

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS

JORGE LUIZ VALENÇA MARIZ

**ANÁLISE DA ADERÊNCIA DOS MÉTODOS DE PREVISÃO DA TAXA
DE PRODUÇÃO EM FASES PREMATURAS DE PROJETOS
MINEIROS À REALIDADE BRASILEIRA**

PORTO ALEGRE
2018

JORGE LUIZ VALENÇA MARIZ

**ANÁLISE DA ADERÊNCIA DOS MÉTODOS DE PREVISÃO DA TAXA
DE PRODUÇÃO EM FASES PREMATURAS DE PROJETOS
MINEIROS À REALIDADE BRASILEIRA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

PORTO ALEGRE
2018

JORGE LUIZ VALENÇA MARIZ

**ANÁLISE DA ADERÊNCIA DOS MÉTODOS DE PREVISÃO DA TAXA
DE PRODUÇÃO EM FASES PREMATURAS DE PROJETOS
MINEIROS À REALIDADE BRASILEIRA**

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Aprovada em: _____

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter – UFRGS

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski – UFRGS

Prof. Dr. Júlio Cesar de Souza – UFPE

PORTO ALEGRE
2018

Dedico este trabalho aos meus avós, Maria Odalea Ramos da Costa Valença e Severino Moacir Barbosa Mariz, que vibraram com meu ingresso na graduação e, sem dúvida, teriam vibrado com a conclusão deste mestrado.

AGRADECIMENTOS

Sou extremamente grato aos meus pais, Luciano Jorge Maranhão Mariz e Valéria Valença Mariz, por sempre terem me proporcionado o necessário ao meu desenvolvimento intelectual e emocional; não há palavras para descrever tudo o que já fizeram por mim e tudo o que sinto por vocês. Sou grato à minha esposa Cristiane Gabriela Boesing de Souza, pois graças à sua vontade de progredir decidimos ir para Porto Alegre estudar e, somente então, fui em busca dos meios necessários para iniciar esta etapa da minha vida acadêmica; nada disso existiria sem você. Agradeço a todos os professores do DEMINAS da UFPE por me fornecer o alicerce da profissão que hoje desempenho com muito orgulho, razão pela qual nunca me afastei do 3º andar do CTG e tomo como obrigação exaltar minha formação por onde ando; agradeço especialmente a Júlio César de Souza e Evenildo Bezerra de Melo por sempre me aconselharem nos instantes de dúvidas e virem em meu socorro nos momentos de necessidade. Agradeço aos professores do PPGE3M da UFRGS por terem me apresentado com maior profundidade diversos assuntos que, como bacharel, apenas conhecia superficialmente, de modo que graças a vocês o engenheiro que sou hoje é muito superior ao que eu era em 2014; sobretudo, agradeço a Rodrigo de Lemos Peroni por ter fornecido ao nosso projeto tanto de seu tempo e energia, tornando possível com sua orientação a elaboração de um trabalho consistente e útil à mineração brasileira. Sou grato também à Pedreira Esperança Ltda. por me prover praticamente desde a conclusão da minha graduação, ao passo que me oferecia diariamente os desafios mais diversos e aparentemente insolúveis, além de toda equipe, que é obrigada a aturar meu humor peculiar há bastante tempo; agradeço especialmente a Pedro Celso de Castro Pita Júnior por ter incentivado o meu progresso profissional quando poderia ter feito o inverso. Devo ainda agradecer à ANM pelo fornecimento do banco de dados utilizado neste estudo; também merecem reconhecimento pela contribuição que ofereceram os engenheiros de minas Camila Lamonato Centeno, Marcos Antônio de Holanda Tavares e Gustavo Alexandre Silva, assim como Antônio Alves Amorim Neto e Adhelbar de Albuquerque Queiroz Filho. Finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram com este projeto ou influenciaram no meu desenvolvimento pessoal até então; a todos, OBRIGADO.

"[...] e depois, Ana, no esforço de fazer o melhor, quem chega ao núcleo? não podemos esquecer que as estradas, como qualquer caminho, só à flor da terra é que são rasgadas, e que todo traço, mesmo a vida no subsolo, é sempre um movimento na superfície ampla;"

Raduan Nassar, *Lavoura Arcaica*, 1975.

RESUMO

O planejamento de lavra de um projeto que está em fase inicial apresenta como desafio adicional o fato de as incertezas serem ainda demasiadas e inerentes ao caráter prematuro de uma análise neste estado. Entretanto, ainda assim é necessário avaliar a atratividade do empreendimento e considerá-lo ou não técnica e economicamente viável para que se possa discernir sobre levar o projeto adiante ou não. Para que seja possível chegar a alguma conclusão neste âmbito, é necessário definir uma taxa de produção anual e a vida útil do projeto. Sendo ainda a maior parte das informações acerca do depósito mineral e da lavra conjecturas, torna-se bastante difícil definir com precisão estes parâmetros do ponto de vista da maximização do lucro. Na busca por soluções que apresentassem certa confiabilidade na resolução deste problema, diversos autores pesquisaram e propuseram suas próprias equações para definir estes indicadores, embora a mais difundida ainda hoje seja a proposta pioneira, desenvolvida considerando somente 30 minas em 1977. Este trabalho tem por objetivo verificar a aderência da regra de Taylor e dos demais estudos presentes na literatura à realidade das minas em operação no Brasil a partir de um banco de dados contendo informação dos Relatórios Anuais de Lavra (RAL) entre 2010 e 2015. Após a análise da aderência, foi utilizada a metodologia de Monte Carlo para propor novas equações dotadas da máxima aderência possível aos dados segmentados por substância mineral, método de lavra e/ou porte do empreendimento. Os resultados obtidos demonstraram que a regra de Taylor possui um deslocamento para a grande maioria dos projetos em operação no Brasil, recomendando-se a utilização das novas abordagens propostas neste trabalho para análise de projetos em fase precoce de estudos.

Palavras-chave: Mineração no Brasil; Planejamento de lavra; Regra de Taylor; Taxa de produção; Vida útil.

ABSTRACT

Mine planning of an early stage project presents as an additional challenge the fact that the uncertainties are still too many and inherent in the premature character of an analysis in this state. However, it is necessary to evaluate the attractiveness of the enterprise and consider it technically or economically feasible so that it can be discerned about whether or not to carry the project forward. In order to reach some conclusion in this context, it is necessary to define an annual production rate and the lifetime of the project. With most of the information about mineral deposit and mining yet conjectures, it is difficult to precisely define these parameters from the point of view of profit maximization. In the search for solutions that present some reliability in the resolution of this problem, several authors have researched and proposed their own equations to define these indicators, although the most widespread still the pioneer proposal, developed considering only 30 mines in 1977. The aim of this work is to verify the adherence of the Taylor's rule and other studies in the literature to the reality of the mines in operation in Brazil from a database containing information from the Annual Mining Reports between 2010 and 2015. After, the Monte Carlo methodology was used to propose new equations with the maximum possible adherence to data segmented by mineral substance, method of mining and/or size of the project. The results obtained demonstrated that the Taylor's rule has a displacement for the great majority of the projects in operation in Brazil, recommending the use of the new approaches proposed in this work for the analysis of projects in the early phase of studies.

Keywords: Brazilian mining; Mine planning; Taylor's rule; Production Rate; Lifetime.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vida útil e taxa de produção em função da massa de minério (TAYLOR, 1977).	23
Tabela 2 - Descrição dos objetos de estudo e das conclusões obtidas por cada autor.....	27
Tabela 3 - Taxas de produção obtidas em diferentes massas nos diversos métodos.....	27
Tabela 4 - Classificação das minas quanto ao porte em função da produção.....	33
Tabela 5 - Eventos subdivididos em substância mineral, porte e método de lavra.	38
Tabela 6 - Aderências das metodologias clássicas ao banco de dados.....	50
Tabela 7 – Simulações necessárias à obtenção da aderência máxima e seus coeficientes.	56
Tabela 8 - Simulações necessárias à obtenção da aderência máxima e seus coeficientes.....	59
Tabela 9 –Aderência das metodologias clássicas e das simulações à maior parcela dos dados, além dos coeficientes empregados nas equações.	59
Tabela 10 - Segmentação por método de lavra.....	60
Tabela 11 - Segmentação por substância mineral e as 25 mais importantes.....	61
Tabela 12 – Segmentação por substância mineral, porte do empreendimento e eventos lavrados a céu aberto para as substâncias minerais mais importantes.....	63
Tabela 13 - Segmentação por substância mineral, porte do empreendimento e eventos lavrados através de métodos subterrâneos somados aos eventos lavrados em concomitância através de métodos a céu aberto e subterrâneos para as substâncias minerais mais importantes.	64

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vida útil e taxa de produção em função da massa de minério (TAYLOR, 1977)..	23
Figura 2 - Taxa de produção das equações estudadas em função da massa de minério presente em depósitos até 100 Mt.....	28
Figura 3 - Segmentação dos eventos por Estado.....	34
Figura 4 - Segmentação dos eventos por método de lavra.....	35
Figura 5 - Somatório da produção total dos eventos dos 16 Estados mais relevantes.....	35
Figura 6 - Somatório das reservas totais dos eventos por Estado.....	36
Figura 7 - Substâncias minerais com maior produção total.....	37
Figura 8 - Substâncias minerais com maiores reservas totais.....	37
Figura 9 - Aderência de Taylor (1977) aos eventos.....	41
Figura 10 - Aderência de Taylor (1977) aos eventos contendo metais preciosos.....	42
Figura 11 - Aderência de Taylor (1977) aos eventos contendo metais de base.....	42
Figura 12 - Aderência de Singer et al. (1998) aos eventos contendo ouro e prata lavrados a céu aberto.....	43
Figura 13 - Aderência de Singer et al. (1998) aos eventos contendo ouro e prata lavrados a céu aberto somados aos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos.....	43
Figura 14 - Aderência de Long (2009) aos eventos lavrados a céu aberto.....	44
Figura 15 - Aderência de Long (2009) aos eventos lavrados a céu aberto somados aos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos.....	45
Figura 16 - Aderência de Long (2009) aos eventos contendo ouro, cobre, zinco e chumbo lavrados a céu aberto.....	46
Figura 17 - Aderência de Long (2009) aos eventos contendo ouro, cobre, zinco e chumbo lavrados a céu aberto somados aos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos.....	46
Figura 18 - Aderência de Long (2009) aos eventos lavrados em subsolo.....	47
Figura 19 - Aderência de Long (2009) aos eventos lavrados em subsolo somados aos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos.....	48
Figura 20 - Aderência de Long (2009) aos eventos contendo ouro, cobre, zinco e chumbo lavrados em subsolo.....	49
Figura 21 - Aderência de Long (2009) aos eventos contendo ouro, cobre, zinco e chumbo lavrados em subsolo somados aos eventos mistos.....	49
Figura 22 - Distribuição uniforme e limites definidos para os coeficientes a e b, respectivamente.....	54
Figura 23 - Histograma de frequência e probabilidade cumulativa das 100.000 simulações iniciais.....	54
Figura 24 - Limites dos coeficientes na distribuição uniforme das 100.000 simulações finais para os coeficientes a e b, respectivamente.....	55
Figura 25 - Histograma de frequência e probabilidade cumulativa das 100.000 simulações finais.....	55
Figura 26 - Limites dos coeficientes a, b e c, respectivamente, na distribuição uniforme das 100.000 simulações iniciais para funções com três coeficientes.....	57

Figura 27 - Histograma de frequência e probabilidade cumulativa das 100.000 simulações iniciais.....	58
Figura 28 - Limites dos coeficientes a, b e c, respectivamente, na distribuição uniforme das 100.000 simulações iniciais para funções com três coeficientes.....	58
Figura 29 - Limites dos coeficientes na distribuição uniforme das 100.000 simulações iniciais para funções com três coeficientes.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANM = Agência Nacional de Mineração

C = Capacidade de produção (toneladas por dia)

C_{st} = Capacidade de produção (toneladas curtas por dia)

Dwy = Dias trabalhados por ano

L = Vida útil da mina (anos)

m^2 = Metro quadrado

m^3 = Metro cúbico

Mt = Mega tonelada

RAL = Relatório Anual de Lavra

ROM = Run of Mine

T = Massa do minério (toneladas)

T_{st} = Massa do minério (toneladas curtas)

T_{Mt} = Massa do minério (milhões de toneladas)

t = Tonelada

t/dia = Tonelada por dia

USBM = United States Bureau of Mines

USGS = United States Geological Survey

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 META.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.3 ETAPAS DA PESQUISA	16
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	18
2.1 ETAPAS DE UM PROJETO	18
2.2 A REGRA DE TAYLOR (TAYLOR, 1977)	21
2.3 ESTUDOS E REVISÕES EFEITUADOS NA REGRA DE TAYLOR	24
2.4 MÉTODOS DE MONTE CARLO.....	28
2.4.1 Aplicações básicas.....	29
2.4.2 Origem.....	30
3 BANCO DE DADOS E ADERÊNCIA DAS METODOLOGIAS CLÁSSICAS	32
3.1 BANCO DE DADOS	33
3.2 ADERÊNCIA DAS METODOLOGIAS CLÁSSICAS AO BANCO DE DADOS	40
4 METODOLOGIA.....	51
4.1 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE MONTE CARLO AO PROBLEMA	51
4.2 APLICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO E BUSCA PELA EQUAÇÃO ÓTIMA GERAL.....	52
4.2.1 Critérios e simulações com dois coeficientes	52
4.2.2 Critérios e simulações com três coeficientes.....	56
4.3 SEGMENTAÇÃO DOS DADOS EM DIFERENTES CENÁRIOS	60
4.3.1 Segmentação por método de lavra	60
4.3.2 Segmentação por substância mineral	61
4.3.3 Segmentação por substância mineral, porte do empreendimento e método de lavra	62
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	65
5.1 CONCLUSÃO.....	65
5.2 TRABALHOS FUTUROS	67

REFERÊNCIAS	68
ANEXO I – DESCRIÇÃO MINERALÓGICA DAS SUBSTÂNCIAS MINERAIS.....	71
ANEXO II - SEGMENTAÇÃO DE DADOS POR SUBSTÂNCIA MINERAL	76
ANEXO III - SEGMENTAÇÃO POR SUBSTÂNCIA MINERAL COMPARADA À REGRA DE TAYLOR (TAYLOR, 1977)	78
ANEXO IV - SEGMENTAÇÃO POR SUBSTÂNCIA MINERAL, PORTE DO EMPREENHIMENTO E MÉTODO DE LAVRA (OP).....	80
ANEXO V - SEGMENTAÇÃO POR SUBSTÂNCIA MINERAL, PORTE DO EMPREENHIMENTO E MÉTODO DE LAVRA (UG + OP E UG).....	83

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Uma análise de projeto envolve, geralmente, três estágios (LEE, 1984), que são o estudo conceitual, o estudo preliminar (ou pré-viabilidade) e o estudo de viabilidade técnica e econômica. No primeiro, as ideias iniciais de um projeto serão esboçadas; no segundo, será determinado se o projeto apresenta atratividade suficiente para justificar um maior investimento; por fim, o terceiro fornecerá as bases técnicas e considerações de diversas naturezas, tais como ambientais, legais e comerciais, fornecendo subsídios para a tomada de decisão de investir ou não o projeto. Para a conclusão dos estudos de pré-viabilidade e de viabilidade é necessário definir um calendário de produção, embora a maior parte das informações acerca da lavra ainda sejam conjecturas nesta fase, tornando difícil definir a taxa de produção adequada para que o máximo de lucro seja obtido.

Diversos autores buscaram soluções para esta lacuna, embora o mais utilizado seja ainda o pioneiro H. K. Taylor, cuja equação desenvolvida em 1977 (TAYLOR, 1977) é largamente utilizada até a presente data. Vários estudos foram desenvolvidos tencionando um melhor ajuste desta equação à realidade, visto que o autor utilizou somente 30 minas para construir o seu modelo. Em função da generalidade e simplicidade da equação, elaborada para atender projetos em fases iniciais, em diversos casos ela não apresenta a aderência necessária aos projetos em operação, já que ela não prevê particularidades inerentes a cada caso.

As características geomorfológicas do depósito são fundamentais na projeção da taxa de produção e vida útil do empreendimento. Além da seleção do método de lavra ser diretamente influenciada por estas características, a geometria, a extensão lateral e em profundidade e o condicionamento topogeológico influem diretamente no espaço disponível para incrementar a capacidade produtiva da mina. Lavras em subsolo, por exemplo, geralmente possuem capacidade produtiva bem inferiores às operações a céu aberto.

Caso a massa de minério contida em uma determinada jazida seja muito elevada, a equação pode apontar para uma taxa de produção elevada e inadequada ao porte de empresa, principalmente no início do empreendimento. O modelo não leva em consideração possíveis ampliações na planta de beneficiamento e assume uma taxa constante ao longo da vida da mina; caso de depósitos como o de Carajás, por exemplo. Além destes e de outros fatores restritivos, cada modificação elaborada na regra de Taylor (TAYLOR, 1977) ao longo das décadas apresenta determinada confiabilidade e aderência para aplicações em casos

semelhantes aos estudados por cada autor em cada contexto, de modo que uma mina com características distintas destas provavelmente não apresentará resultados consistentes para o uso destas metodologias.

Não existiam até então registros de estudos efetuados no Brasil acerca da aplicação e da precisão da regra de Taylor na estimativa da vida útil e da taxa de produção das minas brasileiras em operação, até que Mariz e Peroni (2018a) verificaram que as equações existentes não apresentavam aderência adequada. Além da verificação, os autores propuseram novos conjuntos de equações para dados segmentados por substância mineral, método de lavra e/ou porte do empreendimento para 30 substâncias minerais (MARIZ; PERONI, 2018b).

1.1 META

A meta deste estudo é revisar a aplicabilidade da regra de Taylor (TAYLOR, 1977) e das outras equações elaboradas no intuito de prever a taxa de produção e a vida útil de empreendimentos mineiros em fase inicial de projeto, considerando a aderência destas para as minas em operação em depósitos brasileiros. Em seguida, serão propostas novas equações que apresentem aderência máxima a cada cenário simulado, considerando uma tolerância de 20% para mais ou para menos, onde serão propostas segmentações nos dados por substância mineral, método de lavra e porte do empreendimento.

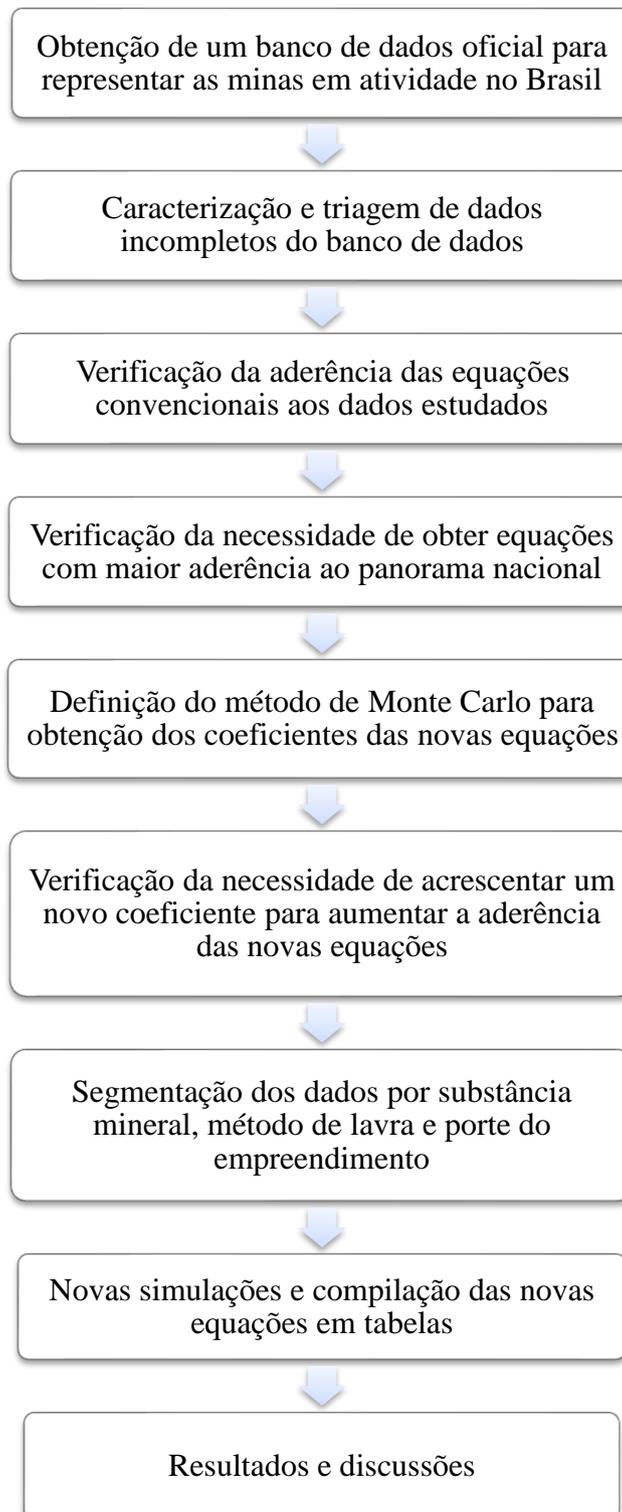
1.2 OBJETIVOS

Para atingir a meta proposta neste estudo, foram definidos os seguintes objetivos:

- Consolidação de uma base de dados confiável que contemple, ao menos, a substância mineral, o método de lavra, a produção anual e a reserva declarada de empreendimentos mineiros brasileiros;
- Análise da aderência das metodologias de estimativa de produção presentes na literatura às minas brasileiras em operação a partir da triagem dos dados;
- Desenvolvimento de novas equações que apresentem aderência máxima aos cenários simulados, que serão segmentados por substância mineral, método de lavra e porte do empreendimento, produzindo então tabelas consistentes que apresentem soluções para diferentes situações.

1.3 ETAPAS DA PESQUISA

Para atender aos objetivos propostos nessa pesquisa foram definidas as seguintes etapas:



1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 2 apresenta um resumo das etapas, o conteúdo presente em um estudo de viabilidade e um breve histórico das metodologias empíricas usadas no desenvolvimento das equações que visavam simular as taxas de produção e as vidas úteis de empreendimentos mineiros em fase incipiente. São expostas as particularidades da regra de Taylor (TAYLOR, 1977), que foi o estudo pioneiro e que até hoje é largamente utilizado, assim como outros trabalhos desenvolvidos por Singer et al. (1998, 2000), Long e Singer (2001) e Long (2009), sendo efetuada uma comparação entre todas elas.

O capítulo 3 consiste em uma análise quantitativa e qualitativa dos dados utilizados no estudo, assim como a avaliação da aderência das equações e modelos apresentados no capítulo 2, levando em consideração as premissas utilizadas por cada autor em seus estudos. A partir da observação de falta de aderência entre os dados utilizados e as equações disponíveis até o momento, novas equações foram propostas para representação da realidade brasileira.

O capítulo 4 propõe que as novas equações devem possuir a mesma forma que as utilizadas pelos autores anteriores e define que os coeficientes destas equações deverão ser obtidos através de simulações de Monte Carlo. A aderência obtida pelas equações com dois coeficientes, embora superior a qualquer resultado anterior, ainda não foi satisfatória, o que motivou a adição de um terceiro coeficiente, não comprometendo a simplicidade da equação e determinando que a equação com três coeficientes apresenta melhores resultados. São efetuadas segmentações nos dados em busca de melhores resultados que os obtidos no domínio completo. Inicialmente é efetuada uma segmentação por método de lavra para verificar se as minas lavradas concomitantemente sob métodos subterrâneos e a céu aberto deveriam ser agrupadas com as minas a céu aberto ou subterrâneas. Em seguida foi efetuada a segmentação por substância mineral. Por fim, foi efetuada a segmentação em concomitância por substância mineral, método de lavra e porte do empreendimento, onde os resultados foram superiores aos obtidos na segmentação somente por substância mineral.

O capítulo 5, finalmente, conclui e reitera que as metodologias presentes na literatura não são satisfatórias e que, embora a dispersão dos dados dificulte a obtenção de uma equação simples e que apresente boa aderência, as novas propostas são significativamente mais adequadas ao cenário da mineração no Brasil que as desenvolvidas anteriormente. São apresentadas ainda propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta uma revisão sobre as etapas e o conteúdo de um estudo de viabilidade, além de apontar para a necessidade da estimativa da vida útil de uma jazida e da taxa de produção do empreendimento quando ainda são muitas as incertezas e escassos os dados à disposição. É efetuada também uma revisão na literatura sobre as metodologias desenvolvidas até então no intuito de fornecer estes parâmetros para empreendimentos mineiros em estágio incipiente, confrontando por fim os resultados obtidos em cada estudo.

2.1 ETAPAS DE UM PROJETO

As fases de projeto de empreendimentos envolvem, geralmente, três estágios de estudo (LEE, 1984):

- O estudo conceitual (ou escopo), onde as ideias iniciais de um projeto são transformadas em uma iniciativa de investimento, considerando diferentes perspectivas e técnicas de estimativa de custos para identificar potenciais oportunidades de projeto;
- O estudo preliminar de viabilidade (ou pré-viabilidade), onde será determinado se o projeto apresenta atratividade suficiente para um maior detalhamento e são identificados os aspectos críticos à viabilidade do projeto;
- Por fim, o estudo de viabilidade, que envolve redução das incertezas e maior nível de detalhamento que os estágios anteriores, além de fornecer consistentes bases técnicas, ambientais e comerciais que possibilitam uma tomada de decisão precisa e segura.

O custo de cada um destes estudos (LEE, 1984) varia de acordo com a dimensão do projeto, sua natureza, a quantidade de alternativas que serão investigadas, dentre outros fatores. Entretanto, o custo individual de cada etapa pode ser avaliado como uma porcentagem do custo de capital do projeto (excluindo os custos com sondagem, testes de cominuição ou metalúrgicos e estudos ambientais). Desta forma, o estudo conceitual abrangeria entre 0,1 e 0,3%, o estudo preliminar 0,2 a 0,8% e, finalmente, o estudo de viabilidade abrangeria o intervalo entre 0,5 e 1,5% dos custos de capital (HISTRULID; KUCHTA, 2006).

Segundo Taylor (1977), o principal conteúdo do relatório preliminar de avaliação deve abranger os seguintes tópicos:

- Alvo, onde os objetivos buscados e a justificativa da busca são descritos brevemente;
- Conceitos técnicos, onde são descritos a localização do projeto, os objetivos quanto à produção, os meios de atingir estes objetivos e o destino dos produtos;
- Descobertas, onde seriam agrupadas as mais importantes observações de todas as demais seções.

Estes três primeiros tópicos devem abranger todas as observações, informações gerais e suposições, sendo a parcela adequada à leitura de quem possui menor conteúdo técnico. Devem haver, ainda, tópicos mais detalhados referentes às seguintes informações: massa total e teor do minério, calendário de produção, estimativa dos custos de capital, estimativa dos custos de operação, estimativa de faturamento, impostos e financiamentos e, por fim, o fluxo de caixa (HUSTRULID; KUCHTA, 2006).

Caso aprovado, o estudo de pré-viabilidade será aperfeiçoado e integrará o estudo de viabilidade, que deve apresentar de maneira clara, objetiva e com maior riqueza de detalhes todas as informações pertinentes à compreensão do empreendimento, como descrições dos processos selecionados, as justificativas em selecionar determinado método ou equipamento em detrimento de outros, etc. Segundo Taylor (1977), o estudo de viabilidade pode ser subdividido nos seguintes tópicos:

- Generalidades, incluindo a topografia, o clima da região, a população, acesso à mina, localizações indicadas para instalação da planta de beneficiamento, tamanho e locação do depósito de estéril, cidades próximas, etc.;
- Geologia de campo, contendo informações acerca das estruturas, mineralizações, gênese, mapeamento de alterações, geofísica, amostragem e ensaios nas amostras, entre outros;
- Geologia e lavra, incluindo bancos de dados, cálculos de massa e teores, análises estatísticas, litologias, modelagem completa dos corpos minerais, etc.;
- Lavra, onde serão agrupadas informações acerca da cava, a relação estéril-minério, diluição e perda de minério, taxa de produção, sequenciamento, equipamentos e mão-de-obra necessários, dentre outras informações pertinentes;
- Pesquisa necessária ao desenvolvimento da planta de beneficiamento, onde serão analisados os testemunhos de sondagem, será proposta uma planta piloto, e nela serão obtidas especificações sobre o grau de processamento, a natureza e a qualidade dos

produtos. Será efetuada a coleta de amostras destes e posteriormente serão efetuadas a estimativa da influência que os diferentes tipos de minérios e teores tiverem na recuperação e na qualidade dos produtos finais;

- Design da planta de beneficiamento, contendo o fluxograma, capacidade de produção, especificações sobre recuperação e teor a ser trabalhado;
- Serviços auxiliares, como construção dos acessos, provisão de água, energia e combustível, construção dos escritórios, oficinas, laboratórios, dentre outras construções, além da contratação das equipes e provisão dos dormitórios e do transporte destes;
- Estimativa dos custos de capital, como o desenvolvimento da mina e da área da planta de beneficiamento, definição dos custo de aquisição de equipamentos e de matéria-prima para as construções, abastecimento do almoxarifado e da oficina industrial, capital reservado para imprevistos, capital de giro para operação antes do primeiro recebimento e verificação da necessidade de empréstimos;
- Estimativa dos custos de operação, combustível, energia, explosivo, material de desgaste, regentes, além dos custos de manutenção dos equipamentos e dos salários e custos administrativos diversos;
- Mercado, onde serão avaliadas as especificações dos produtos, a previsão de preços futuros, os compradores, os custos com frete, serão esboçados cartas de intenção de venda e contratos diversos;
- Aspectos legais, como direitos minerários, arrendamentos, royalties, aquisição de propriedades, licenças e permissões para operar a mina e a área de servidão, acordos entre sócios, dentre outros;
- Aspectos financeiros, como o enquadramento do empreendimento em determinado tipo de sociedade, juros, refinanciamento de débitos, conversão de moedas, depreciação dos subsídios, levantamento de impostos diversos, apropriação e divisão dos lucros;
- Efeitos no meio ambiente, como os estudos de impacto ambiental, plano de recuperação de área degradada, dentre outras conformidades;
- Faturamento e análise de lucratividade, onde serão estimados os calendários de produção da mina e da planta, além dos custos anuais de produção. Será elaborado um fluxo de caixa completo do empreendimento (individualizado nos 10 anos iniciais e condensado no restante dos anos até o fechamento da mina), serão calculados o valor

presente líquido, a taxa interna de retorno e o tempo de recuperação do investimento, além da análise de sensibilidade nos parâmetros que mais influenciam no resultado do fluxo de caixa (HUSTRULID; KUCHTA, 2006).

Desde o estudo de pré-viabilidade, entretanto, há a necessidade de definir o calendário de produção, que deverá ainda ser reavaliado e selecionado em definitivo no estudo final de viabilidade. Entretanto, em um estágio onde praticamente todas as informações acerca da lavra são conjecturas, é difícil definir qual a taxa de produção adequada para que a lucratividade do projeto seja a máxima possível. Conseqüentemente, a estimativa da taxa de produção vem sendo estudada por diversos autores ao longo das décadas, sendo que a metodologia mais aplicada é a exposta por H. K. Taylor em seu artigo “*Mine Valuation and Feasibility Studies*”, publicado em 1977 (HUSTRULID; KUCHTA, 2006).

2.2 A REGRA DE TAYLOR (TAYLOR, 1977)

Na teoria, é possível calcular a taxa de extração ótima de um corpo mineral a partir do conhecimento ou da inferência de sua massa total e da distribuição de teores (incluindo os efeitos da variação do teor de corte), além de todos os custos e preços de venda dos produtos através da vida útil da mina. Estas informações, entretanto, não estão disponíveis em um estágio incipiente de projeto, podendo eventualmente sequer serem obtidas com precisão até o fechamento da mina.

Mesmo detendo parte destes conhecimentos, a formulação de uma teoria de otimização forneceria respostas diferentes quando variasse o parâmetro a ser maximizado, como o lucro total, o fluxo de caixa total, o valor presente líquido ou a taxa interna de retorno. Os riscos envolvidos em um empreendimento mineiro, que costumam ser altos, podem também inibir os investidores de definir uma taxa de produção mais arrojada, devido ao receio de que súbitas mudanças no cenário econômico acarretem na modificação do teor de corte e da absorção do mercado para determinado minério, tornando a operação superdimensionada ou mesmo forçando sua paralisação.

Taxas de produção demasiado reduzidas alongam o fluxo de caixa, postergam receitas e sacrificam potenciais lucros, que são minguados e atingidos somente após muitos anos de empreendimento. Inversamente, taxas de produção demasiado elevadas, mesmo tendendo a aumentar o valor presente líquido do projeto e a reduzir o custo operacional por metro cúbico produzido, aumentam consideravelmente os custos de capital, podendo levar o empreendimento a sequer recuperar o investimento devido à vida útil reduzida, além de

produzir uma quantidade de minério superior à capacidade de absorção do mercado. Vale ressaltar ainda que os preços dos metais costumam variar ciclicamente, de modo que uma operação com taxa de produção muito elevada pode ocorrer em período de preços ascendentes, deixando pouco ou nenhum minério a ser lavrado na fase de queda dos preços.

Na prática, taxas de produção são fortemente limitadas ou influenciadas por problemas práticos, como o espaço disponível para as operações. É natural que a maioria das geometrias de depósitos possibilitem o incremento na produção, partindo do princípio de que haverá mais frentes de serviços após determinado tempo de lavra. Em uma mina a céu aberto, o espaço disponível para os equipamentos varia com a área (m^2), ao passo que a produção varia com o volume (m^3). Seria esperado, portanto, que as taxas de produção fossem proporcionais a dois terços da massa total da jazida. A vida útil da mina seria, então, proporcional à raiz cúbica da tonelagem. Taylor (1977), entretanto, após efetuar um estudo em vários projetos contemporâneos à época da avaliação, em operação ou aptos a iniciar, cujos tamanhos e geometrias dos corpos minerais eram os mais diversos (excluindo depósitos tabulares), além de reservas totais razoavelmente conhecidas, averiguou que a taxa de extração, na verdade, comportava-se proporcionalmente a três quartos da massa do minério ao invés de dois terços, de modo que a vida útil dos empreendimentos era proporcional à raiz quádrupla da massa (HUSTRULID; KUČHTA, 2006). Eis que estava estabelecida a empírica regra de Taylor (TAYLOR, 1977), simples e prática como apresentada na equação 1:

$$L \cong 0,2 * T^{0,25} \quad (1)$$

onde L representa a vida útil da mina, em anos, e T representa a massa de minério identificada no depósito nas fases iniciais do projeto. É indiferente o uso da tonelada métrica ou curta na fórmula anterior, graças à atenuação da divergência pela raiz quádrupla (equivalente a elevar o fator T a 0,25). É mais conveniente, entretanto, a expressão da tonelagem em milhões de toneladas e, salvo raras exceções, o valor obtido possui uma amplitude de variação de 20% para mais ou para menos, de modo que a fórmula pode ser reescrita como a equação 2 (TAYLOR, 1986):

$$L \cong (1 \pm 0,2) * 6,5 * T_{Mt}^{0,25} \quad (2)$$

onde T_{Mt} representa a massa de minério em milhões de toneladas. Inicialmente, a massa do minério deve ser razoável e pouco otimista, evitando assim que a reserva (e conseqüentemente a taxa de produção) seja superestimada, devendo ser considerados, portanto, o recurso medido e o recurso indicado, sendo o recurso inferido excluído do cálculo. Esta regra produz, finalmente, uma provisória mas necessária estimativa da taxa de produção,

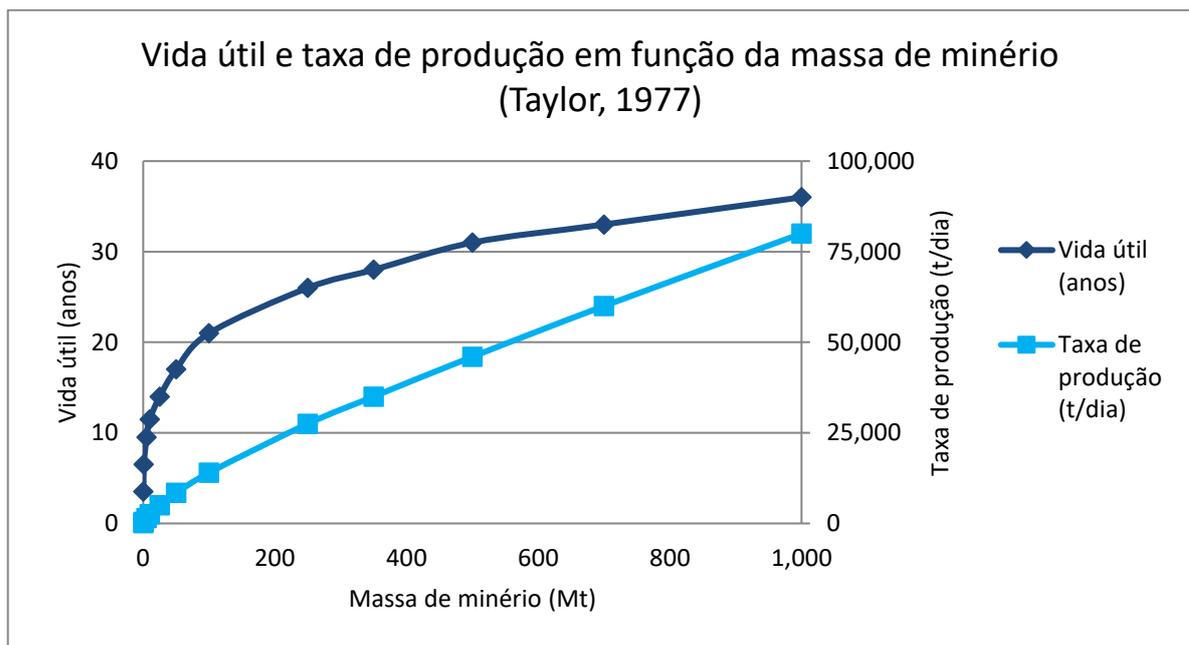
possibilitando o desenvolvimento de subsequentes estudos econômicos, onde uma das taxas de produção contidas no intervalo proposto deverá ser utilizada em definitivo no estudo de viabilidade econômica (HUSTRULID; KUCHTA, 2006). A tabela 1, a seguir, foi composta a partir de valores obtidos através da regra de Taylor (TAYLOR, 1977), ao passo que a Figura 1 apresenta um gráfico confeccionado com os dados desta tabela.

Tabela 1 - Vida útil e taxa de produção em função da massa de minério.

Massa do depósito (Mt)	Vida útil (anos)	Intervalos da vida útil (anos)	Taxa de produção média (t/dia)	Intervalos da taxa de produção (t/dia)
0,5	4	3 - 4,5	80	65 - 100
1	7	5,5 - 7,5	450	400 - 500
5	10	8 - 11,5	1.500	1.250 - 1.800
10	12	9,5 - 14	2.500	2.100 - 3.000
25	14	12 - 17	5.000	4.200 - 6.000
50	17	14 - 21	8.400	7.000 - 10.000
100	21	17 - 25	14.000	11.500 - 17.000
250	26	22 - 31	27.500	23.000 - 32.500
350	28	25 - 33	35.000	30.000 - 42.000
500	31	26 - 37	46.000	39.000 - 55.000
700	33	28 - 40	60.000	50.000 - 72.000
1.000	36	30 - 44	80.000	65.000 - 95.000

Fonte: Adaptado de TAYLOR, 1977.

Figura 1 - Vida útil e taxa de produção em função da massa de minério (TAYLOR, 1977).



Fonte: Autor.

Em 1991, o engenheiro de minas Thomas W. Camm, pesquisador do *United States Bureau of Mines* (USBM), desenvolveu um estudo que visava a obtenção de modelos de custos para aplicar na avaliação de pré-viabilidade de empreendimentos, levando em consideração todos os insumos necessários para a operação de cada um dos métodos de lavra avaliados. O autor chegou à conclusão de que a capacidade produtiva por dia podia ser calculada como na equação 3:

$$C_{st} = \frac{T_{st}}{Dwy * L} \quad (3)$$

onde C_{st} representa a capacidade produtiva por dia em toneladas curtas, e T_{st} representa a massa de minério existente no depósito em toneladas curtas, Dwy representa dias trabalhados em um ano e L representa a vida útil do depósito. A vida útil foi obtida através da aplicação da regra de Taylor (TAYLOR, 1977), possibilitando ao autor a conclusão de que a relação entre taxa de produção e tonelagem de minério para 350 dias de trabalho por ano correspondia à equação 4:

$$C_{st} = 0,0143 * T_{st}^{0,75} \quad (4)$$

Esta relação para 350 dias de trabalho será utilizada para fins comparativos por todos os autores subsequentes.

2.3 ESTUDOS E REVISÕES EFEITUADOS NA REGRA DE TAYLOR

Em 1998, os pesquisadores do USGS Donald A. Singer, W. David Menzie e Keith R. Long desenvolveram um estudo nas minas a céu aberto de ouro e prata dos Estados Unidos visando comparar os resultados obtidos através da regra de Taylor (TAYLOR, 1977) com os por eles obtidos. Foram consideradas 80 minas onde o beneficiamento era efetuado através de cinco tipos de processos, cuja aplicação dependia das proporções e características mineralógicas dos metais no depósito, além da presença de outros elementos. Destas, 46 foram consideradas econômicas e 34 não econômicas, partindo de um critério simples onde, para ser econômica, a mina deveria estar fornecendo algum lucro após 70% dos anos de operação.

Foi observado que a taxa de produção das minas instaladas aparentava ser maior que a mensurada no estudo de Camm (1991). Partindo da análise de 46 das minas economicamente viáveis do estudo de 1998, independente do método de beneficiamento (visto que as regressões entre cada um dos métodos apresentaram pouca divergência), os autores (SINGER

ET AL., 1998) obtiveram a equação 5 como relação entre a capacidade produtiva e a massa do minério:

$$C_{st} = 0,4159 * T_{st}^{0,5874} \quad (5)$$

onde C_{st} representa a capacidade produtiva em toneladas curtas por dia e T_{st} representa a massa de minério em toneladas curtas.

Em 2000, os autores Donald A. Singer, W. David Menzie e Keith R. Long desenvolveram um novo estudo, desta vez em minas subterrâneas instaladas em depósitos de minérios sulfetados de grande porte. A análise foi efetuada em 28 depósitos considerados econômicos pelos mesmos critérios do estudo das minas a céu aberto de ouro e prata (SINGER ET AL., 1998). Estes depósitos estavam localizados nos Estados Unidos, no Canadá, na Austrália, em Portugal, na Espanha, no Chile e na Groenlândia; suas minas produziam até três produtos finais e eram lavradas através de cinco métodos diferentes: *room and pillar*, *cut and fill*, *crater retreat*, *shrinkage stope* e *sublevel longhole*. O cálculo da massa das reservas levou em consideração a diluição e a recuperação proporcionada por cada método de lavra segundo a mesma tabela utilizada por Camm (1991). A regressão obtida através do teste estatístico “t de Student” não apresentou uma diferença tão grande quanto no estudo anterior (SINGER ET AL., 1998), embora tenha ficado claro que a regra de Taylor (TAYLOR, 1977) superestimava a taxa de produção das minas subterrâneas, talvez por ter sido principalmente desenvolvida sobre dados de minas a céu aberto. A equação 6 apresenta o resultado obtido por este estudo:

$$C_{st} = 0,0248 * T_{st}^{0,704} \quad (6)$$

onde C_{st} representa a capacidade produtiva em toneladas curtas por dia e T_{st} representa a massa de minério em toneladas curtas.

Em 2001, os autores Keith R. Long e Donald A. Singer desenvolveram um novo estudo através do USGS, onde foram estudados 45 depósitos de cobre porfírico lavrados a céu aberto e tratados em seguida através de pilhas de lixiviação. Long e Singer (2001) apontam as dificuldades em comparar esta união entre lavra e tratamento com o modelo de Camm (1991), visto que este não previa esta composição nem avaliava produtos secundários, como era o caso de muitas minas, além de não prever custos com metalurgia, refino e transporte. As minas do estudo estavam distribuídas no Chile, nos Estados Unidos, no Panamá, no Peru, no Canadá, em Burma (atual Myanmar) e no México. A equação 7 apresenta o resultado obtido neste estudo:

$$C_{st} = 0,0236 * T_{st}^{0,74} \quad (7)$$

onde C_{st} representa a capacidade produtiva em toneladas curtas por dia e T_{st} representa a massa de minério em toneladas curtas.

Em 2009, o autor Keith R. Long publicou na revista *Natural Resources Research* um artigo com o estudo mais completo efetuado até então, abrangendo 539 minas subdivididas em 342 a céu aberto e 197 subterrâneas. Dentre elas, 319 (59%) eram minas de ouro, 125 (23%) eram de cobre e 62 (12%) eram minas de zinco e chumbo. Grande parte das minas foi submetida a, pelo menos, uma expansão em sua capacidade produtiva ao longo de sua vida útil e, como é assumido que esta expansão deve corresponder a uma expansão nas reservas, cada uma destas mudanças foi considerada, para efeito de cálculo, como uma nova mina. Algumas minas tratavam suas reservas e usinas de beneficiamento de alto e baixo teor de maneira diferenciada, de modo que cada conjunto foi avaliado independentemente, desde a abertura de cada frente de lavra e usina até suas respectivas expansões. Destarte, foram consideradas para efeito de cálculo 1196 minas, das quais 539 eram minas reais e 657 eram expansões destas.

Uma das principais contribuições do estudo foi subdividir o ajuste à equação original em duas novas equações, uma referente às minas a céu aberto e subterrâneas lavradas através do método *block caving* e outra referente aos demais métodos subterrâneos. Em ambos os casos o coeficiente a que está elevada a massa das reservas foi menor que os três quartos proposto por Taylor (1977), de modo que a capacidade produtiva foi inserida no intervalo entre metade e dois terços da tonelagem, sendo o coeficiente alusivo às minas subterrâneas menor ainda que o outro caso. As equações 8 e 9, respectivamente, apresentam os resultados obtidos nas minas a céu aberto com as lavradas através do método subterrâneo *block caving* seguido dos resultados obtidos nas demais minas subterrâneas.

$$C = 0,123 * T^{0,649} \quad (8)$$

$$C = 0,297 * T^{0,563} \quad (9)$$

onde C representa a capacidade produtiva em toneladas por dia e T representa a massa de minério em toneladas. O autor também conclui que o coeficiente que representa o expoente da massa do depósito é o que apresenta maior impacto na taxa de produção, além de ser coerente que este coeficiente represente sempre um número menor que 1, visto que a relação capacidade de produção - reserva mineral não pode ser linear nem exponencial, já que restrições físicas e tecnológicas impedem o crescimento desmedido da capacidade produtiva.

A Tabela 2 resume o exposto até então, onde as equações desenvolvidas por cada autor são apresentadas junto ao principal grupo de minas por eles estudado em cada ocasião e à quantidade de minas abrangida em cada estudo. A Tabela 3, por sua vez, apresenta, para cada

metodologia proposta, a simulação da taxa de produção (t/dia) obtida junto às diferentes massas de minério (Mt) propostas, permitindo assim a comparação entre os métodos para cada tamanho de depósito mineral.

Tabela 2 - Descrição dos objetos de estudo e das conclusões obtidas por cada autor.

Fonte e ano	Equação desenvolvida	Tipo de mina	Minas
Taylor (1977)	$C_{st} = 0,0143 * T_{st}^{0,75}$	Desconhecido	30
Singer et al. (1998)	$C_{st} = 0,4159 * T_{st}^{0,5874}$	Céu aberto (ouro e prata)	41
Singer et al. UG (2000)	$C_{st} = 0,0248 * T_{st}^{0,704}$	Subterrânea (grandes depósitos sulfetados)	28
Long, Singer (2001)	$C_{st} = 0,0236 * T_{st}^{0,74}$	Céu aberto (cobre)	45
Long OP (2009)	$C = 0,123 * T^{0,649}$	Céu aberto e <i>block caving</i>	342
Long UG (2009)	$C = 0,297 * T^{0,563}$	Subterrânea (- <i>block caving</i>)	197

Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

Tabela 3 - Taxas de produção obtidas em diferentes massas nos diversos métodos.

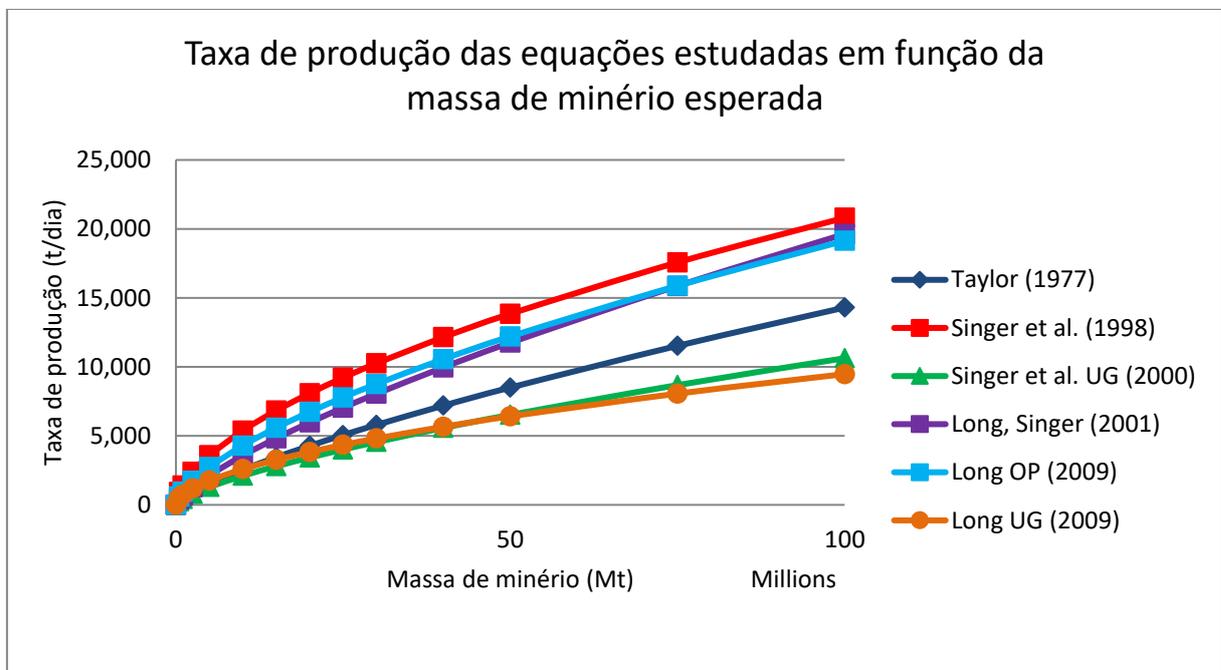
Massa esperada (Mt)	Taylor (1986)	Singer et al. (1998)	Singer et al. UG (2000)	Long, Singer (2001)	Long OP (2009)	Long UG (2009)
0	0	0	0	0	0	0
0,5	268,88	925,90	254,99	389,18	614,52	480,04
1,0	452,21	1.391,20	415,39	650,00	963,62	709,18
2,5	899,06	2.383,08	791,77	1.280,52	1.746,50	1.187,95
5,0	1.512,04	3.580,67	1.289,81	2.138,70	2.738,65	1.755,00
10,0	2.542,94	5.380,08	2.101,12	3.572,00	4.294,43	2.592,72
15,0	3.446,71	6.826,92	2.795,25	4.821,91	5.587,12	3.257,59
20,0	4.276,70	8.083,77	3.422,76	5.965,88	6.734,01	3.830,33
25,0	5.055,81	9.215,92	4.004,99	7.037,00	7.783,38	4.343,07
30,0	5.796,65	10.257,70	4.553,50	8.053,45	8.761,06	4.812,56
40,0	7.192,52	12.146,16	5.575,73	9.964,06	10.559,47	5.658,69
50,0	8.502,83	13.847,26	6.524,19	11.753,03	12.204,97	6.416,18
75,0	11.524,76	17.571,14	8.679,50	15.865,63	15.878,88	8.061,50
100,0	14.300,00	20.806,02	10.628,00	19.629,62	19.138,38	9.478,87

Fonte: Autor.

A figura 2 auxilia na compreensão da Tabela 3, onde são expostas graficamente as tendências das curvas de cada equação dentre as citadas, as divergências em cada resultado e os pontos de intersecção das curvas entre si. É perceptível que as curvas referentes exclusivamente às minas subterrâneas, como em Singer et al. (2000) e Long (2009), apresentam taxas de produção menores que as demais, em grande parte devido às restrições

impostas pelo espaço disponível para as operações de lavra. A equação desenvolvida por Singer et al. (1998) para minas a céu aberto de ouro e prata é a que apresenta maiores taxas de produção dentre todas as soluções propostas. O estudo pioneiro de Taylor (1977) apresenta taxas de produção bastante semelhantes às estipuladas por Long (2009) em sua abordagem nas minas subterrâneas, apresentando uma considerável diferença em relação à abordagem à céu aberto. Entretanto, à medida que a massa do depósito aumenta, seu comportamento se afasta da equação das minas lavradas através de métodos subterrâneos e se aproxima da desenvolvida para lavras a céu aberto.

Figura 2 - Taxa de produção das equações estudadas em função da massa de minério presente em depósitos até 100 Mt.



Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

2.4 MÉTODOS DE MONTE CARLO

Os métodos de Monte Carlo são um conjunto de técnicas matemáticas experimentais que utilizam variáveis aleatórias em suas soluções, sendo frequentemente aplicados em problemas com variáveis estocásticas ou quando a resolução de um determinado problema está além dos recursos disponíveis na matemática teórica.

2.4.1 Aplicações básicas

Em geral, os problemas a serem solucionados através destes métodos podem ser probabilísticos ou determinísticos, dependendo se eles preocupam-se ou não com o comportamento e o resultado dos processos aleatórios. Os problemas determinísticos são aqueles em os componentes atuam de forma previsível, independente da complexidade do panorama, como um sistema de equações ou um modelo astronômico. Os problemas probabilísticos, por sua vez, são baseados na incerteza dos resultados, como o lançamento de um dado ou o crescimento populacional de determinado grupo.

No caso probabilístico, a abordagem de Monte Carlo observa números aleatórios, escolhidos de modo que simulem os processos físicos aleatórios do problema original, além de inferir a solução desejada através do comportamento destes números escolhidos. As partículas estudadas pela física nuclear, por exemplo, submetem-se mais às leis probabilísticas que às determinísticas, de modo que é possível simular a atuação de um reator nuclear antes de sua construção através da seleção de números aleatórios que representem os movimentos aleatórios dos nêutrons nestas partículas.

A matemática teórica, por sua vez, utiliza da abstração e da generalidade como principal ferramenta para formular soluções gerais para problemas particulares, de modo que suas particularidades não influenciem na essência do problema. Entretanto, quanto mais generalista e formal for a solução proposta, menor é a capacidade desta teoria de produzir soluções numéricas para aplicações práticas. A ideia por trás da abordagem de Monte Carlo para problemas determinísticos é extrair a força desta ferramenta utilizada na matemática teórica, evitando assim a fraqueza associada à generalidade, substituindo a teoria por experimentos quando aquela não for satisfatória. Assim, é possível propor soluções para problemas determinísticos que podem ser formulados, mas não solucionados por meios teóricos; após a matemática pura descrever a estrutura principal do problema, as técnicas aleatórias propõem uma solução.

Deve-se levar em consideração que o método de Monte Carlo possui uma incerteza intrínseca oriunda da quantidade de observações dos dados aleatórios e, conseqüentemente, da representatividade da amostragem do domínio. Geralmente, quanto maior a geração e observação de dados aleatórios (amostragem), maior a representatividade e menor a possibilidade de haver erros. Entretanto, a redução do erro responde a uma lei quadrática que impõe que a observação deva sofrer um acréscimo de 100 vezes para que o erro seja reduzido 10 vezes. Para evitar este excesso de amostragens, se possível, outras técnicas de redução de

incerteza (variância) devem ser aplicadas, como modificação da instrumentação e, quando possível, distorção e modificação dos parâmetros do problema. Dependendo do caso, esta inserção de números aleatórios não deve ser empreendida inopinada e prodigamente, visto que cada dado aleatório pode ser uma fonte de incerteza no produto final (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964).

2.4.2 Origem

A nomenclatura e o desenvolvimento sistemático dos métodos de Monte Carlo remontam ao ano de 1944, embora haja relatos de casos isolados e não plenamente desenvolvidos desde, pelo menos, o século XIX. No começo do século XX há registros de que a *British Statistical School* tenha desenvolvido experimentos simples para fins demonstrativos a seus estudantes. Em 1908 o estatístico britânico *Student* (codinome de William Sealy Gosset) utilizou amostragem experimental em auxílio de sua descoberta da distribuição do coeficiente de correlação. Aparentemente ele já conhecia alguns dos momentos da distribuição, seja com base na amostragem experimental ou através do *Occam's razor*, princípio atribuído ao inglês franciscano William de Occam, que viria a revolucionar a ciência através da busca da simplicidade, que diz que “as entidades não devem ser multiplicadas além do necessário” (TORNAY, 1938). Assim, a forma analítica da distribuição deveria ser uma das curvas de frequência de Pearson, onde r equivale ao coeficiente de correlação e α e β são constantes que dependem do tamanho da amostra n , conforme a equação 10.

$$(1 - \alpha r^2)^\beta \tag{10}$$

Ao considerar o número de amostras como 4 e 8 para esta expressão, e tendo arredondado os resultados das estimativas de α e β para 1 e $\frac{1}{2}(n - 4)$, ele obteve o mesmo resultado que o teórico, feito único até então. No mesmo ano *Student* utilizou a amostragem para reforçar sua fé na então chamada distribuição-t, que ele havia somente derivado de uma análise teórica inconsistente e incompleta.

Uma consequência deste papel didático e verificador dos experimentos com amostragem foi que estes foram deliberadamente despojados de incrementos que causavam distração, empregando maior atenção ao refinamento e acurácia dos resultados. Estatísticos insistiram que outros experimentalistas deveriam criar experimentos em que a sujeição ao erro indesejados fosse a mínima possível, e ainda prestaram grande auxílio a eles neste sentido (embora em seus próprios experimentos fossem ineficientes, quiçá negligentes, neste aspecto).

O uso real dos métodos de Monte Carlo como uma ferramenta de pesquisa deriva do trabalho sobre as bombas atômicas desenvolvido durante a segunda guerra mundial. Este trabalho envolveu uma simulação direta dos problemas probabilísticos relativos à difusão aleatória dos nêutrons no material passível de fissão. Entretanto, mesmo nos primeiros estágios desta investigação, von Neumann e Ulam refinaram esta simulação direta através de certas técnicas de redução de variância, em particular a “roleta russa” e o “quarteamento”. Finalmente, o desenvolvimento sistemático destas ideias teve que esperar o trabalho de Harris e Herman Kahn em 1948.

A possibilidade de aplicação dos métodos de Monte Carlo para problemas determinísticos foi percebida por Fermi, von Neuman e Ulam, e foi imediatamente popularizada por eles nos anos pós-guerra. Por volta de 1948 Fermi, Metropolis e Ulam obtiveram estimativas de Monte Carlo para os autovalores da equação de Schrödinger. Dr. Stephen Brush (*Radiation Laboratory*, em Livermore), que possuía um interesse particular na história da matemática, desenterrou uma publicação de Kelvin onde, setenta anos antes, impressionantes técnicas de Monte Carlo surgiram em uma discussão acerca da equação de Boltzmann. Entretanto, Lord Kelvin estava mais preocupado com os resultados que com o método (para ele, óbvio), de modo que pareceu correto que Ulam, von Neumann e Fermi não só recebessem o crédito pela redescoberta dos métodos de Monte Carlo, mas também por garantir que seus colegas cientistas tomassem consciência de suas possibilidades, potencialidades e aplicações físicas (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964).

Capítulo 3

O principal objetivo deste estudo é verificar a aderência da regra de Taylor e das demais metodologias clássicas de obtenção de vida útil e taxa de produção ideais para a realidade brasileira e, a depender dos resultados, desenvolver alternativas que porventura sejam mais eficientes e apresentem maior aderência que as existentes.

O estudo toma por base um banco de dados que contém informações oficiais de minas que apresentem, para determinado ano, no mínimo, reservas minerais e taxa de produção de um determinado bem mineral. Este banco de dados passa por uma triagem inicial para excluir eventos em que a reserva ou a taxa de produção declarada no referido ano são nulas ou não foram informadas.

Em seguida, as equações clássicas são confrontadas com o banco de dados, de modo que possibilite avaliar a aderência destas metodologias consagradas às minas em operação no Brasil ao longo do período estudado. De posse desses valores, foram buscados meios de obter resultados mais robustos através da proposição de novas equações, que apresentaram soluções ótimas e aderência máxima a cada cenário proposto. Visando uma avaliação mais abrangente, os dados foram analisados de forma integral e segmentados de diversas maneiras, como por substância mineral, taxa de produção e método de lavra. Essa segmentação pretende conferir maior aderência a determinadas situações com certos tipos de depósitos ou substâncias, principalmente aqueles depósitos de grandes dimensões que fogem da realidade dos demais.

3 BANCO DE DADOS E ADERÊNCIA DAS METODOLOGIAS CLÁSSICAS

O ponto de partida consiste na aquisição de um banco de dados que forneça de forma detalhada e representativa as informações necessárias ao estudo. Foi obtido junto à Agência Nacional da Mineração (ANM, antigo Departamento Nacional de Produção Mineral) dados contendo registros do Relatório Anual de Lavra (RAL) referente ao período compreendido entre 2010 e 2015, sem referência nominal às minas em operação ou não (visto que estes dados são sigilosos) em cada ano-base. Na base de dados constam elementos como a produção anual (Run of Mine, ROM), as reservas medidas, indicados e inferidos, a expectativa da vida útil restante da mina, o método de lavra, o minério lavrado, dentre outras.

3.1 BANCO DE DADOS

O banco de dados possui 53.524 processos codificados, que resultaram em 321.138 dados de produção anual e reservas, sendo daqui por diante considerados como **eventos**, de modo semelhante ao definido por Long em 2009; isso significa que uma mesma mina pode possuir diversos eventos, caso haja informações de reservas e ROM em anos distintos. Foram efetuadas diversas triagens no banco de dados, visando eliminar eventos que poderiam influenciar a análise, produzindo viés. Foram excluídos os eventos em que a reserva total não foi informada (163.425), além dos que possuíam reservas totais inferiores a 10.000 toneladas (971), visto que em boa parte destes estava claro que os dados eram imprecisos, e foi preferível a sua exclusão que a adição de viés ao banco de dados. Aqueles cuja taxa de produção foi declarada no ano base como não informada (98.596) ou nula (22.983), talvez pela paralização do empreendimento) também foram excluídos; eventos cuja produção anual declarada foi inferior a 100.000 toneladas (28.117) foram também desconsiderados, visto que minas de pequeno porte (conforme classificação da tabela 4) não são o foco do estudo. Após a seleção dos dados, restaram 7.946 eventos, que foram considerados dentro do intervalo de interesse da análise (MARIZ; PERONI, 2018a, 2018b).

Tabela 4 - Classificação das minas quanto ao porte em função da produção.

Porte das minas	Classe	Maior que (t/ano)	Menor que (t/ano)
Grandes	G2	3.000.000	-----
	G1	1.000.000	3.000.000
	M4	500.000	1.000.000
Médias	M3	300.000	500.000
	M2	150.000	300.000
	M1	100.000	150.000
	P3	50.000	100.000
Pequenas	P2	20.000	50.000
	P1	10.000	20.000

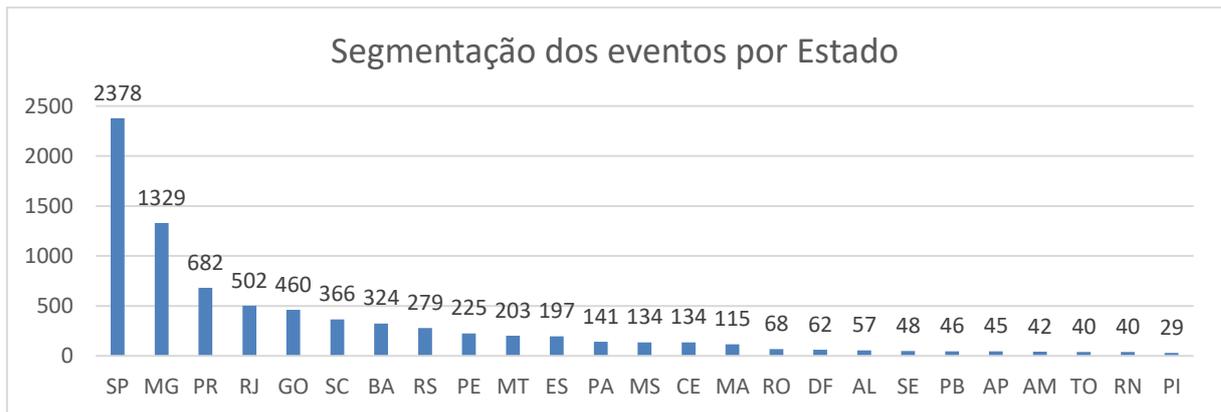
Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

As figuras 3 a 8 apresentam mais informações acerca das minas. Conforme mencionado, serão considerados recursos totais como o somatório dos recursos medidos e indicados, sendo os inferidos desconsiderados, ao passo que a produção fornecida em cada evento será dividida por 350 para a determinação da produção diária, tal qual a metodologia

desenvolvida por Camm (1991) e utilizada por todos os autores subsequentes a ele (MARIZ; PERONI, 2018a).

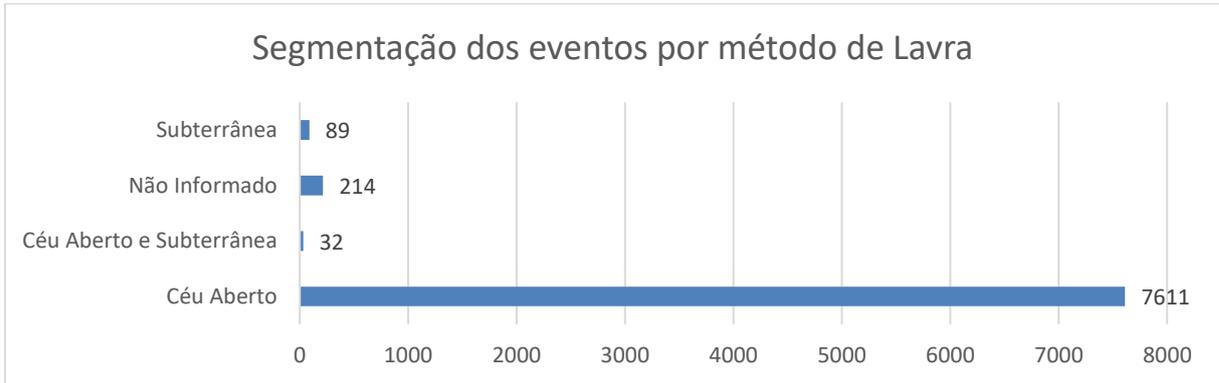
A análise dos eventos através dos seus Estados de origem revela a absoluta preponderância dos Estados de São Paulo e Minas Gerais em números de eventos que, juntos, apresentaram 46,65% dos dados ao somarem 3.707 dos 7.946 totais. Os dez estados que apresentaram maior número de eventos foram São Paulo (2.378), Minas Gerais (1.329), Paraná (682), Rio de Janeiro (502), Goiás (460), Santa Catarina (366), Bahia (324), Rio Grande do Sul (279), Pernambuco (225) e Mato Grosso (203), que juntos apresentaram 6.748 eventos (ou seja, minas que declararam produção maior que 100.000 toneladas em determinado ano base), abrangendo 84,92% dos dados, conforme a figura 3.

Figura 3 - Segmentação dos eventos por Estado.



Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

Quanto aos métodos de lavra aplicados, é notório que a maioria das minas do Brasil são lavradas a céu aberto; dentre os eventos considerados, 95,78% são minas lavradas a céu aberto, 1,12% são subterrâneas, 0,4% são minas lavradas através de métodos subterrâneos e a céu aberto e 2,69% das minas são eventos sem informação, conforme a figura 4.

Figura 4 - Segmentação dos eventos por método de lavra.

Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

O somatório das produções (ROM) destes 7.946 eventos selecionados e distribuídos nestes seis anos equivale a 9,382 bilhões de toneladas. Somente o estado de Minas Gerais contribuiu com 43,06% deste montante. Se forem considerados os quatro estados que mais produziram neste intervalo, que são Minas Gerais, Pará, São Paulo e Goiás, verifica-se que 78,23% do minério processado no País é oriundo destas quatro unidades federativas, conforme a figura 5.

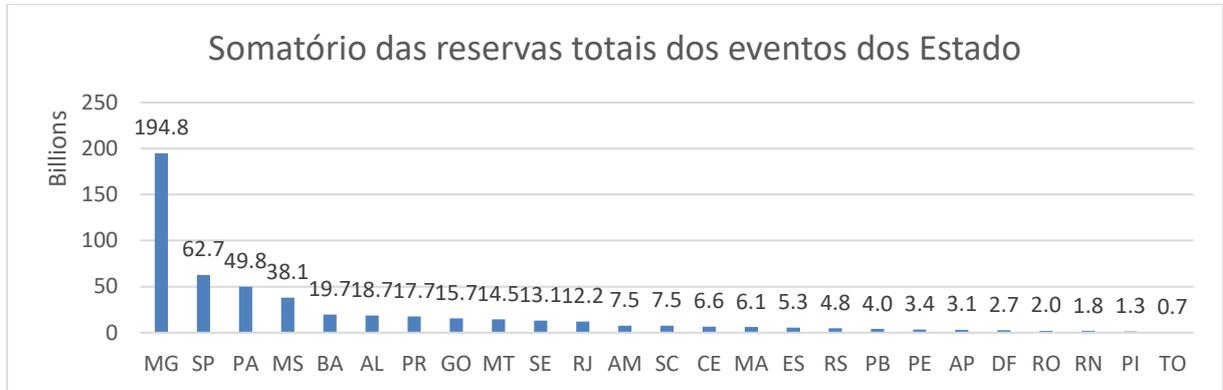
Figura 5 - Somatório da produção total dos eventos dos 16 Estados mais relevantes.

Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

Por sua vez, o somatório dos recursos medidos e indicados deste conjunto de eventos equivale a 513,645 bilhões de toneladas. Mais uma vez o estado de Minas Gerais se destaca, apresentando 37,93% dos recursos conhecidos, ao passo que o somatório dos quatro estados mais relevantes, que neste caso são Minas Gerais, São Paulo, Pará e Mato Grosso do Sul, representam 67,24% dos recursos apresentados nestes seis anos. Vale salientar que os valores absolutos da figura 6 naturalmente contém certo viés, visto que os recursos de uma mina

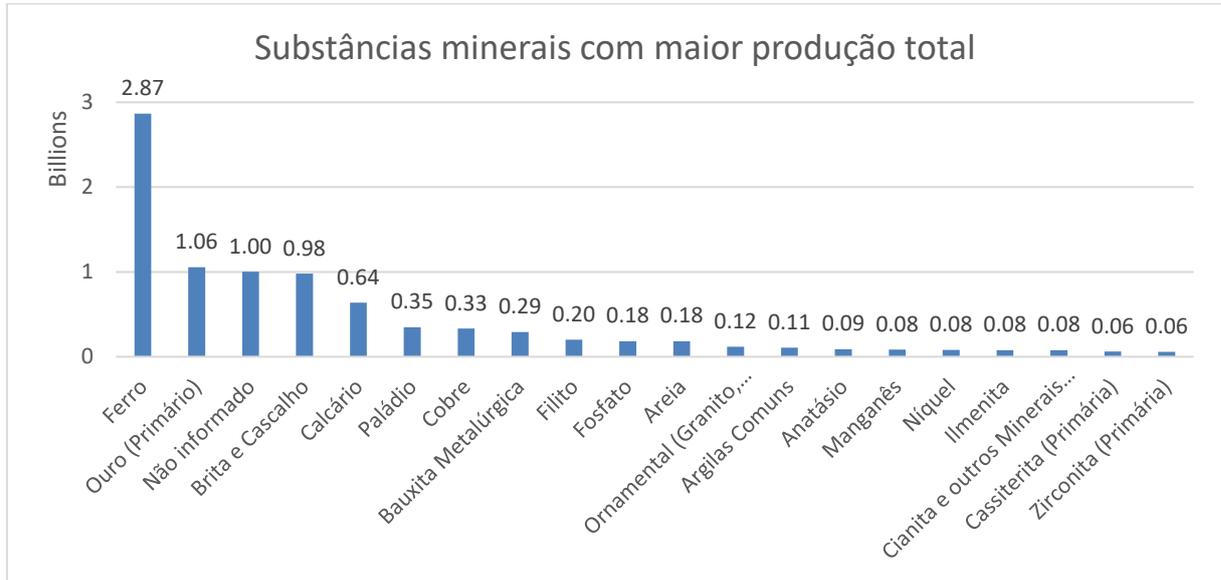
podem ter sido replicados até seis vezes, caso o preenchimento do RAL tenha atendido a todas as restrições consideradas.

Figura 6 - Somatório das reservas totais dos eventos por Estado.



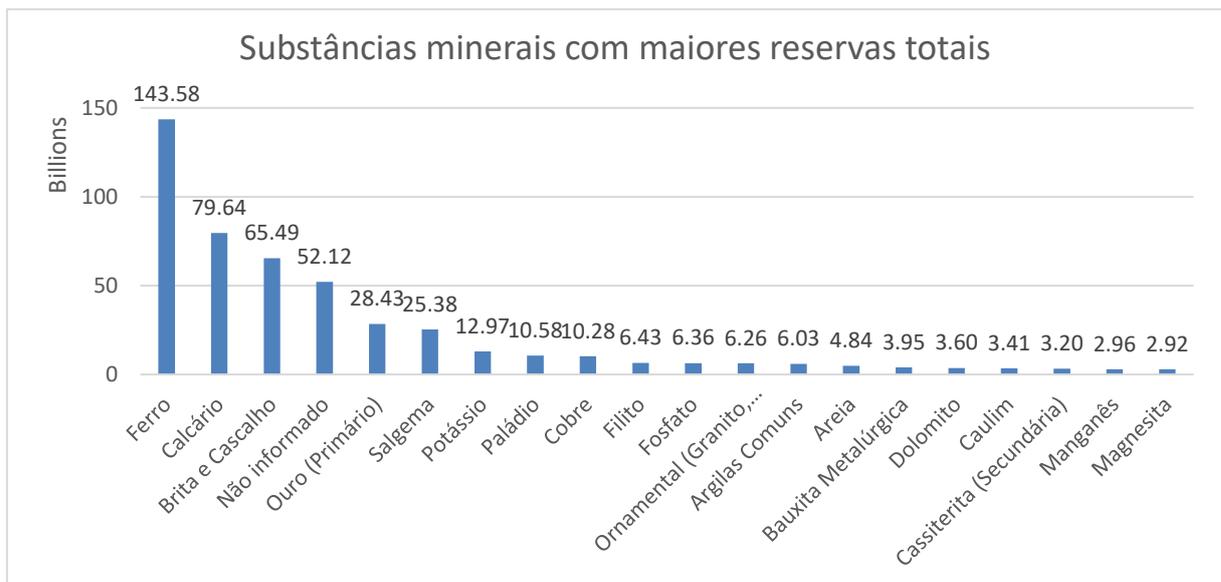
Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

A figura 7, por sua vez, apresenta as 20 substâncias minerais com maior produção declarada dentre os eventos selecionados. Dentre os 9,382 bilhões de toneladas produzidas no período, o minério de ferro se destaca com 30,59% do total. As minas que têm ouro como produto principal apresentaram, por sua vez, 11,30% da produção. Por consequência de um preenchimento pouco criterioso dos Relatórios Anuais de Lavra, 10,66% do montante produzido não informava acerca da substância mineral produzida. Os minerais industriais, por sua vez, apresentam relevância no cenário nacional, onde a brita e o cascalho, juntos, apresentaram 10,45% e o calcário apresentou 6,82% do total. Portanto, se forem somados o minério de ferro, ouro primário, brita e cascalho com o calcário, será verificada a relevância de 59,16% da produção nacional neste período, dadas as restrições consideradas.

Figura 7 - Substâncias minerais com maior produção total.

Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

Tal qual na figura 6, a figura 8 apresenta dados sobre as reservas, embora parte das minas tenha sido computada tantas vezes quanto se enquadraram às restrições nos RALs destes seis anos. Ainda assim é possível verificar a predominância das jazidas de ferro (27,95%), de calcário (15,50%) e de brita e cascalho (12,75%) que, juntas, representam 56,20% das reservas computadas neste estudo.

Figura 8 - Substâncias minerais com maiores reservas totais.

Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

A tabela 5 é um compêndio onde cada substância mineral presente neste estudo foi subdividida por porte do empreendimento (conforme tabela 4, onde M = Médio porte e G = Grande porte) e método de lavra (OP = Lavra a céu aberto e UG = Lavra subterrânea); os 1.894 eventos cujas substâncias minerais não foram identificadas nos RALs não estão presentes, visto que não faz sentido efetuar nenhuma avaliação individual nestes eventos.

Tabela 5 - Eventos subdivididos em substância mineral, porte e método de lavra.

Substância	Minas OP		Minas UG		Minas OP e UG		Não Informado		Soma
	M	G	M	G	M	G	M	G	
Agalmatolito	3	0	0	0	0	0	0	0	3
Anatásio	0	6	0	0	0	0	0	0	6
Ardósia	7	0	0	0	0	0	0	0	7
Areia Industrial	94	11	0	0	0	0	5	0	110
Areia	614	19	0	0	0	0	6	0	639
Argila Refratária	97	1	0	0	0	0	1	0	99
Argilas Comuns	276	7	1	3	0	0	43	7	337
Argilas Plásticas	47	0	0	0	0	0	8	0	55
Barita	1	3	0	0	0	0	0	0	4
Bauxita Metalúrgica	76	26	0	0	0	0	3	0	105
Bauxita Refratária	10	0	0	0	0	0	7	0	17
Bentonita e Argilas Descorantes	5	0	0	0	0	0	0	0	5
Brita e Cascalho	1941	170	0	0	0	0	1	0	2112
Calcário	625	152	1	0	0	0	5	4	787
Calcita	10	0	0	0	0	0	1	0	11
Carvão Mineral	48	7	7	2	0	0	7	4	75
Cassiterita (Primário)	15	6	0	0	0	0	1	0	22
Cassiterita (Secundário)	25	4	0	0	0	0	0	0	29
Caulim	29	11	0	0	0	0	10	0	50
Cianita e Outros Refratários	0	6	0	0	0	0	0	0	6
Cobalto	3	7	7	0	0	0	0	0	17
Cobre	8	30	5	0	4	2	0	0	49
Conchas Calcárias	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Criolita	0	6	0	0	0	0	0	0	6
Crisotila	0	6	0	0	0	0	0	0	6
Cromo	9	0	0	0	0	0	1	5	15
Dolomito	76	5	0	0	0	0	12	0	93
Enxofre	0	0	0	6	0	0	0	0	6
Feldspato	4	6	0	0	0	0	0	0	10
Ferro	137	232	0	0	0	0	0	0	369
Filito	17	0	0	0	0	0	4	8	29
Fosfato	30	25	0	0	0	0	0	0	55

Substância	Minas OP		Minas UG		Minas OP e UG		Não Informado		Soma
	M	G	M	G	M	G	M	G	
Gemas (Primária)	0	0	0	0	6	0	0	0	6
Gipsita	70	0	0	0	0	0	0	0	70
Grafita	23	0	0	0	0	0	0	0	23
Ilmenita	2	6	0	0	0	0	0	0	8
Leucita e Nefelina-Sienito	5	0	0	0	0	0	0	0	5
Magnesita	15	6	0	0	0	0	0	0	21
Manganês	20	16	0	0	1	3	0	6	46
Mozanita	2	0	0	0	0	0	0	0	2
Níquel	5	23	4	0	3	0	0	0	35
Ornamental (Granito, Gnaiss e afins)	251	15	0	0	0	0	6	0	272
Ornamental (Mármore e afins)	4	5	0	0	0	0	0	0	9
Ouro (Primário)	34	45	12	6	13	0	16	10	136
Ouro (Secundário)	9	3	0	0	0	0	0	0	12
Outras Rochas Ornamentais	1	0	0	0	0	0	11	0	12
Paládio	0	0	0	0	0	0	0	6	6
Pirocloro	4	7	0	0	0	0	0	0	11
Potássio	0	0	0	6	0	0	0	0	6
Prata (Primário)	6	0	6	6	0	0	4	0	22
Quartzito Industrial	12	0	0	0	0	0	2	0	14
Quartzo Cristal	2	0	0	0	0	0	0	0	2
Quartzo	13	0	0	0	0	0	0	0	13
Saibro	83	6	0	0	0	0	2	0	91
Salgema	0	0	12	0	0	0	0	0	12
Serpentinito Industrial	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Talco	7	6	0	0	0	0	0	0	13
Tântalo (Columbita-Tantalita) Primário	8	0	0	0	0	0	0	0	8
Tungstênio	10	0	0	0	0	0	0	0	10
Turfa	0	8	0	0	0	0	8	0	16
Urânio	9	0	0	0	0	0	0	0	9
Vanádio	1	1	0	0	0	0	0	0	2
Vermiculita e Perlita	5	0	0	0	0	0	0	0	5
Zinco	1	0	5	0	0	0	0	0	6
Zirconio (Óxidos)	3	0	0	0	0	0	0	0	3
Zirconita (Primária)	2	6	0	0	0	0	0	0	8
Zirconita (Secundária)	2	0	0	0	0	0	0	0	2
Soma	4818	899	60	29	27	5	164	50	6052

Fonte: Autor.

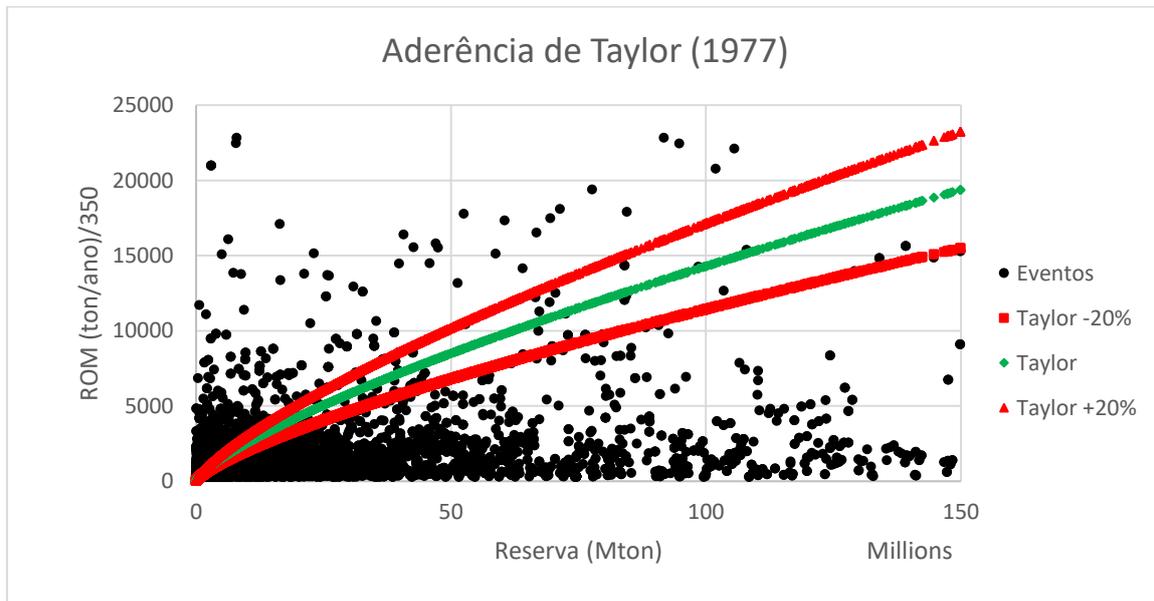
3.2 ADERÊNCIA DAS METODOLOGIAS CLÁSSICAS AO BANCO DE DADOS

Após a definição dos parâmetros restritivos e a análise qualitativa dos 7.946 eventos restantes, fez-se necessária a avaliação do desempenho das metodologias presentes na literatura para os dados estudados. Como supracitado, os recursos considerados em cada evento são a soma dos recursos medidos e indicados. A produção total de cada evento, por sua vez, foi dividida por 350 dias por ano, tal qual definido em Camm (1991) e utilizado em todos os estudos anteriores, possibilitando assim a efetiva avaliação da aderência das equações clássicas aos dados. A aderência foi verificada evento por evento de forma binária, onde a inserção da taxa de produção declarada nas equações de 1 a 9 poderia resultar em uma reserva coincidente com a declarada naquele evento (caso positivo) ou não (caso negativo). Foi considerada ainda a tolerância de 20% para mais ou para menos no enquadramento desta reserva. Quanto às segmentações efetuadas por método de lavra, como nunca existiu um estudo efetuado somente em minas lavradas simultaneamente através dos dois métodos, os eventos que possuem estas características foram agrupados junto aos demais (céu aberto ou subterrâneos) em diferentes circunstâncias para cada análise efetuada.

A metodologia desenvolvida por Taylor (1977) é largamente utilizada por profissionais do planejamento de lavra e seus resultados são considerados parâmetro de referência para definição de vida útil e taxa de produção no início de uma análise econômica de um depósito mineral. Entretanto, dentre o total de dados analisados (7.946 eventos), somente 781 eventos (9,83%) foram enquadrados no intervalo de tolerância. Este resultado indica a baixa aderência da equação original ao panorama nacional. O gráfico da figura 9 apresenta o enquadramento das produções reais às linhas teóricas.

É possível visualizar que esta equação superestima a produção quando as reservas são muito grandes, de modo que poucas são as minas (e, conseqüentemente, os eventos) que conseguem manter semelhantes taxas de produção; outro fator a ser levado em consideração é que a metodologia subestima em demasia as taxas de produção quando as reservas são pequenas.

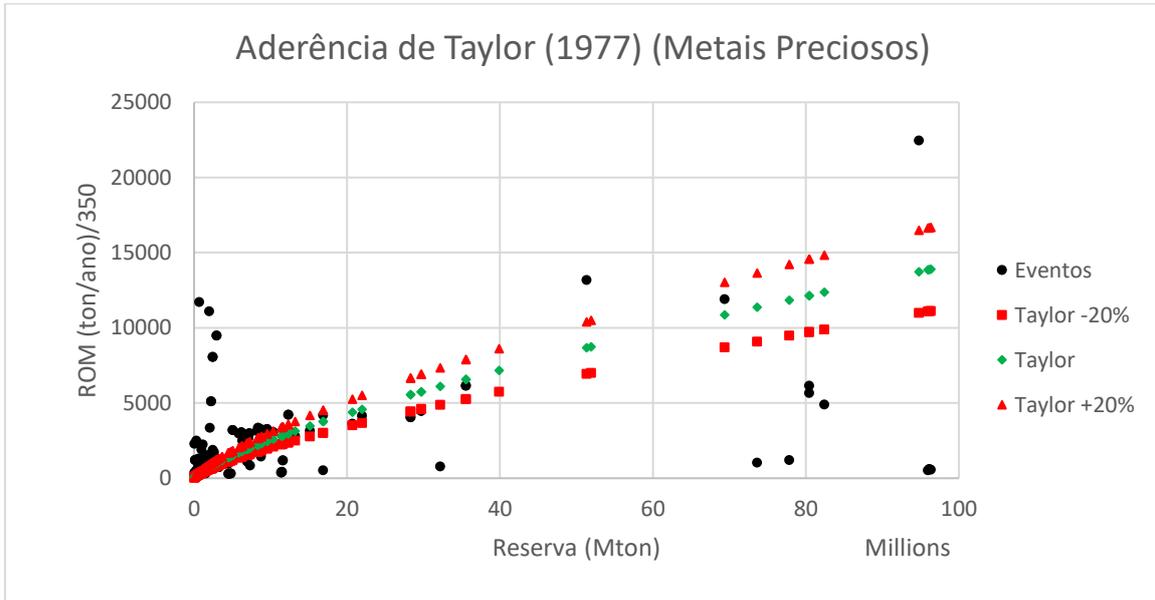
Figura 9 - Aderência de Taylor (1977) aos eventos.



Fonte: Autor.

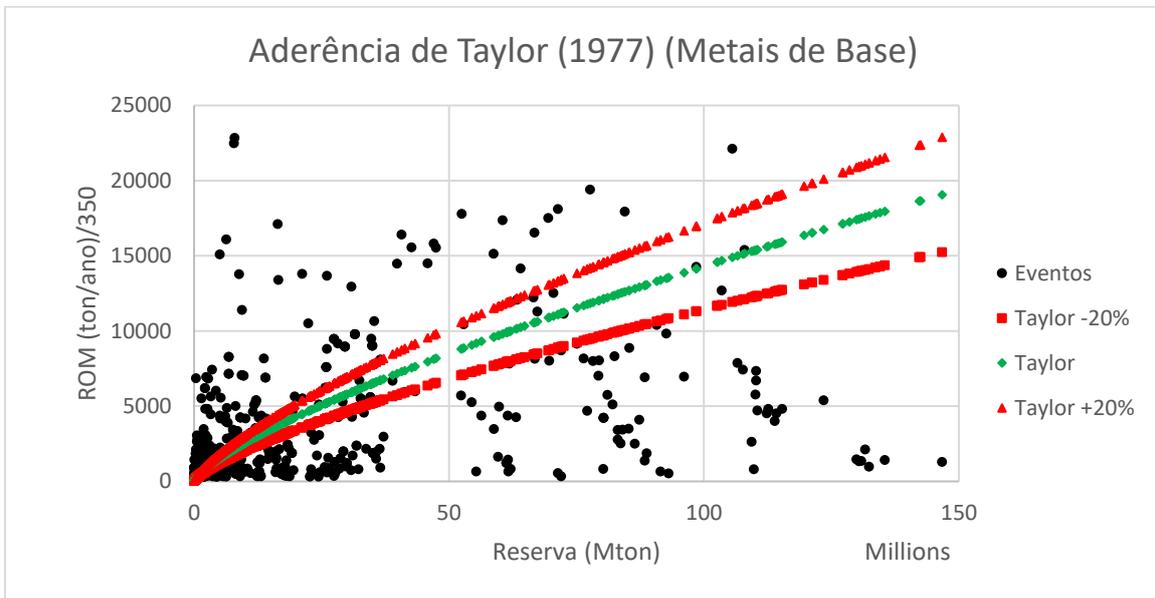
É provável, entretanto, que quando Taylor (1977) desenvolveu seu estudo ele não tenha considerado certas substâncias minerais, como agregados ou rochas ornamentais, dadas suas particularidades comerciais. Os agregados costumam ter seu mercado limitado às cidades circunvizinhas, ao passo que as rochas ornamentais são influenciadas pela moda, sendo a comercialização dos minerais produzidos nestes casos regida por fatores distintos dos metais que são cotados na bolsa de valores, por exemplo. Portanto, foi proposta uma avaliação da regra de Taylor (TAYLOR, 1977) para os metais preciosos, como ouro, prata e platinóides, e outra nos metais de base, como alumínio, bismuto, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, manganês, molibdênio, nióbio, níquel, tântalo, titânio, tungstênio e zinco (MOORS et al, 2005; ASME, 2015), sendo que alguns destes não possuem representantes dentre os dados. As figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos conforme Taylor (1977) para os metais preciosos e metais de base presentes nos dados, onde a aderência obtida foi 16,48% e 11,43%, resultados considerados insatisfatórios para a aplicação do método ao panorama nacional.

Figura 10 - Aderência de Taylor (1977) aos eventos contendo metais preciosos.



Fonte: Autor.

Figura 11 - Aderência de Taylor (1977) aos eventos contendo metais de base.

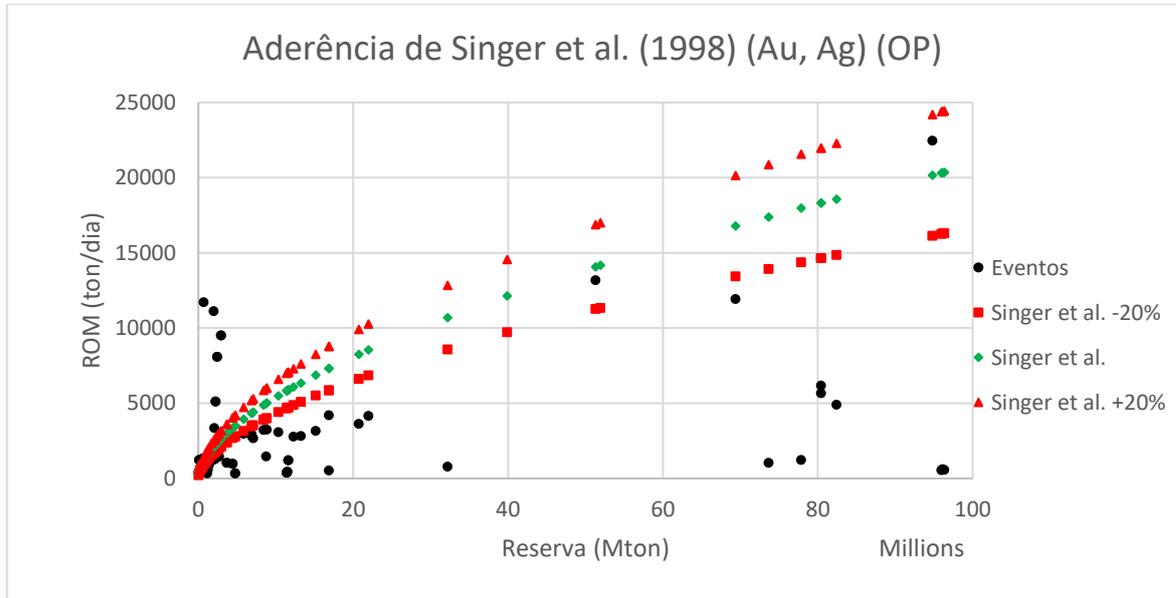


Fonte: Autor.

A equação elaborada por Singer et al. (1998) foi desenvolvida através de um estudo em minas de ouro e prata a céu aberto. Destarte, foram consideradas as substâncias minerais ouro primário, ouro secundário e prata primária na composição dos gráficos das figuras 12 e 13. Ao ser aplicada em eventos lavrados a céu aberto, a equação aderiu somente a 9,28% dos dados, ao passo que quando houve a inclusão das minas lavradas concomitantemente a céu

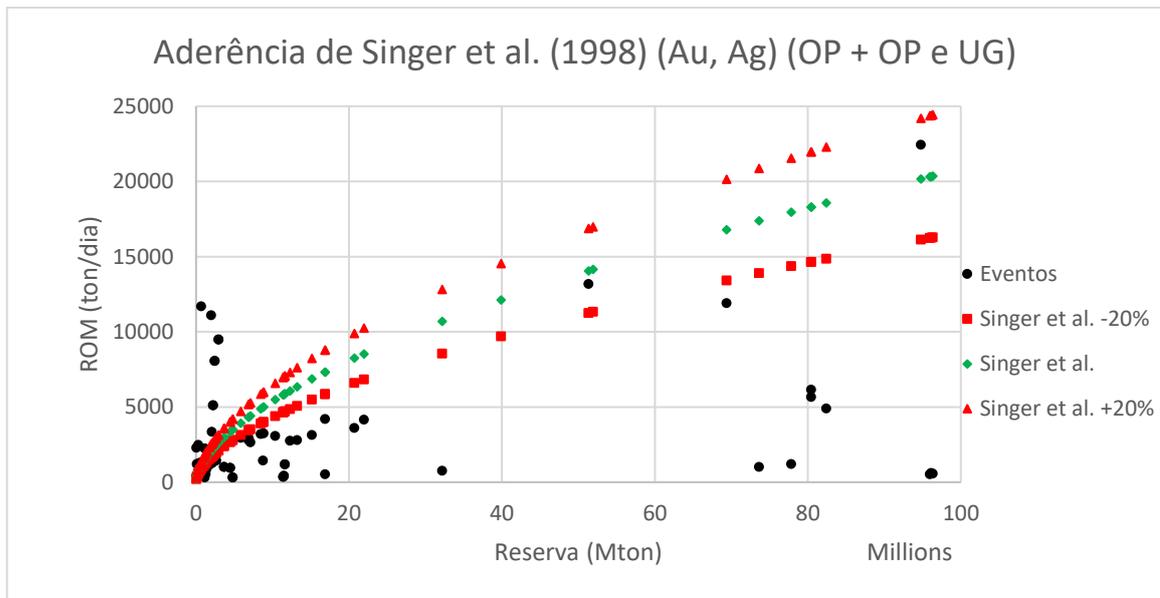
aberto e através de métodos subterrâneos, a aderência equivaleu a 10,91%, sendo baixa em ambos os casos.

Figura 12 - Aderência de Singer et al. (1998) aos eventos contendo ouro e prata lavrados a céu aberto.



Fonte: Autor.

Figura 13 - Aderência de Singer et al. (1998) aos eventos contendo ouro e prata lavrados a céu aberto somados aos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos.



Fonte: Autor.

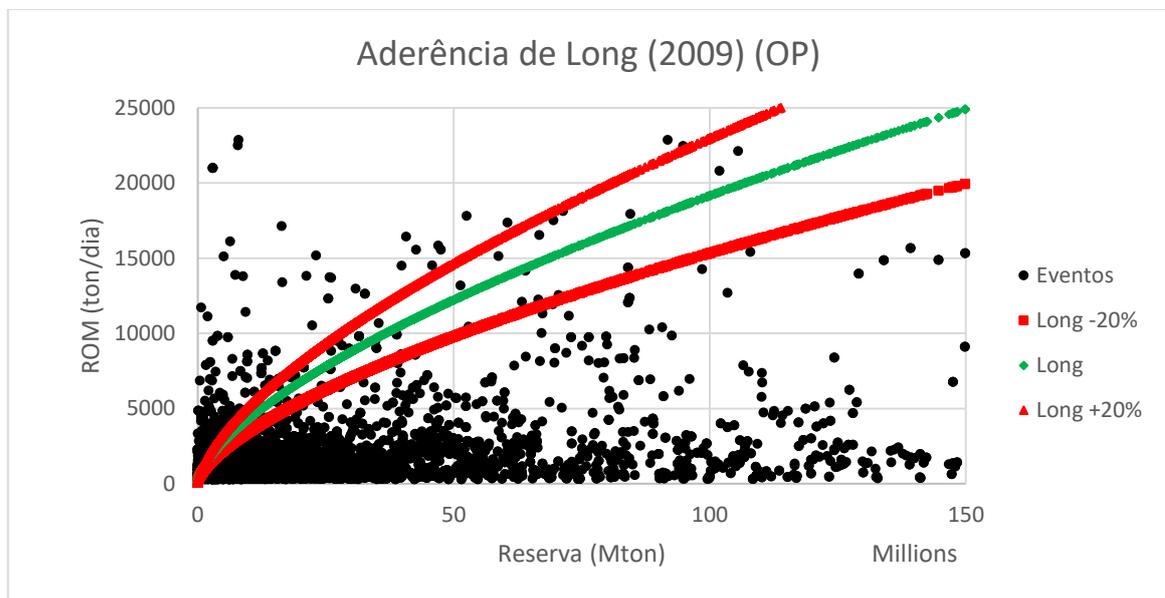
Long (2009), por sua vez, efetuou seu estudo principalmente em minas de ouro, prata, chumbo e zinco, considerando 539 minas em diversos países, subdivididas em 342 a céu

aberto e 197 minas subterrâneas, produzindo 1.196 eventos. Desta forma, visto que o autor desenvolveu equações diferentes para minas a céu aberto (incluindo as lavradas através do método subterrâneo *block caving*) e minas subterrâneas (excluídas as *block caving*), os eventos foram subdivididos de acordo com seus métodos de lavra. Como não havia informações suficientes para averiguar que uma mina lavrada em subsolo corresponderia ao método *block caving* ou não, a subdivisão foi efetuada somente em métodos a céu aberto e subterrâneos. Foram analisados individualmente os eventos lavrados a céu aberto e em subsolo, sendo avaliada também a adição em cada cenário dos eventos lavrados simultaneamente através dos dois métodos.

Além das restrições ao método de lavra, foram abordados cenários onde todas as substâncias minerais foram incluídas indistintamente ou somente as substâncias estudadas por Long (2009), cujas principais são ouro, cobre, zinco e o chumbo. Dentre as 539 minas estudadas pelo autor, 319 (59%) eram minas de ouro, 125 (23%) eram de cobre e 62 (12%) eram minas de zinco e chumbo, de modo que estes quatro elementos representam 94% das minas presentes em seu estudo, justificando assim uma análise neste estudo sob esta perspectiva.

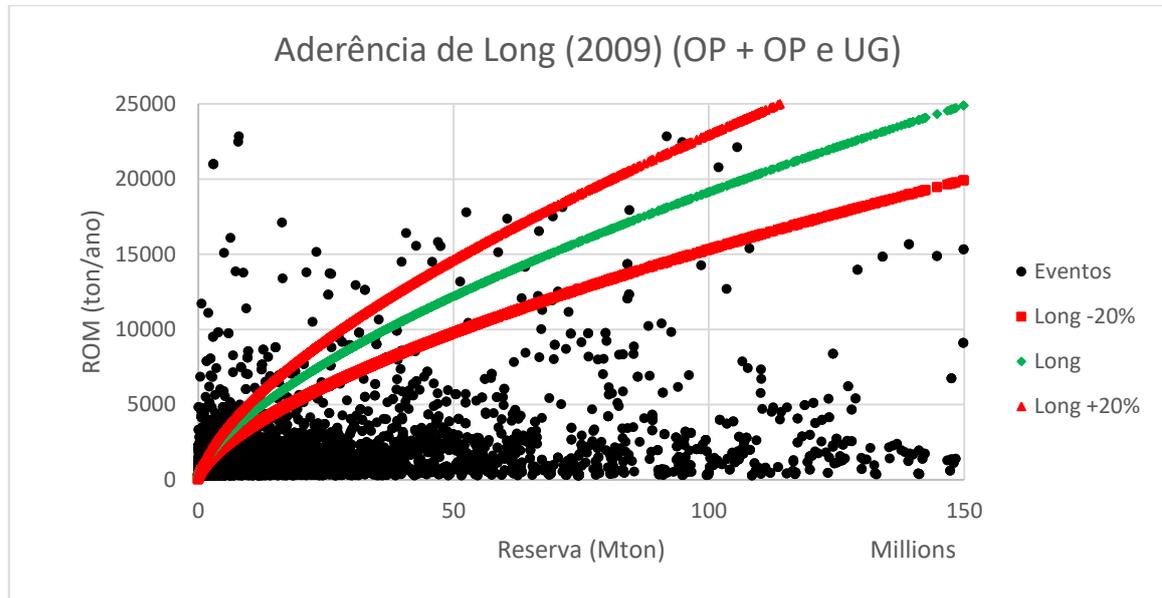
A figura 14 apresenta o gráfico da aderência de Long (2009) aos eventos a céu aberto considerando todas as substâncias minerais, ao passo que a figura 15 aplica sua equação à união dos eventos lavrados a céu aberto com os lavrados a céu aberto e em subsolo, também sem fazer nenhuma restrição quanto às substâncias.

Figura 14 - Aderência de Long (2009) aos eventos lavrados a céu aberto.



Fonte: Autor.

Figura 15 - Aderência de Long (2009) aos eventos lavrados a céu aberto somados aos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos.



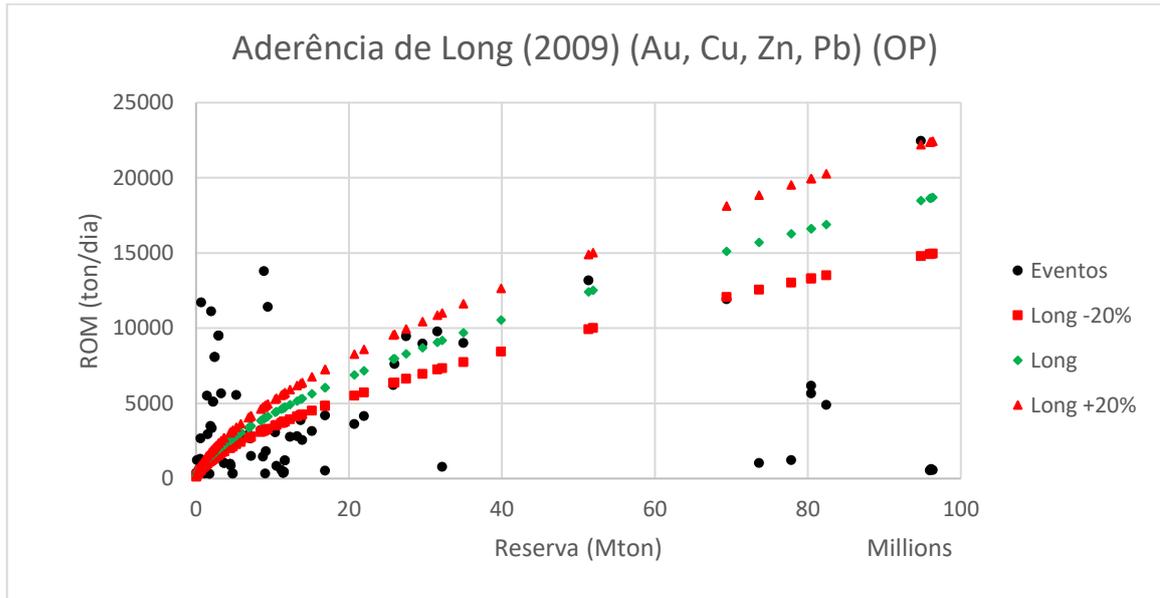
Fonte: Autor.

Conforme já apresentado inicialmente na figura 2, as equações de Long (2009) para minas a céu aberto e de Singer et al. (1998) preveem taxas de produção ainda maiores que a equação de Taylor (1977) para minas que possuem abundância de recursos, de modo que a porção direita dos gráficos destas metodologias apresentam ainda menos eventos enquadrados que seu antecessor. Dentre os 7.611 eventos considerados no caso exposto na figura 14, houve a aderência de 508, equivalendo a 6,67%; por sua vez, dentre os 7.643 eventos considerados no caso apresentado na figura 15, 517 foram enquadrados, atingindo 6,76%. Estes resultados novamente indicam uma baixa aderência dos métodos de estimativa de produção perante o conjunto de dados, sendo inferiores até que os obtidos através da regra de Taylor (TAYLOR, 1977).

Ao avaliar os cenários com segmentação quanto à substância mineral e o método de lavra, foi verificado que dentre os 130 eventos a céu aberto que apresentavam lavra de ouro, cobre, zinco ou chumbo (este sem nenhum representante), 36 apresentaram aderência à equação de Long (2009) para minas a céu aberto. Este resultado representa 27,69% dos dados deste subconjunto que, desta feita, abrangeu mais de um quarto dos dados do domínio selecionado, embora seja um grupo restrito, como pode ser verificado na figura 16. Já o cenário que foi analisado com as mesmas substâncias minerais, mas onde houve a adição dos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos, contou com 149 dados, dos quais houve a aderência de 40 deles, concretizando assim 26,85% de convergência. Embora

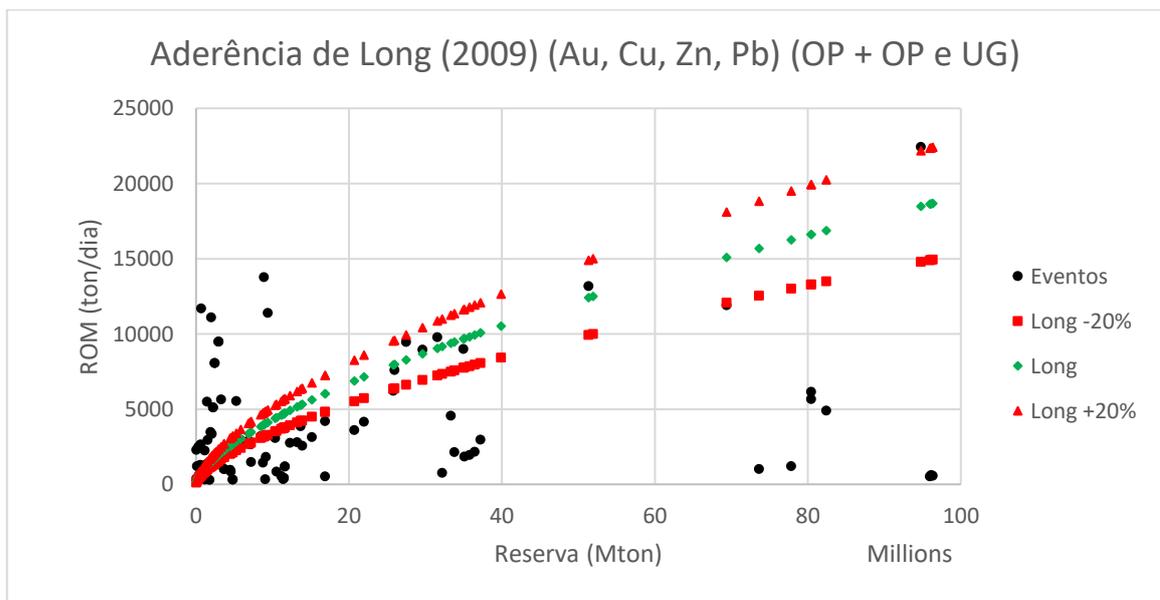
estes dois cenários tenham apresentado significativo acréscimo percentual em relação aos demais, a convergência de um quarto dos dados de um subgrupo que sequer contempla em torno de 2% dos 7.946 eventos não pode ser considerado um sucesso; a figura 17 apresenta este segundo cenário.

Figura 16 - Aderência de Long (2009) aos eventos contendo ouro, cobre, zinco e chumbo lavrados a céu aberto.



Fonte: Autor.

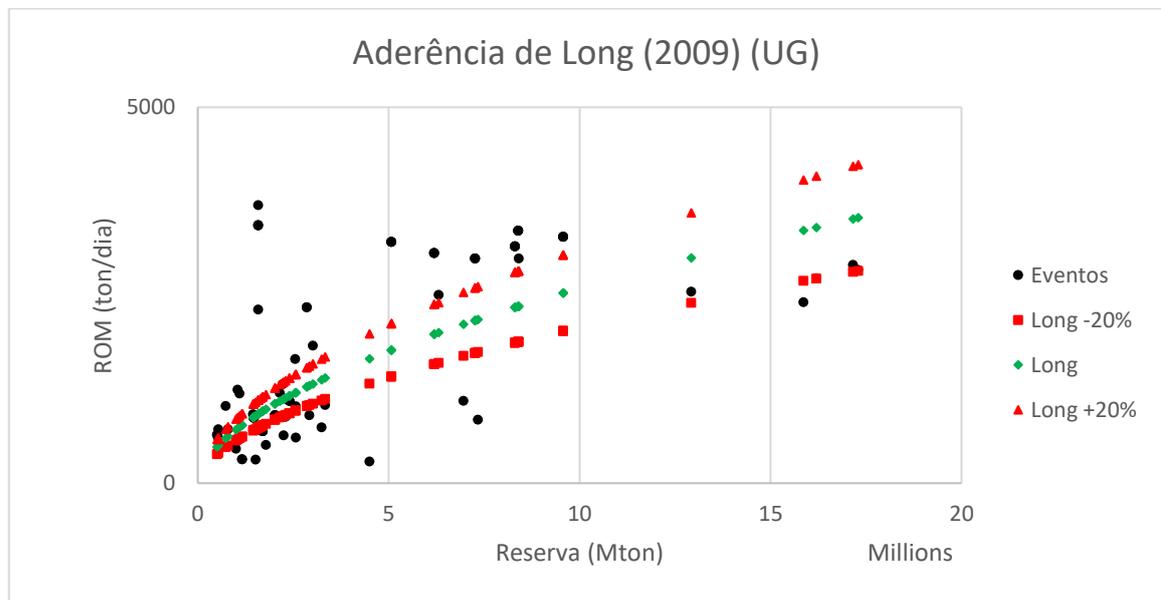
Figura 17 - Aderência de Long (2009) aos eventos contendo ouro, cobre, zinco e chumbo lavrados a céu aberto somados aos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos.



Fonte: Autor.

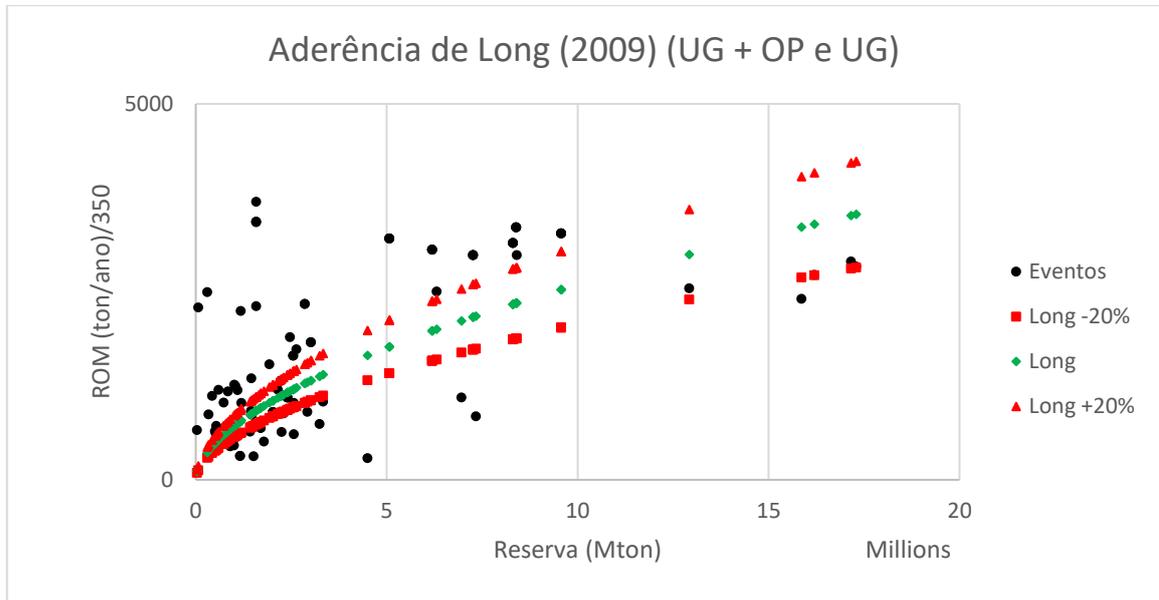
A restrição espacial de empreendimentos lavrados através de métodos subterrâneos resulta na impossibilidade de atingir a mesma taxa de produção de minas lavradas a céu aberto, de modo que a equação que Long (2009) desenvolveu para estas minas apresenta menor expansão da produção em função da reserva que as demais citadas neste tópico. Embora o Brasil possua poucas minas subterrâneas de relevância se comparadas às minas a céu aberto (pouco mais de 1% dos eventos deste estudo), dos 89 eventos subterrâneos contidos no banco de dados, houve a aderência de 18, equivalendo a 20,22%, como pode ser verificado no gráfico da figura 18. Por sua vez, dentre os 121 eventos lavrados através de métodos subterrâneos somados aos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos em concomitância, 25 eventos apresentaram-se dentro da margem de erro, representando 20,66% do subgrupo (figura 19). Ou seja, houve a aderência de pouco mais de um quinto dos dados à metodologia proposta em ambos os cenários, que consideraram pouco mais de 1% dos dados presentes no domínio do estudo, o que representa um resultado insatisfatório.

Figura 18 - Aderência de Long (2009) aos eventos lavrados em subsolo.



Fonte: Autor.

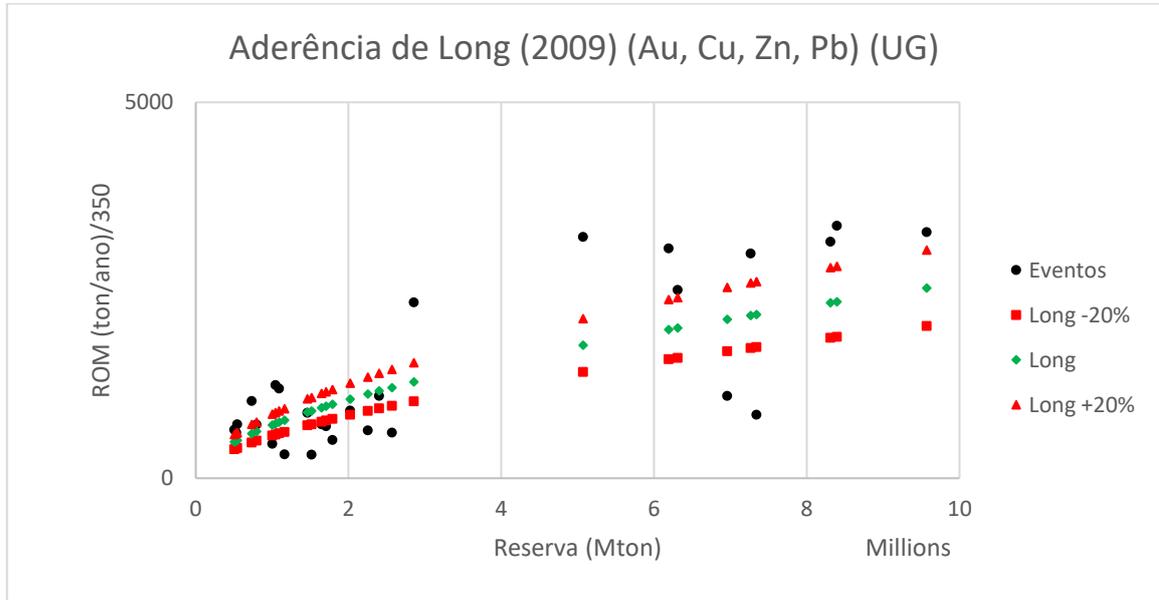
Figura 19 - Aderência de Long (2009) aos eventos lavrados em subsolo somados aos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos.



Fonte: Autor.

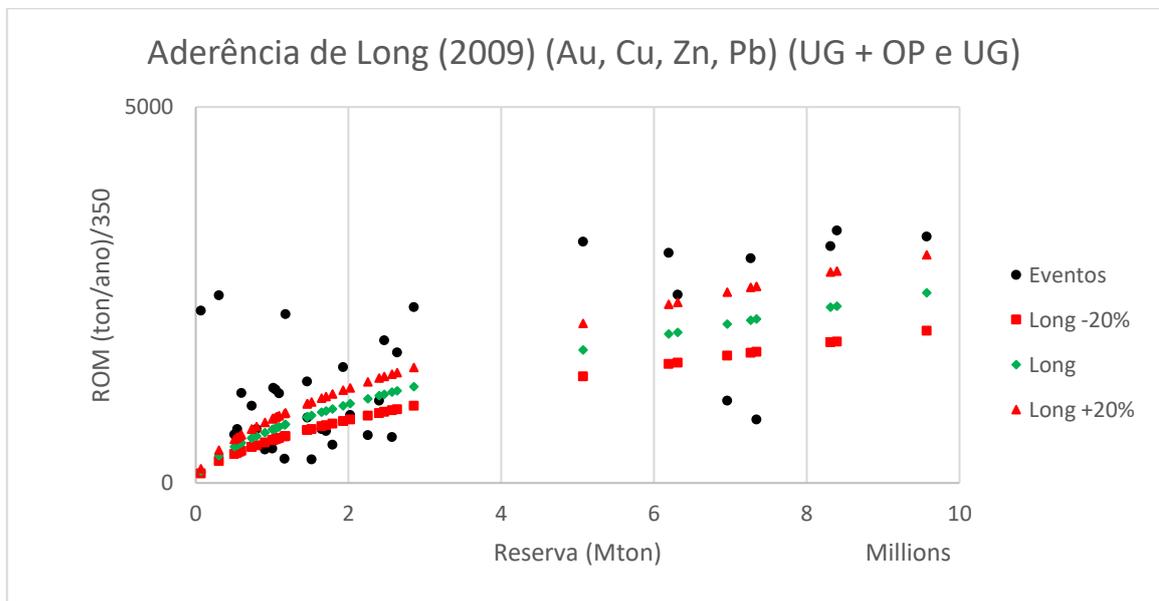
Os cenários com restrições quanto à substância mineral e o método de lavra apresentaram ainda resultados inferiores, onde foi verificado que dentre os 28 eventos lavrados através de métodos subterrâneos que apresentavam ouro, cobre, zinco ou chumbo (este sem nenhum representante), 4 apresentaram aderência à equação de Long (2009) para minas subterrâneas, representando assim 14,29% dos dados deste subconjunto, conforme figura 20. Já o cenário que foi analisado para as mesmas restrições, mas onde houve a adição dos eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos, contou com 47 dados, dos quais houve a aderência de 8 deles, concretizando assim 17,02% de convergência, conforme figura 21.

Figura 20 - Aderência de Long (2009) aos eventos contendo ouro, cobre, zinco e chumbo lavrados em subsolo.



Fonte: Autor.

Figura 21 - Aderência de Long (2009) aos eventos contendo ouro, cobre, zinco e chumbo lavrados em subsolo somados aos eventos mistos.



Fonte: Autor.

A tabela 6 apresenta a aderência que cada equação obteve nas diferentes segmentações aplicadas aos dados das minas brasileiras. Como o banco de dados não apresentava informações acerca da mineralogia dos depósitos lavrados, não foi possível aplicar as equações desenvolvidas por Singer et al. (2000) e por Long e Singer (2001), visto que a primeira avaliou depósitos sulfetados lavrados através de métodos subterrâneos e a segunda

foi desenvolvida para depósitos de cobre porfirítico lavrados a céu aberto. Não obstante, as demais equações foram verificadas e condensadas na tabela 6.

Tabela 6 - Aderências das metodologias clássicas ao banco de dados.

	Metodologia clássica	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência
1	Taylor (1977)	7.946	781	9,83%
2	Taylor (1977) (Metais preciosos)	176	29	16,48%
3	Taylor (1977) (Metais de base)	691	79	11,43%
4	Singer et al. (1998) (Au, Ag) (OP)	97	9	9,28%
5	Singer et al. (1998) (Au, Ag) (OP + OP e UG)	110	12	10,91%
6	Long (2009) (OP)	7.611	508	6,67%
7	Long (2009) (OP + OP e UG)	7.643	517	6,76%
8	Long (2009) (Au, Cu, Zn, Pb) (OP)	130	36	27,69%
9	Long (2009) (Au, Cu, Zn, Pb) (OP + OP e UG)	149	40	26,85%
10	Long (2009) (UG)	89	18	20,22%
11	Long (2009) (UG + OP e UG)	121	25	20,66%
12	Long (2009) (Au, Cu, Zn, Pb) (UG)	28	4	14,29%
13	Long (2009) (Au, Cu, Zn, Pb) (UG + OP e UG)	47	8	17,02%

Fonte: Adaptado de MARIZ; PERONI, 2018a.

Diante do exposto neste tópico, a maior taxa de convergência obtida por alguma destas metodologias foi pouco mais de 25%, e somente em um subgrupo restrito dos eventos a céu aberto. O subgrupo de eventos subterrâneos ainda atingiu aproximadamente 20% de aderência à equação proposta, ao passo que as demais tentativas obtiveram convergência menor que 20% dos dados. A partir dos resultados obtidos é possível concluir que a aderência apresentada pelos métodos presentes na literatura não é satisfatória para a realidade brasileira, sendo necessário buscar novos meios de obter resultados mais consistentes através da proposição de novas equações e/ou novas segmentações do banco de dados (MARIZ; PERONI, 2018a).

Capítulo 4

Considerando o exposto no capítulo anterior, onde ficou comprovada a baixa aderência das equações presentes na literatura aos dados trabalhados neste estudo, fez-se necessária a obtenção de uma ou mais equações que conduzam a uma melhor aderência aos cenários e segmentações propostos no domínio principal.

4 METODOLOGIA

Com o objetivo definido de obter novas equações que apresentem aderência máxima aos cenários propostos, este tópico visa discutir quais serão os meios de obtenção de cada coeficiente, os limites definidos para cada um deles, quando uma equação será considerada aceitável e, finalmente, a compilação destes resultados de acordo com as restrições propostas em cada cenário.

4.1 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE MONTE CARLO AO PROBLEMA

Conforme exposto anteriormente, as equações à disposição na literatura não apresentaram aderência satisfatória quando aplicadas aos dados estudados. A regra de Taylor (TAYLOR, 1977), a equação de Long (2009) considerando eventos a céu aberto e estes adicionados aos lavrados em subsolo e a céu aberto em concomitância, que foram as aplicações mais abrangentes do capítulo anterior, apresentaram aderência menor que 10%. Mesmo as aplicações a subconjuntos restritos (nenhuma delas trabalhou mais de 2% dos eventos) obtiveram, no máximo, a aderência de aproximadamente 25% do subdomínio. Destarte, é necessário buscar uma solução matemática (ou um conjunto delas) que possibilite estimar taxas de produção e vidas úteis de depósitos no Brasil com maior confiabilidade.

Como este é um problema onde as atenções estão voltadas somente para os dados de entrada (ROM e reservas de cada evento) e os de saída (os coeficientes das equações que proporcionarão aderência máxima a determinado cenário), não são levados em consideração a trajetória e o comportamento dos dados até que eles atinjam o resultado final, sendo uma característica marcante de um problema probabilístico que, sem dúvida, pode ser elucidado através de simulações de Monte Carlo.

4.2 APLICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO E BUSCA PELA EQUAÇÃO ÓTIMA GERAL

A regra de Taylor (TAYLOR, 1977) e seus estudos subsequentes têm por base a equação 11, onde $y(x)$ equivale à taxa de produção (toneladas ou toneladas curtas por dia) e x representa a massa do minério (milhões de toneladas ou de toneladas curtas).

$$y(x) = a * x^b \quad (11)$$

Uma alternativa de otimização desta família de equações sem que seja necessário modificar sua estrutura seria alterar somente os coeficientes a e b , tencionando o máximo enquadramento aos dados de um determinado cenário. No entanto, para que esta opção seja viabilizada, é necessário que a cada modificação em um dos coeficientes seja verificada e quantificada a convergência desta nova equação para os eventos presentes no cenário. Assim, ao passo que os dados de entrada das simulações de Monte Carlo consistem nos coeficientes da equação, cujo comportamento é regido pela distribuição estatística selecionada, a saída é representada pela aderência total dos eventos à nova equação. Esta aderência foi verificada individualmente de forma binária, onde cada evento era classificado como positivo caso a reserva declarada no evento, ao ser confrontada com os coeficientes propostos pela simulação na equação 11, resultasse na taxa de produção dividida por 350 (conforme Camm (1991)) ou dentro do intervalo de 20% para mais ou para menos. Caso o resultado da simulação para um determinado evento fosse uma taxa de produção fora deste intervalo de tolerância, o evento era classificado como negativo. As variáveis que, juntas, apresentaram maior aderência aos eventos de determinado cenário, foram então eleitas as mais representativas daquele cenário, compondo assim a equação “ótima” para um determinado conjunto de dados e condicionantes.

As ferramentas utilizadas nesta etapa foram o Microsoft Excel e o Risk Simulator 2017, software adquirido à Real Options Valuation Inc. e que foi o responsável pela aplicação das simulações de Monte Carlo ao problema estudado.

4.2.1 Critérios e simulações com dois coeficientes

Como é possível verificar na tabela 2, que apresenta os estudos sobre as estimativas das vidas úteis de minas e as equações desenvolvidas nestes, desde o pioneirismo de Taylor (1977) até a revisão de Long (2009), o coeficiente a variou entre 0,0143 e 0,4159, ao passo que o coeficiente b variou de 0,563 a 0,75. Entretanto, para que não fosse restringida qualquer

possibilidade de incrementar o resultado final das equações até que fosse atingida a aderência máxima aos dados em cada cenário, os limites para estes coeficientes foram largamente estendidos, permitindo que o coeficiente a assumisse valores entre 0,01 e 10 e o coeficiente b entre 0,25 e 1. Ou seja, através dos intervalos selecionados, a variação do coeficiente b pode produzir uma curva monotonicamente decrescente ou uma reta, nunca uma curva monotonicamente crescente, visto que reservas minerais são bens não renováveis e a taxa de produção não pode crescer exponencialmente de modo indefinido (MARIZ; PERONI, 2018a).

Após a definição dos limites dos coeficientes, as simulações de Monte Carlo foram efetuadas em conformidade com a distribuição estatística selecionada para cada coeficiente simulado. Há diferentes tipos de distribuição disponíveis no Risk Simulator 2017, onde cada um possui particularidades quanto à inserção dos limites, valores médios, etc. A distribuição selecionada para este problema foi a uniforme, que considera que todos os valores entre o mínimo e o máximo ocorrem com a mesma probabilidade, sendo os valores mínimo e máximo fixos. Portanto, qualquer valor intermediário dentre os selecionados como limites possuem igual probabilidade de serem selecionados em cada uma das simulações.

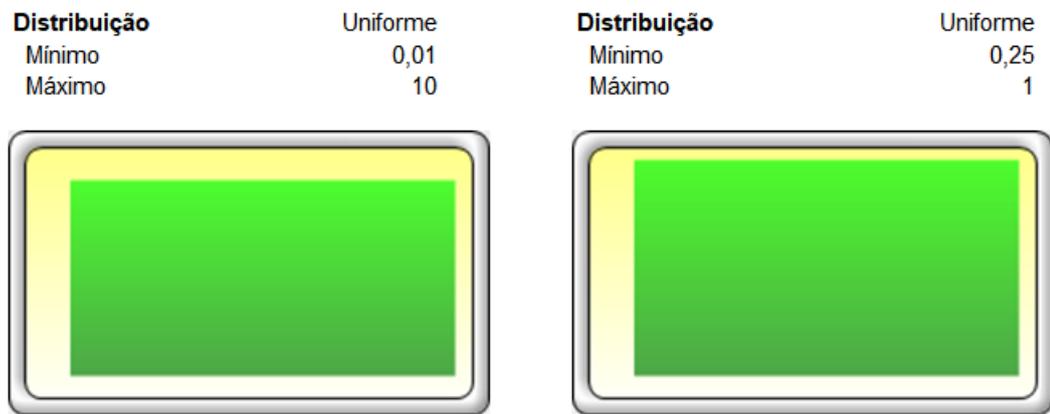
Como os limites adotados para os valores assumidos por estes coeficientes são amplos, fez-se necessária a execução de grande número de simulações que assegure a representatividade do método e não deixe dúvida quanto à sua completa abrangência. A maneira encontrada para que os conjuntos de coeficientes que apresentem as melhores aderências não passem despercebidos pelas simulações foi executá-las em conjuntos de 100.000 simulações. Caso a solução ótima (total aderência do modelo) não fosse obtida, um novo conjunto de 100.000 simulações deveria ser efetuado, sendo que os limites definidos para cada coeficiente simulado deveriam ser paulatinamente restringidos, sempre considerando os melhores resultados da simulação imediatamente anterior (neste estudo o mínimo de resultados levados em consideração foi de quatro conjuntos de coeficientes simulados). As simulações continuam em execução até que esta sequência produza um conjunto de coeficientes que apresente aderência máxima aos dados do domínio simulado ou até que dois conjuntos consecutivos de 100.000 simulações ofereçam resultados idênticos, ou até uma redução na convergência. Caso contrário, os limites eram revisados e a operação repetida.

Não obstante, este método não assegura que a almejada equação que apresente aderência a todos os eventos seja sempre obtida, visto que estes podem estar dispersos de tal modo que seja impossível a obtenção de semelhante aderência por uma função $y(x) = a * x^b$. Foi verificado também que os coeficientes obtidos através das simulações deveriam ser

apresentados com, pelo menos, 5 casas decimais, caso contrário poderia acontecer de a aderência apresentada aos eventos não ser reproduzida em função do arredondamento excessivo das casas decimais.

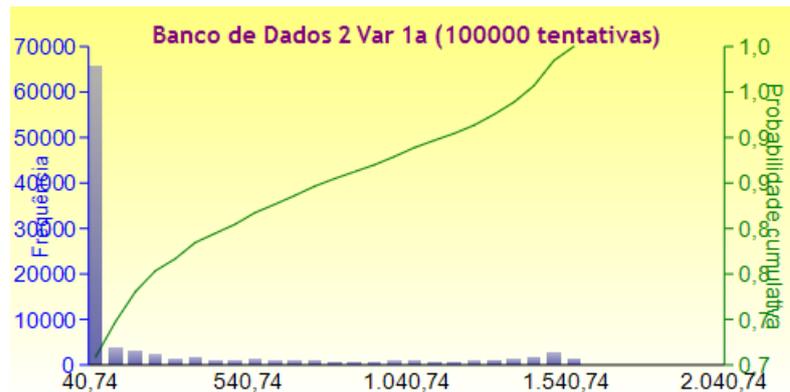
A figura 22 apresenta a distribuição estatística uniforme aplicada nas primeiras 100.000 simulações junto aos limites definidos para as simulações destes coeficientes; a figura 23, por sua vez, oferece o histograma de frequência e probabilidade cumulativa deste conjunto de simulações.

Figura 22 - Distribuição uniforme e limites definidos para os coeficientes a e b, respectivamente.



Fonte: Autor.

Figura 23 - Histograma de frequência e probabilidade cumulativa das 100.000 simulações iniciais.

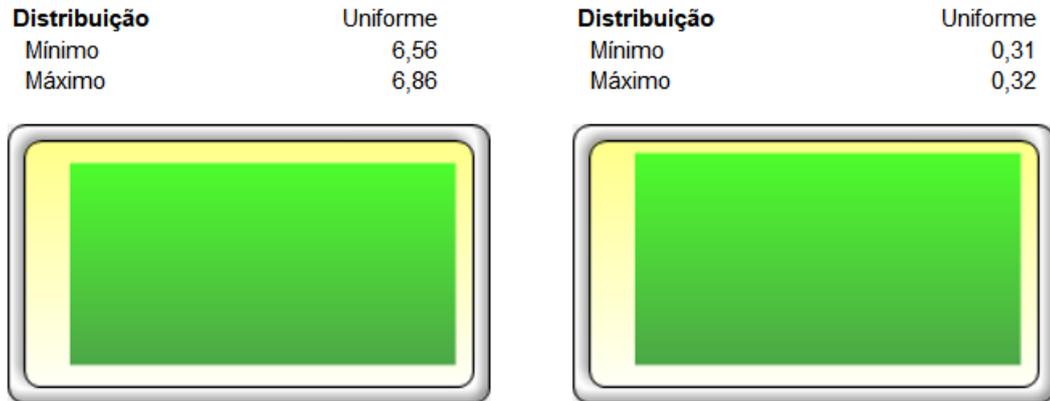


Fonte: Autor.

As figuras 24 e 25 apresentam basicamente o mesmo que as duas anteriores, sendo que desta vez trata-se do quarto e último conjunto de simulações efetuado neste cenário, quando o processo foi encerrado e os coeficientes que possibilitaram a máxima aderência aos eventos levando em consideração os critério de desempate foram finalmente obtidos. É possível

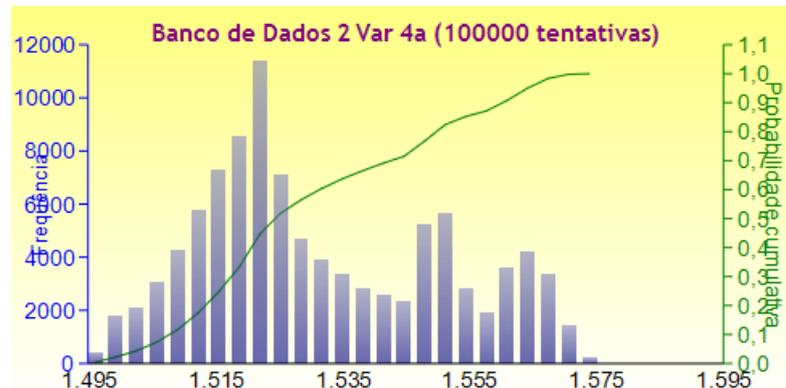
verificar na figura 24 que os limites aplicados à quarta bateria de simulações foram restritos em comparação com os aplicados nas primeiras simulações.

Figura 24 - Limites dos coeficientes na distribuição uniforme das 100.000 simulações finais para os coeficientes a e b, respectivamente.



Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

Figura 25 - Histograma de frequência e probabilidade cumulativa das 100.000 simulações finais.



Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

Conforme exposto na tabela 6, as metodologias presentes na literatura sequer atingiram 10% dos eventos quando a maior parcela do banco de dados foi considerada, ao passo que este primeiro conjunto de simulações convergiu para 1574 eventos dentre os 7964 considerados, atingindo a marca de 19,76% de aderência, o que consiste no dobro de qualquer resultado obtido através dos estudos presentes na literatura. Entretanto, este ainda consiste em um resultado de baixa aderência, o que conduz à necessidade de busca por outras alternativas mais representativas.

A tabela 7 apresenta a sequência lógica utilizada nesta e em todas as baterias de simulações efetuadas neste estudo. Dentre as 100.000 combinações obtidas, as que

apresentaram os melhores resultados (no mínimo 4 resultados, conforme supracitado) foram tomadas como referência para que houvesse uma restrição dos limites iniciais, de modo que as 100.000 simulações seguintes fossem efetuadas em um domínio menor e com maior probabilidade de obtenção do resultado ótimo. O segundo conjunto de simulações, por exemplo, teve como limites os valores máximo e mínimo apresentados dentre coeficientes obtidos nas sete melhores simulações anteriores, que apresentaram aderência entre 1564 e 1567 eventos. Como nos dois conjuntos iniciais a aderência ótima não foi obtida nem houve redundância na aderência máxima possível para os cenários, um terceiro conjunto de simulações foi efetuado, onde o valor máximo obtido ainda foi acrescido de um evento, totalizando a aderência de 1574. Finalmente, como o quarto conjunto não apresentou nenhum incremento em relação ao anterior, tampouco o resultado ótimo foi obtido, foi considerado que este cenário com duas variáveis havia atingido sua capacidade máxima de convergência aos dados. Como houve empate, o conjunto de coeficientes que apresentou a maior aderência e o menor valor para o coeficiente **b** foi o obtido através da quarta bateria de simulações, de modo que a equação máxima neste cenário foi $y(x) = 6,85965 * x^{0,31316}$, onde $y(x)$ representa a taxa de produção sugerida e x representa os recursos medidos e inferidos de um determinado depósito.

Tabela 7 – Simulações necessárias à obtenção da aderência máxima e seus coeficientes.

Simulação	Eventos considerados	Limite mínimo	Limite máximo	Coef. A	Coef. B
Simulação 1	7	1564	1567	5,94302	0,32155
Simulação 2	4	1573	1573	6,85836	0,31319
Simulação 3	10	1573	1574	6,85611	0,31320
Simulação 4	-----	-----	1574	6,85965	0,31316

Fonte: Autor.

4.2.2 Critérios e simulações com três coeficientes

Teoricamente, é possível obter equações que apresentem aderências muito maiores que as atingidas neste estudo através do acréscimo de variáveis (graus) em um polinômio, independentemente da quantidade de dados e da dispersão destes. Entretanto, semelhante artifício conceberia uma solução exclusiva ao problema em questão, sendo muito improvável que uma equação deste tipo pudesse ser aplicada com sucesso a um caso diferente. Em conformidade com o princípio postulado pela navalha de Occam (TORNAY, 1938), a

proposta de solução deve ser o mais simples e coerente possível, de modo que funções cíclicas (senóides, por exemplo) ou polinomiais estariam fora de cogitação.

O comportamento de uma equação exponencial monotonicamente decrescente pode ser considerado como o andamento natural de um empreendimento em fase de expansão (até que a exaustão da jazida esteja próxima, quando uma redução na taxa de produção ocorrerá naturalmente, seja esta redução brusca ou gradual). Foi considerado que a alternativa proposta deveria ser o mais próxima possível da desenvolvida por Taylor (1977) graças à sua simplicidade, de modo que foi adicionado um terceiro coeficiente somado à equação. Através desta modificação, a única alteração na estrutura da equação inicial seria o ponto de intersecção da função no eixo das ordenadas, possibilitando assim que a liberdade desta não fosse restringida e que a função não fosse condicionada a cruzar o eixo em zero. A equação 12 apresenta o formato da nova função proposta, acrescentando a constante a ser buscada dentro das simulações:

$$y(x) = a * x^b + c \quad (12)$$

Como citado anteriormente, 100.000 toneladas anuais (produção mínima dos eventos considerados) divididas por 350 dias trabalhados por ano resultam em 286 toneladas por dia, que é o ponto do eixo das ordenadas a partir do qual há eventos. Portanto, para permitir à nova função um intervalo abrangente, foi definido que o coeficiente c iria variar entre 0 e 500 nas simulações, ao passo que para os demais coeficientes foram mantidos os mesmos limites definidos para o caso aplicado à equação 11, como pode ser verificado na figura 26. A figura 27 apresenta, por sua vez, o histograma de frequência e probabilidade cumulativa deste conjunto de simulações.

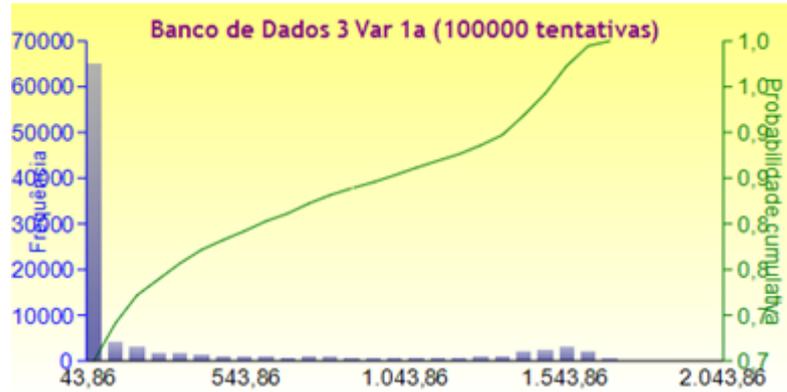
Figura 26 - Limites dos coeficientes a, b e c, respectivamente, na distribuição uniforme das 100.000 simulações iniciais para funções com três coeficientes.

Distribuição	Uniforme	Distribuição	Uniforme	Distribuição	Uniforme
Mínimo	0,01	Mínimo	0,25	Mínimo	0
Máximo	10	Máximo	1	Máximo	500



Fonte: Autor.

Figura 27 - Histograma de frequência e probabilidade cumulativa das 100.000 simulações iniciais.



Fonte: Autor.

Foi considerado um critério de desempate para os casos em que foram simulados 3 coeficientes. Diferente de quando havia somente dois coeficientes, o conjunto de coeficientes que apresentasse o menor coeficiente c seria armazenado, visto que a equação mais próxima da desenvolvida por Taylor (1977) seria a que apresentasse este coeficiente nulo. Neste cenário, houve a necessidade de efetuar 5 baterias de 100.000 simulações até que o resultado máximo fosse obtido, onde houve a aderência de 1712 dados, o que representa 21,55%, como pode ser verificado na tabela 8. A equação tomou a forma de $y(x) = 0,25686 * x^{0,39371} + 325,84712$, onde $y(x)$ representa a taxa de produção sugerida e x representa os recursos medidos e inferidos de um determinado depósito. Portanto, é possível verificar que houve um incremento entre a aderência do cenário que simulou dois coeficientes e o cenário que simulou três, de modo que todos os cenários daqui por diante foram simulados com três coeficientes. A figura 28 apresenta os limites utilizados na última bateria de simulações, ao passo que a figura 29 expõe o histograma de frequência e probabilidade cumulativa.

Figura 28 - Limites dos coeficientes a, b e c, respectivamente, na distribuição uniforme das 100.000 simulações iniciais para funções com três coeficientes.

Distribuição	Uniforme	Distribuição	Uniforme	Distribuição	Uniforme
Mínimo	324,92	Mínimo	0,16	Mínimo	0,39
Máximo	335,29	Máximo	0,27	Máximo	0,42



Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

Figura 29 - Limites dos coeficientes na distribuição uniforme das 100.000 simulações iniciais para funções com três coeficientes.



Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

Tabela 8 - Simulações necessárias à obtenção da aderência máxima e seus coeficientes.

Simulação	Eventos considerados	Limite mínimo	Limite máximo	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Simulação 1	6	1672	1687	1,98971	0,26909	310,72855
Simulação 2	7	1698	1706	0,16615	0,41693	333,54545
Simulação 3	7	1708	1710	0,15115	0,42116	336,04443
Simulação 4	11	1710	1712	0,21156	0,40378	330,40481
Simulação 5	-----	-----	1712	0,25686	0,39371	325,84712

Fonte: Autor.

Após a exposição e definição da metodologia a ser seguida no trabalho, foram propostas e avaliadas novas segmentações nos dados, visando a obtenção de resultados mais consistentes, visto que 21,55% de aderência ainda é um valor muito inferior ao que se espera de uma ferramenta robusta e funcional. A tabela 9 expõe um resumo da aderência das metodologias clássicas aplicadas à maior parte dos dados os coeficientes das equações, além das simulações com dois e três coeficientes efetuadas nesta sessão.

Tabela 9 –Aderência das metodologias clássicas e das simulações à maior parcela dos dados, além dos coeficientes empregados nas equações.

Método	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Taylor (1977)	7946	781	9,83%	0,01430	0,75000	
Long (2009) (OP)	7611	508	6,67%	0,12300	0,64900	
Long (2009) (OP + OP e UG)	7643	517	6,76%	0,12300	0,64900	
Simulação com 2 Variáveis	7946	1574	19,81%	6,85965	0,31316	
Simulação com 3 Variáveis	7946	1712	21,55%	0,25686	0,39371	325,84712

Fonte: Autor.

4.3 SEGMENTAÇÃO DOS DADOS EM DIFERENTES CENÁRIOS

Até esta etapa os eventos foram avaliados conforme as restrições impostas pelos autores anteriores (tabela 6), que geralmente utilizaram um determinado método de lavra ou determinadas substâncias minerais em seus estudos. A única segmentação efetuada pelo estudo até então foi a eliminação dos eventos que possuísem produção anual menor que 100.000 toneladas; mesmo as simulações efetuadas com dois ou três coeficientes não possuem qualquer outra imposição. Visto que os resultados obtidos até o momento não ofereceram aderência satisfatória, foram efetuadas diversas segmentações na busca por resultados que contemplem uma quantidade maior de eventos.

4.3.1 Segmentação por método de lavra

A primeira segmentação avaliada foi por método de lavra, até porque era necessário verificar com qual método de lavra os eventos lavrados através de métodos a céu aberto e subterrâneos devem ser combinados, de modo que não seja necessário verificar todas as combinações como as efetuadas na tabela 6.

Dentre os 7.946 eventos trabalhados, 214 não possuem informações quanto ao método de lavra aplicado, restando 7.732 para esta análise. A tabela 10 apresenta os resultados obtidos nestas 1.300.000 simulações, onde foi verificado que a aderência total do cenário que combinou os eventos lavrados através de métodos subterrâneos com os lavrados através da combinação de métodos a céu aberto e subterrâneos obteve um resultado melhor (21,87%) que o cenário que combinou os eventos lavrados a céu aberto com os lavrados através da combinação de métodos a céu aberto e subterrâneos (21,79%).

Tabela 10 - Segmentação por método de lavra.

Método	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
OP	7.611	1.649	21,67%	0,30531	0,38029	328,19198
UG + OP e UG	121	42	34,71%	1,15946	0,49497	342,48180
Resultado 1	7.732	1.691	21,87%			
OP + OP e UG	7.643	1.654	21,64%	0,28293	0,38863	323,64511
UG	89	31	34,83%	6,70261	0,25324	487,27089
Resultado 2	7.732	1.685	21,79%			

Fonte: Autor.

Portanto, ao considerar o resultado obtido nesta análise, quaisquer simulações doravante efetuadas com segmentação por método de lavra consideraram, de uma lado, depósitos lavrados a céu aberto, ao passo que do outro lado a união de depósitos lavrados através de métodos subterrâneos com os lavrados através da combinação de métodos a céu aberto e subterrâneos.

4.3.2 Segmentação por substância mineral

Foram efetuadas 142.000.000 simulações de Monte Carlo para que fosse possível a confecção da tabela presente no ANEXO II, que levou em consideração a segmentação de dados por substância mineral e apresenta o conjunto de coeficientes que apresentou maior aderência aos eventos de cada uma delas. A partir das informações reunidas nesta tabela, o profissional do planejamento de lavra que necessitar simular um cenário onde seja necessário definir a taxa de produção de um empreendimento em fase incipiente já pode utilizar a equação correspondente à substância mineral a ser trabalhada. Todos os resultados obtidos nas simulações apresentaram aderência superior aos obtidos através da metodologia de Taylor (1977), como pode ser verificado no ANEXO III, onde somente uma substância apresentou resultados iguais para as duas metodologias, mas nunca superiores. A tabela 11 apresenta as 25 principais substâncias minerais (maior produção entre 2010 e 2015 ou maior reserva) simuladas neste estudo.

Tabela 11 - Segmentação por substância mineral e as 25 mais importantes.

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Anatásio	6	6	100,00%	4,60648	0,49646	0,70342
Areia	639	229	35,84%	0,24556	0,38261	336,30000
Argilas Comuns	337	126	37,39%	0,16420	0,30684	355,91505
Bauxita Metalúrgica	105	34	32,38%	9,35242	0,30453	204,99734
Brita e Cascalho	2112	476	22,54%	0,83027	0,42917	297,81170
Calcário	787	167	21,22%	0,40677	0,48719	73,66004
Cassiterita (Primário)	22	9	40,91%	0,43222	0,54947	27,77136
Cassiterita (Secundário)	29	13	44,83%	1,04642	0,38920	134,62646
Caulim	50	22	44,00%	9,42578	0,25393	160,61393
Cianita e Outros Refratários	6	6	100,00%	5,91708	0,45577	2,22864
Cobre	49	16	32,65%	0,02217	0,74463	20,30153
Dolomito	93	28	30,11%	3,04005	0,32661	105,41135
Ferro	369	76	20,60%	0,02184	0,74319	22,84216

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Filito	29	10	34,48%	0,03983	0,70991	158,47558
Fosfato	55	14	25,45%	0,04145	0,67519	342,54380
Ilmenita	8	7	87,50%	0,04681	0,71025	17,80874
Magnesita	21	17	80,95%	0,75363	0,41957	16,92052
Manganês	46	18	39,13%	9,76409	0,37419	148,20936
Níquel	35	17	48,57%	0,04934	0,69976	41,39949
Ornamental (Granito, Gnaiss e afins)	272	73	26,84%	3,65362	0,31524	279,57782
Ouro (Primário)	136	54	39,71%	0,03200	0,73177	95,99154
Paládio	6	6	100,00%	0,08655	0,68038	0,36570
Potássio	6	5	83,33%	1,27268	0,43052	0,47741
Salgema	12	12	100,00%	8,56047	0,25577	0,66417
Zirconita (Primária)	8	6	75,00%	0,17995	0,59434	0,20201

Fonte: MARIZ; PERONI, 2018a.

A tendência é que quanto maior seja o número de eventos agrupado, maior seja a dispersão dos dados; entretanto, esta característica é inerente aos dados obtidos, sendo fruto do preenchimento dos relatórios anuais de lavra (RALs) pelas empresas. O resultado que apresentou menor aderência foi o minério de ferro, onde houve convergência para 20,6% dos dados. Todavia, este resultado ainda é superior aos obtidos através dos métodos presentes na literatura onde este minério fosse incluído na análise, cujos 9,83% obtidos através da regra de Taylor (1977) representaram o melhor resultado (MARIZ; PERONI, 2018a).

Foram analisados 6.052 eventos nesta seção, visto que 1.894 não apresentavam informação acerca da substância mineral declarada no RAL; dentre o montante avaliado, houve a aderência de 1.855, que representa 30,65% do subdomínio, atingindo um resultado mais de 300% superior ao obtido através das equações de Taylor (1977) ou Long (2009).

4.3.3 Segmentação por substância mineral, porte do empreendimento e método de lavra

Uma derradeira análise foi ainda efetuada, onde os eventos que compõem este banco de dados foram segmentados por substância mineral, porte do empreendimento e método de lavra, conforme subdivisão já descrita na tabela 4. Embora os resultados obtidos no tópico anterior sejam superiores aos clássicos, ainda é possível buscar um incremento na aderência através desta nova segmentação conjunta. Entretanto, para utilizá-la, o profissional deverá antever o método de lavra e o porte do empreendimento, caso contrário o aconselhado é utilizar somente a segmentação por substância mineral.

Foram efetuadas 172.000.000 simulações nos eventos lavrados a céu aberto e 30.000.000 simulações nos lavrados através de métodos subterrâneos combinados com os lavrados a céu aberto em concomitância com métodos subterrâneos. As tabelas 12 e 13 apresentam os resultados das principais substâncias minerais, anteriormente representadas na tabela 11; os Anexos IV e V apresentam os resultados completos desta mesma segmentação, desta vez efetuada em todos os dados.

Tabela 12 – Segmentação por substância mineral, porte do empreendimento e eventos lavrados a céu aberto para as substâncias minerais mais importantes.

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Anatásio G	6	6	100,00%	4,60648	0,49646	0,70342
Areia G	19	8	42,11%	5,72730	0,37619	0,69246
Areia M	614	227	36,97%	0,20409	0,39347	337,56549
Argilas Comuns G	7	4	57,14%	2,93504	0,41238	0,01132
Argilas Comuns M	276	114	41,30%	0,02047	0,26265	363,69862
Bauxita Metalúrgica G	26	14	53,85%	4,44781	0,47090	1,31242
Bauxita Metalúrgica M	76	32	42,11%	9,19104	0,30819	173,78818
Brita G	170	56	32,94%	6,28845	0,35672	146,69242
Brita M	1941	467	24,06%	6,17738	0,31030	234,00138
Calcário G	152	54	35,53%	9,85163	0,32295	482,10225
Calcário M	625	157	25,12%	0,17313	0,48309	270,42977
Cassiterita (Primária) G	6	4	66,67%	3,36919	0,44615	0,04623
Cassiterita (Primária) M	15	6	40,00%	2,26244	0,35157	0,53576
Cassiterita (Secundária) G	4	3	75,00%	2,53962	0,34567	0,10370
Cassiterita (Secundária) M	25	10	40,00%	9,50892	0,26503	2,66656
Caulim G	11	8	72,73%	0,65112	0,51668	45,09469
Caulim M	29	18	62,07%	9,80034	0,26840	104,50465
Cianita e Outros Minerais Refratários G	6	6	100,00%	5,91708	0,45577	2,22864
Cobre G	30	14	46,67%	0,05008	0,69515	41,83150
Cobre M	8	3	37,50%	1,15280	0,46439	0,63285
Dolomito G	5	5	100,00%	9,26302	0,35865	1,85031
Dolomito M	76	23	30,26%	8,64456	0,27636	250,97282
Ferro G	232	66	28,45%	5,06118	0,40755	207,72935
Ferro M	137	34	24,82%	0,07161	0,47669	279,45602
Filito M	17	8	47,06%	2,21538	0,27716	198,41372
Fosfato G	25	10	40,00%	1,13260	0,49942	39,98047
Fosfato M	30	12	40,00%	3,01303	0,25152	472,94907
Ilmenita G	6	6	100,00%	9,60346	0,42921	0,22641
Ilmenita M	2	2	100,00%	1,32519	0,43065	0,07390
Magnesita G	6	6	100,00%	3,28460	0,34369	0,22676
Magnesita M	15	12	80,00%	0,17466	0,36324	320,68245

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Manganês G	16	14	87,50%	6,57898	0,39513	10,96477
Manganês M	20	9	45,00%	5,73152	0,30310	0,25296
Níquel G	23	13	56,52%	0,05894	0,68933	62,14327
Níquel M	5	3	60,00%	0,69769	0,47992	1,64271
Ornamental G (Granito, Gnaisse e afins)	15	7	46,67%	7,05156	0,35612	0,19886
Ornamental M (Granito, Gnaisse e afins)	251	72	28,69%	9,19556	0,26118	407,29648
Ouro (Primário) G	45	19	42,22%	0,01685	0,75727	220,80868
Ouro (Primário) M	34	16	47,06%	0,35743	0,55855	17,10187
Zircônia (Primária) G	6	4	66,67%	4,25624	0,43432	5,43045
Zircônia (Primária) M	2	2	100,00%	2,18676	0,39286	0,07800

Fonte: MARIZ; PERONI, 2018b.

Tabela 13 - Segmentação por substância mineral, porte do empreendimento e eventos lavrados através de métodos subterrâneos somados aos eventos lavrados em concomitância através de métodos a céu aberto e subterrâneos para as substâncias minerais mais importantes.

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Argilas Comuns G	3	3	100,00%	8,74188	0,41386	0,21167
Argilas Comuns M	1	1	100,00%	8,48496	0,38773	0,08247
Calcário M	1	1	100,00%	8,25902	0,37643	0,42412
Cobre G	2	1	50,00%	4,32446	0,40316	0,16506
Cobre M	9	8	88,89%	8,14062	0,32398	1,47556
Manganês G	3	3	100,00%	4,31043	0,42573	0,23997
Manganês M	1	1	100,00%	6,18582	0,35135	0,12757
Níquel M	7	5	71,43%	0,28280	0,57649	5,61742
Ouro (Primário) G	6	6	100,00%	2,99459	0,44065	0,88531
Ouro (Primário) M	25	10	40,00%	5,88552	0,32337	0,84323
Potássio G	6	5	83,33%	1,27268	0,43052	0,47741
Salgema M	12	12	100,00%	8,56047	0,25577	0,66417

Fonte: MARIZ; PERONI, 2018b.

Desta feita, foram analisados 5.838 eventos, visto que foram excluídos os 1.894 que não apresentavam informação acerca da substância mineral e 214 não informavam o método de lavra no RAL. Dentre o subdomínio avaliado, houve a aderência de 2.026, que representa 34,70% do subdomínio, atingindo um resultado superior às metodologias anteriormente propostas e às análises aqui efetuadas até então.

Capítulo 5

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais acerca da aplicação de equações presentes na literatura a depósitos minerais brasileiros e da geração de novas equações com o intuito de propor a taxa de produção ótima para exploração deste depósitos em fases prematuras do projeto, quando ainda há pouca informação disponível.

5.1 CONCLUSÃO

A base de dados utilizada neste estudo apresentou diversas limitações, visto que somente 2,47% dos eventos (7.946) foram considerados aptos à análise das operações mineiras em andamento entre 2010 e 2015. Entretanto, para reproduzir uma expectativa de produção e, principalmente, para estimar o porte de um empreendimento, foi demonstrado que ainda precisa-se de maior confiabilidade, transparência e comprometimento das empresas ao preencher os dados oficiais de produção (Relatórios Anuais de Lavra).

As diversas propostas de autores internacionais para estimativa de produção e vida útil de minas não apresentaram boa aderência aos projetos em operação no Brasil. As equações aplicadas na maior parte dos eventos atingiram menos de 10% de aderência, e mesmo as aplicadas a cenários mais restritos obtiverem aderência máxima de aproximadamente 25%. Caso fossem utilizadas as propostas existentes, certamente haveria grandes diferenças entre o que seria previsto e o que seria executado. Portanto conclui-se que as equações de previsibilidade apresentaram uma aderência muito baixa ao projetos correntes nos últimos anos no Brasil.

A adição de uma constante à equação permitiu o deslocamento da curva no eixo y sem comprometer a simplicidade do modelo, sendo comprovado em seguida que este acréscimo possibilitou a obtenção de melhores resultados. O método de Monte Carlo permitiu que fossem realizadas centenas de milhares de simulações para que novas equações fossem obtidas para cada substância. Foi proposta a segmentação dos dados por substância mineral, método de lavra e porte dos empreendimentos e, de maneira geral, a aderência obtida pelas novas equações representou um considerável incremento na qualidade dos resultados quando

comparados com os métodos clássicos, embora a dispersão inerente a alguns cenários impossibilitasse a obtenção de melhores resultados.

A segmentação somente por substância mineral apresentou resultados inferiores aos obtidos pela segmentação simultânea por substância mineral, método de lavra e porte do empreendimento. O minério de ferro, por exemplo, que representa a maior produção dentre os anos analisados, apresentou aderência de 10,84% à regra de Taylor (TAYLOR, 1977), ao passo que apresentou 20,60% para a segmentação por substância mineral. Quando considerada a segmentação simultânea das três características, a aderência para minas a céu aberto médias e grandes foi de 24,82% e 28,45%, respectivamente. O minério de ouro (primário), que representa a segunda maior produção dentre os anos analisados, apresentou aderência de 18,38% à regra de Taylor (TAYLOR, 1977), ao passo que apresentou 39,71% para a segmentação por substância mineral. Quando considerada a segmentação simultânea das três características, a aderência para minas a céu aberto médias e grandes foi de 47,06% e 42,22%, respectivamente, ao passo que as minas lavradas através de métodos subterrâneos somadas à lavradas a céu aberto e através de métodos subterrâneos apresentaram aderência entre 40% e 100% considerando médias e grandes minas, respectivamente. Entretanto, caso não haja a previsão do porte que o empreendimento irá atingir e do método de lavra que será utilizado, é indicado que sejam utilizadas as equações segmentadas somente por substância mineral.

Em resumo, foi verificado que as equações existentes na literatura para estimativa de taxa de produção e vida útil de reservais minerais em projetos incipientes não apresentaram aderência às minas brasileiras em operação entre 2010 e 2015. A partir dessa constatação foram propostas novas equações, que obtiveram uma aderência significativamente maior que as anteriores a partir das várias segmentações efetuadas sobre os dados, de modo que o profissional que necessitar destas tabelas terá dois conjuntos de equações à sua disposição para uma mesma substância mineral. Todavia, como foram consideradas três restrições na última análise, deve haver previamente, para a utilização deste modelos, algum conhecimento acerca do método de lavra e do porte dos equipamentos que serão utilizados na mina estudada.

Deve-se reiterar também que cada substância mineral tem suas particularidades e mercado próprio, o que torna estas equações (mesmo as segmentadas) limitadas em casos específicos. Agregados voltados à construção civil são geralmente dependentes do investimento governamental em infraestrutura e têm seu mercado limitado às regiões circunvizinhas. O carvão mineral, por sua vez, depende da demanda por energia termoelétrica.

A produção e comercialização de rochas ornamentais é interligada a fatores estéticos e à moda, o que pode aumentar ou reduzir drasticamente a demanda pelo produto. A ausência de infraestrutura necessária ao escoamento da produção de determinado minério pode comprometer um projeto que obteria sucesso em outras circunstâncias geográficas; mesmo que as empresas optem muitas vezes por construir suas próprias rodovias, ferrovias e minerodutos, em determinados casos este investimento pode ser inviável. Portanto, as equações elaboradas neste estudo têm sua importância como parâmetro indicativo inicial, visto que baseiam-se em minas em operação no Brasil, mas a tomada de decisão só deve ser concretizada com estudos mais elaborados e quando as particularidades de cada caso forem identificadas e avaliadas.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

É possível efetuar novas análises utilizando a mesma metodologia aplicada neste estudo. A maior dificuldade na execução deste trabalho foi a obtenção de um banco de dados amplo e representativo. Os RALs só estão disponíveis em meio digital a partir do ano de 2010, e mesmo os disponíveis apresentam uma grande gama de inconsistências, razão pela qual somente 7.946 dentre os 321.138 eventos foram utilizados neste estudo. Por esta razão, em alguns anos um novo estudo poderá ser efetuado nos mesmos moldes, visto que haverá mais dados à disposição para aumentar a representatividade e a confiabilidade das equações propostas.

Outra possibilidade é a identificação dos Municípios (lembrando que os dados solicitados vieram codificados) atrelados a cada evento que, em conjunto com o conhecimento geológico de determinada região, possibilitaria o desenvolvimento de equações específicas para uma determinada província geológica, se considerados os empreendimentos existentes naquela região, conferindo assim um resultado com precisão maior para um domínio mais restrito.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **2015 ASME Boiler & Pressure Vessel Code. II Materials – Part A – Ferrous Material Specifications (SA-451 to End)**. ASME, New York, NY, 2015.
- BETEJTIN, A. **Curso de Mineralogia**. 3. ed. Moscú: Editorial Mir, 1977.
- BRANCHE, G.; CHERVET, J.; GUILLEMIN, C. **Nouvelles Espèces Uranifères Françaises**: Rapport C. E. A. n° 128. Fontenay-aux-roses: Commissariat A L'énergie Atomique, 1952.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: Dnrm, 2009.
- CAMM, Thomas W. **Simplified cost models for prefeasibility mineral evaluations**: U.S. Bureau of Mines, Information Circular 9298, 35 p, 1991.
- DANA, James D.; HURLBURT JUNIOR, Cornelius S. **Manual de Mineralogia**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., 1970.
- FERREIRA, Cláudio J.; FERNANDES DA SILVA, Paulo C. **O uso de sistema de informações geográficas na priorização de áreas para aproveitamento mineral de saibro em áreas degradadas, Ubatuba, SP**. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 29 (1/2), 19-31, 2008.
- FOLTIN, Juliana P. **Avaliação da perda de carga em leito fixo de partículas irregulares utilizando xisto betuminoso, analisando a modelagem matemática através do efeito de parede e porosidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.
- HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo Methods**. London: Chapman and Hall, 1964.
- HUSTRULID, William A.; KUCHTA, Mark. **Open Pit Mining Planning & Design**. 2. ed. Florida: CRC Press, 2006.
- LEE, T. D. **Planning and mine feasibility study – And owners perspective**. In: Proceedings of the 1984 NWMA *Short Course 'Mine Feasibility – Concept to Completion'* (G.E. McKelvey, compiler). Spokane, WA, 1984.
- LONG, Keith R.; SINGER, Donald A. **A Simplified Economic Filter for Open-Pit Mining and Heap-Leach Recovery of Copper in the United States**. U. S. Geological Survey, Open File Report 01-218, 2001.

- LONG, Keith R. **A Test and Re-Estimation of Taylor's Empirical Capacity-Reserve Relationship**. *Natural Resources Research*, [s.l.], v. 18, n. 1, p.57-63, 30 jan. 2009. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11053-009-9088-y>.
- LUZ, Adão B.; LINS, Fernando A. F. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.
- MARIZ, Jorge L. V.; PERONI, Rodrigo L. **Análise da Aderência à Realidade Brasileira dos Métodos de Previsão da Taxa de Produção em Fases Prematuras de Projeto**. 9º CBMina, Belo Horizonte, MG, 2018.
- MARIZ, Jorge L. V.; PERONI, Rodrigo L. **Estimativa de taxa de produção em fases prematuras de projeto através de dados segmentados por substância mineral, método de lavra e porte dos empreendimentos**. 4º ABM Week, 19º Simpósio de Mineração, São Paulo, SP, 2018.
- MOORS, Ellen H. M.; MULDERB, Karel F.; VERGRAGT, Philip J. **Towards cleaner production: barriers and strategies in the base metals producing industry**. *Journal of Cleaner Production*, V. 13, Issue 7, p. 657-668, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.12.010>
- OLIVEIRA, M. C. A.; RODRIGUES, E. P.; ARTUR, A. C. **Ardósia como matéria prima para cerâmica**. 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, SP, 2000.
- SATO, Kei; BASEI, Miguel A. S.; SIGA JÚNIOR, Oswaldo; SPROESSER, Walter M.; PASSARELLI, Cláudia R. **Novas técnicas aplicadas ao método U-Pb no CPGeo - IGc/USP: avanços na digestão química, espectrometria de massa (TIMS) e exemplos de aplicação integrada com SHRIMP**. *Geologia USP. Série Científica*, 8(2), 76-99, 2008. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2008000200006>
- SINGER, Donald A., MENZIE, W. David, and LONG, Keith R. **A simplified economic filter for open-pit gold-silver mining in the United States**, U. S. Geological Survey, Open-File Report 98-207, 10 p, 1998.
- SINGER, Donald A., MENZIE, W. David, and LONG, Keith R. **A simplified economic filter for underground mining of massive sulfide deposits**, U. S. Geological Survey, Open-File Report 00-349, 2000.
- TAYLOR, H. K. **Mine valuation and feasibility studies**, in Hoskins, J. R., and Green, W. R., eds., *Mineral industry costs*, 2nd edn: Spokane, Washington, Northwest Mining Association, p. 1-17, 1977.
- TAYLOR, H. K. **Rates of working of mines - a simple rule of thumb**: *Trans. Institution Mining Metall.*, v. 95, sect. A, p. A203-204, 1986.

TORNAY, Stephen Chak. **Ockham: Studies and Selections.** The Philosophical Review, [s.l.], v. 48, n. 4, p.443-448, jul. 1939. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/2180732>

WANG, Baowen et al. **Chemical looping combustion of a chinese anthracite with Fe₂O₃-based and CuO-based oxygen carriers.** Fuel Processing Technology, n. 96, p.104-115, abr. 2012.

ANEXO I – DESCRIÇÃO MINERALÓGICA DAS SUBSTÂNCIAS MINERAIS

Substância mineral	Caracterização e composição molecular
Agalmatolito	Rocha metamórfica - Pirofilita ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) e Moscovita ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$)
Ágatas, Calcedônia, etc.	Variantes de Quartzo - SiO_2
Água Mineral	H_2O
Ambligonita	Fosfato - $Li \cdot Al \cdot [PO_4] \cdot F$
Anatásio	Óxido - TiO_2
Ardósia	Rocha metamórfica oriunda de argilitos e folhelhos
Areia	Silicato - SiO_2
Areia Industrial	Rochas silicáticas como granitos, gnaisses e basaltos
Arenito Ornamental	Silicato - SiO_2
Argilas Comuns	Composição de impurezas, Caulinita $Al_4[Si_4O_{10}][OH]_8$ e Montmorillonita $m\{Mg_3[Si_4O_{10}][OH_2]\} \cdot p(Al,Fe)_2 \cdot [Si_4O_{10}][OH_2] \cdot nH_2O$
Argilas Plásticas	Mesmo que Argilas Comuns
Argilas Refratárias	Mesmo que Argilas Comuns, adicionadas de Gibbsita $Al[OH]_3$ e Halosita $Al_4Si_4OH_8O_{10} \cdot 8H_2O$
Barita	Sulfato - $BaSO_4$
Bauxita Metalúrgica	Óxido - Gibbsita $Al[OH]_3$ Óxido - Boehmita $AlOOH$ Óxido - Diasporo $HAIO_2$ Óxido - Hidrargilita $Al[OH]_2$ Sulfato - Alunita $KAl_3[SO_4]_2[OH]_6$ Alumino-Silicato - Nefelina $Na[AlSiO_4]$
Bauxita Refratária	Mesmo que Bauxita Metalúrgica
Bentonita e Argilas Descorantes	Alumino-Silicato hidratado (Argila) - Montmorillonita $m\{Mg_3[Si_4O_{10}][OH_2]\} \cdot p(Al,Fe)_2 \cdot [Si_4O_{10}][OH_2] \cdot nH_2O$
Berílio	Silicato - $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$ Alumino-Silicato - Crisoberilo $BeO \cdot Al_2O_3$
Bismuto	Sulfeto - Bismutinita Bi_2S_3
Brita e Cascalho	Rochas silicáticas como granitos, gnaisses e basaltos
Cádmio	Sulfeto - Greenockita - CdS
Calcário	Rocha sedimentar composta por carbonatos $CaCO_3$
Calcita	Carbonato - $CaCO_3$
Calcita Ótica	Carbonato - $CaCO_3$
Carvão Mineral	Cadeia carbônica - Linhito $C_\alpha H_\beta S_\gamma O_\delta (N_2)_\nu$ (65 - 80% C) Cadeia carbônica - Hulha $C_\alpha H_\beta S_\gamma O_\delta (N_2)_\nu$ (80 - 93% C) Cadeia carbônica - Antracito $C_\alpha H_\beta S_\gamma O_\delta (N_2)_\nu$ (93 - 98% C)
Cassiterita (Primária)	Óxido - SnO_2
Cassiterita (Secundária)	Óxido - SnO_2
Caulim	Alumino-Silicato hidratado (Argila) - $Al_4[Si_4O_{10}][OH]_8$
Chumbo	Sulfeto - Galena PbS Carbonato - Cerusita $PbCO_3$

Substância mineral	Caracterização e composição molecular
Cianita e outros Minerais Refratários	Alumino-Silicato - $Al_2O_3 \cdot SiO_2$
Cobalto	Sulfeto - Cobaltita $CoAsS$ Arseneto - Esmaltita $CoAs_3$ Sulfeto - Cobaltopirita $(Fe,Co)S_2$ Sulfeto - Glaucodot $(Co,Fe)AsS$
Cobre	Elemento nativo Sulfeto - Calcocita Cu_2S Sulfeto - Calcopirita $CuFeS_2$ Sulfeto - Bornita Cu_5FeS_4 Sulfeto - Covelita CuS Óxido - Cuprita Cu_2O Carbonato hidratado - Malaquita $Cu_2[CO_3][OH]_2$ Carbonato hidratado - Azurita $Cu_3[CO_3]_2[OH]_2$ Silicato hidratado - Crisocola - $CuSiO_3 \cdot nH_2O$
Conchas Calcárias	Carbonato - $CaCO_3$
Coríndon	Óxido - Al_2O_3
Criolita	Fluoreto - Na_3AlF_6
Crisotila	Silicato hidratado (Asbesto) - $Mg_6[Si_4O_{10}][OH]_8$
Cromo	Óxido - Espinelas cromíferas $(Mg,Fe)(Cr,Al,Fe)_2O_4$
Diamante (Primário)	Elemento nativo (Carbono)
Diamante (Secundário)	Elemento nativo (Carbono)
Diatomita	Sílica hidratada - $SiO_2 \cdot nH_2O$
Dolomito	Rocha sedimentar composta por carbonatos $CaMg[CO_3]_2$
Enxofre	Elemento nativo
Esposdumênio	Alumino-Silicato - $LiAl[Si_2O_6]$
Feldspato	Alumino-Silicato - Sanidina, Ortoclásio e Microclina $K[AlSi_3O_8]$ Alumino-Silicato - Albita $Na[AlSi_3O_8]$ Alumino-Silicato - Anortita $Ca[AlSi_3O_8]$
Ferro	Óxido - Hematita Fe_2O_3 Óxido - Magnetita Fe_3O_4 Óxido - Magnomagnetita $(Fe,Mg)Fe_2O_4$ Óxido - Goethita $HFeO_2$ Óxido - Limonita $HFeO_2 \cdot (aq)$ Carbonato - Siderita $FeCO_3$
Filito	Rocha metamórfica oriunda de argilitos e folhelhos
Fluorita	Fluoreto - CaF_2
Fosfato	Apatita - $Ca_5(F,Cl,OH)[PO_4]_3$
Gemas (Primária)	Pedras preciosas de composição diversa
Gemas (Secundária)	Pedras preciosas de composição diversa
Geodos de Ametista	Silicato (Tipo de quartzo) - SiO_2
Gipsita	Sulfato - $Ca_2SO_4 \cdot 2H_2O$
Substância mineral	Caracterização e composição molecular

Grafita	Elemento nativo (Carbono)
Granada	Silicato - $(\text{Mg,Fe,Mn,Ca})_3(\text{Al,Fe,Cr})_2(\text{SiO}_4)_3$
Ilmenita	Óxido - FeO.TiO_2
Lepidolita	Óxido hidratados - $\text{KLi}_{1,5}\text{Al}_{1,5}[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}][\text{F,OH}]_2$
Leucita e Nefelina-Sienito	Alumino-Silicatos - $\text{K}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]$ e $\text{Na}[\text{AlSiO}_4]$
Magnesita	Carbonato - MgCO_3
Manganês	Óxido - Pirolusita MnO_2 Óxido - Hausmanita MnMn_2O_4 Óxido - Braunita Mn_2O_3 Óxido hidratado - Manganita $\text{MnO}_2.\text{Mn}[\text{OH}]_2$ Óxido hidratado - Psilomelano $n\text{MnO}.\text{MnO}_2.n\text{H}_2\text{O}$ Carbonato - Rodocrosita MnCO_3
Mica	Alumino-Silicato hidratado (Argila) - Biotita $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}][\text{OH,F}]_2$ Alumino-Silicato hidratado (Argila) - Moscovita $\text{KA}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}][\text{OH}]_2$ Alumino-Silicato hidratado (Argila) - Clorita $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2.\text{Mg}_3[\text{OH}]_6$
Molibdênio	Sulfeto - MoS_2
Monazita	Fosfato - $(\text{Ce, La, Y, Th})\text{PO}_4$
Não informado	
Nióbio (Columbita-Tantalita)- Secundária	Óxidos - $(\text{Fe,Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$ - $(\text{Fe,Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$
Níquel	Sulfeto - Millerita NiS Sulfeto - Pentlandita $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ Sulfeto - Gersdorffita NiAsS Arseneto - Cloantita NiAs_3 Arseneto - Niquelita NiAs Silicato hidratado - Revdinskita $(\text{Ni,Mg})_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$ Silicato hidratado - Garnierita $\text{Ni}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_4.4\text{H}_2\text{O}$
Ocre	Alumino-Silicato hidratado (Argila) rico em óxidos de ferro
Ornamental (Granito, Gnaisse e afins)	Rochas silicáticas
Ornamental (Mármore e afins)	Rochas carbonáticas
Ouro (Primário)	Elemento nativo
Ouro (Secundário)	Elemento nativo
Outras Rochas Ornamentais (Pedra de Talhe, Pedra-Sabão, Basalto, etc.)	Rochas silicáticas
Paládio	Elemento nativo Platina Paladífera (Pt, Pd) Antimoneto - Estibiopaladinita - Pd_3Sb Estanheto - Estannopaladinita - Pd_3Sn_2 Óxido - Paladita - PdO Sulfeto - Braggita - $(\text{Pt, Pd, Ni})\text{S}$ Minerais de Platina
Substância mineral	Caracterização e composição molecular
Petalita	Alumino-Silicato - $\text{Li}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$

Pirocloro	Óxido - $(\text{Na,Ca...})_2(\text{Nb,Ta...})_2\text{O}_6[\text{F,OH}]$
Pirofilita	Alumino-Silicato hidratado - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Potássio	Cloreto - Silvita - KCl Cloreto - Carnalita - $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Cloreto - Silvinita - KNaCl_2 Sulfato - Langbeinita - $(\text{KMg}_2(\text{SO}_4)_3)$ Sulfato - Polihalita - $(\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ Sulfato - Kainita - $(4\text{KCl} \cdot 4\text{MgSO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O})$
Prata (Primária)	Elemento nativo Sulfeto - Argentita Ag_2S Sulfeto - Pirargilita - Ag_3SbS_3 Sulfeto - Proustita - Ag_3AsS_3
Quartzito Industrial	Rocha Metamórfica rica em Quartzo - SiO_2
Quartzito Ornamental	Rocha Metamórfica rica em Quartzo - SiO_2
Quartzo	Silicato - SiO_2
Quartzo (Cristal)	Silicato - SiO_2
Rutilo	Titanato - TiO_2
Saibro	Material argilo-arenoso oriundo da decomposição de rochas graníticas e gnáissicas
Salgema	Cloreto - NaCl
Serpentinito Industrial	Silicato hidratado - $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$
Sílex	Silicato - SiO_2
Talco	Silicato hidratado - $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$
Tântalo (Columbita-Tantalita)-Primário	Óxidos - $(\text{Fe,Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$ - $(\text{Fe,Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$
Tântalo (Columbita-Tantalita)-Secundário	Óxidos - $(\text{Fe,Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$ - $(\text{Fe,Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$
Terras-Raras	Fosfato - Monazita $(\text{Ce, La, Y, Th})\text{PO}_4$ Fosfato - Xenotimo YPO_4 Carbonato - Bastnaesita $(\text{Ce,Lu})\text{CO}_3\text{F}$ Óxido - Cerianita CeO_2 Óxido - Knopita $(\text{Ca,Ce})(\text{Ti,Fe})\text{O}_3$ (Perowskita)
Tufo Vulcânico	
Tungstênio	Óxido - Scheelita CaWO_4 Óxido - Wolframita $(\text{Mn, Fe})\text{WO}_4$ Óxido - Ferberita FeWO_4 Óxido - Hubnerita MnWO_4
Turfa	Cadeia carbônica - $\text{C}_\alpha\text{H}_\beta\text{S}_\gamma\text{O}_\delta(\text{N}_2)_\nu$ (55 - 65% C)
Turmalina Industrial	Alumino-Silicato - $(\text{Na,Ca})_3(\text{Mg,Al})_6[\text{B}_3\text{Al}_3\text{Si}_6(\text{O,OH})_{30}]$
Urânio	Óxidos - Uraninita UO_2 Fosfato/Óxido Hidratado - Torbenita $\text{Cu}[\text{UO}_2]_2[\text{PO}_4]_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Fosfato/Óxido Hidratado - Autunita $\text{Ca}[\text{UO}_2]_2[\text{PO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Óxido Hidratado - Tyuyamunita $\text{Ca}[\text{UO}_2]_2[\text{VO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Óxido Hidratado - Carnotita $\text{K}_2[\text{UO}_2]_2[\text{VO}_4]_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ Silicato/Óxido Hidratado - Kasolita $\text{Pb}[\text{UO}_2][\text{SiO}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$
Substância mineral	Caracterização e composição molecular
Vanádio	Óxido - Vanadinita $(\text{Pb}_5[\text{VO}_4]_3\text{Cl})$

	Óxido hidratado - Decloisita $(\text{Zn,Cu})\text{Pb}[\text{VO}_4][\text{OH}]$
	Óxido Hidratado - Carnotita $\text{K}_2[\text{UO}_2]_2[\text{VO}_4]_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Vermiculita e Perlita	Alumino-Silicato hidratados - $(\text{Mg,Fe}^2,\text{Fe}^3)_3[(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Xisto e outras Rochas Betuminosas	Rochas sedimentares ricas em matéria orgânica
Zinco	Sulfeto - Esfalerita ZnS Carbonato - Smithsonita ZnCO_3 Carbonato - Monheimita $(\text{Zn,Fe})\text{CO}_3$ Silicato - Willemita - Zn_2SiO_4
Zircônio (Óxidos)	Óxido - Baddeleyita ZrO_2
Zirconita (Primária)	Silicato - ZrSiO_4
Zirconita (Secundária)	Silicato - ZrSiO_4

ANEXO II - SEGMENTAÇÃO DE DADOS POR SUBSTÂNCIA MINERAL

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Agalmatolito	3	3	100,00%	5,01382	0,26188	0,62530
Anatásio	6	6	100,00%	4,60648	0,49646	0,70342
Ardósia	7	6	85,71%	2,06221	0,25333	264,43697
Areia	639	229	35,84%	0,24556	0,38261	336,30000
Areia Industrial	110	44	40,00%	0,75765	0,28683	383,73846
Argila Refratária	99	47	47,47%	0,39798	0,40346	247,56543
Argilas Comuns	337	126	37,39%	0,16420	0,30684	355,91505
Argilas Plásticas	55	30	54,55%	4,51318	0,26338	182,93603
Barita	4	3	75,00%	3,22162	0,40594	0,00556
Bauxita Metalúrgica	105	34	32,38%	9,35242	0,30453	204,99734
Bauxita Refratária	17	9	52,94%	9,79028	0,26015	461,81132
Bentonita e Argilas Descorantes	5	5	100,00%	3,21739	0,25095	281,18438
Brita e Cascalho	2112	476	22,54%	0,83027	0,42917	297,81170
Calcário	787	167	21,22%	0,40677	0,48719	73,66004
Calcita	11	8	72,73%	3,44247	0,29327	4,49612
Carvão Mineral	75	25	33,33%	0,12961	0,60025	223,91749
Cassiterita (Primário)	22	9	40,91%	0,43222	0,54947	27,77136
Cassiterita (Secundário)	29	13	44,83%	1,04642	0,38920	134,62646
Caulim	50	22	44,00%	9,42578	0,25393	160,61393
Cianita e Outros Refratários	6	6	100,00%	5,91708	0,45577	2,22864
Cobalto	17	11	64,71%	0,02186	0,74852	47,85424
Cobre	49	16	32,65%	0,02217	0,74463	20,30153
Conchas Calcárias	1	1	100,00%	1,14842	0,38166	0,34052
Criolita	6	4	66,67%	2,04157	0,47107	2,98060
Crisotila	6	6	100,00%	2,15070	0,45630	0,20427
Cromo	15	7	46,67%	3,58927	0,35518	0,62325
Dolomito	93	28	30,11%	3,04005	0,32661	105,41135
Enxofre	6	6	100,00%	6,45236	0,39251	0,01700
Feldspato	10	6	60,00%	0,03148	0,63639	79,00139
Ferro	369	76	20,60%	0,02184	0,74319	22,84216
Filito	29	10	34,48%	0,03983	0,70991	158,47558
Fosfato	55	14	25,45%	0,04145	0,67519	342,54380
Gemas (Primária)	6	5	83,33%	9,73297	0,33210	230,29873
Gipsita	70	34	48,57%	2,94026	0,25668	337,28573
Grafita	23	10	43,48%	8,70137	0,27271	22,23956
Ilmenita	8	7	87,50%	0,04681	0,71025	17,80874
Leucita e Nefelina-Sienito	5	4	80,00%	2,12325	0,25549	218,63468
Magnesita	21	17	80,95%	0,75363	0,41957	16,92052
Manganês	46	18	39,13%	9,76409	0,37419	148,20936

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Mozanita	2	2	100,00%	1,51542	0,42030	0,03005
Níquel	35	17	48,57%	0,04934	0,69976	41,39949
Ornamental (Granito, Gnaiss e afins)	272	73	26,84%	3,65362	0,31524	279,57782
Ornamental (Mármore e afins)	9	6	66,67%	0,42839	0,49439	1,53594
Ouro (Primário)	136	54	39,71%	0,03200	0,73177	95,99154
Ouro (Secundário)	12	6	50,00%	5,80402	0,25743	1,73461
Outras Rochas Ornamentais*	12	5	41,67%	0,80109	0,49757	0,86651
Paládio	6	6	100,00%	0,08655	0,68038	0,36570
Pirocloro	11	5	45,45%	9,92018	0,37200	247,72353
Potássio	6	5	83,33%	1,27268	0,43052	0,47741
Prata (Primário)	22	12	54,55%	9,45999	0,36174	340,01608
Quartzito Industrial	14	8	57,14%	0,57745	0,25180	318,69423
Quartzo	13	8	61,54%	0,48551	0,26164	319,21608
Quartzo Cristal	2	2	100,00%	9,70074	0,31855	57,44593
Saibro	91	30	32,97%	2,74737	0,26449	303,93582
Salgema	12	12	100,00%	8,56047	0,25577	0,66417
Serpentinito Industrial	1	1	100,00%	2,75210	0,29557	0,04844
Talco	13	12	92,31%	0,58060	0,44007	2,68645
Tântalo (Columbita-Tantalita) Primário	8	4	50,00%	9,65481	0,34825	0,19166
Tungstênio	10	4	40,00%	4,49478	0,31486	0,07435
Turfa	16	9	56,25%	1,41174	0,38501	14,25731
Urânio	9	8	88,89%	7,87626	0,27575	0,99833
Vanádio	2	2	100,00%	4,45913	0,39667	0,01467
Vermiculita e Perlita	5	2	40,00%	6,68023	0,29841	0,12444
Zinco	6	4	66,67%	0,01932	0,78750	34,11439
Zirconio (Óxidos)	3	2	66,67%	8,34338	0,33855	0,09963
Zirconita (Primária)	8	6	75,00%	0,17995	0,59434	0,20201
Zirconita (Secundária)	2	2	100,00%	3,69791	0,36063	0,08694
Total	6052	1855	30,65%			

* Pedra de talhe, Pedra-sabão, Basalto, etc.

**ANEXO III - SEGMENTAÇÃO POR SUBSTÂNCIA MINERAL COMPARADA À
REGRA DE TAYLOR (TAYLOR, 1977)**

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B
Agalmatolito	3	0	0,00%	3	100,00%
Anatásio	6	0	0,00%	6	100,00%
Ardósia	7	0	0,00%	6	85,71%
Areia Industrial	110	15	13,64%	45	40,91%
Areia	639	87	13,62%	229	35,84%
Argila Refratária	99	2	2,02%	47	47,47%
Argilas Comuns	337	23	6,82%	128	37,98%
Argilas Plásticas	55	1	1,82%	30	54,55%
Barita	4	0	0,00%	3	75,00%
Bauxita Metalúrgica	105	12	11,43%	34	32,38%
Bauxita Refratária	17	1	5,88%	9	52,94%
Bentonita e Argilas Descorantes	5	0	0,00%	5	100,00%
Brita e Cascalho	2112	170	8,05%	475	22,49%
Calcário	787	68	8,64%	168	21,35%
Calcita	11	0	0,00%	8	72,73%
Carvão Mineral	75	13	17,33%	24	32,00%
Cassiterita (Primário)	22	4	18,18%	9	40,91%
Cassiterita (Secundário)	29	2	6,90%	13	44,83%
Caulim	50	9	18,00%	22	44,00%
Cianita e Outros Refratários	6	0	0,00%	6	100,00%
Cobalto	17	2	11,76%	11	64,71%
Cobre	49	8	16,33%	16	32,65%
Conchas Calcárias	1	0	0,00%	1	100,00%
Criolita	6	1	16,67%	4	66,67%
Crisotila	6	0	0,00%	6	100,00%
Cromo	15	1	6,67%	7	46,67%
Dolomito	93	12	12,90%	28	30,11%
Enxofre	6	0	0,00%	6	100,00%
Feldspato	10	0	0,00%	6	60,00%
Ferro	369	40	10,84%	76	20,60%
Filito	29	7	24,14%	10	34,48%
Fosfato	55	5	9,09%	14	25,45%
Gemas (Primária)	6	1	16,67%	5	83,33%
Gipsita	70	5	7,14%	34	48,57%
Grafita	23	2	8,70%	10	43,48%
Ilmenita	8	0	0,00%	7	87,50%
Leucita e Nefelina-Sienito	5	0	0,00%	4	80,00%

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B
Magnesita	21	2	9,52%	17	80,95%
Manganês	46	6	13,04%	18	39,13%
Mozanita	2	0	0,00%	2	100,00%
Níquel	35	5	14,29%	17	48,57%
Ornamental (Granito, Gnaisse e afins)	272	24	8,82%	73	26,84%
Ornamental (Mármore e afins)	9	0	0,00%	6	66,67%
Ouro (Primário)	136	25	18,38%	54	39,71%
Ouro (Secundário)	12	1	8,33%	8	66,67%
Outras Rochas Ornamentais*	12	2	16,67%	8	66,67%
Paládio	6	0	0,00%	6	100,00%
Pirocloro	11	0	0,00%	5	45,45%
Potássio	6	0	0,00%	5	83,33%
Prata (Primário)	22	3	13,64%	12	54,55%
Quartzito Industrial	14	0	0,00%	8	57,14%
Quartzo Cristal	2	0	0,00%	2	100,00%
Quartzo	13	2	15,38%	8	61,54%
Saibro	91	9	9,89%	30	32,97%
Salgema	12	0	0,00%	12	100,00%
Serpentinito Industrial	1	0	0,00%	1	100,00%
Talco	13	1	7,69%	12	92,31%
Tântalo (Columbita-Tantalita) Primário	8	2	25,00%	4	50,00%
Tungstênio	10	1	10,00%	4	40,00%
Turfa	16	0	0,00%	9	56,25%
Urânio	9	0	0,00%	8	88,89%
Vanádio	2	2	100,00%	2	100,00%
Vermiculita e Perlita	5	1	20,00%	2	40,00%
Zinco	6	1	16,67%	4	66,67%
Zirconio (Óxidos)	3	0	0,00%	2	66,67%
Zirconita (Primária)	8	1	12,50%	6	75,00%
Zirconita (Secundária)	2	0	0,00%	2	100,00%

* Pedra de talhe, Pedra-sabão, Basalto, etc.

ANEXO IV - SEGMENTAÇÃO POR SUBSTÂNCIA MINERAL, PORTE DO EMPREENDIMENTO E MÉTODO DE LAVRA (OP)

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Agalmatolito M	3	3	100,00%	5,01382	0,26188	0,62530
Anatásio G	6	6	100,00%	4,60648	0,49646	0,70342
Ardósia M	7	6	85,71%	2,06221	0,25333	264,43697
Areia G	19	8	42,11%	5,72730	0,37619	0,69246
Areia M	614	227	36,97%	0,20409	0,39347	337,56549
Areia Industrial G	11	6	54,55%	8,71394	0,39459	13,34530
Areia Industrial M	94	42	44,68%	2,67095	0,25713	280,63693
Argilas Comuns G	7	4	57,14%	2,93504	0,41238	0,01132
Argilas Comuns M	276	114	41,30%	0,02047	0,26265	363,69862
Argilas Plásticas M	47	25	53,19%	5,46210	0,26471	152,92399
Argilas Refratárias G	1	1	100,00%	7,28183	0,53445	0,05368
Argilas Refratárias M	97	46	47,42%	0,37282	0,40834	246,44031
Barita G	3	3	100,00%	1,17064	0,45611	0,07970
Barita M	1	1	100,00%	8,51217	0,28095	0,05592
Bauxita Metalúrgica G	26	14	53,85%	4,44781	0,47090	1,31242
Bauxita Metalúrgica M	76	32	42,11%	9,19104	0,30819	173,78818
Bauxita Refratária M	10	7	70,00%	9,05861	0,26948	365,55499
Bentonita e Argilas Descorantes M	5	5	100,00%	3,21739	0,25095	281,18438
Brita G	170	56	32,94%	6,28845	0,35672	146,69242
Brita M	1941	467	24,06%	6,17738	0,31030	234,00138
Calcário G	152	54	35,53%	9,85163	0,32295	482,10225
Calcário M	625	157	25,12%	0,17313	0,48309	270,42977
Calcita M	10	7	70,00%	1,58400	0,35104	0,16190
Carvão Mineral G	7	4	57,14%	9,93237	0,38745	363,47525
Carvão Mineral M	48	18	37,50%	4,27695	0,25781	306,32689
Cassiterita (Primária) G	6	4	66,67%	3,36919	0,44615	0,04623
Cassiterita (Primária) M	15	6	40,00%	2,26244	0,35157	0,53576
Cassiterita (Secundária) G	4	3	75,00%	2,53962	0,34567	0,10370
Cassiterita (Secundária) M	25	10	40,00%	9,50892	0,26503	2,66656
Caulim G	11	8	72,73%	0,65112	0,51668	45,09469
Caulim M	29	18	62,07%	9,80034	0,26840	104,50465
Cianita e Outros Minerais Refratários G	6	6	100,00%	5,91708	0,45577	2,22864
Cobalto G	7	7	100,00%	4,64364	0,43453	2,60944
Cobalto M	3	2	66,67%	5,51311	0,34885	0,18047
Cobre G	30	14	46,67%	0,05008	0,69515	41,83150
Cobre M	8	3	37,50%	1,15280	0,46439	0,63285
Conchas Calcárias M	1	1	100,00%	1,14842	0,38166	0,34052
Criolita G	6	4	66,67%	2,04157	0,47107	2,98060

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Crisotila G	6	6	100,00%	2,15070	0,45630	0,20427
Cromo M	9	7	77,78%	1,88418	0,40295	0,41541
Dolomito G	5	5	100,00%	9,26302	0,35865	1,85031
Dolomito M	76	23	30,26%	8,64456	0,27636	250,97282
Feldspato G	6	4	66,67%	0,61611	0,47970	0,49000
Feldspato M	4	2	50,00%	3,49564	0,27067	145,36915
Ferro G	232	66	28,45%	5,06118	0,40755	207,72935
Ferro M	137	34	24,82%	0,07161	0,47669	279,45602
Filito M	17	8	47,06%	2,21538	0,27716	198,41372
Fosfato G	25	10	40,00%	1,13260	0,49942	39,98047
Fosfato M	30	12	40,00%	3,01303	0,25152	472,94907
Gipsita M	70	34	48,57%	2,94356	0,25913	329,29342
Grafita M	23	10	43,48%	8,70137	0,27271	22,23956
Ilmenita G	6	6	100,00%	9,60346	0,42921	0,22641
Ilmenita M	2	2	100,00%	1,32519	0,43065	0,07390
Leucita e Nefelina-Sienito M	5	4	80,00%	2,12325	0,25549	218,63468
Magnesita G	6	6	100,00%	3,28460	0,34369	0,22676
Magnesita M	15	12	80,00%	0,17466	0,36324	320,68245
Manganês G	16	14	87,50%	6,57898	0,39513	10,96477
Manganês M	20	9	45,00%	5,73152	0,30310	0,25296
Mozanita M	2	2	100,00%	1,51542	0,42030	0,03005
Níquel G	23	13	56,52%	0,05894	0,68933	62,14327
Níquel M	5	3	60,00%	0,69769	0,47992	1,64271
Ornamental (Mármore e afins) G	5	5	100,00%	8,60165	0,33011	0,02389
Ornamental (Mármore e afins) M	4	3	75,00%	1,04974	0,36732	166,93832
Ornamental G (Granito, Gnaisse e afins)	15	7	46,67%	7,05156	0,35612	0,19886
Ornamental M (Granito, Gnaisse e afins)	251	72	28,69%	9,19556	0,26118	407,29648
Ouro (Primário) G	45	19	42,22%	0,01685	0,75727	220,80868
Ouro (Primário) M	34	16	47,06%	0,35743	0,55855	17,10187
Ouro (Secundário) G	3	3	100,00%	0,04654	0,80901	16,66089
Ouro (Secundário) M	9	6	66,67%	5,96764	0,25608	0,38848
Outras Rochas Ornamentais* M	1	1	100,00%	9,40197	0,28885	0,09306
Pirocloro G	7	3	42,86%	2,32657	0,43461	0,88999
Pirocloro M	4	2	50,00%	9,22588	0,37877	0,09200
Prata (Primária) M	6	4	66,67%	1,84949	0,44120	0,18623
Quartzito Industrial M	12	6	50,00%	2,40848	0,25080	147,57250
Quartzo Cristal M	2	2	100,00%	9,70074	0,31855	57,44593
Quartzo M	13	8	61,54%	0,48551	0,26164	319,21608
Saibro G	6	4	66,67%	4,27661	0,37707	0,20989
Saibro M	83	30	36,14%	6,11470	0,25075	305,85360

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Serpentinito Industrial M	1	1	100,00%	2,75210	0,29557	0,04844
Talco G	6	6	100,00%	5,37965	0,32515	0,50743
Talco M	7	6	85,71%	1,86509	0,36078	0,36988
Tântalo (Columbita-Tantalita) Primário M	8	4	50,00%	9,65481	0,34825	0,19166
Tungstênio M	10	4	40,00%	4,49478	0,31486	0,07435
Turfa M	8	6	75,00%	6,36301	0,28832	0,21984
Urânio M	9	8	88,89%	7,87626	0,27575	0,99833
Vanádio G	1	1	100,00%	3,33506	0,41010	0,01561
Vanádio M	1	1	100,00%	9,73993	0,35340	0,34516
Vermiculita e Perlita M	5	2	40,00%	6,68023	0,29841	0,12444
Zinco M	1	1	100,00%	1,80917	0,39669	0,18453
Zircônio (Óxidos) M	3	2	66,67%	8,34338	0,33855	0,09963
Zirconita (Primária) G	6	4	66,67%	4,25624	0,43432	5,43045
Zirconita (Primária) M	2	2	100,00%	2,18676	0,39286	0,07800
Zirconita (Secundária) M	2	2	100,00%	3,69791	0,36063	0,08694
Total	5717	1932	33,79%			

* Pedra de talhe, Pedra-sabão, Basalto, etc.

ANEXO V - SEGMENTAÇÃO POR SUBSTÂNCIA MINERAL, PORTE DO EMPREENDIMENTO E MÉTODO DE LAVRA (UG + OP E UG)

Substância	Total de eventos	Eventos contemplados	Aderência	Coef. A	Coef. B	Coef. C
Argilas Comuns G	3	3	100,00%	8,74188	0,41386	0,21167
Argilas Comuns M	1	1	100,00%	8,48496	0,38773	0,08247
Calcário M	1	1	100,00%	8,25902	0,37643	0,42412
Carvão Mineral G	2	2	100,00%	3,24831	0,41680	1,42097
Carvão Mineral M	7	7	100,00%	0,95319	0,47985	0,26318
Cobalto M	7	5	71,43%	0,29121	0,57387	23,05598
Cobre G	2	1	50,00%	4,32446	0,40316	0,16506
Cobre M	9	8	88,89%	8,14062	0,32398	1,47556
Enxofre G	6	6	100,00%	6,45236	0,39251	0,01700
Gemas (Primária) M	6	5	83,33%	9,73297	0,33210	230,29873
Manganês G	3	3	100,00%	4,31043	0,42573	0,23997
Manganês M	1	1	100,00%	6,18582	0,35135	0,12757
Níquel M	7	5	71,43%	0,28280	0,57649	5,61742
Ouro (Primário) G	6	6	100,00%	2,99459	0,44065	0,88531
Ouro (Primário) M	25	10	40,00%	5,88552	0,32337	0,84323
Potássio G	6	5	83,33%	1,27268	0,43052	0,47741
Prata (Primária) G	6	6	100,00%	6,25914	0,38998	340,02611
Prata (Primária) M	6	3	50,00%	9,15606	0,32241	1,27917
Salgema M	12	12	100,00%	8,56047	0,25577	0,66417
Zinco M	5	4	80,00%	0,11387	0,65929	6,55544
Total	121	94	77,69%			