



ANÁLISE DAS POSSIBILIDADES DE DEPÓSITO DE ESTÉREIS E REJEITOS DE MINERAÇÃO: AS VANTAGENS DA CODISPOSIÇÃO E DA DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA.

Giovanna Monique Alelvan – giovannaalelvan@hotmail.com
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia
Campus Universitário Darcy Ribeiro,
70910-900 – Brasília – DF

Ana Carolina Gonzaga Pires – carolina.gonzaga20@gmail.com
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Luis Fernando Martins Ribeiro – martins.luisf@gmail.com
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Resumo: *Esse artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre das possibilidade de depósito de estéreis e rejeitos oriundos de atividades de mineração. Os estéreis e os rejeitos são materiais sem fins econômicos na comercialização do minério. Entretanto, estes materiais devem ser devidamente depositados a fim de não causar impactos ambientais, tais como: contaminação no nível freático. A disposição destes materiais de mineração pode ser realizada de forma subterrânea, subaquática ou a céu aberto, sendo essa última enfoque deste trabalho. A disposição a céu aberto pode ser: aterro hidráulico, deposição do rejeito em pasta e codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis. Ainda neste artigo, serão apresentados casos de obra que utilizam os métodos construtivos descritos.*

Palavras-chave: *Mineração, Rejeitos, Estéreis, Codisposição, Disposição Compartilhada.*



ANÁLISE DAS POSSIBILIDADES DE DEPÓSITO DE ESTÉREIS E REJEITOS DE MINERAÇÃO: AS VANTAGENS DA CODISPOSIÇÃO E DA DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA.

Giovanna Monique Aelvan – giovannaaelvan@hotmail.com
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia
Campus Universitário Darcy Ribeiro,
70910-900 – Brasília – DF

Ana Carolina Gonzaga Pires – carolina.gonzaga20@gmail.com
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Luis Fernando Martins Ribeiro – martins.luisf@gmail.com
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Resumo: *Esse artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre das possibilidade de depósito de estéreis e rejeitos oriundos de atividades de mineração. Os estéreis e os rejeitos são materiais sem fins econômicos na comercialização do minério. Entretanto, estes materiais devem ser devidamente depositados a fim de não causar impactos ambientais, tais como: contaminação no nível freático. A disposição destes materiais de mineração pode ser realizada de forma subterrânea, subaquática ou a céu aberto, sendo essa última enfoque deste trabalho. A disposição a céu aberto pode ser: aterro hidráulico, deposição do rejeito em pasta e codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis. Ainda neste artigo, serão apresentados casos de obra que utilizam os métodos construtivos descritos.*

Palavras-chave: *Mineração, Rejeitos, Estéreis, Codisposição, Disposição Compartilhada.*

Abstract: *This article presents a bibliographic review concerning the sterile deposit possibilities and waste arising from mining activities. The sterile and waste are no economic purpose materials marketing in the ore. However, these materials must be properly disposed so as not to provide environmental impacts such as contamination in the water table. The arrangement of these mining materials can be carried out underground, underwater, or in the open form, which the last item focus this paper. The arrangement in the open which can be: hydraulic landfill disposal of the waste paste and codisposal and shared tailings disposal and sterile. Also in this article, will be presented cases of work that use the construction methods described.*

Keywords: *Mining, Waste, Sterile, Codisposal, Shared tailings. Environmental.*

1. INTRODUÇÃO

As atividades de mineração estão relacionadas à extração e ao beneficiamento de bens minerais para fins econômicos. Durante esses processos, além das modificações no meio ambiente, são gerados dois tipos de resíduos com origens e características distintas, denominados de estéreis e de rejeitos.

Define-se estéril como sendo um agregado natural composto por um ou mais minerais, o qual se apresenta na lavra do minério e que não possui valor econômico. Ele pode existir na forma de camadas entre o minério ou em afloramentos. E, independentemente do aspecto, deve ser retirado para possibilitar a lavra do minério.



A origem do estéril não é bem definida, podendo ser oriunda de processos de decomposição de rochas sãs e encaixante ou da sedimentação de materiais diversos. Sua composição também varia entre solo, rocha ou uma mistura desses materiais.

Os rejeitos, por sua vez, são materiais oriundos do processo de beneficiamento do minério que são rejeitados economicamente. Devido à ausência de valor comercial, os rejeitos e os estéreis são destinados a um depósito permanente, geralmente em áreas onde os trabalhos de mineração já se encerraram como em cavas e minas esgotadas.

Os estéreis, usualmente, são armazenados em pilhas próximas à lavra, de forma a minimizar a distância de transporte, as quais são denominadas ‘pilhas de estéril’ (PDE).

A atividade de beneficiamento utiliza grande quantidade de água para a separação do material de interesse dos demais. Dessa forma, o rejeito apresenta-se em forma de polpa, sendo então comumente armazenado em barragens de terra e/ou bacias de rejeito.

Contudo, devido às restrições ambientais cada vez mais rigorosas, formas alternativas de disposição desses materiais têm sido estudadas para que o impacto no meio ambiente seja minorado.

Para os rejeitos tem-se investigado metodologias como disposição dos rejeitos granulares na forma de aterro hidráulico, disposição dos rejeitos desaguados e ainda, a codisposição ou disposição compartilhada com estéreis.

A partir dessas informações preliminares, esse artigo abordará as possibilidades de disposição, bem como alguns estudos de casos presentes na literatura para depósito de estéril e rejeito.

2. METODOLOGIAS ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS E ESTÉREIS

A clara necessidade de reduzir os espaços ocupados pelos depósitos dos resíduos da mineração, impulsiona estudos de alternativas que, claramente, possuem vantagens sobre as metodologias convencionais.

Além dos fatores ambientais, as metodologias não convencionais tendem a utilizar os próprios materiais para construção de estruturas de contenção, de modo a ocupar e perturbar a menor área possível.

Diante das variáveis que dominam as características dos rejeitos, é importante saber que as formas de disposição dos rejeitos dependerão de suas propriedades geotécnicas. A forma de disposição dos rejeitos é relacionada ao tipo de minério e ao processo empregado para o seu beneficiamento (Figueiredo, 2007).

A disposição de rejeitos e estéreis de mineração pode ser feita de forma subterrânea, subaquática ou a céu aberto. Neste trabalho serão abordados os aspectos construtivos referentes à disposição a céu aberto que pode ser: aterro hidráulico, deposição do rejeito em pasta e codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e de estéreis.

2.1. Aterro Hidráulico

O aterro hidráulico é formado pelo processo de hidromecanização, de forma que o próprio rejeito seja utilizado como material de construção (Portes, 2013). Segundo Moretti & Cruz (1996) *apud* Figueiredo (2007), à técnica de hidromecanização relacionam-se as atividades de transporte e deposição de rejeitos sólidos utilizando água ou outro fluido.

Esta metodologia é uma excelente alternativa principalmente para construção de barragens de rejeitos de mineração, uma vez que o custo de implantação é reduzido quando comparado ao método convencional.

Para a construção do barramento utilizando a técnica de aterro hidráulico, deve ser feito inicialmente um dique de partida, constituído de solo ou enrocamento, o qual tem função de conter os primeiros rejeitos lançados hidráulicamente.

A construção da barragem de rejeito pode ser feita em uma única ou em várias etapas. Os



métodos construtivos realizados em várias etapas podem ser de jusante, de montante ou de linha de centro. Dentre estes métodos de construção o método de montante é considerado o mais simples e econômico.

Neste método, o rejeito é lançado a montante da crista por meio de canhões ou hidrociclones em um único ponto de descarga. Portanto, seu comportamento está diretamente relacionado a competência da fundação e dissipação das poropressões (Vector, 2002).

No método de jusante, por sua vez, a barragem não é alteada sobre o rejeito previamente depositado, isto é, existe uma previsão de compactação e controle de percolação. No caso do método de linha de centro, o alteamento da crista segue na vertical e não para a jusante (Ribeiro, 2000).

A técnica de aterro hidráulico por meio de ciclones proporciona uma segregação hidráulica, de forma que ocorre uma separação das partículas de acordo com seu peso. Assim, próximo ao ponto de descarga é formada uma zona de alta permeabilidade constituída de material granular e em pontos distante da descarga é formada uma zona de baixa permeabilidade (material fino). Uma zona de permeabilidade intermediária é formada entre as duas zonas supracitadas (Portes, 2013).

2.2. Rejeitos Desaguados ou em Pasta

Após o processo de beneficiamento, o produto gerado, chamado de rejeito, pode apresentar diferentes estados físicos de acordo com o processo de desaguamento aplicado.

A retirada de água é feita para se obter um material com maior teor de sólidos, e assim obter-se o aumento da resistência.

Segundo Gomes (2006), os rejeitos são vistos de uma forma geral como polpa. Contudo, incorporam-se outros conceitos, como: espessados, em pasta, filtrados a úmido e filtrados a seco. Diversos autores como Osório (2005) apresentaram outras classificações.

Sugerindo-se uma maior recuperação da água utilizada no processo de beneficiamento, Robinsky (1968) *apud* Robinsky (2002) introduz a técnica de disposição de rejeitos espessados ou em pasta. Os autores referem-se ainda, que esta técnica possibilita maior controle tecnológico que as barragens convencionais e os aterros hidráulicos.

A disposição em forma de pasta pode ser feita superficialmente ou em minas subterrâneas. O primeiro caso é viável em caso de minas a céu aberto, para que haja uma minoração das áreas para depósito em superfície.

Já nas minas subterrâneas, a viabilidade relaciona-se à necessidade de preenchimento para manutenção da estabilidade do maciço ou para formação de um piso que possibilitará o desmonte de fatias de minério acima da área lavrada. Nesse último caso, as condições de resistência da pasta são de deveras importância, sendo assim, aditivos podem ser adicionados ao material, como: estéril, areia e/ou cimento.

Segundo Alves (2009), a introdução de cimento *Portland* traz melhorias na permeabilidade, no adensamento e na resistência ao cisalhamento, uma vez que melhora a coesão e o ângulo de atrito. Esse método apresenta diversas vantagens, tanto relacionadas às características físicas do produto, quanto ao operacional da sua disposição.

Pode-se ressaltar como vantagens físicas a baixa quantidade de água que é incorporada, gerando assim uma baixa permeabilidade que reduz o volume percolado e restringe a infiltração (Figueiredo, 2007). Já as características operacionais propiciam rejeitos com maior densidade, menor potencial de liquefação, menor susceptibilidade de contaminação de águas subterrâneas, entre outros.

A desvantagem do método relaciona-se primordialmente aos custos operacionais, uma vez que é determinante para o sucesso do método que a infraestrutura seja eficiente.

Sendo assim, o custo de instalação de bombas de deslocamento e tubulações de transporte pode chegar a ser o dobro da disposição do rejeito de forma convencional.



Entretanto, em casos onde a topografia é desfavorável para construção de uma barragem tradicional e há notória necessidade de recuperação da água incorporada, o método de disposição em pasta é uma excelente alternativa também do ponto de vista econômico.

2.3. Codisposição e Disposição Compartilhada de Rejeitos e Estéreis

Desde o final da década de 1970 foi proposto que essa disposição seja feita de forma compartilhada pelos rejeitos e estéreis de variadas granulometrias, seja na superfície ou subterraneamente. Surge então a ideia de dois conceitos distintos: codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis. No primeiro, os materiais são previamente misturados, ao contrário do segundo, que essa etapa não ocorre, já que eles apenas são depositados no mesmo local.

Deve-se ressaltar que esse método não faz referência apenas a misturas de rejeitos e estéreis. Pode ser feito também para diferentes granulometrias de rejeitos, que por vezes possuem características geotécnicas distintas.

Um exemplo são os rejeitos granulares que há tempos possuem aplicações em obras ferroviárias atuando no lastro. Os rejeitos finos, contudo, necessitam de um alto investimento para desaguamento.

Sendo assim, uma boa alternativa é a codisposição, já que gera-se uma mistura com características geotécnicas superiores a dos materiais isoladamente. Isso ocorre uma vez que os rejeitos finos ocupam os vazios dos granulares, possibilitando uma redução da permeabilidade.

No caso de resíduos de carvão, William *et. al.* (1992) apresentaram resultados para misturas de rejeitos finos e granulares codispostos em superfície. Para os autores, apesar dos problemas de segregação das partículas e o alto custo para realizar a mistura, o método torna-se vantajoso por seus benefícios, como: aumento da estabilidade, da trafegabilidade, do grau de saturação e redução do volume total disposto, da drenagem ácida e dos custos totais.

Ainda para resíduos de carvão, Indraratna (1994) *apud* Alves (2009) ressalta que a codisposição de rejeitos origina um material com baixo peso específico, e assim, proporciona fácil manejo com equipamentos convencionais. Outros autores também destacaram as vantagens dessas técnicas, como Martin *et al.* (2002), que realça a existência de uma notória melhoria nas condições de resistência e drenagem.

Vector (2002) *apud* Alves (2009) apresenta três metodologias para disposição compartilhada e uma para codisposição. O primeiro caso de disposição compartilhada refere-se a uma pilha de estéril que recebe pequenas lagoas de rejeito em pasta contidas por diques do próprio material granular. O autor recomenda que as lagoas estejam separadas por quatro vezes da sua altura.

A segunda proposta é a injeção de rejeitos em pasta através de tubos inclinados ou verticais em pilhas de estéreis. Ressalta-se que esses rejeitos já devem ter sido desaguados e espessados.

O terceiro método trata da execução de camadas alternadas de rejeito e estéreis, obedecendo ao processo de secagem do primeiro. Mais uma vez, as condições de estabilidade devem ser minuciosamente verificadas. Isto porque nas regiões de encontro entre os diferentes materiais localiza-se as zonas de fraqueza.

O último caso é de codisposição em que o autor sugere que os rejeitos sejam lançados pelo topo do depósito de estéril, formando uma pilha. Contudo, deve-se atentar para as condições de estabilidade da estrutura, principalmente a inclinação dos taludes.

Com relação aos ensaios, recomenda-se ensaiar cada material isoladamente e posteriormente fazer testes de dosagem para concluir qual deles apresenta melhor desempenho. As características que devem ser notadas durante os ensaios de dosagem são melhorias nas condições de resistência e drenagem, recuperação de água e reabilitação de áreas utilizadas para disposição. Leduc & Smith (2003) sugere a execução dos ensaios: resistência ao cisalhamento, granulometria, permeabilidade dos rejeitos, compressão simples e análise química do material.



3. ESTUDO DE CASOS E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

3.1. Mineração Casa de Pedra

De acordo com o trabalho desenvolvido por Figueredo (2007), cujo objeto de estudo consistiu na concepção da Mineração da Casa de Pedra, propriedade da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, pode-se realizar uma análise quanto ao mecanismo de deposição empregado pela mineradora para compor o estudo de caso proposto. A mina está localizada a 10 quilômetros do município de Congonhas, no estado de Minas Gerais. Nesse local é feita a atividade de lavra, beneficiamento e embarque do minério de ferro.

A mineradora apresentava planos de expansão do empreendimento e assim projetou duas barragens de rejeito para atender as necessidades do beneficiamento. Porém, essas estruturas ocupariam grandes áreas. Dessa forma, era interessante realizar um estudo de alternativas para disposição dos rejeitos gerados. Figueiredo (2007) realizou um estudo de três alternativas para essa mina, sendo elas: aterro hidráulico, disposição dos rejeitos desaguados ou em pasta e codisposição de rejeitos e estéreis em superfície.

3.3.1 Caracterização geotécnica dos rejeitos e estéreis

Sabendo-se da essencial importância do conhecimento do comportamento geotécnico dos materiais, Figueiredo (2007) realizou ensaios de caracterização dos rejeitos e estéreis. O autor analisou os rejeitos oriundos do processo de ciclonagem secundária e de flotação. O primeiro foi classificado como um material silto-argiloso e o segundo como silto-arenoso, mostrando a granulometria mais grosseira dos materiais na praia de rejeito.

Compostos primordialmente por partículas de quartzo e hematita, os rejeitos de minério de ferro obtiveram densidades dos grãos médias de 3,65 e 3,31 para os advindos dos processos de ciclonagem e flotação, respectivamente.

No trabalho apresentado por Figueiredo (2007) foram desenvolvidos diversos outros ensaios de caracterização que permitiram analisar a viabilidade das alternativas para disposição desses rejeitos da Mineração Casa de Pedra.

3.3.1 Disposição dos rejeitos granulares na forma de aterro hidráulico

A aplicabilidade da disposição de rejeitos na forma de aterro hidráulico está diretamente ligada à granulometria do material e ao seu potencial de liquefação. Sendo assim, materiais com natureza granular são ditos como próprios para a técnica, pois podem ser usados para a construção do próprio barramento ou para conformação de pilhas de rejeito. Ressaltando-se apenas a necessidade de se fazer estudos estruturais, da densidade e do estado de tensões *in situ*.

Figueiredo (2007) concluiu que a lama oriunda do processo de flotação é adequada devido às suas partículas mais grosseira. O que não é o caso da lama da ciclonagem secundária que apresenta-se com granulometria mais fina. Sendo assim, o autor recomendou a adoção da técnica, mas ressalta que o terreno de fundação deve ser preparado sem dispensar o constante controle sobre essas obras.

3.3.2 Disposição de rejeitos desaguados e/ou em pasta

Ainda de acordo com as metodologias apresentadas pelo autor, apenas os rejeitos do processo de ciclonagem mostraram-se viáveis para serem dispostos na forma de rejeitos espessados e/ou em pasta. Isso acontece devido a sua granulometria mais fina, a boa resposta aos ensaios de viscosidade, *slump* e fume. No teste de *slump* observou-se que, a medida que aumentava a concentração da pasta,



menores alturas eram obtidas. O experimento evidenciou também um bom comportamento da faixa de concentração entre 60 a 65% para os rejeitos do processo de ciclonagem, o que gera baixas tensões de escoamento e, portanto, uma facilidade no transporte da pasta que reduz custos da operação.

Já o teste de fume apresentou elevados valores de ângulos de repouso o que faz com que as pilhas e as praias de rejeito possuam taludes mais abatidos, ocupando menores áreas para a disposição final dos rejeitos.

3.1.3 Codisposição de rejeitos e estéreis em superfície

Apesar dos estudos de caracterização e outros ensaios realizados por Figueredo (2014), o autor não recomenda a utilização da técnica de codisposição em superfície, uma vez que, devido às poucas metodologias presentes, não foi possível afirmar a viabilidade para o caso do rejeito da Mineração Casa de Pedra.

3.2. Mina do Cauê

Segundo a pesquisa desenvolvida por Alves (2009), a Cava da Mina do Cauê localiza-se no município de Itabira em Minas Gerais, sendo uma das cavas do Complexo Minerador de Itabira, explorada pela Empresa Vale. Este complexo é constituído por um conjunto de cavas de mineração onde são executadas as operações de lavra a céu aberto com a escavação de materiais estéreis (solos e rochas encaixantes) e extração de minérios de ferro.

A descrição geológica do local indica que a região é composta principalmente por solos coluvionares e depósitos de canga, e atualmente está restrito às ocorrências no entorno da cava. O relevo da região apresenta-se bastante acidentado e montanhoso, tendo como feição mais relevante a Serra de Itabirucu.

No processo de beneficiamento do material extraído da mina resulta a produção de um concentrado de minério de ferro (hematita e itabirito), cuja produção total entre os anos de 1924 e 2004 foi de aproximadamente 2000 milhões de toneladas. Além do minério de ferro, são gerados os rejeitos e as lamas que são descartados na forma de polpa (sólidos + água) com um teor de sólidos de 50 a 55%. Esses materiais foram devidamente depositados na cava exaurida da mina, bem como, o estéril gerado durante a escavação da mina.

Diversos estudos foram realizados para avaliar as alternativas de disposição do estéril e os rejeitos. Conclui-se que a melhor opção foi depositar o estéril no lado oeste e os rejeitos na porção leste, onde a base da mina atingiu cotas mais baixas.

A disposição de estéril foi concomitante à disposição de rejeitos, de forma que a pilha foi contrapilhada pelo rejeito sedimentado gradualmente ao enchimento da cava. Esta distribuição foi assumida considerando o fato de que é mais fácil depositar o estéril na parte mais elevada da mina (Aba Oeste), reduzindo-se a distância de transporte, e a parte baixa (Aba Leste) é mais favorável para acumulação de rejeitos e água e, também, mais próxima da usina, tanto para receber os rejeitos como para bombear a água recirculada, apesar da maior diferença de cota (Alves, 2009).

Estudos do sistema de disposição compartilhada de estéril e rejeitos começaram a ser desenvolvidos inicialmente pela Geoconsultoria e ECAD. Neste projeto considerou-se a altura final da pilha de estéril (175 m) posicionada na cota de elevação 945 m e a altura final da camada de rejeito (160 m) posicionado na cota de elevação 870 m.

Posteriormente, foram elaborados projetos com a finalidade de elevar a cota de alteamento da Pilha de Disposição de Estéril (PDE) na Aba Oeste e aumentar a altura final da pilha de rejeito. SPEC (2004) realizou o projeto executivo ampliando a Pilha de Disposição de Estéril (PDE) da cota de elevação 825m à cota de elevação 945m, mantendo a altura final da pilha de estéril com 175m e aumentando a altura final da camada de rejeito para 170m.



RDIZ (2008) realizou estudos de estabilidade que tiveram como objetivo subsidiar o projeto de alteamento da PDE - Aba Oeste para a cota de elevação 1100m, aumentando a altura final da pilha de estéril para 330m e mantendo a altura final da camada de rejeito em 170m.

3.2.1. Caracterização geotécnica do material de rejeito

Os estudos de caracterização das amostras de rejeitos tinham como finalidade estudar especialmente as características de adensamento por meio de ensaios de laboratório para parâmetros necessários na simulação do enchimento da cava através de modelo numérico.

Para tanto, foram coletadas três amostras junto às instalações de clonagem no reservatório da Barragem do Pontal, sendo elas: amostra de rejeitos totais, *underflow* e *overflow* (Alves, 2009). Foram realizados ensaios de granulométrica, densidade dos grãos e índice de vazios máximo e mínimo.

As curvas granulométricas desses materiais mostraram que as amostras de *overflow* são constituídas, em sua maioria, de material fino. As amostras de rejeitos totais e *underflow*, por sua vez, são compostos de materiais mais grosseiros.

Para a determinação das características de compressibilidade e permeabilidade foram realizados ensaios edométricos como o objetivo de definir as relações tensão efetiva x índice de vazios e coeficiente de permeabilidade x índice de vazios, as quais serviram de base para a simulação do adensamento dos rejeitos na cava.

No estudo de adensamento dos rejeitos na Cava da Mina do Cauê utilizou-se o Programa de Adensamento com Deformações Finitas (ADF), o qual considera o adensamento unidimensional (vertical) dos rejeitos, com base na teoria das deformações finitas, a partir das propriedades de compressibilidade, permeabilidade e das curvas cota x volume e cota x área do reservatório.

De acordo com os resultados obtidos, observou-se que a variação do índice de vazios com a profundidade não é significativa para cerca de 170 m de espessura de rejeitos, pois o material é pouco compressível e, desta forma, a parcela de água que será expulsa pelo adensamento é pequena em comparação com a vazão de água liberada no processo de sedimentação (Geoconsultoria, 2002).

Além disso, pode-se perceber que ao final dos treze anos de alteamento ainda existirá excesso de poropressões a ser dissipado, o que corresponde numa diminuição da espessura da camada.

3.2.1 Caracterização geotécnica do material de estéril

Para os estudos de caracterização do estéril, Alves (2009) coletou amostras de diversas pilhas de disposição de estéril do Complexo Minerador de Itabira, devido à variabilidade e heterogeneidade dos materiais constituintes.

Para tanto, foram executados 21 furos de sondagens rotativas com recuperação de testemunho (penetrando 15m nas fundações) e 24 furos de sondagens rotativas sem recuperação de testemunho. O objetivo destes furos é a instalação de piezômetros, numa profundidade de 5m abaixo da interface da pilha com a fundação, e de medidores de nível de água, respectivamente.

Desta forma, este autor realizou ensaios de permeabilidade em campo para monitorar as condições de fluxo de água das pilhas com a fundação. Pode-se observar que os coeficientes de permeabilidade nas pilhas estão distribuídos numa faixa de 10^{-8} a 10^{-6} m/s, e que o nível de água nas fundações tende a ascender na pilha e situar-se abaixo do nível de água nas pilhas.

Além disso, foram executados 25 poços nas pilhas para coleta de amostras indeformadas para a realização dos ensaios de compressão triaxial adensado isotropicamente não-drenado saturado. Os resultados indicaram ângulos de atrito na faixa de 27° a 33° e coesões da ordem de 0 a 30 kPa.



Os ensaios de caracterização mostraram que as PDEs do Complexo Minerador de Itabira são compostas, em geral, por solos finos (siltes e argila) com baixa plasticidade.

3.2.2. Análise do sistema de disposição compartilhada na cava da Mina Cauê

No trabalho desenvolvido por Alves (2009), o qual visava a análise de estabilidade de taludes associados à disposição compartilhada de estéril e rejeito na Cava da Mina do Cauê, foram realizados estudos de estabilidade e tensão–deformação. Consideraram os efeitos do alteamento da PDE - Aba Oeste concomitante ao lançamento de estéril (nova PDE) sobre os rejeitos depositados na cava, desde a cota 1.100m até sua conformação final.

Desta forma, os estudos de estabilidade foram realizados com base no projeto executivo SPEC (2004) e RDIZ (2008), analisados em dois cenários: o primeiro sendo o lançamento só de estéril, considerou uma condição de operação, ou seja, com geração de acréscimos de poropressão durante todo o alteamento; e o segundo lançamento de enrocamento e estéril, considerou-se a pilha de estéril primeiro numa condição em que não há mais geração de acréscimos de poropressão e depois numa condição de operação, com geração de acréscimos de poropressão durante todo o alteamento.

As análises de tensão-deformação também foram realizadas em dois cenários, sendo que a diferença entre eles está no zoneamento do módulo de elasticidade do rejeito. No primeiro caso o módulo de elasticidade é constante ao longo de todo o depósito de rejeito, enquanto que no segundo caso, o módulo de elasticidade é diferente em três zonas definidas por Alves (2009).

Os alteamentos dos materiais foram divididos em quatro camadas, de modo que fosse lançado inicialmente uma camada mais fina de 5m e o restante (225m) em três camadas de 75m.

Os resultados apresentados mostraram que o alteamento da nova Pilha de Disposição de Estéril provoca um efeito estabilizante na PDE – Estéril Projetado, aumentando seu fator de segurança e diminuindo sua probabilidade de falha, o que acarreta numa estrutura mais estável e segura.

Além disso, como não houve diferenças significativas quando se analisa a estabilidade da nova PDE; caso seja conveniente, pode-se adotar o enrocamento, não como uma camada de 5m, mas como uma espinha de peixe, funcionando neste caso como dreno e controlando a geração de poropressão.

Caso o lançamento de estéril precise ser paralisado e/ou interrompido permanentemente a partir da segunda camada, a estrutura atende ao critério de fechamento e/ou desativação, mesmo apresentando geração de acréscimos de poropressão.

3.3. Mina Capim I

No trabalho desenvolvido por Silva (2014) é apresentado as concepções e premissas do projeto de codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis gerados pelo beneficiamento de caulim na Mina Capim I. A Mina Capim I, de propriedade da Pará Pigmentos S. A., localiza-se no município de Ipixuna do Pará, no estado do Pará, e explora caulim desde 1995.

A autora realizou análises de estabilidade e de percolação do conjunto de pilha de estéreis sobre rejeitos, além de análises sobre os indícios de ocorrência do processo de liquefação desses últimos através de ensaios de laboratório.

Caulim é um material rochoso composto por silicatos hidratados de alumínio e impurezas como areia, quartzo, palhetas de mica, grãos de feldspato, óxido de ferro e titânio. O Brasil é um dos quatro países que possui reservas de caulim e detendo 28% de toda a quantidade mundial, perdendo apenas para os Estados Unidos. A Mina Capim I, por sua vez, é responsável por 21,83% da produção nacional, e tem como destino indústria de papel e cimento (DNPM, 2012).



As operações na lavra são realizadas no município de Ipixuna, e em seguida o material é transportado até a cidade de Barcarena, também no estado do Pará, para expedição no porto.

Hidrologicamente, a Mina Capim I pertence a Bacia Hidrográfica do Rio Guamá-Capim, a qual possui aquífero livre e confinado. A geologia local possui os seguintes horizontes do topo para a base: latossolos amarelos, sedimentos argilosos e argilo-arenosos, arenito avermelhado, caulim duro, intermediário e caulim macio. Até a chegada no caulim tem-se 20 metros de perfil.

3.3.1 Caracterização geotécnica dos rejeitos

Silva (2014) realizou diversos ensaios de caracterização nos resíduos de mineração da Mina Capim I, pautando-se nos conceitos da Mecânica dos Solos tradicional. Contudo, deve-se ressaltar que os rejeitos e estéreis não apresentam características do material natural.

No caso dos rejeitos a autora procurou analisar o potencial para processos de liquefação, pois os depósitos desses materiais apresentam-se granulares, saturados, com alto índice de vazios e sujeitos a carregamentos estáticos e não drenados.

De acordo com as etapas dos processos de beneficiamento foram ensaiados três tipos de rejeitos: de desarenamento, de centrifugação e da mistura dos dois, os quais representam 86% do total de rejeitos gerados. Essa mistura é depositada na cava ainda em lavra em regime de disposição compartilhada com os estéreis da mina.

Seguindo as normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Silva (2014) realizou ensaios de caracterização, adensamento convencional, cisalhamento direto e compressão triaxial. Para caracterização dos materiais, foram realizadas análise granulométrica, limites de consistência, massa específica real dos grãos e índices de vazios máximos e mínimos. Granulometricamente, para os três tipos de rejeito, a autora obteve os maiores valores nas frações de silte e de areia fina, apesar de conter porcentagens nas outras granulometrias. As umidades médias das amostras foram de 11% para as de desarenamento e de centrifugação e 16% para decomposição. Silva (2014) analisou ainda, o potencial de liquefação das amostras a partir das curvas granulométricas obtidas e concluiu que apenas o rejeito de centrifugação não está susceptível ao fenômeno.

A partir dos ensaios dos limites de consistência, juntamente com os de granulometria, foi possível classificar os rejeitos de acordo com os sistemas convencionais para solo. Sendo assim, as amostras de desarenamento, centrifugação e composição foram classificadas como areia silto-argilosa, silte-areno-argiloso e uma areia silto-argilosa, respectivamente.

Segundo o Sistema Unificado de Classificação, o material foi classificado como SM (areia siltosa) para os rejeitos de desarenamento e de centrifugação e ML (silte de baixa plasticidade) para a composição. Após a análise desses ensaios de caracterização, a autora concluiu que a influência predominante na mistura final são dos rejeitos provenientes da fase de desarenamento.

Silva (2014) realizou o ensaio de cisalhamento direto do tipo lento, adensado e inundado com tensões normais de 150, 400 e 500 kPa. Os resultados mostraram que os três tipos de amostras apresentaram comportamento contrátil de uma areia fofa, ou seja, com redução de volume o que é um forte indicio de tendência à processos de liquefação.

Os ensaios de compressão triaxial, por sua vez, foram do tipo pré-adensado isotropicamente, saturado e com medida de poropressão, com tensões confinantes de 150, 400 e 500 kPa. As curvas das trajetórias das tensões efetivas indicaram que as poropressões eram positivas, o que indicava um comportamento típico de dilatância sob cisalhamento para os três tipos de amostras. Os ângulos de atrito efetivo variaram entre 31° a 35° sendo o maior valor da amostra de composição.



3.3.2 Caracterização geotécnica dos estéreis

Quanto à caracterização geotécnica dos estéreis, Silva (2014) optou por apresentar os resultados dos ensaios de acordo com o processo de formação dos sedimentos, sendo eles Formação Barreira e Formação Ipixuna. Para a Formação Barreira, as amostras foram classificadas como areno-argilosas, com teores de areia variando entre 43 e 58%. Dentre as quatro amostras analisadas, duas foram consideradas argilosas e as demais arenosas. No ensaio de compressão triaxial, as amostras de estéril argiloso obtiveram ângulo de atrito de 33° e coesão de 25kPa. Para os estéreis arenosos os valores foram de 31° e 0° kPa.

As amostras relativas a Formação Ipixuna, que são das unidades inferiores de estéreis, foram coletadas em regiões com predominância de caulim duro, que possuem alto teor de ferro incorporado. Os ensaios de caracterização classificaram os elementos dessa formação como materiais argilo-siltosos com areia, e de acordo com os limites de consistência, como argilas de baixa a média plasticidade. Os ensaios de cisalhamento direto levaram a valores do ângulo de atrito variando entre 27° a 30°, e de coesão entre 25 e 30 kPa. No ensaio de compressão triaxial do tipo adensado, saturado e com medida de poropressão obteve-se o intervalo de 28° a 30° para ângulo de atrito e coesão de 30 a 60 kPa.

3.3.3 Resultados da codisposição e disposição compartilhada

Silva (2014) propôs que a disposição dos rejeitos fosse feita no interior da cava, pelo método da codisposição, acompanhando a frente de lavra exaurida. Com isso, seria possível postergar a construção de uma barragem de rejeito no entorno da mina, situada numa região considerada de importância ambiental. O sistema foi concebido para a disposição dos rejeitos em forma de polpa, com células de 3 metros de altura, em média. O confinamento desse material feito por barragens de 29 metros de altura. Sobre os rejeitos sedimentados, formar-se-ia a pilha de estéreis com altura final de aproximadamente 32 metros.

Foram realizadas, portanto, análises de estabilidade de talude e de percolação na barragem e na pilha de estéril, através do Método de Equilíbrio Limite e do Método dos Elementos Finitos.

As análises para os estéreis foram feitas para os dois tipos de formação e considerou-se a mais crítica dentre elas, uma vez que na realidade, será feita uma mistura das duas formações. Conforme mostrado nas figuras, o modelo considerado apresenta a fundação em arenito caulínico que se apresentava na maior parte da mina, cuja permeabilidade estava entre 10^{-2} a 10^{-3} cm/s. Já para o rejeito, o ensaio de adensamento indicou os valores 10^{-4} a 10^{-6} cm/s.

No projeto da barragem eram previstos solos de capeamento (argilosos-arenosos e areno-argiloso) compactados com energia Proctor-Normal.

Dessa forma, como resultado de percolação, Silva (2014) observou que o material do estéril não tinha influência primária sobre o regime de fluxo global, e sim a fundação permeável. Portanto, a percolação tendia-se a se concentrar nessa região, não mobilizando pressões atípicas; o que favorece as condições de segurança.

Silva (2014) concluiu que esses resultados indicavam que não havia necessidade de se projetar sistemas de drenagem interna entre os rejeitos e a fundação, e também, entre os rejeitos, pilha e a fundação. Exceto da essencial para o projeto da barragem. Para as análises de estabilidade, adotou-se como coeficientes de segurança mínimos iguais a 1,5 para todas as análises.

Para a condição final futura dos anos de 2019 a 2025 nos taludes da barragem, obteve-se fatores de segurança da ordem de 1,975, muito superiores ao valor mínimo. Idem ocorreu com a pilha de estéreis, em análises para ambos os materiais.

Portanto, conclui-se que a codisposição dos rejeitos e a disposição compartilhada de rejeitos e estéreis são viáveis do ponto de vista de estabilidade e também de percolação. Ademais, a autora apenas ressalta a necessidade de mais estudos, variando outros parâmetros, além da contínua observação de mudanças de comportamento do empreendimento.



4. CONCLUSÕES

Conclui-se que os métodos de codisposição e de disposição compartilhada são muito atrativos, no sentido de ocupar menores áreas. Contudo, deve-se verificar essencialmente as condições de estabilidade dessas estruturas de depósito. Uma vez que, a grande variabilidade dos materiais e os processos de segregação podem gerar zonas de fraqueza e levar à ruptura.

Além disso, é possível dispor áreas para a codisposição, sem que isso interfira no avanço da lavra. Para tanto, é necessário estudar a viabilidade, bem como assegurar-se da estabilidade da barragem planejando diversas situações em toda a vida útil do empreendimento, fazer análises para arranjos intermediários e finais e ainda, realização de ensaios e de instrumentação.

É essencial a análise geotécnica dos rejeitos, pois as características químicas e mineralógicas dos rejeitos apresentam consideráveis variações em função da natureza do minério e das especificações dos processos de beneficiamento industrial, incluindo ações afetadas por mudanças nas frentes de lavra.

Vale ressaltar finalmente, a importância de uma análise detalhada quanto aos aspectos ambientais gerados pelo processo de disposição, garantindo a qualidade e eficiência da obra. A falta desse tipo de análise pode acarretar impactos em intensidades ainda maiores ao meio ambiente, de forma que as atividades de recuperação ambiental se tornam extremamente onerosa; não justificando assim a ausência de estudo analítico.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, bem como ao CNPq, pela possibilidade de contribuir no desenvolvimento de pesquisa junto à comunidade acadêmica.

5. REFERÊNCIAS E CITAÇÕES

Alves, A. R. C. (2009). **Disposição Compartilhada de Rejeito e Estéril Gerados no Processo de Extração de Minério de Ferro**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF.

(DNPM, 2012). **Súmaro Mineral 2012**. Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, DNPM. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>. Acesso em: 25 mar 2016.

Figueiredo M. M. (2007). **Estudo de Metodologias Alternativas de Disposição de Rejeitos para Mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG** - Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

Geoconsultoria (2002). **Disposição de Rejeitos na Cava Exaurida da Mina do Cauê – Relatório Técnico**. VL09-RT-01. Itabira, MG, 34 p.

Gomes, R. C. (2006). **Notas de Aula. Disposição de Rejeitos de Mineração – Caracterização Tecnológica de Rejeitos**.

Indraratna, B. (1994). **Geotechnical Characterization of Blended Coal Tailings for Construction and Rehabilitation Work**. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 27:353-361.

Martin et al. (2002). **O futuro da mineração – MMSD - Minerals and Sustainable Development-Stewardship of Tailing Facilities** – B. C Canadá.

Moretti, M. R. & Cruz, P. T. (1996). **Aterros hidráulicos e sua aplicação na construção de barragens. 100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto**. P. T. Cruz, (ed.),



Oficina das Letras, São Paulo, SP, pp. 556-591.

Osorio, C. A. H. (2005). **Caracterização de Pastas Minerais** – Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

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

Ribeiro, L. F. M. (2000). **Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicados a barragem de rejeito** – Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF.

RDIZ (2008). **PDE Aba Oeste - Alçamento para a Elevação 1100,00 metros - Análise de Estabilidade. RDIZ Projetos**, RL 119E – 00 – 10001. Itabira, MG, 19 p.

Robinsky, E. (2002) **Site Planning for Thickened Tailings Disposal (TTD)**. In: High Density & Paste Seminar, Apr – 2002, Santiago – Chile. Apresentações digitais.

Silva, R. K. A. (2014). **Co-Disposição e Disposição Compartilhada de Rejeitos e Estéreis em Cava Exaurida**. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

SPEC (2004). **Pilha para Disposição de Estéril da Aba Oeste - Conformação Final (Elevação 945 metros)**. SPEC Planejamento, Engenharia e Consultoria LTDA, Relatório do Projeto Executivo - Volume I. RL-119E-17-0039. Itabira, MG, 80 p.

Vector Engineering (2002). **Verificação da Variação no Comportamento de Estéreis e Rejeitos Dispostos Juntos em um Mesmo Bota-Fora** – Opções de Disposição e Projeto Conceitual.

Williams, D. J. & Kuganathan, V. (1992). **Co-disposal of fine and coarse grained coal mine washery wastes by combined pumping**. International Journal of Environmental Issues in Minerals and Energy Industry, 53-58.