

MODELO DE ESTIMATIVA DOS CUSTOS DE CAPITAL E OPERACIONAL DE LAVRA SUBTERRÂNEA ATRAVÉS DE CURVAS PARAMETRIZAS OBTIDAS POR ESTUDOS DE VIABILIDADE

Vinícius Igor Albuquerque Batista de Araújo, UFRGS/PPGE3M, viniciusigor@gmail.com

Carlos Otávio Petter, UFRGS/PPGE3M

Fernando Alves Cantini Cardozo, UFRGS/PPGE3M

Renato Aurelio Petter, UFRGS/PPGE3M

RESUMO

Esse estudo envolve coletar os relatórios técnicos de viabilidade recentes, disponibilizados pelas empresas mineradoras listadas na bolsa de valores de Toronto, extrair os custos de capital e operacional de extração associado ao método de lavra e as especificidades do empreendimento mineiro. Os dados dos projetos foram separados em duas famílias em função de se tratar de projetos *greenfield* e *brownfield* para os métodos com maior número de amostras (corte & enchimento e lavra em subníveis). Como resultado, são apresentadas as curvas paramétricas com os dados atuais objetivando gerar curvas de predição e comparar Opex e Intensidade Capitalística (Investimento Inicial/produção diária) para os dois métodos.

Palavras-chave: Custo operacional e de capital; Estudo de viabilidade em mineração; Lavra subterrânea

ABSTRACT:

This work was based on to collect feasibility studies available by public traded companies listed in Toronto Stock Exchange (TSX), to extract recent operations and capitals costs associated with underground mining methods and their specificities. The database was separated into two series: greenfield and brownfield projects then it was divided into the two largest underground mining methods found in the database. As results are demonstrated in parametric curves in present values with the purpose to create prediction curves and compare it with operation costs and Capital Intensity (Initial investment/diary production) for two methods found.

Keywords: Capital and operation expenditure; Mining feasibility studies; Underground method

INTRODUÇÃO

O estudo da viabilidade técnico econômica, com a respectiva avaliação de custos e receitas é considerada a base para implementação de projetos de qualquer natureza. No setor mineral, onde tipicamente se trabalha com projetos na escala de milhões de dólares, devido as grandes escalas de operação e, onde mesmo o aprofundamento de estudos prospectivos – sondagens e ensaios de laboratórios, significam em altos dispêndios, as estimativas preliminares de custos de forma rápida e de baixo custo torna-se de suma importância. Para tal é alvo de diversos estudos e produtos comerciais a estimativa de custos na mineração, por exemplo comissionamento e custos operacionais.

Para as estimativas rápidas (no jargão do setor, as chamadas “*quick evaluations*” o setor mineral utiliza-se de estimativa de custos por semelhança de valores para com projetos já executados ou com estimativas de custos executadas em detalhes (projetos de detalhe) como apresenta Carriconde [1]. Motta e Calôba [2], apresentam como a economia de escala – de ampla aplicação na avaliação econômica de empreendimento – é aderente e aplicável a projetos de mineração. Segundo esta metodologia o custo de investimento em um determinado projeto (CAPEX – *capital expenditure*) é proporcional ao custo de investimento em um projeto de mesma natureza, mas de escala produtiva diferente. De la Vergne [3] apresenta uma série de fatores (α) para aplicação nas atividades de mineração.

$$CAPEX_A = CAPEX_B * \left(\frac{Q_A}{Q_B}\right)^\alpha \quad (1)$$

Onde:

$CAPEX_A$ é o investimento em um projeto em um nível A; $CAPEX_B$ é o investimento em um projeto similar em um nível B; Q_A é a escala de produção para o nível A; Q_B é esta mesma escala para o nível básico B; e α é o termo que determina a intensidade de economia de escala, quando $0 < \alpha < 1$; e a deseconomia de escala, quando α é maior do que 1. Para a estimativa do custo operacional (OPEX – *operational expenditure*), De la Vergne [3] não recomenda o uso direto desse procedimento, uma vez que os custos operacionais diminuem com a escala, assim faz-se necessária o uso inverso do fator (α), subtraindo-o do valor unitário (1).

A mineração tem como seu principal ativo a sua reserva mineral, e em operação, ela é exaurida durante a vida útil. As grandes mineradoras buscam alvos próximos as suas operações e/ou novos projetos com o objetivo de manter e/ou aumentar seus ativos, e consequentemente mantendo a sustentabilidade dos seus negócios.

Segundo Bullock [4], a elaboração de relatórios técnicos de viabilidade, com dados confiáveis e auditáveis, tem como objetivo demonstrar que o projeto de mineração seja exequível, que possa ser vendido a outra parte, seja colocado em manutenção à espera de uma nova tecnologia possível para seu aproveitamento econômico ou a uma oportunidade de mercado.

De forma análoga, considerando os valores de diferentes projetos, pode-se estruturar equações paramétricas para estimativas de custos e outros parâmetros de projeto. Assim destaca-se o trabalho de O'hara [5], que se verifica com boa aderência para projetos de

mineração a céu aberto, mas com divergência para projetos de mineração subterrânea. De mesmo modo, a aplicação fica limitada pelos métodos de lavra disponíveis (*sublevel stoping, room and pillar, cut and fill*) e tipo de acesso a ser adotado. Outro aspecto relevante não considerado é a consideração da influência da qualidade do maciço rochoso, que como apresentam Paraskevopoulou e Benardos [6], é fator chave no custo de escavações subterrâneas.

Assim este trabalho se propõe estruturar um banco de dados dos estudos de viabilidade dos projetos de mineração subterrâneo, obtidos do *System for Electronic Document Analysis and Retrieval* (SEDAR) da *Canadian Securities Administrators*, entender a relação entre os métodos de lavra presentes no software MAFMINE, produção de minério, geometria do corpo de minério do stope e tipo de acesso para que futuramente possa incorporar modelos de estimativas de custos para a mineração subterrânea, ao MAFMINE, estruturado sob os Modelos desenvolvidos por O'Hara [5]. Dessa forma, ampliando a aplicabilidade do MAFMINE, ao aumentar a aderência das saídas.

CANADIAN SECURITIES ADMINISTRATORS (CSA) E SYSTEM FOR ELECTRONIC DOCUMENT ANALYSIS AND RETRIEVAL (SEDAR).

No Canadá, o maior centro financeiro está localizado em Toronto, e conseqüentemente é a sede da bolsa de valores do país, a *Toronto Stock Exchange* (TSX), onde as empresas de capital aberto negociam suas ações sendo elas canadenses ou não. Uma vez listadas, as companhias seguem as regras da *Canadian Securities Administrators* (CSA), que é a agência local que regulariza o mercado capital.

Todos os relatórios técnicos, sejam de reserva e/ou recursos fornecidos pelas mineradoras, devem seguir as normas instrumentais NI 43-101, cujo seu objetivo é assegurar que informações enganosas, errôneas ou fraudulentas relacionadas as propriedades minerais não sejam publicadas e promovidas para investidores nas bolsas de valores supervisionadas pela CSA. Destarte, a NI 43-101 possui regras e políticas para atenuar as incertezas na declaração dos recursos e reservas. Disponível no site <https://mrmr.cim.org/en/standards/canadian-securities-regulatory-standards-for-mineral-projects>.

Para assegurar transparência dos dados, a CSA disponibiliza o *System for Electronic Document Analysis and Retrieval* (SEDAR) para que as empresas divulguem aos acionistas ou não, todos os estudos de recurso, estudos conceituais, pré-viabilidade e viabilidade, informes dos responsáveis pelos estudos e entre os informativos inerentes ou não ao NI 43-101.

Estudos de viabilidade

As descrições das três fases da viabilidade econômica e ou financeira de um empreendimento mineiro, de acordo com Lee [7], são colocadas na seguinte ordem

I – Estudo Conceitual

Representa a transformação de uma ideia ou conceito a uma oportunidade de negócios a serem apresentadas à possíveis investidores, onde os custos e métodos são obtidos através de dados históricos.

II - Estudo preliminares ou pré-viabilidade

A partir da aprovação do estudo conceitual, a próxima fase consiste em determinar quais partes do relatório técnico anterior necessita de um detalhamento maior, que partes do projeto são críticos ao ponto de inviabilizar o projeto e qual item necessita de um estudo aprofundado. Todos esses questionamentos são realizados no estudo de viabilidade.

III – Estudos de viabilidade

É o estudo definitivo que engloba a parte técnica, ambiental e comercial do empreendimento para que se tenha uma decisão de a aprovação ou não, considerando todos os riscos e oportunidade levantados nos estudos anteriores.

De acordo com a NI 43-101, todos os estudos técnicos devem conter com a seguinte ordem:

i) **Resumo:** Um breve resumo contendo as informações do estudo técnico como a descrição da propriedade e sua composição acionária, geologia e mineralização local, status da exploração, desenvolvimento e operação, recurso e reserva mineral e as conclusões e recomendações do responsável por atestar as informações, denominados de *Qualified Person* (QP).

ii) **Introdução:** Informativo sobre as obrigações dos responsáveis pela elaboração dos estudos e do contratante e as origens dos dados utilizados.

iii) *Qualified Person* (QP): Identifica os nomes dos QP's e seus respectivos currículos como também as assinaturas de suas responsabilidades.

iv) **Descrição da propriedade e Localização:** Mapa mostrando a localização do empreendimento mineiro, como também os seus limites legais de exploração.

v) **Acessibilidade, clima, infraestrutura e a relevo da superfície:** Informações sobre os acessos disponíveis e futuros da mina, histórico anual dos índices pluviométricos e temperaturas da região, a infraestrutura das cidades vizinhas ou planejada no local e as condições de relevo da superfície.

vi) **Histórico local:** Determinar o histórico de pesquisa geológica da área estudada, como também os responsáveis, como também confirmar se houve lavra no local e a quantidade, em massa e seus teores.

vii) **Geologia e a mineralização:** Mostrar por mapas e descrição a geologia e mineralização local.

viii) **Tipo depósito:** Descrever que tipo de depósito a ser lavrado como também o plano de investigação para a ser realizado na exploração geológica.

ix) **Exploração geológica:** informar as metodologias escolhidas, suas justificativas e os resultados obtidos.

x) **Sondagem, amostragem, análise e os controles de qualidade:** Apresentar o plano de sondagem, localização dos furos, profundidade, mergulho e azimuth. Informar a metodologia a ser realizada, junto com os resultados obtidos com a espessura encontrada dentre os

teores considerados altos. Como também os procedimentos de controle de qualidade e amostragem seguidos.

xi) Caracterização tecnológica dos minerais: Caracterizar a porção mineral a ser processada através da campanha de sondagem, caracterizar a identificação e composição mineralógica afim de identificar possíveis contaminantes que atrapalham a rota metalúrgica.

xii) Estimativa do recurso mineral: Prover a estimativa dos recursos minerais assim como seu método escolhido para realizar a sua quantificação e os parâmetros escolhidos.

xiii) Estimativa da reserva mineral: Prover a estimativa das reservas minerais assim como seu método escolhido para realizar a sua quantificação e os parâmetros escolhidos.

xiv) Método de lavra: Através de parâmetros hidrogeológicos e geotécnicos, propor os métodos de lavra escolhidos, com suas justificativas através de recuperação, segurança e produtividade. Assim como as suas operações unitárias, diluição, sequenciamento de desenvolvimento e lavra, dimensionamento de frota e pessoas e a vida útil da mina.

xv) Métodos de beneficiamento: Através de parâmetros da caracterização tecnológica e produtividade da mina, propor a rota de beneficiamento apropriada de acordo com o dimensionamento dos equipamentos e pessoas nas suas operações unitárias e o consumo previsto de energia, água e substâncias químicas necessárias para a planta de beneficiamento.

xvi) Infraestrutura: Prover toda a infraestrutura necessária para o apoio do empreendimento, tais como rotas internas, estruturas necessárias para o escoamento da produção tais como portos, ferrovias, pilhas de estéril, bacias de rejeitos como também estruturas de trabalho, alojamentos e segurança.

xvii) Estudos de impactos ambientais e sociais: resumo de todos os estudos de impactos ambientais e sociais, com os planos de monitoramento das pilhas de estéril, bacias de rejeitos, lençóis freáticos ou qualquer estrutura que possa ser impactada pela atividade mineradora. Discussões sobre o impacto social nas cidades circunvizinhas e suas medidas mitigadores. E o plano de fechamento da mina, com seu sequenciamento e custos previstos.

xviii) Estudo de Mercado: Identificar os futuros mercados do fornecimento da matéria final do empreendimento mineiro, assim como a previsão de preços das commodities, previsão de oferta e demanda ao longo da vida útil da mina.

xix) Custos operacionais e capitais do empreendimento: Estimar os custos capitais para abertura do empreendimento e que mantenha o nível de produção planejada e os custos operacionais ao longo da vida útil da mina.

xx) Análise Econômica: Prever o fluxo de caixa anual ao longo da vida útil, assim como determinar o lucro em valor presente, a taxa interna de retorno, determinar em quanto tempo o retorno financeiro é garantido, impostos e taxas a serem pagas durante o projeto.

xxi) Conclusões: Sumarizar todas as interpretações, recomendações e conclusões dos Qualified Persons de todos os itens acima, com seus riscos e medidas mitigadores sugeridas.

xxii) Referências: Informar todos os estudos realizados que subsidiem os estudos de viabilidade.

LAVRA SUBTERRÂNEA

A opção pela extração em subsolo, mineração subterrânea, se confunde com o surgimento de mineração, uma vez que é paralela ao conceito de mineração a céu aberto. Já em 1874 J. H. Collins, no livro *Principles of metal mining* [8], destacava-se a importância da mineração subterrânea, e a necessidade de se projetar de maneira adequada o processo de mineração e todas suas estruturas. Outra bibliografia seminal que aborda a lavra subterrânea é o *De re metallica* de Georgius Agricola, de 1556.

Todavia, com o surgimento de novas tecnologias, pressão por sustentabilidade e esgotamento de jazidas mineráveis a céu aberto, tem forçado o setor mineral constantemente a seguir com operações em subsolo.

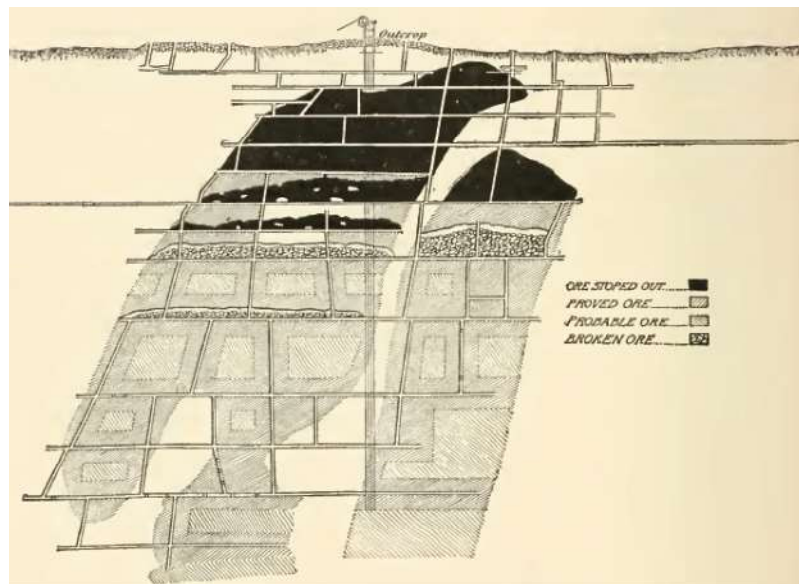


Figura 1- *Layout* de mina do início do século XX, com indicação de classificação de reserva [9]

Hoover [9] aborda que o desenvolvimento em mineração tinha duas funções, primeiro procurar por minério e segundo em desenvolver as vias para a extração dele. Segundo Hoover [9], à época, só se haveria certeza quanto ao minério ao se chegar a ele, o que tornava a exploração mineral algo extremamente incerto e custoso. O advento de recursos tecnológicos e de novos processos hoje tornaram aproveitáveis reservas antes não lavráveis. Constantemente novas tecnologias vêm levando a maiores produtividades e conseqüentemente menores custos, o que viabiliza o aproveitamento de mais jazidas, tornando a mineração subterrânea mais presente no contexto da mineração.

Particularmente, vê-se na lavra subterrânea uma maior dinâmica de opção do que na lavra a céu aberto, na forma de maiores opções de métodos e tecnologias, sempre as quais propõem maior aderência a uma determinada situação, normalmente relacionada à jazida (corpo de minério) e produção planejada.

Comparativo entre métodos de lavra subterrânea

Visto as características dos diversos métodos de lavra disponível, a Tabela 1 (abaixo) compilada inicialmente por Tatiya [10], apresenta um resumo comparativo entre os métodos de lavra subterrâneas, quanto as características e ambientes de aplicação característica. Tal comparação pode bem ser um ponto inicial para a escolha por um método de lavra em projetos iniciais (conceituais) e ideação de custos; entretanto deve-se considerar que para muitos ambientes e tipos de jazidas, mais de um método de lavra podem apresentar-se como adequados, bem como mais de um método pode vir a ser aplicado, sendo inclusive comum para alguns casos o uso de diferentes métodos associados.

Tabela 1 - Comparativo entre os métodos de lavra subterrânea [10]

Método	Room & Pillar	Stope & Pillar	Shrinkage Stopping	Sublevel Stopping	Cut & Fill	Stull Stopping	Square Set Stopping	Longwall	Sublevel Caving	Block Caving
Custo relativo % (em relação ao Sq. Set stopping)	30	30	50	40	60	70	100	20	50	20
Produção ton/homem*avanço	30-80	30-50	5-10	15-30	10-20	-	1-3	75-180	20-40	15-40
Recuperação %	75	75	75-85	75	90-100	>90	+100	70-90	90-125	90-125
Diluição %	10-20	10-20	<10	>20	5-10	5-10	baixa	10-20	10-35	10-20
Powder factor kg/ton	-	-	-	0,15-0,30	0,25-0,60	-	-	-	0,3-0,4	0,05-0,10
Desenvolvimento	pequeno	pequeno	moderado	lento e extenso	pequeno - moderado	baixo	baixo	baixo	alto	lento, extenso & caro
Capital requerido	moderado	moderado	baixo	moderado - alto	moderado - alto	baixo	baixo	moderado - alto	moderado -alto	alto
Flexibilidade	Flexível	Flexível	Flexível	moderado	Inflexível	Flexível	Flexível	Não Flexível	Inflexível e Rígido	Inflexível e Rígido
Seletividade	Seletivo	Seletivo	Moderado	Não Seletivo	Seletivo	Seletivo	Seletivo	Não Seletivo	Caving	Caving
Ground control	requer monitoramento	requer monitoramento	bom	bom	excelente	bom	requer monitoramento	ocorre subsidência	ocorre subsidência	ocorre subsidência
Segurança	ventilação ruim	moderada	ruim	pouca exposição a insegurança	bons índices de segurança	requer mais suporte	pouca segurança, perigo de incêndios	boa segurança, algum risco de incêndio/gases	boa segurança	-
Aplicação	popular para minas de carvão	limitado para minas metalíferas	mineração de pequena escala	muito popular, método moderno	aplicável em várias condições	não popular	método caro, aplicável a maciços de pessimas condições	popular para minas de carvão	altas produções, mas com grande desenvolvimento	eficiente para altas produções

MODELAMENTO E ESTIMATIVAS DE CUSTOS

Segundo Jimeno e Revuelta [11], a estimativa de custos é fundamental a projetos de engenharia. Segundo Petter [12] e D'Arrigo [13], para a estimativa de custos de um projeto de mineração, quanto maior a porcentagem de engenharia concluída, menor a variabilidade no custo estimado. Nestes termos a Lei de Pareto se encaixa como um exemplo ilustrativo, de modo que segundo tal, com 20% da engenharia realizada teria-se 80% de precisão em uma possível estimativa referente ao todo planejado. Na Figura 2 está ilustrada a relação proposta pela lei de Pareto.

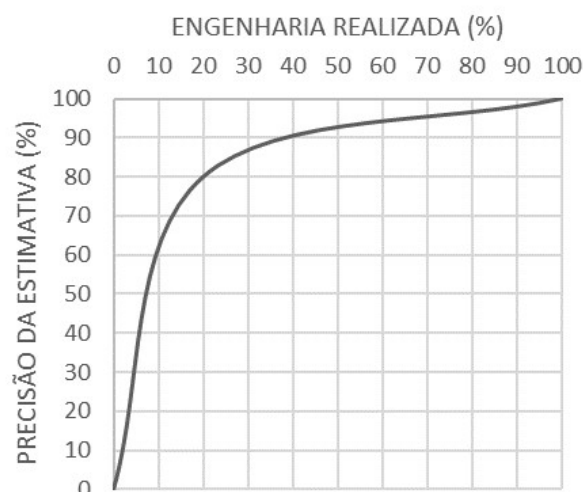


Figura 2 - Lei de Pareto aplicada estudos de engenharia

Entretanto, deve-se salientar que a Lei de Pareto orienta quanto a dinâmica do comportamento das estimativas de custo, não sendo está uma regra rígida a se basear, de fato, outras fontes apresentam-se mais otimistas. Na Tabela 2 é apresentado a precisão característica para diferentes fases de projeto, segundo o Manual de Estimativas de custos da indústria de mineração australiana [14].

Tabela 2 - Precisão das estimativas de custos em diferentes fases de projeto [14]

Fase de Projeto	Precisão
Estudo Conceitual	65 – 70 %
Pré-Viabilidade	75 – 80%
Viabilidade	85 – 90 %
Definitivo	90 – 95%

Assim, considerando as faixas de precisão mostradas na Tabela 2 percebe-se que a estimativa de custos de em mina por modelos paramétricos é mais adequada às fases de estudo Conceitual, onde temos poucos dados conclusivos à disposição

Princípios do Modelamento Econômico

Trabalhos como os de Sayadi *et al.* [15], Sayadi *et al.* [16] e Oraee *et al.* [17]; apresentam o uso de regressão não linear (Equação 1 e Figura 3); e lineares, como Sanchez *et al.* [18], como ferramenta simples para estimativa de custos operacionais e capitais para equipamentos, processos e operação como um todo. Sendo a metodologia análoga entre estes e os demais autores [5, 13, 19, 20] com referência a processos que envolvem diferentes escalas, como o custo geral de um empreendimento. De maneira uniforme a metodologia utilizada é a regressão não linear simples, em que as variáveis custos são

estimadas em função de uma única variável de entrada. Sendo os ajustes de equações feitas sobre gamas de dados reais de empreendimentos (Figura 3), como especificado por Sanchez et. al. [18], onde sob dados de custos de minas existentes de tungstênio estimou-se os custos para abertura de uma nova mina.

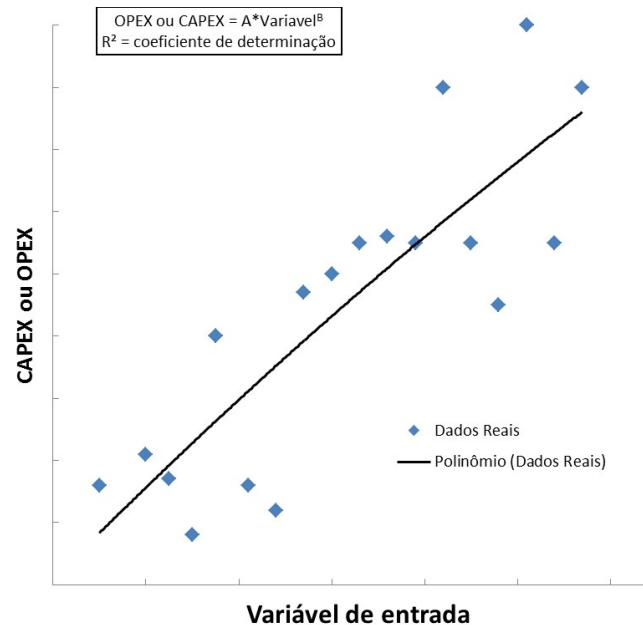


Figura 3 – Ajuste de função não linear a dados reais de empreendimentos

D'Arrigo [13] apresenta a compilação de diversas equações de custos voltados a setor mineral (originalmente apresentados por O'Hara e modificado por Nagle [21] na forma de um aplicativo computacional de livre acesso denominado MAFMINE (disponível em <http://www.mafmine.com.br/v3/#>). Diferencia-se no apresentado por D'Arrigo [13] a introdução de índices de atualização dos preços obtidos (*PPI - producer price index*) e *Big Mac Index* [22], que permite de forma simples e intuitiva atualizar tempo e espacialmente os valores de custos capitais e operacionais.

Todavia é relevante considerar as hipóteses de surgimento de tecnologias disruptivas, cujo surgimento modifique significativamente um processo, alterando sua produtividade e seu custo; como surgimento de caminhões mais eficientes, uso de TBM (*Tunnel Boring Machine*) em mineração ou de SBM (*Shaft Boring Machine*) para execução de poços. Equipamentos estes que representam uma mudança de paradigma em comparação com processos anteriormente adotados na mineração subterrânea. A evolução na produtividade e custos de operações unitárias de escavação subterrânea é descrita por Zare e Bruland [23].

Dado este cenário, vê-se uma carência na atualização de modelos e equações para estimativas de custos para mineração subterrânea e seus processos. Assim, este trabalho apresenta um estudo da aderência e a adaptação de equações paramétricas, conforme modelo de O'Hara, para mineração subterrânea e diferentes métodos de lavra.

METODOLOGIA

Para compreender os estudos de viabilidades econômicas, foram avaliados parâmetros e seus custos operacionais e capitais de mina estimados, cujos dados estão disponíveis para consulta no site SEDAR (<https://www.sedar.com/>). Tais projetos apresentam variada gama de localidade (países), geometria de corpos, métodos de lavra e consequentemente taxas de produção e desenvolvimento. Para formatação de banco de dados foram analisados 73 projetos publicados entre janeiro de 2012 até julho de 2020, sendo que destes, 59 contribuíram com informações.

Compõem o banco de dados as seguintes informações:

- (i) Localidade,
- (ii) Ano,
- (iii) Minério,
- (iv) Método de Lavra,
- (v) Fase de Projeto,
- (vi) Geometria,
- (vii) Produção,
- (viii) Classificação geomecânica,
- (ix) CAPEX,
- (x) OPEX;

Para que os dados tenham suas comparações efetivas e justas, todos os valores foram ajustados para 2020, pelo índice preços ao produtor (PPI) elaborado U.S. *Bureau of Labor Statistics* de acordo com a suas commodities a serem lavradas.

Para avaliação dos dados, foram separados por métodos de lavra e no caso do método *Long Hole*, foi subdividido em stopes menor ou igual a 5 metros e maior que 5 metros. Essa subdivisão foi realizada pois stopes em veios estreitos não se perfura em leque, como consequência, há uma diferença de custos operacionais e capitais.

Foram utilizadas ferramentas de análise estatística e de ajuste de equações, nas identificações dos parâmetros chave nos quesitos produtividade, custos e o investimento de capital para produzir uma tonelada de minério diária, denominado intensidade unitária (IU). Para validação dos modelos foi avaliada a aderência dos dados ao modelo gerado e pontos retirados do banco de dados, bem como foi levada em consideração o R^2 das equações paramétricas geradas. Foram testados e selecionados os tipos de Equações com maiores valores de R^2 .

Base de dados

Dos 73 projetos analisados, 59 foram aproveitados. Os motivos dos estudos descartados foram devidos aos métodos de lavra os quais não são contemplados no MAFMINE, tais como *Block Caving*, Lavra *in situ* entre outros, e estudos onde não é possível identificar o custo operacional por método de lavra.

A maioria dos estudos estão localizados na América do Norte (Canadá, EUA e México) e na África, de acordo com a figura 4

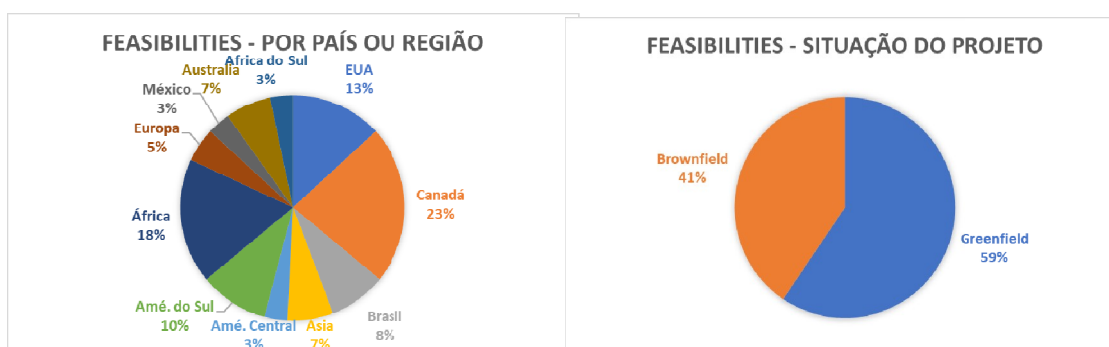


Figura 4 – Distribuição dos projetos por país e por situação de projeto

Dos estudos aproveitados no banco de dados, quase 60% dos projetos são considerados novos ou *greenfield*, pouco mais de 40% são considerados projetos retomados ou *brownfield*.

Dos métodos de lavra, *Long Hole* (LH) foi o mais utilizado, seguido de *Cut and Fill* (CF), *Room and Pillar* (RP) e *Shrinkage* (SH). No banco de dados, os métodos RP e SH não tiveram uma quantidade suficiente para ser analisado, destarte não foram utilizados para esse estudo.

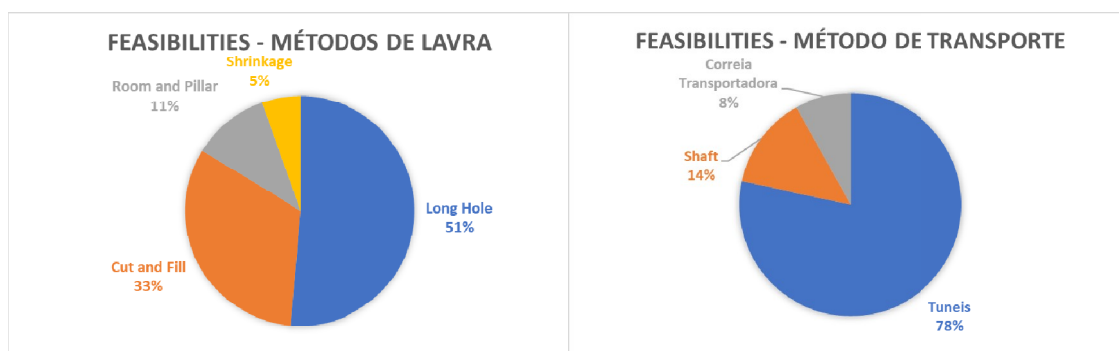


Figura 5 – Distribuição por método de lavra e de transporte

E dos métodos de transportes do minério até a superfície, a maioria utilizam caminhões como meio, seguido de *Shaft* e correias transportadoras através de tuneis horizontais.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No método CF, mostra que há uma diferença entre o custo operacional, em US\$/toneladas e o produto entre a produção diária de minério (tpd) e a espessura do *stope*, tanto para projetos *greenfield* e *brownfield*. respectivamente US\$ 41,95 e US\$ 73,43 por tonelada, com uma diferença entre eles de 75%. Essa discrepância está relacionada pelo fato de os projetos novos possuírem estruturas mineiras mais modernas, por exemplo, frotas atualizadas e/ou autônomas, equipamentos auxiliares inovadores e estruturas com tecnologias hodiernas. Por outro lado, essas atualizações necessitam de uma intensidade unitária (IU) capital maior do que os projetos que já forma iniciados a um tempo. A IU mostra que para os projetos *Greenfield* é 33% maior dos projetos *Brownfield*, US\$ 0,16 Milhões / tonelada contra US\$ 0,12 Milhões / tonelada.

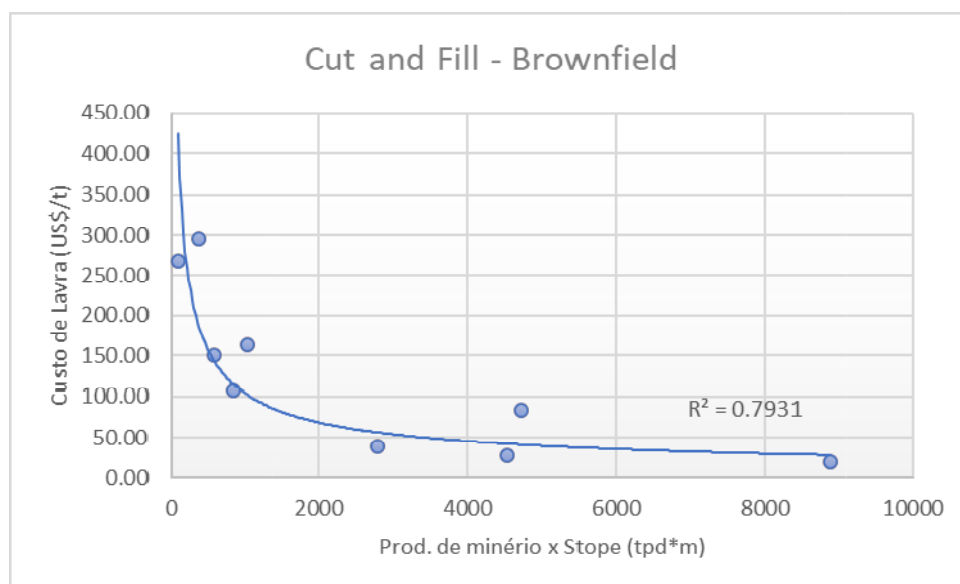


Figura 6 – Relação dos custos operacionais CF com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Brownfield*

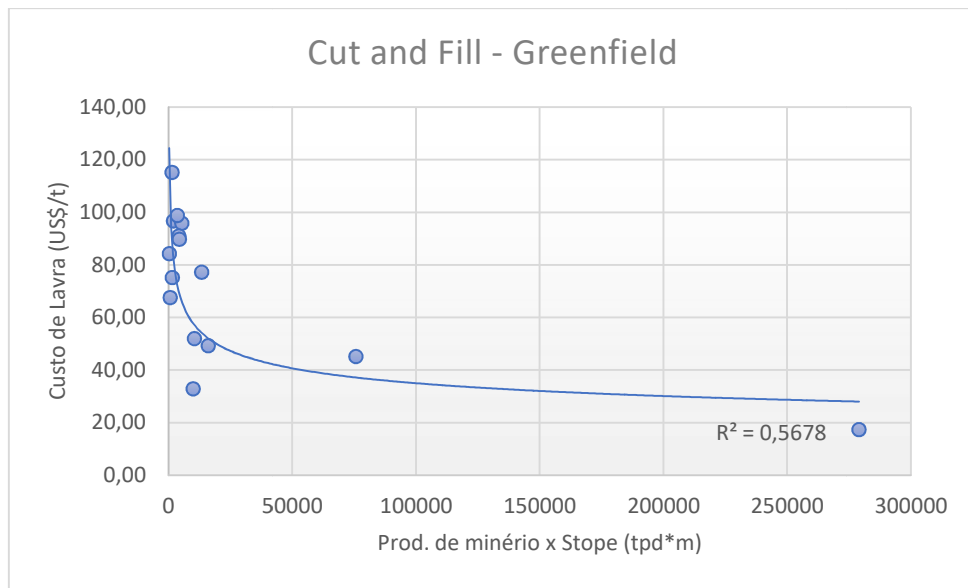


Figura 7 – Relação dos custos operacionais CF com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Brownfield*

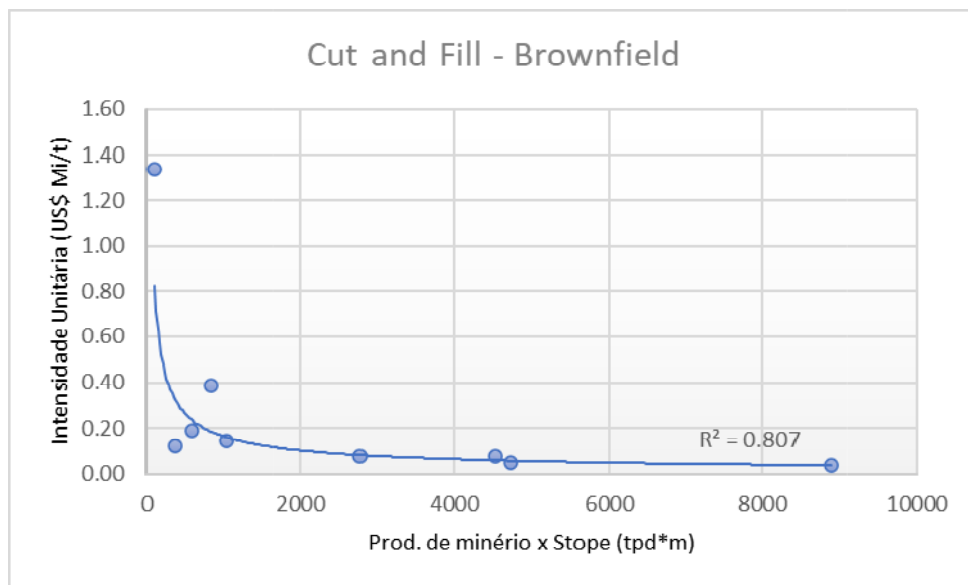


Figura 8 - Relação da intensidade unitária CF com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Brownfield*

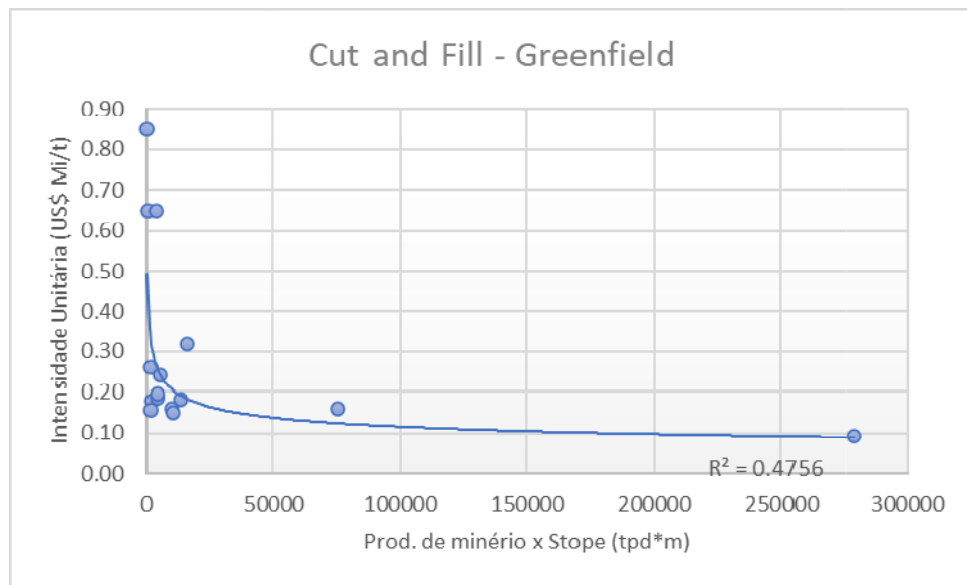


Figura 9 - Relação da intensidade unitária CF com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Greenfield*

No método LH, possui o mesmo comportamento da relação entre o custo operacional e o produto entre a produção diária de minério e a espessura do *stope* em comparação ao método *Cut and Fill* (CF), tanto para *stopes* com menos de 5 metros de espessura como maiores do que 5 metros. O mesmo comportamento foi detectado para os custos operacionais, ou seja, o custo médio operacional para projetos *Brownfield* com *stope* menores que 5 metros é 17% maior do que os projetos *Greenfield*, US\$ 50,2 por tonelada contra US\$ 42,94 por tonelada. Já a IU dos projetos *Greenfield* é 128% maior, US\$ 0,16 Milhões /tonelada contra US\$ 0,07 Milhões/tonelada.

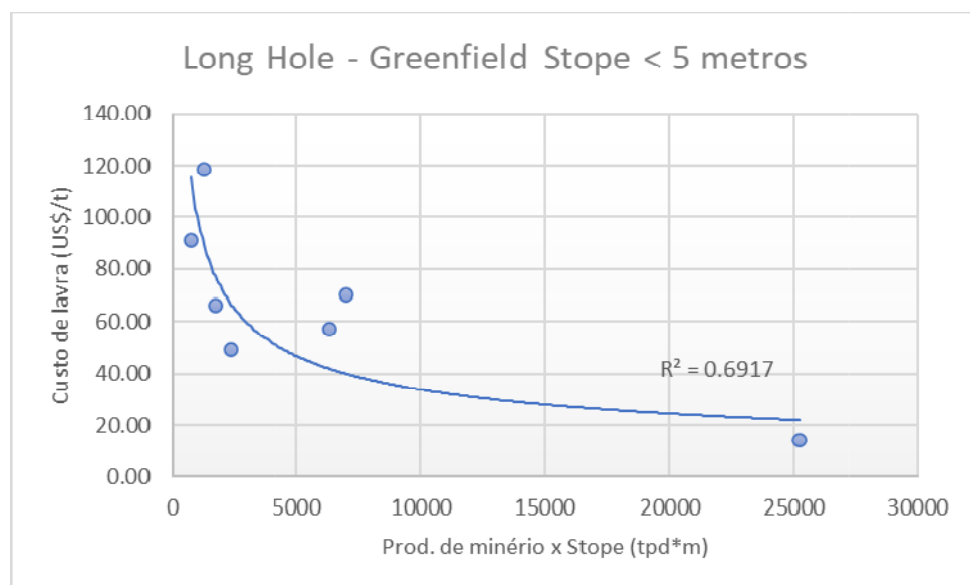


Figura 12 – Relação dos custos operacionais LH com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Greenfield*

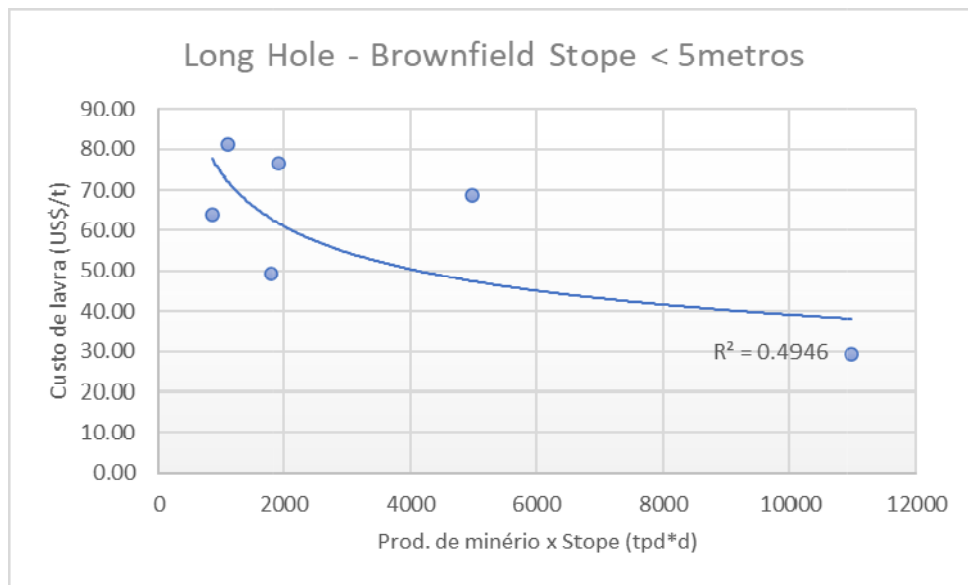


Figura 13 – Relação dos custos operacionais LH com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Brownfield*

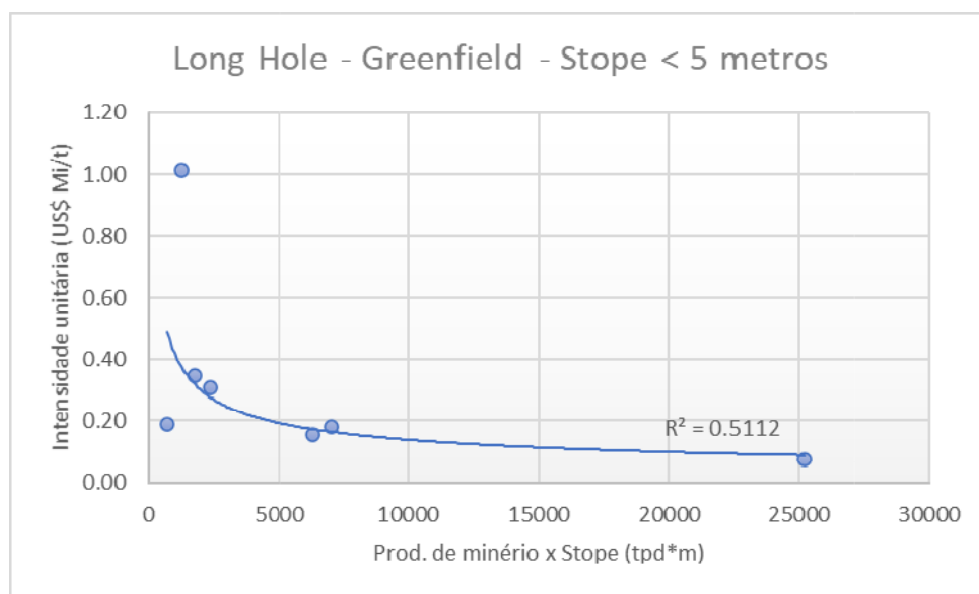


Figura 14- – Relação da intensidade unitária CF com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Greenfield*

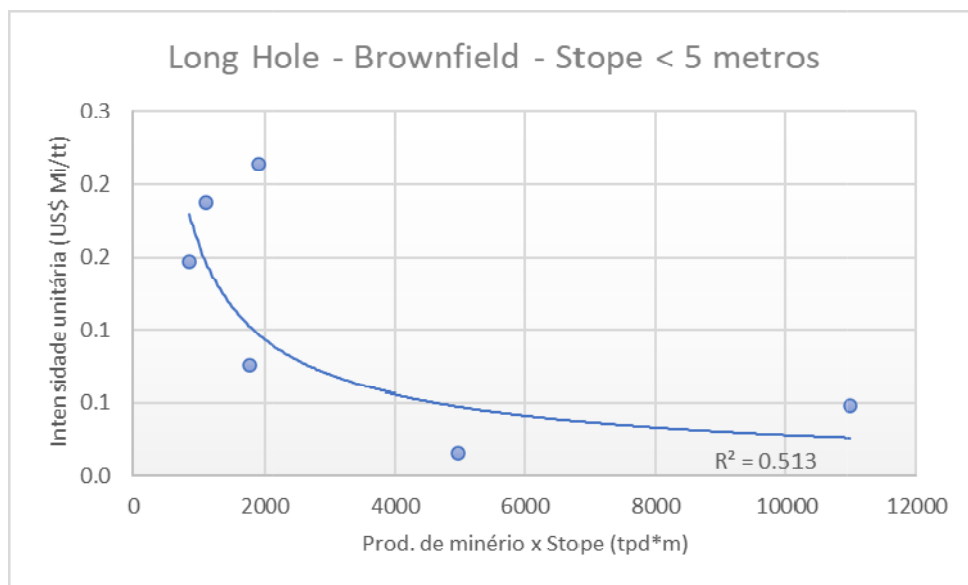


Figura 15- – Relação da intensidade unitária LH com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Brownfield*

Para *stopes* maiores que cinco metros, a tendência também segue, ou seja, o custo médio operacional para projetos *Brownfield* com *stope* maiores que 5 metros é 24% maior do que os projetos *Greenfield*, US\$ 48,34 por toneladas contra US\$ 39,09 por toneladas. Já a IU dos projetos *Greenfield* é 22% maior, US\$ 0,11 Milhões /tonelada contra US\$ 0,09 Milhões/tonelada.

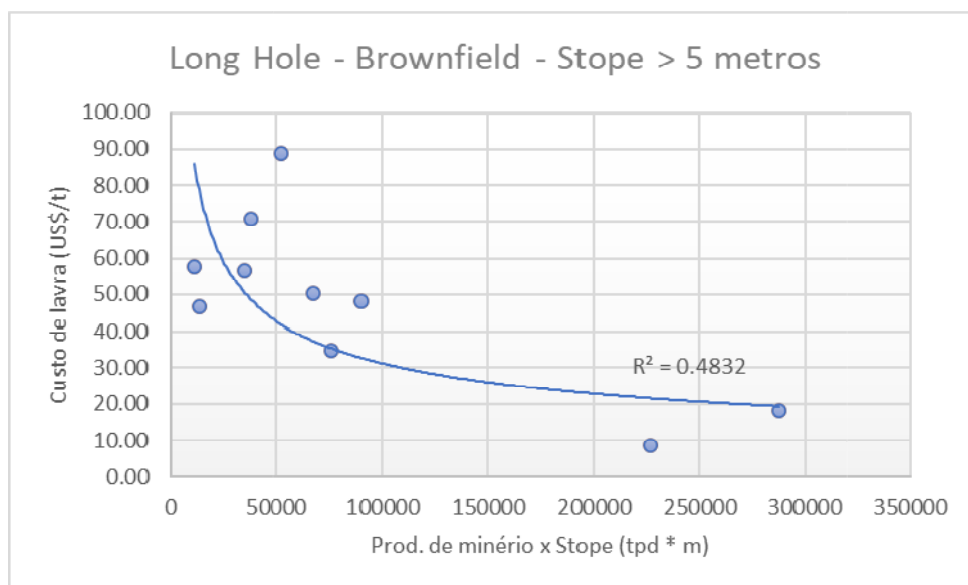


Figura 16 – Relação dos custos operacionais LH com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Brownfield*.

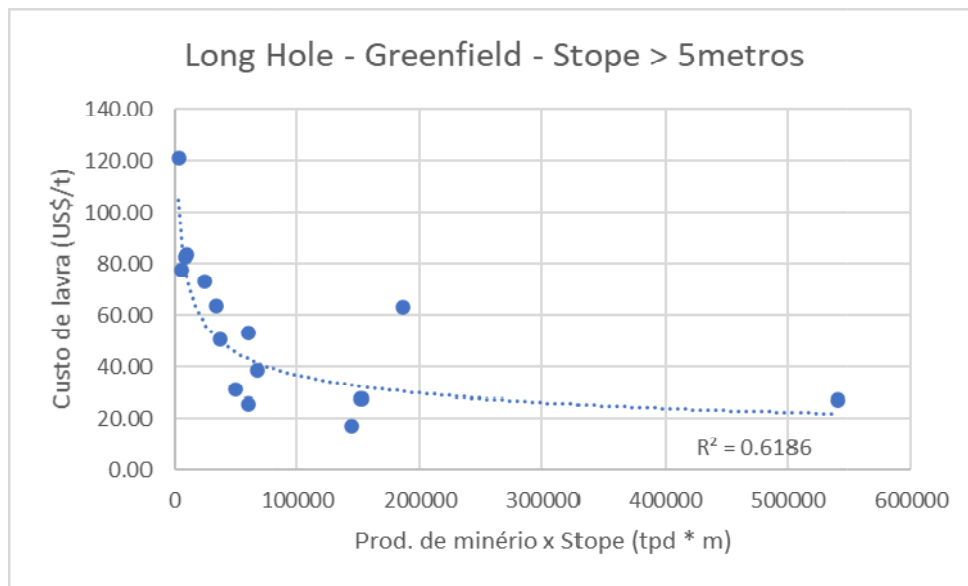
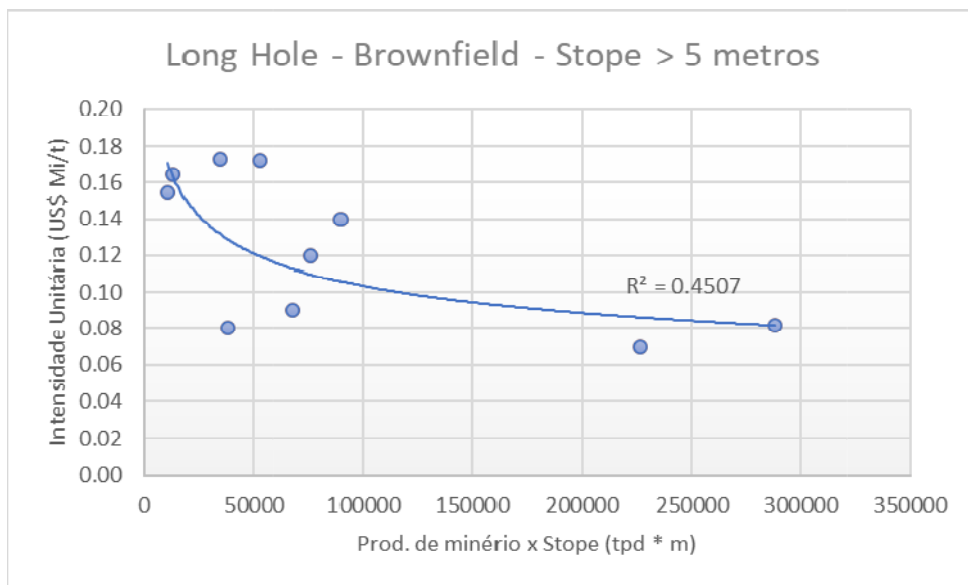


Figura 17 – Relação dos custos operacionais LH com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Greenfield*.



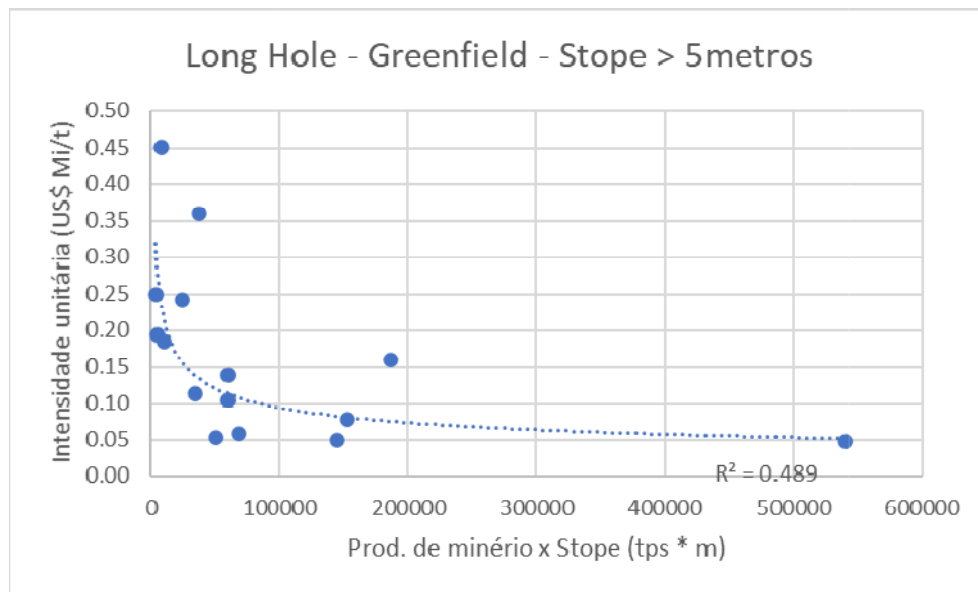


Figura 18- – Relação da intensidade unitária LH com o produto entre a produção diária e *stope* para projetos *Greenfield*

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo mostrou que há relação do custo operacional, da intensidade unitária com o produto da produção de minério diária e a espessura do *stope*. Como também foi mostrado, os estudos conceituais devem ser distinguidos quando o projeto é considerado *Greenfield* ou *Brownfield*, pois afetam tanto o custo operacional como o custo de capital. Avaliando-se os gráficos paramétricos pode-se observar correlações compatíveis com a inferência de custos para projetos conceituais ou mesmo de pré-viabilidade.

Alguns métodos importantes na lavra subterrânea como câmaras e pilares e *block caving* necessitam ter a mesma avaliação, mas é preciso obter dados suficiente que irão ser realizados com anexação de banco de dados de outras publicações de bolsa de valores diferentes, como a Sidney, Nova York, Joanesburgo, respectivamente na Austrália, Estados Unidos e África do Sul, pois são países em que a mineração tem sua importância na economia.

Com base nesse estudo, e pelo levantamento do banco de dados, as equações obtidas, serão inseridas na nova versão do MAFMINE, que está em andamento no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a fim de melhorar a aderência das equações de custo operacional, capital, entre outras do software.

Referências Bibliográficas

1. CARRICONDE, Milton Correa. Verificação da aplicabilidade do programa MAFMO como ferramenta auxiliar na estimativa de custos em projetos conceituais. 2010. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
2. MOTTA, Regis da Rocha; CALÔBA, Guilherme Marques. Análise de Investimentos: Tomada de Decisão em Projetos Industriais. São Paulo: Atlas, 2011. 391 p.
3. DE LA VERGNE, Jack. Hard Rock Miner's Handbook. Tempe/North Bay: McIntosh Engineering. ISBN 0-968006-1-6, 2003.
4. BULLOCK, Richard L., Mineral Property Feasibility Studies In: DARLING, P. SME Mining Engineering Handbook. [S.l.]: [s.n.], 2011. p. 227-261.
5. O'HARA, T. Alan. Quick guides to the evaluation of orebodies. publisher not identified, 1980.
6. PARASKEVOPOULOU, Chrysothemis; BENARDOS, Andreas. Assessing the construction cost of Greek transportation tunnel projects. Tunnelling and underground space technology, v. 38, p. 497-505, 2013
7. LEE, T. D., Planning and mine feasibility study – An owner perspective. In proceeding of the NWMA Short Course "Mine Feasibility—Concept to Completion." Compiled by G.E. McKelvey. Spokane, WA: Northwest Mining Association, 1984
8. COLLINS, J. H. Principles of metal mining. New York: G. P. Putnam's, 1874. 158p.
9. HOOVER, H. C. Principles of mining. New York: McGraw-Hill, 1909. 220 p.
10. TATIYA, R. R. Surface and Underground Excavations – Methods, Techniques and Equipment. Balkema. 2005, p. 405-491
11. REVUELTA, M. B. & JIMENO, C. L. Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras. Madrid. 1997
12. PETTER, R. A. A técnica de análise de risco econômico aplicada a diferentes cenários de investimentos casos de estudo: Minas de elementos terras raras Reciclagem de rejeitos de material de demolição e construção civil. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
13. D'ARRIGO, R. A. Modelo de Estimativa de Custos Operacionais e de Capital em Projetos de Mineração em Fase Conceitual Baseado no Modelo de O'Hara, 2012. Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
14. LANZ, T., NOAKES, M. Cost estimation handbook for the Australian mining industry. Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Aus IMM), Carlton South, 1993.
15. SAYADI, Ahmad Reza; KHALES, Mohammad Reza; BORJI, Mahsa Khoshfarman. A parametric cost model for mineral grinding mills. Minerals Engineering, v. 55, p. 96-102, 2014.

16. SAYADI, Ahmad Reza; LASHGARI, Ali; PARASZCZAK, Jacek Jack. Hard-rock LHD cost estimation using single and multiple regressions based on principal component analysis. *Tunnelling and underground space technology*, v. 27, n. 1, p. 133-141, 2012.
17. ORAEE, B.; LASHGARI, Ali; SAYADI, Ahmad Reza. Estimation of capital and operation costs of backhoe loaders. *SME Annual Meeting*, 2011.
18. SÁNCHEZ, Ana Suárez et al. Investment in new tungsten mining projects. *Resources Policy*, v. 46, p. 177-190, 2015.
19. BAUDSON, Adolfo José Gonçalves Stavaux. *APLICATIVO PARA A AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE JAZIDAS MINERAIS*. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas da Universidade Federal Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
20. ASSIS, Artur Ângelo Alcântara de. *Modelo de custos para a produção de água mineral*. 2019. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
21. NAGLE, A. J. *Aide a l'Estimation des Paramètres Economiques d'un Projet Minier dans les Etudes de Prefaisabilité*. [S.l.]: [s.n.], 1988
22. ONG, Li Lian. Burgernomics: the economics of the Big Mac standard. *Journal of International Money and Finance*, v. 16, n. 6, p. 865-878, 1997.
23. ZARE, S.; BRULAND, A. Progress of drill and blast tunnelling efficiency with relation to excavation time and costs. In: *Proceedings of the 33rd ITAAITES World Tunnel Congress*, Prague, Czech Republic. 2007. p. 805-809.