

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

BÁRBARA GONTIJO SUPPA

**ALTERNATIVA DE DISPOSIÇÃO A SECO DE REJEITO DE MINÉRIO DE  
FERRO: UM ESTUDO DE CASO**

Belo Horizonte

2019

**BÁRBARA GONTIJO SUPPA**

**ALTERNATIVA DE DISPOSIÇÃO A SECO DE REJEITO DE MINÉRIO DE  
FERRO: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Professora Orientadora: Rísia Magriotis Papini.

Belo Horizonte

2019

## RESUMO

Atualmente a mineração está inserida em um delicado cenário, no qual há um aumento do volume de rejeitos gerados no processo de beneficiamento de minério de ferro e urgência em relação a revisão das tecnologias empregadas na disposição dos rejeitos. As barragens de rejeito se tornaram uma opção ultrapassada e insustentável, dessa forma a filtragem de rejeitos e o posterior empilhamento a seco (*dry stacking*) apresenta-se como uma alternativa técnica, sustentável e socialmente mais responsável. Estudos mostram que os filtros prensa e de disco são as melhores escolhas técnico-econômicas para desaguar rejeitos finos e grossos, respectivamente.

A Mina de Pau Branco, localizada na divisa dos municípios de Brumadinho e Nova Lima, passou a operar com um sistema dotado de peneiras desaguadoras e filtros prensa, que permite a disposição a seco dos rejeitos com baixa umidade, eliminando assim os riscos de instabilidade inerentes às antigas barragens do empreendimento. Foi realizado um levantamento e análise dos dados referentes às operações de filtragem e disposição dos rejeitos desta mina, tomando como base o que é proposto na literatura sobre o assunto e também as novas tecnologias oferecidas pelo mercado.

Palavras-chave: Rejeitos de minério de ferro; Filtragem de rejeitos; Empilhamento a seco.

## **ABSTRACT**

Mining sector is currently in a delicate scenario, in which there is an increase in the volume of tailings generated from the iron ore beneficiation process. Additionally, there is an urgency regarding the revision of technologies that are employed in the tailings disposal. Tailings dams have become an outdated and unsustainable option, which leads tailing filtration and subsequent dry stacking a more sustainable option representing both as a technical alternative socially responsible. Studies have shown that press and disc filters are the best technical-economical choices to dump fine and coarse tailings, respectively.

The Pau Branco Mine located on the border of the municipalities of Brumadinho and Nova Lima, started to operate with a system equipped with dewatering screens and press filters which allows the dry disposal of low moisture tailings thus eliminating the inherent instability risks to the old dams of the venture. A survey and analysis of data regarding the filtration and disposal operations of this mine was conducted based on what is proposed in the literature and on the new technologies offered by the market.

**Keywords:** Iron ore tailings; Tailings filtration; Dry stacking

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classificação do minério de ferro por produto.....	14
Figura 2- Diagrama do processo produtivo - mina/beneficiamento.....	17
Figura 3 - Modelo de rota de processamento mineral a úmido.....	20
Figura 4 - Método de descarga de polpa periférica por um único ponto .....	22
Figura 5- Arranjo típico de hidrociclones ao longo da crista da barragem .....	23
Figura 6 - Spigot em ponto único. ....	23
Figura 7 - Spigot em pontos múltiplos.....	24
Figura 8- Alteamentos sucessivos: método da linha de montante .....	25
Figura 9 - Alteamentos sucessivos: método da linha de jusante .....	25
Figura 10 - Alteamentos sucessivos: método da linha de centro .....	26
Figura 11 - Ciclo de filtragem no filtro de disco convencional.....	29
Figura 12 - Filtro a disco em operação na Mina do Pico .....	29
Figura 13 - Filtro de disco hiperbárico .....	30
Figura 14 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara .....	31
Figura 15 - Filtro-prensa de placas verticais .....	31
Figura 16 - Ciclo de um filtro de pressão vertical convencional .....	32
Figura 17- Filtro horizontal de correia .....	33
Figura 18 - Arranjo típico para instalação de filtros horizontais de correia .....	33
Figura 19- Células de rejeitos em depósitos de estéril .....	33
Figura 20 - Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril .....	37

Figura 21 - Injeção de rejeito em furos inclinados no topo do depósito de estéril.....	38
Figura 22 - Disposição de rejeito em camadas finas no depósito .....	38
Figura 23 - Rota de beneficiamento simplificada .....	41
Figura 24 - Bayer carregado com tortas secas – Representativo .....	45
Figura 25 – Localização das barragens de rejeito e pilhas .....	46
Figura 26 - Pilha Cachoeirinha e dique (Vallourec, 2019) .....	47

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Classificação dos rejeitos desaguados.....	27
Quadro 2 - Resultados das escolhas de filtros Guimarães (2011) .....	35
Quadro 3 - Produtos da Mina de Pau Branco .....	42
Quadro 4 - Comparativo do projeto de filtragem da Mina de Pau Branco comparado aos resultados de Guimarães - VGR (2011) .....	43
Quadro 5 - Capex da solução proposta por Guimarães (2011) e a solução implementada na Mina de Pau Branco .....	44
Quadro 6 - Capex e custo de instalação dos filtro prensa e das peneiras .....	44

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
<b>1.1 Objetivo e Relevância.....</b>	<b>9</b>
2 METODOLOGIA.....	10
3. BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO .....	11
<b>3.1 Processamento mineral com umidade natural.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Beneficiamento a úmido de minério de ferro.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Barragem de rejeitos .....</b>	<b>20</b>
4 ALTERNATIVA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO A SECO.....	26
<b>4.1 Filtragem de rejeitos de minério de ferro.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 Tipos de disposição a seco de rejeito.....</b>	<b>35</b>
5 ESTUDO DE CASO .....	39
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	47
REFERÊNCIAS .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos a evolução e o desenvolvimento humano impulsionaram uma crescente exploração de matérias-primas, especialmente os minerais. A mineração, que já serviu meramente para fabricação de ferramentas, armas e utensílios, em épocas bastante remotas, atualmente é protagonista na produção de praticamente todos os bens duráveis, além de gerar oportunidades econômicas para países em potencial.

Devido a formação geológica do território brasileiro, o país apresenta uma grande quantidade e variedade de minerais contidos no subsolo, com destaque para os minerais-minérios de ferro, especialmente a hematita, matéria-prima para a fabricação do aço. Esta ocorre, principalmente, em grandes massas compactas ou friáveis, de elevado teor, ou em rochas nas quais estão associados a outros minerais sem valor econômico (minerais de ganga).

Após ser extraído da natureza, o minério de ferro necessita ser processado para atender as exigências do mercado internacional. Com a redução das reservas conhecidas de alto teor em minério de ferro, faz-se necessário concentrar os minerais de interesse, removendo os minerais de ganga. A operação de flotação reversa é a mais utilizada entre os processos de concentração do minério, mas demanda um elevado consumo de água, o que gera um resíduo, sem valor econômico, denominado rejeito, com baixas concentrações de sólidos em massa, que é depositado em barragens.

Devido ao atual cenário da mineração brasileira, as empresas vêm enfrentando o desafio de adaptar suas plantas de processamento de minério de ferro a úmido para prolongar suas atividades de lavra e obter novos licenciamentos. A disposição do rejeito em barragens é vista como uma alternativa ultrapassada e insustentável e, com o objetivo de reduzir riscos operacionais e impactos ao meio ambiente, tem-se estudado e investido em novas técnicas para disposição dos rejeitos resultantes do processo de beneficiamento de minério de ferro. Dentre elas ressalta-se o desaguamento dos rejeitos por meio de espessadores e filtros prensa, tendo como destinação final as pilhas, bem como a disposição sob a forma de pasta.

## **1.1 Objetivo e Relevância**

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa de disposição de minério de ferro a seco, por meio da filtragem, tendo em vista o atual cenário da mineração brasileira, no qual as empresas vêm enfrentando o desafio de adaptar suas plantas de processamento de minério de ferro a úmido para prolongar suas atividades de lavra e obter novos licenciamentos.

Será apresentado um estudo de caso da Mina de Pau Branco, pertencente à empresa Vallourec, que passou a utilizar um sistema de filtragem para retirar a água do material processado, o que possibilitou o empilhamento do rejeito a seco, eliminando assim os riscos de estabilidade associados ao método tradicional de disposição.

Por fim, pretende-se demonstrar que é possível que a mineração brasileira continue exercendo seu papel vital ao desenvolvimento da sociedade, em especial alimentando o crescente consumo global de minério de ferro, de forma sustentável, e garantindo, principalmente, a segurança dos municípios mineradores.

## 2 METODOLOGIA

- Etapa 1 – Levantamento bibliográfico

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o beneficiamento de minério de ferro no Brasil, filtragem e disposições de rejeito. As teses de Guimarães (2011) e Gomes (2016) serviram como base para as análises feitas no estudo de caso.

- Etapa 2 – Levantamento de dados

Por meio de duas visitas técnicas à Mina de Pau Branco, pertencente à Vallourec, foi realizada uma análise das operações de filtragem e empilhamento a seco de rejeito de minério de ferro adotadas pela empresa.

- Etapa 3 – Análise de dados

Os dados referentes à filtragem e ao empilhamento de rejeitos foram analisados e comparados ao que é sugerido literatura. Além disso, com base nas observações realizadas na visita, foi sugerida uma possível melhoria no processo de filtragem.

### 3. BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

O desenvolvimento humano e a crescente projeção da população mundial impulsionam cada vez mais a exploração de bens minerais. A conjectura do avanço da civilização ao longo dos anos sem atividades mineradoras é praticamente inconcebível. Segundo Luz e Lins (2010) toda atividade no ramo agrícola ou industrial, utiliza minerais direta ou indiretamente.

Para melhor compreensão deste trabalho é necessário, preliminarmente, definir alguns termos. Determina-se *mineral* como todo corpo inorgânico sólido, cristalino, natural, de composição química e propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre (Luz e Lins, 2010), e *rocha* como uma associação natural de minerais ou de um único mineral, que ocorrem em uma extensão considerável e, se nesta ocorrem um ou mais minerais de importância econômica, denomina-se *minério*. Os minerais com valor econômico agregado são chamados de *minerais-minério* e os não aproveitados são definidos como minerais de *ganga* (Luz e Lins, 2010).

Os principais minerais que contém ferro são hematita, magnetita, goethita e siderita. No Brasil, os principais depósitos minerais ferríferos, constituintes de formações ferríferas bandadas (FFB), encontram-se em Carajás e no Quadrilátero Ferrífero, e são denominados itabiritos e jaspilitos, respectivamente.

Ao longo de evoluções geológicas, tais formações ferríferas sofreram alterações mineralógicas, texturais e estruturais (Henriques, 2009). Os minerais hematíticos são produto do metamorfismo dos itabiritos e jaspilitos, apresentam teores de ferro superiores a 64% e quantidade de sílica (*ganga*) praticamente irrelevante em termos das exigências industriais. No Quadrilátero Ferrífero, jazidas conhecidas com estes minerais estão próximas de serem exauridas, e alternativamente explotam-se minérios de baixo teor (%Fe ~ 40% ou mais), denominados minérios itabiríticos, que são resultantes da intemperização da rocha de mesmo nome (Henriques, 2009). Em Carajás, há ocorrência de corpos de hematitas friável e compacta, além de hematita friável manganésifera, que ocorre de forma local. Cabe ressaltar que acima desses corpos, há uma cobertura laterítica que constitui o denominado minério hidratado, composto por hematitas em menor quantidade, que também apresenta viabilidade exploratória (Revista Vale – S11D, 2016). Segundo publicação feita pela Vale S.A, o minério de ferro produzido no Complexo S11D, em Carajás, pode chegar a 66,7% de teor de ferro.

Enfatiza-se ainda que os jaspelitos de base, mais profundos, apresentam de 40 a 45% de ferro e ainda não são lavrados.

Para atenderem às especificações da indústria, os minérios de ferro necessitam passar pela etapa de Beneficiamento. Segundo Araujo (2007) Tratamento ou Beneficiamento de Minérios consiste de operações básicas (unitárias) que são realizadas em uma matéria-prima mineral (minério bruto) com o objetivo de se obter produtos comercializáveis.

Devido aos altos teores dos minérios hematíticos, estes necessitam apenas de uma adequação granulométrica. Para tal, são requisitadas operações de britagem, moagem e, algumas vezes, peneiramento, tendo por finalidade obter um minério com dimensões uniformes e adequadas à siderurgia. Tal forma de processamento é denominada beneficiamento a seco ou a umidade natural.

Os minerais itabiríticos necessitam ser processados para atingir teores de ferro maiores. São realizadas operações de concentração, com intuito de separar seletivamente os minerais, baseando-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério e os minerais de ganga, que em sua grande maioria utilizam água no processo, dando nome ao beneficiamento a úmido. Entre estas propriedades destacam-se: densidade, susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, forma, radioatividade etc (Luz e Lins, 2010).

De maneira simplificada, os produtos do beneficiamento mineral são denominados concentrado e rejeito. O primeiro produto contém, idealmente, somente a(s) espécie(s) útil(eis), enquanto que o rejeito contém a(s) não útil(eis). A maioria dos processamentos minerais é feito a úmido e se faz necessário eliminar parte da água do concentrado, por meio de operações que compreendem desaguamento (espessamento e filtração) e secagem, com a finalidade de adequar o produto às especificações da indústria. Por questões econômicas, em grande parte das vezes os rejeitos são descartados na forma de polpa, sem espessamento e com baixa concentração de sólidos em volume, por meio de sistemas de bombeamento ou por gravidade.

Após seco, o concentrado, produto comercializado do beneficiamento, pode ser classificado em três grupos, destinados ao mercado interno e à exportação: granulados (lump) e finos (*sinter feed* e *pellet feed*).

Figura 1- Classificação de minério de ferro por produto



Fonte: Apresentação CNS Mineração S.A

Segundo a CSN Mineração S.A, o granulado tem granulometria entre a faixa de 50 mm-6,3 mm e é obtido após britagens e peneiramentos iniciais. Seu formato aglomerado permite a alimentação direta no alto-forno. O *sinter feed* apresenta granulometria entre a faixa de 6,3 mm-0,15 mm e é o produto de minério de ferro mais utilizado pelas siderúrgicas no mundo. É obtido em fases finais do beneficiamento e necessita ser aglomerado em unidade de sinterização antes de ser utilizado no alto-forno. Já o *pellet feed* é o produto mais fino tratando-se de minério de ferro, apresentando granulometria abaixo de 0,150 mm. Para que possa ser utilizado na siderurgia, o produto passa pelo processo de pelotização. Quando em quantidades mássicas pequenas, também pode ser misturado ao *sinter feed* e associado à sinterização.

Cabe ressaltar que a escolha de uma rota de beneficiamento de um minério de ferro não se baseia somente em decisões gerenciais, mas também nas características químicas, físicas e mineralógicas do minério. Entretanto, a forma de disposição do rejeito é passível de definições administrativas, que tem caráter econômico e socioambiental.

Nos próximos capítulos deste trabalho será abordado, com maior propriedade, como ocorrem os beneficiamentos de minério de ferro com umidade natural e a úmido, bem como as formas de disposição de seus respectivos rejeitos.

### 3.1 Processamento mineral com umidade natural

Ao longo dos anos a mineração enfrenta constantes desafios, principalmente devido às causas sociais e ambientais. Diante deste cenário, as empresas encontraram uma solução mais sustentável para o tratamento de alguns minérios, principalmente os ferrosos de alto teor. O

processamento com umidade natural é uma alternativa frente ao grande consumo de água das operações realizadas no tratamento convencional de minérios. O processo permite utilizar a própria umidade natural do minério bruto, ao invés de introduzir água, utilizada em grandes volumes nos métodos de concentração usuais (flotação, concentração magnética e gravimétrica). Pode ser aplicado a diferentes classes de bens minerais tais como: minerais metálicos/ferrosos (minério de ferro de alto teor/hematitas, manganês); minerais não metálicos (rochas e minerais industriais, rochas ornamentais e agrominerais), gemas e energéticos (carvão mineral). De forma geral, as etapas que configuram este processo para minérios ferríferos são britagem, eventualmente moagem a seco, e separação de tamanho por peneiramento. A finalidade é obter produtos com faixas granulométricas definidas ou eliminar os minerais sem valor agregado, predominantes em alguma fração granulométrica, que, normalmente, são descartados na forma de pilhas (Silva e Souza, 2015).

Um exemplo de aplicação de processamento com umidade natural é o projeto Complexo S11D, operado pela Vale SA, na Serra Sul da província mineral de Carajás. A jazida S11 foi dividida para efeito da pesquisa geológica em quatro corpos, a saber: corpo A, corpo B, corpo C e corpo D. As reservas estimadas de minério para o empreendimento são da ordem de 4,27 bilhões de toneladas, sendo que os corpos A, B, C e D estão dispostos no sentido norte-sul. O bloco D, isoladamente, possui reservas de 4,24 bilhões de toneladas métricas. (Revista Vale – S11D, 2016).

Fruto de um investimento de US\$ 14,3 bilhões, o S11D integra mina, usina, logística ferroviária e portuária, além de tecnologias que permitem uma operação sustentável e a baixo custo, tendo como produto minério de ferro na forma de *sinter feed* (Revista Vale – S11D, 2016).

A Vale desenvolveu uma rota de beneficiamento que reduz em 93% o consumo de água, correspondente ao suprimento de uma cidade com 400 mil habitantes. O beneficiamento com umidade natural de Carajás reduziu o consumo mensal de água para 110 mil metros cúbicos opoentes aos quase 1,7 milhão de metros cúbicos de uma planta a úmido (Revista Vale – S11D, 2016). Além disso, houve uma redução no consumo de energia em torno de 18 mil megawatts, proporcionada pela retirada de bombas e outros equipamentos que se tornaram desnecessários para o processamento do minério de ferro do complexo (UFG, 20-).

A literatura técnica relatava que o peneiramento de minério sem o uso de água seria crítico ou infactível, apesar disso, a inovação foi alcançada por meio de uma nova tecnologia que permite separar o insumo fino do grosso a partir da aceleração da velocidade de peneiramento. Tal novidade exigiu um reforço nas estruturas das peneiras com um sistema de rolamentos para aumentar a durabilidade do equipamento (UFG, 20-).

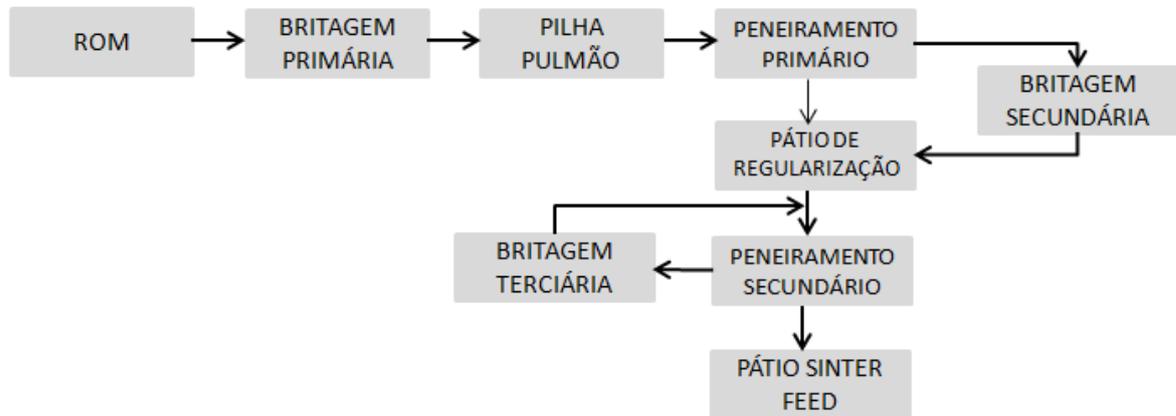
As peneiras passaram a ser fabricadas com poliuretano e borracha, substituindo o material metálico convencional. Além disso, as peças receberam furos diferenciados para granular o minério *sinter feed* e acessórios inovadores foram desenvolvidos, como barras cilíndricas e retangulares que auxiliam o peneiramento. Tais alterações renderam índice de eficiência global de equipamentos 4,8% superior ao processamento à base úmida. (UFG, 20-).

De maneira simplificada, o ROM passa por uma britagem primária que acontece na mina e alimenta a pilha pulmão com capacidade de 20 milhões de toneladas. O material então é depositado em um transportador de correia de longa distância (TCLD), e percorre cerca de 9 (nove) quilômetros até o peneiramento primário/britagem secundária, localizados na usina, onde é reduzido em partículas de cerca de 120 mm. Em seguida é transferido para um pátio de regularização, que tem como finalidade equilibrar o ritmo de processamento da usina com o de extração na mina para um melhor rendimento operacional. O pátio tem capacidade de estocar até 1 (um) milhão de toneladas de minério. O minério então é direcionado para o peneiramento secundário, que apresenta dois decks e separa o *sinter feed* e os minérios de granulometria maior, que são encaminhados para a britagem terciária. O minério já na sua forma comercial é direcionado para um pátio de produto, que estoca até 4 (quatro) milhões de toneladas de *sinter feed* e encaminhado para o embarque ferroviário. (Revista Vale – S11D, 2016).

A tecnologia empregada evita a construção de barragens de rejeitos. A parcela ultrafina de minério (< 16 mm), passante no segundo *deck* do peneiramento secundário, iria para barragem após o processamento a úmido, entretanto passou a ser incorporada à produção. Além disso, há um aumento na recuperação mássica, uma vez que no processamento via úmida sempre há perda de material, que é arrastado pela água e bombeado para enormes barragens de rejeito. (Revista Vale – S11D, 2016).

O diagrama do processo produtivo de beneficiamento está representado na figura 2

Figura 2- Diagrama do processo produtivo - mina/beneficiamento



Fonte: Adaptado de Silva e Souza (2015)

O conhecimento detalhado do depósito ferrífero de Carajás e sua variabilidade nas diversas extensões (morfologia, distribuição e participação das várias litologias) têm papel fundamental no desenvolvimento e sucesso do projeto (Silva e Souza, 2015).

A unidade do minério processado é um dos maiores gargalos enfrentados pela mineradora e estudos de melhoria entorno do assunto são constantes.

### 3.2 Beneficiamento a úmido de minério de ferro

Segundo Chaves (2007) toda rota de processamento mineral é desenvolvida por uma sequência de operações denominadas operações unitárias, variando-se suas respectivas combinações e sequenciamento, com o objetivo de garantir um produto final comerciável. De forma simples, as operações unitárias podem ser agrupadas em 3 (três) grupos: cominuição, concentração e operações auxiliares. O processamento mineral a úmido engloba equipamentos pertencentes às 3 (três) categorias de operações unitárias, que demandam utilização de elevados volumes de água, principalmente tratando-se da etapa de concentração.

As operações de cominuição têm como finalidade reduzir o tamanho das partículas minerais, adequando-as às diferentes operações consecutivas do processo e promovendo uma liberação adequada dos minerais a serem separados. São caracterizadas pela britagem e moagem. Estas operações sempre estão atreladas por classificadores, que separam as partículas por tamanho,

dentre os mais comuns estão: peneiras, classificadores mecânicos e ciclones. Tais equipamentos podem operar a úmido, assim como a moagem. (Ministério de Minas e Energia)

As operações de concentração visam separar as partículas das diferentes espécies minerais. Tal separação exige que haja uma diferença física ou físico-química entre o mineral de interesse e a ganga. Os principais métodos de concentração de minérios são a separação gravítica, separação magnética, flotação e seleção manual. Para o minério de ferro adotam-se as operações de flotação e separação magnética. Ambas operam a úmido, com grande demanda hídrica (Ministério de Minas e Energia, 20-).

Por fim, as operações auxiliares são aquelas responsáveis por intermediar o transporte do material entre duas operações unitárias, além de separar a água contida neste produto. Resumidamente são elas: transporte de sólidos particulados, transporte de polpa, estocagem e homogeneização em pilhas, estocagem em silos, espessamento, filtração e secagem. Para as etapas de transporte, por exemplo, utiliza-se água (Chaves, 2007).

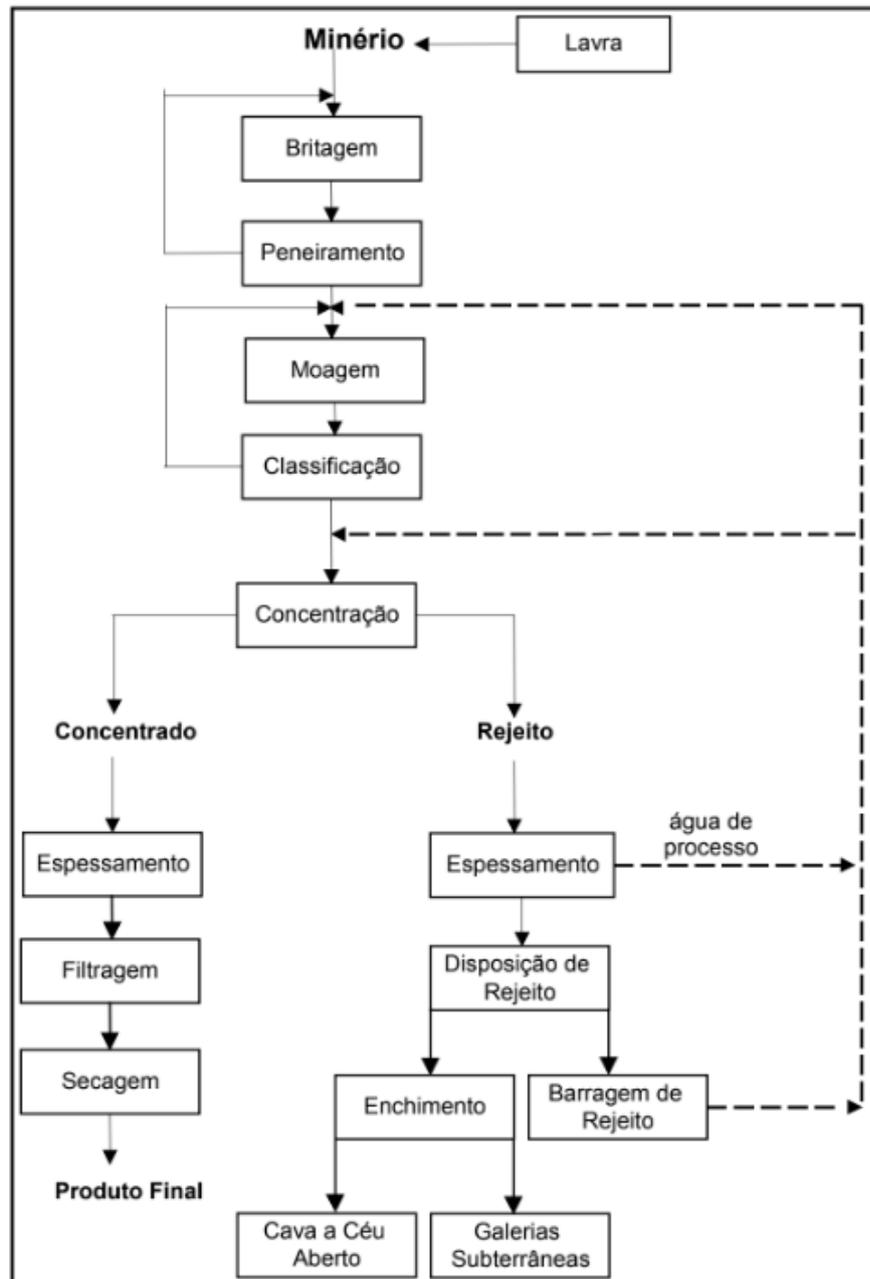
Devido ao grande volume associado às operações unitárias para minérios de ferro, ao final do processo de concentração, o rejeito encontra-se em polpa, ou seja, com baixa concentração de sólidos em volume. Para reduzir a umidade do material, podem ser utilizadas operações de espessamento e filtração, decisão que se baseia em critérios técnico-econômicos. Na grande maioria das vezes o rejeito é disposto em barragens na forma de polpa, modalidade de menor custo, porém mais suscetível a acidentes (Thomé e Passini, 2017).

Luz e Lins (2010) tem exemplificado um típico fluxograma de tratamento de minérios a úmido (figura 3), que pode ser aplicado a um minério de ferro com teores mais baixos, compreendendo as seguintes etapas:

- (i) Cominuição: britagem e moagem;
- (ii) Peneiramento (separação granulométrica) e classificação (cliconagem, classificação espiral);
- (iii) Concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação, etc
- (iv) Desaguamento do concentrado: espessamento e filtração;

- (v) Secagem do concentrado: secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado;
- (vi) Espessamento do rejeito: diminuição da demanda por recurso hídrico.
- (vii) Disposição do rejeito

Figura 3 - Modelo de rota de processamento mineral a úmido



Fonte: Luz e Lins, 2010, p.5.

Para tal rota de beneficiamento, nota-se que antes de disposto, o rejeito é espessado, com a finalidade de reinsserir a água, presente no *overflow*, no processo e, conseqüentemente, minimizar a quantidade de água no rejeito final. O autor traçou duas formas de disposição para o material: barragem de rejeitos e enchimento (backfill). Nos próximos capítulos serão discutidos tais métodos de disposição, além da forma de disposição de rejeitos em pilhas,

técnica que vem ganhando uma maior atenção. O maior foco será nas disposições a seco (backfill e empilhamento).

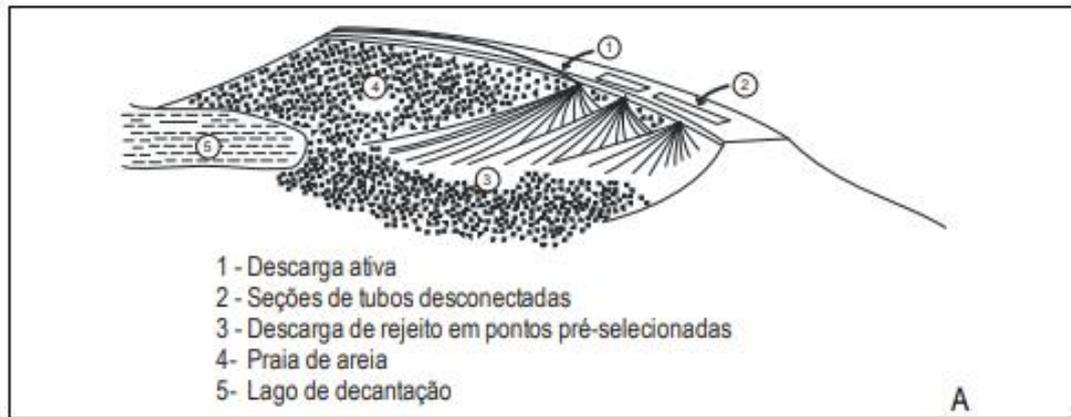
### **3.3 Barragem de rejeitos**

A demanda por bens minerais gerou uma crescente geração de rejeitos, que convencionalmente são dispostos em barragens, na forma de polpa. As frações argilosas do rejeito passam a se comportar como um fluido viscoso e, então, o material é lançado, em barragens, por métodos hidráulicos. Manter estas estruturas estáveis é uma das atividades mais complexas no gerenciamento dos rejeitos de minas. A NBR 13028 (2017) define barragens de mineração como

“Barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água”.

Segundo Soares (2010) o processo mais empregado para dispor os rejeitos do processamento mineral consiste no seu lançamento em lagos de decantação (aterros hidráulicos), represados por barragens. Thomé e Passini (2018) têm explicado que tal técnica é baseada na construção de um dique capaz de represar o rejeito proveniente do beneficiamento mineral. Normalmente, a tubulação de descarga da polpa de rejeito é lançada em áreas pré-selecionadas. Conforme a polpa é despejada para a montante desse dique, as partículas sólidas presentes no rejeito tendem a assentar no fundo da represa. Os sólidos de maior granulometria formam praias ao se depositarem entorno dos pontos de descarga, enquanto os mais finos são carregados pelo fluxo d'água, atingindo distâncias crescentes (Figura 4).

Figura 4 - Método de descarga de polpa periférica por um único ponto

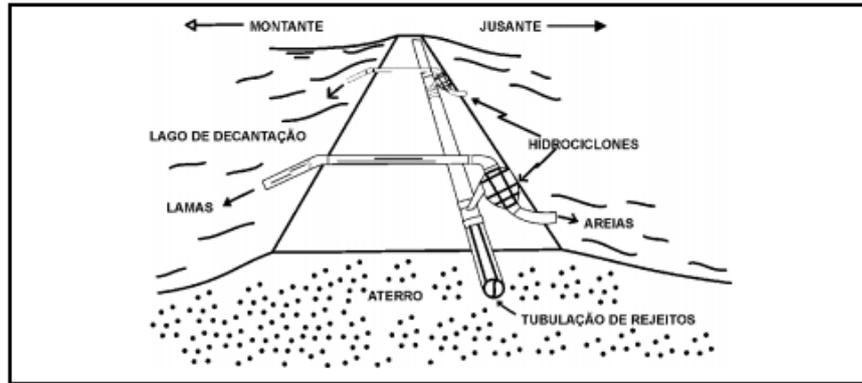


Fonte: Soares, 2010, p. 838

A separação dos sedimentos contidos no rejeito lançado é um processo natural consoante a sua densidade, granulometria e forma das partículas. Em alguns casos, antes do lançamento da polpa na barragem, o volume de água presente no rejeito pode ser recuperado e reintroduzido no sistema, por meio de espessadores e hidrociclones. Além disso, as operações de hidrociclonagem podem ser empregadas para separação das frações por tamanho. A fração mais grossa (*underflow*) atua como o corpo (maciço) da barragem e a fração mais fina (*overflow*) é destinada ao lago de decantação resultante do barramento. A hidrociclonagem se tornou muito importante na construção de barragens, uma vez que passou a selecionar e adequar os materiais construtivos (Soares, 2010).

A figura 5 exemplifica a utilização de hidrociclones como finalidade de se selecionar os materiais para construção de uma barragem. A granulometria mais grossa (areia) é despejada para a jusante e a mais fina (lama) para a montante do aterro.

Figura 5- Arranjo típico de hidrociclones ao longo da crista da barragem



Fonte: Soares, p. 837.

As técnicas mais usuais de descarga da polpa de rejeito ocorrem por um ou vários pontos, segundo plugues (spigots – figura 6 e 7) que controlam o descarregamento do material.

Figura 6 - Spigot em ponto único.



Fonte: SOUZA JUNIOR, MOREIRA & HEINECK (2018)

Figura 7 - Spigot em pontos múltiplos.



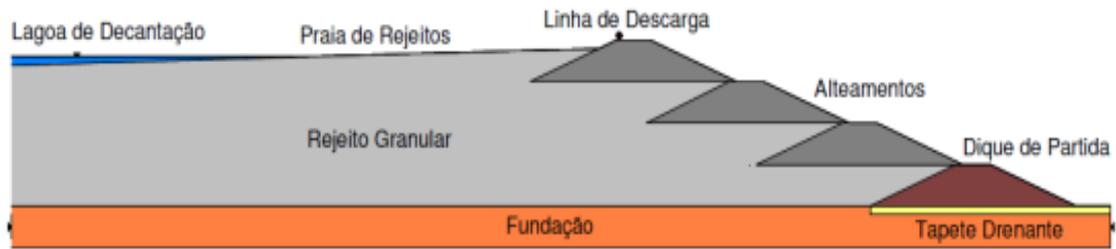
Fonte: SOUZA JUNIOR, MOREIRA & HEINECK (2018)

O dique de partida (aterro) deve apresentar geometria considerando uma capacidade de retenção de rejeitos para um período de lavra de dois ou três anos. Após esse período, caso haja necessidade, pode ser empregada a técnica de alteamento para potencializar a capacidade volumétrica da barragem.

Thomé e Passini (2018) pontuam três principais métodos de alteamento, denominados de acordo com o deslocamento do eixo da barragem no decorrer de sua construção, sendo eles: montante, jusante e linha de centro, utilizando áreas de empréstimo, materiais estéreis ou até mesmo o próprio rejeito.

O método a montante consiste na disposição dos rejeitos sobre as praias formadas pela decantação do próprio rejeito, formando diques e deslocando o eixo da obra em direção a montante (Figura 8). Basicamente os rejeitos dispostos são utilizados como fundação do alteamento consecutivo. É um método mais barato, entretanto menos seguro, principalmente devido à capacidade de liquefação da massa de rejeitos saturada sob solicitações estáticas e ou dinâmicas (Thomé e Passini, 2018).

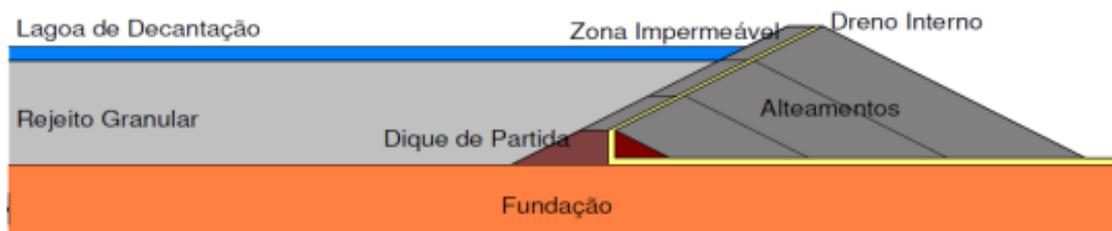
Figura 8- Alteamentos sucessivos: método da linha de montante



Fonte: VALERIUS,2014, p.9.

O método a jusante se baseia no alteamento em direção oposta ao lago de decantação, ou seja, para jusante (Figura 9). Diferente do método a montante, o alteamento não é feito sobre as praias. É uma técnica mais segura, pois viabiliza a instalação de sistema de drenagem durante a elevação do aterro (Vick, 1983).

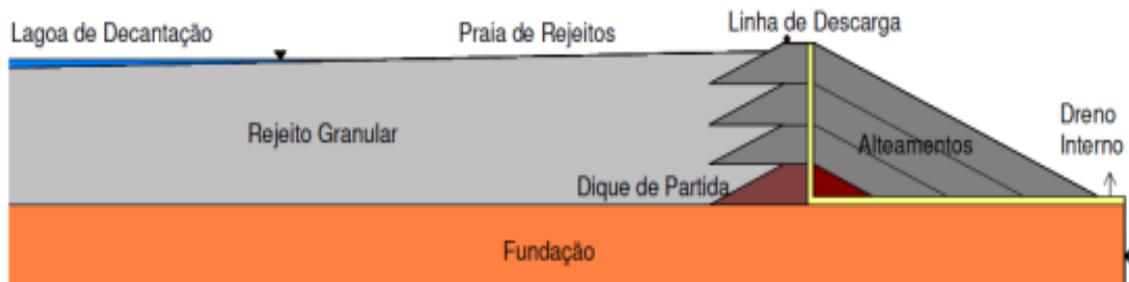
Figura 9 - Alteamentos sucessivos: método da linha de jusante



Fonte: VALERIUS, 2014, p.9

Por fim, o método de linha de centro é uma alternativa intermediária entre as técnicas a jusante e a montante. Uma fração menor do rejeito é disposta sobre a praia formada pela decantação de rejeitos e o restante sobre o talude de jusante do alteamento anterior.

Figura 10 - Alteamentos sucessivos: método da linha de centro



Fonte: VALERIUS, 2014, P.9.

Em 25 de fevereiro de 2019, foi sancionada a Lei 23.291, que proíbe a instalação de barragens a montante em Minas Gerais – mesmo tipo das estruturas que se romperam em Mariana, em 2015, e em Brumadinho, em 2019. De forma geral, o licenciamento para empreendimentos minenários está cada vez mais rigoroso no que tange a construção de barragens como forma de disposição de rejeitos. Dessa forma, as empresas têm estudado métodos alternativos para dispor os rejeitos, levando em consideração aspectos técnicos, econômicos, sociais e legislativos.

## 4 ALTERNATIVA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO A SECO

### 4.1 Filtragem de rejeitos de minério de ferro

Na contramão da disposição de rejeito em barragens, empresas de tecnologia especializada têm desenvolvido soluções de equipamentos que permitem o desaguamento dos rejeitos, garantindo níveis ótimos de umidade e sua disposição a seco (*dry stacking*).

O espessamento de rejeitos pode elevar a mistura sólido-líquido até uma consistência denominada de pasta, que apresenta alto teor de sólidos, entretanto ainda com características de fluido. Posteriormente, para garantir que o rejeito final apresente baixa umidade, o material pode passar por um processo de filtragem, formando uma torta seca (*filter cake*). Figueiredo (2007) apresenta os conceitos que caracterizam os diferentes tipos de rejeitos desaguados (Quadro 1):

Quadro 1- Classificação dos rejeitos desaguados

Tipos de rejeitos desaguados			
Espessados	Pasta “paste tailings”	Filtrados a úmido “wet cake tailings”	Filtrados a seco “dry cake tailings”
Rejeitos desaguados parcialmente, mas que ainda apresentam a consistência de uma polpa, com alto teor de sólidos e ainda passível de bombeamento.	Rejeitos espessados mediante a incorporação de algum tipo de aditivo químico, ainda passível de bombeamento.	Rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase saturada, não mais passível de bombeamento.	Rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%), não passível de bombeamento.

Fonte: Elaborado pela autora

A produção de pastas é realizada por meio de espessadores, convencionais ou especiais, que geram uma alta velocidade de sedimentação das partículas e garantem um intenso

adensamento das polpas. O espessador também é alimentado com alguns reagentes, como floculantes e coagulantes, que auxiliam no desempenho da operação. Cabe ressaltar que o transporte de pastas deve ser feito com bombas diafragma ou bombas de deslocamento positivo. (Oliveira, 2004)

Para garantir rejeitos com uma concentração de sólidos mais elevada, ou seja, rejeitos capazes de serem dispostos a seco, o espessamento costuma anteceder uma etapa de filtração. Segundo Guimarães (2011), a maioria dos filtros utilizados no mercado requerem uma concentração mínima de sólidos para garantir boa performance, de forma que concentrações de sólidos em massa cada vez mais elevadas favorecem o processo de filtração.

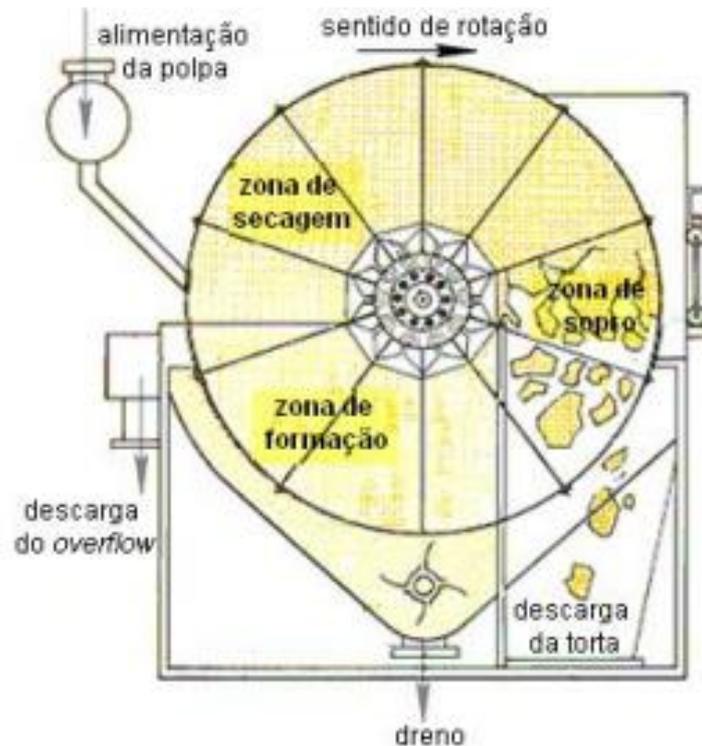
Segundo Portes (2009), a filtração de rejeitos consiste na separação sólido-líquido por meio da passagem da polpa em um meio filtrante, este que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido. Para o funcionamento dos sistemas de filtração é necessária a ação de uma força incidente sobre as partículas, que provém da gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. Martin (2011) ainda complementa que os rejeitos podem ser filtrados a úmido (wet cake), apresentando grau de saturação próximo a 100%, ou a seco (dry cake), com 70 a 85% de grau de saturação.

Para Valadão e Araujo (2007) o desempenho técnico de um filtro industrial baseia-se na umidade da torta (massa líquido/massa torta), na taxa unitária de filtração (massa de torta seca/tempo/área) e na porcentagem de sólidos no filtrado (massa de sólidos/massa do filtrado). Se tratando do processamento de minério de ferro, as práticas de filtração mais usuais utilizam filtros de discos e horizontais de correias, ambos a vácuo, além de filtros prensas que funcionam sob pressão. (Guimarães, 2011)

Os filtros de disco convencionais são formados por um conjunto de discos interligados por um tubo, que atravessa perpendicularmente seus eixos e proporciona a rotação do sistema. Em um ciclo, parte dos discos imerge em um tanque base agitado, este que mantém as partículas da polpa em suspensão. A torta (filter cake) é formada pela ação do vácuo junto à tela e, após a imersão, na parte externa ao tanque, o material é seco por sucção e descarregado, dentro da própria unidade, por sopro de ar com o auxílio de um raspador. Cada disco detém de múltiplos setores independentes, cobertos de tela e que se comunicam com as tubulações de vácuo e de ar comprimido. O filtrado, ou seja, a água clarificada, passa através de cada tela para dentro de seus respectivos setores e destes para o tubo, de onde é direcionado para o

sistema de drenagem. (Oliveira, 2004). Existem ainda filtros de disco que utilizam setores constituídos de material cerâmico, dispensando o uso de tecidos. Segundo Portes (2013) a capilaridade deste material facilita filtragem, aliviando, em parte, o bombeamento a vácuo e reduzindo custos com energia. As figuras 11 e 12 demonstram, sucintamente, o funcionamento de um filtro prensa.

Figura 11 - Ciclo de filtragem no filtro de disco convencional



Fonte: Guimarães (2011)

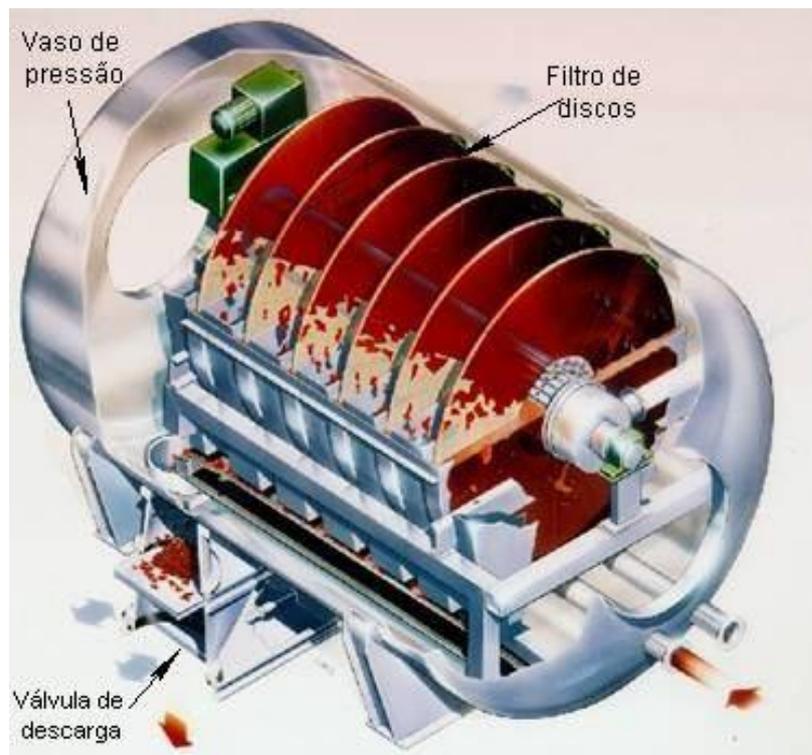
Figura 12 - Filtro a disco em operação na Mina do Pico



Fonte: BOCCAMINO, 2017

Existem também os filtros de disco encapsulados ou hiperbáricos, que apresentam tecnologia semelhante aos filtros de disco convencionais, porém com a operação realizada dentro de uma câmara pressurizada. A câmara pressurizada é uma espécie de vaso de pressão preenchido com ar comprimido, este que provém de um compressor. A pressão dentro da câmara pode chegar a 6 bar acima da pressão atmosférica e o funcionamento simplificado do filtro está demonstrado na figura 13. (Guimarães, 2011)

Figura 13 - Filtro de disco hiperbárico



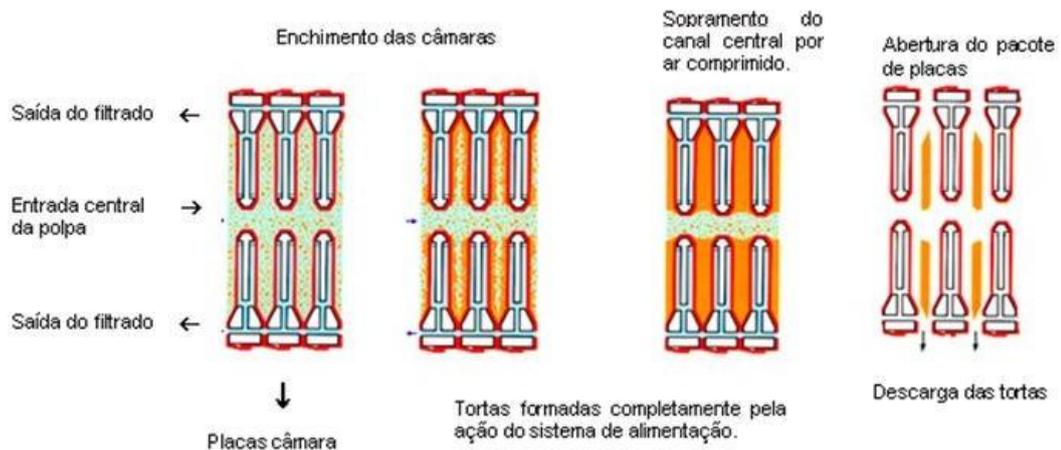
Fonte: Andritz *apud* Guimarães (2011)

Os filtros prensa, que podem ser horizontais e verticais, se baseiam no princípio de que os sólidos são incompressíveis. O ciclo da filtração abrange as etapas de bombeamento de polpa, prensagem, secagem, abertura, descarga e fechamento.

O filtro prensa horizontal com placas tipo câmara possui várias placas posicionadas verticalmente. As placas possuem um recesso nos dois lados, que juntamente com a placa vizinha formam uma câmara. Além disso, estas placas são revestidas do meio filtrante. O pacote de placas é fechado por um cilindro hidráulico e posteriormente inicia-se o processo de filtração. A polpa é bombeada para dentro do filtro, preenchendo todas as câmaras formadas pela união das placas, e os sólidos ficam retidos nas lonas filtrantes que revestem as placas. A

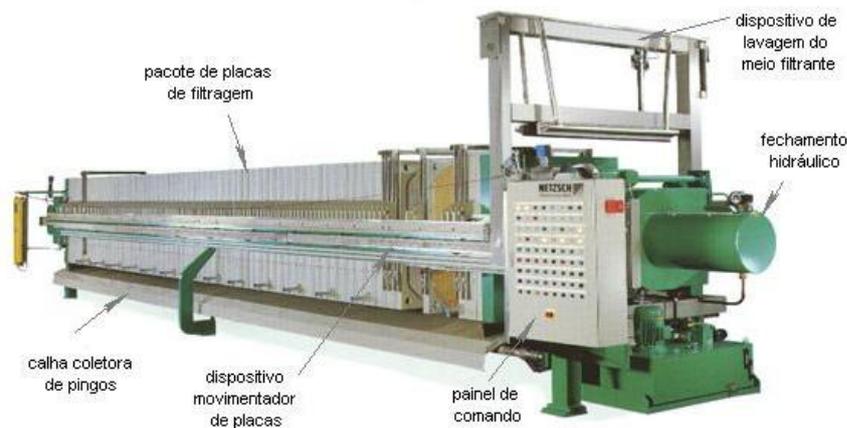
pressão de polpa obriga o filtrado a atravessar a lona filtrante e escoar pelos dutos de drenagem existentes nas placas, enquanto que os sólidos permanecem retidos. Terminado o ciclo, interrompe-se o bombeamento, as placas são abertas e as tortas descarregadas. Caso necessário, antes do descarregamento, as tortas podem ser lavadas. (Oliveira, 2004)

Figura 14 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara



Andritz *apud* Guimarães (2011)

Figura 15 - Filtro-prensa de placas verticais

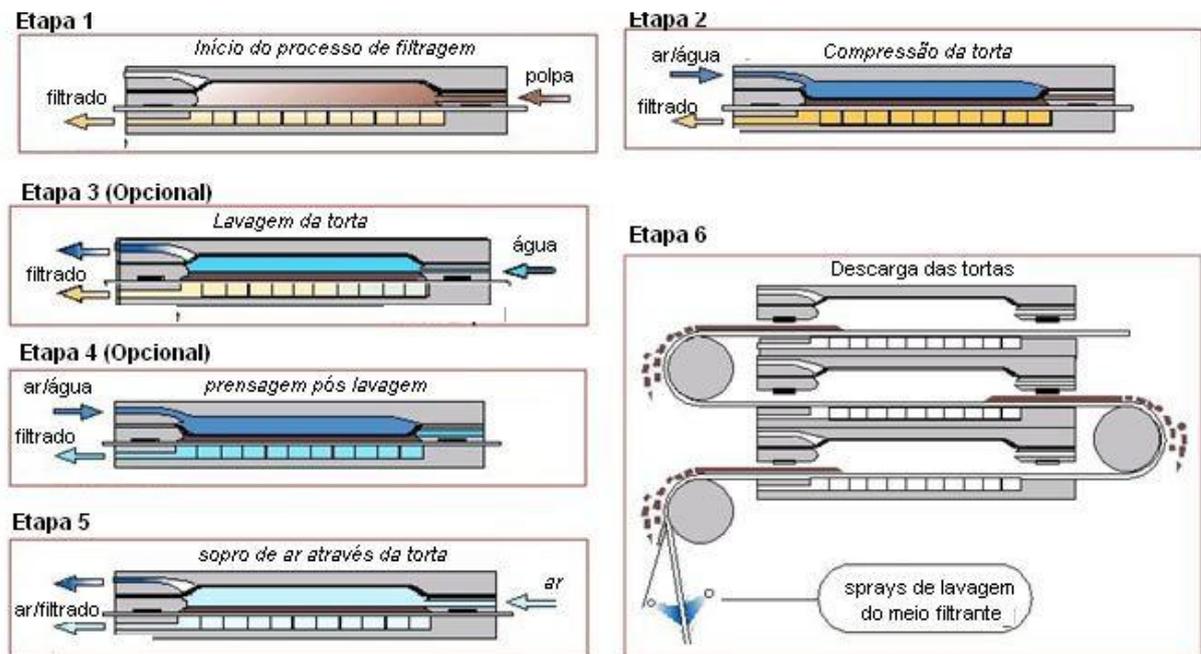


Fonte: NETZSCH *apud* Guimarães (2011)

O filtro prensa vertical tem sua configuração formada por placas posicionadas horizontalmente e o seu funcionamento está esquematizado na figura 16. O filtro é alimentado com a polpa que preenche as câmaras e, posteriormente, a torta e o filtrado já começam a ser formados. As tortas começam a ser comprimidas por meio do preenchimento dos diafragmas com água ou ar altamente pressurizados. A torta pode ser lavada por meio do bombeamento

de água para o interior das câmaras e, nesse caso, a torta pode ser novamente comprimida. Para que haja um produto com umidade mínima, ar comprimido é insuflado através das tortas. Por fim, as placas dos filtros são abertas automaticamente e a torta é descarregada por meio da esteira filtrante. Para iniciar um novo ciclo, o meio filtrante é lavado por jatos de água (Guimarães, 2011). A figura 15 representa um modelo de filtro prensa.

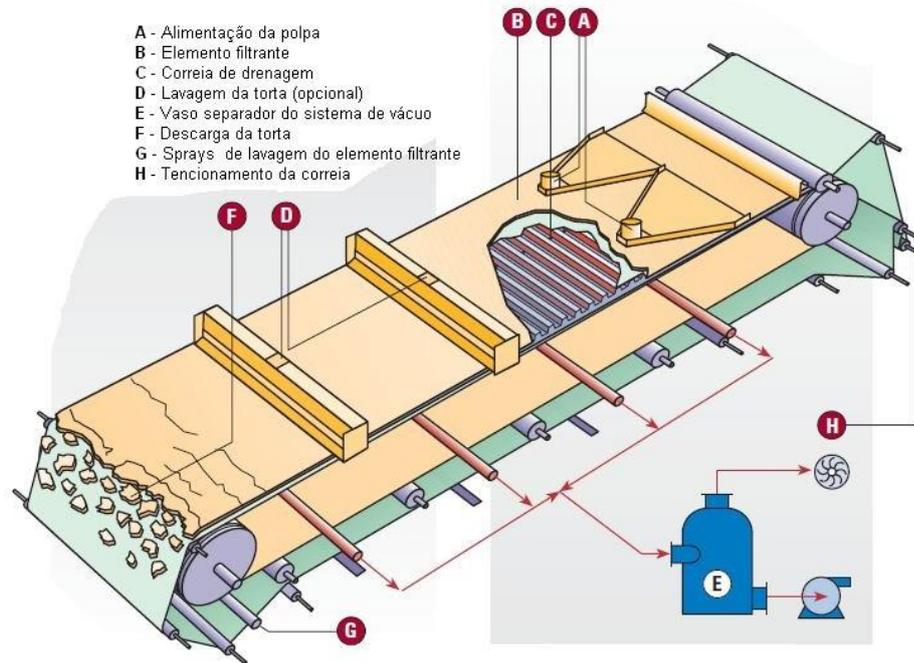
Figura 16 - Ciclo de um filtro de pressão vertical convencional



Fonte: Larox *apud* Guimarães (2011)

Os filtros horizontais de correia se assemelham a um transportador de correias (Figura 17). Nesse sentido, o tapete de correia de borracha suporta o meio filtrante. Em uma extremidade, a polpa alimenta o elemento filtrante por cima e há a aplicação de vácuo na parte inferior deste elemento, acompanhando a força gravitacional. As ranhuras e furos na correia permitem o contato do vácuo com o material. Ao longo da superfície, a polpa se transforma em torta, é seca, às vezes lavada e descarregada na outra extremidade do filtro. Também ocorre a lavagem do meio filtrante, por meio de jatos de água. (Oliveira, 2004).

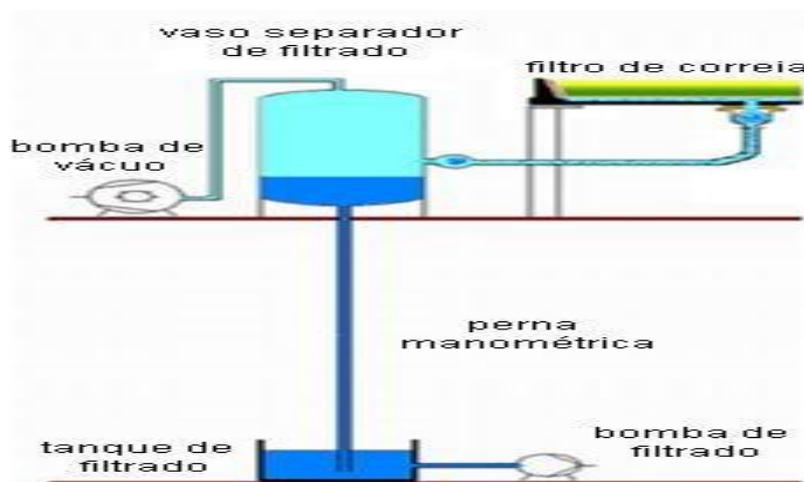
Figura 17– Filtro horizontal de correia



Fonte: EIMCO *apud* Guimarães (2011)

O filtro horizontal de correia está totalmente interligado a um sistema composto por bomba de vácuo, vaso separador e tanque de filtrado. O filtrado é direcionado, por meio de tubulações, ao vaso separador e posteriormente conduzido para o tanque, como mostra a figura 18 (Guimarães, 2011).

Figura 18 - Arranjo típico para instalação de filtros horizontais de correia



Fonte: LAROX *apud* Guimarães (2007)

O filtro de correia horizontal normalmente é utilizado no beneficiamento para polpas com minérios mais grossos, como é o caso da filtração do concentrado de *sinter feed*.

Guimarães (2011) realizou um estudo conceitual bastante relevante no que tange a escolha de filtros para desaguar rejeitos e lamas. O autor realizou um estudo comparativo econômico referente às tecnologias de filtração. Foi feita uma estimativa dos preços dos equipamentos, incluindo bomba de vácuo e compressores, exigidos para cada tipo de filtro e também considerando impostos, taxas de importação e câmbio.

O autor propôs alguns fluxogramas para a filtração de rejeitos da Instalação de Tratamentos de Minério I de Vargem Grande (ITM VGR), que também poderia ser aplicado a projetos similares de beneficiamento, visando-se o empilhamento dos rejeitos. Nesse caso, procurou-se verificar a melhor alternativa técnico-econômica para a filtração dos rejeitos e lamas.

A análise granulométrica feita por Guimarães (2011) demonstrou que o rejeito proveniente da flotação de VGR apresenta  $d_{50}$  equivalente à 20 $\mu$ m e a lama possui  $d_{50}$  correspondente a 10  $\mu$ m. Além disso, foi considerada a geração de 1.025 t/h de rejeito de flotação e 546 t/h de lamas.

Uma das alternativas se baseou no espessamento separado dos rejeitos de flotação e lama, bombeamento em separado dos produtos espessados, filtração em separado dos rejeitos de flotação e lamas. Segundo Boccamino (2017), comumente adota-se uma rota de processo para desaguar o rejeito fino (lama) e outra para desaguar o rejeito grosso (arenoso). A outra alternativa proposta pelo autor se baseou no espessamento separado dos rejeitos de flotação e lama, bombeamento em separado dos produtos espessados, filtração em conjunto dos rejeitos de flotação e lamas. Os resultados estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Resultados das escolhas de filtros Guimarães (2011)

	Fluxo	% sólidos	Tipos de filtro testados	Escolha do filtro (técnico-econômica)	Resultados
Rejeito da flotação	<i>Underflow</i> do espessador de rejeito	60	- Horizontal de correia - Disco convencional - Disco cerâmico - Prensa horizontal - Prensa vertical - Hiperbárico	Disco convencional	- 1.036,6 kg/h/m <sup>2</sup> - 8 filtros de 160 m <sup>2</sup> - CAPEX: R\$ 14,4 M (1,8 M/filtro) - Umidade: 12%
Lamas	<i>Underflow</i> espessador lamas	45	- Prensa horizontal - Hiperbárico - Prensa vertical	Prensa Horizontal	- 85,8 kg/h/m <sup>2</sup> - 21 filtros de 1500 x1500 x 110 câmeras - CAPEX: R\$ 83,2 M (3,95 M/filtro) - Umidade: 20,9%
Mistura rejeito da flotação + lamas	<i>Underflow</i> do espessador de rejeito + <i>Underflow</i> espessador lamas		- Prensa horizontal - Hiperbárico - Prensa vertical	Prensa horizontal	- 186,6 kg/h/m <sup>2</sup> - 28 filtros de 1500 x1500 x 110 câmeras - CAPEX: R\$ 110,2 M (3,95 M/filtro) - Umidade: 13,9%

Fonte: Guimarães (2011)

Vale ressaltar que já existem projetos detalhados (FEL 3), de minas do Quadrilátero Ferrífero, para a filtragem de misturas, com 20% de lamas e 80% de rejeito arenoso, por meio do filtro a disco.

A partir dos estudos realizados por Guimarães (2011) é possível concluir que a filtragem de rejeitos mostrou ser uma alternativa viável no que tange a disposição destes rejeitos em pilhas. Além disso, é válido ressaltar que a filtragem de lamas apresenta um desempenho menor

quando se comparada à filtração de rejeitos, pois gera tortas com maior umidade e menor taxa unitária de filtração.

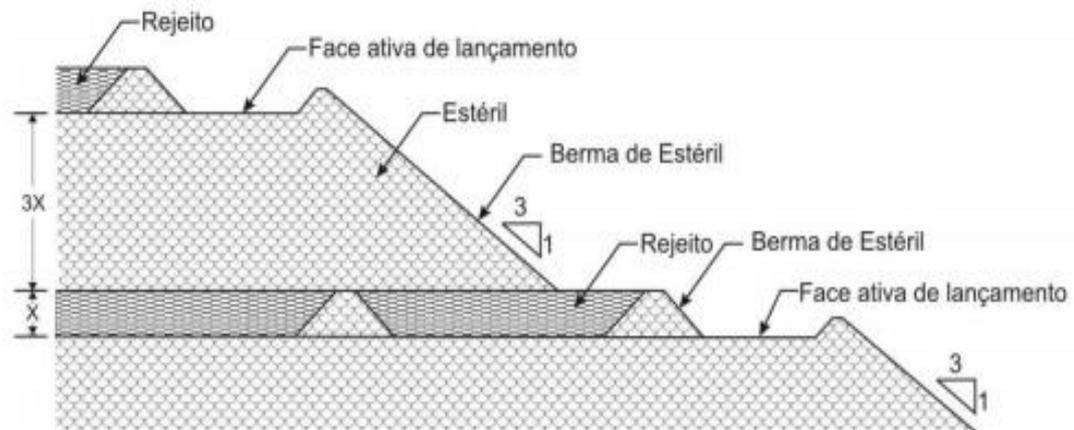
## **4.2 Tipos de disposição a seco de rejeito**

A fabricação de pasta mineral e a co-disposição/disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em forma de pilhas são metodologias de disposição de rejeito que podem ser consideradas como alternativas às barragens. Tais técnicas dependem das características físico-químicas do rejeito, dos sistemas mecânicos envolvidos na deposição e da topografia local.

O empilhamento de estruturas individuais de rejeito apresenta, muitas vezes, condições geotécnicas desfavoráveis. Nesse sentido, são executadas técnicas de disposição combinando rejeito e estéreis, conhecidas como co-disposição e disposição compartilhada. A co-disposição é o método em que se misturam previamente o rejeito com o estéril para em seguida dispô-los, de forma que as partículas finas de rejeito preencham os vazios formados pelas partículas mais grosseiras, estas que apresentam diferentes tamanhos e formas devido às metodologias empregadas nas frentes de lavra. Este método também pode ser feito para diferentes tipos de rejeito, com granulometrias diferentes, que por vezes possuem características geotécnicas distintas (Martin *et al.*, 2002). Já a disposição compartilhada consiste na disposição combinada de rejeitos e estéreis num mesmo espaço físico, porém sem permanecerem previamente misturados (Alves, 2009).

Segundo Alves (2009), para disposição compartilhada, as técnicas comumente utilizadas incluem baias para disposição de rejeito, disposição de rejeito em finas camadas e injeção dos rejeitos nos depósitos dos estéreis. A primeira metodologia de disposição compartilhada refere-se à disposição do rejeito em pontos específicos (baias) no depósito de estéril (Figura 18). Para conter os rejeitos lançados nas baias independentes, há a construção de bermas com o próprio estéril. Enquanto uma baia é formada, a outra se mantém em processo de secagem e uma terceira em processo de construção. Espera-se que o adensamento e ressecamento do rejeito para que seja lançado estéril sobre a célula consolidada e, assim, reiniciar o processo.

Figura 19 - Células de rejeitos em depósitos de estéril

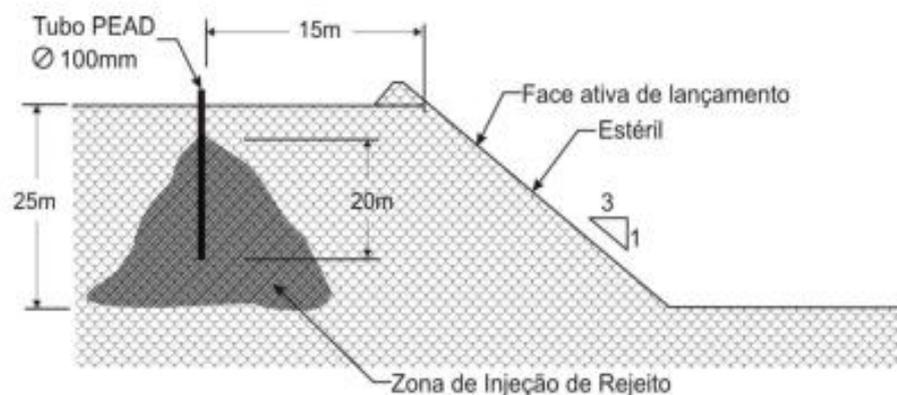


Fonte: LEDUC, 2003, mod

A técnica proposta acima não exige equipamentos especiais, fato que simplifica sua execução e reduz os custos operacionais. Entretanto, a pilha é construída de forma mais lenta e há a necessidade de adotar-se um planejamento mais rigoroso em relação à construção dos diques e baias, a fim de evitar a geração de poropressões.

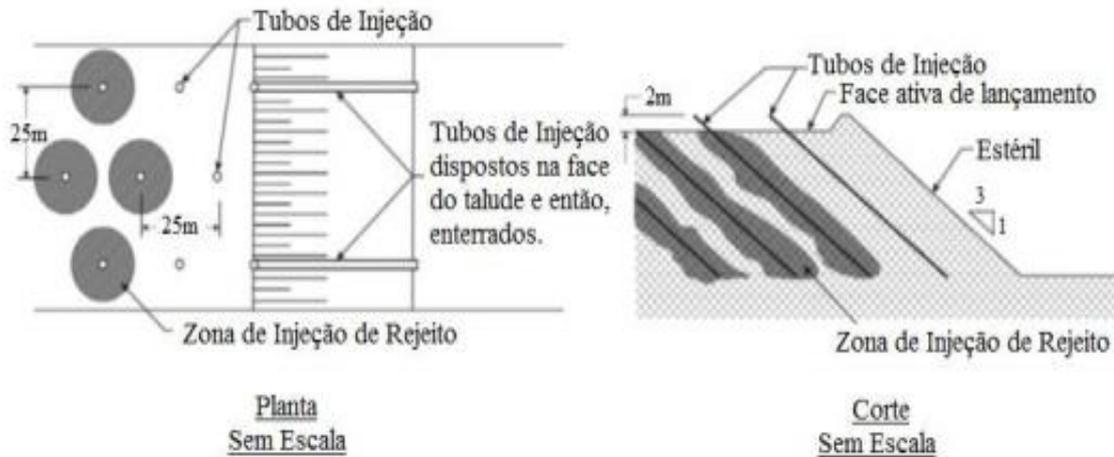
A segunda metodologia apresenta como técnica a injeção de rejeitos, na forma de pasta ou espessado, no depósito de estéril (Figura 19 e 20). Esta injeção é realizada por meio de perfurações, verticais ou inclinadas, instaladas diretamente no topo do depósito.

Figura 20 - Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril



Fonte: (LEDUC & SMITH, 2003, modificado)

Figura 21 - Injeção de rejeito em furos inclinados no topo do depósito de estéril

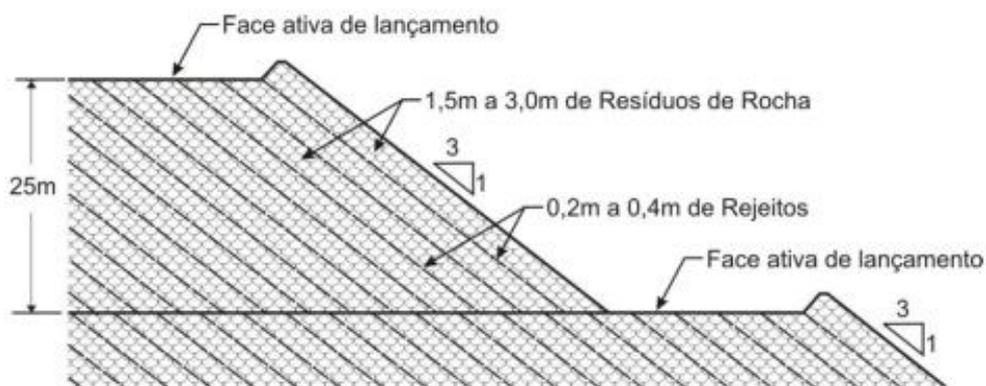


(LEDUC & SMITH, 2003, modificado)

Tal metodologia apresenta alta eficiência no que tange o preenchimento dos poros entre as partículas de estéril e a possibilidade de injeção em pilhas existentes. Entretanto, o transporte do rejeito até a área de lançamento, as bombas de alta pressão utilizadas na injeção de rejeito no depósito, além da manutenção constante da instalação e da operação da malha, torna o método, muitas vezes, desvantajoso.

Por fim, a terceira metodologia de disposição compartilhada envolve a disposição alternada entre camadas de estéril e rejeito, com o objetivo de promover a infiltração do rejeito nas camadas de estéreis, dissipando os excessos de poropressões induzidas no rejeito (Figura 21).

Figura 22 - Disposição de rejeito em camadas finas no depósito



Fonte: (LEDUC & SMITH, 2003, modificado)

A alternância entre camadas de estéril e rejeito é considerada simples e flexível. A disposição do rejeito é feita por gravidade diretamente no topo do depósito de estéril, o que permite que todo o processo seja acompanhado e inspecionado em superfície. Entretanto, excessos de poropressões podem ser gerados, devido à aplicação não uniforme dos rejeitos no depósito, o que gera a instabilidade da estrutura (Carvalho, 2017).

Para os sistemas de codisposição, a relação em massa da mistura entre rejeito e estéril pode ser determinante para a viabilização ou não da solução integrada de disposição (Leduc et al., 2003). Segundo Mohallem (2018), a técnica de codisposição empregada pela Arcelor Mittal, na Mina Serra Azul, produz uma mistura com proporção rejeito-estéril de 1:1, no caso de rejeitos finos, e de 2:1, quando os rejeitos são mais grosseiros.

De acordo com Martin et al. (2002), a técnica de codisposição garante uma melhoria dos parâmetros de resistência e drenabilidade do rejeito, além de minimizar a potencialidade de geração de drenagem ácida do estéril, quando este se encontra associado a sulfetos. Entretanto, há necessidade de um maior controle operacional dos depósitos, uma vez que diferentes proporções de estéril e rejeito podem comprometer a estabilidade global.

## 5 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi desenvolvido por meio de duas visitas técnicas à Mina de Pau Branco, nos dias 04/10/2019 e 29/10/2019. Além disso, informações referentes à filtragem e ao empilhamento de rejeito foram levantadas com o auxílio da tese de doutorado de Gomes (2016) e também por intermédio do contato com funcionários e ex-funcionários da Vallourec.

Após o levantamento dos dados, foi realizado um comparativo com o que é sugerido na literatura. Foram feitos apontamentos em relação a operação, visando a melhoria desta.

Por fim, pretendeu-se demonstrar que o empilhamento a seco de rejeito de minério de ferro por meio da filtragem já é uma realidade implantada e funcional.

A mina de Pau Branco, pertencente à Vallourec do Brasil, está localizada na divisa dos municípios de Brumadinho e Nova Lima, aproximadamente a 30 quilômetros de distância, por rodovia, de Belo Horizonte. O empreendimento situa-se no Distrito do Pico de Itabirito, posicionado na porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, região com expressivas reservas de minério de ferro de alto teor.

Em 2010, a empresa detectou a necessidade de realizar o primeiro alteamento a montante da barragem de rejeitos em operação. Nesse sentido, o corpo técnico iniciou as pesquisas com a finalidade de encontrar uma forma de eliminar os riscos de estabilidade associados à disposição de rejeito em barragens. Em novembro de 2015 o módulo de desaguamento por filtros prensa entrou em operação, com a finalidade de empilhamento a seco. A Vallourec foi pioneira, em escala global, neste segmento.

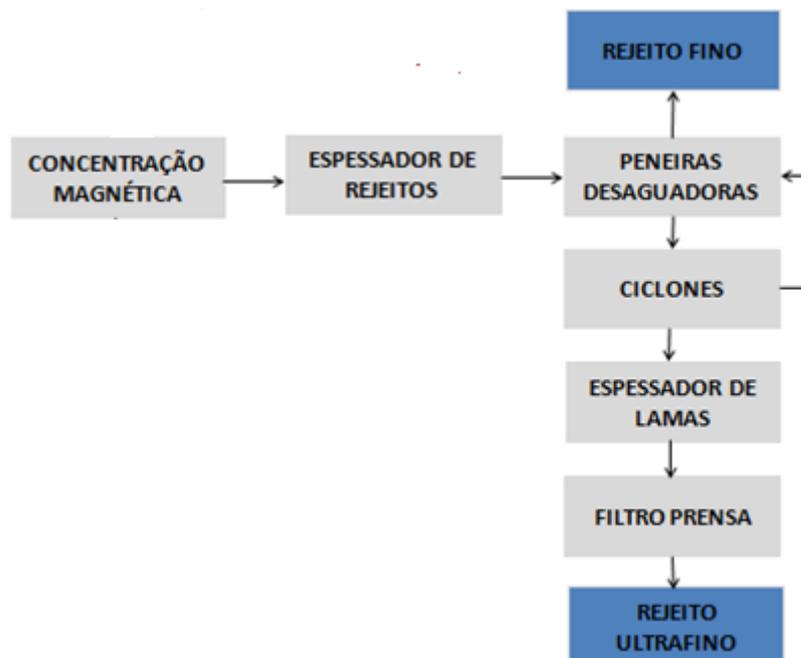
O método de extração de minério de ferro é a céu aberto e, atualmente, a mina tem capacidade de extração de 7,4 Mtpa. Até o ano de 2005 o processamento mineral era focado apenas nos corpos hematíticos, considerando um teor de corte acima de 64% de Ferro e tratando o restante do material como estéril. (Gomes, 2016).

O minério proveniente das atividades de lavra e da pilha de estéril/rejeito na Mina Pau Branco é tratado e beneficiado em uma Instalação de Tratamento de Minério (ITM), para beneficiamento via a úmido, contando com uma capacidade produtiva de 5,0 Mtpa. A usina é alimentada com um ROM (*run of mine*) com, em média, 54% de ferro.

O ROM é britado até atingir a granulometria adequada e em seguida, é encaminhado, por transportadores de correia, para o processamento a úmido (classificação por peneiramento, ciclonação, jigagem, concentração magnética, espessamento de lammas e filtragem), tendo como resultado final a separação do concentrado (produto) e do rejeito.

Após a separação magnética, o rejeito passa pelas operações contidas na figura 23. As peneiras desaguadoras, os ciclones de rejeitos, o espessador de lammas e os filtros prensa horizontais foram adquiridos para viabilizar a disposição de rejeito a seco. É válido salientar que antigamente o rejeito era espessado e disposto em barragem com ~70% de sólidos.

Figura 23 - Rota de beneficiamento simplificada



Fonte: (ITM I)

Segundo dados da Vallourec este processo gera 5% de *Natural Pellet Ore* (NPO), 6% de Hematitinha (HTT), 22% de *Sinter Feed* (SF) e 37% de *Pellet Feed* (PF).

Quadro 3 - Produtos da Mina de Pau Branco

<b>Produto</b>	<b>Granulometria</b>
<i>Natural Pellet Ore</i> (NPO)	Entre 31,5 e 12,5 mm
Hematitinha (HTT)	Entre 12,5 e 6,3 mm
<i>Sinter Feed</i>	Entre 6,3 e 0,15 mm
<i>Pellet Feed</i>	< 0,15 mm

Fonte: Elaborado pela autora

Os produtos da ITM são depositados em pilhas de estocagem para, posteriormente, serem encaminhados para as usinas siderúrgicas do grupo (Usinas Barreiro / Jeceaba) e para outros clientes, por meio de transporte rodoviário. A água utilizada em todo o beneficiamento mineral é clarificada e reutilizada no processo.

Cabe ressaltar que há a operação de peneiras móveis acessórias da ITM utilizadas para produção direta de minério, sendo apenas realizada a classificação do material.

O rejeito da separação magnética passa pelo espessador de rejeitos e alimenta as peneiras desaguadoras, com em torno de 70 a 75% de sólidos, onde é separado em frações acima e abaixo de 45  $\mu\text{m}$ . A fração mais grossa retida nas peneiras, que representa ~ 70% da quantidade total de rejeitos, já é empilhada com < 15% de umidade e o material passante (~30%) alimenta os ciclones em um circuito fechado. O *underflow* dos ciclones alimenta o espessador de lamas e deste o material ultrafino é encaminhado para os filtros prensa com em torno de 70 % de sólidos. Segundo informações, as peneiras desaguadoras têm em torno de 75% de eficiência, ou seja, 25% de material acima de 45 microns é direcionado para a filtragem e 25% de material abaixo de 45  $\mu\text{m}$  (lama) fica retido na peneira.

Informações internas também apontaram que atualmente a alimentação da ITM de Pau Branco pode chegar a 1.200 t/h, tendo uma recuperação mássica em torno de 70%. Ou seja, considerando um cenário com estas premissas, a produção de rejeito da ITM alcançaria a taxa de 360 t/h, sendo que 252 t/h ficariam retidos no peneiramento e 108 t/h alimentariam os filtros.

A usina conta com 3 (três) filtros prensa horizontais da Matec, sendo que, atualmente, 2 (dois) são operacionais e 1 (um) é reserva. Estes equipamentos são extremamente confiáveis, apresentando fator de *break down* baixíssimo (~3%). Gomes (2016) apresentou os parâmetros relativos à filtragem em seu estudo e uma comparação foi feita com os testes realizados em VGR, por Guimarães (2011). (Quadro 4)

Quadro 4 - Comparativo do projeto de filtragem da Mina de Pau Branco comparado aos resultados de Guimarães - VGR (2011)

	Guimarães (2011)	Gomes (2016)
	VGR ITM I	Pau Branco
D50 (µm)	10	10
% sólidos alimentação	45	70
Taxa unitária de filtragem (kg/h/m <sup>2</sup> )	85,8	128
Umidade rejeito (%)	20,9	< 15

Fonte: Elaborado pela autora

Pode ser observado que a filtragem em Pau Branco apresenta uma eficiência mais alta, tanto em termos de umidade final, quanto em relação à taxa unitária de filtragem. Tal fato pode ser explicado pela % de sólidos com que os filtros são alimentados, uma vez que, segundo a literatura, existe uma concentração mínima de sólidos para garantir boa performance, de forma que concentrações de sólidos em massa cada vez mais elevadas favorecem o processo de filtragem. Os filtros de Pau Branco são alimentados com uma % de sólidos consideravelmente maior, o que pode explicar esta diferença. Vale ressaltar que devido à ineficiência do peneiramento que antecede a filtragem, em torno de 25% de material acima de 45 microns alimenta os filtros, o que também pode explicar a maior eficiência de filtragem, devido a essa parcela de material mais grosso direcionado ao filtro.

Ainda em termos comparativos, o desaguamento dos rejeitos grossos utilizando peneiras se apresentou como uma alternativa economicamente mais viável. Em sua dissertação, Guimarães (2011) propôs uma rota de beneficiamento em que os rejeitos grossos seriam filtrados com filtro de disco convencional em Vargem Grande. Para fins comparativos, foi considerada a mesma taxa de filtragem considerada em VGR (1.036,6 kg/h/m<sup>2</sup>) e, para o custo unitário do filtro de disco, fez-se uma pesquisa de mercado atual e adotou-se o valor de R\$ 2.900.000,00. O quadro 5 apresenta os resultados em relação ao CAPEX dos equipamentos para desaguar 252 t/h de rejeitos grossos:

Quadro 5 - Capex da solução proposta por Guimarães (2011) e a solução implementada na Mina de Pau Branco

	Quantidade	CAPEX
Peneira desaguadora SX PHD 3012/ID	2	R\$ 700.000,00
Filtro a disco (área 160 m <sup>2</sup> )	2	R\$ 5.800.000,00

Fonte: Elaborado pela autora

Ou seja, a escolha pelas peneiras desaguadoras na Mina de Pau Branco é em torno de 8 (oito) vezes mais econômica, em termos de CAPEX, quando se comparada com a utilização de filtros a disco.

Ao considerar o CAPEX dos filtros e das peneiras, bem como os respectivos valores de instalação dos equipamentos, demonstrados no Quadro 6, conclui-se que custo total referente à estes equipamentos é de R\$ 40.900.000,00.

Quadro 6 - Capex e custo de instalação dos filtro prensa e das peneiras

	CAPEX + Custo de Instalação
Filtros prensa	R\$ 40.000.000,00
Peneiras desaguadora SX PHD 3012/ID	R\$ 900.000,00

Fonte: Elaborado pela autora

No que tange as observações realizadas *in loco*, em ambas as visitas à Mina, foi observado que havia sempre um dos três filtros em manutenção. Levando em conta a produção de rejeito atual e a capacidade dos filtros, que segundo Gomes (2016) informações internas é de 150 t/h, conclui-se que há uma sobrecapacidade dos equipamentos e, como há mais filtros do que o necessário, eles entram em manutenção preventiva. Essas manutenções excessivas, realizadas sempre que o equipamento não está em funcionamento, podem gerar custos desnecessários, pois podem ser realizadas, muitas das vezes, sem necessidade. Nesse sentido, vale salientar que já existem sistemas para filtros que geram alarmes de manutenção preventiva quando há sua real necessidade.

Além disso, cabe ressaltar que a mina de Pau Branco está em processo de expansão. A ITM 1 terá sua capacidade produtiva ampliada e haverá a instalação de uma nova usina de beneficiamento (ITM 2), de forma que a capacidade total instalada passará de 5,0 Mtpa para 11,0 Mtpa. Parte do rejeito da ITM 2 também será destinado aos filtros prensas, dessa forma

é interessante pensar em soluções cada vez mais automatizadas para a filtragem, uma vez que, provavelmente, não haverá a sobrecapacidade dos equipamentos e, conseqüentemente, haverá mais margem para possíveis problemas operacionais.

As tecnologias já oferecidas pelo mercado são protagonistas em detectar as principais falhas referentes à filtragem, como o desgaste dos tecidos e a baixa produtividade por comaltação dos tecidos, e ainda garantem um maior controle do percentual de sólidos, por exemplo. O sistema Metris addIQ da Andritz, a título de exemplo, evita tempos de inatividade com a utilização de alarmes de manutenção preventiva e da interface intuitiva do equipamento, além disso, possui um rápido rastreamento de falhas com a utilização de listas de alarmes e memória do histórico de ocorrências. O sistema maximiza o desempenho do equipamento, independentemente de estar utilizando um filtro prensa Andritz ou de outro fabricante.

A descarga de dois dos filtros em Pau Branco é realizada diretamente em um *bayer* e a do outra é realizada em um transportador de correias que direciona o material para seu respectivo *bayer*. A figura 23 representa um filtro prensa com seus respectivo *bayer*.

Figura 24- Bayer carregado com tortas secas – Representativo



Cada filtro operacional conta com 1 (uma) pá-carregadeira e 3 (três) ou 4 (quatro) caminhões para realizarem o carregamento e o transporte do material. Na pilha de disposição compartilhada de estéril/rejeito, denominada Cachoeirinha, ficam 3 (três) tratores que realizam a distribuição e compactação do material.

O empreendimento também apresenta outras pilhas de estéril, Nordeste e Sul, além de duas antigas barragens de rejeitos. Atualmente as barragens estão desativadas e o material das pilhas está sendo destinado para a atividade de reaproveitamento (para recuperação de finos com teor de ferro). As suas respectivas localizações encontram-se na figura 24.

Figura 25 – Localização das barragens de rejeito e pilhas



Fonte: Imagens de satélite google maps modificado pela autora

A pilha cachoeirinha é construída de forma ascendente, na qual cada alteamento sucessivo é sustentado pelo anterior, que serve como apoio de superfície plana para o pé do talude do banco e garante confinamento para o solo de fundação. O rejeito é incorporado às camadas de estéril, sendo envelopado para impedir a criação de zonas preferenciais de acúmulo e

percolação de água. A proporção de estéril/rejeito é de 1:1, entretanto como é feita a compactação do material por tratores, as camadas de rejeito apresentam espessuras menores (~ 80 cm), quando se comparada às camadas de estéril (~ 100 cm), devido à umidade do material. Cabe ressaltar que em períodos chuvosos as camadas de estéril e rejeito apresentam espessuras maiores, tendo aproximadamente o dobro de material em cada camada. Há um constante acompanhamento e controle geotécnico ao longo dos alteamentos realizados e, além disso, a pilha possui um sistema de drenagem interna e superficial a fim garantir a percolação de água que é direcionada para o dique destacado na figura 25.

Figura 26 - Pilha Cachoeirinha e dique (Vallourec, 2019)



Fonte: Gomes (2016)

Cabe ressaltar que a literatura (Leduc & Smith, 2003) recomenda camadas de rejeito menos espessas (20 a 40 cm) e camadas de estéril mais espessas (150 a 300 cm) para a disposição compartilhada. Entretanto, deve-se levar em conta que a baixa umidade do rejeito filtrado de Pau Branco, muito provavelmente, determina a maior espessura da respectiva camada de rejeito na pilha. Além disso, segundo informações internas, a relação estéril-minério da mina atualmente é baixa, principalmente porque a pilha irá alcançar a altura máxima permitida pela sua respectiva licença ambiental no início de 2020. Dessa forma, está sendo retirado menos material estéril, o que torna a espessura das camadas mais finas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disposição de rejeitos em barragens se apresenta como uma solução ultrapassada e insustentável. A utilização de filtros prensa e de disco, para rejeitos ultrafinos e grossos, respectivamente, se mostra como uma alternativa que possibilita a disposição do material a seco. Cabe ressaltar que os estudos mostram que rejeitos mais finos tornam a filtração menos eficiente.

A Mina de Pau Branco é um exemplo da viabilidade deste processo. O desaguamento de rejeitos grossos (> 45 microns) por meio de peneiras desaguadoras se mostrou eficiente, uma vez que o material retido já é empilhado com 15% de umidade e, além disso, apresenta-se como uma alternativa mais econômica frente à filtração com filtros de disco, proposta na literatura. A lama (< 45 microns) é desaguada por filtros prensa e também é empilhada com aproximadamente 15% de umidade. O rejeito é destinado à pilha de disposição compartilhada com estéril, que é controlada pelo corpo geotécnico.

O custo de aquisição dos 3 (três) filtros e do sistema de peneiramento, assim como o valor de instalação associado é totalizado em R\$ 40.900.000,00. Cabe ressaltar que não foram considerados custos operacionais, energéticos e também os custos dos equipamentos que foram adquiridos para auxiliar no desaguamento dos rejeitos: ciclones e espessador de lamas.

A partir de observações feitas *in loco*, percebeu-se que as manutenções preventivas em relação aos filtros podem estar acontecendo em excesso, pois são realizadas sempre que o equipamento não está em funcionamento, e em geral, sempre há um filtro desativado. Nesse sentido, sugere-se a instalação de sistemas que geram alertas quando há necessidade de manutenção preventiva. O Metris addIQ é um exemplo de sistema que oferece esse tipo de automação, além de outros benefícios, como o rápido rastreamento de falhas. Tal sistema seria interessante, principalmente porque haverá um aumento de produção geral.

O pioneirismo da Vallourec promoveu a desativação da alimentação das barragens e isso possibilitou a drenagem contínua do antigo material já disposto. Atualmente, este material pode ser movido com bastante facilidade. Além disso, o desaguamento dos rejeitos possibilitou a maior recirculação de água para a usina e também para operações auxiliares, como a lavagem de rodas de caminhões e o controle de poeira das vias. Cabe ressaltar que a melhora no relacionamento com as comunidades ao entorno é outro ponto positivo a ser levado em conta.

Em contrapartida se deve salientar que a disposição em pilhas também demanda áreas extensas e gera custos. Dessa forma, estudos para reaproveitamento do rejeito, na construção civil, por exemplo, devem ser aprofundados.

Considerando o desenvolvido neste trabalho, uma temática relacionada a um estudo mais detalhado em relação aos custos operacionais de desaguamento, carregamento, transporte e disposição dos rejeitos da Mina de Pau Branco parecem relevantes.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 13028, de 14 de Novembro de 2017. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). **Mineração – Elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ALVES, A.R.C. **Disposição compartilhada de rejeito e estéril gerados no Processo de extração de minério de ferro.** Dissertação de Mestrado, Programa de PósGraduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 183p, 2009.

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

CARVALHO, WESLEY. **Sistema de disposição compartilhada de estéreis e rejeitos desaguados da mina de Fernandinho.** 2017.

CHAVES, Arthur P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios.** 3. ed. São Paulo: Signus Editora, 2007. Coleção Teoria e prática do tratamento de minérios, v. 1. 280p.

CSN MINERAÇÃO S.A. **Anais...** Disponível em: [http://www.csn.com.br/conteudo\\_pti.asp?idioma=0&tipo=61062&conta=45](http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&tipo=61062&conta=45). Acesso em 15 set. 2019.

FIGUEIREDO, M.M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra–Congonhas/MG.** Dissertação em mestrado profissional em Engenharia Geotécnica. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto.2007.

GOMES, R., B. **Influência da recuperação da reserva e disposição dos rejeitos no desenvolvimento sustentável de operações de minas no Quadrilátero Ferrífero.** 2016. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016. Disponível em:[Influência da recuperação da reserva e disposição dos](#)

[rejeitos no desenvolvimento sustentável de operações de minas no Quadrilátero Ferrífero.](#)

Acesso em: 15 set. 2019.

GUIMARÃES, N.C. **Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro Visando a sua Disposição em Pilhas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, 129p.2011.

HENRIQUES, A. B., **Caracterização mineralógica e propriedades eletrocinéticas de hematitas do Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte:** Escola de Engenharia da UFMG, 145p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), 2009.

LEDUC, M. & SMITH, M.E.. **Tailings co-disposal** – Innovations for cost savings and liability reduction. The Latin America Mining Record, 15p.2003.

LUZ, A.B e LINS, F.F., **Introdução ao Tratamento de Minérios** – Tratamento de Minérios, 2010.

MARTIN T.E, DAVIES M.P., RICE S., HIGGS T.; LINGHTHALL P.C.**O futuro da mineração MMSD** - Minerals And Sustainable Development - Stewardship Of Tailings Facilitiea - B.C Canadá, 2002.

MARTIN T.E, DAVIES M.P., RICE S., HIGGS T.; LINGHTHALL P.C.**O futuro da mineração MMSD** - Minerals And Sustainable Development - Stewardship Of Tailings Facilitiea - B.C Canadá, 2002.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Beneficiamento de Minérios.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/177708/Beneficiamento+de+Min%C3%A9rios/0b762ba9-35a6-4e73-9e7b-6d1e957e5d8f?version=1.0>. Acesso em: 15 set. 2019.

MOHALLEM, S.D.S. **Análise de sistema de co-disposição dos rejeitos de minério de ferro gerados na Mina Serra Azul** – Itatiaiuçu/MG. Dissertação em mestrado profissional em Engenharia Geotécnica. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2018.

OLIVEIRA, M. L. M. de; LUZ, José A. M. da; LACERDA. **Carla Maria Mendes. “Espessamento e Filtragem”** Departamento de Engenharia de Minas. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas, 2004

PORTES, A. M. C.; **Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2013. 139p.

**REVISTA VALE – S11D.** Disponível em: <http://www.vale.com/PT/initiatives/innovation/s11d/Documents/s11d-2016/assets/doc/revista-vale-s11d.pdf>. Acesso em: 27 de set. 2019.

SILVA, E. C.; SOUZA, A. A. Desafios do processamento em umidade natural/rotas de mínimo consumo de água. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 26, 2015. **Anais...**Poços de Caldas, 2016.

SOARES, L (2010). **Barragem de rejeitos**. In: Luz, A.U.; Sampaio J. A.; França, S. C. A. (Orgs). Tratamento de Minérios. (5ª ed., Cap. 19, pp. 831-888). Rio de Janeiro, Brasil: Cetem, 867p.

SOUZA JUNIOR, T. F. S.; MOREIRA, E.; HEINECK, K. S. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil, **Holos**, v. 05, n. 34. 2018.

THOMÉ, R.;PASSINI, M.L. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. **Ciencias Sociais Aplicadas em Revista – UNIOESTE/MCR**, Marechal Cândido Rondon, v.18, n. 34, p. 49-65, 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIAS. **Vale Dispensa água em novos projetos na mina Carajás**. Disponível em: [https://cetm\\_engminas.catalao.ufg.br/n/53761-vale-dispensa-agua-em-novos-projetos-na-mina-carajas](https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/n/53761-vale-dispensa-agua-em-novos-projetos-na-mina-carajas) Acesso em 27 set. de 2019.

VALADÃO, G. E. S; ARAUJO, A. C. de. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VALERIUS, M. B. **Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás**. Distrito Federal, 105 p. Dissertação de Mestrado - UnB, 2014.

VICK, S. G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. Wiley Int., New York, USA 1983.