UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

ALEXANDRE CARDOSO DA SILVEIRA REPLE

Bulk ore sorter: um estudo de caso na mina de Phu Kham

São Paulo
2017

ALEXANDRE CARDOSO DA SILVEIRA REPLE

Bulk ore sorter: um estudo de caso na mina de Phu Kham

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção de
título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador: Prof.^a Dr.^a Ana Carolina Chieragati

Coorientador: Dr. Walter Valery Jr.

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Reple, Alexandre Cardoso da Silveira

Bulk ore sorter: um estudo de caso na mina de Phu Kham / A. C. S.

Reple -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

75 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS 2.SENSOR (USO) 3.COBRE (LAOS)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

DEDICATÓRIA

A minha família.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio das empresas envolvidas: Kalium, Metso, Phu Bia Mining Limited e PanAust Limited, que proporcionaram auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial também aos profissionais envolvidos no projeto, principalmente aos meus amigos orientadores Ana Carolina Chierigati, Walter Valery, Fabio Prati e Bento Sipoli.

RESUMO

O cenário atual das *commodities* minerais tem obrigado as empresas de mineração a otimizar suas operações e buscar soluções inovadoras para manter a lucratividade desejada de suas minas, controlar os riscos envolvidos e garantir a sobrevivência do negócio. Neste contexto, com a menor disponibilidade de minérios de alto teor, os depósitos minerais remanescentes exigem a lavra e o beneficiamento de grande quantidade de massa por tonelada de metal produzido. Apesar de apresentarem um teor médio decrescente, estes depósitos frequentemente contêm regiões com minério de teor mais elevado incorporados às porções de baixo teor ou mesmo na massa estéril. Por melhor que seja o conhecimento das reservas, a lavra seletiva dessa massa de teor mais elevado é praticamente inviável operacionalmente. A forma mais eficiente de aproveitar estas reservas é por meio do processo de pré-concentração de minério por *ore sorting* (seleção/classificação de minério). O objetivo deste processo é remover, quanto antes possível, o material com teor não econômico. A consequência imediata é uma potencial redução dos custos de processamento e do consumo de água e energia para a mesma massa de metal produzido. Existem várias tecnologias aplicáveis em pré-concentração; este estudo é focado especificamente na apresentação e discussão dos impactos causados no empreendimento mineiro de Phu Kham (PanAust), a partir da instalação e utilização do equipamento de pré-concentração, *bulk ore sorter*. Este equipamento faz uso de um sensor de ressonância magnética, e tem por objetivo a separação de grandes volumes de estéril direto no transportador de correias totalmente carregado (*in-pit* ou correia de alimentação da usina), baseando-se nos teores medidos ou inferidos a partir de seu sensor. A pré-concentração com *bulk ore sorter* é fundamentalmente utilizada para aumentar a produtividade baseada na capacidade fixa da usina e atenuar os prejuízos causados pelas incertezas nas definições de teores da mina. Isto é, a partir da maior precisão no controle do teor, pode-se reduzir a diluição e a perda de minério oriundas da operacionalização e exploração das reservas minerais, controlar o teor de corte e o teor médio na alimentação da usina ou ainda separar os diversos tipos de minérios para serem tratados em diferentes rotas no processo de beneficiamento. Este trabalho estuda a viabilidade técnica e econômica da aplicação do *bulk ore sorter* na mina de Phu Kham, no Laos. Inicialmente a tecnologia de *sorting* é apresentada, juntamente com os sensores disponíveis e o sistema diversor. Os resultados econômicos foram avaliados a partir dos dados de produção da mina no ano de 2014. Sem a possibilidade da realização de estudos de amostragem, a variabilidade do minério foi estimada a partir da variância de dispersão, uma ferramenta geoestatística. A estimativa do desempenho da separação inclui os erros associados a leitura do sensor e do sistema diversor. Avaliações econômicas foram realizadas para diferentes cenários e demonstraram que o *bulk ore sorter* tem o potencial de aumentar a produção metálica e o lucro. Este sistema de pré-concentração permite a que apenas o material com valor agregado alimente a planta de beneficiamento.

Palavras-chave: Sensores. *Ore Sorting*. *Bulk ore sorter*. Pré-concentração.

ABSTRACT

The current scenario of mineral commodities has forced the mining companies to optimize their operations and look for innovative solutions to maintain the desired profitability of their mines, control the risks involved and ensure the survival of the business. In this context, with the depletion of high grade deposits, the remaining lower grade deposits require the mining and processing of larger volumes of material per tonne of product. These low grade deposits often contain a large proportion of barren gangue. The aim of pre-concentration is to remove this barren material at as coarse a particle size and as early in the process as possible. This has the potential to reduce processing costs, energy and water consumption and possibly ore transport requirements. There are several technologies that may be applicable for pre-concentration; this work looks specifically at bulk ore sorting. This involves the separation of a large volume of barren gangue from a fully loaded conveyor belt (in-pit or plant feed belt) based on the grade as measured or inferred from a sensor measurement. Bulk ore sorting may be used to increase the production rate through fixed plant capacity, or reduce the required size of downstream processing equipment. Uneconomic or marginal reserves may be upgraded making them economic to treat and improving the resource utilisation. Bulk ore sorting could also be used to reduce dilution and ore loss in mining operations by improving grade control, or to separate ore types to treat via different process routes. Thus, bulk ore sorting has the potential to improve the profitability and reduce the environmental impact of mining operations and may be applied in different ways. This study investigates three examples of how bulk ore sorting may be employed and the associated economic benefits. The technical and economic viability of bulk ore sorting is evaluated for a copper deposit in Laos. Bulk ore sorting technology is described briefly along with discussion of appropriate sensor and diversion systems for the copper deposit considered. The economic implications were evaluated using the actual mined material and costs from 2014 as the base-case. In the absence of sampling data, ore grade variability was estimated using geo-statistical tools based on mine grade control data. A process model of the sorter was developed considering the accuracy of the sensor measurement and errors associated with material diversion. This was used to simulate the separation performance. Economic evaluations were conducted for a number of different scenarios and demonstrated that bulk ore sorting has the potential to increase the amount of metal in product and annual profit for the operation considered. This is because it is cheaper to sort and reject below cut-off grade material contained in the plant feed than to treat this material through the processing plant. The sorter acts as a gatekeeper – only above cut-off grade material (value-adding) reports to the processing plant.

Keywords: Sensors. Ore sorting. Bulk ore sorting. Preconcentration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixa de comprimento de onda de atuação das diversas tecnologias de sensores.....	14
Figura 2 - Variograma típico.....	18
Figura 3 - Variância de dispersão para diferentes tamanhos de blocos	19
Figura 4 - Tecnologias atuais para classificação de minérios (para partículas individuais)	27
Figura 5 - Conceitos Metso para o sistema <i>BOS</i>	29
Figura 6 - <i>Layout</i> esquemático do elevador E26-2 do bloco da mina de Northparkes.....	31
Figura 7 - Sistema de manuseio de materiais do elevador E48-1 da mina	31
Figura 8 - As aplicações e os potenciais benefícios da pré-concentração com <i>ore sorter</i>	34
Figura 9 - Ilustração esquemática da diluição e perda de minério	37
Figura 10 - Modelo de reconciliação proativa	41
Figura 11 - Exemplo de curva de partição.....	43
Figura 12 - Localização da Phu Kham Mine	46
Figura 13 - Litologias Phu Kham Milne	47
Figura 14 - Fotografia Phu Kham Mine.....	48
Figura 15 - Fluxograma do beneficiamento de Phu Kham Mine	48
Figura 16 - Sistema divisor	51
Figura 17 - Variograma baseado nas leituras das amostras do rougher a cada 5 minutos	54
Figura 18 - Curvas de Partição com uso do <i>sorter</i> sem (a) e com (b) o erro do divisor.....	56
Figura 19 - Curva Teor x Massa - Teor de corte 0,2% de Cobre.....	62
Figura 20 - Definição dos cenários e balaço de massa.....	65
Figura 21 - Resumo dos resultados dos cenários	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sensores comerciais	22
Tabela 2 - Consumo de energia nas etapas de cominuição	34
Tabela 3 - Aplicações industriais de <i>ore sorting</i>	35
Tabela 4 - Fontes de problemas na reconciliação	40
Tabela 5 - Custo médio realizado por atividade em 2014.....	52
Tabela 6 - Parâmetros da análise variográfica das quatro zonas de mineralização de cobre em Phu Kham	52
Tabela 7 - Resultado das simulações e desempenho do <i>sorter</i>	56
Tabela 8 - Resultados da simulação	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CONCEITOS DE GEOESTATÍSTICA E VARIABILIDADE	17
2.1.1	Teor médio	17
2.1.2	Teor de corte.....	17
2.1.3	Análise variográfica	18
2.1.4	Variância de dispersão	19
2.1.5	Erros de estimativa de teores da reserva	19
2.1.6	Variabilidade de depósitos minerais.....	20
2.1.7	Conceito de heterogeneidade	20
2.2	PRÉ-CONCENTRAÇÃO COM ORE SORTER.....	20
2.2.1	Pré-concentração	20
2.2.2	Sensores	21
2.2.3	Modelo convencional de ore sorter	26
2.2.4	Bulk Ore Sorting.....	27
2.2.5	Variabilidade e suscetibilidade de minérios à pré-concentração com ore sorter	29
2.2.6	Benefícios	32
2.2.7	Aplicações industriais	35
2.3	OPERACIONALIZAÇÃO DO ORE SORTER.....	35
2.3.1	Seletividade da lavra e recuperação da jazida	35
2.3.2	Controle de teor.....	36
2.3.3	Recuperação dos recursos e reservas	37
2.3.4	Diluição de teores	37
2.3.5	Unidades de separação	38
2.3.6	Efeitos da diluição e da perda de minério	38
2.3.7	Conceitos de reconciliação	39
2.3.8	Curva de partição	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4	SIMULAÇÕES, ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46

4.1	PHU KHAM MINE	46
4.1.1	Descrição da operação	46
4.1.2	Potencial para a aplicação do BOS em PK.....	49
4.2	SELEÇÃO DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DO BENEFÍCIO	49
4.3	PREMISSAS	50
4.3.1	Modelo conceitual do divisor	50
4.3.2	Custos	51
4.3.3	Análise variográfica	52
4.3.4	Unidade de separação	53
4.3.5	Cálculo da variância de dispersão	53
4.3.6	Verificação do valor calculado	54
4.3.7	Eficiência da separação	55
4.4	CENÁRIOS	57
4.5	SIMULAÇÕES DA PRÉ-CONCENTRAÇÃO COM BULK ORE SORTER PARA PHU KHAM.....	60
4.5.1	Cálculo da eficiência do bulk ore sorter	60
4.5.2	Resultado das Simulações	61
4.6	AVALIAÇÃO ECONÔMICA	64
4.7	DISCUSSÕES E APLICABILIDADE PARA OUTROS EMPREENDIMENTOS.....	66
	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICE A – ANÁLISE ECONÔMICA CENÁRIOS 1 E 2.....	73
	APÊNDICE B – ANÁLISE ECONÔMICA CENÁRIOS 3 E 4.....	74
	APÊNDICE C – ANÁLISE ECONÔMICA CENÁRIOS 5 E 6.....	75

1 INTRODUÇÃO

Durante todas as etapas do processo de lavra são adotadas estimativas como base para a tomada de decisões que influenciarão os resultados do empreendimento ao longo de todo o seu tempo de operação. Qualquer atividade de mineração se inicia pelo estudo geológico da área, bem como pela determinação do potencial mineral. Este levantamento exige investimentos proporcionais aos níveis de confiança e risco com os quais se quer conviver. Quanto maior o investimento em pessoas e tecnologia, maior a confiança nas informações que balizam o empreendimento – desde a utilização do minério, capacidade e produção, método de beneficiamento, passando pela tecnologia implantada, recuperação das reservas, recursos humanos, até a distribuição do produto final e o tratamento dos rejeitos produzidos (VALERY, 2015).

Com a menor disponibilidade de depósitos de alto teor, os depósitos remanescentes elevam os riscos envolvidos e requerem maior capacidade técnica para a extração econômica do minério, exigindo a movimentação e o processamento de volumes maiores de material por tonelada de produto. O transporte, a cominuição e o processamento desses grandes volumes são onerosos e demandam um alto consumo energético. Depósitos de minério de baixo teor frequentemente apresentam recursos de teor mais rico, em meio às porções de baixo teor ou mesmo no estéril, os quais podem ser separados antes de alimentar a usina. Por melhor que seja o conhecimento das reservas, a lavra seletiva dessa massa de teor mais elevado é praticamente inexecutável. Esta separação de massa sem valor econômico, a partir do material de alimentação, denominada de pré-concentração, reduz a massa total e aumenta o teor médio do minério alimentado ao próximo estágio do processamento (POKRAJCIC; LEWIS-GRAY, 2010). A rejeição do material com teores abaixo do teor de corte definido evita o beneficiamento de material cujo custo total é maior que o respectivo valor do metal contido recuperado.

A pré-concentração é uma etapa do processamento mineral que remove o material estéril antes de ser alimentado na usina de beneficiamento. O estéril é normalmente rico em silicatos e tipicamente mais duro e resistente do que os minerais de minério. A remoção desse material duro e sem valor econômico antes dos estágios de moagem tem o potencial de reduzir significativamente o consumo de energia e os custos de processamento. Este processo pode também melhorar significativamente o

aproveitamento de recursos ao enriquecer o material originalmente inviável economicamente ou marginal, além de aumentar a produção metálica. Também é possível reduzir o teor de corte, dependendo do saldo líquido entre a redução de custos de processamento, somado ao aumento da produção metálica e dos novos custos associados à lavra de maiores volumes e pré-concentração (DUFFY, 2015).

A principal diferença entre o *bulk ore sorting* e os equipamentos tradicionais de *ore sorting* é que a leitura de teores é realizada sobre a correia carregada e não por partículas individuais. Desta maneira, a fim de otimizar a pré-concentração com *bulk ore sorter*, deve-se evitar a homogeneização da massa lavrada, isto é, evitar e controlar os processos que promovam a mistura excessiva entre o minério e o estéril durante as etapas de lavra. Existem várias tecnologias aplicáveis para pré-concentração, incluindo-se: métodos densitários, separação magnética, pré-concentração de minério a partir de sensores e classificação granulométrica. A aplicabilidade varia caso a caso de acordo com as propriedades do minério. Esse trabalho foca especificamente na separação de minério a partir de sensores (VALERY, 2015).

A vantagem adicional da utilização dos sensores é a de medir o conteúdo metálico a ser alimentado na usina. Esta aplicação substitui a difícil e frequentemente incorreta amostragem do material grosso na alimentação da usina. Segundo Pitard (2008), a estimativa incorreta de teores, baseada em amostras incorretas, bem como a pouca importância dada aos desvios de estimativas, com excesso de foco na média dos valores dos parâmetros e muito pouco nas incertezas estatísticas, promovem sérios problemas de reconciliação, que implicam em enormes perdas anuais (PITARD, 2008).

Desta maneira, é possível comparar o conteúdo metálico medido pelo sensor aos valores estimados pelos modelos geológicos e ao resultado da produção metálica. Isto é, podem-se agregar informações confiáveis à reconciliação das reservas e ao controle de teores na lavra. A reconciliação de reservas é um dos mais convincentes métodos de se demonstrar precisão do modelo de recursos, boas práticas de operação e conseqüentemente, saúde financeira da operação para os investidores (CRAWFORD, 2004). Entretanto, o impacto econômico de más práticas de amostragem e de reconciliação tem sido subestimado pelas empresas mineradoras.

A pré-concentração de minério com sensores, *bulk ore sorter*, possibilita também complementar a seletividade realizada nas frentes de lavra para teores

predeterminados, bem como alterar o teor de corte da alimentação conforme as variações do mercado. Essa é uma forma eficiente de lidar com as incertezas quanto aos teores, particularmente quando a complexidade geológica da mina torna difícil a estimativa de teores. Dessa forma, a pré-concentração serve de instrumento balizador para que se atinjam os teores de corte e médios estabelecidos, bem como para otimizar o resultado econômico do empreendimento mineral.

O primeiro processo de concentração aplicado na mineração foi a catação manual baseada na identificação superficial de rochas mineralizadas. Após consideráveis avanços na tecnologia de sensores, estes equipamentos passaram a substituir o olho humano na realização desta tarefa. Com isso, além de detectar as nuances superficiais no espectro visível, os sensores se tornaram capazes de mensurar características específicas dos minerais em até 14 ordens de grandeza do espectro eletromagnético – tal como é possível observar na Figura 1, além da penetrabilidade nas rochas na ordem de dezenas de centímetros. Para tanto, utilizam-se diversas tecnologias, como raios gama, raio-X, ressonância magnética, entre outras, todas com o objetivo de identificar as porções de massa com valor econômico contidas no ROM (*run of mine*) e promover separação entre o material estéril e minério, baseado em um valor de teor de corte pré-determinado (DUFFY, 2015).

Figura 1 - Faixa de comprimento de onda de atuação das diversas tecnologias de sensores.

Fonte: Pearson Education, inc. (2016).

Uma vez que as tecnologias de leitura se aprimoram a cada ano e novos sensores são desenvolvidos, é necessário que as técnicas de lavra e beneficiamento incluam essas tecnologias em suas diversas etapas, a fim de promover ganhos econômicos, sociais e ambientais.

1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Dados os elevados riscos inerentes à atividade de mineração, incluído o alto capital financeiro investido para operação nesta área, pode-se afirmar que a mineração é uma atividade conservadora no que tange à inovação, uma vez que qualquer modificação nos processos já consagrados causa grande incerteza por parte dos operadores e há a possibilidade de um revés financeiro inviabilizar a continuidade da operação.

Com isso, para se introduzirem novas tecnologias à operação, estas devem ser amplamente estudadas e testadas, bem como deve ter comprovados os benefícios, até que se atinja o grau de confiança esperado pelas empresas do setor.

A introdução do *bulk ore sorter* (BOS) no ciclo de produção afetará os processos nas duas principais áreas do projeto mineiro, quais sejam: a lavra e o beneficiamento. Por exemplo, a mina precisará controlar a homogeneização do minério a fim de aumentar a eficiência da separação e a usina, por consequência, receberá um material com elevada variação de teores. Com relação às atividades de lavra, deverão ser estudadas as exigências sobre o controle de teores, a seletividade e a recuperação da jazida. Já em relação ao beneficiamento, será avaliada a capacidade de produção da instalação, a recuperação final do processo e o custo de beneficiamento por tonelada de produto.

Há que se destacar também o impacto sobre o controle de lavra, fundamental para a eficiência da atividade mineira, isto é, para redução dos custos, segurança operacional, melhor aproveitamento das reservas naturais, desenvolvimento social, além, é claro, do retorno financeiro.

Desta maneira, o principal objetivo do presente trabalho é determinar os benefícios potenciais do emprego do BOS em etapa de pré-concentração na operação de Phu Kham. Neste contexto, incluem-se os seguintes itens:

- discriminar a interferência do BOS nas atividades de lavra e beneficiamento; e

- determinar o potencial econômico a partir da instalação do *ore sorter*, por meio da análise geoestatística.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O potencial econômico da utilização do *ore sorter* na mina de Phu Kham é o principal objetivo deste trabalho, tal como destacado no capítulo anterior. Para tanto, este estudo se baseia em conceitos da geoestatística, nos equipamentos e sensores disponíveis no mercado e nas variáveis operacionais do empreendimento em questão. Este capítulo apresenta uma revisão dos elementos fundamentais para o desenvolvimento e entendimento do trabalho.

2.1 CONCEITOS DE GEOESTATÍSTICA E VARIABILIDADE

2.1.1 Teor médio

Um dos parâmetros fundamentais de caracterização de reservas minerais e, conseqüentemente, da modelagem de blocos é o teor médio do bloco. Este valor representa a relação entre a massa do elemento de interesse e a massa do bloco; é obtido com o auxílio de um método de estimativa baseado nos dados dos testemunhos de sondagens. O método mais comumente aplicado a reservas de médio e grande porte é a Krigagem (MARANHÃO, 1982).

2.1.2 Teor de corte

A determinação das reservas, do teor médio, do custo de extração do minério e das receitas permite a obtenção do teor de corte, o qual representa o valor mínimo para que seja rentável a sua exploração, isto é, que ao menos cubra os custos das operações subsequentes à lavra (MARANHÃO, 1982). Dado que os valores de comercialização e os custos de lavra variam com o tempo, pode-se então afirmar que o teor de corte é um valor dinâmico que deve ser revisado, de acordo com as variações do mercado, a fim de se manter a economicidade do projeto e o melhor aproveitamento dos recursos minerais.

O teor de corte tem uma função bastante importante no máximo aproveitamento dos recursos minerais. Ele deve ser considerado no planejamento e na otimização de lavra, a fim de não alimentar a usina com materiais sem valor econômico e também

de não rejeitar porções de minério. Vale ressaltar que grande parte do retorno financeiro de empreendimentos de mineração advém de regiões ricas da mina, nas quais o teor médio supera, em algumas vezes, o teor de corte.

2.1.3 Análise variográfica

A geoestatística é uma aplicação prática da teoria das variáveis regionalizadas. A partir dos conceitos de funções aleatórias visa-se determinar a interdependência entre as amostras georreferenciadas. Essas variáveis podem apresentar valores de maneira estruturada se, em sua formação, obedeceram a alguma lei da Física. Há também fatores – como o tempo geológico – que tendem a conferir um caráter aleatório, isto é, os valores de teor obtidos, por exemplo, em uma campanha de sondagem, podem variar consideravelmente entre si, mas não são completamente independentes de sua localização espacial (MARANHÃO, 1982).

Uma ferramenta básica é a função variograma, a qual é o instrumento que revela a estrutura do espaço mineralizado e mede as relações estatísticas existentes entre pontos do espaço equidistantes. O variograma é fundamental para revelar as estruturas, de modo que não depende de um ponto fixo para ser calculado, isto é, pode ser calculado para qualquer região do espaço.

A estrutura de um variograma é composta por quatro parâmetros, quais sejam: alcance ou amplitude (a); efeito pepita (C_0); covariância (C); e patamar, tal como apresentado na Figura 2.

Fonte: Wanderley, Amorim e Carvalho (2012).

2.1.4 Variância de dispersão

A variância de dispersão é o elemento que descreve o valor médio da dispersão de teores dentro de um bloco em torno de sua média. Esse valor não depende de uma posição particular e é função apenas da geometria do bloco e do variograma. De acordo com o *site* MINES ParisTech - Centre de Géosciences (2017), “*This variance is used to quantify the dispersion of the variable in a finite domain, in function of the geometry and size of this domain.*”

A Figura 3 ilustra a relação entre a variância de dispersão e o tamanho dos blocos.

Figura 3 - Variância de dispersão para diferentes tamanhos de blocos

Fonte: Valery (2016).

2.1.5 Erros de estimativa de teores da reserva

Devido ao simples fato de que uma amostra nunca apresentará um teor idêntico ao do bloco de onde foi retirada, há um erro envolvido em toda e qualquer estimativa. A validade de qualquer método de estimativa é dada pela magnitude dos seus erros. Não é possível anular um erro, o melhor método será aquele que conduza aos menores erros gerais.

A média dos teores reais deve ser igual à média dos teores estimados, esta é a condição de não enviesamento. Espera-se, também, que a distribuição dos erros tenha dispersão baixa, ou seja, uma variância baixa.

2.1.6 Variabilidade de depósitos minerais

A variabilidade do teor do depósito depende da diferença entre dois pontos; se esta for muito grande, a variância do teor também o será. Essa diferença pode ser expressa em função do variograma, isto é, a variância do teor também é função do variograma.

Numa jazida, a coexistência de diferentes formações geológicas acentua a variabilidade do depósito.

2.1.7 Conceito de heterogeneidade

A heterogeneidade é uma propriedade estrutural de todos os materiais (PITARD, 1993). São extremamente raros elementos homogêneos, os quais se enquadram no caso limite da heterogeneidade, isto é, a condição inatingível de heterogeneidade nula. Ao se observar, individualmente, os elementos de um determinado universo, é possível observar sua heterogeneidade, uma vez que cada indivíduo apresenta tamanhos, cores, formas, durezas, densidades próprias.

2.2 PRÉ-CONCENTRAÇÃO COM ORE SORTER

2.2.1 Pré-concentração

A pré-concentração manual é uma prática realizada há centenas de anos, baseada na identificação superficial de rochas mineralizadas. Com o passar dos anos e com o desenvolvimento tecnológico, este processo teve sua aplicação ampliada ao identificar, também, as características físicas do minério, como na separação densitária, magnética, eletrostática, dentre outras.

Este processo consiste em um primeiro estágio de concentração, no qual se busca obter alta recuperação com uma relação de enriquecimento ao menos satisfatória. O pré-concentrado será, então, submetido a métodos mais sofisticados e caros, até a obtenção do produto final.

2.2.2 Sensores

A pré-concentração com base em sensores não é uma novidade e tem comprovado sua viabilidade técnica e econômica com o aumento do número de aplicações em empreendimentos mineiros pelo mundo. Entretanto, na indústria mineral, este tema ainda é tratado com ressalvas devido ao custo de instalação e operação. A tecnologia atual, baseada na medição e separação de partículas individuais, é bem documentada em literatura, por exemplo, em trabalhos de Wotruba (2006), Bergmann (2009) e Manouchehri (2004) e também em publicações de fornecedores.

A pré-concentração de minério com uso de *ore sorter* depende da leitura de alguma propriedade mensurável com valores distintos entre o estéril e o minério, utilizando-se um sensor. Uma variedade de sensores está disponível no mercado e, destes, os mais utilizados em aplicações industriais incluem os fotométricos, eletromagnéticos, radiométricos e raios-x. Uma relação de sensores é apresentada na Tabela 1 e os mais utilizados são detalhados em seguida.

Tabela 1 - Sensores comerciais

Sensores	Propriedade de Separação	Áreas de Aplicação	Aplicação Atual / Estado de Desenvolvimento	Velocidade	Grau de Penetração
Ressonância Magnética (MR)	Excitação e detecção de linhas espectrais específicas de radiofrequência	Apenas aplicável a certos minerais (atualmente calcopirita)	Desenvolvimento para classificação a granel (bulk sorting)	Segundos	Penetrante
Radiométrico (RM)	Radiação gama natural	Urânio, metais preciosos	Classificação de partículas	Tempo real	Penetrante
Transmissão de Raio X de dupla energia (XRT)	Absorção de raios-x (densidade atômica)	Metais de base e preciosos, minerais industriais, combustíveis, diamantes	Classificação de partículas	Tempo real	Parcialmente penetrante
Fluorescência de raios X (XRF)	Emissão secundária (fluorescente) de raios X	Diamantes	Classificação de partículas	Tempo real	Superfície
Cor (Câmaras CCD - Dispositivo de Carga Acoplada)	Reflexão, absorção, transmissão	Metais de base e preciosos, minerais industriais, combustíveis, diamantes	Classificação de partículas	Tempo real	Superfície
Fotométrico (PM)	Reflexão / absorção monocromática	Minerais industriais, diamantes	Classificação de partículas	Tempo real	Superfície
Eletromagnético (EM)	Condutividade, permeabilidade	Metais de base	Classificação de partículas	Tempo real	Penetrante
PGNAA	Análise de raios gama resultantes de ativação neutrônica	Calcário, Fe, Al, Pb, Mn, Cu, Zn	Somente medição	Minutos	Penetrante
PFTNA	Análise de ativação de nêutrons pulsados e térmicos (Pulsed Fast Thermal Neutron Analysis)	Ni, Fe, Co, Mg, Si, Al, Mn, Cr, C, H, O	Somente medição	Minutos	Penetrante
Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)	Reflexão, Absorção	Metais de base e minerais industriais	Aplicações em operações de reciclagem	Tempo real	Superfície
Infravermelho (IR)	Condutividade térmica, dissipação de calor	Metais de base e minerais industriais	Em desenvolvimento	Tempo real	Superfície

Fonte: Duffy (2015).

2.2.2.1 Ressonância magnética (RM)

O sensor de ressonância magnética excita a amostra com pulsos de radiofrequência; o mineral recebe e, por conseguinte, emite radiação eletromagnética. O mineral excitado transmite um sinal em uma frequência de ressonância específica que pode ser detectado e, conseqüentemente, determinada a sua presença.

Esse sensor (RM) identifica minerais e não elementos. Cada mineral emite uma frequência distinta, desta maneira, não há interferência nos sinais e nem requer calibração prévia. Em escala industrial, é aplicado somente para calcopirita, um mineral de cobre. Entretanto, esta tecnologia tem potencial para ser aplicada em outros minerais.

O sensor RM apresenta as características necessárias para a aplicação com o *bulk ore sorter*, uma vez que apresenta uma penetratividade de aproximadamente um metro em rocha sólida e o tempo de leitura leva segundos, com um erro de centésimos de porcentagem. Entretanto, é necessária a utilização de balança no transportador de correia, a fim de se determinar o teor médio do material analisado.

Há um protótipo instalado na mina de Cadia, na Austrália. O sensor mede o teor de calcopirita na correia de saída do produto do britador primário a uma vazão de 1300 toneladas por hora e com velocidade de 4,2 m/s. A calcopirita é o mineral predominante no empreendimento, portanto, definir a quantidade de calcopirita é suficiente para definir o teor de cobre na alimentação da usina.

2.2.2.2 Eletromagnético (EM)

O sensor eletromagnético promove a diferenciação dos materiais analisados a partir das características eletromagnéticas, como, por exemplo, a condutividade e a permeabilidade eletromagnética. No momento em que uma porção de material condutivo é submetida ao campo criado pelo sensor, ele modifica a frequência eletromagnética. Esta variação pode ser detectada e, com o auxílio de uma pré-calibração, é possível identificar os materiais analisados. Este sensor é comumente aplicado na indústria da reciclagem, entretanto, há aplicações em minerais condutivos, tais como níquel, cobre e ouro.

Há um equipamento de *sorting* que utiliza esta tecnologia na mina de *CuDeco's Rocklands Copper*, localizada no estado de Queensland, na Austrália. O equipamento é capaz de pré-concentrar cobre nativo a uma vazão de 200 toneladas por hora, com uma recuperação de 85 a 95% do metal alimentado.

2.2.2.3 *Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA)*

O *PGNNA* mede elementos e não minerais. O material a ser analisado é continuamente irradiado por um feixe de nêutrons. Os elementos que constituem o fluxo absorvem parte desses nêutrons e, por consequência, emitem raios gama, que podem ser medidos por um espectrômetro. A energia desses raios gama identificam os elementos que capturaram os nêutrons, enquanto a intensidade dos raios determina a quantidade contida de cada elemento. Para esta identificação, é necessária uma pré-calibração do sensor.

Para a sua aplicação com o *bulk ore sorter*, o tempo de leitura deve ser reduzido em comparação aos equipamentos já em operação. Uma das possibilidades em estudo para tal seria a partir da instalação de mais detectores. Há uma série de equipamentos em operação pelo mundo, principalmente em operações de ferro, carvão e fábricas de cimento.

O *PGNAA* utiliza o elemento califórnio como fonte de emissão de nêutrons. Uma vez que se trata da utilização de materiais radioativos, é necessária, além de cuidados específicos, uma licença do órgão controlador. Uma opção equivalente é o gerador de nêutrons conhecido como *Pulsed Fast Thermal Neutron Analysis (PFTNA)*.

2.2.2.4 Fluorescência de raios-X (*XRF*)

O *XRF* identifica os elementos de uma amostra a partir da emissão do raio-x característico. Os átomos bombardeados com raios-x têm elétrons ejetados. Os elétrons do último nível de energia ocupam os espaços deixados pelos elétrons ejetados e, nesta mudança de nível de energia, emitem o raio-x característico de cada elemento. Desta maneira, é possível identificar os elementos que compõem a amostra e, a partir da intensidade, é possível medir a concentração destes elementos.

Esta técnica pode medir apenas os elementos da superfície da amostra, deste modo, não é possível considerar que os valores obtidos representem todo o material analisado, fator fundamental para o sucesso da aplicação do *bulk ore sorter*. Entretanto, esta tecnologia é amplamente aplicada para *ore sorting* de partículas individuais e análise de testemunhos de sondagem.

2.2.2.5 Transmissão de raio-X (*XRT*)

O *XRT* é capaz de medir a densidade atômica baseado na transmissão de raios-x por meio dos materiais. A quantidade de raios-x transmitida pelo material depende da densidade e espessura.

A aplicação desta tecnologia com *ore sorting* depende de calibração prévia para a identificações dos materiais analisados. Para metais como o cobre, não há uma boa precisão para a determinação do teor corretamente, entretanto, este sensor pode separar os materiais que contêm ou não sulfetos, já que os minérios de cobre são, em sua maioria, sulfetados.

2.2.2.6 Espectroscopia no infravermelho (*NIR*)

O sensor *NIR* identifica os minerais a partir das propriedades, únicas e específicas, de cada mineral na reflexão dos raios infravermelhos (HUNT, 1977). O *NIR* requer um processo de calibração complexo, no qual é necessário desenvolver um modelo preditivo, baseado em um banco de dados de espectros e em associação com leituras anteriores.

2.2.2.7 Óptico

Os sensores ópticos fazem identificação dos materiais analisados a partir das cores e frequências refletidas pelas superfícies das partículas. Esta tecnologia é aplicada quando há uma evidente diferença de cor, brilho, reflexão ou transparência entre o minério e o estéril. As aplicações industriais mais comuns na mineração são para ouro, platina e diamantes.

2.2.2.8 Radiométrico (RM)

O sensor radiométrico utiliza detectores de cintilação e *scanners a laser* para medir a radioatividade e a área das partículas analisadas. Os detectores de cintilação medem a atividade dos raios gama, na maioria dos casos, emitidos por Bi^{214} e Pb^{214} durante o decaimento do urânio. A maior aplicação é para minério radioativos. Como exemplo, na África do Sul, esta tecnologia é utilizada para pré-concentrar minério de ouro que apresenta traços de urânio.

2.2.3 Modelo convencional de *ore sorter*

Os equipamentos convencionais de *ore sorter* apresentam um processo dividido em cinco etapas, quais sejam: condicionamento do material, apresentação do material, detecção, processamento de dados e separação, tal como ilustrado na Figura 4. Uma preparação cuidadosa da alimentação é necessária para que cada partícula possa ser detectada e medida; a remoção das partículas selecionadas é normalmente realizada por meio de jatos de ar comprimido. Os equipamentos disponíveis possuem uma restrição de capacidade para até 300 t/h. Essa restrição pode inviabilizar a aplicação em empreendimentos que beneficiem dezenas de milhões de toneladas anualmente.

Figura 4 - Tecnologias atuais para classificação de minérios (para partículas individuais)

Fonte: Valery (2015).

2.2.4 Bulk Ore Sorting

O conceito de *bulk ore sorting* baseia-se na separação de grandes volumes de minério sobre um transportador de correia totalmente carregado. A diferenciação dos materiais com e sem valor econômico dar-se-á a partir dos teores medidos ou inferidos por um sensor específico para cada jazida. Os depósitos minerais são heterogêneos, o que pode possibilitar a separação de grandes volumes de materiais sem valor econômico, caso a detecção seja conduzida nas etapas iniciais do processo, isto é, antes que manuseio excessivo ou processos de homogeneização ocorram. Minérios altamente disseminados são pouco recomendáveis de se submeter à seleção por *ore sorting*.

Uma revisão das tecnologias dos sensores existentes indica que a maioria dos sensores não são aplicáveis a grandes vazões, seja por não serem suficientemente penetrativos, seja por serem muito lentos para uma separação eficaz, tal como demonstrado no resumo dos sensores listados na Tabela 1. Por exemplo, espectroscopia no infravermelho (*NIR*) e sensores fotométricos são leitores somente

de superfície, não penetrando nas rochas. Fluorescência de raios-X (*XRF*) possui uma espessura de feixe e penetração de apenas alguns milímetros.

Sensores de análise imediata com ativação de gama nêutrons (*PGNAA*) e de ativação pulsada rápida e térmica de nêutrons (*PFTNA*) medem os elementos e podem penetrar todo o corte transversal de um transportador de correia totalmente carregado. Entretanto, as velocidades de medição atuais não são suficientes para uma pré-concentração efetiva, em escala de minutos ao invés de segundos. É possível adaptar tais sensores para o *bulk ore sorting*; a contrapartida seria a redução da precisão e o aumento do custo.

A CSIRO - *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*, na Austrália, está desenvolvendo um sensor que utiliza ressonância magnética (RM) e que possui a capacidade de medir rapidamente lotes de minério em grandes transportadores de correia (MILJAK, 2011). O sensor RM se aplica muito bem ao *bulk ore sorting*, pois é penetrativo e pode medir grandes volumes em transportadores de correia totalmente carregados. Adicionalmente, o tempo de resposta à medição é rápido, apenas alguns segundos, permitindo o controle efetivo de material com diferentes teores. Entretanto, o sensor RM mede um mineral individual e pode ter limitação para medir minérios de mineralogia complexa. O sensor está atualmente desenvolvido para calcopirita, contudo, com desenvolvimentos adicionais, poderá ser potencialmente aplicado para outros tipos de minerais (HESELEV, 2012).

Com a continuidade do desenvolvimento, a tecnologia para o *BOS* poderá incorporar mais de um tipo de sensor para superar as limitações dos diferentes tipos existentes. Para isto, também é necessário um sistema de controle capaz de interpretar os dados do sensor (ou sensores) e tomar uma decisão de aceitar ou rejeitar o material sobre a correia, além da necessidade de um sistema diversor, como uma comporta de desvio para separar estéril dos “lotes” de minério, assim como apresentado na Figura 5, a seguir. A Metso, empresa de equipamentos de mineração, já desenvolveu projetos conceituais para implantar o tratamento de até 3.600 t/h em correias com velocidade de até 5 m/s de alimentação da usina de processo ou em transportadores *in-pit*. Como o *BOS* se vale da heterogeneidade natural dos depósitos, é teoricamente correto instalar o sistema na primeira etapa possível do processo, na qual a variabilidade é maior, potencializando, dessa forma, os benefícios. Dois possíveis locais para a instalação do *BOS* são a correia de alimentação da usina

ou *in-pit*, necessariamente, antes das pilhas de blendagens ou de homogeneização, se existirem.

Figura 5 - Conceitos Metso para o sistema BOS

Fonte: Valery (2015).

2.2.5 Variabilidade e suscetibilidade de minérios à pré-concentração com *ore sorter*

Muito pouco se conhece sobre amplitude e frequência da variabilidade nas correias de alimentação das usinas de beneficiamento. Além de ser de difícil medição, são também dependes da variabilidade *in situ* dos depósitos de minério, do método de lavra, do manuseio do minério, da britagem e da blendagem. Entender a variabilidade é importante para determinar o tempo de resposta requerido para a medição, a separação (desvio) e também o potencial enriquecimento que determinará, caso a caso, se há retorno econômico na implantação da pré-concentração com *ore sorter*.

Os depósitos minerais são heterogêneos, o que pode torná-los potencialmente suscetíveis à pré-concentração com sensores, o *ore sorting*. Entretanto, as práticas de lavra atuais são normalmente projetadas para minimizar a variação e, assim, prover uma alimentação estável e consistente à usina de processamento.

A indústria da mineração costuma definir o método de lavra e a rota do beneficiamento a partir de um minério médio ou típico; desta maneira, um teor de alimentação constante é necessário para que o processo seja estabilizado e

otimizado. Consequentemente, as operações de lavra possuem estratégias de blendagem para entregar, na medida do possível, um teor de alimentação estável para a usina. Não é incomum haver uma série de pilhas de minério bruto, ROM, de diferentes faixas de teores que podem ser alimentados ao processo em proporções necessárias para alcançar o teor de alimentação desejado.

Minas subterrâneas podem possuir dezenas de pontos de extração, dos quais, muitos podem ser lavrados simultaneamente. Os pontos de extração ativos são definidos pela sequência de lavra, mas também podem ser escolhidos a partir de amostras de controle em pontos de extração para se atingir o teor médio de alimentação da usina. Blendagens podem ocorrer na extração, na britagem ou no manuseio dos materiais antes da entrega à usina. O *layout* esquemático do elevador E26-2 da mina de *Northparkes* é apresentado na Figura 6 a fim de ilustrar este cenário, enquanto a Figura 7 mostra o sistema de manuseio de materiais do elevador E48-1 da mina. Esses desenhos demonstram o número de pontos de extração e as etapas do manuseio do minério (passagens de minério, silos, britadores, transportadores e alimentadores).

Cada vez que o minério é manuseado, transferido, britado, misturado, etc., a variabilidade é reduzida e, consequentemente, também o potencial para separação efetiva do minério do estéril. Para potencializar o fator de enriquecimento do minério, algumas mudanças nas práticas de lavra podem ser necessárias para tirar proveito da variabilidade natural.

Figura 6 - Layout esquemático do elevador E26-2 do bloco da mina de Northparkes

Fonte: Adaptado de Butcher et al. (2013).

Figura 7 - Sistema de manuseio de materiais do elevador E48-1 da mina

- (8) Estação subterrânea de carga – três passagens de minério (*ore passes*) alimentam o sistema de içamento, composto de dois *skips* de 16 t de carga útil.
- (9) Minério içado é transferido por meio de um pequeno transportador de correia para uma estação de britagem secundária.
- (10) O produto do britador secundário é, então, transportado à usina concentradora por uma correia curva de alta velocidade.

Fonte: Adaptado de Butcher et al. (2013).

2.2.6 Benefícios

O primeiro e mais nítido benefício da pré-concentração é a melhora efetiva na alimentação da usina, visto que menos massa de minério é tratada por tonelada de produto, reduzindo, desta forma, os custos e o consumo de energia e água por tonelada de produto. Entretanto, outros benefícios adicionais são de grande importância e ajudam a viabilizar a lavra de diferentes tipos de recursos minerais.

Ao remover o material estéril grosso, a pré-concentração tem o potencial de reduzir significativamente a massa de material a ser beneficiada nas etapas subsequentes do processo. Se realizado o mais próximo possível da frente de lavra, ao rejeitar o material estéril, reduz-se a massa de minério a ser transportada à usina de processamento. Esta aplicação ganha grande importância quando se trata de empreendimentos que enviam o minério a usinas localizadas distantes dos pontos de lavra. Neste cenário, o transporte de minério entre grandes distâncias é um fator importante na composição do custo de produção.

A pré-concentração pode aumentar a recuperação da jazida ao viabilizar materiais previamente classificados como não econômicos e também deve ser considerada na definição do teor de corte da mina (VALERY, 2015).

Pode ser possível reduzir o teor de corte, a depender do saldo entre a redução dos custos de beneficiamento (devido à rejeição do estéril) e dos custos adicionais associados à pré-concentração e ao aumento da capacidade de lavra. Estes recursos adicionais para a lavra (perfuração e desmonte, carregamento e transporte, manuseio de estéril) podem ser necessários para manter constante a vazão de alimentação da usina, devido à rejeição de material pelo *ore sorter*, que fora previamente classificado como minério.

Adicionalmente, a pré-concentração com *ore sorter* reduz a diluição e a perda de minério nas operações de lavra ao melhorar o controle de teor.

O impacto ambiental da mina também é atenuado devido à redução: no consumo de energia, na emissão de gases de efeito estufa e no consumo de água por tonelada de produto. Uma quantidade menor de rejeitos úmidos é produzida, reduzindo-se assim o tamanho da barragem de rejeitos necessária, bem como minimizando o impacto na superfície. A área de depósito de estéril pode ser aumentada, entretanto, em alguns casos, o material grosso e seco rejeitado pelo *ore sorter* pode ser utilizado como agregado ou para outros propósitos de preenchimento.

A pré-concentração com *ore sorter* pode ser aplicada na separação de diferentes tipos de minério, a fim de tratá-los separadamente. Material de alto teor pode ser beneficiado por meio de um processo mais caro, porém, mais efetivo devido ao alto valor contido; enquanto o material de baixo teor pode ser beneficiado por meio de um processo de recuperação menos dispendioso e efetivo. Por exemplo, algumas operações podem se beneficiar do uso de flotação para o tratamento do material de alto teor e de lixiviação para o material de baixo teor. Isso significa que uma mina pode ter uma diversidade de teores de corte, dependendo do custo das opções de rota que seguem.

Também pode ser possível recuperar materiais com valor econômico a partir dos depósitos de estéril e de pilhas de material de baixo teor (reservas marginais) que seriam economicamente inviáveis de serem tratados.

As aplicações e os potenciais benefícios da pré-concentração com *ore sorter* são ilustrados na Figura 8, a seguir. Apesar dos benefícios, a inclusão do *ore sorting* na mineração tem sido lenta, uma vez que há limitações quanto a aplicabilidade dos sensores disponíveis e, mais importante, devido à baixa capacidade de produção dos separadores de partículas individuais.

Entretanto, as perdas de metal na pré-concentração são equilibradas – se não completamente compensadas – pelo aumento da recuperação nos processos subsequentes devido ao maior teor de alimentação e da economia geral proporcionada pelos custos reduzidos e/ou pela produção aumentada.

Um sistema de pré-concentração com *bulk ore sorting* será bem mais simples e barato, tanto em relação aos custos de capital como os custos operacionais, e requer muito menos área superficial exposta das partículas do que a atual tecnologia de classificação de partículas individuais.

Figura 8 - As aplicações e os potenciais benefícios da pré-concentração com *ore sorter*

Fonte: Valery (2015).

O impacto global na lucratividade do projeto depende, é claro, dos depósitos e características do minério, métodos de lavra e processamento, condições da usina, ambiente econômico local etc., além de demandar uma avaliação caso a caso.

2.2.6.1 Consumo Energético na Cominuição

Hukki (1961) ilustra a ordem de grandeza do consumo de energia para as etapars de cominuição estimadas a partir das teorias de Bond e Rittinger, para iguais trabalhos de moagem, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo de energia nas etapas de cominuição

ESTÁGIO	BOND (KWH/T)	RITTINGER (KWH/T)
DESMONTE POR EXPLOSIVOS	0,07	0,0009
BRITAGEM PRIMÁRIA	0,22	0,009
BRITAGEM SECUNDÁRIA	0,69	0,09
MOAGEM GROSSEIRA	2,18	0,9
MOAGEM FINA	6,89	9

Fonte: Adaptado de Hukki (1961).

2.2.7 Aplicações industriais

A Tabela 3 apresenta algumas aplicações industriais de *ore sorting* no mundo.

Tabela 3 - Aplicações industriais de *ore sorting*

Segmento	País	Aplicação
Tungstênio	Austrália	Pré-concentração
Calcário	EAU	Pré-concentração
Diamantes	Lesoto	Concentração
Carvão	EUA	Retirar impureza
Diamantes	África do Sul	Concentração
Cromita	Brasil	Pré-concentração
Cobre	Austrália	Pré-concentração
Ouro	EUA	Concentração
Magnesita	Rússia	Pré-concentração
Ouro	Namíbia	Pré-concentração
Fosfato	Cazaquistão	Pré-concentração
Ouro	Austrália	Pré-concentração
Ouro	Canadá	Pré-concentração

Fonte: Autoria própria.

2.3 OPERACIONALIZAÇÃO DO ORE SORTER

2.3.1 Seletividade da lavra e recuperação da jazida

Comumente há mais de uma maneira para se lavar um corpo mineralizado, a depender do grau de seletividade a ser praticado. O objetivo da seletividade da lavra é reduzir a diluição na alimentação da usina, advinda do aumento de massa causado pela adição de estéril no minério. Os controles para a seletividade na lavra incluem os seguintes parâmetros:

- geologia estrutural do corpo mineral;
- teor de corte aplicado;
- continuidade do minério acima do teor de corte;
- tamanho e acurácia dos equipamentos; e
- vazão de produção.

Esses controles são utilizados para a determinação do *selective mining unit* (SMU), o qual representa o menor sólido de lavra a ser explotado. A determinação de

um *SMU* de grandes proporções em um local de alta complexidade geológica resultará em um alto grau de diluição interna e operacional. A relação entre volume e variância demonstra que o teor de corte deve ser aplicado no *SMU* e não em blocos menores, uma vez que o teor do *SMU* representa o teor diluído e realmente capaz de ser recuperado. O grau de continuidade do minério aumenta à medida que se reduz o teor de corte. Portanto, a seleção do *SMU* está relacionada diretamente com o teor de corte operacional.

A estimativa de recursos/reservas recuperáveis representa a massa e os teores que realmente podem ser lavrados acima dos teores de corte nos *SMUs* escolhidos. A garantia de qualidade do cálculo desta massa e teor, a partir do modelo de controle de teores, está diretamente condicionada a se dispor de um grande número de amostras com proximidade espacial, o que, conseqüentemente, proporcionará uma estimativa robusta a partir da análise estatística e variográfica (THOMAS; SNOWDEN, 1990).

2.3.2 Controle de teor

Em qualquer operação mineira é de vital importância o conhecimento e a previsibilidade da lavra. Esta previsão não pode ser obtida de outra maneira a não ser por métodos de estimativa.

A jazidas são comumente lavradas a partir de um teor de corte, este valor separa o minério do estéril. Vários métodos de lavra podem ser aplicados, desde uma lavra de pequena escala, muito seletiva, até uma lavra de grande escala, altamente mecanizada. Na pequena escala, é possível considerar pequeníssima unidade de controle *SMU*, o que levará a uma ótima separação entre minério e estéril, embora os custos operacionais sejam mais altos. Já em grande escala, devem ser consideradas grandes unidades de controle de lavra, que sejam compatíveis com o porte dos equipamentos, embora signifique baixa eficiência na separação entre minério e estéril. Para cada jazida, há um método e uma escala de lavra adequada.

2.3.3 Recuperação dos recursos e reservas

Segundo Journal e Huijbregts (1978), "o ambiente geológico do depósito é o que determina os recursos *in situ*. A transformação dos recursos minerais em reservas lavráveis depende, não somente de suas características peculiares, mas, também, do nível econômico e tecnológico no qual o projeto mineral está inserido".

2.3.4 Diluição de teores

A diluição é a redução da concentração de minério, ou teor, em uma dada massa, ou seja, é a adição de material estéril na massa de minério. Em uma operação mineira, existem três tipos de diluição, quais sejam: a interna, intrínseca à formação geológica; a planejada, fruto das características do método de lavra adotado e da exequibilidade técnica; e, por fim, a operacional, que advém da incapacidade técnica de explorar o minério sem que ocorra a contaminação deste com material sem valor econômico (Figura 9).

Algumas causas da diluição na lavra são: a movimentação da massa no desmonte, diluição interna, imprecisão nos limites entre minério e estéril, equipamentos de mineração de grande escala, não seletivos, e erros de despacho. Todas essas causas contribuem para a diluição ou perda de minério. Algumas medidas podem ser tomadas a fim de reduzir a diluição ou as perdas de minério, mas estas não podem ser completamente evitadas (EBRAHIMI, 2013).

Figura 9 - Ilustração esquemática da diluição e perda de minério

Fonte: Duffy (2015).

2.3.5 Unidades de separação

A coleta de amostras é uma das técnicas mais eficientes e amplamente utilizadas para a determinação de teores em diversos pontos do processo de lavra. Entretanto, para se obter um valor confiável do teor de alimentação da usina em diversos tempos, seria necessária a coleta de um grande número de amostras representativas, o que é extremamente dispendioso em termos de mão de obra, tempo e dinheiro e, portanto, é evitada ao máximo pelas operações, o que praticamente inviabiliza o estudo em um empreendimento do porte de Phu Kham Mine. Para tanto, a geoestatística fornece ferramentas eficientes para a determinação, neste estágio do estudo, da variabilidade de teores na alimentação do *bulk ore sorter*.

A fim de se calcular os efeitos do *BOS* na operação, é necessário determinar a unidade mínima que será desviada ou separada pelo equipamento. Uma vez fixada esta massa, é possível estimar, a partir do modelo de blocos de curto prazo, o material, massa e teor, que será o concentrado do *sorter* e alimentará a usina.

O tempo de leitura é uma das variáveis mais importantes do sistema. Este é definido a partir da capacidade de leitura do sensor numa relação direta com a precisão de separação, isto é, quanto maior o tempo de leitura, melhor será a precisão. Por outro lado, se o tempo de leitura for muito extenso, as unidades de separação – ou desvio – serão maiores, diminuindo, assim, a eficiência do processo de separação de minério e estéril.

Outro fator limitante diz respeito ao comprimento da correia. Este fator é fundamental, uma vez que o material deve ter seu destino definido antes que deixe o transportador de correia e não possa mais ser redirecionado.

2.3.6 Efeitos da diluição e da perda de minério

O modelo de blocos e, conseqüentemente, a definição do material a ser beneficiado são baseados em amostragens e em uma estimativa de teores. O teor real não é conhecido e frequentemente não é medido antes de o material ser classificado como minério ou estéril. Isso resulta na diluição e na perda de minério devido à sua classificação incorreta.

A diluição tem um impacto significativo na rentabilidade das operações mineiras, uma vez que ela reduz o teor de alimentação da usina e, conseqüentemente, eleva os custos operacionais, pois, além de se transportar e beneficiar mais minério por tonelada de produto, a redução do teor de alimentação da usina também afeta a recuperação do processo. Adicionalmente, a capacidade de produção da usina é reduzida, prolongando, assim, a vida útil da mina e retardando o retorno do investimento.

Perdas de minério ocorrem quando o minério é incorretamente classificado como estéril e, desta forma, não processado, resultando em perda de rentabilidade.

As dimensões da perda de minério e da diluição são difíceis de quantificar e, muito provavelmente, são subestimadas. Na Somincor, uma mina subterrânea de cobre e zinco localizada no Sul de Portugal, o sistema SmartTag™ para rastreamento de minério é utilizado para rastrear o minério e o estéril. Chegou-se à conclusão de que cerca de 20% do estéril era beneficiado na usina e uma quantia similar de minério era descartada como estéril antes da implantação de práticas melhoradas para controle de teor por meio do sistema SmartTag™ (ISOKANGAS, 2012; comunicação pessoal).

Reduzir a diluição e a perda de minério representa uma oportunidade significativa para aumentar a lucratividade; o valor perdido com minério classificado erroneamente como estéril é ainda maior, tal como demonstra o estudo da Somincor.

Uma etapa de pré-classificação com *bulk ore sorter* pode reduzir tanto a diluição como a perda de minério ao melhorar o controle de teor. Somente o material acima do teor de corte é enviado para o beneficiamento, melhorando a execução do teor de corte teórico. Do mesmo modo, material de teor acima do de corte (e também o lucro) não é encaminhado ao bota-fora. O BOS tem o potencial de melhorar a produtividade da mina e reduzir os custos, particularmente em depósitos com geologia complexa e limites tênues entre minério e estéril.

2.3.7 Conceitos de reconciliação

A reconciliação na mineração é definida como a comparação entre uma estimativa de massa, teor e metal contido e uma medição da produção real. Segundo Morley (2003), os principais objetivos da reconciliação são: medir o desempenho da

operação, embasar o cálculo das reservas minerais, validar as estimativas dos recursos e reservas, bem como fornecer indicadores de desempenho para o controle do curto e do longo prazo. Uma reconciliação recorrente e efetiva pode evidenciar oportunidades de melhorias no processo e elevar a acurácia no planejamento de curto prazo. Assim, o conceito de reconciliação poderia ser resumido em: “medir, controlar e melhorar” (NOPPÉ, 2004). A Tabela 4 mostra as causas comuns dos principais problemas de reconciliação.

Tabela 4 - Fontes de problemas na reconciliação

Fontes	Causas
Modelo Geológico	• efeito pepita <i>in situ</i>
	• erros de amostragem e subamostragem
	• erros analíticos
	• erros de estimativa
	• rejeição excessiva de <i>outliers</i>
	• densidade do minério
	• definição do corpo mineralizado
Modelo de Controle de Teor e Lavra	• efeito pepita <i>in situ</i>
	• movimentação do minério no desmonte
	• perda de finos na amostragem
	• erros de amostragem e subamostragem
	• erros analíticos
	• diluição operacional
	• furos de desmonte paralelos à mineralização
Usina	• definição do contorno do teor do minério
	• erros de amostragem
	• desconhecimento do processo de beneficiamento
	• calibração das balanças e dos medidores de fluxo
	• equipamentos de amostragem inapropriados
	• erros analíticos
	• más práticas de amostragem no laboratório

Fonte: Chierigati (2009).

2.3.7.1 Reconciliação proativa

A reconciliação ‘proativa’ surge como uma nova visão à já consagrada reconciliação reativa e consiste na coleta e análise dos dados críticos, utilizados para aperfeiçoar as estimativas usando processos iterativos (MORLEY, 2003). Os erros

são analisados a fim de se planejarem ações corretivas visando minimizar a diferença entre os valores estimados e os valores reais, isto é, aproximar o valor dos fatores de reconciliação de 1.

Esse processo iterativo de análise de erros e correção de processos (essencialmente de amostragem e modelagem) leva ao conceito de “prognosticação”, ou seja, estimativas transformam-se em prognósticos e auxiliam na tomada de decisões da empresa, assegurando que o que acontece no futuro corresponda ao que é planejado no presente (CHIEREGATI, 2007).

Este conceito pode ser visualizado no modelo de reconciliação proativa proposto por Chieregati, reproduzido na Figura 10, nos quais, o longo prazo, o curto prazo, a lavra, a alimentação da usina e os rejeitos são estimativas, e apenas o concentrado é uma medição.

Fonte: Chieregati (2013).

- MCF ou *Mine Call Factor* = produção da usina ÷ estimativa do modelo de longo prazo.
- GM ou *Geological Model* = estimativa do modelo de curto prazo ÷ estimativa do modelo de longo prazo.
- MO ou *Mine Operation* = teor do minério lavrado ÷ estimativa do modelo de curto prazo.

- MP ou *Mine to Plant* = teor da alimentação da usina $\div$ teor do minério lavrado.
- MR ou *Mine Reconciliation* = teor da alimentação da usina $\div$ estimativa do modelo de longo prazo.
- PR ou *Plant Reconciliation* = (produção da usina + rejeitos) $\div$ alimentação da usina.

2.3.7.2 O Conceito de reconciliação mina-usina

Os empreendimentos mineiros buscam incessantemente o aumento da eficiência, produtividade e redução de custos, a fim de manter a lucratividade do negócio, uma vez que os custos dos suprimentos e serviços continuam a crescer e os preços do produto final tendem a cair. A integração dos processos de mineração, desde a geologia até a usina, é uma ferramenta valiosa e utiliza a tecnologia da informação para fornecer informações acuradas à usina sobre o minério a ser beneficiado. Este processo possibilita a redução da variabilidade do teor do material alimentado. Com isso, é possível visualizar o processo de maneira integrada (IMRIE, 2001).

A reconciliação entre a mina e a usina consiste na prática de se compararem as estimativas de produção baseadas em dados da mina com as estimativas de produção baseadas em dados da usina e, a partir dos resultados, sugerir medidas que minimizem a discrepância entre as estimativas (CHIEREGATI, 2007).

A discrepância entre as estimativas da mina e as estimativas da usina é resultado dos erros inerentes aos diferentes métodos de amostragem aplicados às duas grandes áreas da mineração – lavra e beneficiamento.

Normalmente, a mina conta apenas com a inserção de informações advindas das amostras de furos de desmonte para o desenvolvimento de modelos de controle de teores a partir do modelo de longo ou médio prazo.

Já a usina pode facilmente coletar amostras após a moagem, o que, dada a granulometria reduzida, simplifica consideravelmente o desafio de se coletar uma amostra representativa. Desta maneira, as estimativas da usina são consideradas mais acuradas que as da mina e, portanto, na maioria dos casos, elas são a base para os cálculos de reconciliação.

2.3.8 Curva de partição

A curva de partição, demonstrada na Figura 11, é o método mais aplicado para representar a eficiência de um processo de separação de partículas. A partir desta, é possível determinar a porcentagem da massa alimentada recuperada em relação a uma propriedade do minério, tal como densidade, teor, granulometria, suscetibilidade magnética, dentre outras. Uma separação ideal com *bulk ore sorter* deve apresentar um rejeito com 100% dos teores abaixo do corte e um concentrado com teores 100% acima do corte. Entretanto, na prática, isso não ocorre; desta maneira, haverá uma porção da massa de baixo teor no concentrado e de alto teor no rejeito, caracterizando, assim, uma separação não perfeita.

Dois parâmetros relevantes podem ser extraídos da curva de partição, a saber: o ponto de separação e o coeficiente angular da reta. Na Figura 11, o ponto de separação é o valor do teor de cobre em que a recuperação para o concentrado atinge 50%; o coeficiente angular da reta é calculado a partir dos pontos de teor em que as partículas tem 25% e 75% de chance de irem para o concentrado. Quanto mais próximo de zero o valor de I, chamada de imperfeição de corte, melhor a eficiência do processo.

Figura 11 - Exemplo de curva de partição

$$I = \frac{t_{75} - t_{25}}{2t_{50}} \quad (1)$$

Fonte: Autoria própria

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir da parceria entre a Kalium Consultoria e a Metso PTI, deu-se início aos trabalhos de pesquisa da aplicação do *bulk ore sorter* em minas de cobre com predominância de calcopirita, no caso, em Phu Kham Mine. O estudo proposto foi dividido em etapas, sendo a primeira uma extensa revisão bibliográfica sobre a utilização de *ore sorting* na mineração e as características necessárias dos sensores existentes para a aplicação na mineração, seguida por uma série de reuniões para discutir as principais informações levantadas, aplicabilidade, método de estudo e cronograma de trabalho. Em abril de 2015, a equipe técnica das empresas se reuniu nas instalações da Metso PTI no CSIRO, em Brisbane, Austrália; após 4 semanas de sedimentação da metodologia e discussões com a diretoria da Pan Austrália, a equipe se dirigiu à mina, em Laos, a fim de verificar as condições operacionais, detalhamento da jazida e obtenção do banco de dados com as seguintes informações:

- modelo de recursos/reservas;
- plano de lavra;
- balanço de massa da mina e controle de despacho de 2014;
- teor de corte planejado;
- método de amostragem;
- método de elaboração do modelo de controle de teores;
- análise variográfica;
- custos de produção (lavra, beneficiamento, administrativo - g&a)
- controle da alimentação;
- resultados de produção;
- eficiência da moagem;
- amostragem na usina;
- recuperação da usina;
- previsão de produção para o LOM;
- estimativa dos custos de *sorting* (Metso PTI); e
- modelo conceitual do sistema de diversor (Metso PTI).

Estes dados são a base para a simulação da operação do *bulk ore sorter* que é o principal processo deste estudo. Este estima a massa e o teor de alimentação da

usina a partir do produto do sistema em questão. Para realizar a sequência de iterações e o cálculo da curva de teor *versus* massa, fez-se uso do *software* Studio 3, com os seguintes dados de entrada:

- teor de corte;
- variograma;
- variância de dispersão;
- curva de distribuição de teores (tipo de distribuição, normal, log-normal ou normal truncada); e
- dimensões dos SMUs, ou dimensões da unidade mínima de separação.

O resultado da simulação é a porcentagem de massa acima do teor de corte determinado e o teor para cada bloco contido no modelo. A partir destes valores, é possível construir a curva de 'teor $\times$ massa' do material pré-concentrado.

Como premissa, considera-se que o equipamento possa ser alimentado com qualquer teor, entretanto, o produto conterá apenas a massa que contiver o teor superior ao de corte. A massa de alimentação é subdividida nas unidades mínimas de separação e deve ser admitido um valor para a disponibilidade do equipamento.

Os resultados devem ser ajustados para incorporar o erro de classificação durante o tempo de movimento do elemento mecânico que define a direção do fluxo. Esse tempo é definido pelo projeto conceitual apresentado e, a partir da otimização deste protótipo, pode-se reduzir esse erro. Assumiu-se esse erro para o material mal classificado durante o movimento do divisor, entretanto, o movimento será exclusivamente realizado durante o período em que houver a separação de rejeito do *sorter*, para, assim, evitar possíveis perdas de minério.

Para o cálculo da eficiência do processo é necessário saber o número de vezes em que o divisor será acionado. Para tanto, foi assumido que o divisor atuará na massa mínima de leitura o número necessário de vezes para retirar a massa de estéril da calculada a partir da curva teor $\times$ massa. Entretanto, este número é conservador, uma vez que esta premissa considera que o estéril sempre se apresentará sobre a correia de maneira intercalada com o minério.

4 SIMULAÇÕES, ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PHU KHAM MINE

4.1.1 Descrição da operação

A mineração Phu Kham da Phu Bia Mining Ltda. é controlada pela empresa australiana PanAust. A mina de cobre e ouro está localizada a aproximadamente 140 km nordeste da capital do Laos, Vientiane (Figura 12).

Figura 12 - Localização da Phu Kham Mine

Fonte: BENNETT et al. (2014).

A geologia de Phu Kham (PK), demonstrada na Figura 13, é extremamente heterogênea devido ao intemperismo, elevado grau de alteração, falhas e acamamento; o depósito consiste em horizontes complexos de ouro e cobre. A variabilidade do minério afeta diretamente a alimentação e a recuperação metalúrgica da usina que é, em média, 76%. O cobre é o principal metal de interesse da operação e está predominantemente contido na calcopirita; entretanto, há outros minerais como

calcocita, covelita, bornita e tenalita. Apenas a fração do ouro associado aos sulfetos de cobre é recuperada. Não há nenhuma etapa no processo focada no aumento da recuperação do ouro.

Figura 13 - Litologias Phu Kham Milne

Fonte: BENNETT et al. (2014).

A exploração é feita a partir de uma cava a céu aberto, tal como pode ser visto na Figura 14, com movimentação anual de 60 milhões de toneladas, sendo aproximadamente 40 milhões de toneladas de estéril e 20 milhões de toneladas de minério que alimenta a usina de beneficiamento. O processo consiste em britar, moer e flotar para recuperar o cobre e os outros metais presentes, como ouro e prata. Após expansão e otimização do projeto, houve um aumento na capacidade da usina de 14 milhões de toneladas por ano para 19,5 milhões de toneladas por ano (BENNETT et al., 2014).

Figura 14 - Fotografia Phu Kham Mine

Fonte: BENNETT et al. (2014).

A britagem se dá em um único estágio, por meio de um britador giratório. A moagem é composta de um moinho SAG e dois moinhos de bolas em paralelo, cada um em circuito fechado com bateria de ciclones, como demonstrado na Figura 15. Em sequência, tem-se o circuito de flotação com baterias de *roughers*, outra etapa de moagem, e uma sequência de etapas de *cleaning*. O concentrado contém, em média, de 22 a 25% de cobre, 7 g/t de ouro e 60 g/t de prata.

Figura 15 - Fluxograma do beneficiamento de Phu Kham Mine

Fonte: BENNETT et al. (2014).

4.1.2 Potencial para a aplicação do *BOS* em PK

O *bulk ore sorter* atua principalmente na variabilidade natural do minério, desta maneira, o ideal é instalar o sistema em uma etapa do processo na qual a variabilidade ainda não foi atenuada pelas sucessivas etapas de manuseio, cominuição e homogeneização do minério.

Devido às limitações técnicas dos sensores disponíveis no mercado é fundamental verificar se a vazão de alimentação e o comprimento da correia estão de acordo com a capacidade de leitura e tempo de processamento do sensor de selecionado.

Em Phu Kham é recomendada a instalação do *bulk ore sorter* após a britagem primária, uma vez que esta cominui o material à granulometria ideal para que, submetido ao sensor, seja classificado sobre o transportador de correia e separado pelo divisor mecânico.

Em 2014, a usina de beneficiamento operou com uma vazão de alimentação média de 2500 t/h de minério. O transportador de correia da saída do britador primário tem 800 m de comprimento e opera com velocidade média de 5 m/s. Desta maneira, o material permanece em média 160 s sobre o transportador de correia.

O sensor selecionado para o *bulk ore sorter* em Phu Kham é o de ressonância magnética que apresenta capacidade superior a atual vazão de alimentação e tempo de processamento de aproximadamente 20 s, isto é, inferior ao limite da infraestrutura instalada na mina que é de 160 s.

4.2 SELEÇÃO DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DO BENEFÍCIO

O benefício do *bulk ore sorter* está diretamente relacionado com a distribuição dos teores de cobre sobre a correia do britador primário. Desta maneira, para calcular o benefício econômico obtido a partir da instalação do *BOS* na operação, é fundamental estimar a massa e o teor do produto e do rejeito desta etapa do processo.

Para tanto, foram levantadas três possibilidades. A primeira era instalar o sensor na correia para verificar a capacidade de leitura e a distribuição dos teores para as diferentes zonas da mina. Este certamente é o método mais eficaz, entretanto, também é o mais caro. Desta maneira, foi descartado nesta primeira etapa do estudo.

O segundo método era realizar uma campanha de amostragem contínua na correia do produto do britador primário. A vantagem deste método é evitar a compra do sensor sem a comprovação do retorno econômico. Entretanto, também foi descartado, uma vez que provocaria grande impacto no fluxo de alimentação da usina pelas sucessivas interrupções para a coleta de amostra. Há que se destacar também o possível acúmulo de erros de amostragem, uma vez que o produto do britador primário apresenta uma granulometria grossa e, desta maneira, a massa mínima para a amostra ser considerada representativa deveria ser de dezenas de quilos, o que dificultaria ainda mais o processo.

O terceiro método era o método geoestatístico, o qual calcula a distribuição de teores no ponto de leitura do sensor a partir da variância de dispersão dos blocos do modelo krigado de curto prazo. Como descrito no item 2.1.4, “a variância de dispersão é o elemento que descreve o valor médio da dispersão de teores dentro de um bloco em torno de sua média. Este valor não depende de uma posição particular e é função apenas da geometria do bloco e do variograma”. Desta maneira, ao simular a distribuição de teores sobre a correia do britador primário, considerando-se apenas a variabilidade do minério *in situ*, a geometria dos blocos do modelo e a massa a ser separada a cada atuação do *BOS*, reduziu-se consideravelmente o custo e a interferência na operação deste estudo, o que viabilizou a sua realização. A partir dos resultados pode-se, então, estimar o possível benefício econômico e, desta maneira, embasar a decisão de arcar com os custos da instalação do sensor e faturamento de toda infraestrutura do sistema de *bulk ore sorting* no empreendimento.

4.3 PREMISSAS

4.3.1 Modelo conceitual do diversor

O sistema de *bulk ore sorting* é composto por um ou mais sensores, seguidos de uma central de processamento que recebe as informações de leitura de teores e, em seguida, aciona o diversor mecânico que realiza o corte no fluxo da correia, tal como demonstrado na Figura 16.

Este componente mecânico deve ser capaz de atuar de maneira rápida e precisa, uma vez que parte da eficiência do processo está associada diretamente ao

tempo de mudança de posição do divisor. O projeto base estima em três segundos o tempo de atuação do divisor. A aplicação de *bulk ore sorter* na mineração depende da capacidade dos sensores disponíveis, mas também da eficiência do divisor mecânico. A Figura 16 apresenta um modelo conceitual da Metso para um fluxo de 3600 t/h para uma correia de 1200 mm de largura e com velocidade 5 m/s. Neste modelo, o divisor é alimentado pelo produto do britador primário e dividido em quatro fluxos de saída. Há a possibilidade de separar o material em diversas faixas de teores e, assim, criar ou alimentar estoques de material com teores marginais.

Figura 16 - Sistema divisor

Fonte: Adaptado de Duffy (2015).

4.3.2 Custos

A introdução do *BOS* no circuito de beneficiamento impacta diretamente a movimentação de massa de cada processo unitário. Desta maneira, para quantificar

o benefício econômico é necessário individualizar os custos de produção e recalcular o custo total de produção para, assim, comparar com o valor anterior. A Tabela 5 apresenta o custo médio realizado por atividade em 2014.

Tabela 5 - Custo médio realizado por atividade em 2014		
Custo médio por atividade em 2014		
Perfuração e desmonte	0,44	USD/t
Carregamento e transporte	1,03	USD/t
Atividades auxiliares	0,29	USD/t
Administração - Lavra	0,42	USD/t
Custo total de lavra	2,18	USD/t
Beneficiamento	5,30	USD/t
Administração – Beneficiamento	0,71	USD/t
Custo total de beneficiamento	6,01	USD/t
Britagem	0,50	USD/t
Teor do concentrado	23	% Cu
Preço médio de comercialização 2014		
Cobre	2,72	USD/lb
Ouro	1300	USD/oz.

Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Análise variográfica

A mineralização de cobre Phu Kham foi modelada em quatro zonas. Os parâmetros dos variogramas de cada zona são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros da análise variográfica das quatro zonas de mineralização de cobre em Phu Kham

			Alcance													
Zona	Modelo	Efeito Pepita	Alcance 1				Alcance 2				Ângulos			Eixos		
			C1	X	Y	Z	C2	X	Y	Z	1	2	3	1	2	3
1	Esférico	0,06	0,13	15	15	12	0,12	32	65	65	0	0	0	3	1	3
2	Esférico	0,06	0,13	15	15	12	0,12	32	65	65	15	0	-45	3	1	2
3	Esférico	0,09	0,27	7,5	7,5	7,5	0,09	30	30	30	0	0	0	3	1	2
4	Esférico	0,09	0,27	7,5	7,5	7,5	0,09	30	30	30	0	0	0	3	1	2

Fonte: Autoria própria.

4.3.4 Unidade de separação

A operação da mina de Phu Kham impõe uma vazão de alimentação de 2500 t/h, o comprimento da correia principal é de 800 m, a velocidade de 5 m/s e o peso específico do minério é de 2,7 t/m³.

A CSIRO, fabricante do sensor de ressonância magnética, após testes com diversos minérios de cobre, indica que, para o erro entre o teor real e teor de leitura do sensor limite-se a casa de centésimos de percentual de cobre, deve-se adotar o tempo mínimo de leitura de 20 s.

Desta maneira, considerando-se a capacidade de 2500 t/h e a velocidade de 5 m/s, tem-se 14 t e 100 m na correia para o tempo mínimo de leitura 20 s. Estas 14 toneladas, dada a densidade padrão do minério de Phu Kham, 2,7 t/m³, representam um bloco de volume igual 5,2 m³ *in situ*. Para este volume, tem-se um cubo de 1,73 m de lado. A fim de manter conservador o estudo, dada a impossibilidade da realização dos testes com o sensor de RM na correia, adotou-se um cubo com lado de 2 m.

4.3.5 Cálculo da variância de dispersão

Em função das características da operação de Phu Kham e da capacidade de leitura do equipamento, adotou-se como unidade mínima de separação um cubo com lado de 2 m. Para esse cubo, pode-se calcular a variância de dispersão dos teores a partir das seguintes equações:

$$D^2(v,V) = Y(V,V) - Y(v,v) \quad (1)$$

$$Y(V,V) = \frac{1}{V^2} \iint_V \bar{\gamma}(x-y) dx dy \quad (2)$$

Em que: V é a dimensão do bloco inicial, v é a dimensão do SMU, Y é a função variograma e $\bar{\gamma}$ é a função variograma médio.

Dado que V do modelo de blocos da mina é 10 m, $V = 10\text{m} \rightarrow Y(V) = 0,2175$ e para um v de 2 m tem-se: $v = 2\text{ m} \rightarrow Y(2) = 0,0946$. Portanto, o desvio padrão será $D(2,10) = 0,35$. Uma vez que se trata de um estudo conceitual, optou-se por torná-lo, sempre que possível, o mais conservador. Como não é viável estimar com precisão

os efeitos potenciais de homogeneização provenientes das etapas de lavra, como desmonte, carregamento e transporte e britagem, admitiu-se um bloco base de 5 m de lado. Com isso, tem-se o mesmo $V=10\text{ m} \rightarrow Y(10) = 0,2175$ e $v = 5\text{ m} \rightarrow Y(5) = 0,1447 \rightarrow D(5,10) = 0,27$.

4.3.6 Verificação do valor calculado

Como forma de verificação dos valores obtidos, calculou-se a variância dos teores na etapa *rougher* do beneficiamento, uma vez que esta dispõe de um equipamento de verificação *on-line* de teores. Neste caso, há informações de teores de cobre a cada 5 minutos. A partir destas leituras, construiu-se o variograma experimental do *rougher*, apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Variograma baseado nas leituras das amostras do rougher a cada 5 minutos

Fonte: Autoria própria.

A linha laranja representa a variância da amostragem e vale 0,0037. Portanto, o desvio padrão absoluto é de 0,061. Comparando-se com o desvio do bloco de 5 m, tem-se um material aproximadamente 4,5 vezes mais homogêneo do que *in situ*. Este número é plausível, dadas as etapas de homogeneização na lavra anteriores ao ponto de leitura no *rougher*. Este valor pode ser comparado à homogeneização em uma pilha de homogeneização, que é de aproximadamente 10 vezes.

4.3.7 Eficiência da separação

A pré-concentração com *bulk ore sorting* visa elevar o teor de alimentação da usina a partir da remoção do material sem valor econômico. Idealmente, o produto do *bulk ore sorter* deve conter somente o material com teor acima do teor de corte e rejeitar qualquer quantidade de massa com teor inferior a este. Na prática, a separação dar-se-á por porções sobre a correia e não partícula a partícula; desta maneira, haverá um erro na separação, tanto porções do minério serão rejeitadas como parte do estéril estará no produto do *sorter*. Para mensurar o desempenho do *sorter*, foi construída uma curva de partição.

Na prática, há duas maneiras de se construir uma curva de partição para prever o desempenho do *sorter*, quais sejam: por meio de ensaios de laboratório ou a partir de uma simulação. Neste trabalho, a curva foi gerada a partir de uma planilha, em que os teores de cobre do minério são gerados em função da distribuição log-normal do minério, definida no modelo de teores da mina para um período de 24 horas, em intervalos de 20 segundos de integração do sensor.

O valor médio e o desvio padrão do minério em um período de 24 horas é o típico do modelo de controle de teor de Phu Kham, e os valores de teor e massa para cada intervalo são baseados em uma vazão de alimentação de 2000 t/h, com uma variação aleatória de $\pm 10\%$.

O teor de cada intervalo é comparado com o teor de corte. Se este teor é superior ao de corte, a massa e o conteúdo metálico desse intervalo são adicionados à massa da alimentação; caso contrário, é adicionada ao rejeito.

Há também o erro de leitura do sensor, o qual é simulado e aplicado aos resultados. Este pode ser zerado a fim de verificar sua influência no resultado final.

Como valor de saída desta simulação, tem-se a massa e o conteúdo de cobre recuperados para o produto do *sorter*, além do número médio de vezes por hora que o diversor é acionado.

A partir do ordenamento dos teores com a frequência de 20 segundos, com incrementos de 0,005% Cu, é também possível construir a curva de partição para o *sorter*.

Um exemplo de resultado da simulação de desempenho para um teor de corte de 0,23% de cobre é apresentado na Tabela 7 e corresponde à curva de partição, tal como demonstrado na Figura 18.

Tabela 7 - Resultado das simulações e desempenho do <i>sorter</i>		
Simulação <i>Sorter</i>	Recuperação %	
Condições operacionais	Massa	Cobre
3 s sem erro no divisor	92.1	96.3
3 s com erro no divisor	89.9	94.3

Fonte: Autoria própria.

Figura 18 - Curvas de Partição com uso do *sorter* sem (a) e com (b) o erro do divisor

Fonte: Autoria própria.

As curvas apresentam influência no produto da pré-concentração com *bulk ore sorter* do tempo de atuação do divisor e do erro de leitura do sensor. Na curva (a) tem-se a condição ideal e, na curva (b), são consideradas as ineficiências do sistema.

4.4 CENÁRIOS

Para estimar o potencial técnico e econômico da instalação do *bulk ore sorting* na produção, nos custos e nos lucros de Phu Kham, tomou-se como caso base os valores de custo e produção de 2014. O potencial efeito do *bulk ore sorter* foi estimado seguindo esta metodologia:

1. Foram utilizadas ferramentas geoestatísticas para a determinação da variabilidade de teores na alimentação da usina;
2. O resultado da pré-concentração com o *bulk ore sorter* e a determinação da nova alimentação da usina foram simulados baseando-se na variabilidade do minério (massas e teores);
3. As avaliações econômicas foram elaboradas para seis diferentes cenários. Foram considerados os custos adicionais da operação do *sorter* e do remanejamento do rejeito do *sorter*.

Os cenários considerados foram os seguintes:

Cenário 1: o primeiro cenário considera o *bulk ore sorter* e a mina operando com o teor de corte aplicado em 2014, ou seja, 0,2% Cu. Nesse cenário, o *bulk ore sorter* aumenta a seletividade do minério a ser alimentado na usina ao aplicar o teor de corte em porções menores do que os blocos de lavra na mina. Assim, o material que estiver abaixo do teor de corte, isto é, material fruto das diluições naturais, planejada e operacional, serão removidos antes da alimentação da usina.

Para tanto, um aumento na capacidade de lavra será necessário para manter constante a vazão de alimentação da usina de beneficiamento, uma vez que parte do material que alimentaria a usina será removido pelo *BOS*.

Cenário 2: o segundo cenário considera o teor de corte aplicado em 2014 no *BOS* (0,2% Cu), entretanto, considera também uma redução do teor de corte na mina para 0,1% Cu. O objetivo desta avaliação é o aproveitamento de parte do material considerado sem valor econômico na mina e que seria descartado com estéril, além de reduzir a pressão sobre a produção, uma vez que este material supre parte da nova

demanda de minério proveniente da rejeição de parte do material alimentado no *bulk ore sorter*, a fim de se manter constante a capacidade da usina.

Esta é uma opção interessante, uma vez que aproveita parte do material que anteriormente seria rejeitado, aumenta a vida útil da mina e requer um aumento de produção menor em relação ao Cenário 1.

Os dois primeiros cenários estudados são comparados ao cenário base de 2014. No entanto, ambos excedem a capacidade instalada do empreendimento e serão possíveis apenas se eliminadas as restrições para aumento da capacidade de produção da mina e da alimentação do britador primário. Já a usina mantém a capacidade de produção de 2014 em 18,1 Mt por ano.

Os seguintes cenários (3 e 4) foram elaborados com base na capacidade instalada: lavra 58 Mt por ano, britagem primária 19 Mtpa, máxima alimentação da usina 19 Mt por ano e produção de cobre 87 Kt por ano. A utilização da capacidade máxima instalada permite o aumento da produção em relação a 2014, de 18,1 Mt por ano para 19 Mt por ano. Com isso, os Cenários 3 e 4 são comparados com um novo caso base, que considera a alimentação da usina de 19 Mtpa para, assim, equalizar a comparação e determinar o benefício econômico apenas do processo de *sorting* e não do aumento proveniente da utilização da capacidade total da usina.

Cenário 3: como mencionado anteriormente, este cenário considera as constantes de produção de Phu Kham em 2014, teor de corte da mina e do *sorter* em 0,2% de cobre. O britador primário tem a capacidade limitada em 19 Mt por ano. Dado que o material que alimenta *BOS* deve ser previamente britado, este equipamento também está limitado a 19 Mt por ano.

O diferencial deste cenário é a redução da massa alimentada na usina advinda da atuação do *bulk ore sorter* no processo de pré-concentração. Como principais pontos positivos tem-se a redução significativa do custo de beneficiamento e do consumo energético na moagem.

Cenário 4: este cenário também considera as constantes de produção de 2014 em relação às capacidades de produção e teor de corte da mina, entretanto, ao considerar um teor de corte de 0,1% de cobre no *BOS*, a redução da massa alimentada na usina é menor. A lógica deste cenário é reduzir as perdas de minério na operação, enquanto remove do processo o material sem valor econômico. Este

cenário promove o bom equacionamento da produção com a redução da massa alimentada na usina, e, por consequência, a redução dos custos de produção, mas com a manutenção da produção metálica.

A partir do aprofundamento da mina, aumento da dureza do minério e do modelamento da alimentação da usina, a previsão futura indica que, mais à frente na vida útil da mina de Phu Kham, o gargalo no processo será o moinho SAG ao invés do britador primário, como o é atualmente, devido ao aumento na dureza do minério (BENNETT et al., 2014). Desta maneira, a alimentação da usina será limitada em 16,5 Mtpa.

Os Cenários 5 e 6 consideram a capacidade do moinho SAG como limitante para a determinação dos parâmetros de lavra e beneficiamento. Isso proporciona uma combinação bastante interessante para a instalação do *bulk ore sorter*, uma vez que, ao se limitar a produção pelo moinho, surge uma capacidade ociosa no britador primário que favorece o cenário com a pré-concentração em relação ao caso base.

Há que se lembrar que o *bulk ore sorter* retira parte da massa que seria alimentada na usina. Apesar de esse material não apresentar o conteúdo metálico necessário para obtenção de retorno financeiro, sua exclusão reduz a vazão de alimentação e, por consequência, a produção metálica final. Para reverter esse ponto inconveniente, tem-se que elevar a capacidade de lavra e britagem primária, alterações consideradas para os Cenários 5 e 6.

Cenário 5: considera o moinho SAG com a capacidade máxima de 16,5 Mt por ano e com os teores de corte da mina e do BOS em 0,2% de Cu. Mesmo com a redução da vazão de alimentação da usina para 16,5 Mt por ano a produção do britador primário ainda não é suficiente para suprir toda essa demanda e, portanto, esta etapa de britagem continua sendo o limitante principal.

Cenário 6: considera o moinho SAG com a capacidade máxima de 16,5 Mt por ano, o teor de corte na mina será novamente de 0,2% de Cu, entretanto, o teor de corte do BOS será 0,1% de Cu. Igualmente ao Cenário 4, a lógica desde cenário é remover o material sem valor econômico da massa de minério contido na faixa de teores entre 0,1% e 0,2% de Cu, anteriormente descartada, com a intenção do melhor

aproveitamento das reservas minerais, da ampliação da vida útil da mina e da maximização da produção.

4.5 SIMULAÇÕES DA PRÉ-CONCENTRAÇÃO COM *BULK ORE SORTER* PARA PHU KHAM

Para a simulação dos resultados da pré-concentração com *bulk ore sorter*, foi necessária a utilização de um *software* (Studio 3), o qual é capaz de aplicar a variância de dispersão para todos os blocos do modelo de curto prazo de Phu Kham e, assim, calcular a curva de teor x massa com os seguintes dados de entrada:

- teor de corte: o teor de corte aplicado na mina em cinco dos seis cenários foi 0,2% de cobre, uma vez que, segundo a equipe técnica da mina, a recuperação do processo cai consideravelmente para teores inferiores a este. No cenário número 2, aplicou-se o teor de corte de 0,1% de cobre, a fim de verificar a interferência desta variável no estudo;
- variograma: foram utilizados os variogramas específicos para as quatro mineralizações de cobre da mina;
- variância de dispersão: este valor pode ser calculado pelo *software* ou introduzido como uma constante, uma vez que este só depende do variograma e da geometria do bloco. O modelo de curto prazo de Phu Kham não é sub-blocado, portanto, todos os blocos têm a mesma geometria, um cubo de 10 m de lado;
- curva distribuição de teores: indica o tipo de distribuição;
- dimensões dos SMUs: as dimensões da unidade mínima de separação definida anteriormente, neste caso, um cubo de 5 metros de lado;
- eficiência do *bulk ore sorter*: este fator considera a disponibilidade e possíveis erros na operação do equipamento.

4.5.1 Cálculo da eficiência do *bulk ore sorter*

Em relação à eficiência do processo de *bulk ore sorting*, a partir da massa de rejeito do *sorter* obtida na simulação, determinou-se que o diversor mecânico será acionado o número de vezes necessário para que o equipamento retire do fluxo toda

a massa com o teor medido inferior ao de corte, sendo considerada cada porção eliminada de 14 toneladas, a cada 20 segundos.

Deve ser considerado, também, que o tempo de abertura e fechamento do diversor mecânico é de 3 segundos. Com isso, durante o período de curso do diversor, há um erro de direcionamento de 50% do material, que será programado para que sempre ocorra de maneira a nunca perder minério e, sim, a reduzir a eficiência do equipamento ao permitir a passagem de estéril para o beneficiamento.

Para calcular a massa rejeitada pelo *sorter*, tem-se a equação 4.

$$M_e = \frac{M_{es} \times D \times (T_L - T_D)}{T_L} \quad (4)$$

Em que:

M_e – Massa de estéril após o cálculo da eficiência.

M_{es} – Massa de estéril da leitura do sensor.

D – Disponibilidade física.

T_L – Tempo de leitura.

T_D – Tempo de acionamento do diversor.

Desta maneira, a massa de minério que alimentará a usina é a soma da massa de minério definida na leitura do sensor somada à diferença entre a massa de estéril lida pelo sensor e a massa de estéril após o cálculo da eficiência. Como definido pela equação 5:

$$M_m = M_{ms} + (M_e - M_{es}) \quad (5)$$

Em que:

M_m – Massa de minério após o cálculo da eficiência.

M_{ms} - Massa de minério da leitura do sensor.

4.5.2 Resultado das Simulações

Como resultado da simulação, tem-se a massa e o teor da porção de cada bloco do modelo com teor acima do teor de corte escolhido. A partir destes valores, é possível construir a curva de teor x massa do material recuperado. Um exemplo do

resultado da simulação, considerando o teor de corte na mina de 0,2% de cobre, é apresentado na Figura 19 e na Tabela 8.

Figura 19 - Curva Teor x Massa - Teor de corte 0,2% de Cobre

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Resultados da simulação

Mina		R.O.M.			Resultado da Simulação				
Teor de Cobre (%Cu)	Massa (t)	Cobre (t)	Cobre acumulado(t)	Teor de cobre	Massa (t)	Cobre (t)	Cobre acumulado (t)	Teor de cobre	de
0	33.527.060	4.376							
0,1	3.266.555	4.954	97.118	0,43%	698.926	2.846	87.904	0,66%	
0,2	4.220.935	10.680	92.164	0,47%	1.928.026	8.293	85.059	0,68%	
0,3	5.061.558	17.643	81.485	0,54%	3.063.620	15.571	76.766	0,72%	
0,4	3.936.635	17.585	63.841	0,63%	2.635.654	16.263	61.195	0,80%	
0,5	2.473.788	13.493	46.256	0,74%	1.822.689	12.820	44.933	0,90%	
0,6	1.295.380	8.355	32.762	0,87%	1.006.658	8.051	32.112	1,02%	
0,7	2.456.040	24.407	24.407	0,99%	2.141.865	24.062	24.062	1,12%	
Total	56.237.950	101.494			13.297.438	87.904			

Fonte: Autoria própria.

4.6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A avaliação econômica foi elaborada com o objetivo de se estimar o desempenho da operação a partir dos seguintes índices: aumento da capacidade de produção da mina, elevação do teor médio na alimentação da usina e os custos adicionais do processo de *sorting* e reacomodação do rejeito do *bulk ore sorter*.

Para esta análise, foram assumidos os seguintes índices:

- custos por tonelada de lavra, processamento e administração iguais aos de 2014;
- acréscimo no custo de lavra proporcional ao valor por tonelada executado em 2014;
- custos adicionais incluídos em função da operação do *sorter* (US\$ 0,4 por tonelada alimentada) e reacomodação do rejeito do *sorter*;
- retomada e acomodação do material rejeitado US\$1,6 por tonelada;
- rendimento operacional do *bulk ore sorter* de 90%;
- tempo de leitura e integração do sensor: 20 segundos, equivalente a 14 toneladas;
- recuperação da usina calculada em função do teor de alimentação baseada na análise da curva de regressão da usina de Phu Kham em 2014;
- preço de venda do cobre US\$ 5.500/t.

Seis cenários foram avaliados, conforme Figura 20 e descrição constante no item 4.4. Em cada um deles foi alterado o valor de um indicador característico do processo a fim de se avaliar o seu impacto da flutuação no balanço econômico do empreendimento.

A capacidade de lavra teria que aumentar em 37% para o Cenário 1 e em 25% para o Cenário 2, para que seja repostado o material rejeitado pelo *bulk ore sorter* e mantida a alimentação da usina de modo igual ao realizado em 2014. Como resultado, a usina receberia um material muito mais rico, com o teor médio 33% maior para o Cenário 1 e 25% maior para o Cenário 2. O resumo dos resultados dos cenários é exibido na Figura 21.

Figura 20 - Definição dos cenários e balanço de massa

Fonte: Adaptado de Valery (2016).

Figura 21 - Resumo dos resultados dos cenários

Fonte: Adaptado de Valery (2016).

Se não houvesse limitações para a capacidade de lavra e britagem, a produção metálica anual aumentaria de 30 a 40% e, o lucro, de 50 a 60%; entretanto, a operação de Phu Kham não dispõe da capacidade instalada para tanto. Com as limitações de um empreendimento já instalado e as capacidades máximas de operação (Cenários

3 e 4), o lucro pode ser elevado em 5% a partir da redução da massa alimentada na usina por tonelada de metal produzido. Quando a operação passar a ser restringida pela limitação de capacidade do moinho SAG, em detrimento do britador primário (Cenários 5 e 6), a produção metálica pode ser aumentada de 10 e 15% e, o lucro, de 20 a 25%, caso seja instalado o *ore sorter*.

4.7 DISCUSSÕES E APLICABILIDADE PARA OUTROS EMPREENDIMENTOS

A indústria mineira costuma não considerar as variações do minério e de teores durante a vida útil da mina, isto é, a usina é comumente desenvolvida para um minério típico, teor médio e em uma fase inicial do projeto, na qual o conhecimento sobre a jazida ainda é bastante limitado. Por consequência, as operações mineiras desenvolveram estratégias de homogeneizar o minério lavrado a fim de evitar grandes flutuações das variáveis no beneficiamento, principalmente em relação ao teor e à mineralogia, de modo a sempre se trabalhar com um processo estável e otimizado.

Não é incomum encontrar uma série de pilhas, no pátio de britagem, de material ROM com diferentes faixas de teor, que podem alimentar o britador na proporção tal que mantenha os padrões requeridos pelo beneficiamento. Por outro lado, para maximizar o benefício da pré-concentração, o material lavrado deve ser mantido com sua heterogeneidade natural, uma vez que o processo de *bulk ore sorter* se vale justamente desta diferença de teores para realizar a pré-concentração do minério.

Sabemos que a diluição pode ter um impacto muito significativo no retorno financeiro das operações mineiras, como a redução do teor médio de alimentação. O *bulk ore sorting* pode reduzir o efeito de todas as diluições da lavra e reduzir a perda de minério a partir da evolução no controle de teores.

Os custos de operação normalmente crescem durante a vida útil da mina, uma vez que os teores tendem a diminuir e, portanto, mais massa deve ser tratada por tonelada de produto, além do fato de que a recuperação da usina, na maioria dos casos, cai com a diminuição do teor alimentado. A diluição também exige o aumento do teor de corte da mina, o que reduz o aproveitamento dos recursos minerais. Perdas de minério ocorrem quando do erro de estimativa dos recursos, fruto de más práticas de amostragem e da própria heterogeneidade do depósito. A consequência é que parte do minério é enviada diretamente à pilha de estéril. Com a possibilidade da

redução do teor de corte na lavra e a partir da medição de teores com o sensor, o *bulk ore sorter* proporciona a correta alocação do minério. Somente o material com teor superior ao de corte será beneficiado, aumentando assim a disponibilidade da usina e facilitando o cumprimento do planejamento teórico elaborado para a operação.

Uma pré-concentração efetiva eleva o teor médio de alimentação da usina, reduz a massa de material processado por unidade de produto final e reduz o custo de energia e de consumo de água por tonelada de produto. Além disto, o aumento do teor médio deve elevar a recuperação da usina como um todo, principalmente dos circuitos de flotação. Com base no histórico de informações da mina de Phu Kham, estima-se que, com o aumento do teor médio da alimentação promovida pelo uso do *bulk ore sorter*, a recuperação da usina aumente entre 2,5 e 3%.

CONCLUSÕES

O propósito da pré-concentração com *bulk ore sorter* é remover material estéril grosso antes das etapas subsequentes de manuseio e processamento. Menos toneladas de minério seriam tratadas por tonelada de produto, reduzindo-se, assim, os custos e o consumo de energia e de água por tonelada produzida. Dessa forma, a pré-concentração com *BOS* tem o potencial de elevar a lucratividade e reduzir o impacto ambiental de uma operação de mineração.

A pré-concentração com *BOS* pode ser utilizada para aumentar a produção de uma usina com capacidade fixa ou reduzir o tamanho dos equipamentos de processamento nas etapas subsequentes.

Reservas inviáveis economicamente, minérios marginais de um depósito, pilhas de material estéril ou teores marginais podem ser enriquecidos para se tornar economicamente viáveis para tratamento e, dessa forma, aumentar a recuperação da jazida. Adicionalmente, a pré-concentração com *BOS* pode reduzir a diluição e a perda de minério em uma operação de lavra ao melhorar o controle de teores, ou mesmo ser utilizado para separar tipos diferentes de minérios para serem tratados separadamente.

Um eficiente pré-concentrador de minério permite a seletividade com base em um volume menor, como, por exemplo, o volume referente a alguns metros de material em um transportador de correia em vez do volume referente a uma carga de caminhão.

O principal fator que afeta a lucratividade de um pré-concentrado de minério é o fator de enriquecimento que pode ser alcançado com o concentrador (rejeição e recuperação de massa), ou seja, o quão efetivo o concentrador é para remover o material estéril ao mesmo tempo em que recupera a fração com valor econômico. Essa efetividade é função das características do minério, da distribuição de teores ao longo do depósito e da eficiência do concentrador, e, portanto, requer extensivos testes e avaliações caso a caso. O impacto total nos custos operacionais e de capital para a operação também devem ser considerados. É provável que, pelo menos em alguns casos, os custos adicionais associados à pré-concentração com *BOS* excedam a redução nos custos de processamento subsequentes e/ou aumento da produção.

Para a mina de Phu Kham, na qual a geologia é complexa e o minério bastante heterogêneo, a análise geoestatística indica que a pré-concentração com *BOS* deve elevar o teor de alimentação o suficiente para se tornar economicamente viável.

Tal como demonstrado anteriormente pelos cenários avaliados, é mais barato retirar o material sem valor econômico o mais cedo possível no processo do que deixar que seja beneficiado, principalmente porque esta parcela de material utiliza parte da capacidade de processamento da usina que poderia ser utilizada para tratar minério.

A análise econômica indica um incremento potencial de 5% no lucro anual com aplicação do *BOS* nas atuais condições operacionais na mina de Phu Kham, entretanto, um benefício muito maior pode ser obtido com a ampliação da capacidade de lavra e britagem, ou simplesmente no futuro próximo da vida útil da mina, quando o moinho SAG terá sua capacidade reduzida.

Conclui-se, portanto, que os objetivos do presente trabalho de determinar os benefícios potenciais e a viabilidade econômica do emprego do *BOS* em etapa de pré-concentração na operação de Phu Kham foi cumprido. Uma vez que o equipamento encontrase em desenvolvimento, o próximo passo é a instalação do sensor, que, a partir de uma sequência de medições, poderá detectar a variação de teores e validar os valores estimados por meio da análise geoestatística e do novo teor médio de alimentação para a mina de Phu Kham. Se o teste confirmar o potencial esperado, o sistema diversor poderá ser instalado e a solução *BOS* passará a fazer parte do processo produtivo de Phu Kham.

REFERÊNCIAS

BENNETT, D.; TORDOIR, A.; WALKER, P.; LA ROSA, D.; VALERY, W.; DUFFY, K. Throughput Forecasting and Optimisation at the Phu Kham Copper-Gold Operation. In: *Proceedings of the 12th AusIMM Mill Operators' Conference* (The Australian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne), 2014.

BERGMANN, C. Developments in ore sorting technology. *Council for Mineral Technology*. 2009. Disponível em: <<http://www.mintek.co.za/Mintek75/Proceedings/M02-Bergmann.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

BUTCHER, A, CUNNINGHAM, R, EDWARDS, K, LYE, A, SIMMONS, J, STEGMAN, C, WYLLIE, A. *Northparkes Mines, Rio Tinto, em Monografia 28 - Australasian Mining and Metallurgical Operating Practices - Terceira Edição, 2013* (ed: W J Rankin), páginas 861 a 878 (Instituto Australiano de Mineração e Metalurgia: Melbourne).

CHIEREGATI, A. C. *The many facets of mine reconciliation. In: World Conference on Sampling and Blending, 6rd. WCSB6. Lima, Peru. 2013.*

CHIEREGATI, A. C; PITARD, F.F. *The challenge of sampling gold. Fourth World Conference on Sampling & Blending, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009.*

CHIEREGATI, A. C. *Reconciliação pró-ativa em empreendimentos mineiros*. Tese de doutorado. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP, 2007. p. 201.

CRAWFORD, G.D. Reconciliation of reserves: part 2. *Pincock Perspectives*, nº50, jan/2004, págs. 1-4, Pincock, Allen & Holt, Colorado. Disponível em: <<http://www.pincock.com/perspectives/Issue50-Reconciliation-2.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2016.

EBRAHIMI, A. *The importance of dilution factor for open pit mining projects*. 2013. Disponível em: http://www.srk.com.au/files/File/papers/dilution_factor_openpit_a_ebrahimi.pdf. Acesso em: 6 jan. 2017.

DUFFY, K., VALERY, W., JANKOVIC, A., & HOLTHAM, P. (2015). Integrating Bulk Ore Sorting into a Mining Operation to Maximise Profitability, *Proceedings of Metplant 2015*, (AusIMM: Melbourne).

HESELEV, T. *Ore sorting: Sound technology making waves*. 2012. Disponível em: <<http://www.csiro.au/Portals/Publications/Magazines/resourceful/Issue-2/2-sound-technology.aspx>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

HUKKI, R. T. Mineral beneficiation: proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond. *AIME Transactions*. New York, jan. 1961.

HUNT, G. R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3), p. 501–513, 1977.

IMRIE, G. O. C. Ore flow optimization: mine to mill integration - the next step improvement. *Hatch Beddows Strategy Consulting*, Australia. 2001. Disponível em: <http://www.hatch.ca/Operations_Support/articles.htm>. Acesso em: 29 nov. 2017.

JOURNEL; HUIJBREGTS. Mining Geostatistics. New York : The Blackburn Press, 1978.

MANOUCHEHRI, H. R. *Sorting: possibilities, limitations and future*. 2004. Disponível em: <<http://pure.ltu.se/portal/files/299975/article>>. Acesso em: 19 jan. 2015.

MARANHÃO, R. J. *Introdução a pesquisa mineral*. Fortaleza: Imprensa Universitária da UFC, 1982.

MILJAK, D. *Ore sorting provides sustainable future for mining*. CSIRO, 2011.

MINES ParisTech - Centre de Géosciences, Fontainebleau, FRANCE. Disponível em: <<http://www.geosciences.mines-paristech.fr/en/training/continuing-education/geostatistic-resource-estimation/linear-geostatistics>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

MORLEY, C. Beyond reconciliation: a proactive approach to using mining data. In: *Large Open Pit Mining Conference*, 5th, p. 185-192, Kalgoorlie, Australia, 2003.

NOPPÉ, M. Reconciliation: importance of good sampling and data QA-QC. In: *Mining and Resource Geology Symposium*, Queensland, Australia, 2004. Disponível em: <<http://www.snowdengroup.com/Files/GradeControl-1.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2016.

PEARSON EDUCATION, inc. Disponível em: <<http://www.geogrify.net/GEO1/Lectures/EnergyAtmosphere/SolarEnergy.html>>. Acesso em: 05 out. 2016.

PITARD, F. F. 2008. Blasthole Sampling for Grade Control – The Many Problems and Solutions. In: *Sampling Conference*, Perth, Australia, 2008.

PITARD, F. F. Pierre. *Gy's sampling theory and sampling practice*: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control. Florida, CRC Press, 2nd ed., p. 488, 1993.

POKRAJCIC, Z.; Lewis-Gray, E. Advanced comminution circuit design – essential for industry, *AusIMM Bulletin*, August 2010, p. 38 – 42, 2010.

THOMAS, N.; SNOWDEN, V. Improving reconciliation and grade control by statistical and geostatistical analysis. In: *Strategies for Grade Control, AIG Bulletin 10*, Australia, p. 49-59. 1990. Disponível em: <<http://www.snowdengroup.com/Files/>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

VALERY, W., DUFFY, K.; REPLE, A.; JANKOVIC, A.; SIPOLI, B. Nova tecnologia de Ore Sorter Permite Otimizar Teores e Lucros. *Revista Brasil Mineral*, April 2015, pags. 66-75.

VALERY, W., DUFFY, K., REPLE, A.; HOLTHAM P., PRATI, F.; WALKER, P.. Evaluation of Bulk Ore Sorting for Pre-concentration of Copper Ore at the PanAust Phu Kham Operation. *World Mining Congress (WMC)*, Rio de Janeiro, Brazil, 18-21 September 2016.

WANDERLEY, H.; AMORIM, R.; CARVALHO, F. Spatial variability and missing precipitation data filling in Alagoas state. *Revista Brasileira Meteorologia*, vol. 27 n. 3, São Paulo, set. 2012, p. 347-354.

ISOKANGAS, E. SONMEZ, B. WORTLEY, M. VALERY, W. Using SmartTag TM to Track Ore in Process Integration and Optimisation Projects: Some Case Studies in a Variety of Applications. *5th International Platinum Conference*, The Southern African Institute of Mining & Metallurgy, South Africa, 17-21 September 2012

WOTRUBA, H. Sensor sorting technology – is the minerals industry missing a chance?, In: *Proceedings of XXIII International Mineral Processing Congress (IMPC)*, Istanbul, Turkey, 3-8 September, 2006.

APÊNDICE A – ANÁLISE ECONÔMICA CENÁRIOS 1 E 2

Ano 2014		Realizado		Cenário 1		Cenário 2	
Estéril	Ton.	34,193,367		46,820,632		39,081,448	
Perfuração e Desmonte	US\$/t	0.44	\$15,045,081	0.44	\$20,601,078	0.44	\$17,195,837
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$35,219,168	1.03	\$48,225,251	1.03	\$40,253,892
Serviços auxiliares	US\$/t	0.29	\$9,916,076	0.29	\$13,577,983	0.29	\$11,333,620
Outros	US\$/t	0.05	\$1,709,668	0.05	\$2,341,032	0.05	\$1,954,072
Custo de administração	US\$/t	0.42	\$14,361,214	0.42	\$19,664,666	0.42	\$16,414,208
Custo total - Estéril	US\$/t	2.23	\$76,251,208	2.23	\$104,410,010	2.23	\$87,151,629
Minério	Ton.	18,079,056		24,743,317		26,473,376	
Teor	%	0.46		0.47		0.43	
Perfuração e Desmonte	US\$/t	0.44	\$7,954,785	0.44	\$10,887,059	0.44	\$11,648,286
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$18,621,427	1.03	\$25,485,616	1.03	\$27,267,577
Serviços auxiliares	US\$/t	0.29	\$5,242,926	0.29	\$7,175,562	0.29	\$7,677,279
Custo de administração	US\$/t	0.42	\$7,593,203	0.42	\$10,392,193	0.42	\$11,118,818
Custo total - Minério	US\$/t	2.18	\$39,412,342	2.18	\$53,940,430	2.18	\$57,711,960
Alimentação <i>Ore Sorter</i>	Ton.	0		24,743,317		26,473,376	
Custo <i>Ore Sorting</i>	US\$/t	0	\$0	0.4	\$9,897,327	0.4	\$10,589,350
Rejeito (Sorted)	Ton.			6,664,261		8,394,320	
Britagem	US\$/t	0.5	\$0	0.5	\$3,332,130	0.5	\$4,197,160
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$0	1.03	\$6,864,189	1.03	\$8,646,150
Custo de administração	US\$/t	0.05	\$0	0.05	\$333,213	0.05	\$419,716
Custo total - <i>Ore Sorter</i>	US\$/t	\$0	\$0	\$0.8	\$20,426,859	\$0.9	\$23,852,377
Minério (Sorted)	Ton.	18,079,056		18,079,056		18,079,056	
Teor (Sorted)	%	0.46		0.61		0.58	
Custo beneficiamento	US\$/t	5.3	\$95,818,996	5.3	\$95,818,996	5.3	\$95,818,996
Custo de administração	US\$/t	0.71	\$12,836,130	0.71	\$12,836,130	0.71	\$12,836,130
Custo total - Beneficiamento	US\$/t	6.01	\$108,655,125	6.01	\$108,655,125	6.01	\$108,655,125
Custo total - Minério (Sorted)	US\$/t	8.19	\$148,067,467	10.12	\$183,022,414	10.52	\$190,219,462
Valor por bloco	Ton. Cu	82,734		110,364		104,991	
Proço do cobre	US\$/t	5500	\$455,035,246	5500	\$607,002,132	5500	\$577,451,952
Recuperação beneficiamento	%	77	\$348,101,963	80	\$488,029,714	80	\$460,229,206
Recuperação total	%	77	\$348,101,963	80	\$488,029,714	80	\$460,229,206
Teor de corte - <i>Ore Sorter</i>	%			0.2		0.2	
Teor de corte - Beneficiamento	%	0.2		0.2		0.1	
Retorno financeiro			\$123,783,289		\$200,597,290		\$182,858,115
Benefício - <i>Ore Sorter</i>					\$76,814,002		\$59,074,826
Variação no conteúdo metálico	%				40%		32%
Variação do retorno financeiro	%				62%		48%

APÊNDICE B – ANÁLISE ECONÔMICA CENÁRIOS 3 E 4

Ano 2014		Cenário base atual		Cenário 3		Cenário 4	
Estéril	Ton.	35,702,869		35,702,869		35,702,869	
Perfuração e Desmonte	US\$/t	0.44	\$15,709,262	0.44	\$15,709,262	0.44	\$15,709,262
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$36,773,955	1.03	\$36,773,955	1.03	\$36,773,955
Serviços auxiliares	US\$/t	0.29	\$10,353,832	0.29	\$10,353,832	0.29	\$10,353,832
Outros	US\$/t	0.05	\$1,785,143	0.05	\$1,785,143	0.05	\$1,785,143
Custo de administração	US\$/t	0.42	\$14,995,205	0.42	\$14,995,205	0.42	\$14,995,205
Custo total - Estéril	US\$/t	2.23	\$79,617,398	2.23	\$79,617,398	2.23	\$79,617,398
Minério	Ton.	19,000,000		19,000,000		19,000,000	
Teor	%	0.47		0.47		0.48	
Perfuração e Desmonte	US\$/t	0.44	\$8,360,000	0.44	\$8,360,000	0.44	\$8,360,000
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$19,570,000	1.03	\$19,570,000	1.03	\$19,570,000
Serviços auxiliares	US\$/t	0.29	\$5,510,000	0.29	\$5,510,000	0.29	\$5,510,000
Custo de administração	US\$/t	0.42	\$7,980,000	0.42	\$7,980,000	0.42	\$7,980,000
Custo total - Minério	US\$/t	2.18	\$41,420,000	2.18	\$41,420,000	2.18	\$41,420,000
Alimentação <i>Ore Sorter</i>	Ton.	0		19,000,000		19,000,000	
Custo <i>Ore Sorting</i>	US\$/t	0	\$0	0.4	\$7,600,000	0.4	\$7,600,000
Rejeito (Sorted)	Ton.			5,117,380		3,785,522	
Britagem	US\$/t	0.0	\$0	0.5	\$2,558,690	0.5	\$1,892,761
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$0	1.03	\$5,270,901	1.03	\$3,899,088
Custo de administração	US\$/t	0.05	\$0	0.05	\$255,869	0.05	\$189,276
Custo total - <i>Ore Sorter</i>	US\$/t	\$0.0	\$0	\$0.8	\$15,685,460	\$0.7	\$13,581,125
Minério (Sorted)	Ton.	19,000,000		13,882,620		15,214,478	
Teor (Sorted)	%	0.47		0.61		0.57	
Custo beneficiamento	US\$/t	5.36	\$101,840,000	5.3	\$73,577,886	5.3	\$80,636,734
Custo de administração	US\$/t	0.71	\$13,490,000	0.71	\$9,856,660	0.71	\$10,802,279
Custo total - Beneficiamento	US\$/t	6.01	\$114,190,000	6.01	\$83,434,546	6.01	\$91,439,013
Custo total - Minério (Sorted)	US\$/t	8.19	\$155,610,000	10.12	\$140,540,006	9.63	\$146,440,138
Valor por bloco	Ton. Cu	88,350		84,747		86,418	
Proço do cobre	US\$/t	5500	\$485,925,000	5500	\$466,107,303	5500	\$475,300,295
Recuperação beneficiamento	%	79	\$383,880,750	81	\$376,148,593	81	\$383,567,338
Recuperação total	%	79	\$383,880,750	81	\$376,148,593	81	\$383,567,338
Teor de corte - <i>Ore Sorter</i>	%			0.2		0.2	
Teor de corte - Beneficiamento	%	0.2		0.2		0.1	
Retorno financeiro			\$148,653,352		\$155,991,189		\$157,509,803
Benefício - <i>Ore Sorter</i>					\$7,337,837		\$8,856,450
Variação no conteúdo metálico	%				-2%		0%
Variação do retorno financeiro	%				5%		6%

APÊNDICE C – ANÁLISE ECONÔMICA CENÁRIOS 5 E 6

Ano 2014		Cenário base SAG		Cenário 5		Cenário 6	
Estéril	Ton.	31,000,000		35,702,869		35,702,869	
Perfuração e Desmonte	US\$/t	0.44	\$13,640,000	0.44	\$15,709,262	0.44	\$15,709,262
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$31,930,000	1.03	\$36,773,955	1.03	\$36,773,955
Serviços auxiliares	US\$/t	0.29	\$8,990,000	0.29	\$10,353,832	0.29	\$10,353,832
Outros	US\$/t	0.05	\$1,550,000	0.05	\$1,785,143	0.05	\$1,785,143
Custo de administração	US\$/t	0.42	\$13,020,000	0.42	\$14,995,205	0.42	\$14,995,205
Custo total - Estéril	US\$/t	2.23	\$69,130,000	2.23	\$79,617,398	2.23	\$79,617,398
Minério	Ton.	16,500,000		19,000,000		19,000,000	
Teor	%	0.47		0.47		0.48	
Perfuração e Desmonte	US\$/t	0.44	\$7,260,000	0.44	\$8,360,000	0.44	\$8,360,000
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$16,995,000	1.03	\$19,570,000	1.03	\$19,570,000
Serviços auxiliares	US\$/t	0.29	\$4,785,000	0.29	\$5,510,000	0.29	\$5,510,000
Custo de administração	US\$/t	0.42	\$6,930,000	0.42	\$7,980,000	0.42	\$7,980,000
Custo total - Minério	US\$/t	2.18	\$35,970,000	2.18	\$41,420,000	2.18	\$41,420,000
Alimentação Ore Sorter	Ton.	0		19,000,000		19,000,000	
Custo Ore Sorting	US\$/t	0	\$0	0.4	\$7,600,000	0.4	\$7,600,000
Rejeito (Sorted)	Ton.			5,117,380		3,785,522	
Britagem	US\$/t	0.5	\$0	0.5	\$2,558,690	0.5	\$1,892,761
Carregamento e Transporte	US\$/t	1.03	\$0	1.03	\$5,270,901	1.03	\$3,899,088
Custo de administração	US\$/t	0.05	\$0	0.05	\$255,869	0.05	\$189,276
Custo total - Ore Sorter	US\$/t	\$0.0	\$0	\$0.8	\$15,685,460	\$0.7	\$13,581,125
Minério (Sorted)	Ton.	16,500,000		13,882,620		15,214,478	
Teor (Sorted)	%	0.47		0.61		0.57	
Custo beneficiamento	US\$/t	5.3	\$87,450,000	5.3	\$73,577,886	5.3	\$80,636,734
Custo de administração	US\$/t	0.71	\$11,715,000	0.71	\$9,856,660	0.71	\$10,802,279
Custo total - Beneficiamento	US\$/t	6.01	\$99,165,000	6.01	\$83,434,546	6.01	\$91,439,013
Custo total - Minério (Sorted)	US\$/t	8.19	\$135,135,000	10.12	\$140,540,006	9.63	\$146,440,138
Valor por bloco	Ton. Cu	78,210		84,747		87,335	
Proço do cobre	US\$/t	5500	\$430,155,000	5500	\$466,107,303	5500	\$480,341,995
Recuperação beneficiamento	%	77	\$329,068,575	80	\$371,487,520	79	\$379,470,176
Recuperação total	%	77	\$329,068,575	80	\$371,487,520	79	\$379,470,176
Teor de corte - Ore Sorter	%			0.2		0.2	
Teor de corte - Beneficiamento	%	0.2		0.2		0.1	
Retorno financeiro			\$124,803,575		\$151,330,116		\$153,412,641
Benefício - Ore Sorter					\$26,526,541		\$28,609,066
Variação no conteúdo metálico	%				13%		15%
Variação do retorno financeiro	%				21%		23%