



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



DIEGO COSTA TEIXEIRA

**BENEFÍCIOS COM A UTILIZAÇÃO DE REJEITOS EM ENCHIMENTO DE MINAS
SUBTERRÂNEAS - Uma visão geotécnica e sustentável**

OURO PRETO / MG

2018

DIEGO COSTA TEIXEIRA

BENEFÍCIOS COM A UTILIZAÇÃO DE REJEITOS EM ENCHIMENTO DE MINAS
SUBTERRÂNEAS - Uma visão geotécnica e sustentável

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva

OURO PRETO / MG

2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

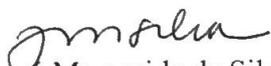
Aos dois dias do mês de fevereiro de 2018, às 15h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa da monografia de final de curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, pelo aluno **Diego Costa Teixeira**, intitulado: “**BENEFÍCIOS COM A UTILIZAÇÃO DE REJEITOS EM ENCHIMENTO DE MINAS SUBTERRÂNEAS - Uma visão geotécnica e sustentável**”, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. José Margarida da Silva** (orientador), **Prof^a. M.Sc. Flávia Gomes Pinto**, e **Eng^o de Minas Elder Lucas Sant’Anna Ferreira Ribeiro**.

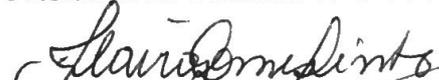
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela APROVAÇÃO do candidato, com a nota 9,0 concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

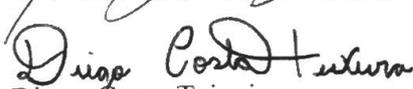
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

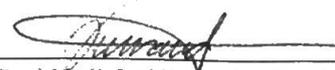
Ouro Preto, 2 de fevereiro de 2018.


Prof. Dr. José Margarida da Silva
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof^a. M.Sc. Flávia Gomes Pinto
Membro da Comissão Avaliadora


Eng^o de Minas Elder Sant’Anna Ferreira Ribeiro
Membro da Comissão Avaliadora


Diego Costa Teixeira


Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

À Deus e à família, em
especial minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha mãe pela força, dedicação e incentivo a esta conquista.

À Escola de Minas e a todos os professores do Departamento de Engenharia de Minas, em especial ao Professor José Margarida da Silva, pelo apoio, paciência, incentivo e orientação ao meu trabalho.

Agradeço também ao Departamento Nacional de Produção Mineral, Superintendência do estado do Espírito Santo, em especial ao Especialista em Recursos Minerais: João Antônio Vasconcelos e ao servidor: Júlio Zago pela convivência, amizade e aprendizado durante os 9 meses que realizei meu estágio.

E por fim, agradeço à República Quinta Negra a qual me proporcionou uma família em Ouro Preto, onde pude aprender e crescer pessoalmente.

“Happiness is only real when shared”.

Chris McCandless

RESUMO

TEIXEIRA, Diego Costa. **Benefícios com a Utilização de Rejeitos em Enchimento de Minas Subterrâneas - Uma visão geotécnica e sustentável**. 2018. 42 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

O setor mineral possui extrema relevância na economia do Brasil representando 4,3% de todo o PIB conforme o relatório anual de atividades do Instituto Brasileiro de Mineração – (IBRAM, 2017). Durante todo o processo de atividade minerária, quantidades significativas de materiais são movimentados e extraídos gerando resíduos que, quando estocados em superfície, apresentam condições desfavoráveis ao meio ambiente. Este trabalho teve como objetivo geral, por meio de uma revisão na literatura, apresentar os benefícios na utilização de rejeitos em enchimento de minas subterrâneas a fim de minimizar os impactos negativos destes quando dispostos à superfície. Constatou-se que além dos benefícios ambientais, há condições favoráveis geomecânicas, de sustentação e econômicas nas minas que utilizam desses rejeitos para o preenchimento de seus vazios. Além disso, realizou-se a descrição dos tipos de enchimentos e dos métodos de extração com a possível utilização destes.

Palavras-chaves: Rejeitos de mina. Enchimento. Mina Subterrânea.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Diego Costa. **Benefícios com a Utilização de Rejeitos em Enchimento de Minas Subterrâneas – Uma visão geotécnica e sustentável.** 2018. 42 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

The mineral sector is extremely relevant to the Brazilian economy, accounting for 4.3% of all GDP, according to the IBRAM's annual activity report in 2017. Throughout the mining process, significant amounts of mass and volume of materials are moved and extracted, which generates waste that, when stored on the surface, results in unfavorable conditions to the environment. The objective of this work was to review the literature on the benefits of using tailings to fill underground mines in order to minimize the negative impacts of these when disposed to the surface. It was found that besides the environmental benefits, there are favorable geomechanical, sustaining and economic conditions in the mines that use these tailings to fill their voids. In addition, the types of fillers and extraction methods were described, alongside with their possible use.

Keywords: Mine rejects. Fill. Underground mine.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Contribuição percentual média de cada bem mineral extraído na geração de rejeitos da atividade de mineração entre os anos de 1996-2005.	13
Figura 2 - Contribuição média projetada de cada bem mineral na geração de rejeitos da atividade de mineração entre os anos de 2010 a 2030.....	14
Figura 3 - Consistência de um <i>backfill</i> , Boulby Mine, Reino Unido.	18
Figura 4 - Realce preenchido com <i>paste-fill</i> na Mina Caraíba, Jaguarari, Bahia.	20
Figura 5 - Fotografia do material utilizado como enchimento (<i>rockfill</i>) na Mina Bonito I. ...	21
Figura 6 - Método de lavra por câmaras e pilares.	23
Figura 7 - Método por Corte e Enchimento.....	24
Figura 8 - Método por Realces em Subníveis.	26
Figura 9 - Tensões verticais concentradas nos extremos de uma cavidade.....	28
Figura 10 - Tensões verticais concentradas num pilar abandonado de uma cavidade.	28
Figura 11 - Localização do máximo de tensão vertical num pilar após fratura.	29
Figura 12 - Análise da Resistência à Compressão, do conteúdo em água e do tipo de aglomerante usado com enchimento na Lupin Mine.....	31
Figura 13 - Análise da Resistência à Compressão na Mina Fetr (Irã), com cimento pozolânico, Portland e misturas com adição de escória de liga de cromo.....	31
Figura 14 - Realce instrumentado na Mina Raleigh em estudos com barricadas.....	37
Figura 15 - Barricada com drenagem em teste na Mina Raleigh.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PIB – Produto Interno Bruto

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

GDP – Gross Domestic Product

IPEA – Instituto de Pesquisa Aplicada

MME – Ministério de Minas e Energia

ROM – Room of Mine

σ_z – Estado de tensão

SUMÁRIO

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Importância do tema	12
1.2. Objetivos.....	16
Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Enchimento	17
2.1.1. <i>Hydraulicfill</i>	18
2.1.2. <i>Pastefill</i>	19
2.1.3. <i>Rockfill</i>	20
2.2. Métodos de extração em minas subterrâneas com a possível utilização de rejeitos como enchimento de espaços vazios	21
2.2.1. Método por Câmaras e Pilares (<i>Room and Pillar</i> ou <i>Bord and Pillar</i>).....	21
2.2.2. Método por Corte e Enchimento (<i>Cut and Fill</i>).....	23
2.2.3. Método por Realces em Subníveis (<i>Sublevel Stopping</i>).....	24
Capítulo 3 – A UTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO ENCHIMENTO DE MINAS SUBTERRÂNEAS.....	27
3.1. Uma visão geotécnica	27
3.1.1. Propriedades dos enchimentos	29
3.2. Uma visão sustentável	32
3.2.1. Melhor condição de trabalho.....	32
3.2.2. Redução dos impactos negativos da disposição de rejeitos em superfície.....	34
3.2.3. Redução de custos de produção e aumento de recuperação de minério.....	35
Capítulo 4 – CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

As atividades de mineração têm propiciado um aumento significativo na geração de resíduos, uma vez que há movimentação e extração de grandes volumes de materiais. A quantidade de resíduos gerados nestes processos depende basicamente do método designado para a extração do minério, da concentração mineral de interesse hospedada na rocha matriz e da localização da jazida junto à superfície. Há dois tipos principais de resíduos sólidos gerados na atividade de mineração, sendo eles: os rejeitos e os estéreis. Os rejeitos são resultantes do beneficiamento aplicado às substâncias minerais de interesse, já os estéreis são gerados durante o processo de extração (ou lavra), constituindo-se de rochas para as quais não há nenhum valor ou interesse econômico, ficando a maioria dispostos em pilhas à superfície (IPEA, 2012).

Conforme citado por Costa e Silva *et al.* (2012), uma vez dispostos em superfície, os resíduos podem desencadear impactos ambientais através dos processos de degradação de ecossistemas e sistemas aquíferos, visto que o método de deposição em superfície pode provocar aumento de concentração de sedimentos, contaminação por drenagem ácida e deposição de metais pesados.

No âmbito nacional, devido às brandas restrições ambientais e o baixo custo na manutenção de rejeitos em superfície, a utilização de rejeitos para o enchimento de vazios em minas não é tão amplamente utilizado se comparado com países que buscam a sustentabilidade em suas atividades como é o caso do Canadá, Escandinávia e Austrália (Germani, 2002).

Em virtude da exaustão gradativa de reservas de fácil acesso à exploração a céu aberto, projeta-se para o futuro um aumento significativo de exploração mineral por métodos de lavra subterrânea (Silveira, 2000, citado por Silva, 2010).

Portanto, as empresas mineradoras devem planejar a médio e longo prazo, juntamente com seu plano diretor, novas alternativas que assegurem a disposição de seus rejeitos gerados de forma mais segura, sustentável e economicamente viável. Assim, temos neste cenário a utilização de rejeitos para enchimento de minas subterrâneas (*backfill*) como alternativa e solução à deposição destes em superfície (Gama e Torres, 2005 citados por Vissotto, 2013).

No primeiro capítulo, será abordado um breve conhecimento do trabalho de forma a mostrar a importância e o principal objetivo do tema. Para o segundo capítulo, realizou-se a revisão

bibliográfica caracterizando os principais tipos de enchimento de rejeitos utilizados para o preenchimento de vazios gerados na mineração, além de uma prévia descrição dos principais métodos de exploração em minas subterrâneas com a possível utilização de rejeitos para enchimento destes vazios. O terceiro capítulo traz os benefícios ao se utilizar estes rejeitos como enchimento, tratados na visão geotécnica e de sustentabilidade. No capítulo 4, é feita a conclusão do trabalho, sugestões para trabalhos posteriores e, por fim, tem-se as referências bibliográficas que serviram como base a este.

1.1. Importância do tema

Por muito tempo, as mineradoras tiveram como prioridade em suas atividades o beneficiamento e tratamento de seus minérios, principais fontes geradoras de lucro, deixando em segundo plano os rejeitos e os estéreis gerados, assim como seus métodos de disposição onde por muitas das vezes apresentavam projetos precários de engenharia, uma vez tratados como produtos sem valor econômico (Gama e Torres, 2005 citado por Vissoto, 2013).

Conforme mencionado, há dois tipos principais de resíduos sólidos gerados pela atividade de mineração: os rejeitos e os estéreis. Como objeto de estudo deste trabalho, tem-se o foco na quantificação dos rejeitos de mineração de 14 substâncias minerais cujos critérios de escolha entre as cercas de 80 substâncias mineradas no país foram: a quantidade da produção bruta, a quantidade e toxicidade dos rejeitos e a disponibilidade de informações para o diagnóstico.

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (2012), só no Brasil, entre os anos de 1996-2005, houve um salto de 202 milhões para 290 milhões de toneladas de rejeitos gerados pela atividade de mineração, ou seja, um aumento equivalente a 1,4 vezes, onde os principais bens minerais lavrados são: o ferro (correspondendo a 35,08% do total de rejeitos gerados pela atividade), o ouro (com 13,82%), titânio (com 12,55%) e por fim o fosfato (com 11,33%) conforme observa-se na Figura 1, que evidencia a distribuição média de cada substância mineral na geração de rejeitos da atividade mineral entre os anos 1996-2005 no Brasil.

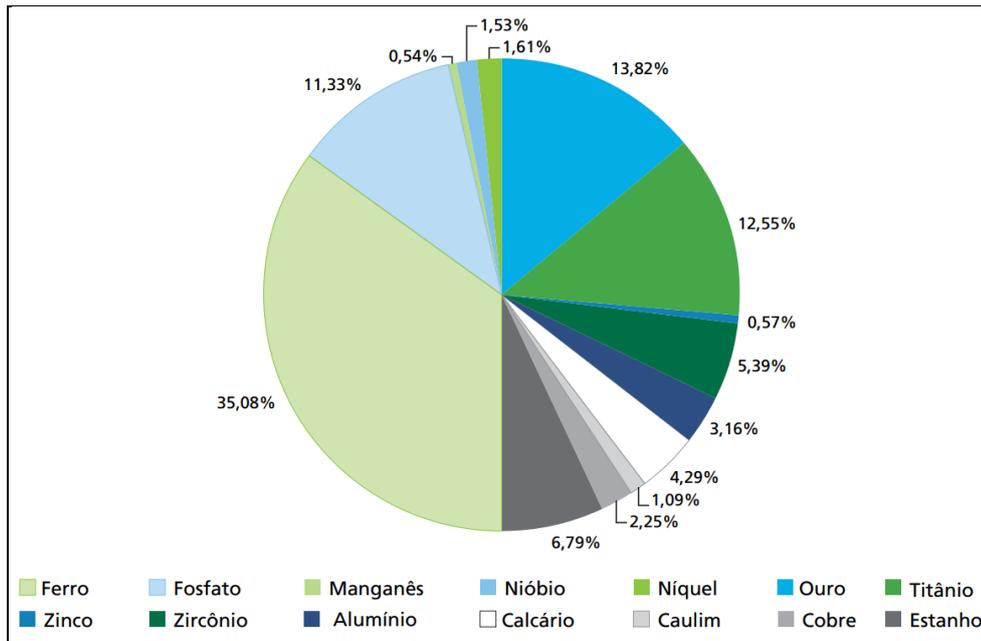


Figura 1 - Contribuição percentual média de cada bem mineral extraído na geração de rejeitos da atividade de mineração entre os anos de 1996-2005 (IPEA, 2012).

Ainda de acordo com IPEA (2012), estima-se que a quantidade anual de rejeitos gerados pela atividade de mineração irá quase que dobrar, passando dos 348 milhões de toneladas em 2010 para 684 milhões em 2030, sendo o ferro a principal substância geradora (41,38%), seguido do fosfato que passa a ter maior destaque (9,89%), o ouro (9,74%) e o titânio (8,93%), conforme observa-se na Figura 2 da contribuição média de cada substância entre os anos de 2010 a 2030. Para a estimativa desses dados, utilizou-se como principal fonte de informação os relatórios gerados pelo Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia (Projeto Estal), do MME, cujos relatórios serviram de subsídio para a elaboração do Plano Nacional de Mineração 2030.

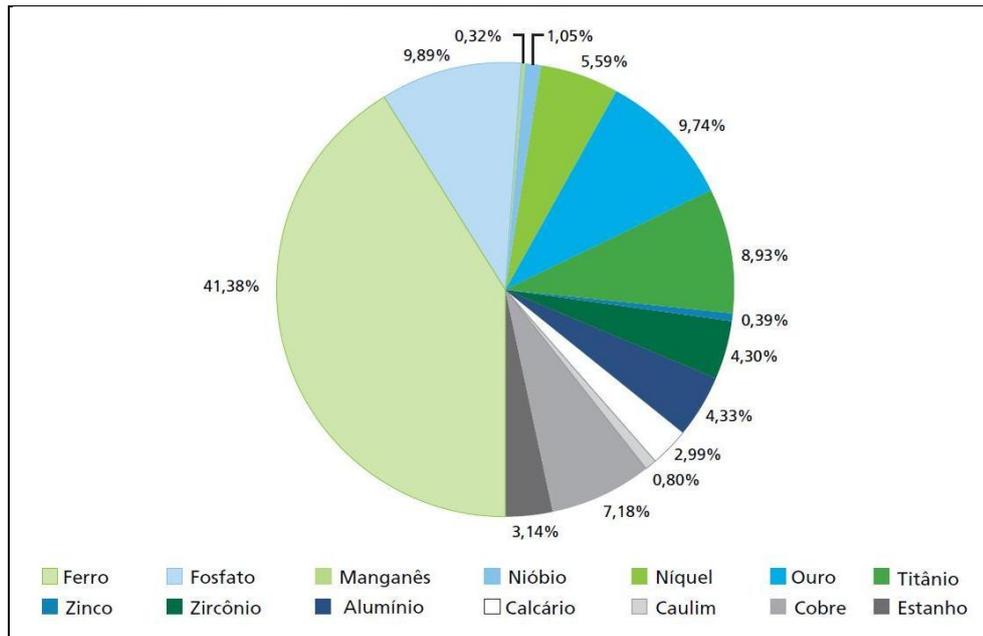


Figura 2 - Contribuição média projetada de cada bem mineral na geração de rejeitos da atividade de mineração entre os anos de 2010 a 2030 (IPEA).

Nesse contexto, a geração de rejeitos nas atividades de mineração e o método pelo qual são dispostos possuem grande relevância no âmbito socio-ambiental e devem ser tratados com alto grau de importância, uma vez que podem apresentar riscos inerentes caso não planejados, operados e/ou mantidos adequadamente. O Plano Nacional de Mineração 2030 explicita:

o setor mineral deve estabelecer uma clara diretriz quanto à reciclagem de metais e de outros minérios, considerando-se a entrada em vigor da Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Essa Lei responsabiliza todos os elos das cadeias produtivas de grandes, médias e pequenas empresas sobre o processo de coleta, destino, reciclagem e restituição dos descartes sólidos, incluídos aí os eletroeletrônicos. A Lei, quando regulamentada, intensificará a logística reversa, também chamada de logística “verde”, e ampliará as atividades de reciclagem no País (BRASIL, PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO 2030, 2010, p.62).

Algumas atividades já têm feito a recuperação em antigos depósitos, no minério de ferro, no ouro (Vilas Boas, 2016), no cromo (Silva, 2016), entre outros, com o retratamento.

Há diversos casos de reaproveitamento intenso de materiais ao longo dos processos de lavra e tratamento de minérios, algumas vezes retratando-se rejeitos depositados por longos períodos de tempo. Depósitos de estéril e rejeitos da planta que ainda contêm componentes valiosos constituem um potencial recurso futuro. Tecnologias novas ou melhoradas podem permitir

que sejam recuperados elementos valiosos contidos em depósitos estratégicos e barragens de rejeitos, que foram perdidos no processamento anterior ou produtos considerados como estéril no passado se tornem valiosos em nova ordem econômica. A blendagem é feita com ROM para assegurar teor de entrada na usina dentro da faixa requerida para determinado elemento. O custo de retratamento de rejeitos é muitas vezes menor que o processamento do minério original, porque grande parte do custo já é conhecido, particularmente na lavra e cominuição.

Existem várias plantas de retratamento e aplicações pelo mundo, incluindo-se minérios de ouro, ferro, cromo, urânio, cobre, diamante, platina, entre outros.

A redução ou eliminação de rejeitos descarregados pelo retratamento também reduz impacto ambiental do estéril.

Existe tendência também para o estudo do aproveitamento de rejeitos de atividades minerais, como alternativa a outros materiais, a exemplo de areia artificial a partir de finos de brita, o emprego de rochas contendo potássio para uso como fertilizante, rejeitos de beneficiamento de minério de ferro para utilização em estradas em substituição à brita, entre diversos outros casos.

Há pressão crescente na mineração para que rejeitos de beneficiamento sejam usados, por exemplo, para preenchimentos de minas (*backfill*), visando à restauração das áreas mineradas, ou que sejam cuidadosamente dispostos. Ao utilizar rejeitos em galerias subterrâneas lavradas, de forma a reciclá-los e garantir a sustentação estrutural, tem-se uma medida mitigadora de riscos socioambientais, permitindo a viabilização estrutural e econômica de minas subterrâneas.

Várias minas têm utilizado ou estudado a colocação de enchimento nos vazios para solução de problemas ambientais e de sustentação em suas cavidades. A exemplo estão as minas de carvão no Brasil que, devido ao seu elevado teor de cinza, faz-se necessário realizar o beneficiamento gerando uma enorme quantidade de rejeitos que, se não depositados de forma correta e controlada, podem desencadear em drenagem ácida e até mesmo na combustão espontânea das pilhas, afetando drasticamente o ecossistema. Além disso, ao utilizar os rejeitos para preenchimento das cavidades, têm-se a solução para problemas relacionados a estabilidade de áreas urbanas que avançaram sobre regiões de minas de carvão abandonadas evitando a subsidência dessas áreas (Barbosa, 2010).

Existem várias plantas de retratamento e uma variedade de aplicações pelo mundo. A Companhia EastRand de ouro e urânio fechou as operações em 2005 e 28 anos depois já tratou novamente cerca de 870 M t de rejeitos de ouro em Joanesburgo, produzindo 250 t de ouro. Também em 2005, a mina subterrânea fechou em Kimberley, deixando a operação de retratamento como a única fonte de produção de diamante. Alguns produtores de platina na África do Sul passaram a operar plantas de retratamento para recuperação, tendo ainda cromita como subproduto da extração de um corpo de minério bastante presente nas minas, o UG2 Reef. Os rejeitos da histórica mina Timmins (de ouro, no Canadá) são igualmente reprocessados (Wills, 2011).

O ouro tende a dominar essas situações por causa do valor do produto, mas existem outros exemplos, tanto já operados, em operação, como em potencial de disposição estratégica de estéril e/ou reaproveitamento de rejeitos, como carvão na Austrália, rejeitos de urânio e cobre na Índia, cobre na Zâmbia, cobre e cobalto no Congo (Wills, 2011).

A exemplo de reaproveitamento de materiais ao longo dos processos de lavra e tratamento, tem-se a empresa FERBASA: o rejeito da barragem da mina a céu aberto é parte da nova alimentação da usina de tratamento; a escória do forno é tratada e parte do material segue no processo de fabricação de ligas e o rejeito vira brita para construção civil; o rejeito da fabricação de ligas de silício é matéria-prima na fabricação de concreto reforçado para sustentação de escavações da mina subterrânea (Silva, 2016).

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é apresentar a utilização de rejeitos das atividades de mina como elemento estrutural e de sustentabilidade de escavações subterrâneas.

Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Enchimento

Acredita-se que a utilização de enchimento para preenchimento dos vazios gerados pela exploração mineira tenha se iniciado ao fim do século XIX, ocorrendo quase que naturalmente devido ao processo de acumulação de enrocamento dos trabalhos desenvolvidos ou até mesmo pela colocação dos rejeitos mineiros (McLeod, 1992 citado por Gomes, 2016).

Define-se como *backfill* o rejeito da lavra que é utilizado para o preenchimento de uma mina subterrânea. Nos últimos 30 anos, a devolução de parte do rejeito em subsolo resultou em benefícios ambientais e geomecânicos, o que proporcionou um maior interesse pelas empresas em adotar o *backfill* e conseqüentemente a realização de mais estudos para a compreensão do comportamento e propriedades físicas dos diferentes tipos de enchimento (Vissoto, 2013).

Para a classificação do *backfill*, leva-se em consideração o material utilizado e o mecanismo de transporte do mesmo. O enchimento pode ser cimentado ou não e os 3 tipos mais utilizados são: o *hydraulicfill*, *pastefill* e *rockfill*.

Contudo, o enchimento deve ser realizado com materiais inertes e efetuados em condições adequadas, que garantam sua estabilidade química e a não alteração de sistemas aquíferos, pois quando se utiliza o enchimento em polpa, por exemplo, a drenagem dessa água torna-se mais uma questão importante a ser tratada, requisitando a implementação de sistemas de controle das águas com o intuito de assegurar que o lugar de trabalho permaneça seco (PUC-RJ, 2016).

A Figura 3 apresenta a consistência típica de um *backfill* utilizado na mina subterrânea de potássio Boulby Mine, no Reino Unido.



Figura 3 - Consistência de um *backfill*, Boulby Mine, Reino Unido (Paterson e Cooke, 2003).

2.1.1. *Hydraulicfill*

Hydraulicfill ou enchimento hidráulico tem como principal composição rejeitos finos com uma porcentagem de sólidos variando entre 50% a 70%, de forma a serem transportados por um sistema de bombas e tubos com fluxo turbulento. Devido ao elevado teor de água, deve-se levar em consideração sistemas de drenagem e contenção uma vez que a água exerce uma pressão adicional. Além disso, caso o enchimento tenha superfície livre e exposta, é necessário a utilização de ligantes (geralmente o cimento Portland) de forma a garantir a sua sustentação em superfícies verticais. O enchimento hidráulico também pode ser utilizado como suporte primário de maciço de longo prazo e para o controle da subsidência em minas que apresentam rochas resistente, uma vez que este tende a se fluir e preencher os vazios gerados, distribuindo as tensões (Gomes, 2016).

Na Companhia Nitroquímica/Votorantim, em Morro da Fumaça – Santa Catarina, o método de lavra é por corte e enchimento. Conforme o Balanço Mineral Brasileiro de 2001, estima-se uma capacidade de produção de 6.000 toneladas de fluorita nas Minas III e IV. O transporte, a partir da lavra, consiste na passagem de minérios verticais em dois estágios e com grelha de malha quadrada. O minério, após desmontado, é conduzido por meio de carregadeiras

elétricas do tipo “bob-cat” até os chutes e carregado em vagonetas, sendo que nas zonas de maior estabilidade, adota-se o método de recalque. Para o enchimento, utiliza-se o mecanismo hidráulico (Silva, 2017).

Diversos métodos são utilizados para estudar a distribuição de carga nas escavações com *backfill*. Há modelos físicos, analíticos, de medições em campo e de modelagem computacional, sendo os modelos numéricos os mais flexíveis, abordando análises de tensão e deformação.

2.1.2. *Pastefill*

Pastefill ou enchimento de pasta tem como composição rejeitos finos e cimento como ligante, apresentando uma porcentagem de sólidos entre 78% a 87%, o que torna-se desnecessário a realização de drenagem da água, considerando que ela é utilizada como hidratante do cimento e por sua vez incorporada na sua matriz. A grande vantagem em relação ao *hydraulicfill* é que para este tipo de enchimento, a quantidade de água é suficiente para hidratar o cimento, não sendo necessário a utilização de grandes quantidades do ligante para atingir a resistência desejada. Por outro lado, a menor fluidez faz com que os mecanismos de transporte tornam-se mais caros que os utilizados pelo *hydraulicfill* (Gomes, 2016).

Na Mina Caraíba, em Jaguarari – Bahia, a implementação do sistema de aterramento em pasta, conforme observa-se à Figura 4, tornou-se um sucesso para a expansão da mina. O uso de pasta contribuiu na redução da utilização de água, além da disposição de estéreis em superfície. Outro fator relevante se deu que, a partir da utilização do enchimento, foi possível realizar a lavra dos pilares entre os painéis, pilares de soleira e pilares intermediários culminando assim na duplicação da reserva e redução da diluição do minério de cobre (Cavalcante, 2013, citado por Silva, 2017).



Figura 4 - Realce preenchido com *pastefill* na Mina Caraíba, Jaguarari, Bahia (Andrade Filho, 2002).

2.1.3. *Rockfill*

Rockfill ou enchimento de enrocamento apresenta em sua composição agregados (fragmentos de rochas) juntamente com rejeitos finos, tornando este tipo de enchimento por vezes mais caros, já que há maior necessidade na quantidade de ligante a fim de se atingir a resistência desejada. Para o transporte, geralmente utilizam-se sistemas mais simples de equipamentos projetados para o material mais grosseiro e tubos e bombas para transportar o material hidráulico e fino (Gomes, 2016).

A Carbonífera Catarinense, localizada no município de Lauro Muller/SC, emprega o método de Câmaras e Pilares com a detonação por explosivos de forma a fragmentar o carvão na Mina Bonito I. Após o beneficiamento do carvão, parte do rejeito é utilizado como *rockfill* e transportado para o preenchimento das galerias, onde é disposto a uma distância entre 20 cm e 30 cm do teto das galerias a fim de contribuir com o confinamento dos pilares. A Figura 5 mostra a foto do material aguardando ser acumulado e espalhado num realce.



Figura 5 - Fotografia do material utilizado como enchimento (*rockfill*) na Mina Bonito I (Zingano *et al*, 2009).

2.2. Métodos de extração em minas subterrâneas com a possível utilização de rejeitos como enchimento de espaços vazios

Para os diversos métodos de extração em minas subterrâneas deve-se levar em consideração alguns fatores restritivos e importantes, tais como: tamanho do corpo mineralizado, teor, forma, profundidade, mergulho e competência das rochas hospedeiras e do minério. Para este trabalho, será feita uma prévia abordagem dos métodos para os quais se tem a possível aplicação de enchimento (*backfill*).

2.2.1. Método por Câmaras e Pilares (*Room and Pillar* ou *Bord and Pillar*)

No método por câmaras e pilares, as principais condições consideradas para a escolha são: competência do maciço, estado de tensões *in situ* e as condições geométricas nas quais o corpo de minério foi formado, uma vez que, em atividade de extração, o minério é vastamente escavado abandonando pilares como mecanismos de sustentação e de suporte aos tetos e às

paredes. Portanto, este método é amplamente utilizado em corpos mineralizados extensos e espessos de forma a garantir a viabilidade na execução e trânsito de equipamentos de lavra, além disso devem apresentar baixo mergulho e rochas hospedeiras com ótima competência (Vissoto, 2013).

Devido às condições supramencionadas, a necessidade na utilização de suportes de apoio e sustentação artificiais neste método geralmente é baixa, portanto o uso de enchimento é tomado mais como solução para disposição dos rejeitos gerados.

A exemplo deste método, tem-se a Mina Buick localizada próximo a cidade de Boss, Missouri, nos Estados Unidos. Responsável pela extração de chumbo, cobre e zinco, esta mina utiliza o método de lavra por câmaras e pilares com enchimento (*backfill*) de dolomita de pedreira (Tesarik *et al.*, 2003, citado por Vissoto, 2013). Já no Brasil, a Mina da Passagem, localizada no município de Mariana, Minas Gerais, atingiu os 410 metros de profundidade durante as atividades de extração de ouro utilizando o método de câmaras e pilares, porém atualmente encontra-se exaurida e aberta a visitas como um atrativo educacional e turístico no município (Germani, 2002, citado por Figueiredo, 2014).

A Figura 6 apresenta um modelo esquemático da utilização do método de câmaras e pilares. Neste modelo, a operação de lavra é realizada com avanços de baixo para cima dentro do corpo mineralizado onde observam-se estruturas de pilares de minérios abandonados para a sustentação dos tetos e das paredes. Também conhecida como *step mining*.

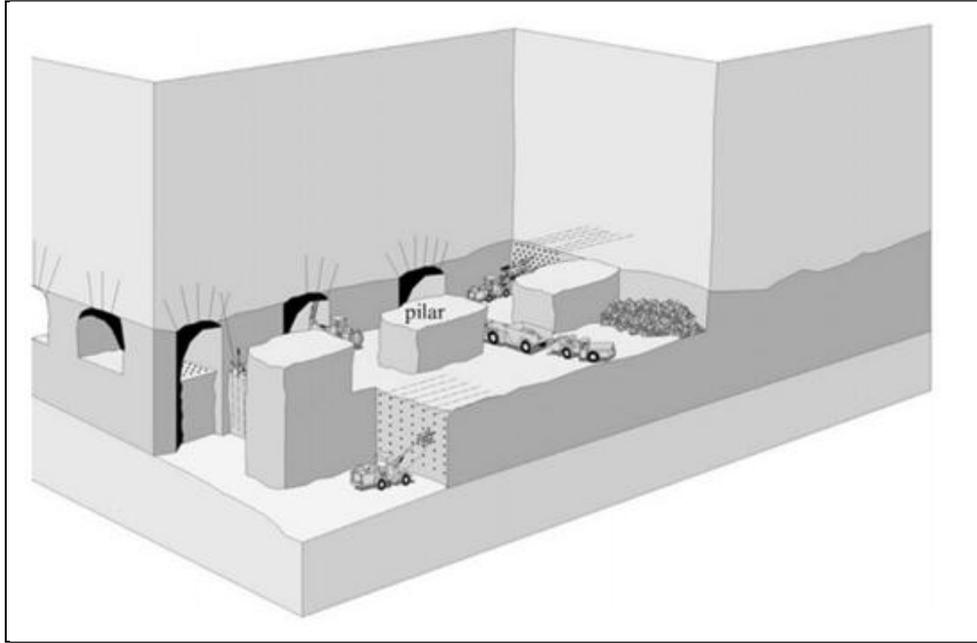


Figura 6 - Método de lavra por câmaras e pilares (Brady e Brown, 2004).

2.2.2. Método por Corte e Enchimento (*Cut and Fill*)

Para o método de corte e enchimento, as variantes relevantes e de maior utilização se referem a corpos mineralizados mais estreitos, de considerável extensão vertical e que apresentam ângulo de mergulho médio a alto, conforme Silva (2017). Este método, também é bastante utilizado em corpos com características mais irregulares, que apresentam diferenças em teores ao longo de sua mineralização e com rochas hospedeiras de média ou baixa competência. Nesse método, principalmente na lavra ascendente, apenas pequenas áreas de parede são expostas e por um pequeno período de tempo, uma vez que a lavra é conduzida de forma ascendente e em tiras da base para o topo do alargamento. Esta altura da seção de lavra (fatia ou tira) é definida pela competência das rochas encaixantes, sendo portanto aplicável a corpos de minério descontínuos em que a diluição é tida como um problema para os outros métodos de lavra (Hartman, 1982 citado por Vissoto, 2013).

No Canadá, a Falconbridge, responsável pela lavra de níquel próximo a cidade de Sudbury, ao norte de Ontário, tem uma produção de aproximadamente 70% utilizando o método por corte e enchimento em recuo. Para o enchimento, a empresa utiliza areia e cascalho glacial (capeamento de baixo custo), porém há a necessidade de suporte e concreto elevando assim os custos de sustentação (Silva, 2017).

A Mina Santa Isabel, em Itabirito, Minas Gerais, extraía ouro de veios de quartzo utilizando o mesmo método. Para o enchimento dos espaços vazios, utilizava-se enchimento hidráulico (*backfill*) proveniente dos rejeitos gerados na planta de beneficiamento, em alternância com o enchimento do tipo *rockfill*, com fragmentos de espessuras entre 0,80 m a 1,00 metro (Silva, 2017).

A Figura 7 apresenta um modelo esquemático da utilização do método por corte e enchimento. Nesse modelo, a operação de lavra ocorre em avanços de baixo para cima e no sentido horizontal. Posteriormente é preenchido o espaço vazio gerado para que se possa escavar no próximo nível.

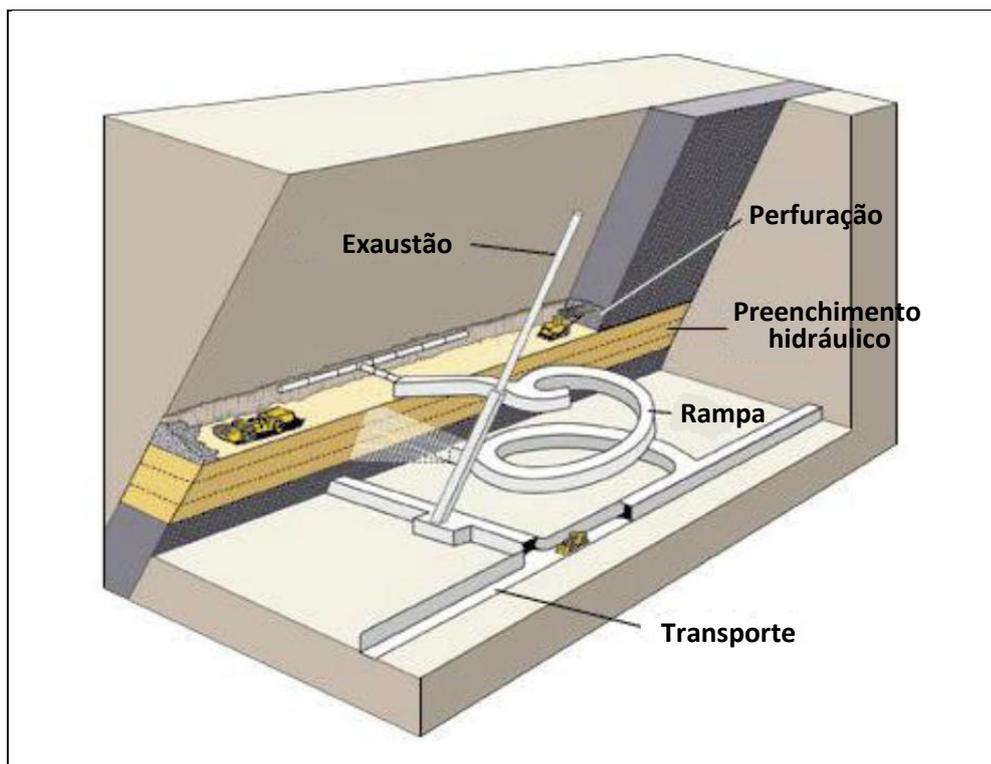


Figura 7 - Método por Corte e Enchimento (adaptado de Atlas Copco, 1997).

2.2.3. Método por Realces em Subníveis (*Sublevel Stopping*)

No método por realces em subníveis, tiras verticais de minério de grande volume são desmontadas e escoadas através dos chutes e travessas de produção. Esse método é aplicado a

corpos de minério com forte mergulho (verticalizados ou subverticalizados), regulares e que apresentam ótima competência, assim como as rochas encaixantes, sendo possível o trabalho em mais de um subnível por horizonte. Além disso, ao realizar o preenchimento dos realces abertos com o enchimento (*backfill*), tem-se um aumento considerável na recuperação da lavra auxiliado a pilares em forma de vigas verticais contribuindo para a sustentação da escavação evitando o abatimento dos mesmos (Hartman *et al.*, 2002).

A Mina de Brunswick, no Canadá, produz cobre, zinco, chumbo e prata utilizando preferencialmente o método por realces em subníveis. Os furos para desmonte e o carregamento do material desmontado é realizado por equipamentos que operam por controle remoto. Além disso, para a plataforma de trabalho da mina, é utilizado material estéril como enchimento (Silva, 2017).

No Brasil, a Mina Córrego do Sítio, em Santa Bárbara, Minas Gerais, utiliza como método de lavra variações de realces em subníveis com enchimento. A mudança no dimensionamento de seus subníveis, de 15 metros para 20 metros, culminou no aumento de até 38% em sua produção e a diminuição de até 29% em seu desenvolvimento (Silva, 2017).

A Figura 8 representa um modelo esquemático da utilização do método por realces em subníveis (*sublevel stoping*) onde observa-se a lavra em dois subníveis.

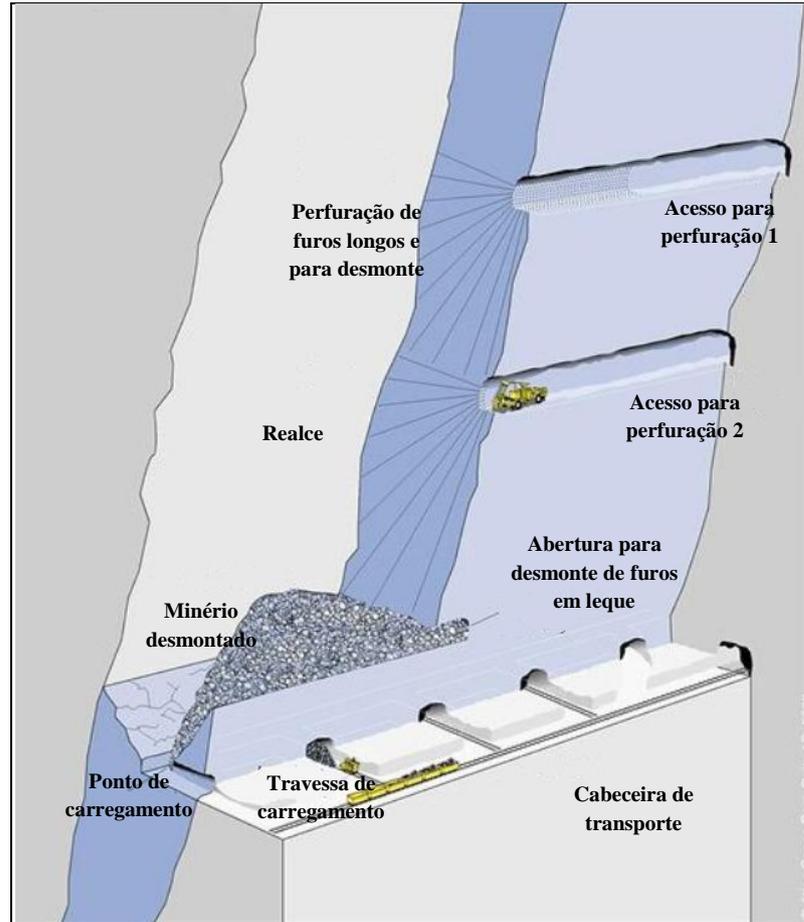


Figura 8 - Método por Realces em Subníveis (adaptado de Atlas Copco, 2000).

Capítulo 3 – A UTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO ENCHIMENTO DE MINAS SUBTERRÂNEAS

3.1. Uma visão geotécnica

A análise dos materiais que envolvem o dimensionamento de obras geotécnicas é de extrema importância para a segurança e desempenho no período de vida útil da obra. Nesta seara, a avaliação das tensões nas minas subterrâneas que utilizam o *backfill* como mecanismo estrutural, torna-se necessária quando o enchimento é usado no preenchimento de vazios de maneira a se evitar o colapso das estruturas.

Quando colocado no menor intervalo de tempo possível após a abertura dos vazios, o enchimento aumenta a sua atuação como mecanismo de suporte passivo em face de que há um melhor aproveitamento do efeito de convergência das paredes aplicadas sobre o material de forma a comprimi-lo. Outra vantagem é que, geralmente no processo de abertura dos vazios, as paredes e tetos apresentam fraturas que podem gerar individualização de blocos e estes podem ser projetados devido as altas tensões de confinamento (situação conhecida como *rockbursts*), ou até mesmo pela força gravitacional, assim ao utilizar o enchimento cria-se condições adicionais de atrito e de sustentação aos blocos suscetíveis às projeções (Costa e Silva *et al.*, 2012).

Conforme observa-se na figura 9, nos vazios abertos não é possível a transferência ou distribuição de qualquer que seja as forças, desta forma as componentes dos estados de tensões (σ_z) presentes nos tetos dos vazios são transferidas para os extremos das cavidades (paredes) originando picos de concentração de tensões importantes.

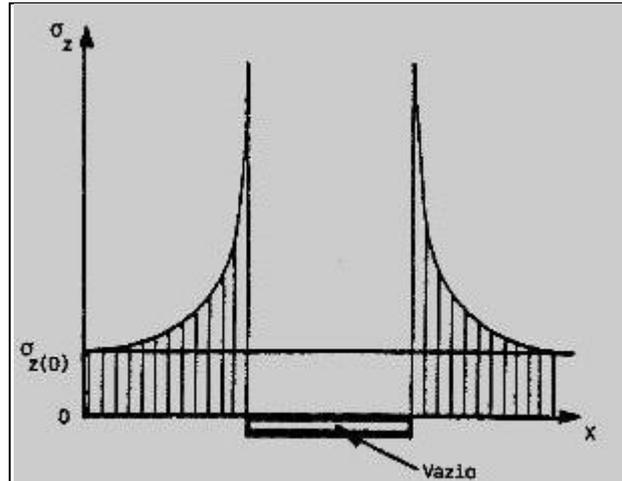


Figura 9 - Tensões verticais concentradas nos extremos de uma cavidade (Costa e Silva *et al.*, 2012).

Deste modo, ao abandonar um pilar, esse torna-se um local de transmissão das tensões entre o teto e o piso, assim como nos extremos dos vazios, conforme observado à Figura 10, o que pode acarretar em fraturas por corte no meio dos pilares já que nesta região, horizontalmente, as componentes dos estados de tensões tornam-se nulas. Após a fratura, os picos de tensões verticais são direcionados para o interior dos pilares, como de acordo com a Figura 11.

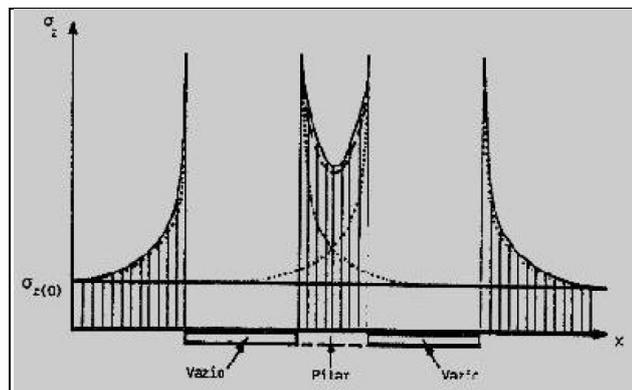


Figura 10 - Tensões verticais concentradas num pilar abandonado de uma cavidade (Costa e Silva *et al.*, 2012).

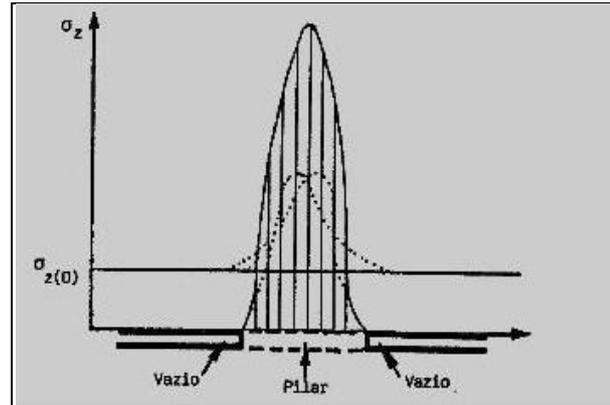


Figura 11 - Localização do máximo de tensão vertical num pilar após fratura (Costa e Silva *et al.*, 2012).

Ao utilizar enchimento como mecanismo de confinamento dos pilares abandonados, tem-se a mobilização estrutural do pilar e a redistribuição dos estados de tensões (σ_z), refletindo diretamente na percepção da diminuição dos picos de tensões antes notórias nos extremos das cavidades e nos pilares abandonados (Figuras 9 e 10), de forma a se evitar o colapso desses pilares e prevenir fenômenos de instabilidade regionais, como é o caso da subsidência e do abatimento do terreno adjacente às minas (Costa e Silva *et al.*, 2012).

À medida que o material útil vai sendo extraído, o vazio formado é preenchido com outro material, de forma a promover a sustentação do teto. O desmonte da face é integral, sendo acompanhado à distância pelo enchimento. O teto na frente de trabalho é normalmente sustentado com estruturas apropriadas para evitar a eventual queda de blocos mais ou menos soltos ("chocos") (Silveira, 1987, citado por Silva, 2017).

3.1.1. Propriedades dos enchimentos

Sabe-se que os enchimentos são constituídos principalmente por rejeitos (provenientes do tratamento do minério), estéreis (provenientes das operações e atividades de desenvolvimento da lavra), agregados ou rochas (adicionados), água e ligantes (geralmente cimento).

Estudos têm se concentrado na composição dos materiais usados no *backfill*, incluindo-se distribuição de tamanho das partículas agregadas, dosagem de cimento e influência das misturas de cimento, conforme Wang e Villaescusa (2000). Para isso, cada tipo de enchimento pode ser caracterizado de acordo com as seguintes propriedades:

Composição granulométrica: quanto menor for a distribuição granulométrica das partículas no enchimento, menor será o volume de vazios e conseqüentemente terá menos água, bem como maior densidade logo, maior resistência. Também há influência no fluxo, a exemplo se dá nos enchimentos de pasta onde a quantidade de finos é maior e estes têm maior capacidade em reter água o que evita que ela seja drenada e assim manter o fluxo constante (Henderson e Revell, 2005, citado por Gomes, 2016).

Teor de umidade: o conhecimento deste permite corrigir e controlar a quantidade necessária de água para melhoria no transporte de disposição. Além disso, a água adicionada pode influenciar as características dos enchimentos, uma vez que no geral utiliza-se águas mais salinas que as potáveis podendo ocasionar a redução na resistência total do enchimento (Wang e Villaescusa, 2000, citados por Gomes, 2016).

Coefficiente de permeabilidade: influenciando no tempo de escoamento da água, quando o enchimento encontra-se saturado, uma grande vibração, uma detonação próxima por exemplo, pode fazer com que este comporte-se como líquido, sendo denominado como efeito de liquefação. Assim, além da adição de ligante para evitar o efeito de liquefação, outro método utilizado se dá pela redução da velocidade de disposição do enchimento de forma a auxiliar a sua drenagem (Jung e Biswas, 2002, citados por Vissoto, 2013).

Mineralogia das partículas: como cada mineral possui suas características como retenção de água, resistência, abrasividade e sedimentação, a mineralogia também pode influenciar a partir das reações químicas seja nos processos de consolidação ou de resistência, uma vez que quanto maior a retenção de água por um mineral, menor será a sua resistência (Henderson e Revell, 2005, citados por Gomes, 2016).

Forma das partículas: podendo influenciar nas questões de permeabilidade, partículas mais achatadas tendem a se sedimentarem mais lentamente o que pode gerar camadas impermeáveis.

Presença de sulfetos: quando em contato com água e oxigênio, os sulfetos podem reagir produzindo ácido sulfúrico e calor o que ocasiona um atraso no tempo de cura e quebra de ligações com o cimento reduzindo assim a resistência do enchimento (Henderson e Revell, 2005, citado por Gomes, 2016).

Presença de ligantes: a quantidade e o tipo de ligante influencia no tempo de cura e na resistência dos enchimentos. Na Barrick Bullfrog Mine, conforme Hustrulid e Bullock (2001),

existem faixas de aplicação do *backfill*: para alta resistência – adição de 7% de cimento (em frentes de lavra), para baixa resistência – 3 a 4 % (em cabeceiras na lapa). O enchimento de alta resistência requer 30 dias para retorno do trabalho; caminhões que levam minério trazem o enchimento, distribuído por carregadeiras de 6 J³. A resistência de projeto é 3,5 MPa. Nessa área, ainda são relatados testes e tentativas de novos ligantes, conforme mostrado nas Figuras 12 e 13.

Aglomerante	RCU					Conteúdo água
	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	
HSM	280-344	413-415	535-496	574-559	651-642	24%
Cimento convencional	87-88	135-137	184-190	235-246	292-322	48%

Figura 12 - Análise da Resistência à Compressão, do conteúdo em água e do tipo de aglomerante usado com enchimento na Lupin Mine (Taylor e Francis, 1999, citados por Silva, 2012).

Tipo de aglomerante	Módulo elasticidade -E (kPa)		RCU (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
6% cimento pozolânico	120	166	0,78	1,13
8% cimento pozolânico	200	283	1,36	1,55
6% cimento Portland	181	207	1,32	1,67
8% cimento Portland	273	320	2,16	2,7
6% cimento Portland, 30% escória	397	-	3,2	4
5% cimento Portland, 15% escória	202	222	1,4	1,7
5% cimento Portland, 25% escória	250	271	1,6	1,9
5% cimento Portland, 30% escória	270	300	1,85	2,25
6% cimento Portland, 15% escória	335	400	2,2	2,5
6% cimento Portland, 25% escória	316	513	2,5	2,72

Figura 13 - Análise da Resistência à Compressão na Mina Fetr (Irã), com cimento pozolânico, Portland e misturas com adição de escória de liga de cromo (Silva, 2017).

Em dadas situações, é importante verificar os riscos da reutilização de rejeitos. Para as minas de ouro de Far West Rand (África do Sul), os riscos mais significativos dizem respeito ao cianeto para a saúde e segurança dos trabalhadores com a exposição potencial a descargas e gases (que podem ser liberados onde altas concentrações no corpo de minério e rocha encaixante geram drenagem ácida de mina e elevam o pH dos rejeitos).

Apesar de existirem faixas de intervenções de engenharia como espessamento de rejeitos e desintoxicação que podem servir para reduzir o perfil de risco, as estratégias de mitigação

mais efetivas (e de menor custo) parecem estar relacionadas aos sistemas de segurança baseados no comportamento que levam a força de trabalho a identificar e mitigar riscos relacionados ao cianeto e tomar a ação apropriada para esses riscos eventuais.

3.2. Uma visão sustentável

Atualmente, empresas de mineração têm buscado mecanismos e formas de minimizar problemas ambientais e de segurança provenientes das atividades de extração mineral, principalmente no que concerne o armazenamento e disposição dos rejeitos gerados nos processos de beneficiamento.

Deste modo, visando uma perfeita harmonia estrutural e sustentável, projetos ambientais vêm sendo apresentados com a aplicação do *backfill* para o preenchimento de vazios nas minas, de forma que se possa reduzir os custos de recuperação das áreas degradadas pelas atividades minerárias e a mitigação de possíveis impactos ambientais que possam surgir com a disposição dos rejeitos em superfície, principalmente em pelo método de barragens (Gama e Torres, 2005).

Hasan *et al.* (2013) também lembram o desafio do tempo necessário para se remover o excesso de água, que contribui para as altas pressões geostáticas durante e após o enchimento, mas também põe riscos como a liquefação e corridas de material de enchimento.

3.2.1. Melhor condição de trabalho

No interior de uma mina subterrânea, diversos e sucessivos ciclos de trabalhos ocorrem simultaneamente. A exemplo, tem-se a perfuração, o carregamento e detonação de explosivos, gerando material útil, escombros e resíduos (entulhos). A organização das plataformas de trabalho impede que o material útil projetado se misture com o material de entulho evitando a indesejável diluição do minério. Nesta seara, as condições dessas plataformas são extremamente importantes para garantir a eficiência na circulação dos equipamentos e da mão de obra. Portanto, para se evitar que um equipamento móvel sofra algum tipo de impedimento durante seu traslado, os pisos das plataformas devem ter condições suficientemente necessárias para o deslocamento do mesmo.

O enchimento desempenha funções únicas nesse método. A mais óbvia e importante é o suporte das paredes eventualmente fracas do depósito mineral. Nessa consideração, a compressibilidade é a mais crítica propriedade do enchimento, variando de 25 % para o enchimento seco assentado mecanicamente a 5 - 10 % para o assentado hidraulicamente ou pneumáticamente. A segunda função do enchimento é prover uma plataforma de trabalho sobre a qual a próxima tira de minério é perfurada e detonada. Por causa do empolamento, somente cerca de 0,6 t de enchimento é requerida por tonelada de minério lavrada (Silva, 2017).

De acordo com Costa e Silva *et al.* (2012), a utilização de rejeitos do tipo hidráulico (granulometria de até 5 mm) para a produção de pisos nas plataformas de trabalho proporciona a melhoria da qualidade dos mesmos, uma vez que garantem uma melhor permeabilidade dos agregados e conseqüentemente melhor consolidação natural do material, gerando pisos moderadamente lisos e com boa resistência, tornando possível até mesmo a utilização de veículos do tipo LHD que chegam a pesar 40 t quando carregados.

A aplicação padrão, em lavra ascendente, requer que uma tira de minério, com 2,4 m a 3 m de espessura, seja removida do teto do alargamento. A altura da seção de lavra é determinada pela resistência da rocha encaixante.

Após a segurança do teto ser executada, o minério desmontado é removido através de passagens de minério ligadas ao nível inferior. Quando a rocha estiver removida, as passagens de rocha são estendidas para cima até a altura correspondente à tira de minério removida e, então, o alargamento é enchido com estéril e um outro ciclo é então iniciado. O enchimento é executado integralmente com o ciclo de lavra e não após completar a lavra de todo o painel.

Ainda de acordo com Costa e Silva *et al.* (2012), outra melhoria da condição de trabalho dentro dos vazios subterrâneos se dá no processo de corte e enchimento por desmontes descendentes criando-se tetos “falsos” que protegem a mão de obra e equipamentos. Neste modelo, ao retirar fatias de minério, são colocados geralmente suportes como malha metálica e ancoragens (às vezes cabos), ou mesmo pisos de madeira em estrados, de forma a se conseguir condições de auto sustentação pelas forças verticais de atritos originadas, permitindo os trabalhos em nível subjacente.

Entretanto, a colocação segura e eficiente de enchimento em pasta requer um entendimento detalhado das características da pasta da produção à exposição final. A mobilização da pasta não curada, como resultado de ruptura da barreira, é um risco à segurança e pode levar a

consequências significativas, incluindo-se perigo para o pessoal, dano à propriedade, perdas de produção e atrasos.

O enchimento é constituído por material granular (ou solo artificial) e o assunto deve ser abordado à luz dos conhecimentos de mecânica dos solos e das rochas. Gomes (2016) desenvolveu modelos de dimensionamento de simples utilização com base em métodos de cálculo por elementos finitos, que permitam o dimensionamento adequado das barricadas (ou portas de enchimento, para o autor), em função das dimensões e do plano de construção que se pretende usar nessas estruturas de contenção, recorrendo a dados fornecidos pela mina Neves Corvo.

A ruptura das barricadas (portas) pode originar acidentes de trabalho e perdas financeiras. Em Bronzewin, na Austrália, uma porta em uma mina de ouro rompeu-se, à profundidade de 260 m, despejando 18.000 m³ de enchimento causando a morte de 3 pessoas e o arraste de todo o maquinário pesado da mina, em junho de 2000 (Sivakugan, 2008).

Segundo Infomine (2008), na Mina Cayeli (Turquia), desde a introdução do enchimento em pasta em 1999, aconteceram três maiores incidentes com ruptura de barreiras. Felizmente, não aconteceu nada mais grave com o pessoal. As rupturas, entretanto, foram muito violentas e resultaram em danos sérios a equipamentos e causaram atrasos significativos de produção.

Investigações pós-rupturas revelaram que casos ocorreram em realces pequenos e cegos durante o estágio final de enchimento enquanto era comprimido. Essas rupturas foram atribuídas a um dos ou à combinação de fatores de acordo com o Infomine (2008):

- taxa de enchimento;
- enchimento contínuo ou inadequado plug no tempo de cura;
- sobre-enchimento na fase de compressão, devido à ausência, bloqueio ou uso inadequado dos furos de respiro;
- ausência de manejo adequado e controle de monitoramento;
- projeto inadequado da barreira.

3.2.2. Redução dos impactos negativos da disposição de rejeitos em superfície

O uso de *backfill* em minas subterrâneas é tomado por uma das razões seguintes ou combinação delas: estabilização do maciço, redução do aquecimento direto na mina, melhoria

da utilização do ar de ventilação e/ou redução do volume de estéril a ser disposto em superfície.

Quando dispostos em superfície, os rejeitos criam diversas condições de riscos como é o caso da alteração do pH e da composição dos solos e águas subterrâneas através do mecanismo de percolação de sedimentos pela ação de águas pluviais e a possível contaminação atmosférica, no caso de rejeitos que apresentam menores granulometrias, resultante essencialmente pela ação dos ventos que transportam estas partículas mais leves. Em alguns casos específicos, há a possibilidade de combustão dos rejeitados finos de sulfetos e carvão, contaminação radioativa a depender das substâncias minerais presentes, além de criar uma agressão paisagística regional uma vez expostos, como citado por Costa e Silva *et al.* (2012).

Portanto, utilizar os rejeitos como enchimento dos vazios em minas subterrâneas contribui susceptivelmente para a redução destes efeitos elencados, porém a utilização destes torna-se restritiva uma vez que parte dos rejeitos provenientes das atividades minerárias necessita de uma readequação granulométrica, podendo gerar material que não atenda às características geomecânicas para utilização como enchimento, o que implica a disposição desses novamente em superfície.

3.2.3. Redução de custos de produção e aumento de recuperação de minério

As irregularidades das jazidas (em mergulho e potência, por exemplo), a distribuição heterogênea dos teores de minério, as características geomecânicas dos mesmos e das rochas encaixantes são fatores que influenciam a viabilidade, o método e o desenvolvimento de uma mineração.

A exemplo, o método de corte e enchimento apresenta maior flexibilidade em relação ao sequenciamento das atividades de operação. Mesmo sendo necessário uma mão-de-obra mais especializada, maiores custos de transporte e utilização dos materiais de enchimento, ao final, o valor total desses custos operacionais, considerando os de produção, processamento e ambiental, se tornam menores do que os demais métodos.

Costa e Silva *et al.* (2012) exemplificam que, se comparado, o método de corte e enchimento propicia um aumento de até 15% do teor médio recuperado e redução de até 40% da diluição, reduzindo significativamente os custos de remoção, transporte e processamento de minérios,

se comparado com as iguais quantidades do concentrado final. Além disso, ao utilizar enchimento para preenchimento de vazios subterrâneos, alguns possíveis pilares verticais e horizontais podem ser recuperados, assim como zonas de difícil acesso, permitindo maior recuperação das jazidas.

Cavalcante (2013) relata alguns dos aspectos positivos a exemplo do caso da Mineração Caraíba, tais como a seguir.:

- implementação do sistema de aterramento com pasta culminou no sucesso da expansão da mina subterrânea;
- a lavra dos pilares entre os painéis, pilares de soleira e pilares intermediários (entre realces) essencialmente duplicou a reserva e diminuiu a diluição do minério;
- a melhoria na estabilidade das escavações assegurou grau mais elevado de segurança, em escavações de desenvolvimento e nos trabalhos de extração;
- a utilização de pasta resultou na redução de água e estéril dispostos em superfície;
- quase toda a água a partir da planta é recuperada com a filtragem de sólidos;
- o período de retorno do investimento no sistema de preenchimento com pasta foi pouco mais de dois anos.

Desta forma, ao reduzir os volumes de estéreis e dos rejeitos do beneficiamento que seriam dispostos em superfície, têm-se uma diminuição dos custos ambientais como de construção, manutenção e conservação das barragens de rejeitos, o que também reduz a possibilidade do surgimento de impactos negativos provenientes da poluição do meio ambiente.

Ademais, conforme Hasan *et al.* (2013), a indústria da mineração tem expectativas de reduzir o conteúdo em cimento, de utilização de uma barricada mais econômica, do enchimento contínuo, reduzindo o tempo de ciclo.

Remover frações ultrafinas de rejeitos aumenta as taxas de desaguamento e diminui a quantidade necessária de aglomerante na pasta de enchimento, ensinam Landriault *et al.* (2013). Autores estudaram uso de ciclones deslamadores em minas de zinco e ouro e concluíram que aumentam a viabilidade do enchimento, dependendo da massa lavrada, das características dos rejeitos, dos requisitos de resistência do enchimento e dos custos de materiais.

Estudos foram conduzidos na Mina Raleigh (ouro, Austrália), acompanhados de instrumentação em dois realces similares, um com barricada e outro sem o dispositivo. Os

realces estavam situados no mesmo subnível, separados por um outro realce. Suas dimensões médias eram 17 m de altura, 18 m de comprimento, 3,5 m de largura, inclinados de cerca de 65-70° em relação à horizontal, conforme Figura 14. A instrumentação consistiu de células de pressão e piezômetros e sistema de registro. A Figura 15 mostra barricada com drenagem (Hasan *et al.*, 2013).

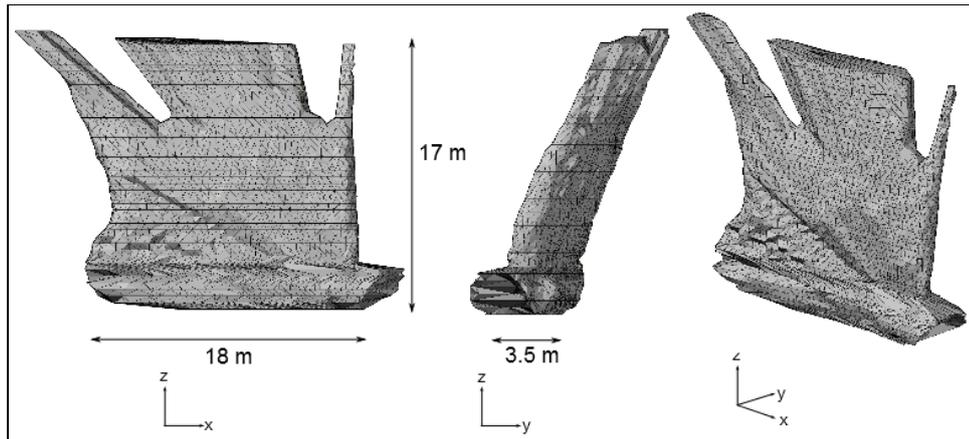


Figura 14 - Realce instrumentado na Mina Raleigh em estudos com barricadas (Hasan *et al.*, 2013).



Figura 15 - Barricada com drenagem em teste na Mina Raleigh (Hasan *et al.*, 2013).

O fluxo foi mantido com uma taxa de enchimento de 100-110 m³/h, proporcionando uma taxa de elevação de 1,7 m/h. Pisos e paredes estavam em condição seca antes do enchimento. O

fluxo de água foi monitorado e o produto da planta de rejeitos da planta de tratamento do ouro foi usado, com 14% de umidade e deslamado. Após 3 dias, o conteúdo de água drenada era cerca de 500 litros. A pressão horizontal e a poropressão dentro do realce com drenagem foram inferiores à situação sem drenagem. Autores propuseram, a partir do resultado, redução do conteúdo em cimento de 4 a 5% (Hasan *et al.*, 2013).

Capítulo 4 – CONCLUSÕES

Diante da importante relevância que a prática minerária possui na economia do Brasil e pesquisas indicando aumento significativo na geração de rejeitos a partir dessas atividades, medidas de proteção e segurança ambientais devem ser tomadas, uma vez que atualmente as empresas, em maioria, dispõem seus rejeitos em superfície.

A discussão sobre resíduos é considerada imprescindível para desenvolvimento tecnológico brasileiro. É fundamental debater alternativas para o melhor aproveitamento de resíduos sólidos, que podem ser tratados como subproduto, dependendo do uso que se faz desse material, abrindo a possibilidade de reuso desses resíduos, como matéria-prima e até novas tecnologias, propiciando desenvolvimento econômico para o país.

Deve ser estudada a eficiência do processo produtivo; maior recuperação e maior aproveitamento do minério; reaproveitamento dos resíduos sólidos, que constituem o material estéril gerado nas operações de lavra; e rejeitos do processo de beneficiamento.

A partir dos estudos bibliográficos, pode-se afirmar que, ao retirar os rejeitos dispostos em superfície e utilizá-los em preenchimento de minas subterrâneas, há melhorias nas condições ambientais locais impedindo que esses possam contaminar o solo, a água e o ar.

Numa outra perspectiva, revela-se que a utilização do método de corte e enchimento pode reduzir os custos de produção e um aumento significativo de recuperação das jazidas. Também observa-se que o preenchimento dos vazios nas minas proporciona melhores condições de trabalho dentro das mesmas, uma vez que auxilia a operação de equipamentos e máquinas internas. A exemplo tem-se a Mineração Caraíba que duplicou sua reserva e elevou o grau de segurança nas escavações e desenvolvimentos da mina.

Mesmo com os conhecimentos adquiridos com estudo das vantagens em se utilizar os rejeitados em enchimento de minas subterrâneas no decorrer deste trabalho e considerando a crescente busca da indústria de mineração a métodos de reaproveitamento de estéreis e rejeitos, se faz necessário um aprofundamento, inclusive utilizando-se de ensaios e experimentos a respeito dos mecanismos, tipos e comportamentos de enchimentos para preenchimento dos vazios, avaliando sua resistência de acordo com os parâmetros e propriedades, o comportamento dos mesmos junto aos demais dispositivos de segurança

internos das estruturas, como por exemplo das portas que asseguram este material, além de estudar seu comportamento com o passar do tempo e dos anos.

As expectativas das minerações estão em reduzir custos, por meio da redução do conteúdo em cimento no enchimento, de utilização de uma barricada mais econômica, do enchimento contínuo, reduzindo o tempo de ciclo.

Desse modo, a utilização de rejeitos das atividades de mina como elemento estrutural e de sustentação de escavações subterrâneas pode trazer benefícios técnicos e econômicos à mineração, cumprindo a função de retardar a descompressão do maciço, bem como possibilitando viabilidade do empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATLAS COPCO. Underground Mining Methods. United Kingdom, 1997.

BARBOSA, R. M. Estudo do comportamento de material de enchimento para minas subterrâneas de carvão. Porto Alegre, 2010.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock Mechanics for Underground Mining, 3ª Edição. Chapman & Hall. London, 2004. p . 628.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030): geologia, mineração e transformação mineral. 2010. 62p.

BRITANNICA. Disponível em: www.britannica.com. Acesso em 27/10/2017.

CAVALCANTE, P. Pastefill a safety solution for pillars mining. – Mineração Caraíba S. A. Brasil, 2013.

COSTA E SILVA, M.; NEVES, P. F. Utilização de rejeitados de mina como elementos estruturais e sustentabilidade nas explorações subterrâneas. Ouro Preto, 2012.

CPRM. Perspectivas do Meio Ambiente do Brasil – Uso do Subsolo. MME - Ministério de Minas e Energia. Brasil, 2002.

DNPM. Balanço Mineral Brasileiro 2001 – Fluorita. MME – Ministério de Minas e Energia, Brasil, 2001.

FIGUEIREIDO, J. R. Estudo de Viabilidade de Lavra Subterrânea de Ouro, Estudo de caso: Mina Pau-a-Pique – Yamana Gold – Brasil. Monografia de Graduação. Ouro Preto, 2014.

FORTIN, R. An analysis of barricade containment pressures during the backfill pouring process, 2008. FOSMINAS, Ouro Preto, 2010.

GAMA, C. D. & TORRES, V. F. N. Engenharia Ambiental Subterrânea e aplicações. CETEM/CYTED. Rio de Janeiro, 2005.

GERMANI, D. J. A Mineração no Brasil – Relatório Final ao PNUD. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em www.cgee.org.br.

GOMES, T. M. H. Estudo da estabilidade de portas de enchimento – Caso de estudo da mina da Somincor. Lisboa, 2016.

HARTMAN, H.L. Heart in mines, Chapter 20, Mine ventilation and air conditioning. 2nd. Ed. Ney York, 1982.

HASAN, A.; SUAZO, G.; FOURIE, A. Full scale experiments of the effectiveness of a drainage system for cemented paste backfill. PASTE. Belo Horizonte, 2013.

HUSTRULID, W. A.; BULLOCK, R. C. Underground mining methods - Engineering Fundamentals and International Case Studies. U.S.A, 2001.

INFOMINE - Paste Backfill Bulkhead Failures and Pressure Monitoring at Cayeli Mine. 2008. Disponível em: <http://technology.infomine.com>. Acesso em 22/01/2018.

IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas – Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012.

IPT. Tratamento de rejeitos é solução alternativa e economicamente viável à barragem de mineradoras. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 2016. Disponível em www.ipt.br. Acesso em 27/10/2017.

KARAS, R. L e ZINGANO, A. Relatório de Atividades Parcial - Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina. Santa Catarina, 2009.

LANDRIAULT, J.; PRIMEAU, P. A. Application of Cyclone Technology in Paste Backfill Plant Design. PASTE. Belo Horizonte, 2013.

MCLEOD, A. Arnold Black and Hydraulic Fill: Mineral Heritage Oration. AusIMM Annual Conference, Broken Hill, Australia, 1992. p. 17–21.

PUC-RJ. Controle das Águas em Projetos de Mineração, Rio de Janeiro, 2016.

PATERSON & COOKE. Disponível em: www.patersoncook.com/mine-backfill. Acesso em 27/10/2017.

SILVA, J. M. Aspectos geomecânicos da caracterização ao monitoramento do comportamento de suporte de escavações de lavra subterrânea. Jornada Medio Ambiente Subterraneo Y Sustentabilidad. Red MASYS. Ouro Preto, 2012.

SILVA, J. M. Lavra por Corte e Enchimento. DEMIN/EM/UFOP. Notas de Aula Lavra Subterrânea. 2017.

SINGH, R. H. Wastewater Quality Management in Coal Mines in the Illawarra Region. University of Wollongong – Australia, International Conference on Mining and the Environment. Australia, 1998.

SIVAKUGAN, N. Drainage issues and stress developments within hydraulic fill mine stopes. Australia, 2008.

VISSOTO, L. A. J. Análise tridimensional de mina subterrânea com ênfase na interação entre maciço e preenchimento – Caso de estudo: Mina Cuiabá. Brasília, 2013.

ZINGANO, A. C. Rede de Pesquisa Desenvolvimento e Inovação do Carvão Mineral – Projeto Backfill. Porto Alegre, 2009.

WANG & VILLAESCUSA. Backfill Research at the WASM. MassMin Conference. 2000.

WILLS, B. A. Mineral Processing Technology – An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. UK, 2011.