



METODOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO PARA SUBSTITUIR AS BARRAGENS DE REJEITO

DISPOSAL METHODS OF IRON ORE TAILINGS TO REPLACE THE TAILING DAMS

Heloísa das Graças de Ávila Fonseca¹

Júnia Soares Alexandrino²

Telma Ellen Drumond Ferreira³

Resumo

A lavra de minérios de ferro com teores cada vez mais baixos aumentou significativamente a quantidade de rejeitos produzidos e, conseqüentemente, a dimensão das barragens de contenção de rejeitos. Diante das inúmeras falhas com barragens de rejeitos que vêm ocorrendo, técnicas alternativas para disposição dos rejeitos estão sendo desenvolvidas. Este trabalho, por meio de uma revisão bibliográfica, buscou identificar quais são as metodologias alternativas para disposição do rejeito de minério de ferro, como substituição das tradicionais barragens. As principais técnicas identificadas foram: rejeitos espessados e em pasta, rejeitos filtrados, disposição em cava exaurida, codisposição compartilhada de rejeitos e estéreis, disposição subaérea e empilhamento drenado. Metodologicamente, esta pesquisa caracteriza-se como básica, qualitativa, exploratória e bibliográfica, baseando-se em livros, artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado. Os resultados apresentados mostraram que as técnicas alternativas de disposição de rejeitos são viáveis de aplicação e são mais seguras do ponto de vista ambiental e social do que as barragens de contenção de rejeitos.

Palavras-chave: Minério de ferro, Barragens de rejeitos, Disposição de rejeitos.

¹ Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, Unidade João Monlevade - MG - Brasil. Estudante do curso de Engenharia de Minas. Email: heloisaasdp@hotmail.com

² Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, Unidade João Monlevade - MG – Brasil. Coordenadora e Prof. Dr. do curso de Engenharia de Minas. Email: juniaalexandrino@yahoo.com.br

³ Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade João Monlevade – MG – Brasil. Prof. Me. da Universidade do Estado de Minas Gerais. Email: telmaellen@hotmail.com

Abstract

The iron ore mining with increasingly lower contents significantly increased the amount of tailings produced and, consequently, the size of the tailings containment dams. In view of the numerous failures with tailings dams that have been occurring alternative techniques for tailings disposal are being developed. This work, through a bibliographical review sought to identify the alternative methodologies for the disposal of iron ore tailings, as a substitute for traditional tailings dams. The main techniques identified were: thickened and pulped tailings, filtered tailings, exhausted tailings disposal, shared tailings and waste coding, subaerial disposal, drained stacking. This research is characterized as basic, qualitative, exploratory and bibliographical, based on books, articles, master's dissertations and doctoral theses. The results showed that alternative tailings disposal techniques are feasible for application and are safer from the environmental and social point of view than tailings dams.

Keywords: Iron ore, Tailing dams, Tailings disposal.

1. INTRODUÇÃO

Em toda indústria mineral, concomitante com a produção de minério concentrado, existe a produção de estéril e rejeito. O primeiro, é um material resultante da lavra e o segundo, um material oriundo do processo de beneficiamento de minérios, sendo que ambos não apresentam valor econômico. Durante muitos anos, o local e a forma de disposição desses materiais não receberam a devida atenção por parte das empresas mineradoras e dos órgãos fiscalizadores.

Segundo Luz e Lins (2010), no final do século XIX e início do século XX, surgiram várias inovações tecnológicas voltadas para a área de concentração de minérios. Após a Revolução Industrial, houve uma demanda maior de extração de bens minerais e, conseqüentemente, um aumento na produção de rejeitos. A partir do séc. XX, deu-se início à construção das primeiras barragens de contenção dos rejeitos (IBRAM, 2016).

Durante muitos anos, houve uma preferência pelas mineradoras em utilizar barragens de contenção para armazenar o rejeito, podendo ser construídas em uma única etapa ou em múltiplas etapas (FIGUEIREDO, 2007; PORTES, 2013). Porém, essas estruturas podem trazer muitos problemas, com o passar do tempo.

Alguns dos problemas existentes nesse setor é que as barragens de contenção de rejeitos apresentam riscos ambientais, econômicos e para a sociedade local. Vários acidentes com barragens de rejeitos já aconteceram no mundo todo, dentre eles, o mais expressivo do ponto de vista ambiental, foi o rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), pertencente à mineradora Samarco, em novembro de 2015. Em janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da Barragem I da mina Córrego do Feijão em Brumadinho (MG), pertencente à mineradora Vale S.A, deixando mais de 300 vítimas, entre mortos e desaparecidos.

Nos últimos anos, com a escassez das reservas de minério de ferro de alto teor e a necessidade de se lavar minérios cada vez mais pobres, houve um aumento significativo na produção de rejeitos. Nesse contexto, em função da responsabilidade ambiental e social, surgiu a necessidade de desenvolver novas tecnologias para o tratamento dos rejeitos, que permitem uma disposição alternativa à barragem de rejeitos e/ou o desenvolvimento de novos produtos.

Tendo em vista o problema apresentado, este estudo, através de uma revisão da literatura, teve como objetivo apresentar metodologias alternativas de disposição do rejeito proveniente do beneficiamento do minério de ferro.

2. TÉCNICAS CONVENCIONAIS PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Durante muito tempo, grandes volumes de rejeitos eram descartados na natureza e seus impactos eram considerados desprezíveis. Após a Revolução Industrial, houve um aumento muito grande na demanda por bens minerais. Consequentemente, também cresceu muito a produção de rejeitos e esse material era removido para o leito dos rios. E assim era necessária a construção de barramentos e diques de contenção para armazenar e conter os rejeitos ali dispostos, mas tudo isso era feito de forma descontrolada. Somente a partir da década de 80 os aspectos ambientais começaram a ganhar importância (IBRAM, 2016).

Sendo o rejeito um subproduto da indústria mineral sem valor econômico, para reduzir os gastos com o transporte, os rejeitos são descartados nas proximidades das instalações da mina. Esse descarte pode ser feito na forma sólida ou na forma de polpa. No caso de polpa, é feito através de tubulações denominadas de *rejeitodutos* utilizando sistemas de bombeamento ou pela força da gravidade. O descarte na forma de sólidos não é muito utilizado, devido aos altos custos nos processos de desagendamento do rejeito (PEREIRA, 2005).

A disposição de rejeitos pode ser feita de forma subterrânea, superficial ou subaquática. A disposição subaquática não é muito utilizada devido aos impactos ambientais provocados nos ecossistemas aquáticos. A disposição subterrânea é utilizada em minas subterrâneas na qual o rejeito é utilizado para preencher as câmaras já lavradas, servindo como suporte para as paredes e tetos e para controle de subsidência (LOZANO, 2006; MILONAS, 2006).

De acordo com Gomes (2009), a forma mais comum de disposição de rejeito de minério de ferro é sob a forma de polpa, utilizando barragens de contenção. Essa técnica é a mais comum de disposição de rejeitos e consiste no lançamento do material em forma de polpa diretamente em vales que contêm reservatórios confinados por barragens. A primeira etapa de construção da barragem fundamenta-se na implantação de um dique inicial de terra compactada ou de enrocamento de grandes blocos de rocha. A segunda consiste nos alteamentos sucessivos que são realizados conforme a operação da usina. Para não comprometer a estabilidade da estrutura, esses alteamentos devem ocorrer na mesma proporção do reservatório, evitando que o lago se aproxime da barragem e eleve a linha freática (PRESOTTI, 2002).

Com frequência, os alteamentos são executados usando o método de aterro hidráulico, que é a utilização do próprio rejeito como material de construção, por meio do processo de hidromecanização (disposição e transporte do rejeito com subsídio de água) (PORTES, 2013). Os métodos que utilizam o próprio rejeito como material de construção são de montante, de jusante e de linha de centro, cada um com suas especificidades e vantagens próprias.

3. RISCOS DAS BARRAGENS DE REJEITOS

As barragens de rejeitos estão entre as maiores estruturas construídas pelo homem na Terra. Sua segurança, para proteção da vida e do meio ambiente, é uma necessidade essencial nas operações mineiras. Esses fatores, e a precária segurança revelada pelos inúmeros acidentes com barragens de rejeitos, têm mostrado a necessidade de melhorias no projeto e nas operações destas estruturas (ICOLD, 2001).

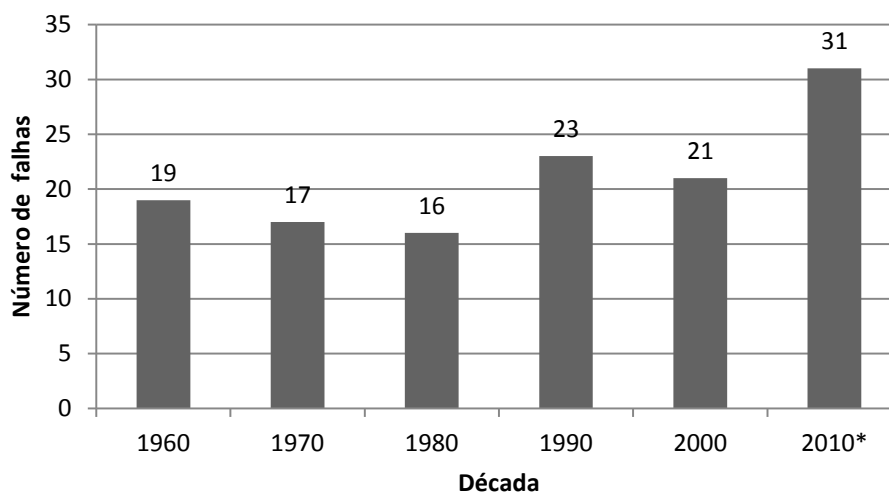
Apesar de muitos investimentos e desenvolvimento de tecnologias para melhorar as práticas, as barragens de rejeitos, construídas para armazenar os rejeitos de mineração, podem entrar em colapso. Esses incidentes ainda são mais prováveis com os efeitos de mudança do clima. Quando eles ocorrem, podem destruir comunidades inteiras e ainda ter um enorme impacto ambiental (NORONHA, 2017). Desde 2014, já ocorreram dezoito falhas significativas em barragens de rejeitos no mundo todo, sendo cinco destas no Brasil, além das centenas que já ocorreram nas décadas passadas (WISE, 2017).

A taxa de rompimentos de barragens de rejeitos é significativamente maior que as de barragem de armazenamento de água, isso porque são utilizados métodos com maiores riscos de ruptura na construção dessas barragens. Estas são construídas com alteamentos sucessivos ao longo dos anos e ainda podem usar o próprio rejeito como material de construção (CHAMBERS, 2012).

Alguns dos mecanismos de falha em longo prazo para as barragens de rejeitos incluem danos cumulativos (por exemplo, erosão interna e múltiplos eventos de terremotos), perigos geológicos (deslizamentos de terra, etc.), liquefação e mudanças nos padrões climáticos. As três principais causas dos incidentes com barragens de rejeitos são sobreposição, estabilidade do talude e terremotos (CHAMBERS, 2012).

A figura 1 apresenta o número de falhas ocorridas em barragens de rejeitos nas últimas décadas.

Figura 1 - Falhas com barragens de rejeitos nas últimas décadas



Fonte: WISE, 2019 (adaptado).

Deficiências no armazenamento e gestão dos rejeitos de mineração são a maior fonte de falhas de alta consequência pública, globalmente. Embora tenha ocorrido outras falhas catastróficas, as rupturas da barragem de Mt Polley no Canadá (2014) e a de Fundão no Brasil (2015) apontaram a necessidade de mudar a ideia de que os impactos da mineração são inevitáveis e compensados por maiores necessidades e benefícios públicos (BOWKER; CHAMBERS, 2017). Cada um desses acidentes liberou mais de 25 milhões de metros cúbicos de rejeito no meio ambiente que, combinados, representam material suficiente para encher 20.000 piscinas olímpicas (UNEP, 2017).

Outro desastre expressivo foi o rompimento da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho (MG), que segundo dados do IBAMA (2019) causou uma destruição de aproximadamente 270 hectares e deixou centenas de mortos e desaparecidos.

A lavra de minérios com teores cada vez mais baixos resulta em um maior volume de rejeitos dispostos nas barragens, prejudicando assim, elementos críticos de segurança do design da mesma e aumentando os riscos de ruptura (BOWKER; CHAMBERS, 2017).

Diante desse cenário, faz-se necessária a adoção de métodos alternativos para a disposição dos rejeitos do minério de ferro. Diversas empresas de mineração já estão adotando sistemas de beneficiamento a seco e técnicas de disposição de rejeitos mais seguras.

4. SISTEMAS ALTERNATIVOS DE DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DO MINÉRIO DE FERRO

4.1 REJEITOS ESPESSADOS E EM PASTA

A ideia de disposição de rejeitos espessados foi apresentada por Robinsky em 1968, em que através do desaguamento da polpa aumenta-se a concentração e a percentagem de sólidos em peso. Nesse procedimento são empregados espessadores que separam os sólidos do líquido mediante sedimentação de partículas por gravidade (PORTES, 2013).

Segundo a mesma autora (2013), em alguns casos, para que ocorra a sedimentação das partículas são utilizados alguns reagentes, como os floculantes e os coagulantes, além da importância de controle do pH.

A grande quantidade de água reaproveitada diretamente dos espessadores, em comparação com as técnicas utilizadas na recuperação de água em barragens de rejeitos, constitui o aspecto mais expressivo dessa tecnologia. Além disso, os processos de espessamento de rejeitos envolvem as seguintes vantagens: menor susceptibilidade à liquefação e a rupturas catastróficas das estruturas de contenção de rejeitos, maior densidade e estabilidade dessas estruturas, menores impactos ambientais e maior recuperação dos reagentes utilizados nos processos de tratamento (GOMES, 2009).

Em se tratando de rejeitos espessados ou sob a forma de pasta (tecnologia chamada também de *P & TT Paste and Thickened Tailings*), a preparação inicial e o transporte do rejeito é tão importante quanto ao dimensionamento e a forma de disposição em si. As características reológicas do rejeito durante as fases de preparação e bombeamento, interferem diretamente no comportamento geotécnico do rejeito nas áreas de disposição. Assim, influenciam diretamente na sequência do projeto: o tipo de espessador utilizado, procedimentos de preparação da pasta, aditivos utilizados, sistema de bombas adotadas e características da linha de bombeamento (GOMES, 2009).

Para a preparação do rejeito, deve-se levar em consideração a mineralogia, a granulometria do material e análises químicas da água, envolvendo medidas de pH, concentração iônica e cátions presentes (FIGUEIREDO, 2007).

Ainda segundo Gomes (2009), os rejeitos espessados podem ser depositados tanto em áreas planas quanto em terrenos irregulares. Em se tratando de vales, a pasta viscosa tende a fluir e a se adensar, conformando à topografia do terreno ou sendo barrada por um dique de contenção. Em áreas planas, a disposição do material tende a formar um depósito cônico de

taludes uniformes e suaves (Figura 2). Para acumulação e aproveitamento de água e reagentes do processo, é construído um dique de contenção à jusante. A construção dos diques também pode ser necessária, à medida que avança o processo de deposição, para aumentar a capacidade de armazenamento dos rejeitos.

Figura 2 - Formação de cone sobre o rejeito depositado na Mina de Bulanhahu



Fonte: Franca (2002) *apud* Gomes (2009).

4.2 REJEITOS FILTRADOS

Os filtros são equipamentos comuns em uma usina de tratamento de minérios. Assim, podem ser utilizados para etapas de desaguamento de rejeitos. A filtração do rejeito é uma etapa de separação sólido-líquido e consiste na passagem da polpa através do meio filtrante, que é capaz de reter as partículas sólidas e permitir a passagem do líquido. Nesse processo, elevadas quantidades de partículas finas podem inviabilizar o processo de filtração (PORTES, 2013).

Segundo Guimarães (2011), para que a filtração aconteça é necessária a presença de uma força sobre as partículas, que pode ser obtida através de gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. O autor afirma que nas usinas de minério de ferro o mais comum é a utilização de filtros que operam a vácuo (filtros de discos convencionais e filtros horizontais de correia) ou filtros de pressão.

Os rejeitos podem ser filtrados a seco (*dry cake*) ou a úmido (*wet cake*). O rejeito filtrado a seco apresenta de 70 a 85% de grau de saturação. O rejeito filtrado a úmido apresenta grau de saturação próxima de 100% (DAVIES, 2011 *apud* PORTES, 2013).

Após o processo de filtragem, os rejeitos apresentam baixo teor de umidade e são transportados em caminhões ou em correias transportadoras até o local de disposição final, onde são lançados, espalhados e compactados em camadas ou estabilizados em pilhas. Assim, não necessitam de qualquer estrutura de contenção a jusante (GOMES, 2009).

Apesar dos custos elevados associados à planta de desaguamento, transporte e disposição final, deve se lembrar que estes custos serão amortizados na fase de desativação do empreendimento, além de ser um método altamente seguro (GOMES, 2009).

A respeito da utilização da técnica de filtragem de rejeitos, Guimarães (2011) conclui em seu trabalho:

A filtragem de rejeitos visando à sua disposição em pilhas mostrou ser uma alternativa viável ao método tradicional de disposição de rejeitos diluídos em barragens. A melhor opção técnico-econômica para filtragem dos rejeitos de flotação é com filtros de disco convencional ou filtro de disco cerâmico (a escolha depende, principalmente, do custo de energia). A filtragem das misturas de rejeitos e lamas ou somente das lamas, em separado, também mostrou ser tecnicamente possível em bancada (necessário teste piloto), sendo o uso de filtro prensa horizontal a melhor escolha econômica. Uma opção a filtragem das lamas é a produção de pasta, porém sua disposição requer condições e estudos especiais (GUIMARÃES, 2011, p. 108).

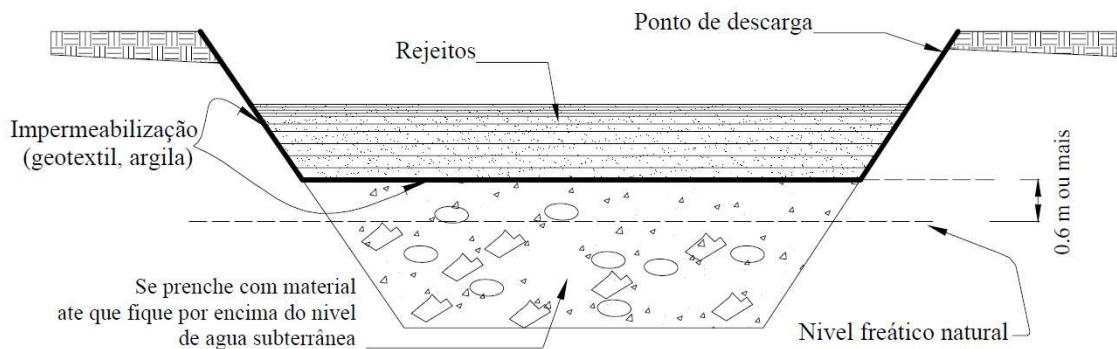
Peixoto (2012) apresentou e discutiu em seu trabalho o chamado Sistema UMD (Unidades Móveis de Desaguamento), que consiste em um sistema de unidades desaguadoras de rejeitos montadas em linha sobre um container móvel e de fácil traslado em áreas limitadas. O autor (2012) ressalta o baixo custo de implantação, a facilidade de manutenção e a grande simplicidade e mobilização em áreas confinadas de praias de rejeitos.

Portes (2013), em seu trabalho, comparou a área e o volume ocupados por três diferentes formas de disposição de rejeitos de minério de ferro: rejeitos filtrados, rejeitos ciclonados e barragem convencional. Assim, a autora (2013) mostrou a redução da área utilizada com a técnica de desaguamento de rejeitos, a barragem em solo compactado corresponde à maior área, seguida pela barragem ciclona e a menor área é a ocupada pela pilha de rejeito filtrado.

4.3 PREENCHIMENTO DE CAVAS DESATIVADAS

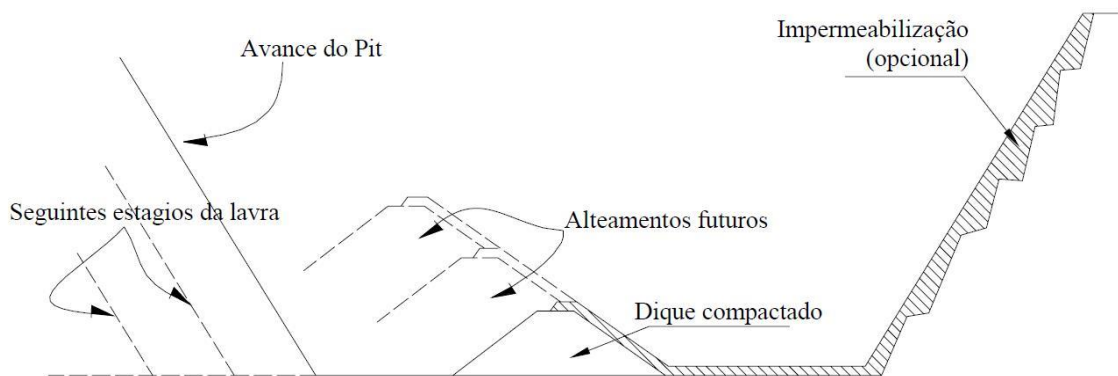
O método de disposição em cavas, também chamado de “*disposição em pit*”, consiste no lançamento do rejeito em cavas exauridas ou naquelas em que ainda há extração de minérios, não sendo necessária a construção de diques (LOZANO, 2006; PORTES, 2013). As Figuras 3 e 4 ilustram essas duas situações.

Figura 3 - Disposição em cava exaurida



Fonte: Ritcey (1989) *apud* Lozano (2006).

Figura 4 - Disposição junto à extração de minério



Fonte: Ritcey (1989) *apud* Lozano (2006).

As principais vantagens desse método, segundo Portes (2013), são: permite recuperar áreas já lavradas ao mesmo tempo em que ocorre o processo de lavra, reduz o impacto ambiental e visual, promove redução de riscos e custos, facilita a recuperação da área ao final do projeto, etc.

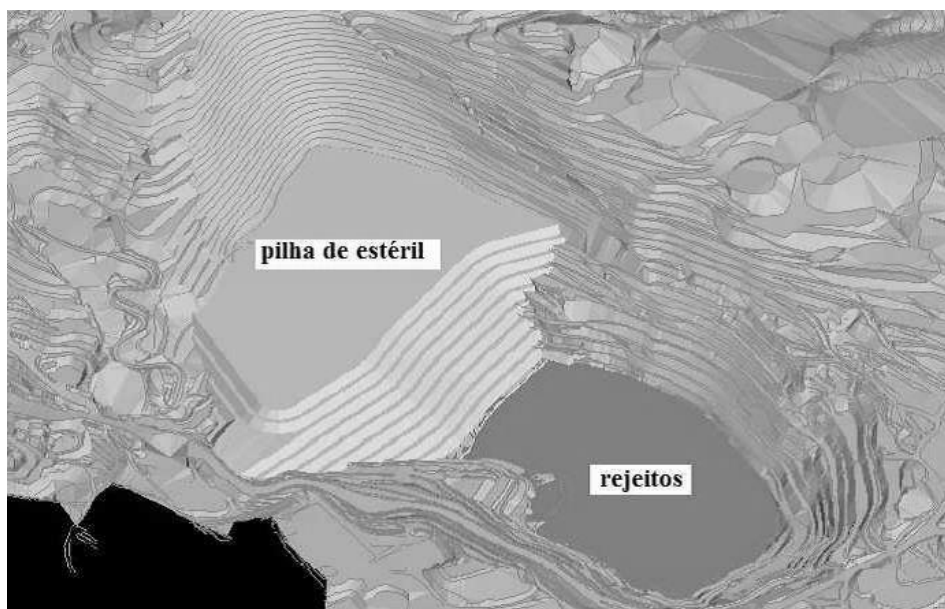
4.4 CODISPOSIÇÃO E DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA DE REJEITO E ESTÉREIS

Com o aumento das restrições para liberação ambiental de novas áreas para disposição dos resíduos da mineração, tornou-se bastante viável a técnica de disposição dos resíduos em um mesmo local. A técnica é definida como codisposição, quando se misturam os rejeitos ou rejeito e estéril para posterior disposição. Quando estéréis e rejeitos não são misturados, mas somente dispostos em um mesmo local, a técnica recebe o nome de disposição compartilhada (SILVA, 2014).

No Brasil, as técnicas de codisposição são quase inexistentes, ocorrendo apenas aplicações em termos de disposição compartilhada (Figura 5) (ALVES *et al.*, 2010 *apud* PEIXOTO, 2012).

É importante ressaltar que a técnica pode ser utilizada também para rejeitos de diferentes granulometrias, que possuem características geotécnicas distintas, e não somente para misturas de rejeitos e estéréis. Um exemplo são os rejeitos finos, que implicam em alto investimento nas etapas de desaguamento. Esses, quando misturados com os rejeitos granulares, ocupam os espaços vazios dos rejeitos granulares, reduzindo assim a permeabilidade da mistura (ALEVAN *et al.* 2016).

Figura 5 - Disposição compartilhada de estéréis e rejeitos na cava exaurida de Cauê



Fonte: Galbiatti (2006).

Segundo Silva (2014), as técnicas geralmente aplicadas para disposição compartilhada compreendem células para disposição de rejeito, disposição de rejeito em finas camadas e injeção dos rejeitos nos depósitos dos estéreis. E assim descreve em seu trabalho:

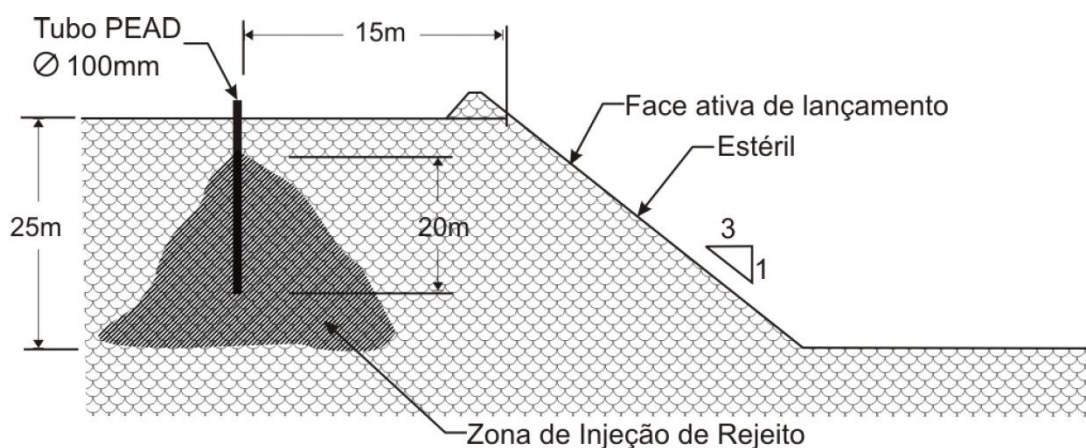
A metodologia da mistura estéril-rejeito envolve algum tipo de codisposição sem prévia mistura. Um exemplo típico compreende na construção de diques de estéril atuando como células independentes receptoras de rejeitos. Essas células são, então, preenchidas em diferentes fases, de tal modo que enquanto uma está sendo formada, a outra estará em processo de secagem e uma terceira em processo de construção. Após o adensamento e ressecamento do rejeito, o estéril é lançado sobre a célula consolidada, reiniciando-se, assim, o processo (SILVA, 2014, p.16).

Segundo Figueiredo (2007), são extremamente importantes para elaboração do projeto os aspectos relacionados ao teor de sólidos, espessura dos rejeitos e taxa de adensamento, sendo comumente utilizada uma relação de espessura de estéril e rejeito da ordem de 4:1.

Tal método é de baixo custo operacional, pois utiliza os mesmos equipamentos que já são utilizados na indústria mineral. Porém, leva mais tempo para sua construção, exigindo assim um planejamento eficiente. Uma alternativa consiste na disposição alternada entre camadas de estéril e rejeito, com o objetivo de promover a infiltração do rejeito nas camadas de estéreis. Dessa forma, permite a dissipação completa do excesso das poropressões geradas no interior do maciço de rejeitos (SILVA, 2014).

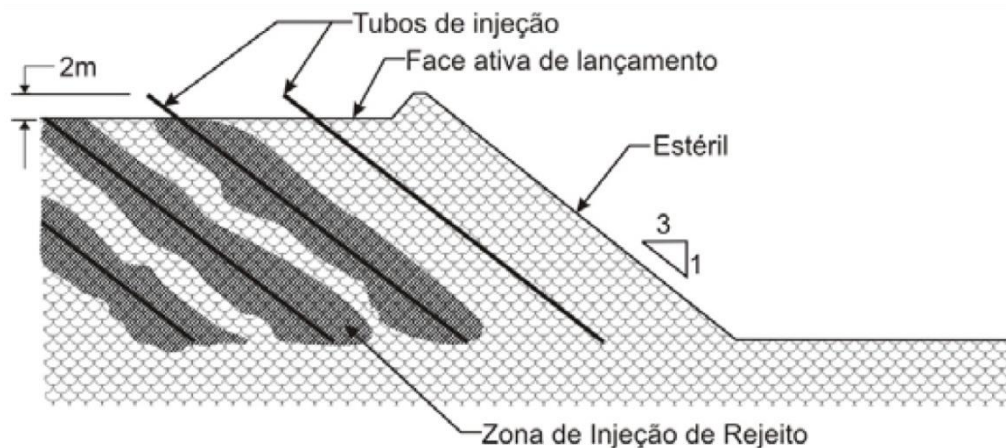
Outro método consiste na injeção de rejeitos no depósito de estéril utilizando perfurações, verticais ou inclinadas, formando na superfície das pilhas uma malha de furos. Porém, é necessário que o rejeito seja disposto na forma de pasta ou espessado e que haja equipamentos de perfuração e injeção (Figuras 6 e 7) (SILVA, 2014).

Figura 6 - Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril.



Fonte: Leduc *et al.* (2003) *apud* Silva (2014).

Figura 7 - Injeção de rejeito em furos inclinados no topo do depósito de estéril.



Fonte: Leduc *et al.* (2003) *apud* Silva (2014).

Alevan *et al.* (2016) concluíram, em seu trabalho, que os métodos de disposição compartilhada e codisposição são muito atrativos, pois ocupam uma área menor. Porém, ressaltaram que se deve verificar os estados de estabilidade dessas estruturas de depósito, uma vez que a presença de variados materiais pode levar à ruptura.

4.5 DISPOSIÇÃO SUBAÉREA

Na disposição subaérea, o rejeito é depositado em finas camadas, no qual são permitidos o adensamento e o ressecamento do material, antes do lançamento da próxima camada. Essa técnica provoca uma maior densificação do material e um aumento significativo na sua resistência (PORTES, 2013). Esse método é considerado o mais fácil e o de menor custo dentre os anteriormente citados (LIMA, 2006).

Lima (2006) efetuou uma pesquisa de retroanálise da formação de um depósito de rejeito fino de minério de ferro construído pelo método disposição subaérea, na Samarco Mineração S.A., em Mariana, Minas Gerais. A autora (2006) concluiu, após análises, que o sistema de ressecamento apresentou o efeito previsto, diferenciando-se pouco dos resultados que seriam obtidos com a técnica convencional de manejo de rejeitos.

4.6 EMPILHAMENTO DRENADO

Neste método, através da técnica de aterro hidráulico, os rejeitos granulares são depositados sob a forma de pilha. A pilha precisa conter um processo de drenagem interna

eficaz, e o coeficiente de permeabilidade dos rejeitos deve permitir a drenagem do material lançado de acordo com as características operacionais do local (PORTES, 2013). O sistema de drenagem interna, ligada aos rejeitos do reservatório, promove a liberação da água livre que sai dos poros dos rejeitos. Esse sistema deve ter grande capacidade de vazão (IBRAM, 2016).

Segundo Gomes (2009), após a construção do dique de partida os alteamentos sucessivos são construídos sobre os rejeitos previamente depositados, utilizando-se equipamentos mecânicos específicos até atingir a altura final projetada da pilha.

Esse método, porém, não deve ser aplicado em rejeitos finos (lamas), pois estes não apresentam as características geotécnicas adequadas. Nesse caso, torna-se necessária a construção de outra estrutura para receber os finos, consistindo assim em uma desvantagem do método (PORTES, 2013).

A principal diferença entre pilhas e uma barragem de contenção de rejeitos é que as pilhas, através da utilização de um sistema eficiente de drenagem interna e de fundo, inibem o acúmulo de água no interior da estrutura. A estrutura deve possuir extravasores e sistemas de captação de água que permitam a remoção rápida de água acumulada em períodos chuvosos (GOMES, 2009).

4.7 REJEITOS COMO MATÉRIA-PRIMA

Além das técnicas alternativas para dispor os rejeitos, o uso dos mesmos como matéria-prima em outros processos produtivos também vem sendo estudada como forma de minimizar o passivo ambiental da indústria mineral.

Toffolo *et.al* (2014) concluíram que a utilização do rejeito do minério de ferro em substituição do agregado natural na produção de blocos de concreto para pavimentação é uma alternativa viável.

Como demonstrado no trabalho de Bastos (2013), os rejeitos do minério de ferro também podem ser utilizados como material de infraestrutura rodoviária, desde que apresente estabilidade química e granulométrica.

Uma outra aplicação é o uso dos rejeitos na fabricação de cerâmicas vermelhas, como estudado por Nociti (2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o estudo realizado, observou-se que:

A principal forma de descarte do rejeito do minério de ferro é em barragens de contenção. Os alteamentos da barragem geralmente são feitos utilizando o próprio rejeito como material de construção, assim apresenta menores custos quando comparado aos alteamentos construídos a partir de material de empréstimo, porém uma atenção maior deve ser dada aos parâmetros geotécnicos do projeto. As barragens de contenção que utilizam rejeitos como material de construção podem ser construídas pelo método de montante, de jusante ou de linha de centro.

As barragens de rejeito são estruturas passíveis de ruptura e, mesmo com o desenvolvimento tecnológico e aumento de investimento em dispositivos para controle de sua estabilidade, inúmeras falhas vêm ocorrendo no mundo todo, com consequências catastróficas.

A necessidade de lavrar minérios de ferro com teores cada vez mais baixos eleva a quantidade de rejeito produzido, conseqüentemente, demanda barragens de rejeitos com dimensões maiores que se tornam mais passíveis de rupturas.

Com o intuito de tornar a disposição de rejeitos mais segura, do ponto de vista social e ambiental, metodologias alternativas estão sendo desenvolvidas. O Quadro 1 apresenta as vantagens e desvantagens dessas metodologias.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens das metodologias alternativas de disposição de rejeitos

MÉTODO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Rejeitos espessados	- Apresentam alta porcentagem de sólidos; - Permite maior recuperação de água na usina; - Podem ser depositados em locais planos ou em vales; - São menos passíveis de rupturas quando comparadas às barragens de rejeitos.	Não identificada
Filtragem de rejeitos	- Permite obter um material com baixo teor de umidade; - Pode ser depositado em pilhas ou camadas, não necessitando de nenhum tipo de estrutura de contenção; - Forma estruturas altamente seguras; - Podem ser utilizados os mesmos filtros do processo de beneficiamento;	Demanda altos investimentos nas operações de desaguamento e transporte.

Filtragem de rejeitos	- Os rejeitos filtrados possuem volume menor, assim requerem áreas menores para disposição.	
Disposição do rejeito em cavas exauridas	- Método simples e econômico; - Não requer nova área para descarte do material; - Não necessita de estruturas de contenção; - Reduz o custo de recuperação da área no final do projeto.	Não identificada
Disposição e codisposição de rejeitos e estéréis	- Permite descartar rejeitos e estéréis ou uma mistura de rejeitos de granulometrias diferentes em um mesmo local; - Permite utilizar uma área menor para descarte desses materiais,	Deve-se atentar aos parâmetros de estabilidade da estrutura, uma vez que rejeitos e estéréis possuem propriedades diferentes.
Disposição subaérea	- Permite o adensamento e ressecamento do material antes do lançamento da próxima camada de rejeitos; - Material mais denso e resistente; - Baixo custo e simplicidade de operação.	Necessária a existência de pelo menos dois reservatórios.
Empilhamento drenado	- Não acumula água no interior do reservatório; - Utiliza sistemas de drenagem interna.	Não deve ser aplicado para rejeitos finos, pois estes possuem propriedades geotécnicas diferentes.

Fonte: O autor (2019).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de rejeitos é imprescindível ao processo de beneficiamento de minérios, e a principal forma de descarte desse material é em barragens de contenção, entretanto, essas estruturas são passíveis de ruptura. A lavra de minérios de ferro de baixo teor elevou significativamente a quantidade de rejeitos produzidos. Assim, cuidado especial deve ser dado à forma de disposição e descarte desse material, de forma a atender satisfatoriamente aos requisitos econômicos, de segurança e ambientais.

Este trabalho apresentou as principais técnicas alternativas para disposição dos rejeitos do minério de ferro, que podem substituir as atuais barragens de rejeitos. Com o intuito de embasar o leitor com os conceitos sobre o tema, por meio de uma pesquisa bibliográfica, foram apresentadas as técnicas convencionais de disposição de rejeitos, os riscos associados e, por fim, as metodologias alternativas de disposição de rejeitos.

Como abordado nos resultados da pesquisa, inúmeros acidentes com barragens de rejeitos têm acontecido no mundo todo e, por este motivo, técnicas alternativas estão sendo desenvolvidas. Vários autores mostraram a viabilidade de aplicação dessas técnicas.

Diante desse cenário, é de extrema importância que a indústria mineral conheça as características do rejeito para que possa estabelecer a melhor forma de tratá-lo pois, dependendo de seus teores, o rejeito pode ser reprocessado e descartado de forma econômica e ambientalmente segura. Além disso, as empresas mineradoras devem prezar principalmente pela segurança das operações, pois, se por um lado as técnicas alternativas são mais caras que as convencionais barragens de rejeitos, por outro, estas são mais seguras do ponto de vista social e ambiental.

Portanto, a tendência é que cada vez menos barragens de rejeitos sejam construídas, sendo gradativamente substituídas por técnicas mais seguras.

7. REFERÊNCIAS

ALEVAN, G. M.; PIRES, A. C. G.; RIBEIRO, L. F. M. **Análise das possibilidades de depósito de estéréis e rejeitos de mineração:** as vantagens da codisposição e da disposição compartilhada. 2016. 10º Simpósio Nacional de Qualidade Ambiental – Regulamentação Ambiental, Desenvolvimento e Inovação, Porto Alegre.

BASTOS, Lucas Augusto de Castro. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria-prima para infraestrutura rodoviária.** 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola De Minas, Ouro Preto.

BOWKER, Lindsay Newland; CHAMBERS, David M. **In the dark shadow of the supercycle tailings, failure risk & public liability reach all-time highs.** MDPI, 2017.

CHAMBERS, David M. **Long term risk of releasing potentially acid producing waste due to tailings dam failure.** 2012. 9 th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Ottawa ON, Canada.

FIGUEIREDO, Marcelo Marques. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a Mineração Casa de Pedra – Congonhas/Mg.** 2007. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola De Minas, Ouro Preto,

GALBIATTI, Henry Francisco. **Ruptura oblíqua condicionada por falha transcorrente na cava a céu aberto da Mina do Cauê, Itabira, Mg.** 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola De Minas, Ouro Preto.

GOMES, Márcio Fernando Mansur. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subprodutos da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro.** 2009. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola De Minas, Ouro Preto.

GUIMARÃES, Nilton Caixeta. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** 2011. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares.** 2019. Disponível em:
< <https://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectares> >. Acesso em: 29 abril 2019.

ICOLD, International Commission on Large Dams. **Tailings dams' risk of dangerous occurrences - Lessons learnt from practical experiences.** Bulletin 121, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração.** 2016. Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. Brasília: IBRAM.

LIMA, Luciana de Moraes Kelly. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo.** 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo. **Seleção de Locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica.** 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, São Paulo.

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

MILONAS, Joice Gonçalves. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro em aterro hidráulico.** 2006. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Brasília.

NOCITI, Denyse Meirelles. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas.** 2011. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá.

NORONHA, Ligia. **Mine Tailings Storage: safety is no accident**. 2017. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal.

PEIXOTO, Cláudio Lineu Pereira. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. 2012. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Ouro Preto.

PEREIRA, Eleonardo Lucas. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto.

PORTES, Andréa Míriam Costa. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Belo Horizonte.

PRESOTTI, Ednelson da Silva. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 2002. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Ouro Preto.

SILVA, Raika Katiuscia Alves. **Co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava exaurida**. 2014. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Ouro Preto.

TOFFOLO, R. V. M.; FILHO, J. N. S.; BATISTA, J. O. S.; SILVA, S. N.; CURY, A. A.; PEIXOTO, R. A. F. **Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro**. 2014. 56º Congresso Brasileiro de Concreto, Natal - Rio Grande do Norte – Brasil.

UNEP, United Nations Environment Programme. **Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident**. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal. 2017.

WISE. World Information Service on Energy and Uranium- Project. **Chronology of major tailings dam failures**. 2019.