

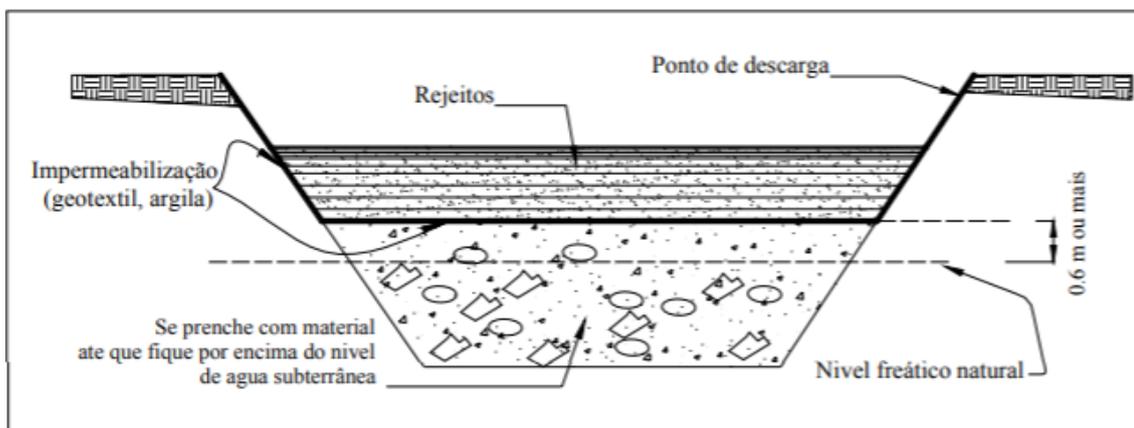
A disposição de rejeitos do beneficiamento mineral em cavas à céu aberto, também chamada de “disposição em *pit*” é um método de disposição, no qual os rejeitos de mineração são dispostos em minas a céu aberto, onde não é necessária a construção de diques (LOZANO 2006). Nestes casos, existem dois tipos de disposições: Uma que é feita concomitantemente com a extração do minério, ilustrado na figura 17, e no outro caso, a disposição é feita em minas já exauridas, nas quais a extração mineral já foi completa (figura 18).

Figura 4.9 - Disposição de rejeitos de forma concomitante à extração de minério



Fonte: Ritcey, 1989 apud Lozano, 2006

Figura 4.10 - Disposição de rejeitos em mina já exaurida



Fonte: Ritcey, 1989 apud Lozano, 2006

Segundo Ritcey (1989), esse método possui uma mínima poluição de ar, sua cobertura final pode ser considerada relativamente fácil, visto que os processos erosivos são mínimos e o risco de falha é baixo. Porém considerando parâmetros hidrogeológicos e fatores ligados a

migração de poluentes e percolação de líquidos, é indicado que a partir de métodos de análise de estabilidade, seja comprovada a segurança dos taludes internos do *pit*, e feita a impermeabilização dos mesmos, quando a rocha encaixante do minério não for suficientemente impermeável.

As principais vantagens do emprego deste método estão relacionadas a facilidade de recuperação das áreas lavradas, juntamente com o avanço de lavra, redução de impactos visuais e ambientais, redução de riscos e minimização dos custos operacionais. Já as desvantagens compreendem fatores de logística de extração de minério, devido à construção de estruturas de contenção de rejeitos dentro da cava, pouco volume disponível para disposição visto que é necessária a construção de tais estruturas e problemas relacionados a percolação de líquidos e estabilidade dos taludes.

Além da disposição de rejeitos em cavas a céu aberto, também é possível dispor esse material em cavas subterrâneas exauridas. Esse tipo de processo é também chamado de disposição em *backfill*. O rejeito é bombeado da usina de beneficiamento para as cavas, e para que esse transporte seja possível é necessário que a porcentagem de água no material esteja entre 25% a 35%, como mostrado na figura 19. Geralmente, outras substâncias são adicionadas as pastas de rejeito como cimento Portland, cinza volante, meta caulim e cal, visando garantir a sustentação quando o mesmo é disposto em superfícies verticais. As pastas utilizadas devem ser previamente estudadas, visando o conhecimento de importantes propriedades como a sua viscosidade, tensão ao cisalhamento, altura de abatimento, ângulo de repouso, resistência à compressão e permeabilidade (LOZANO, 2006).

Figura 4.11 - Preenchimento de abertura subterrânea com backfill



Fonte: Tailings.info

4.5 CODISPOSIÇÃO E DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA DE REJEITOS E ESTÉREIS

Atualmente, têm se cada vez mais a dificuldade de se obter licenciamentos por parte de órgão ambientais para se fazer a disposição de resíduos gerados no processo de mineração. Visto tal dificuldade, uma alternativa viável já utilizada por diversas empresas é se fazer a disposição de rejeitos gerados nas usinas de beneficiamento e estéreis provenientes do processo de lavra, em um único local. Segundo Peixoto (2012), quando é feita a mistura desses dois materiais no próprio ambiente de disposição, dá se o nome a essa técnica de codisposição. Entretanto, quando os rejeitos e estéreis forem dispostos em um mesmo espaço físico, mas sem se misturarem, a metodologia é chamada de disposição compartilhada.

As técnicas de disposição compartilhada e codisposição exigem estudos que determinem as propriedades físicas, químicas e o comportamento geotécnico dos materiais a serem dispostos conjuntamente, principalmente no que diz respeito a quesitos de resistência e parâmetros de permeabilidade. No caso da codisposição, deve ser levada em conta a trabalhabilidade do material, uma vez que a mesma deve viabilizar procedimentos práticos operacionais. Leduc et al., 2003 aponta a relação em peso da mistura entre estéril e rejeito (tabela 5) e a viabilidade da técnica do uso da técnica de codisposição.

Tabela 4.1 - Relação estéril/rejeito x viabilidade da técnica de codisposição

Relação Estéril-Rejeito	Potencial de Aplicação
> 8:1	Provavelmente adequado para codisposição
4:1 a 8:1	Requer estudos mais detalhados para definição
< 4:1	Provavelmente não adequado para codisposição

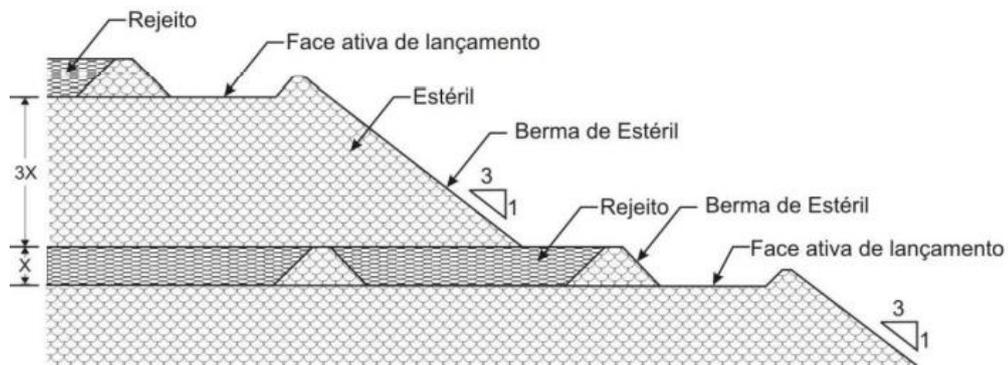
Fonte: Leduc et.al., 2003

Visto que os rejeitos são materiais com maiores teores de umidade, uma proporção alta desse material em relação à quantidade de estéril disposta, pode comprometer parâmetros de estabilidade das estruturas. O método de mistura na codisposição de rejeitos e estéreis é relativamente simples e flexível, uma vez que permite o controle dos processos de homogeneização do material. Porém, esse método necessita também da aplicação de equipamentos para terraplanagem, mistura e transporte dos materiais, o que eleva significativamente os custos de implantação e operação dessa técnica, limitando a sua aplicação.

No caso da disposição compartilhada de rejeitos e estéreis, as técnicas mais utilizadas comumente são as de células para disposição e rejeito, inserção de rejeitos em depósitos de

estéreis e disposição de rejeitos em camadas finas. As células de rejeitos compreendem na construção de diques de estéril que atuam como receptores de rejeitos, como mostrado na figura 20. Tais células são preenchidas em diferentes fases, de modo que enquanto uma está sendo formada, outras estão em processo de secagem e de construção. O processo é reiniciado quando o rejeito está seco e adensando, lançando-se o estéril sobre a célula já consolidada. O planejamento desse tipo de depósito deve ser eficiente, visando evitar que as poropressões comprometa, a estabilidade dos taludes da pilha, minimizando dessa forma, o risco de ruptura dos mesmos.

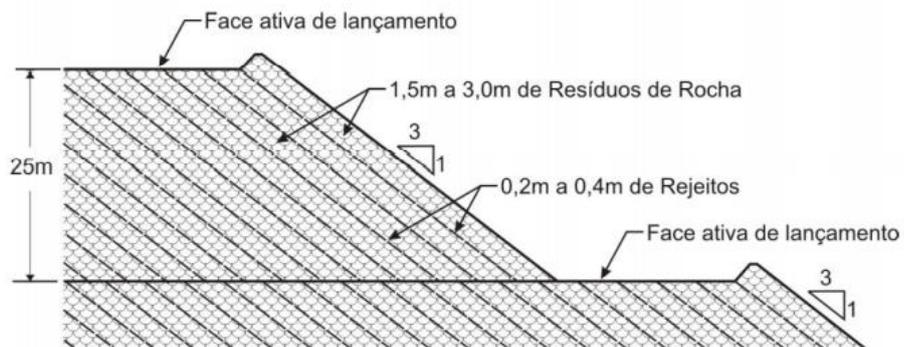
Figura 4.12 - Bacias de rejeitos construídas no depósito de estéril



Fonte: Leduc et. al., 2003 apud Carvalho, 2017

O método de disposição alternada entre camadas de rejeito e estéril consiste em lançar alternadamente esses dois materiais em um mesmo local de disposição, fazendo com que as camadas de rejeito se infiltrem nas camadas de estéril e as poropressões existentes sejam dissipadas, reduzindo tais forças nas camadas de rejeitos (figura 21). Devem ser feitas inspeções visuais no material durante todo o processo construtivo, assim como o controle do lançamento de camadas.

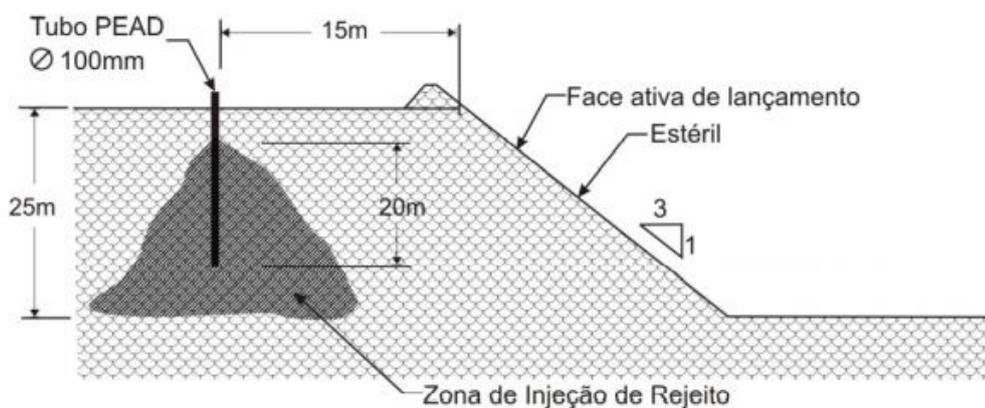
Figura 4.13 - Disposição de rejeito em camadas finas no depósito



Fonte: Leduc et. al., 2003 apud Carvalho 2017

O método de injeção de rejeitos em depósitos de estéreis consiste em injetar rejeito espessado na forma de pasta em perfurações verticais ou inclinadas nas pilhas preexistentes de estéril, como mostrado na figura 22. Um dos fatores limitantes ao emprego dessa técnica é a necessidade de equipamentos de transporte de rejeitos até o local de disposição, que geralmente é feito por bombeamento. Além disso, a manutenção constante da instalação e da operação de perfuração tornam o processo oneroso, com altos custos de operação.

Figura 4.14 - Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril



Fonte: Leduc et. al., 2003 apud Carvalho, 2017

4.6 DISPOSIÇÃO SUBAÉREA

O método de disposição subaérea possui algumas similaridades com os métodos de disposição de lama espessada, pasta e torta (OLIVEIRA-FILHO; ABRÃO, 2015). Tais similaridades dizem respeito à: todas técnicas citadas são técnicas alternativas para a disposição de rejeitos finos; operam de forma alternada entre lançamento e espera; o material depositado possui alta porcentagem de sólidos e resistência elevada, que são possibilitados pelos fenômenos de adensamento por peso próprio e ressecamento por evaporação; e por fim, a disposição do rejeito acontece por meio de camadas pouco espessas.

Segundo Knight e Haile (1983), a disposição subaérea pode ser definida como uma técnica em que o rejeito é disposto em finas camadas, de modo que ocorra o adensamento do mesmo e drenagem da água presente no material, antes que se faça o lançamento de uma nova camada, como mostrado na figura 23. Dessa forma, o depósito formado adquire condições de maior estabilidade, maior estabilidade e baixas poropressões.

Figura 4.15 - Fases do método de disposição subaérea. a) Período de enchimento: sedimentação e adensamento, b) Período de espera: adensamento e ressecamento



Fonte: Almeida, 2004 apud Lima, 2006

Segundo Lima (2006), durante a formação dos depósitos subaéreos é esperado que o material lançado experimente os processos físicos de forma sequencial: sedimentação, adensamento, ressecamento e eventualmente, desaturação. A fase de sedimentação é a mais rápida e as variações de volume inicial e final dependem do teor de sólidos inicial na polpa. Durante as fases de adensamento e ressecamento, podem ocorrer recalques significativos no material depositado e por fim, a fase ressecamento acontece em dois estágios distintos, ressecamento unidimensional e ressecamento tridimensional (ALMEIDA, 2004).

Para que o lançamento seja feito de forma intermitente, de modo a garantir a continuidade das operações do empreendimento, é recomendado que a empresa disponha de diferentes reservatórios, de modo a permitir que o enchimento seja feito de forma cíclica, além de considerar que para a máxima eficiência do método em questão, seja necessário um aumento progressivo nos tempos de espera para o início de um novo lançamento (OLIVEIRA-FILHO; ABRÃO, 2015). Segundo Lima (2006), o número mínimo de reservatórios depende de fatores como o clima, a taxa de produção do rejeito, as características inerentes ao mesmo e o tipo de instalação utilizada no armazenamento do material.

Quando comparado ao método de disposição convencional, o método de disposição subaérea permite que seja armazenado aproximadamente o dobro da quantidade de rejeito estocado em uma mesma área quando comparado ao método de disposição convencional. Contudo, segundo Villar (2002), a quantidade de rejeitos que determinada área suporta, depende de fatores relacionados à composição mineralógica do material, estrutura do solo e teores de umidade inicial e final. Outra vantagem desse método é a recuperação de água pelo processo de sedimentação natural da polpa, uma vez que o processo de sedimentação e adensamento acontece com o peso próprio da polpa. Dessa forma, a recuperação de água pode

ser maior do que a recuperação proveniente do processo de espessamento realizados em plantas de beneficiamento mineral.

4.7 EMPILHAMENTO DRENADO

Segundo Oliveira-filho e Abrão (2015), o empilhamento drenado consiste em uma técnica de disposição de rejeitos na qual rejeitos do tipo arenosos são depositados em forma de pilha em locais de meia encosta ou em pequenos vales confinados, também chamados de grotas. Os rejeitos são primeiramente, transportados desde a usina de beneficiamento até o local de deposição na forma de polpa, onde são dispostos por meio da técnica de disposição hidráulica. Alves (2015) relata que inicialmente é construído um dique de partida a área que será utilizada, bem como sistemas de drenagem interna, que consistem em drenos executados na fundação do reservatório, semelhantes a drenagem interna de pilhas de estéril. Tal sistema deve permitir o padrão de fluxo gravitacional e subvertical de água no interior do reservatório, resultando em um depósito despressurizado no que tange à atuação de forças de poropressão. Os rejeitos são então lançados a partir da crista do dique construído inicialmente. São construídos alteamentos sucessivos utilizando o próprio rejeito, geralmente pelo método de montante.

Um fator importante que deve ser levado em consideração no momento da escolha do método de empilhamento drenado é que o mesmo só pode ser utilizado em rejeitos que apresentem altos coeficientes de permeabilidade, de modo a permitir o fluxo de drenagem gravitacional e subvertical no interior do aterro. Esse método não é recomendado para a disposição de rejeitos com granulometria fina, pois tais materiais não possuem condições geotécnicas adequadas (OLIVEIRA-FILHO, 2015).

Considerando o comportamento hidráulico, geralmente são formadas lagoas na superfície do depósito com a água proveniente da polpa de rejeito, sendo que a contribuição de água afluenta é muito pequena ou limitada à precipitação na área do reservatório. Dessa forma, quando as operações de disposição se encerram, a lagoa de rejeitos praticamente desaparece. (OLIVEIRA-FILHO, 2015).

Pimenta (2011) citado por Portes (2013) traz alguns dos principais objetivos do método de empilhamento drenado:

- Maciço não saturado e estável;

- Maior densidade do material e conseqüentemente maior capacidade e maior vida útil do empreendimento;
- Menor potencial de dano em uma eventual ruptura;
- Mais facilidade para o fechamento e recuperação ambiental;
- Baixo risco de liquefação e ruptura;

A figura 24 mostra o empilhamento drenado de Xingu, que foi responsável por estocar rejeitos gerados na etapa de flotação do minério de ferro da mina de alegria da empresa Vale. Esse empilhamento possui 75 metros de altura, construído com diques de 5 metros de altura e crista com 5 metros de largura, com inclinação 3,0H:1,0V. Foi construído um sistema de drenagem interna constituído de um dique de partida e um tapete drenante perimetral, compostos por materiais granulares junto à fundação. Os alteamentos foram feitos pelo método a montante através do lançamento de rejeitos pelo método de aterro hidráulico. (ESPÓSITO, 2000).

Figura 4.16 - Empilhamento Drenado do Xingu



Fonte: GOMES, 2009

4.8 EMPILHAMENTO DE REJEITOS FILTRADOS

A técnica de empilhamento de rejeitos filtrados consiste em fazer o espessamento do rejeito até certa consistência e logo após enviá-lo a uma planta de filtragem, para a separação do sólido da água, que pode ser usada como água de recirculação (OLIVEIRA FILHO e ABRÃO, 2015). O material é então transportado e lançado em pilhas, onde será compactado segundo critérios geotécnicos e geométricos para a garantia de sua estabilidade. Este método se

configura como uma alternativa à disposição convencional de rejeitos, uma vez que necessita de uma menor área de implantação, decorrente do volume reduzido de rejeito, o que melhora o controle e estabilidade do projeto. Outra vantagem são os ganhos ambientais na redução e reaproveitamento do consumo de água e conseqüente ganhos econômicos decorrente destas características. Um dos fatores mais importantes para a implantação deste sistema é o teor de umidade em que o rejeito deixa os equipamentos de filtragem, que afetará o posterior manejo de material, transporte, lançamento e eventual compactação. A figura 25 mostra um exemplo de pilha de rejeito filtrado construída na mina Cerro Lindo, no Peru.

Figura 4.17 - Pilha de rejeitos filtrados (Dry Stack)



Fonte: Alves, 2020

4.9 QUADRO COMPARATIVO

Diferentes técnicas de disposição de rejeitos de mineração estão presentes na literatura, apresentando vantagens e desafios em termos de engenharia, sustentabilidade e segurança civil e ambiental. O quadro 1 apresenta uma comparação entre os métodos de disposição de rejeitos descritos nesse capítulo, suas principais vantagens e principais desafios encontrados.

Quadro 1: Principais métodos de disposição de rejeitos e suas vantagens e desvantagens

Método de Disposição	Principais Vantagens	Principais Desafios
Convencional	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo Custo de Operação; - Facilidade de transporte do material até o local de disposição por meio de bombas centrífugas; -Alta capacidade de disposição; 	<ul style="list-style-type: none"> -Cumprimento de atendimentos legais de alta complexidade; -Baixo potencial de recuperação da área;
Em cavas	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade de recuperação das áreas lavradas concomitante ao avanço da lavra; - Redução de impactos ambientais e visuais; - Minimização de custos operacionais; 	<ul style="list-style-type: none"> - Problemas relacionados à percolação de fluidos e estabilidade; -Pouco volume disponível para disposição de rejeitos dado o grande volume ocupado pela estrutura de contenção;
Co-Disposição e Disposição Compartilhada	<ul style="list-style-type: none"> -Melhor aproveitamento de áreas de disposição; -Possibilidade de iniciar a recuperação da área impactada desde o início de sua operação; -Apresenta bons parâmetros de estabilidade dos taludes; 	<ul style="list-style-type: none"> -Exige um planejamento operacional bem definido entre as áreas de planejamento de lavra e beneficiamento mineral; -Durante períodos chuvosos a compactação dos materiais fica comprometida.
Disposição Subaérea	<ul style="list-style-type: none"> - Alta recuperação de água; -Maior capacidade de armazenamento de material por área, em relação ao método convencional; -Maior densidade e estabilidade das estruturas; 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto custo de operação com atividades de espessamento e infraestruturas locais; -Necessidade da existência de mais de um reservatório para garantir a continuidade da operação;
Empilhamento Drenado	<ul style="list-style-type: none"> -Baixo risco de liquefação; -Baixo custo operacional; -Melhores condições ambientais para o fechamento e recuperação da área; 	<ul style="list-style-type: none"> -Aplicável somente em rejeitos com altos coeficientes de permeabilidade; -O sistema de drenagem interno deve ser robusto e eficiente;
Empilhamento de Rejeito Filtrado	<ul style="list-style-type: none"> -A revegetação pode ser realizada concomitante à operação; -Alto reaproveitamento de água do processo; -Baixos impactos ambientais; 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto custo de operação; -Não aplicável a rejeitos com granulometrias finas (>74 um)

5 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS FILTRADOS

5.1 EMPILHAMENTO E TRANSPORTE DE REJEITOS FILTRADOS

O método de empilhamento de rejeitos filtrados, tem tomado relevância nacional em substituição ao uso de barragens, devido a complexa legislação envolvendo esse meio que vem sendo desenvolvida reativamente aos desastres ocorridos em Marina e Brumadinho. O empilhamento de rejeitos filtrados consiste, basicamente, em desaguar os rejeitos por meio de espessadores até certa porcentagem de sólidos e depois submeter o material a uma operação de filtragem, onde o mesmo formará uma torta, composta por material não saturado, que por fim será empilhada em local adequado. O transporte do material filtrado até seu local de deposição pode ocorrer por correias transportadoras ou por caminhões, sendo que no último caso, tal transporte só se torna economicamente viável para taxas de produção de rejeito inferiores a 10 mil toneladas por dia (ALVES, 2020). Segundo Davies (2011), a trafegabilidade deve ser levada em conta no momento do transporte, pois geralmente o material já se encontra com um valor de umidade ótima para sua disposição. Em períodos chuvosos, a superfície da pilha de rejeitos pode se tornar inadequada para o tráfego de caminhões, sendo necessária muitas vezes fazer a compactação do material, acima do grau de compactação necessário para a estabilidade da pilha, o que pode tornar a operação dispendiosa economicamente.

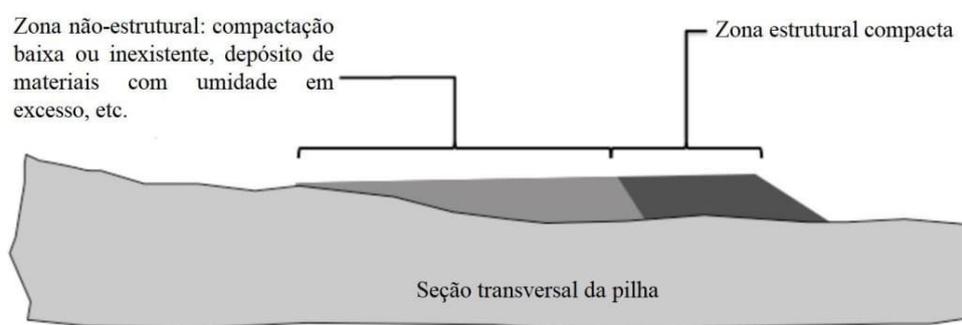
No momento de disposição na pilha de rejeitos, é desejável que o material esteja com um teor de umidade ótimo e densidade desejada de acordo com o projeto inicial do empreendimento. Uma das opções mais comuns para atingir esses valores ótimos é a formação de finas camadas de rejeito filtrado, para posterior compactação por rolos compressores. A espessura fina das camadas permite a evaporação da água presente nas mesmas pela ação dos ventos e da radiação solar, enquanto as operações de compactação do material garantem a estabilidade física da pilha e conseqüentemente mais segurança estrutural da mesma (ALVES, 2020).

Segundo Crysall et. al. (2018), a pilha de rejeitos pode ser dividida em duas zonas: zona estrutural compactada e zona não estrutural, como apresentado na figura 26. Tal divisão permite que a região mais externa do depósito, que possui função estrutural, atenda a critérios mais rigorosos de teor de umidade e compactação. Já a zona mais interna do depósito, chamada de não-estrutural, pode ser composta por rejeitos de granulometria mais fina, que geralmente

apresentam maior teor de umidade. Portanto, é aconselhável que se faça a filtragem separada de rejeitos mais finos, que possuem maior complexidade de operação.

A construção de pilhas em zonas é indicada para locais com estações chuvosas bem definidas, pois dessa forma os rejeitos compactados durante as estações secas, na zona estrutural, servem de contenção para os rejeitos que são depositados na porção mais interna da pilha durante períodos chuvosos. Sendo que não há necessidade de compactação do material lançado na zona não-estrutural, o que traz economia em relação a custos com uso de equipamentos.

Figura 5.1 - Zonas de pilha de rejeitos



Fonte: Lupo e Hall, 2010

É de grande importância a realização de drenagens internas e superficiais da pilha para consolidação do material depositado e dissipação de poropressões. Além disso devem ser realizados monitoramentos constantes visando minimizar a instabilidade da estrutura, controlando a saturação do material, de modo a evitar possíveis rupturas ou liquefações. Para minimizar a infiltração de água na pilha, podem ser construídas bermas de segurança e pontos de saída de água drenada, além de superfície de topo com caimento para evitar o empoçamento, mesmo em locais de clima árido (DAVIES, 2011).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO

A caracterização tecnológica é realizada por meio de ensaios realizados com amostras representativas do rejeito (SILVA, 2014). Esses ensaios podem ser feitos em laboratórios de solo especializados ou no local onde o próprio material está sendo utilizado. O quadro 2 apresenta os principais ensaios utilizados para a caracterização tecnológica de rejeitos e a respectiva norma que deve ser seguida para sua realização.

Quadro 2 - Principais ensaios utilizados para a caracterização tecnológica de rejeitos

Nome do Ensaio	Parâmetro a ser analisado	Norma
Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização	Teor de umidade e massa específica	NBR 6457
Análise granulométrica	Granulometria	NBR 7181
Determinação do limite de liquidez do solo	Limite de liquidez	NBR 6459
Determinação do limite de plasticidade do solo	Limite de plasticidade	NBR 7180
Ensaio de adensamento unidimensional	Compressibilidade	NBR 16853
Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável	Permeabilidade	NBR 14545
Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante	Permeabilidade	NBR 13292
Ensaio de compactação	Teor ótimo de umidade e densidade máxima	NBR 7182
Controle de compactação pelo método de Hilf - Metodo de ensaio	Grau de compactação	NBR 12102
Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação	Massa específica natural	NBR 9813
Determinação da massa específica aparente in situ com o emprego do frasco de areia	Massa específica natural	NBR 7185

5.2.1 *Teor de umidade*

Segundo Davies e Rice (2001), alguns parâmetros operacionais e particularidades devem ser levadas em consideração no momento de projeto e operação de uma pilha de rejeitos filtrados. O primeiro é a relação umidade/densidade do material que determina as expectativas quanto aos valores que poderão ser atingidos de grau de compactação do mesmo. Outra característica importante intrínseca aos materiais são os limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade). Com o avanço das tecnologias de filtragem, rejeitos contendo maior percentual de grãos do tamanho argila, estão sendo produzidos. Visto isso, os projetistas e profissionais responsáveis pela operação da pilha de rejeitos devem se atentar a quaisquer mudanças aparentes nos limites de Atterberg e associá-las à resistência ao cisalhamento do material e parâmetros de permeabilidade (DAVIES, RICE, 2001). A combinação de um rejeito com elevadas porcentagens de teor de umidade e altos limites de plasticidade, foge do ideal da construção de empilhamentos a seco. Sendo assim, durante o projeto de um empreendimento

deste tipo, é necessário acompanhamento do material através de ensaios em laboratório e *in situ*, para verificar possíveis alterações no material (ULRICH; COFFIN, 2013).

Em relação ao teor de umidade, existem duas formas de realizar os cálculos para obtenção de tal parâmetro. A primeira equação 1 é geralmente utilizada nas áreas de beneficiamento mineral e metalurgia.

$$W_m = \frac{m_w}{m_t} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

W_m= Umidade metalúrgica;

M_w= Massa de água;

M_t = Massa de sólidos + Massa de água.

Já a segunda opção de cálculo, apresentada por meio da equação 2 é mais comum em áreas envolvendo a geotecnia e afins:

$$W_g = \frac{m_w}{m_s} \quad \text{Equação 2}$$

W_m= Umidade geotécnica;

M_w= Massa de água;

M_t = Massa de sólidos.

A diferença entre ambas as expressões apresentadas deve ser compreendida tanto pelo engenheiro responsável pelo projeto da pilha quanto por aquele que é responsável pelas operações da planta de filtração. Tal diferença pode se tornar significativa principalmente quando se trabalha com materiais que exibem comportamento plástico. A equação 3 apresenta uma correlação entre os valores de teor de umidade “metalúrgico” e “geotécnico”.

$$W_m = \frac{w_g}{(100 + w_g)} \quad \text{Equação 3}$$

As tortas de rejeito saem da planta de filtração, geralmente com um teor de umidade acima de sua umidade ótima, levando em considerações operacionais do processo de filtração. Visto isso, em ambientes com climas úmidos, a superfície da pilha pode se tornar não trafegável,

principalmente em períodos de chuvas intensas, devido ao fato de que o material pode não atingir o grau de compactação previsto no projeto, fato este, causado pelo excesso do teor de umidade do mesmo. Dessa forma, devem ser previstas instalações como platôs de secagem, durante tais períodos, para garantir a continuidade das operações (DAVIES; RICE, 2001).

Davies e Rice (2001) elucidam que o grau de compactação para atingir a trafegabilidade dos equipamentos pode ser maior do que aquele exigido para manter os parâmetros de estabilidade da pilha. Isso pode favorecer requisitos geotécnicos, uma vez que o material se encontrará mais compactado. Por outro lado, será necessário o uso de mais equipamentos para essa operação e um maior acompanhamento das equipes de controle de qualidade do empreendimento.

Segundo Davies (2011), muitas vezes, o teor de umidade operacional da torta filtrada é baseado apenas em parâmetros da planta filtragem, levando em conta parâmetros operacionais dos filtros utilizados para o desaguamento do material. Contudo, o teor de umidade alvo do rejeito filtrado deve ser tal que facilite a construção da pilha e atenda aos critérios de estabilidade de taludes. Uma regra prática utilizada é que a torta filtrada atinja a umidade ótima para a compactação do material, determinada por meio do ensaio de compactação, NBR 7182 e ASTM D-698. Entretanto, atingir esse parâmetro operacional pode ser relativamente difícil, uma vez que o clima influencia diretamente no teor de umidade do material, assim como o rendimento da planta de filtragem pode ser impactado.

Podem ser feitos ajustes nos valores de teor de umidade alvo da planta de filtragem, levando em consideração as condições climáticas no local do projeto. Em locais com clima árido a secagem adicional do material pode acontecer de forma natural durante o transporte do mesmo até o seu local de disposição. Já em climas úmidos ou frios, pode ser necessário reduzir o teor de umidade alvo dos rejeitos, uma vez que a umidade exterior pode impactar o material durante o seu transporte e sua disposição.

Para rejeitos com um maior teor de argila, os tempos de ciclo da planta de filtragem e custos de OPEX (*operational expenditure*), relacionados aos gastos operacionais para produzir uma torta com valores de umidade próxima da umidade ótima aumentam de forma significativa. Neste caso, deve se levar em considerações outros critérios no momento da determinação da umidade alvo da torta filtrada, como critérios de estabilidade de taludes globais, potencial de saturação e presença de infiltrações.

Milonas (2006) afirma que o formato dos grãos afeta a estrutura do aterro, uma vez que influencia no índice de vazios presente entre as partículas e pode alterar o ângulo de atrito entre os grãos. Segundo o mesmo autor, rejeitos formados por partículas arredondadas apresentam resistência drenada menor do que aqueles rejeitos constituídos de partículas alongadas e angulares.

Guimarães (2011) verificou que a granulometria dos rejeitos é um fator condicionante no que diz respeito à eficiência das operações de filtragem. Partículas com granulometria extremamente fina, também chamadas de lamas, com diâmetros inferiores a 0,01 mm apresentam baixa eficiência de filtragem quando comparadas a partículas mais grosseiras, com diâmetros que variam entre 0,02 mm a 0,015 mm. A granulometria dos rejeitos está relacionada a outros parâmetros operacionais importantes como a permeabilidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Bossi (2015) constatou por meio de diversos estudos em amostras de rejeitos de minério de ferro que a presença de partículas finas ($< 0,074$ mm) em excesso no material reduz significativamente a permeabilidade do mesmo.

5.2.3 Parâmetros de resistência

À medida que a água é retirada do rejeito, sua consistência aumenta progressivamente, de modo que sua resistência ou tensão de cisalhamento aumenta progressivamente. Para Milonas (2006), existe uma dependência entre o ângulo de atrito do material com a granulometria do mesmo. Rejeitos que possuem predominância de partículas com diâmetros maiores que 0,075 mm sem características de plasticidade, possuem uma permeabilidade elevada, alta resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade. Estas características também são dependentes dos processos de compactação, uma vez que diferentes compacidades afetarão a relação de vazios e conseqüente propriedades hidromecânicas destes materiais.

No caso de materiais arenosos, seu comportamento permeável propicia que mesmo quando esses materiais são submetidos a grandes carregamentos não repentinos, haja tempo suficiente para que as pressões neutras geradas no momento do carregamento se dissipem. Dessa forma, a resistência dos materiais arenosos é geralmente definida em termos de tensões efetivas cujo principal parâmetro de resistência ao cisalhamento é o ângulo de atrito. Para Bossi (2015) os principais fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento dos rejeitos arenosos são o formato e tamanho dos grãos, a distribuição granulométrica e a presença de água. A medida da resistência dos rejeitos pode ser obtida por meio de ensaios de laboratório

convencionais como ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial. Na tabela 6 são apresentados a faixa de ângulos de atrito de acordo com a forma dos grãos do material.

Tabela 5.1 - Ângulos de atrito de acordo com cada material

Materiais	Faixa de ângulo de atrito
Bem graduado de grãos angulares	37° - 47°
Bem graduado de grãos arredondados	30 - 40°
Mal graduado de grãos angulares	35° - 43°
Mal graduado de grãos arredondados	28°- 35°

Fonte: Boccamino, 2017

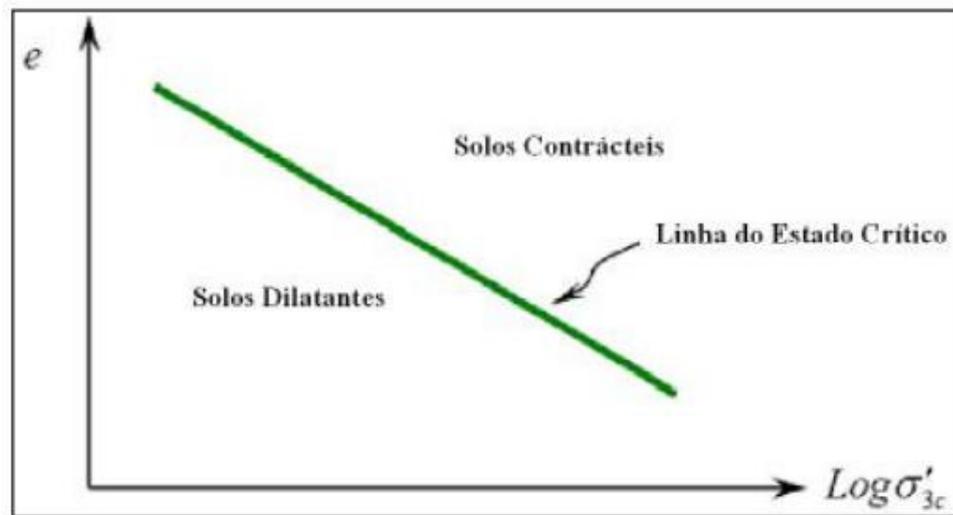
Uma alternativa para análises iniciais de projeto é a utilização de parâmetros de referência na literatura. Porém, Alves (2020) salienta que na literatura há uma falta de informações relacionadas a análise de projetos de pilhas de rejeito filtrado, dificultando a prática de projetos.

5.2.4 Estrutura física

A compacidade e os arranjos estruturais de materiais granulares são propriedades interdependentes entre si. Quando um material passa por um processo de compactação, ele melhora seu comportamento mecânico. Entretanto, segundo Boccamino (2017), a densidade relativa de um material granular é uma variável que deve ser levada em consideração na verificação da possibilidade de ruptura de uma estrutura por liquefação. Materiais granulares com baixos índices de vazios, com elevadas densidades relativas, apresentam chances reduzidas de rupturas.

Segundo Casagrande (1936), o índice de vazios crítico dos materiais é reduzido com o aumento da tensão confinante. Dessa forma, pode se entender que a linha que relaciona o índice de vazios crítico com logaritmo da tensão confinante efetiva foi definida como “linha do estado crítico”, mostrada na figura 28. Essa linha separa os solos com comportamentos contráteis e dilatantes (FREIRE NETO, 2009).

Figura 5.3 - Linha do índice de vazios críticos



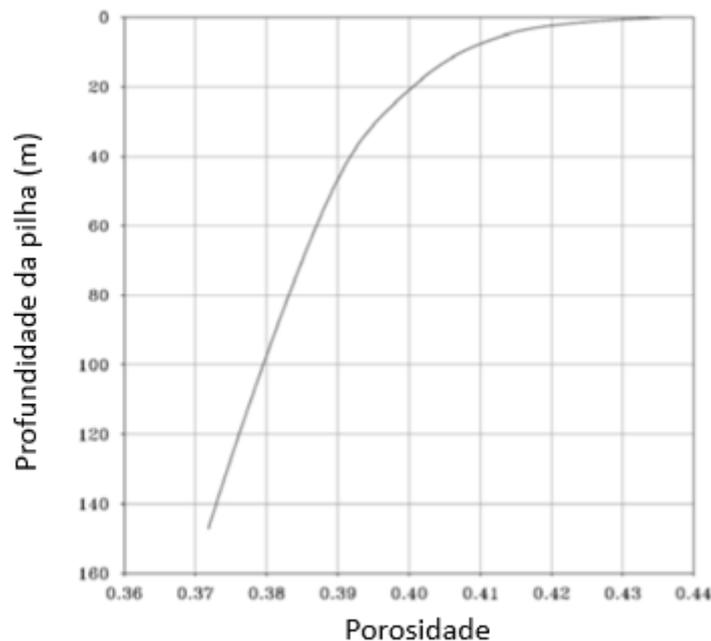
Fonte: Freire Neto, 2009

O processo de liquefação pode ser definido como a perda de resistência com a deformação, apresentado em materiais sem coesão, contráteis e saturados, durante o cisalhamento não drenado. (BOCCAMINO, 2017). Esse comportamento é desencadeado pela tendência das partículas em se deformarem durante o cisalhamento, o que provoca a variação das poropressões durante um carregamento não drenado (FREIRE NETO, 2009).

Segundo Araújo (2007), a liquefação está relacionada a solos que apresentam tendência à contração (redução de volume), durante o mecanismo de cisalhamento. Já os solos que possuem o comportamento de dilatação (acrécimo de volume) durante os esforços de cisalhamento, não apresentam susceptibilidade à liquefação. Neste último caso, a resistência ao cisalhamento não drenada é maior que a resistência drenada pelo efeito de sucção.

No caso dos rejeitos filtrados, os mesmos normalmente saem da planta de filtragem com um percentual de saturação entre 50% a 75%. Entretanto, o grau de saturação dos rejeitos varia em função de sua porosidade. Tal parâmetro muda conforme a profundidade da pilha aumenta, ou seja, na parte inferior da pilha existe uma menor porosidade enquanto no topo da pilha são assumidos valores maiores de porosidade. A figura 29 apresenta a relação entre a porosidade e a profundidade da pilha, nele é possível observar que a redução da porosidade em função da compressão dos rejeitos na estrutura.

Figura 5.4 - Relação entre a porosidade e a compressibilidade de rejeitos



Fonte: Lupo e Hall, 2010

No caso de o material ser altamente compressível, existe a possibilidade de que o mesmo se torne totalmente saturado, fazendo com que qualquer carregamento adicional possa desencadear a origem de pressões excessivas de água nos poros. Tal fato pode aumentar o risco de liquefação da estrutura (LUPO; HALL, 2010).

O potencial de liquefação de um dado material pode ser obtido por meio da interpretação de ensaios de compressão triaxial especiais, que utilizam da análise da granulometria do mesmo juntamente com ábacos e formulações empíricas com posse de dados de condições físicas e geotécnicas da estrutura em mãos (BOCCAMINO, 2017).

5.3 ASPECTOS DE PROJETO

5.3.1 Elementos integrantes

Atualmente ainda não existe uma normalização ou leis específicas que abordem os requisitos mínimos e parâmetros que devem ser adotados durante a criação de um projeto de pilha de rejeitos filtrados. Visto isso, por boa prática, a NBR 13029: 2017 tem sido seguida. Essa norma trata acerca da elaboração e apresentação de um projeto de disposição de estéril em pilha. Considerando as particularidades de cada projeto e de cada material depositado, a NBR

13029:2017 pode nortear os empreendedores na concepção de um projeto de pilha de rejeitos filtrados. Nesse sentido, os projetos que podem ser em nível conceitual, básico e executivo devem apresentar:

- Introdução: Fornecimento de informações básicas acerca do empreendedor, e sobre o projeto como acesso, finalidade, capacidade volumétrica, vida útil operacional da pilha e características do material a ser disposto;
- Estudos Locacionais: O empreendedor deve apresentar estudos locacionais que visam descrever as opções locacionais estudadas, de forma comparativa, justificando a escolha feita para o projeto executivo;
- Caracterização química do material a ser disposto: Descrever e analisar tecnicamente os resultados dos ensaios de caracterização química dos materiais a serem dispostos. Recomenda-se que seja avaliado o potencial de geração de drenagem ácida e lixiviação neutra.
- Estudos hidrológicos e hidráulicos: Visam quantificar e caracterizar possíveis surgências encontradas na área a ser ocupada pela pilha, descrever as características climáticas e hidrológicas da área, por meio dos estudos de cheias e de hidrometeorologia e indicar as estimativas feitas para as taxas de geração de sedimentos através dos estudos sedimentológicos;
- Estudos Geológicos-Geotécnicos: Visa estudar o mapeamento geológico geotécnico da área a ser implantada a estrutura e objetiva orientar a programação das investigações necessárias para se fazer o estudo das fundações da mesma. Contempla investigações da geologia local, parâmetros de fundações e características intrínsecas ao material que deve ser empilhado;
- Premissas e hipóteses admitidas: As premissas e hipóteses admitidas para o projeto devem ser informadas no projeto da estrutura, tais como características do material a ser empilhado; metodologia de construção, tipos de materiais de construção, condições de percolação, fatores de segurança, e premissas hidrológicas, hidráulicas e operacionais;
- Geometria e arranjo geral: Deve apresentar a locação e a geometria final da pilha, considerando a localização em relação ao empreendimento, curva elevação x volume, sistemas de drenagem e estrutura para a contenção de sedimentos, quando houver;

- Acessos provisórios e definitivos: Tem como objetivo descrever os acessos provisórios, necessários à formação ascendente da pilha. Deve apresentar a locação dos acessos definitivos, necessários para os serviços de manutenção da estrutura;
- Sequência de formação: Visa apresentar as etapas de formação da pilha, como construção do acesso à base, drenagem interna, sequenciamento temporal do aterro, drenagem superficial, instrumentação e revestimento vegetal;
- Tratamento das fundações: Mostrar os procedimentos utilizados para a preparação das fundações, como desmatamento, remoção ou tratamento de materiais inadequados e controle de água superficial e subterrânea;
- Projeto Geométrico: No projeto geométrico devem ser indicados todos os elementos geométricos do arranjo geral da pilha, informando os dados de locação necessários para sua implantação;
- Drenagem Interna: Deve apresentar os critérios de dimensionamento de drenagem interna, assim como suas locações, geometria dos drenos e das transições e especificações dos materiais a serem utilizados;
- Drenagem Superficial: Visa apresentar a locação e a geometria dos dispositivos de drenagem superficial e as especificações dos materiais a serem utilizados;
- Análise de Estabilidade: Devem ser realizadas nas seções críticas da pilha com relação à altura, características de fundação e condições de percolação, bem como parâmetros de resistência obtidos com os estudos geológicos geotécnicos;
- Proteção Superficial: Devem ser especificados os revestimentos a serem aplicados nas bermas, plataformas e taludes, quando necessário. Recomenda-se que sejam empregados revestimentos que possam se integrar ao meio ambiente;
- Instrumentação de controle: Nesse caso, devem constar as plantas de localização, as especificações técnicas e os detalhes construtivos dos instrumentos de monitoramento da pilha;
- Plano de desativação: Visa apresentar o plano de desativação conceitual, contemplando todas as atividades após o fim da vida útil operacional da pilha, tais como medidas de instrumentação e monitoramento, revestimentos, sistemas de drenagem superficial e garantia de estabilidade da estrutura;

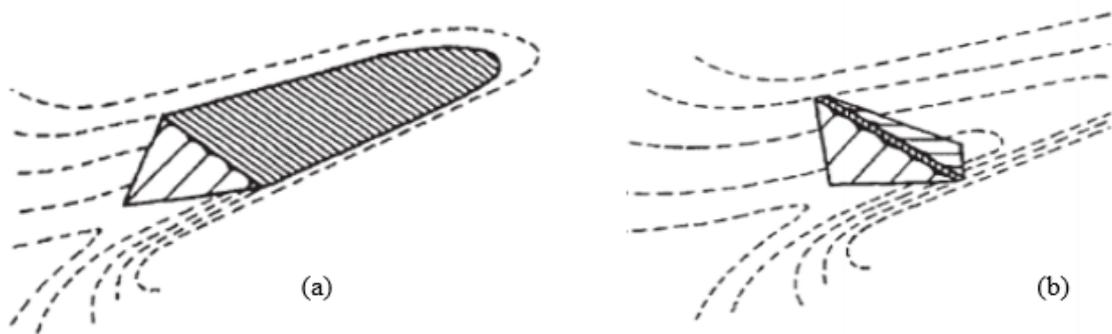
- Plano de fechamento: Visa apresentar o plano de fechamento conceitual, sempre que o uso futuro da área da pilha estiver e/ou houver legislação específica.

5.3.2 Geometria de pilhas

A geometria de uma pilha é variável em função da topografia do local e de fatores relacionados aos parâmetros intrínsecos ao material a ser estocado. Segundo Hawley & Cunning (2017) existem três tipos de pilhas distintas: tipo vale, encosta e pirâmide, sendo esta última a mais comum.

As pilhas em vale ocupam o local de um ponto da encosta até outro, como apresentado na figura 30 (a), possuem condições para lidar pelo fluxo de água descendente, uma vez que as superfícies desse tipo de pilha são inclinadas para permitir a drenagem natural da água da chuva. Canais também são construídos para o desvio dessas águas na superfície da estrutura. Uma variação das pilhas em vale são as pilhas transversais a um vale (Figura 30 (b)), nas quais a estrutura se encontra em um vale, mas não o preenche. Tais estruturas requerem um sistema de drenagem eficiente de modo a evitar que a água se acumule a montante da pilha.

Figura 5.5 - (a) Pilhas em vale, (b) Pilhas transversais a um vale



Fonte: Hawley & Cunning, 2017

As pilhas em encostas são pilhas alocadas contra as encostas, sendo que sua construção e seus processos de alteamento se iniciam no fundo do vale (figura 31 (c)). O formato dessa estrutura favorece o acúmulo de água em canais de desvio superficiais, dependendo da sua

altura. As pilhas de crista, mostradas na figura 31 (d), são um tipo de pilha em encosta na qual os taludes da pilha são simétricos em ambos os lados da estrutura.

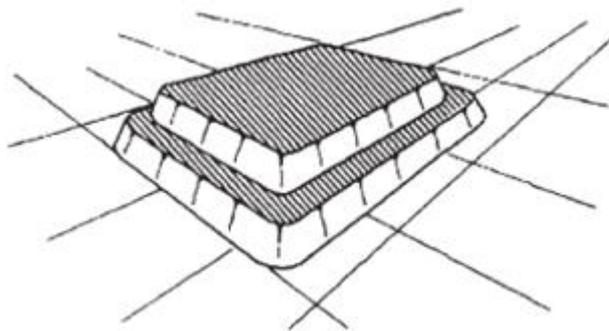
Figura 5.6 - (c) Pilhas de encosta; (d) Pilhas de crista



Fonte: Hawley & Cunning, 2017

As pilhas em formato pirâmide possuem a base quadrada ou um dos lados alongados, como mostrado na figura 32. A base da pirâmide deve ser plana e ligeiramente inclinada. As vantagens desse tipo de construção são que nesse formato a pilha recebe somente precipitação direta sobre a pilha, reduzindo a quantidade de água a ser tratada. Já as desvantagens estão relacionadas a menor quantidade de rejeito disposta por área, quando comparada com outras configurações. No Brasil, esse tipo de pilha é chamado também de “bolo de noiva”.

Figura 5.7 - Pilha do tipo “Bolo de noiva”



Fonte: Hawley & Cunning, 2017

5.3.3 *Sistemas de drenagem*

Existem dois tipos de sistemas de drenagem que devem ser considerados na concepção de um projeto de pilha de rejeito. O primeiro diz respeito ao sistema de drenagem interna que pode ser definida como o movimento de água que se dá através do fluxo interno ao longo dos poros, horizontes e camadas do material empilhado. Já o sistema de drenagem externa ou superficial tem como principal finalidade captar águas que chegam ao corpo da pilha por meio de áreas adjacentes e também captar águas que eventualmente incidam diretamente sobre a pilha, como as águas pluviais, e direcioná-las para o local de desague adequado, que não comprometa a estabilidade da estrutura (PETRONILHO,2010).

Costa (2017) afirma que mesmo que o material se encontre compactado na pilha, sempre haverá percolação de água entre suas partículas. Dessa forma, é importante o conhecimento acerca da condutividade hidráulica presente na estrutura e das condições de fluxo do escoamento para possibilitar um sistema de drenagem interna mais eficiente, melhorando as condições de estabilidade da pilha.

Ainda não existe, no âmbito legal, normas que abordem parâmetros de drenagem para pilhas de rejeito. Porém é usual que os projetos de tais estruturas sigam a ABNT NBR 13029:2017, que traz algumas considerações sobre o sistema de drenagem de pilhas de estéril. A primeira consideração aborda que o dimensionamento da drenagem interna deve considerar as características dos materiais de construção dos drenos, da fundação e dos materiais que serão constituintes da pilha. Além disso, a drenagem interna deve ser dimensionada de acordo com as vazões de referência medidas ou calculadas na área de implantação da pilha.

Segundo a ABNT NBR 13029:2017 o projeto de concepção de uma pilha deve apresentar as locações e a geometria dos dispositivos de drenagem superficial e as especificações dos materiais a serem utilizados. Os seguintes tempos mínimos de recorrência são recomendados:

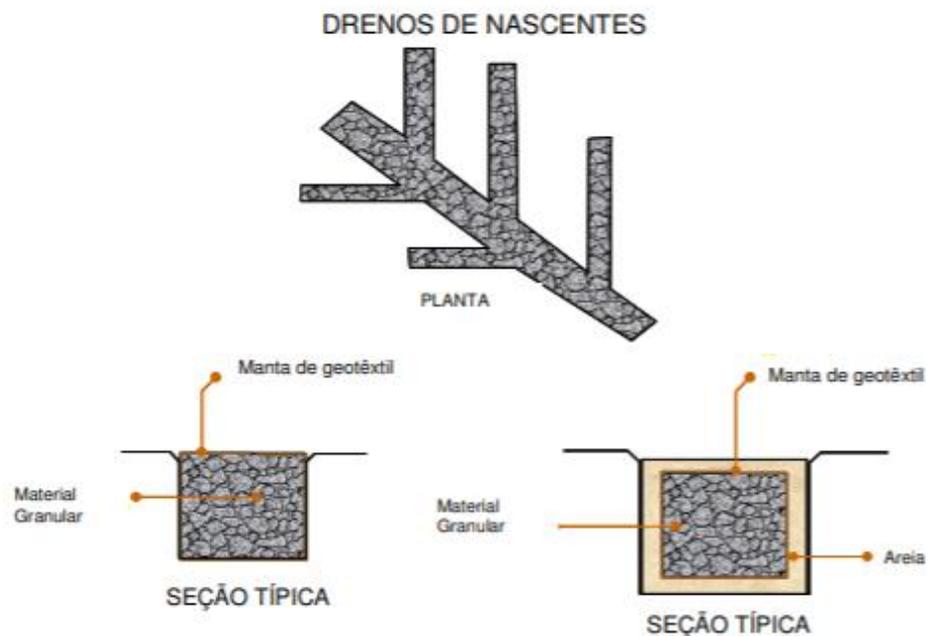
- 100 anos para dispositivos de pequena vazão, como canaletas de berma e descidas d'água entre taludes;
- 100 anos para os canais periféricos temporários de coleta e condução de águas superficiais;
- 500 anos para os canais periféricos definitivos de coleta e condução de águas superficiais.

Para Azevedo (2005), os sistemas de drenagem interna são fundamentais para garantir a estabilidade de pilhas, uma vez que permitem avaliar o nível de poropressão, direcionar o fluxo de água e evitar o carreamento de materiais finos. Tais fatores podem comprometer a estabilidade da estrutura por meio de problemas de erosão interna como *piping* e outros.

O tipo de drenagem interna mais comum encontrado em pilhas são os drenos de fundo ou tapetes drenantes (Figura 33). Tais drenos são constituídos de fragmentos rochosos como matacões e britas de granulometria adequada para atender os afloramentos surgentes no lençol freático. São usadas também mantas de geotêxtil de modo a evitar a colmatagem da drenagem.

O conjunto de drenos pode assumir a forma de uma espinha de peixe, sendo que os drenos mestres são posicionados no fundo do talvegue, conforme mostrado na figura 31. Todos os drenos de fundo deverão ser conduzidos até o enrocamento de pé, de modo que sejam evitadas erosões na estrutura.

Figura 5.8 - Desenho esquemática de dreno de nascente



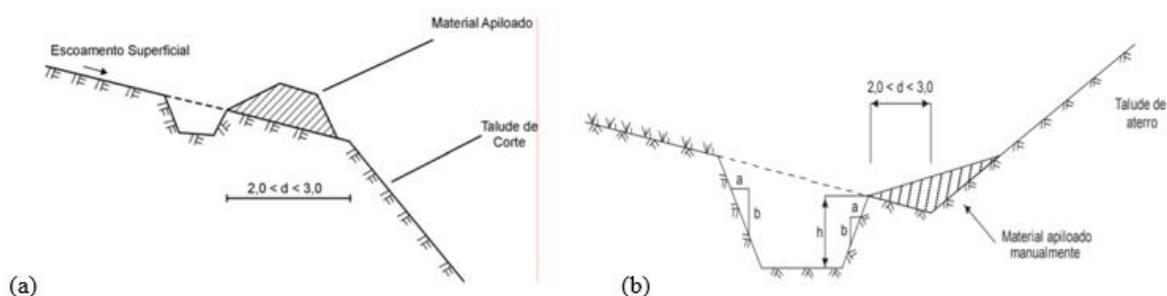
Fonte: Carvalho, 2009

O sistema de drenagem superficial em pilhas compreende a utilização de diversos dispositivos que destinam as águas superficiais captadas para locais seguros. Geralmente são utilizadas canaletas com caimento de 1% na direção longitudinal (do centro para as ombreiras) e de 3% na direção transversal, no sentido do pé da bancada (FERREIRA, 2016). São projetadas

também leiras trapezoidais na crista e ao longo dos bancos para a preservação dos taludes já acabados da pilha.

As valetas de proteção de corte têm como principal objetivo interceptar as águas que escorrem pelo terreno natural a montante de modo a impedir que as mesmas alcancem o talude de corte (figura 34 (a)). Tais valetas podem ter a seção trapezoidal, retangular ou triangular. Já as valetas de proteção de aterro, mostradas na figura 34 (b), possuem a função de interceptar as águas que escoam pelo terreno a montante, impedindo que as mesmas alcancem o pé do talude de aterro. Além disso, as mesmas tem a finalidade de receber as águas das sarjetas e valetas de corte, de modo a conduzi-las ao dispositivo de transposição de talvegues.

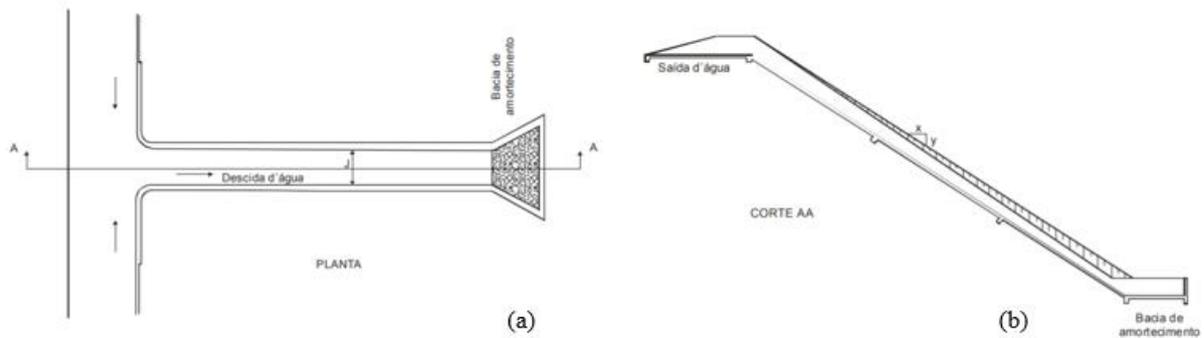
Figura 5.9 - (a) Valetas de proteção de corte, Valeta de proteção de aterro



Fonte: DNIT, 2006

Descidas d'água têm como principal objetivo conduzir as águas captadas por outros dispositivos de drenagem como canaletas da crista e das bermas à um ponto de descarga, como mostrado nas figuras 35 (a) e (b). As descidas são constituídas por degraus que são construídos nos bordos da pilha, ao longo do contato com o terreno natural.

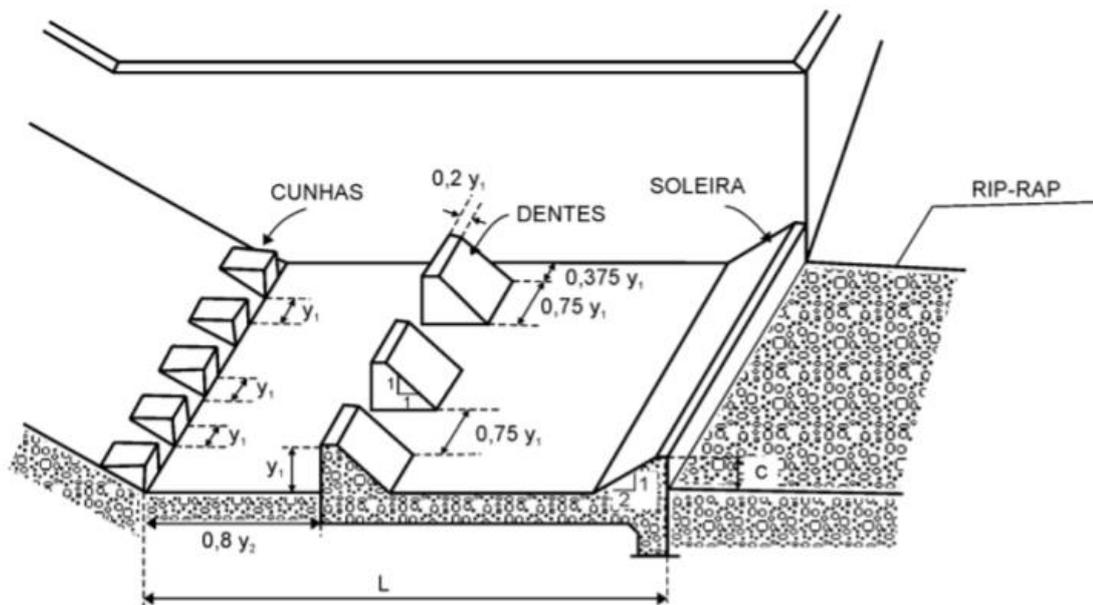
Figura 5.10 - Descida d'água (a) corte, (b) aterro



Fonte: DNIT, 2006

Os elementos dissipadores de energia, apresentados na figura 36, têm como finalidade dissipar a energia do fluxo d'água, reduzindo sua velocidade no escoamento ou no deságue para o terreno natural, visando evitar o fenômeno de erosão interna. As bacias de amortecimento são geralmente instaladas no pé das descidas d'água nos aterros, na boca de jusante dos bueiros ou na saída das sarjetas de corte, nos pontos de passagem de corte e aterro.

Figura 5.11 - Elementos dissipadores de energia



Fonte: DNIT, 2006

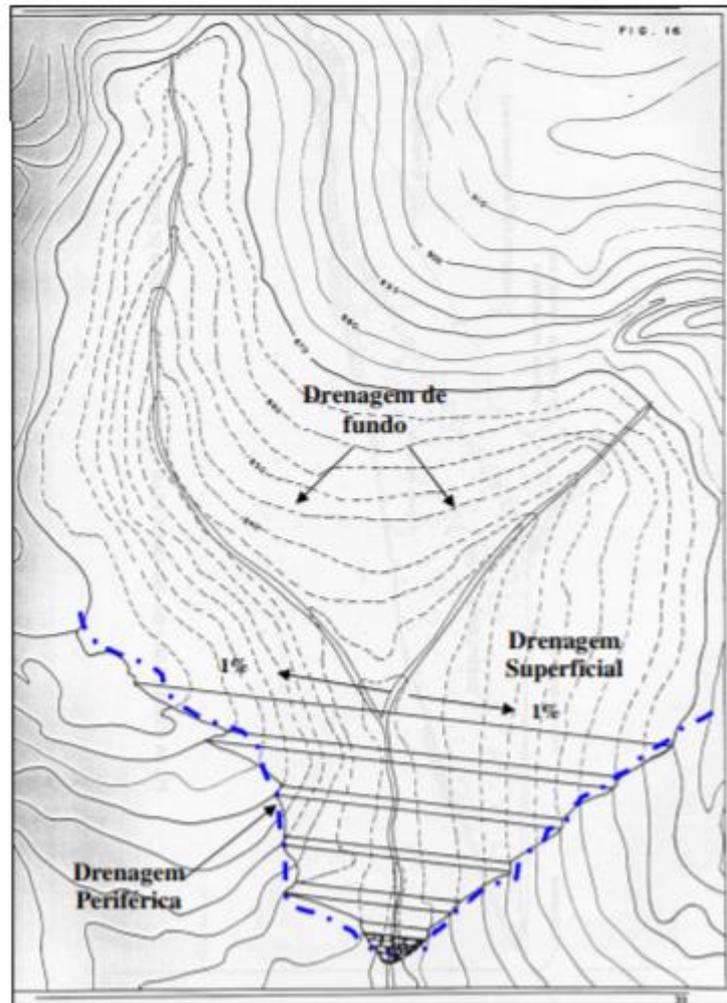
A drenagem periférica tem como principal objetivo receber as águas das descidas d'água e conduzi-las até o canal de drenagem natural com o menor impacto possível. Durante a

evolução na construção da pilha, são preparadas áreas preferenciais para descidas d'água e enrocamento no pé dos taludes. O enrocamento deve ser construído com materiais de granulometria mais grosseira e resistente, de modo que evite a ação do fluxo de água provoque erosões na pilha. A figura 37 mostra um croqui sem escala de elementos de drenagem em uma pilha.

O dique de contenção de sedimentos é uma estrutura similar a uma barragem de terra, porém com menores dimensões, que tem como principal objetivo reter as partículas finas provenientes da pilha que são escoadas pela água pluvial, de modo a evitar a contaminação da drenagem ácida do meio ambiente, visando reduzir os danos ambientais. Essa estrutura pode ser definida como um elemento estrutural, construída transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água, destinada a criação de um reservatório artificial de acumulação de água ou sedimentos podendo ser construída de terra ou enrocamento.

É necessário que o dique de sedimentos seja construído de forma a captar todos os fluxos da bacia hidrográfica que a pilha se encontra. A bacia hidrográfica ou bacia de captação pode ser definida como uma área delimitada espacialmente pelo relevo por meio de divisores de água e uma linha de pontos elevados, sendo drenada por um curso d'água, um sistema conectado de cursos d'água ou uma rede de drenagem de forma que a vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída chamada de seção de controle. Apesar de o dique de contenção possuir dimensões pequenas, pode ser necessário prever a execução de um canal extravasor, de modo que caso ocorra a cheia causada por tempo de retorno além do estimado, gerando o rompimento do dique, os impactos sejam minimizados.

Figura 5.12 - Croqui sem escala de sistemas de drenagem



Fonte: Carvalho, 2009

5.4 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

Segundo Gerscovich (2016), o principal objetivo de uma análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrer o escorregamento de massa de solo ou rejeito presente em um talude natural ou construído. Geralmente, as análises são realizadas por meio da comparação das tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento. Os estudos de estabilidade seguem uma metodologia visando obter dados suficientes para que a análise seja feita de forma eficaz e representativa. Essa metodologia é listada abaixo:

- Definição da topografia do talude;
- Definição das sobrecargas a serem aplicadas sobre o talude, caso existam;

- Execução das investigações de campo para definir a estratigrafia e identificar os elementos estruturais eventualmente enterrados na massa e os níveis freáticos;
- Definição das condições críticas do talude, considerando diversos momentos da vida útil da obra;
- Definição dos locais de extração de amostras indeformadas;
- Realização de ensaios de caracterização, resistência ao cisalhamento e deformabilidade (para estudos de análises e tensões);
- Análise dos resultados dos ensaios para definir os parâmetros de projeto;
- Adoção de métodos de dimensionamento para obtenção do fator de segurança ou das tensões e deformações.

A qualidade do projeto final é correlacionada a confiabilidade de ensaios e investigações de campo, assim como da análise da projetista do empreendimento em interpretar os resultados obtidos, definir os parâmetros de projeto e analisar os diferentes cenários que possam afetar diretamente as condições de resistência ao cisalhamento e conseqüentemente, reduzir o fator de segurança da estrutura (GERSCOVICH, 2016).

Segundo Souza (2020), é importante saber qual tipo de ensaio deve ser utilizado em cada situação de modo a definir as premissas de projeto que deverão ser utilizadas durante o dimensionamento da estrutura. Isto porque o rejeito pode apresentar propriedades resistentes distintas em cada tipo de solicitação geomecânica. Conseqüentemente, a determinação dos parâmetros mecânicos e de resistência ao cisalhamento devem atender às características dos esforços e mecanismos solicitantes em campo. Brown e Gillani (2016) citam três tipos de rupturas que são suscetíveis de acontecer em uma estrutura de contenção de rejeitos: ruptura não consolidada e não drenada, consolidada e não drenada, consolidada e drenada.

A ruptura não consolidada e não drenada é geralmente associada aos carregamentos aplicados durante a construção da geometria do talude em um curto tempo, onde é assumido que o excesso de poropressão desenvolvida durante o processo construtivo é igual a tensão imposta, sem ganho de tensão efetiva e resistência ao cisalhamento. Esse tipo de ruptura é mais comum em materiais que se encontram saturados.

Uma ruptura consolidada e não drenada é aplicável em carregamentos rápidos e de longa duração. Materiais que são contrácteis e saturados apresentam um excesso de poropressão positiva, o que diminui a tensão efetiva durante o cisalhamento, efeito conhecido como

liquefação estática. A compactação de materiais em campo é importante para evitar esse tipo de comportamento. Porém, à medida que pilha de rejeitos atinge determinadas alturas, o material pode se tornar contráctil.

Por fim, a ruptura consolidada e drenada acontece em pequenas velocidades/incrementos de carregamento, uma vez que não existe o desenvolvimento de excesso de poropressão positiva durante o cisalhamento. Os locais de disposição de rejeitos geralmente envolvem materiais não compactados ou argilas moles adensadas na fundação, o que pode implicar em um comportamento contráctil dos materiais, diminuindo a possibilidade de ruptura neste cenário (Brown e Gillani, 2016).

5.4.1 Fatores causadores de instabilidade

Segundo Pereira (2013), ao se iniciar um estudo de análise de estabilidade de taludes é importante abordar quais os fatores que podem causar a instabilidade dessas estruturas. Tais fatores são complexos, pois envolvem uma série de questões que associadas entre si, levam a ruptura ou danificação dos taludes.

Para Terzaghi (1943), o movimento de maciço de terra depende principalmente da sua resistência interna ao cisalhamento. Os movimentos de materiais durante uma possível ruptura podem ser classificados em escorregamentos, desmoronamentos e rastejos (VARNES, 1958). Os escorregamentos são causados pela formação de uma cunha de solo que se movimenta em relação ao resto do maciço formando uma superfície bem definida. Os desmoronamentos são movimentos rápidos, produto da atuação da força da gravidade sobre a massa de solo que se destaca do restante do maciço. Já os rastejos são movimentações lentas que ocorrem nas camadas superiores do maciço e não seguem uma superfície que separa de forma nítida a porção que se desloca da parte estável do maciço.

As causas de instabilidade em taludes podem ser agrupadas em três níveis (TERZAGHI, 1943). As causas externas se referem a atuação fatores que alteram o estado de tensão atuante sobre o maciço causando uma elevação na tensão cisalhante. Quando essa tensão supera ou se iguala a tensão de cisalhamento, ocorre o rompimento da estrutura. São exemplos de fatores externos: aumento demasiado na inclinação do talude, deposição de material ao longo da crista do talude, efeitos sísmicos, cortes no pé do talude, etc. As causas internas atuam de modo a reduzir a resistência ao cisalhamento da estrutura, sem necessariamente alterar visualmente a geometria do maciço. São exemplos desses fatores: intemperismo, erosão interna, variação nas poropressões, mudanças nas características geomecânicas dos materiais como redução na

coesão e ângulo de atrito, etc. Causas intermediárias compreendem ações que podem ocorrer na fundação do maciço devido a elevação ou rebaixamento do lençol freático, liquefação espontânea, empuxo hidrostático de água preenchendo fendas verticais, etc.

Segundo Gerscovich (2016), as análises de estabilidade em taludes, tem como principal objetivo realizar a comparação entre as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento. Com isso a definição de fator de segurança é dada pela equação 7:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad \text{Equação 4}$$

Não existe, no momento atual, alguma legislação ou norma técnica que determine o fator de segurança que deve ser adotado na construção de pilhas de rejeito filtrado. Entretanto, por boas práticas é usual que sejam seguidas normas relacionadas a outras estruturas geotécnicas como pilhas e barragens. Segundo a norma ABNT NBR 13028 que aborda a elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e armazenamento de água, o fator de segurança recomendável para a fase final de construção é de 1,3. Já a norma ABNT NBR 13029 que trata sobre a elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha determina que para análise de ruptura do talude geral, considerando uma superfície freática normal, o fator de segurança mínimo deve ser de 1,50.

5.4.2 Métodos de análise

Existem duas abordagens inerentes ao método de análise de estabilidade de taludes: determinística e probabilística. A abordagem determinística se baseia na obtenção de um valor de um fator de segurança resultante da razão entre esforços resistentes e solicitantes atuantes na massa analisada, mediante a definição de uma superfície de ruptura. Diferentemente da determinística, a análise probabilística leva em consideração o comportamento estatístico das variáveis para a representação das incertezas decorrentes da variabilidade dos parâmetros que são considerados no momento da análise de estabilidade. O método determinístico é amplamente difundido e muito utilizado no ramo da geotecnia, ao passo que as abordagens probabilísticas têm ganhado cada vez mais espaço, sobretudo pela relevância da confiabilidade estrutural na atualidade (GERSCOVICH, 2016).

Independentemente do método de análise de estabilidade de taludes, é necessária a adoção de um mecanismo analítico/numérico que descreve o comportamento dos fenômenos físicos de instabilização, que pode ser abordado via teoria de equilíbrio limite e/ou análises de tensão-deformação.

No método de equilíbrio limite considera-se que a ruptura acontece ao longo de uma superfície e que todos os elementos presentes ao longo dessa superfície atingem de forma simultânea a condição de um fator de segurança igual a 1 (solicitação se iguala à resistência).

A superfície potencial de ruptura que pode ter uma geometria genérica, sendo comum análises com geometria circulares, planares e em cunha (HORST, 2007). Segundo Marangon (2004), no caso de solos e materiais homogêneos tal qual é a grande maioria dos rejeitos filtrados, verifica-se que a superfície de cisalhamento apresenta uma geometria de ruptura próxima de um círculo também chamada de ruptura circular.

Para a análise de estabilidade, assume-se que o material compreendido acima da superfície é considerado um corpo livre e subdividido em fatias, como mostrado no quadro 3. O equilíbrio é então calculado pelas equações da estática e medido com base na análise do equilíbrio de cada fatia, em termos de forças ou momentos estabilizantes e instabilizantes. A tensão cisalhante mobilizada é determinada ao longo da superfície de ruptura de maneira que a estrutura esteja em estado de equilíbrio limite, ou seja, no limite da estabilidade.

A quadro 3 apresenta uma comparação entre os principais métodos de análise de estabilidade determinísticas. Segundo Gerscovich (2016), os métodos mais utilizados na prática são os de Bishop Simplificado e Jambu. Para rupturas com superfícies circulares, a diferença entre os valores de segurança obtidos pelo método de Bishop simplificado e pelos demais métodos mais rigorosos como Spencer ou Bishop Morgenstern não ultrapassa 5%. No caso de superfícies não circulares, o método de Jambu é, comumente o mais conservativo cuja diferença de fator de segurança obtido em relação aos outros métodos pode chegar até 30%. (ABRAMSON et. al., 1996).

Quadro 3 - Principais métodos de análise de estabilidade para equilíbrio-limite

Método	Superfície de ruptura	Considerações	Vantagens	Limitações	Aplicações
Bishop Simplificado	Circular	Considera o equilíbrio de forças e momentos entre as fatias.	Método simples, pode ser feito manualmente ou em computador com resultados conservativos	Aplicação imprecisa para solos estratificados	Recomendado para projetos simples.
Bishop e Morgenstern	Circular	Aplica o método de Bishop simplificado	Facilidade de uso	Limitado a solos homogêneos e taludes com inclinação superior a 27°	Para estudos preliminares, com riscos reduzidos de escorregamento
Spencer	Não circular	Método rigoroso, satisfaz todas as condições de equilíbrio estático	Valores de FS mais realísticos	Complexidade de cálculos	Para análises mais sofisticadas com restrições geométricas de superfícies de ruptura
Jambu	Não circular	Satisfaz o equilíbrio de forças e os momentos, mas despreza as forças verticais em cada fatia	Superfícies de ruptura realísticas. Implementação simples em computadores.	Aplicado para materiais homogêneos. Pode subestimar o fator de segurança	Grande utilização prática. Devem ser consideradas as limitações de cálculos
Morgenstern e Price	Não circular	Satisfaz todas as condições de equilíbrio estático. Resolve o equilíbrio geral do sistema. É um método rigoroso.	Considerações mais precisas que o método Jambu	Não é um método simples. Exige cálculos complexos	Para estudos ou análises detalhadas (Retroanálises)

Fonte: Gerscovich, 2016

De acordo com Gerscovich (2016), independentemente do método de equilíbrio limite adotado, as análises de estabilidade devem atender os seguintes aspectos:

- Possibilidade de abertura de trincas de tração, e conseqüentemente necessidade de incluir o empuxo da água na trinca como um tipo de força instabilizante;
- Possibilidade de ruptura progressiva, que pode ser causada por movimentações prévias ou por um comportamento de tensão x deformação bem definido. Nesses casos, é necessário avaliar a necessidade de se adotar parâmetros de resistência residual;
- Necessidade de análises de sensibilidade, que são feitas variando-se parâmetros como coesão, ângulo de atrito, nível d'água, etc.

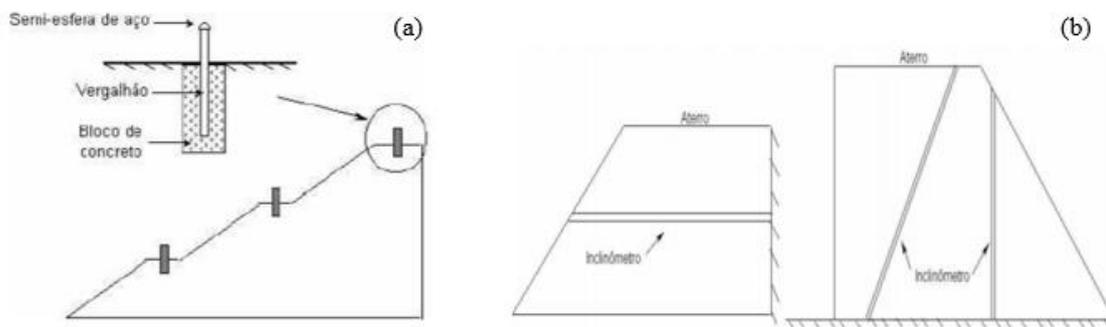
5.5 MONITORAMENTO E INSPEÇÃO

O monitoramento de estruturas tem como principal objetivo acompanhar de forma contínua o desempenho de determinada estrutura geotécnica visando prevenir e mitigar possíveis problemas que venham a surgir ao longo dos tempos. O monitoramento geralmente é feito por meio da instalação de instrumentação adequada e inspeções de campo rotineiras. A instrumentação presente em estruturas geotécnicas tem como principal objetivo garantir a segurança, minimizar custos durante a construção e controlar os procedimentos de construção e planejamento (Dunnicliff, 1988). Segundo Cruz (2004), o engenheiro responsável pela instalação dos instrumentos em determinada estrutura deve antes elaborar um plano de instrumentação. Tal plano leva em consideração características intrínsecas ao empreendimento como as propriedades dos materiais utilizado, a geometria e o método utilizado para construção, etc. Um programa de instrumentação visa fornecer parâmetros confiáveis das leituras dos equipamentos e compatibilizar os valores obtidos com as metodologias de construção utilizadas e às premissas do projeto.

Segundo Boccamino (2017), a oscilação da linha freática de uma estrutura geotécnica está relacionada ao volume de águas pluviais e a operação adequada dos dispositivos de drenagem interna. Portanto, a instalação de um medidor de vazão na saída da drenagem interna possibilita monitorar a operação dos drenos. Além disso, o monitoramento dos taludes pode ser aperfeiçoado através da implantação de marcos topográficos e inclinômetros nas bermas das pilhas, pois assim é possível acompanhar os deslocamentos superficiais e internos da estrutura.

Os marcos superficiais são instrumentos cuja função é dedicada à determinação dos deslocamentos verticais e horizontais dos maciços constituintes de estruturas geotécnicas. Nesse tipo de estrutura, os deslocamentos da estrutura são medidos por meio de levantamentos topográficos periódicos, em relação a marcos de referência que são instalados de forma fixa (FONSECA, 2003). A figura 38 (a) apresenta o esquema de instalação de um marco superficial. Já os inclinômetros (figura 38 (b)) são equipamentos que medem o deslocamento horizontal de determinada estrutura. Segundo Silveira (2006), os inclinômetros são uma forma de torpedo à prova d'água, dotado de um pequeno pêndulo interno, o qual é abaixado dentro de um tubo guia aproximadamente vertical. Dessa forma é possível medir os deslocamentos angulares em intervalos igualmente espaçados e seguindo direções preestabelecidas.

Figura 5.13 - (a) Esquema de instalação de um marco superficial, (b) Esquema de instalação de um inclinômetro



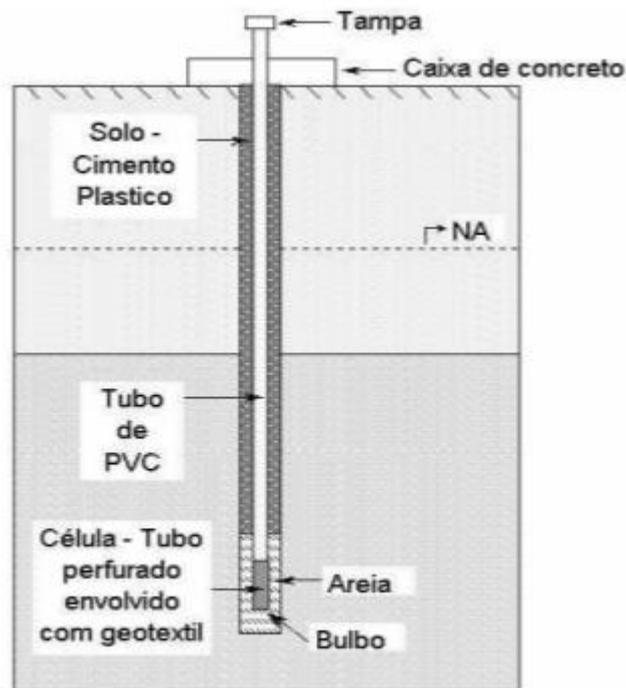
Fonte: Fonseca, 2006

Outro tipo de equipamento utilizado para o monitoramento de pilhas de rejeito são os piezômetros, que são utilizados para a verificação das pressões neutras no aterro e no terreno da fundação. Existem vários tipos de piezômetros, porém os mais utilizados para o monitoramento de estruturas geotécnicas são os de tubo aberto, popularmente chamados de Casagrande, como representado na figura 39 (CRUZ, 2004). Esses equipamentos são constituídos por uma célula acoplada a um tubo de PVC, que fica inserida em um bulbo de material drenante e confinada num trecho limitado com cerca de 1,0 m a 1,5 m por uma camada selante. A água dos poros passa através do filtro do bulbo drenante do instrumento até o momento em que entra em equilíbrio com a poro pressão. O nível a coluna d'água no interior do tubo do piezômetro é medido por meio de um pio elétrico ou por uma trena. No caso do pio, o sensor elétrico emite um sinal sonoro no momento em que a ponteira atinge o nível d'água no interior do equipamento.

De acordo com Boccamino (2017), as inspeções periódicas em pilhas em geral, devem acontecer com uma periodicidade de no mínimo uma vez ao mês. Tal inspeção deve ser feita sob supervisão de profissionais habilitados e capacitados. Segundo a NRM 19, que trata acerca de normas que devem ser seguidas para a disposição de estéril, rejeitos e produtos, a estrutura deve dispor de monitoramento de percolação de água, da movimentação da estabilidade e do comprometimento do lençol freático. Para Boccamino (2017), as inspeções de segurança visam avaliar os seguintes fatores:

- Condições de estabilidade física dos taludes
- Falhas na proteção dos taludes
- Condições de drenagem da pilha

Figura 5.14 - Desenho esquemático de um piezômetro do tipo “Casa Grande”



Fonte: Fonseca, 2003

Por meio de inspeção visual da estrutura pode ser avaliada a estabilidade física dos taludes, onde busca-se verificar a existência de trincas, erosões, abatimentos, recalques ou a presença de toca de animais que possam comprometer a estabilidade da estrutura. Essa inspeção é feita por meio do preenchimento de uma ficha de inspeção, que é desenvolvida de forma particular em cada empreendimento, pela equipe responsável pela operação da pilha de rejeitos.

Parte constituinte da inspeção de segurança, a busca por falhas na proteção de taludes avalia se existem taludes na pilha com vegetação consideravelmente alta, ou taludes sem a proteção vegetal. Deste modo é feita a devida manutenção dos taludes e em alguns casos, a imediata recomposição vegetal.

Com relação à drenagem da pilha, são avaliadas as condições dos dispositivos de drenagem externa da pilha e realizadas medições de vazão na saída de drenos internos, como os drenos fundo. Isso é feito de forma a garantir que a água que sai da pilha não seja turva ou com algum indicativo de carreamento de materiais, que possam, porventura, comprometer o correto funcionamento do sistema de drenagem.

5.6 ASPECTOS ECONÔMICOS DO REJEITO FILTRADO

Segundo Gomes et al. (2016), o investimento necessário para a implantação de uma planta de filtragem pode ser inferior ao investimento necessário para a disposição convencional de rejeitos em barragens. Entretanto, os maiores custos relacionados aos empreendimentos que adotam o empilhamento de rejeitos filtrados estão relacionados com o controle de OPEX (*Operational Expenditure*). Para que tais custos sejam reduzidos, é necessário que ocorra uma interface muito próxima entre empreendedores, projetistas e equipe de operação e fornecedores de equipamentos de filtragem, de modo que o processo de filtragem e disposição ocorra de forma multidisciplinar e integrada, possibilitando a otimização das operações (Crysal et al. 2018).

Para Crysal et al. (2018), na última década, houve um avanço significativo nas tecnologias e equipamentos de filtragem, o que possibilitou uma redução significativa entre o OPEX do método de disposição de rejeitos filtrados e aquele gasto no método de disposição convencional (barragens). Segundo os mesmos autores, o OPEX para a disposição de rejeitos na última forma citada gira em torno de U\$ 1,00 (um dólar) por tonelada, enquanto o OPEX para disposição de rejeitos filtrados é um valor em torno de U\$ 2,00 (dois dólares) a U\$ 3,50 (três dólares e cinquenta centavos) por tonelada. Com o desenvolvimento progressivo e ampla aplicação do método de filtragem e disposição de rejeitos a seco, a expectativa é que a diferença de custos apresentada se torne ainda menor.

A tabela 7 apresenta os custos operacionais estimados para aplicação de diferentes técnicas utilizadas para disposição de rejeitos. Tal valores são generalizados e visam indicar a faixa de custos com desaguamento de rejeitos. Segundo Mend (2017), os custos totais são particulares empreendimento e devem levar em consideração características que variam de acordo com o local e o projeto da estrutura.

Segundo Fourie (2018), os custos para filtrar, carregar, transportar, espalhar e compactar um mesmo tipo de rejeito pode variar de A\$ 1,00 a A\$ 3,50 (dólar australiano) por tonelada. Ainda, o custo de instalação de uma planta de filtragem pode ser 17 vezes maior que o custo de uma planta de desaguamento convencional e vezes mais cara que uma planta de rejeitos espessados. Entretanto, o custo unitário da filtragem de rejeitos tende a se tornar cada vez menor, devido ao avanço tecnológico dos equipamentos utilizados nesse processo. Outro fator que tende a diminuir os custos desse tipo de disposição de rejeitos é o aumento da escala de produção de rejeitos e a utilização de correias transportadoras e substituição ao uso de caminhões.

Tabela 5.2 - Custos operacionais para diferentes técnicas de disposição de rejeitos

Tecnologia de desaguamento	Custo típico de processamento e transporte (U\$/t)	Custo típico de gestão das estruturas de contenção e da água (U\$/t)	Total (U\$/t)	Margem de custo (U\$/t)
Convencional	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: Alves, 2020

A figura 40 exemplifica o detalhamento dos custos operacionais de uma pilha de rejeitos filtrados pertencente a empresa Nexa Resources - Unidade Vazante. É possível perceber que maiores gastos são aqueles relacionados a aluguel de equipamentos e mão de obra. O transporte do rejeito filtrado até o seu local de disposição representa cerca de 52% do custo total de operação e empilhamento do material.

Tabela 5.3 - Custos operacional de uma pilha da empresa Nexa Resources - Unidade VazantCusto Variável

	Custo Mensal (R\$)	Custo Anual (R\$)
Energia	178.469,45	2.141.633,39
Floculante	20.251,91	243.022,87
Troca de lonas	26.160,00	313.920,00
Equipamentos para movimento (aluguel)	567.792,73	6.813.512,76
Combustível (litros de diesel)	238.400,45	2.860.805,38
Subtotal	1.031.074,53	12.372.894,40
Custo fixo		
Mão de obra para movimentação	169.200,00	2.030.400,00
Mão de obra para disposição	93.600,00	1.123.200,00
Mão de obra para manutenção	77.640,00	931.680,00
Custo de manutenção	20.233,33	242.799,96
Locação de veículo pequeno (transporte de operadores)	1.400,00	16.800,00
Consultoria externa	6.666,57	80.000,04
Subtotal	368.740,00	4.424.880,00
TOTAL	1.399.814,53	16.797.774,40

Fonte: Alves, 2020

6 ESTUDOS DE CASOS NACIONAIS

Existem atualmente em todo o país diversas empresas mineradoras que estão em processo de implantação de pilhas de rejeito à seco, e outras que já estão em operação propriamente dita. Segundo uma publicação da revista *In the Mine* (2019), alguns exemplos de tais empresas são:

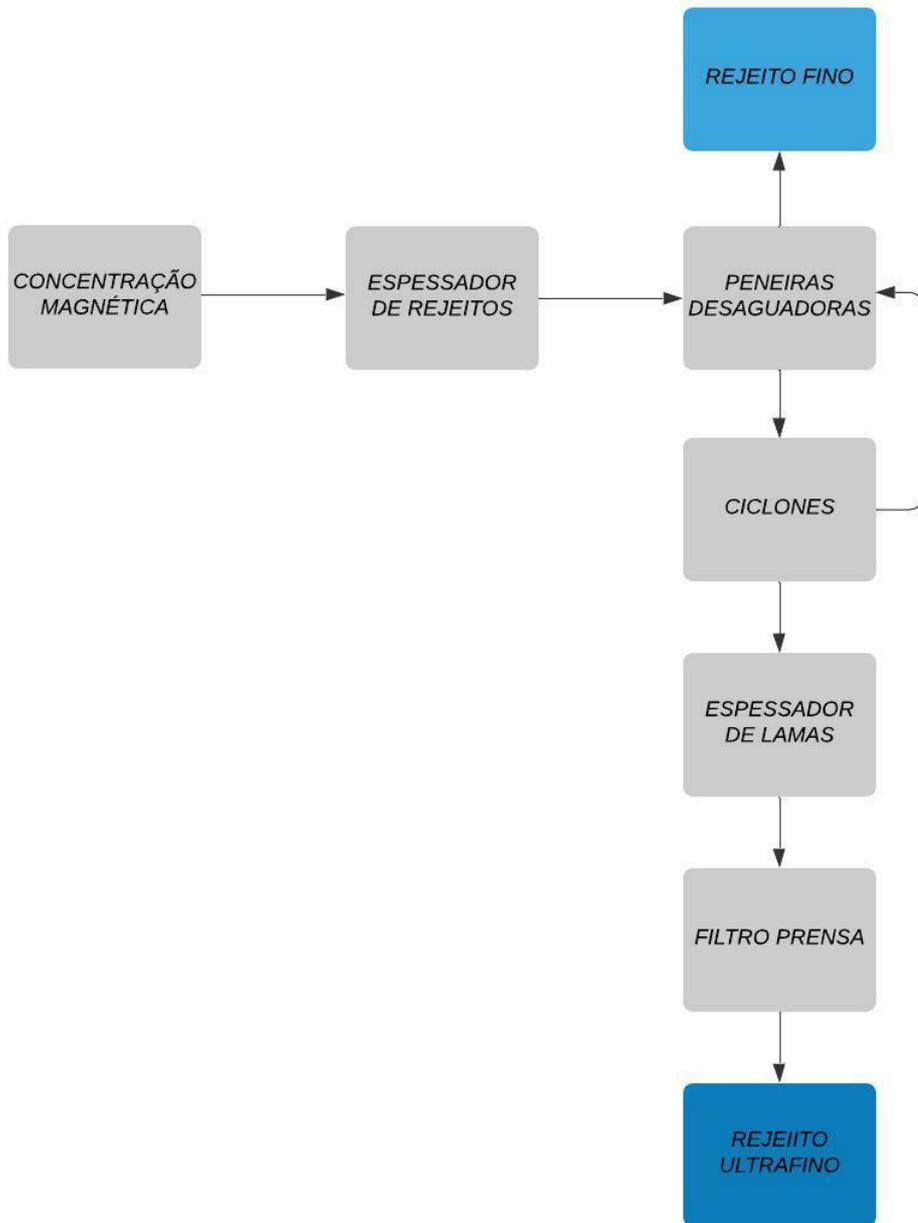
- AngloGold Ashanti, localizada na cidade de Sabará - MG - Mina Cuiabá - A empresa já conta com a filtragem de 50% do rejeito gerado.
- AngloGold Ashanti, localizada na cidade de Sabará - MG - Minas Córrego do Sítio - Ocorre a filtragem de cerca de 40% de todo o rejeito gerado;
- CBA, em Miraf MG - Projeto de planta de filtragem de rejeitos e disposição final da barragem Palmital, com investimento de 300 milhões de reais, com conclusão prevista para 2022;

6.1.1 *Mina Pau Branco*

A mina Pau Branco fica localizada na cidade de Brumadinho em Minas Gerais, a 30 quilômetros de Belo Horizonte e pertence a empresa Vallourec que desenvolve atividades produtivas de extração de minério de ferro desde a década de 1980. A produção da empresa gira em torno de 5 milhões de toneladas de ferro por ano. Os principais produtos extraídos são o minério de itabirito e minerais como a hematita e a goethita.

O minério com cerca de 54% de ferro é extraído na mina é beneficiado em uma instalação de tratamento de minérios (ITM) via úmida. O processo de beneficiamento conta com operações de classificação por peneiramento, ciclonagem, jigagem, concentração magnética, espessamento de lamas e filtragem, tendo como principais produtos o concentrado final e a torta de rejeito filtrado (SUPPA, 2019). A figura 41 mostra de forma simplificada a rota de beneficiamento da empresa.

Figura 6.1 - Rota de beneficiamento ITM I



Fonte: Suppa, 2019

A mina de Pau Branco foi pioneira na filtragem de rejeitos de minério de ferro, sendo que suas operações de filtragem se iniciaram no de 2015 a partir de uma planta contendo dois filtros prensa idênticos, modelo TERRAE 1500 x 2000 da fabricante Matec como mostra a figura 42. Cada um desses filtros contém em torno de 140 placas com dimensões de 1,5 x 2m e uma capacidade de produção de 80 toneladas de rejeito por hora. Em 2019, uma nova planta de filtragem foi instalada com capacidade de 150 toneladas de rejeito por hora, contendo um filtro

de 190 placas com dimensões de 2x2m. Atualmente todo o rejeito produzido na empresa tem sido filtrado, sendo eliminada a necessidade de barragens de rejeito na Vallourec.

Figura 6.2 - Planta de filtragem da mina de Pau Branco



Fonte: Suppa, 2019

O rejeito que alimenta a filtragem com densidades em torno de $1,5 \text{ g/cm}^3$ passa previamente por uma operação de espessamento e é armazenado em dois grandes tanques. O tecido filtrante usado possui uma vida útil de cerca de 1.500 horas na porção dos extremos do filtro, e nos blocos intermediários essa durabilidade varia entre 2.500 e 3.000 horas de vida útil. Os tempos de ciclo de cada um dos filtros utilizados variam entre 17 a 20 minutos, e em geral, a torta descarregada possui teor de umidade em torno de 15% chegando até a 17%. Com um tempo de ciclo maior é possível obter umidades menores, porém tal fato acarretaria uma redução significativa na produtividade do processo de filtragem como um todo.

Por fim, o material é descarregado em baias localizadas abaixo do filtro como mostrado na figura 43. Uma carregadeira retira o material das baias e carrega caminhões com capacidade de 40 toneladas. Os caminhões fazem o transporte do rejeito filtrado até uma pilha de estéril, também chamada de cachoeirinha, na qual atualmente é feita a disposição conjunta de rejeito e estéril proveniente da mina, esse método é conhecido também como codisposição. O rejeito é compactado por tratores e forma camadas com cerca de 80 cm de espessura. A DMT (Distância média de transporte) da planta de filtragem até a pilha é de cerca de 1 quilômetro. O empreendimento conta também com outras duas pilhas de estéril e duas barragens desativadas. Recentemente, a barragem Santa Bárbara, que possui volume armazenado de 711.922 m^3 de

rejeitos foi categorizada como nível 1 de emergência pela Agência Nacional de Mineração, ANM. A figura 44 mostra vista aérea das estruturas.

Figura 6.3 - Baias onde o rejeito filtrado é descarregado



Fonte: Suppa, 2019

Figura 6.4 - Vista aérea das estruturas de disposição de rejeitos na Vallourec



Fonte: Suppa, 2019

A pilha de rejeitos é construída de forma ascendente, de forma que cada alteamento sucessivo é sustentado pelo anterior. O rejeito é incorporado às camadas de estéril, sendo envelopado, visando impedir a criação de zonas preferenciais de acúmulo e percolação de água. Além disso, um sistema de drenagem interna e externa coletam as águas presentes na pilha e as conduzem a uma bacia de contenção de finos localizada no pé da estrutura como mostrado na figura 45. As bancadas da pilha possuem cerca de 10 metros de altura, assim como as bermas, que também possuem 10 metros de largura, enquanto os taludes têm uma inclinação de 30°.

A precipitação média na cidade de Brumadinho nos últimos 30 anos é de cerca de 1.461 mm, sendo que os períodos com maior incidência de chuva são os de janeiro e dezembro. O período chuvoso em geral, compreende os meses de outubro a março. Durante tal período as atividades de transporte, disposição e compactação de rejeito e estéril se tornam um desafio, pois as condições adversas de clima reduzem de forma significativa a trafegabilidade dos caminhões, fazendo com que seja necessário maior empenho da equipe técnica da disposição de rejeitos durante esses meses. Uma solução para tal problema, apontada por Alves (2020) é a construção de um pátio de estocagem próximo a planta de filtragem de modo a estocar o material filtrado por um tempo antes de transportar o mesmo para o seu local de disposição final.

Figura 6.5 - Bacia de contenção de finos próximo a pilha



Fonte: Suppa, 2019

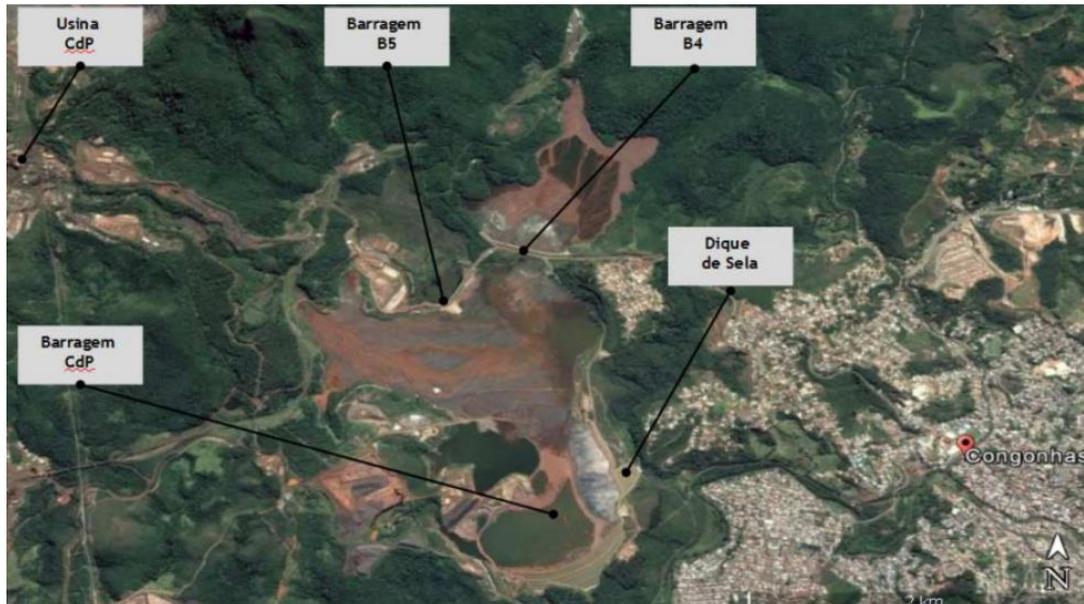
6.1.2 Mina Casa de Pedra

A mina casa de pedra pertencente à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) é uma das minas de minério de ferro mais antigas em operação no país, com início das atividades no ano de 1913. O empreendimento fica localizado no município de Congonhas no estado de Minas Gérias, a 70 Km de Belo Horizonte. Estima-se que a mina casa de pedra possua um recurso mineral de cerca de 6 bilhões de toneladas de minério de ferro e 3 bilhões de toneladas do material em reservas. A empresa possui também outra mina denominada mina do engenho que possui reservas calculadas em 300 milhões de toneladas de minério de ferro (CSN, 2021).

O minério de ferro da mina casa de pedra é lavrado em quatro corpos minerais e segue para beneficiamento na planta central por via úmida ou nas plantas móveis por rota seca. A capacidade de produção do complexo atualmente é de 30 milhões de toneladas por ano, de produtos conhecidos como granulado, *sínter feed* e *pellet feed*. Já o minério extraído na mina do engenho é beneficiado no complexo do Pires e passa por processos de britagem, peneiramento, planta de classificação, concentração espiral e concentração magnética de alta intensidade. O material beneficiado destinado à exportação é transportado pela concessionária MRS até o porto de Itaguaí no Rio de Janeiro.

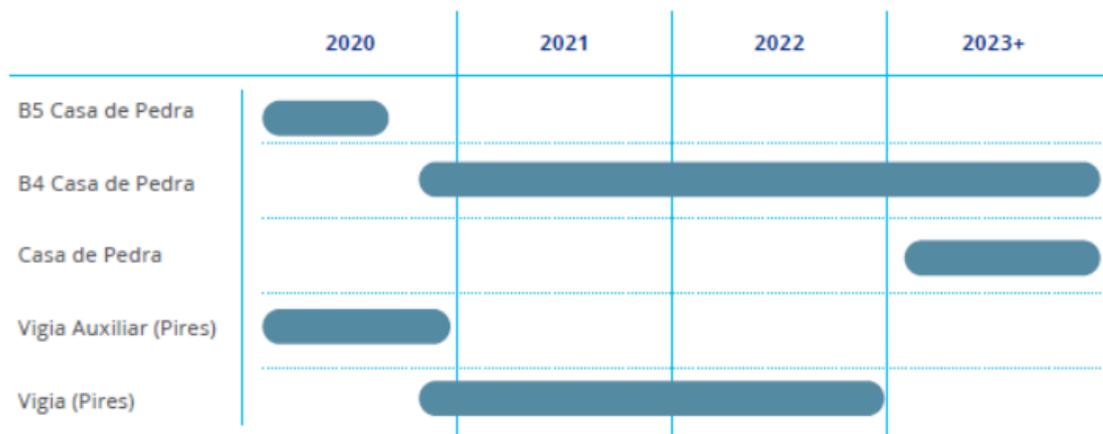
A mineração Casa de Pedra possui em seu complexo uma das maiores barragens de rejeitos, localizada em área urbana, do mundo com capacidade de 50 milhões de m³, mostrada na figura 46. Visto a grande preocupação da população com a proximidade entre a barragem e a área urbana visível, em agosto de 2018 iniciou-se na CSN a operação de filtragem de rejeitos para a disposição em pilhas, com investimentos em torno de 250 milhões de reais. A partir do ano de 2020 todo o rejeito produzido na CSN passou a ser filtrado e empilhado. As barragens localizadas estão em processo de descaracterização, como mostra a figura 47, sendo que a barragem B5 Casa de pedra e a barragem Vigia Auxiliar (Pires) já foram desativadas.

Figura 6.6 - Vista aérea das barragens da CSN na cidade de Congonhas MG



Fonte: CSN Mineração, 2021

Figura 6.7 - Cronograma de descaracterização das barragens pertencentes à CSN mineração nos próximos anos

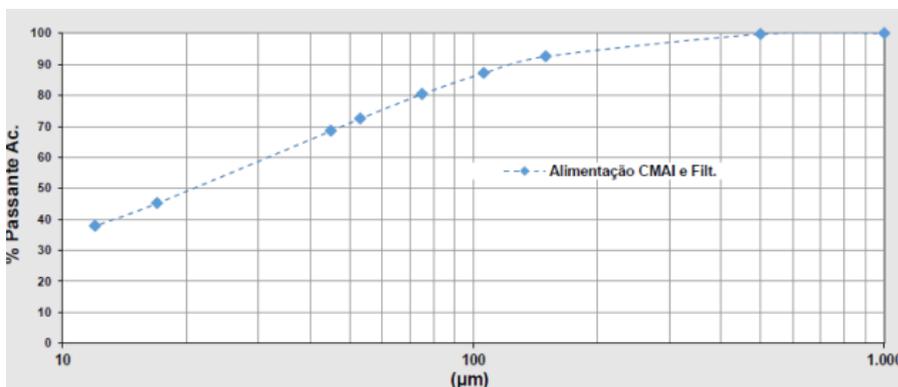


Fonte: CSN Mineração, 2021

O empreendimento possui duas plantas de filtragem sendo que a primeira abriga quatro filtros tipo prensa modelo Magnum 2000 x 2000 da fabricante Matec, contendo, cada um, 193 placas de filtragem. A planta de filtragem de rejeitos 2, compreende 5 filtros prensa com modelo semelhante aos filtros da primeira planta. Antes de chegar a planta de filtragem, a polpa de rejeito passa antes por um separador magnético, visando recuperar parte do elemento útil contido nesse material. Depois o rejeito é direcionado para uma operação de espessamento, onde ocorre também a injeção de floculante, o *underflow* dos espessadores, que alimenta os filtros possui uma densidade entre 1,5 g/cm³ e 1,55 g/cm³. A distribuição granulométrica desse

material possui d50 em torno de 20 μm e d80 de 74 μm , como mostrado na figura 48. A capacidade anual de processamento é de cerca de 9,5 milhões de toneladas de rejeito.

Figura 6.8 - Distribuição granulométrica do rejeito na alimentação da filtragem



Fonte: Alves, 2020

Ao final do ciclo de filtragem, a torta é descarregada sobre duas correias transportadoras que ficam localizadas abaixo da planta de filtragem e a água recuperada utilizada novamente no processo. Ao final do caminho das correias transportadoras existe uma empilhadeira radial que realiza o empilhamento do filtrado no pátio de estocagem temporária. Existe também um pátio com cerca de 8.000 m², que é o local onde os caminhões com capacidades de 30 a 40 toneladas são carregados por meio de uma pá carregadeira. O pátio temporário permite a estocagem de material durante os períodos chuvosos, que varia entre os meses de outubro a março.

O material transportado pelos caminhões é disposto na barragem B5, que é uma antiga barragem de rejeitos descaracterizada, construída no ano de 1993, com 32 metros de altura e 455 metros de crista. O rejeito após ser descarregado pelo caminhão é lançado, espalhado e compactado em camadas. A umidade alvo da torta filtrada é de cerca de 14%, porém o material deixa a planta de filtragem com uma umidade em torno de 16,5%. Apesar de existir essa diferença entre os valores reais e esperado, não há relatos de impactos negativos na disposição final, uma vez que o material pode passar por um processo de perda de umidade durante o seu transporte.

6.1.3 Nexa Resources - Unidade Vazante

A Nexa Resources é uma empresa que surgiu no ano de 2017, a partir de uma união entre a Votorantim Metais e a empresa peruana Milpo. A unidade de mineração localizada na cidade de Vazante em Minas Gerais é uma das minas de zinco pertencentes ao grupo Nexa. A exploração de minério de zinco teve início no ano de 1969, via lavra a céu aberto. Porém no ano de 1982, houve a necessidade de migrar as atividades de lavra para a modalidade subterrânea, que se perpetuam até os dias atuais. Segundo Alves (2020), existe a expectativa que a produção da mina na unidade de Vazante, seja mantida até o ano de 2034, com uma produção de 140 mil toneladas de zinco por ano.

A disposição de rejeitos era feita através do método convencional, desde o ano de 2001 na barragem de rejeitos Aroeira, mostrada na figura 49. Essa barragem passou por 7 alteamentos pelo método de jusante e possui 44 metros de altura, 690 metros de comprimento de crista e uma capacidade de armazenamento de 15 milhões de metros cúbicos de rejeito. Outra funcionalidade da barragem aroeira é receber águas bombeadas da mina subterrânea, visando fazer a clarificação das mesmas e posterior recirculação para o reaproveitamento das águas no processo. A água nova captada é usada apenas no refeitório e nos banheiros da unidade.

Devido a necessidade de prolongar a vida útil da mina em pelo menos mais 10 anos, surgiu o projeto de filtragem e empilhamento de rejeitos a seco, visto que esse método quando comparado com outras alternativas propostas foi o que apresentou menor risco geotécnica, menor risco de projeto, menor impacto ambiental e área de disposição com maior capacidade de volume e menor distância em relação à planta de filtragem. O início do empilhamento de rejeito filtrado aconteceu em julho de 2019 na pilha garrote, mostrada na figura 50.

Figura 6.9 - Barragem Aroeira da Nexa Resources em Vazante MG



Fonte: Nexa Resources, 2021

Figura 6.10 - Pilha de disposição de rejeitos garrote



Fonte: Nexa Resources, 2021

O rejeito advindo da usina de beneficiamento chega na planta de filtragem com a granulometria mostrada na tabela 9, contendo em torno de 18% de sólidos em massa. Logo depois, o mesmo passa por uma operação de espessamento até atingir a faixa de 60% de sólidos para posteriormente, alimentar os filtros. A planta de filtragem é composta por 3 filtros prensa, com 65 placas de dimensões (2 x 2) m cada uma. A taxa de produção dos filtros é de 144

toneladas por hora, podendo esse valor chegar à 172 toneladas por hora. Segundo os parâmetros de projeto, a umidade alvo da torta de rejeitos pode variar entre 9% a 11%.

Tabela 6.1 - Distribuição granulométrica dos rejeitos de flotação

Abertura (#)	Abertura (mm)	Massa (g)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante
65	0,212	3,31	0,43	0,43	99,57
100	0,148	30,82	4,04	4,47	95,53
150	0,105	87,17	11,43	15,90	84,10
200	0,074	92,68	12,15	28,05	71,95
250	0,053	48,74	6,39	34,44	65,56
325	0,044	38,03	4,99	39,43	60,57
400	0,037	25,53	3,08	42,51	57,49
<400	<0,037	438,55	57,49	100,00	0,00
Total	-	762,83	100,00	-	-

Fonte: Alves, 2020

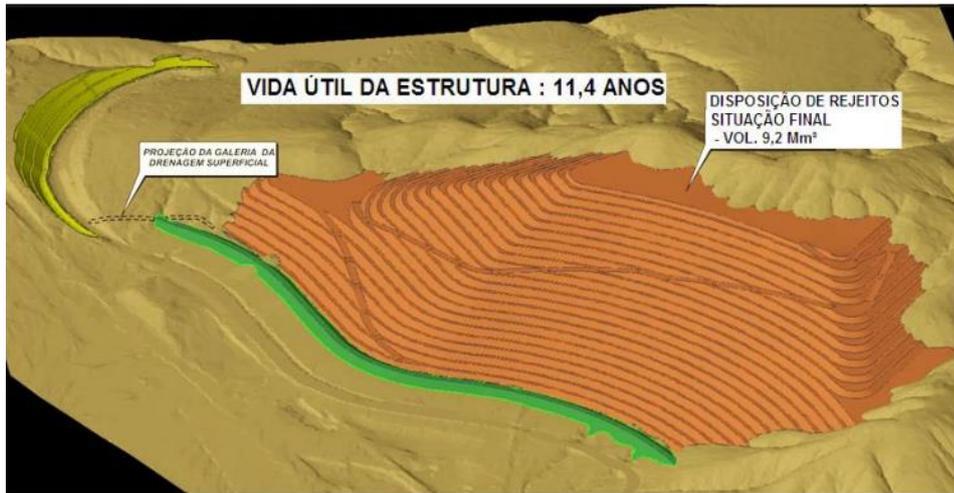
O rejeito filtrado é depositado em uma correia transportadora localizada abaixo dos filtros, após cada ciclo de filtragem. O material é então descarregado em um galpão com cerca de 1.300 m². Se as condições climáticas estiverem favoráveis, o rejeito é transportado por caminhões até o seu local de deposição final, na pilha. Caso contrário, o mesmo é direcionado para um pátio de armazenamento temporário chamado de “platô de secagem”, onde ficará retido até que seja possível realizar seu transporte até a pilha por meio dos caminhões.

O rejeito é descarregado na pilha é então espalhado através de tratores de esteiras, até que a camada atinja cerca de 35 cm de espessura. Depois disso, uma motoniveladora regulariza a camada, para que um trator faça um gradeamento do material visando torná-lo mais homogêneo. Por fim, as camadas são compactadas por meio um rolo é de careiro, até atingir um grau de compactação de 95% em relação ao ensaio de Proctor Normal.

A pilha foi construída com canais de drenagem periférica, com capacidade para 30 mil m³ por hora, estrutura de drenagem subterrânea e também um canal paralelo ao de adução que direciona toda a água drenada para a barragem. As vias são umidificadas através do uso de um

caminhão pipa, visando mitigar a erosão da pilha, além disso, a medida que a ilha for aumentando seu tamanho, as bermas mais inferiores irão passar por processo de revegetação, que ocorrerá de forma simultânea com as atividades de disposição de rejeitos. A figura 51 ilustra o *layout* final da pilha de rejeitos.

Figura 6.11 - *Layout* final em 3D da pilha de rejeitos filtrados



Fonte: Alves, 2020

7 CONCLUSÕES

Considerando a atualidade das discussões acerca de destinações e disposições finais ambientalmente adequadas e seguras, aliada aos avanços tecnológicos dos métodos e processos, este trabalho de conclusão de curso investigou aspectos relacionados à disposição de rejeitos filtrados (*dry stacking*) mediante as informações disponíveis na literatura atual.

A partir dos resultados apresentados, verifica-se que existem diversas técnicas alternativas para a disposição de rejeitos, como as citadas neste trabalho. Dentre elas, juntamente com a prática de empilhamento de rejeitos filtrados, as técnicas de utilização dos rejeitos para o preenchimento de escavações de minas subterrâneas (*backfill*), codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cavas a céu aberto, vêm tomando destaque no mercado mineral, uma vez que as mesmas possibilitam que os rejeitos ocupem um local já existente, não sendo necessário destinar uma nova área para a disposição dos mesmos.

É perceptível que existe uma forte tendência no âmbito das indústrias mineradoras em aderir a prática de empilhamento de rejeitos filtrados. Tal prática vem sendo usada em substituição a disposição convencional de rejeitos por meio das barragens. Atualmente, no país vem sendo criada uma robusta legislação relacionada a barragens e empilhamentos drenados com potencial de liquefação, que contempla medidas rigorosas e exigentes, acarretando no aumento do estudo e da utilização de técnicas alternativas de disposição de rejeitos.

Com relação ao projeto das pilhas, um dos principais parâmetros que rege a disposição de rejeitos filtrados é o teor de umidade. É a partir dessa variável, que é dimensionado todo o sistema de filtragem, visando atingir um grau de compactação que garanta a segurança e estabilidade da pilha a ser formada. Além disso, a porcentagem de finos, limites de plasticidade e liquidez, mineralogia, dentre outras características do material a ser filtrado devem ser previamente determinadas, por meio de uma caracterização tecnológica eficaz e precisa e por meio de testes e simulações como a criação de pilhas experimentais.

Ademais, foi observado na literatura estudada que é usual dividir a pilha de rejeitos em zonas, uma estrutural e outra sem função estrutural. Isso é feito de maneira a reduzir os custos com equipamentos de compactação, uma vez que o material localizado na zona não estrutural não precisa necessariamente ser compactado. O clima possui grande interferência na aplicação do método, visto que em regiões com chuvas recorrentes ou períodos chuvosos intensos o material não consegue atingir o grau de compactação determinado no projeto, devido a sua umidade excessiva. Dessa forma, geralmente são criados pátios de secagem, que são locais

próximos a planta de filtração, destinados ao armazenamento do material durante ao menos 10 dias, no caso de interferências climáticas ou desvios operacionais na planta de filtração.

Considerando a execução e operação, é de extrema importância que sejam feitos testes pilotos em plantas de filtração, visando escolher qual o tipo de filtro adequado a ser utilizado, levando em conta as características reológicas dos rejeitos, a porcentagem de finos, o teor de umidade a ser atingido. Os equipamentos devem ser dimensionados visando atingir os parâmetros desejados, mas também levando em consideração uma maximização da capacidade dos mesmos e redução nos custos de operação.

A grande vantagem da utilização de pilhas de rejeito filtrado está no reaproveitamento de quase toda a água utilizada no processo, um cenário muito diferente do caso da disposição convencional, onde os rejeitos são depositados com baixa porcentagem de sólidos. Além disso, outras vantagens relacionadas ao método estão relacionadas ao baixo impacto ao meio ambiente quando comparado as barragens. Entretanto, o maior desafio da disposição de rejeitos filtrados está relacionado com o elevado custo de operação. Nos exemplos estudados, o custo de operação desse método chegou a ser oito vezes maior que no caso da disposição convencional. Espera-se que, com o avanço constante nas tecnologias e equipamentos de filtração, e com a difusão do método de disposição de rejeitos filtrados nas indústrias mineiras, esse custo venha a reduzir significativamente.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMSON, L. W. et al. **Slope stability and stabilization methods**, John Wiley & Sons Inc., pp. 477-488. 1996.
- ALMEIDA, F. E. **Análise Numérica do Processo de Ressecamento de um Rejeito Fino da Mineração de Ferro**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 108 p., Ouro Preto, 2004.
- ALVES, H. O. **Estudo comparativo de duas técnicas de lavra em barragem de rejeito sob o ponto de vista geotécnico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 153 p. 2015.
- ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 6459: SOLO – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 7180: SOLO – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 7181: SOLO – Análise granulométrica. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) ABNT NBR 6457: AMOSTRAS DE SOLOS – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) ABNT NBR 7182: SOLO – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) ABNT NBR 7185: SOLO – Determinação de massa específica aparente “In Situ”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987) ABNT NBR 9813: SOLO – Determinação de massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1991) ABNT NBR 12102: SOLO – Controle de compactação pelo método de Hilf - Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2020) ABNT NBR 16853: SOLO – Ensaio de andensamento unidimensional. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021) ABNT NBR 13292: SOLO – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021) ABNT NBR 14545: SOLO – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro/RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182: SOLO – **Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro/RJ. 1986.
- BITTENCOURT, G. **Brumadinho e mariana: a dor que não passa**. Tv brasil ebc. 2020. Disponível em: <<https://tvbrasil.ebc.com.br/caminhos-da-reportagem/2020/01/brumadinho-e-mariana-dor-que-nao-passa>> Acesso em 2021.
- BOCCAMINO, G. D. **Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeito 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.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- BOSSI, Dário et al. Reféns da riqueza de nossa terra: **os impactos da mineração sobre as comunidades**. In: Conflitos no campo. p. 65-74, 2010.
- BOSSI, E.T. **Avaliação do efeito da percentagem de finos no comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro**. Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 180p. 2015.
- BRASIL, **Lei N° 12.305** de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). European Commission, (1996).
- BRASIL, **Lei N° 12.334** de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 2010.
- BRASIL, **Lei N° 14.066 de 30 de setembro de 2020**. Brasília, DF, 2020.
- CARDOSO, M. P. **Protótipo de um filtro portátil para realização do leaf-test por alimentação inferior**. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de minas e construção civil. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá MG, Brasil, 85p. 2018.
- CARVALHO, W. D. S. **Sistema de disposição compartilhada de estéreis e rejeitos desaguados da mina de Fernandinho**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 163 p. 2017.

- CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. 4.ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 2, 240 p. 2013.
- CONCHA, F. Solid-liquid separation in the mining industry. Chap. 7 - **Particle aggregation by coagulation and flocculation**. Springer Ed., 2014.
- CRUZ, P.T., **“100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projetos”**. Oficina de Textos, 2ª Edição, São Paulo, 2004.
- CRYSTAL, C.; CHORE, C.; EZAMA, I. **Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience**. In: Proceedings Tailings and Mine Waste. Keystone, Colorado, EUA, 2018. Anais.
- CSN MINERAÇÃO. 2021. Disponível em: <https://www.csn.com.br/quem-somos/grupo-csn/csn-mineracao/>> Acesso em 20 de julho de 2021.
- DAVIES, M. P. **Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals**. 2011.
- DAVIES, M. P. RICE, S. **An alternative to conventional tailings management - “dry stack” filtered tailings**. In proceedings of tailings and mine waste. 2001.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. Wiley, New York; 577 pp, 1988.
- ESPÓSITO, T.J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construída por aterro hidráulico**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 363 p, 2000.
- ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL - **Estruturas de disposição de rejeitos Nº 9**. Projeto EDR9. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração - CBMM. 2020.
- FERNANDES, R. B. **Metodologia para unificação do sistema de classificação de barragens de rejeito**. Dissertação de mestrado, Programa de pós graduação em geotecnia da UFOP. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 172 p. 2017.
- FONSECA, A. R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica** – Estudo de caso das barragens da UHE São Simão, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.
- FOURIE, A. B. CARNEIRO, A. **A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia**. In: RJ Jewell & AB Fourie (eds), Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Anais. p. 439-454. 2018.
- GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 220 p. 2009.
- GOMES, M.F.M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de**

- ferro**. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 193 p. 2009.
- GOMES, R. B.; DE TOMI, G.; ASSIS, P. S. **Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil**. Journal of Materials Research and Technology, Vol. 5. p. 339-344. 2016.
- GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.
- GUIMARÃES, N. C.; Valadão, G. E.S.; Peres, a.e.c. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 543-548, dezembro de 2012.
- HAWLEY, M., & CUNNING, J. (2017). **Guidelines for mine waste dump and stockpile design**. CSIRO Publishing.
- HORST, R. **Avaliação dos métodos para cálculo de estabilidade de taludes em maciço terroso**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) - UNIJUÍ, Ijuí. 129 p. 2007.
- ICOLD. **Tailings dams risk of dangerous occurrences. Published by the International Commission on Large Dams. Bulletin 121, Paris. 2001.**
- IN THE MINE (ITM). **Geração controlada com destinação segura**. Sistemas de gestão, tratamento e destinação de rejeitos da mineração em operações no Brasil. Ano XIV. Nº 81. p. 19-26. 2019
- KNIGHT, R.B. & HAILE, J.P. **Sub-Aerial Tailings Deposition**. Proceedings of the Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vancouver, Canada, 7, pp 627-639, 1983.
- LEDUC, M. & SMITH, M.E. **Tailings co-disposal – Innovations for cost savings and liability reduction**. The Latin America Mining Record, 15p. 2003.
- LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Dissertação de mestrado, Departamento de engenharia civil da escola de minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 140 p. Ouro Preto, 2006.
- LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. 2006. 128 f.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- LUPO, F. HALL, P.E. **Dry stack tailings design considerations**. 2010.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; França, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Faculdade de engenharia, departamento de transportes e geotecnia**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Material didático instrucional. 25 p. Juiz de Fora, 2004.

- MEND – Mine Environment Neutral Drainage Project. MEND Report . **Study of Tailings Management Technologies. Klohn Crippen Berger**. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá, 2017.
- MENDES, M.B. **Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito de minério de ferro alteada para montante**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 189 p. 2008.
- MILONAS, J. G. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro em aterro hidráulico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) -Universidade de Brasília, Brasília, 146 f, 2006.
- MINING MAGAZINE. Stacking up the benefits. Abril de 2017. Disponível em: < [Stacking up the benefits - Mining Magazine](#) >. Acesso em 25 de maio 2021.
- NEXA RESOURCES. 2017. Disponível em: < <https://www.nexaresources.com/>> . Acesso em 20 de julho de 2021.
- NIEBLE, C. M. **Deposição de rejeitos**. Itabira, MG: Abib Engenharia. Apostila do Curso de Geotécnica Aplicada a Minas de Céu Aberto 1986.
- NRM 19. **Disposição de estéril, rejeitos e produtos**. 2002. Disponível em: < https://www.dnpmpe.gov.br/Legisla/nrm_00.php#:~:text=publicada%20no%20DOU%20de%2019%20de%20outubro%20de%202001 > Acesso em 22 de Agosto de 2021.
- NUNES D.R. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2014.
- OLIVEIRA, M. L. M., Luz, J. A. M., Lacerda, C. M. M. Escola de Minas da universidade Federal de Ouro Preto. **Espessamento e Filtragem**, Ouro Preto.121p. 2004.
- OLIVEIRA-FILHO, W. L., ABRÃO, P. **Disposição de rejeitos de mineração**. In: ZUQUETTE, L. V. (Org.). Geotecnia Ambiental. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.
- PEIXOTO, C. L. **Proposta de uma nova metodologia de desagamento de rejeitos em polpa. 2012**. 93 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- PEREIRA, T. S. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra**. Dissertação de metrado, Programa de pós graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração de água e solo da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

- PIMENTA, J. **The drained stacking of granular tailings: a disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass.** Proceedins Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC. 11p. 2011.
- PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2013.
- RITCEY, G. M. **Tailing management: problems and solutions in the mining industry.** Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989.
- SILVA, R. K. A. **Co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava exaurida. Dissertação de mestrado.** Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 158 p. 2014.
- SILVEIRA, E. B. S.; Reades, D. W. **Barragens para contenção de rejeitos.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 9. Rio de Janeiro: CBGB, 1973.
- SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento.** 1. ed.: Oficina de textos, 2006.
- SOUSA, G. M. **Proposta de metodologia para lavra de barragens de rejeitos de ferro construídas pela técnica de aterro hidráulico.** Tese de doutorado, Programa de pós graduação em geotecnia da UFOP. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 420 p. 2020.
- SOUZA, L. M. C. G.; Sampaio, J. A. L. **Licenciamento ambiental e concessão minerária: Perspectivas da política nacional de segurança de barragem.** Revista do programa de pós graduação em direito da UFC. v. 37.1 jan./jun. 2017.
- SUPPA, B.G. **Alternativa de disposição a seco de rejeito de minério de ferro.** 2019. 52f. Monografia-Curso de Engenharia de Minas –Universidade federal de minas-Belo Horizonte, 2019.
- TAILINGS.INFO. **Backfill of tailings to underground workings.** Disponível em: < <https://www.tailings.info/storage/backfill.htm#:~:text=The%20backfill%20tailings%20are%20generally,the%20mine%20that%20requires%20backfilling.&text=Advantage%20s%3A,and%20thus%20prevent%20surface%20disturbance> > Acesso em 20 de junho de 2021.
- TERZAGHI, K **Theoritical Soil Mechanics.** J. Wiley and Sons,New York,1943.
- ULRICH, B., & COFFIN, J. **Considerations for tailings facility design and \operation using filtered tailings.** In The 16th international seminar on paste and thickened tailings, Belo Horizonte. pp. 201-210. 2013.
- VARNES, D. J. **Landslides types and processes.** In Eckel, E.B (ed) Landslides and Engineering Practice. National Academy of Science, Washington, p. 20-47. 1958.
- VICK, S. G. **Planning, design and analysis of tailings dams.** New York: John Wiley & Sons, 1983.

- VILLAR, L. F. S. **Estudo do Adensamento e do Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 461 p., Rio de Janeiro. 2002.
- WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. **Solid/Liquid Separation: Equipment Selection and Process Design**. 1ª. ed. Oxford: Elsevier, 2007.
- WILLIAMS, R, ZINK, D; O'BRIEN, S. **Filtered tailings adds value in cost competitive industries**, in A Wu & R Jewell (eds), Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, University of Science and Technology Beijing, Beijing, pp. 363-370. 2017.