

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

MONOGRAFIA

Análise da Disposição de Rejeitos sob a Forma de Pasta

Aluno: Frederico Fernandes Goulart dos Santos
Orientador: Prof. George Eduardo Sales Valadão

Setembro 2012

Frederico Fernandes Goulart dos Santos

Análise da Disposição de Rejeitos sob a Forma de Pasta

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Professor orientador: George Eduardo Sales Valadão

Setembro / 2012

DEDICATÓRIA

*"O homem pode, é certo, fazer o que quer,
mas não pode querer o que quer."*

Arthur Schopenhauer

*Dedico este trabalho
aos meus pais.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. George Eduardo Sales Valadão, meu orientador, pela sua compreensão, suporte e apoio durante a preparação do trabalho.
- Aos amigos e aos colegas de trabalho pelo auxílio durante o curso e ideias sugeridas para o desenvolvimento do trabalho.
- Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura do texto e pelas sugestões oferecidas ao trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 08 |
| 2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA | 09 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 10 |
| 3.1 Beneficiamento Mineral | 10 |
| 3.2 Disposição de Rejeitos | 13 |
| 3.3 Disposição de Rejeito sob a Forma de Pasta Mineral | 19 |
| 3.4 Ferramenta Multicritério de Apoio a Tomada de Decisão | 25 |
| 4. ESTUDO DE CASO | 27 |
| 4.1 Descrição do Cenário | 27 |
| 4.2 Procedimento | 27 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 30 |
| 6. CONCLUSÕES | 33 |
| 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 34 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 35 |

RESUMO

O aumento da exploração de jazidas de mais baixo teor e a consequente geração de um maior volume de rejeito, a escassez de recursos hídricos para as atividades de mineração e uma legislação ambiental cada vez mais rigorosa, em nível mundial, são algumas tendências irreversíveis da indústria da mineração.

As alternativas convencionais de disposição de rejeitos em barragens geram grande impacto ambiental e social, e existe uma restrição natural dos órgãos ambientais para a aprovação de novos projetos que consideram essa solução.

O presente estudo mostra uma pequena revisão bibliográfica sobre as técnicas utilizadas para a disposição dos rejeitos provenientes do beneficiamento mineral, além de realizar um estudo de caso propondo o uso de uma ferramenta multicritério de apoio à tomada de decisão para a seleção do sistema de disposição de rejeitos mais adequado para um cenário hipotético proposto.

Concluiu-se no caso estudado que a disposição de rejeitos sob a forma de pasta pode ser a escolha mais adequada em situações em que fatores ambientais possuam grande relevância, como para projetos localizados em regiões onde exista dificuldade para obtenção de licenças ambientais e escassez de água.

Palavras-chave: Beneficiamento mineral, disposição de rejeitos, pasta mineral, ferramenta multicritério de apoio à tomada de decisão.

ABSTRACT

Increased exploitation of deposits with less mineral content and the consequent generation of a greater volume of tailings, the scarcity of water resources for mining activities and environmental legislation increasingly stringent, globally, are some of the irreversible trends in the mining industry.

The conventional alternatives for tailings disposal in dams generate large environmental and social impact, and there is a natural restriction of environmental agencies for approval of new projects that consider this solution.

The present study shows a brief literature review on the techniques used for the disposal of tailings from the mineral processing, in addition to present a case study proposing the use of a multi-criteria decision making tool to support the selection of the most appropriate tailings disposal system for a hypothetical scenario proposed.

It was concluded in the case studied that tailings disposal in the form of paste can be the most appropriate choice in situations where environmental factors have great importance, as for projects located in regions where there is difficulty in obtaining environmental permits, and water scarcity.

Keywords: Mineral processing, tailings disposal, paste, multi-criteria decision making tool.

1. INTRODUÇÃO

Uma tendência crescente no cenário da mineração mundial é o esgotamento das jazidas de maior teor e o aumento da exploração de jazidas de menor teor.

Algumas consequências diretas dessa tendência da mineração mundial são:

- Aumento da complexidade da etapa de beneficiamento mineral, em função do menor teor e maior complexidade dos minérios disponíveis, sendo necessário o uso de operações unitárias mais complexas para que se obtenha um produto final que atenda às especificações mínimas exigidas pelo mercado;
- Aumento do volume de rejeito gerado pela etapa de beneficiamento mineral, em função do menor teor, para se obter o mesmo volume de produto final obtido com a exploração de jazidas de maior teor.

Além disso, no âmbito mundial e no país a legislação ambiental se torna cada vez mais rígida, os recursos hídricos cada vez mais escassos e a responsabilidade social já não é um item opcional e sim uma conduta essencial para as empresas de mineração.

Considerando a situação exposta acima, e que as técnicas tradicionais de disposição de rejeito em barragens requerem áreas de grande extensão, que apresentam grande impacto ambiental, que existe limitação de áreas disponíveis para disposição de rejeitos e que existe dificuldade de obtenção de licenciamento ambiental, as técnicas alternativas para a disposição de rejeitos estão se tornando uma solução cada vez mais comum, e entre elas a disposição de rejeitos sob a forma de pasta.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

Este trabalho tem por objetivo descrever a técnica de disposição de rejeitos sob a forma de pasta e explorar as suas vantagens e desvantagens em relação a outras técnicas de disposição de rejeitos.

Além disso, será proposta uma ferramenta multicritério para auxílio na tomada de decisão para a escolha da técnica de disposição de rejeitos mais adequada para utilização em um cenário hipotético.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Beneficiamento Mineral

Raramente as espécies minerais são encontradas puras na natureza, e para que seja possível aproveitá-las industrialmente é necessário submetê-las à etapa da atividade mineradora que tem o objetivo de produzir um produto final de valor comercial, o beneficiamento mineral.

Segundo Valadão et al. (2007), o beneficiamento mineral, também chamado de processamento mineral, pode ser conceituado como o conjunto de operações básicas que são realizadas em uma matéria-prima mineral (minério bruto) como objetivo de se obter sua adequação, ou seja, produtos comercializáveis.

As Normas Reguladoras de Mineração (NRMs) definem o beneficiamento mineral como o tratamento visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais.

As etapas fundamentais do beneficiamento mineral, suas respectivas funções e exemplos de operações unitárias estão representados na Tabela 3.1.

Na Figura 3.1 está representado um fluxograma típico de beneficiamento mineral, segundo Luz et al. (2010), onde podem ser visualizadas diversas operações unitárias.

Tabela 3.1 – Etapas fundamentais do beneficiamento mineral

| Etapas | Função | Operações Unitárias Mais Utilizadas |
|-----------------------|---|---|
| Fragmentação | Reduzir a dimensões físicas de um dado conjunto de blocos ou partículas através do rompimento de ligações estruturais | Britagem, moagem |
| Separação por tamanho | Adequar a granulometria de produtos (intermediários e/ou finais) do processamento | Peneiramento, classificação |
| Concentração | Separar seletivamente as espécies minerais | Flotação, separação magnética, separação gravítica, separação eletrostática |
| Operações auxiliares | Transportar, desaguar e estocar material | Espessamento, filtragem, manuseio |

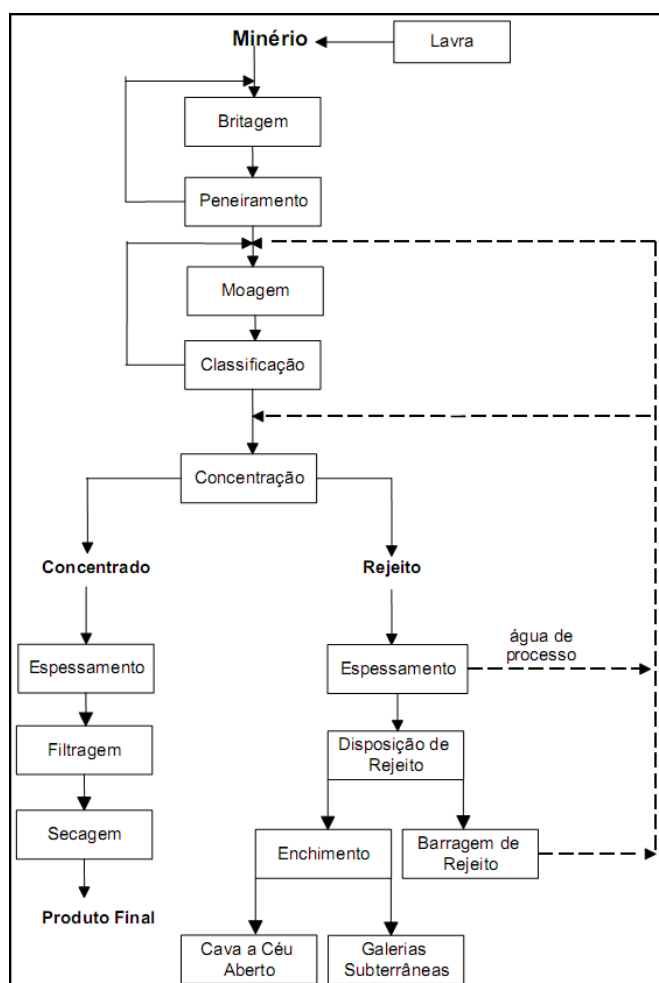


Figura 3.1 – Fluxograma típico de beneficiamento mineral

Segundo Valadão et al. (2007), um aspecto de extrema relevância para a etapa de concentração constitui-se em um conjunto de três requisitos fundamentais:

- Liberação das fases constituintes do minério;
- Existência de propriedades diferenciadora dos minerais;
- Separabilidade dinâmica.

A liberação das fases constituintes dos minérios é essencial para que operações de concentração sejam aplicadas e precisa ser alcançada, na grande maioria das vezes, através do emprego de operações de fragmentação. Após a obtenção de partículas monominerálicas é necessário explorar uma (ou mais) propriedade diferenciadora para efetivamente concentrar certos minerais. As respostas dos diferentes minerais quando submetidos ao campo de (forças de) separação, devem permitir trajetórias diferentes sejam percorridas por minerais diferentes, durante o tempo em que o campo de forças de separação atua, ou seja, deve ser promovida a separabilidade dinâmica (Valadão et al. 2007).

Segundo a NRM-18, que trata do beneficiamento mineral, todo projeto de beneficiamento de minérios deve:

- Otimizar o processo para obter o máximo aproveitamento do minério e dos insumos, observadas as condições de economicidade e de mercado;
- Desenvolver a atividade com a observância dos aspectos de segurança, saúde ocupacional e proteção ao meio ambiente.

A definição do circuito de beneficiamento mineral mais adequado está intimamente relacionada às características químicas e mineralógicas do minério, ao grau de liberação e a consideração de uma propriedade diferenciadora. Além disso, também deve ser observada a necessidade de se escolher e empregar processos que sejam os mais adequados em relação ao meio ambiente, à saúde e à segurança das pessoas.

A situação ideal para a atividade mineral é que o produto da lavra seja integralmente aproveitado, ou seja: que todos os minerais contidos no minério lavrado sejam

aproveitados economicamente. Essa não é, entretanto, a realidade, e normalmente o produto da lavra é beneficiado gerando um concentrado e um rejeito.

O concentrado é o produto final aproveitado economicamente e seguirá até o cliente final através de um processo logístico. O rejeito, por outro lado, é todo o material sem valor econômico resultante do processo de beneficiamento mineral.

3.2 Disposição de Rejeitos

As seguintes definições podem ser encontradas na Resolução nº 29, de 11 de dezembro de 2002, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos:

- Rejeito – material descartado proveniente de plantas de beneficiamento de minério;
- Sistema de disposição de rejeitos – estrutura de engenharia para contenção e deposição de resíduos originados de beneficiamento de minérios, captação de água e tratamento de efluentes.

Em geral, os rejeitos provenientes do beneficiamento mineral são convencionalmente dispostos sob a forma de polpa em estruturas de contenção denominadas barragens. Neste caso, o transporte dos rejeitos é feito por gravidade ou por bombeamento, através de canaletas ou por tubulações (rejeitodutos) e a disposição final dos rejeitos em polpa pela técnica de aterro hidráulico. A Figura 3.2 mostra uma barragem formada por essa técnica.



Figura 3.2 – Barragem I Mina Córrego do Feijão, Brumadinho/MG (Vale, 2009)

Os processos convencionais de disposição de rejeito em barragens têm proporcionado uma crescente reação dos órgãos ambientais, dos órgãos públicos e da população em geral, principalmente as comunidades afetadas, em função dos elevados riscos ambientais e de segurança inerentes ao processo de construção destas estruturas. Caso ocorra uma ruptura, as consequências são catastróficas.

Segundo Davies (2001), os seguintes impactos podem ser decorrentes do rompimento de uma barragem de rejeito:

- Interrupção prolongada da produção;
- Danos ao meio ambiente;
- Imagem negativa da empresa e de todo o segmento de mineração perante a sociedade;
- Consequências econômicas para a empresa e até mesmo para todo o segmento de mineração;
- Responsabilidade legal para os executivos da empresa;
- Perda de vidas.

Na Tabela 3.2 estão relacionados alguns eventos de rompimento de barragem que provocaram a perda de vidas, adaptado de Davies (2001).

Tabela 3.2 – Estatísticas de rompimento de barragens com fatalidades

| Data | Nome (Local) | Minério | Causa da Falha | Mortes |
|-------------|----------------------------------|----------------|-----------------------------|---------------|
| 1928 | Barahona (Chile) | Cu | Terremoto | 54 |
| 1937 | Dos Estrellas (México) | Au | Instabilidade | 70 |
| 1965 | El Cobre (Chile) | Cu | Terremoto | > 300 |
| 1966 | Mir (Bulgaria) | Pb/Zn | Desconhecida | > 10 |
| 1970 | Mufulira (Zâmbia) | Cu | Colapso | 89 |
| 1974 | Bafokeng (África do Sul) | Pt | Infiltração | 12 |
| 1985 | Stava (Itália) | F | Instabilidade | 269 |
| 1986 | Huangmeishan (China) | Fe | Infiltração / Instabilidade | 19 |
| 1988 | Jinduicheng (China) | Mo | Enchimento | 20 |
| 1993 | Marsa (Peru) | Au | Vazamento | 6 |
| 1994 | Harmony (África do Sul) | Au | Instabilidade | 17 |
| 1995 | Surigao del Norte (Filipinas) | Au | Fundação | 12 |
| 2000 | Nandan County (China) | Cu | Colapso | 29 |

Considerando a mesma metodologia utilizada por D'Agostino (2008), na Tabela 3.3 pode ser observado o quadro atual de produção de rejeito no Brasil, estimado a partir dos dados do Anuário Mineral Brasileiro (Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2011), referentes às principais substâncias da produção mineral brasileira, através da expressão:

$$\text{Produção de Rejeito} = \frac{(\text{Produção Bruta} - \text{Produção Beneficiada})}{(\text{Produção Bruta})}$$

Apesar de ser um dado generalista, onde é contabilizada a massa de rejeitos sem levar em consideração as características locais das lavras e seus depósitos, este serve como referência das massas totais produzidas para cada substância (D'Agostino, 2008).

A Figura 3.3 mostra gráfico construído a partir dos dados da Tabela 3.3, onde é possível observar que para alguns minérios contendo ouro, cobre e níquel, o percentual de rejeito é elevado, ou seja, uma grande quantidade de material precisa ser extraída da mina, o Run Of Mine (ROM), para que apenas uma pequena quantidade de concentrado seja

produzida, e conseqüentemente grande parte do ROM é precisa ser descartada como rejeito.

Tabela 3.3 – Percentual de rejeito de mineração (DNPM, 2011)

| Substância | Produção Bruta (t) | Produção Beneficiada (t) | Percentual de Rejeito |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Calcário | 109.566.579 | 101.140.345 | 7,69% |
| Ferro | 406.933.947 | 298.389.316 | 26,67% |
| Alumínio | 36.915.104 | 24.444.242 | 33,78% |
| Manganês | 4.275.858 | 2.680.990 | 37,30% |
| Carvão | 13.118.377 | 5.789.741 | 55,87% |
| Caulim | 6.052.964 | 1.895.425 | 68,69% |
| Potássio | 2.544.407 | 716.635 | 71,83% |
| Fosfato | 36.899.524 | 5.434.022 | 85,27% |
| Argilas | 28.941.106 | 4.161.969 | 85,62% |
| Amianto | 4.708.299 | 288.448 | 93,87% |
| Níquel | 4.333.059 | 192.890 | 95,55% |
| Areia | 265.227.323 | 9.545.825 | 96,40% |
| Nióbio | 11.917.252 | 307.178 | 97,42% |
| Cobre | 37.657.624 | 781.731 | 97,92% |
| Titânio | 24.033.832 | 87.425 | 99,64% |
| Estanho | 15.752.720 | 16.038 | 99,90% |
| Ouro | 187.084.983 | 61 | 100,00% |

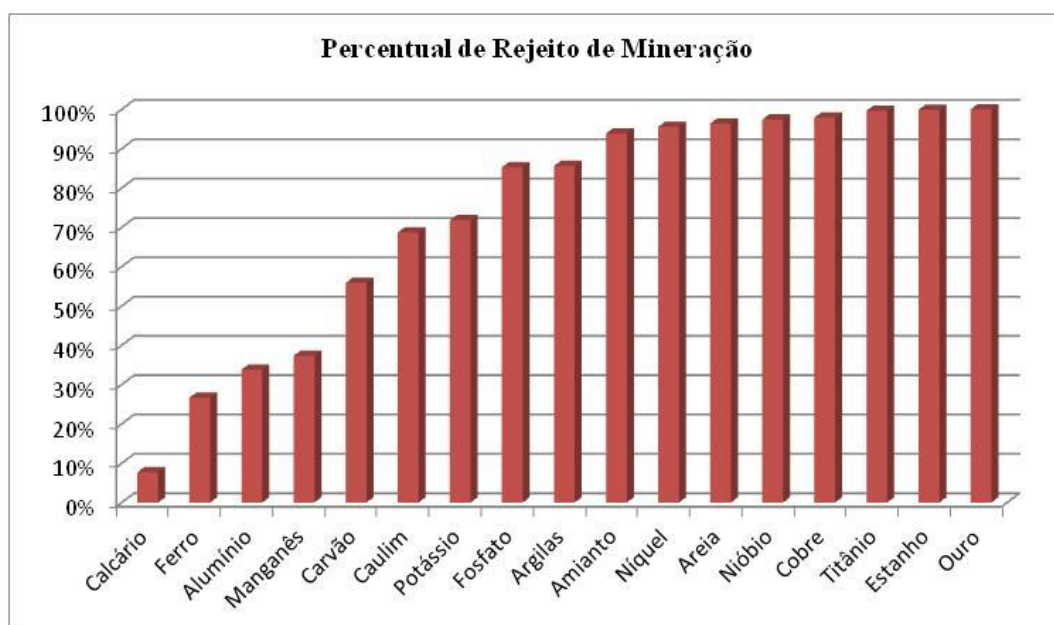


Figura 3.3 – Percentual de Rejeito na Mineração, obtido a partir dos dados mostrados na Tabela 3.3

Além dos minérios que tradicionalmente possuem um percentual de rejeito elevado, a tendência de exploração de jazidas de teor cada vez menor elevará o percentual de rejeitos. O minério de ferro, que no passado era extraído no Quadrilátero Ferrífero (MG) em jazidas com teor acima de 65% é atualmente lavrado em jazidas com teor de até 35%.

Considerando o que foi exposto acima com relação aos problemas da metodologia convencional de disposição de rejeitos e a tendência no aumento da geração de rejeitos, a utilização de metodologias alternativas para a disposição de rejeitos provenientes do beneficiamento mineral tornou-se uma proposta estratégica e uma preocupação ambiental dentro da indústria mineral.

Uma metodologia alternativa para a disposição de rejeitos com uma aceitação cada vez maior na indústria mundial é a disposição de rejeitos mais densos. O princípio da técnica consiste no maior aumento da concentração de sólidos, apresentando as seguintes vantagens:

- Menor área para disposição;
- Maior vida útil;
- Maior recuperação de água;
- Maior densidade e estabilidade das estruturas de disposição;
- Menor susceptibilidade à liquefação e a rupturas catastróficas;
- Menor potencial de contaminação das águas subterrâneas;
- Maior recuperação dos reagentes utilizados nos processos de tratamento;
- Maior facilidade de aceleração dos procedimentos de reabilitação das áreas degradadas.

O apelo ambiental da disposição de rejeitos desaguados é grande, uma vez que essa metodologia necessita de uma área menor para a disposição do rejeito e proporciona um aumento da recirculação da água utilizada no tratamento de minérios e a consequente diminuição no volume de captação de água nova. Tudo isso contribui para a geração de um menor passivo ambiental, além do ganho em imagem da empresa perante os órgãos ambientais e a sociedade.

Em alguns casos, rejeitos desaguados até uma porcentagem de sólidos elevada apresentam aspectos e comportamentos muito mais similares aos solos naturais, tornando mais simples a reabilitação da área destinada para disposição de rejeitos.

De acordo com Figueiredo (2007), os rejeitos desaguados podem ser classificados da seguinte maneira:

- Rejeitos espessados (“thickened tailings”) – rejeitos desaguados parcialmente, mas que apresentam ainda a consistência de uma polpa, com alto teor de sólidos e ainda passível de bombeamento;
- Rejeitos em pasta (“paste tailings”) – rejeitos espessados mediante a incorporação de algum tipo de aditivo químico (tipicamente um agente ligante);
- Rejeitos filtrados a úmido (“wet cake tailings”) – rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase saturada, não mais passível de bombeamento;
- Rejeitos filtrados a seco (“dry cake tailings”) – rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%), não passível de bombeamento.

Laudriault (2002, apud Osorio, 2005) apresenta um gráfico esquemático da tensão de ruptura em função do adensamento da mistura sólido-líquido, na qual se observam distintos estados possíveis: polpa, polpa de alta densidade, pasta e torta. Também são indicados alguns dos equipamentos utilizados nas tarefas de desaguamento, bombeamento e filtragem dessas misturas sólido-líquido, os regimes e velocidades de fluxo possíveis e as características de segregação das partículas sólidas.

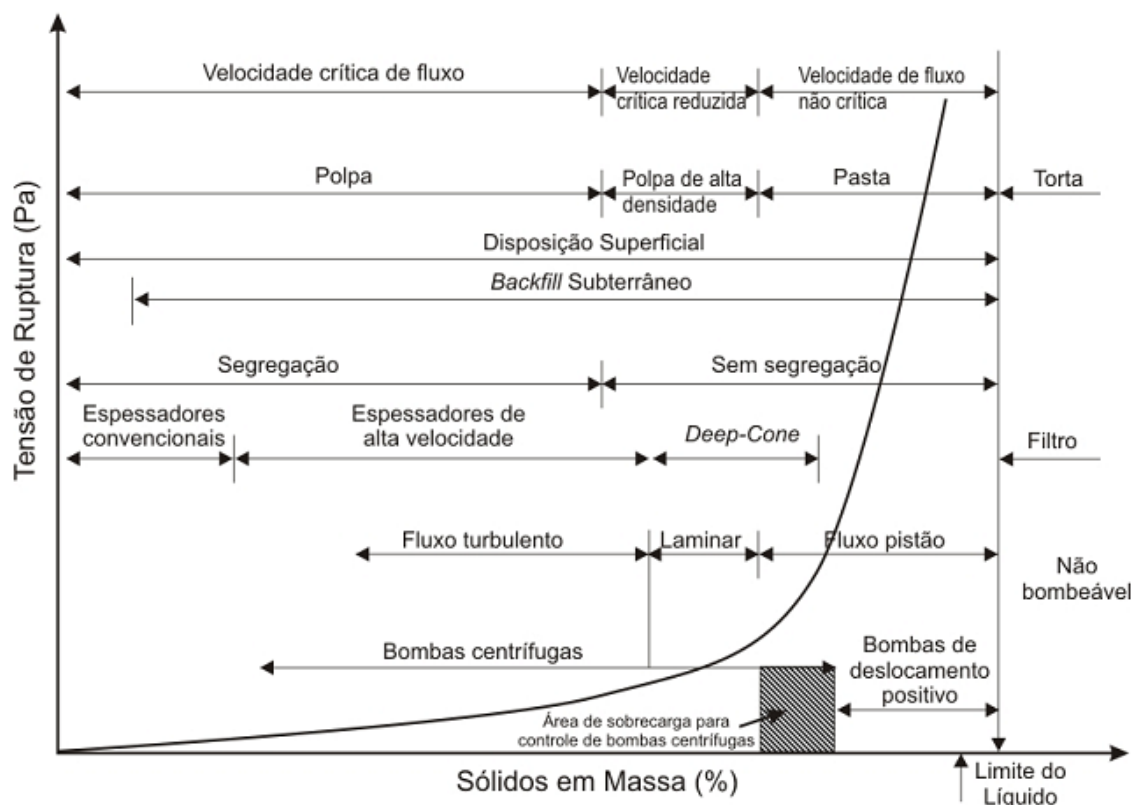


Figura 3.4 – Caracterização de rejeitos Laudriault (2002, apud Osorio, 2005)

Os rejeitos desaguados que não são passíveis de bombeamento são normalmente transportados até o seu destino final através de transportadores de correia e/ou caminhões.

3.3 Disposição de Rejeito sob a Forma de Pasta Mineral

Segundo Araujo et al. (2005, apud Osorio 2005), uma pasta mineral pode ser conceituada como um sistema coloidal que se apresenta como um fluido homogêneo, no qual não acontece segregação de partículas, e que se disposto de forma suave em superfícies estáveis, não apresenta drenagem significativa de água. Um exemplo de disposição de pasta mineral pode ser visto na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Disposição pasta mineral (WesTech, 2012)

De acordo com Araujo et al. (2003, apud Osorio, 2005), as características do comportamento das pastas são devidas ao adensamento em sólidos, fazendo que, a partir de uma determinada porcentagem de sólidos, não haja segregação das partículas sólidas na mistura. Como resultado, pode-se obter ângulos de disposição mais elevados do que ao utilizar polpas, por exemplo, na faixa de 2 até 5%, representando um ganho importante em termos de volumes a serem dispostos, sobretudo para grandes áreas, características das disposições em barragens.

A vantagem em se obter ângulos de disposição mais elevados e o consequente aumento do volume possível de disposição em uma mesma área está ilustrada na Figura 3.6, comparando a disposição de rejeito sob a forma de polpa de alta densidade e sob a forma de pasta.

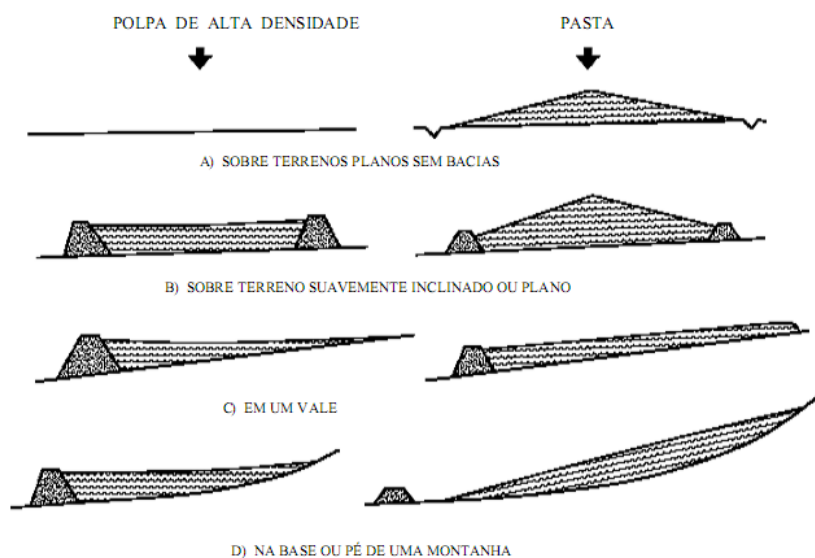


Figura 3.6 – Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta (Laudriault, 2002 apud Osorio, 2005).

A conformação e consistência da pasta durante a sua disposição pode ser avaliada através do teste de abatimento (*slump*) e do teste de calha (*flume*).

Verifica-se do trabalho de Clayton et al. (2003), que o teste de *slump* foi originalmente idealizado para medir a consistência ou plasticidade de misturas de concreto, sendo normalizado pela norma ASTM a partir de 1998. A Figura 3.7 mostra uma representação esquemática do teste de *slump*. Nesse teste, o cone é preenchido com concreto até completar todo seu volume, quando o cone é retirado verticalmente, verificando-se a diferença entre a altura original e a final, a que é chamada de altura de abatimento ou *slump* (Osorio, 2005).

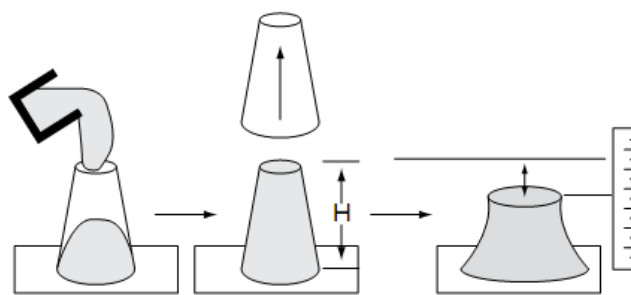


Figura 3.7 – Representação esquemática do teste de abatimento (Osorio, 2005)

O teste de *slump* tem sido utilizado para medir a consistência de fluídos inelásticos, incluindo-se suspensões de rejeitos minerais. A altura de *slump* é utilizada como parâmetro de controle, para avaliação da consistência de uma pasta. Essa altura é dependente tanto da tensão de escoamento quanto da densidade do material. No contexto mineiro, esses fatores poderiam variar com as mudanças na origem do minério ou mudanças em seu processamento. Como resultado, a utilização da altura de *slump* como o único parâmetro para avaliação da consistência para o sistema de disposição de rejeitos potencialmente pode não ser suficiente (Osorio, 2005).

O teste de calha (*flume*) é utilizado para determinar o ângulo máximo possível no qual a pasta ainda se mantém em repouso. Esse teste é realizado de acordo com o esquema mostrado na Figura 3.8, onde a altura da calha é variada até que se obtenha o ângulo máximo de repouso do material.

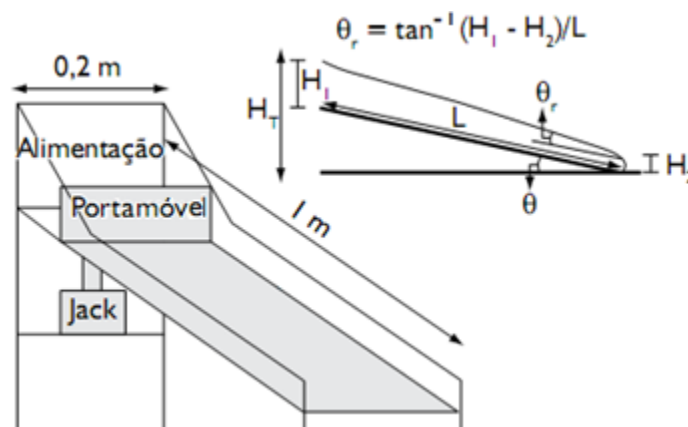


Figura 3.8 – Representação esquemática do teste de calha (Osorio, 2005)

Chambers et al. (2002, apud Osorio, 2005), apresenta correlações obtidas entre resultados de ensaios de *flume* e de *slump* para rejeitos com diferentes teores de sólidos. Essas correlações estão representadas na Tabela 3.3. Pode ser observado na Tabela 3.3 que quanto maior a concentração de sólidos na pasta, menor a altura de *slump* e maior o ângulo de repouso.

Johnson et al. (2000, apud Falcucci, 2007) consideram que pastas geralmente podem ser produzidas a partir de uma ampla faixa de tamanho de partículas, ainda que usualmente tenha um mínimo de 15% em massa de material de tamanho inferior a 20 μ m.

Tabela 3.3 – Valores de altura de *slump* e ângulo de repouso para pastas com diferentes conteúdos de sólidos (Chambers et al., 2002 apud Osorio, 2005)

| Altura de <i>slump</i> (mm) | % de sólidos (em massa) | Ângulo de repouso (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 177,8 | 67,7 | 13 |
| 203,2 | 65,5 | --- |
| 213,4 | --- | 8,9 |
| 228,6 | 63,1 | --- |
| 254 | 60,2 | 1,4 |

O equipamento utilizado para a produção de pasta mineral é o espessador do tipo cone profundo (*deep cone*), que normalmente apresentam uma relação altura: diâmetro de 2:1. A Figura 3.9 mostra o espessador *deep cone*.

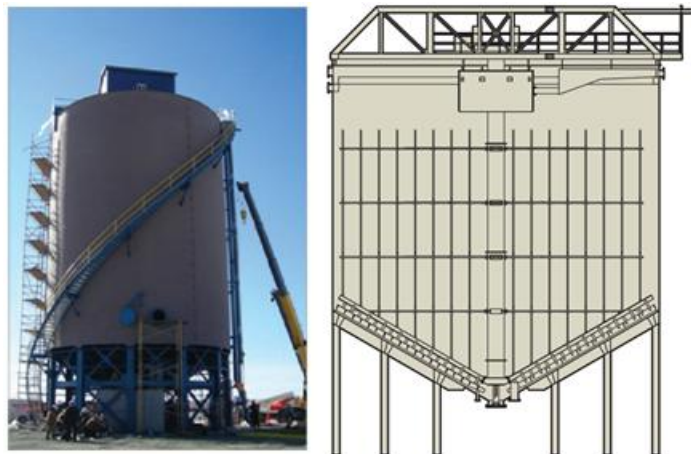


Figura 3.9 – Espessador *deep cone* (WesTech, 2011)

Devido às características apresentadas pelas pastas minerais, a forma de disposição deve ser pensada visando sua melhor distribuição. A disposição superficial pode ser realizada em áreas planas ou irregulares. Em áreas planas, usualmente a disposição é feita por um sistema de torre central a partir do qual a pasta se distribui uniformemente ao longo da área, facilitando desta forma a secagem e o adensamento natural.

Para áreas irregulares, como vales ou taludes, o material tende a fluir e se adensar, conformando-se naturalmente à topografia local ou sendo barrado por um dique de contenção, como mostrado anteriormente na Figura 3.6.

A pasta mineral também pode ser misturada com pequenas quantidades de ligantes, como cimento por exemplo, para aumentar suas características de resistência, e ser utilizada para preenchimento de cavidades subterrâneas, seja para a simples disposição subterrânea do material ou também para o preenchimento de cavidades na mineração subterrânea. A Figura 3.10 mostra o esquema de disposição superficial e subterrânea.

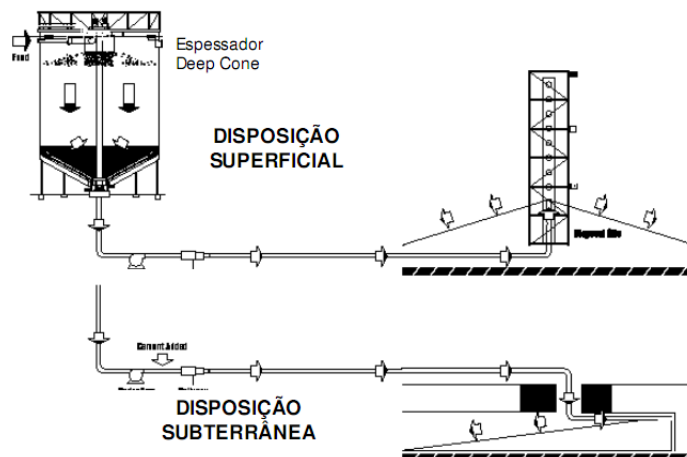


Figura 3.10 – Esquema típico de transporte de pastas minerais (Falcucci, 2007)

Para o transporte da pasta mineral, considerando as elevadas tensões de escoamento induzidas pelo aumento da concentração de sólidos durante o processo de desaguamento e preparação, normalmente são utilizadas bombas de deslocamento positivo, capazes de fornecer maiores pressões de bombeamento.

A pasta mineral disposta superficialmente possui comportamento similar aos solos naturais, tornando mais simples a reabilitação da área destinada para disposição de rejeitos, como mostra a Figura 3.11.



Figura 3.11 – Reabilitação de área destinada para disposição de rejeitos (WesTech, 2012)

3.4 Ferramenta Multicritério de Auxílio na Tomada de Decisão

A ferramenta multicritério de auxílio na tomada de decisão proposta neste trabalho é uma metodologia de análise e aplicação rápida, que suporta a escolha entre as alternativas técnicas para determinar a opção mais adequada para o projeto.

Essa metodologia permite que não apenas critérios técnicos ou econômicos sejam individualmente levados em consideração, mas a combinação desses critérios em conjunto com outros que sejam considerados importantes para a tomada de decisão relacionada ao problema proposto.

Desta forma, a metodologia multicritério dá ao grupo envolvido no processo de tomada de decisão, subsídios necessários para se obter uma solução que melhor se ajuste às suas necessidades.

A comparação entre critérios que não tem uma correlação direta é frequentemente uma tarefa subjetiva e às vezes sem solução. Uma solução para essa comparação é a utilização da Técnica de Comparação aos Pares, que auxilia na determinação de índices de relevância para cada critério, tornando possível a comparação relativa entre os mesmos.

A comparação aos pares possibilita a tomada de decisão sem que ocorram julgamentos tendenciosos, considerando a percepção de todas as disciplinas envolvidas, de forma que todos os critérios sejam considerados, com as suas devidas relevâncias.

Para a correta utilização da ferramenta proposta as seguintes etapas devem ser seguidas (Vale, 2012):

1. Formulação do Problema: definição do escopo do estudo;
2. Determinação das Alternativas: definição de quais alternativas serão consideradas;
3. Definição dos Critérios de Avaliação: determinação do conjunto de critérios a serem considerados no estudo;

4. Comparação aos Pares: comparar todos os critérios de avaliação entre si para a determinação do índice de relevância de cada critério;
5. Avaliação das Alternativas: avaliar cada alternativa em frente aos critérios de avaliação definidos;
6. Consolidação da Pontuação: consolidar a pontuação obtida por cada um das alternativas;
7. Análise Crítica: analisar o resultado final e selecionar a alternativa mais adequada.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Descrição do Cenário

Para aplicação da ferramenta proposta será considerado o caso hipotético descrito a seguir.

O cenário proposto é a seleção do sistema de disposição de rejeitos provenientes de uma nova planta de beneficiamento de minério de ferro, localizada no Brasil, com uma vida útil estimada de 20 anos e com as seguintes particularidades, inerentes à localização do projeto:

- Dificuldade para obtenção de licença ambiental;
- Restrição para captação de água nova;

As particularidades definidas estão em linha com a dificuldade atual das empresas de mineração de obter licenciamento ambiental para a implantação de novos projetos e para a captação de um volume elevado de água de cursos d'água.

4.2 Procedimento

A partir do cenário proposto as etapas mencionadas anteriormente foram seguidas:

1. **Formulação do Problema:** o objetivo desta etapa é descrever o problema de maneira clara objetiva, e para o cenário proposto, o problema foi descrito da seguinte maneira:

- Seleção de sistema para disposição de rejeitos.

2. **Determinação das Alternativas:** a partir do problema formulado, deve-se definir quais alternativas farão parte do estudo, e para a problema descrito na etapa anterior, as seguintes alternativas foram consideradas:

- Alternativa 1 – Barragem Convencional.
 - Alternativa 2 – Pasta Mineral.
3. Definição dos Critérios de Avaliação: nessa etapa, todos os critérios (técnicos, econômicos, sociais, ambientais etc.) definidos como importantes para a solução do problema devem ser relacionados, e para a seleção de sistema para disposição de rejeitos os seguintes critérios foram listados:
- Características do material
 - Impacto ambiental
 - Impacto social
 - Recuperação de água
 - Custo de implantação
 - Custo operacional
 - Segurança
4. Comparação aos Pares: nesta etapa, todos os critérios definidos na etapa anterior são comparados entre si, com o objetivo de quantificar qual a importância relativa de cada critério, e para isso a seguinte pontuação é utilizada:
- Nota 5 – Critério da linha é mais importante que o critério da coluna;
 - Nota 3 – Critério da linha é tão importante quanto o critério da coluna;
 - Nota 1 – Critério da linha é menos importante que o critério da coluna.
5. Avaliação das Alternativas: nessa etapa deve ser realizada uma avaliação de cada alternativa em relação a cada um dos critérios estabelecidos. Essa avaliação é feita pontuando-se cada alternativa de acordo com uma escala de 1 a 5, onde a nota 1 sempre corresponde a pior pontuação, conforme exemplo a seguir para a escala de avaliação do critério “Recuperação de Água”:
- Recuperação de Água
 - 5 – Muito Alta;
 - 4 – Alta;

- 3 – Média;
 - 2 – Baixa;
 - 1 – Muito Baixa.
6. Consolidação da Pontuação: a pontuação obtida por cada alternativa é consolidada através do produto entre a importância relativa e a avaliação de cada critério.
7. Análise Crítica: após a consolidação da pontuação deve ser realizada uma análise crítica do resultado obtido, avaliando a diferença entre a pontuação obtida por cada alternativa para na sequência realizar a seleção da melhor alternativa para a solução do problema proposto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando o cenário proposto e o procedimento descrito nos itens anteriores, os resultados obtidos com a utilização da ferramenta multicritério de auxílio na tomada de decisão são descritos a seguir.

O resultado da comparação aos pares pode ser visualizado nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Resultado da comparação aos pares

| GRUPOS DE PARÂMETROS PARA SELEÇÃO | Características do Material | Impacto Ambiental | Impacto Social | Recuperação de Água | Custo de Implantação | Custo Operacional | Segurança | IMPORTÂNCIA RELATIVA DO GRUPO | |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------|---------------------|----------------------|-------------------|-----------|-------------------------------|-------|
| | | | | | | | | | |
| Características do Material | | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 30 | 23,8% |
| Impacto Ambiental | | | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 | 20 | 15,9% |
| Impacto Social | | | | 1 | 3 | 3 | 3 | 12 | 9,5% |
| Recuperação de Água | | | | | 5 | 5 | 3 | 22 | 17,5% |
| Custo de Implantação | | | | | | 5 | 1 | 12 | 9,5% |
| Custo Operacional | | | | | | | 5 | 14 | 11,1% |
| Segurança | | | | | | | | 16 | 12,7% |
| | | | | | | | | 126 | 100% |

Tabela 5.2 – Ordem de relevância dos critérios

| ORDEM | GRUPOS DE PARÂMETROS PARA SELEÇÃO | IMPORTÂNCIA RELATIVA DO GRUPO |
|-------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Características do Material | 23,8% |
| 2 | Recuperação de Água | 17,5% |
| 3 | Impacto Ambiental | 15,9% |
| 4 | Segurança | 12,7% |
| 5 | Custo Operacional | 11,1% |
| 6 | Impacto Social | 9,5% |
| 7 | Custo de Implantação | 9,5% |

Analisando as tabelas anteriores é possível verificar que o critério “Características do Material” foi considerado mais importante do que todos outros, os critérios “Recuperação de Água” e “Impacto Ambiental” também obtiveram uma importância relativa elevada, principalmente em função do cenário proposto.

A avaliação de cada alternativa em frente aos critérios de avaliação definidos pode ser visualizada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Avaliação de cada alternativa frente aos critérios de avaliação

| Grupo | Parâmetro | Relevância | | | Alternativa | | | | |
|-----------------------------|-----------|------------|----------|-----------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| | | Grupo | Subgrupo | Parâmetro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Características do Material | | 23,8% | 100,0% | 100,0% | 3: Indiferente | 3: Indiferente | 0: Selecione | 0: Selecione | 0: Selecione |
| Impacto Ambiental | | 15,9% | 100,0% | 100,0% | 1: Muito Alto | 2: Alto | 0: Selecione | 0: Selecione | 0: Selecione |
| Impacto Social | | 9,5% | 100,0% | 100,0% | 2: Alto | 3: Médio | 0: Selecione | 0: Selecione | 0: Selecione |
| Recuperação de Água | | 17,5% | 100,0% | 100,0% | 1: Baixa | 3: Média | 0: Selecione | 0: Selecione | 0: Selecione |
| Custo de Implantação | | 9,5% | 100,0% | 100,0% | 3: Médio | 1: Alto | 0: Selecione | 0: Selecione | 0: Selecione |
| Custo Operacional | | 11,1% | 100,0% | 100,0% | 3: Médio | 2: Alto | 0: Selecione | 0: Selecione | 0: Selecione |
| Segurança | | 12,7% | 100,0% | 100,0% | 3: Média | 4: Alta | 0: Selecione | 0: Selecione | 0: Selecione |
| Pontuação | | | | | 224 | 267 | 0 | 0 | 0 |

Durante a avaliação de cada alternativa, procurou-se manter uma coerência com a realidade de cada alternativa, por exemplo, o impacto ambiental da disposição de rejeitos sob a forma de pasta é menor do que a disposição convencional em barragens, assim como o impacto social.

A pontuação obtida pelas alternativas, que pode ser vista na Tabela 5.3, Alternativa 2 (Pasta Mineral) 267 pontos e Alternativa 1 (Barragem Convencional) 224 pontos, indica uma vantagem significativa da disposição sob a forma de pasta em relação à disposição convencional em barragem.

A diferença entre as duas alternativas é devido, principalmente, as particularidades definidas para o projeto, o que acarretou em um peso elevado para os critérios “Impacto Ambiental” e “Recuperação de Água”, justamente dois critérios onde a disposição sob a forma de pasta é mais vantajosa.

6. CONCLUSÕES

A ferramenta multicritério de auxílio na tomada de decisão proposta auxiliou na escolha do sistema de disposição de rejeitos em um cenário hipotético proposto, considerando critérios técnicos, ambientais, sociais e de segurança.

O foco do trabalho foi a disposição de rejeitos sob a forma de pasta mineral, cuja aceitação tem aumentado significativamente nos últimos anos, principalmente no Canadá e na Austrália, lembrando que é possível a disposição da pasta no subsolo, como material de preenchimento de minas subterrâneas ou a disposição em superfície.

Não existe uma alternativa para o sistema de disposição de rejeitos que seja a ideal para todos os projetos, pois cada projeto tem as suas particularidades que devem ser levadas em conta na hora da escolha.

Uma grande vantagem dessa ferramenta é que ela se adapta facilmente as particularidades de cada projeto, uma vez que a ordem de relevância dos critérios está diretamente relacionada com o cenário sob análise.

Normalmente, para os casos onde existam restrições para o licenciamento ambiental e a escassez de água, como no cenário hipotético sugerido, a pasta mineral apresenta vantagens em relação aos métodos convencionais.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de aprofundar ou dar continuidade a alguns aspectos não abordados ou citados de forma superficial no presente trabalho, alguns temas para trabalhos futuros são sugeridos:

- Considerar na ferramenta a análise de outras alternativas para disposição de rejeito;
- Desdobrar os critérios definidos em subcritérios, buscando uma análise mais completa das alternativas;
- Considerar no processo uma nova etapa para análise quantitativa das alternativas (CapEx e OpEx);
- Após incrementar as funcionalidades da ferramenta, testá-la em um caso real de seleção de alternativa de disposição de rejeito.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A. C., SOUZA, C. C., AMARANTE, S. C., 2002 apud OSORIO, C.A.H. Caracterização de Pastas Mineraias. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 177p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

CHAMBERS, R. W., PLEWES, H. D., 2002 apud OSORIO, C.A.H. Caracterização de Pastas Mineraias. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 177p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

CLAYTON, S., GRICE, T. G., BOGER, D. V., 2003 apud OSORIO, C.A.H. Caracterização de Pastas Mineraias. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 177p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS, Brasília. Resolução nº 29, de 11 de dezembro de 2002.

D'AGOSTINO, L.F. Praias de Barragens de Rejeito de Mineração: Características e Análise da Sedimentação. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. 374p. (Dissertação, Doutorado, Engenharia Mineral).

DAVIES, M.P. Impounded Mine Tailings: What are the failures telling us. CIM Distinguished Lecturer Series, p.53-59, jul. 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, Anuário Mineral Brasileiro – 2010, 2011.

FALCUCCI, A. A Influência de Floculantes Poliméricos na Formação de Pastas Mineraias. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 96p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

FIGUEIREDO, M.M. Estudo de Metodologias Alternativas de Disposição de Rejeitos para a Mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG. Ouro Preto: Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2007. 100p. (Dissertação, Mestrado, Geotecnia Aplicada a Mineração).

JOHNSON, S.B., FRANKS, G.V., SCALES, P.J., BOGER, D.V., HEALY, T.W., 2000 apud FALCUCI, A. A Influência de Floculantes Poliméricos na Formação de Pastas Mineraias. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 96p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

LAUDRIAULT, 2002 apud OSORIO, C.A.H. Caracterização de Pastas Mineraias. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 177p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

LUZ, A.B., Sampaio, J.A., França, S.C.A., Tratamento de Minérios. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965p.

NORMAS REGULADORAS DE MINERAÇÃO, Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 12, de 22 de janeiro de 2002.

OSORIO, C.A.H. Caracterização de Pastas Mineraias. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 177p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

VALADÃO, G.E.S., Araujo, A.C. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 234p.

VALE. Programa Barragem Zero. Relatório interno, set. 2009.

VALE. Análise e Seleção de Alternativas (*Trade-off*). Apresentação interna, ago. 2012.

WESTECH. Paste and High Density Thickeners. 2011.

WESTECH. Disponível em: <<http://www.westech-inc.com/en-usa/products/deep-bed-paste-thickeners#media>>. Acesso em: 23 de ago. 2012.