



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

PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO EM MINA DE BAUXITA – TRADE OFF ENTRE A ORDEM DA OPERAÇÃO EM PLATÔS DE BAUXITA

Autora: **MARCUS VINÍCIUS BARROS DE SIMONI**
Orientadores: **Prof. Dr. HERNANI MOTA DE LIMA**

OURO PRETO - MG
2018

Marcus Vinícius Barros De Simoni

PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO EM MINA DE BAUXITA – TRADE OFF ENTRE A ORDEM DA OPERAÇÃO EM PLATÔS DE BAUXITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Mineração; Planejamento.
Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

OURO PRETO - MG

2018

Simoni, Marcus Vinicius Barros de.

Planejamento de longo prazo em mina de bauxita [manuscrito]: trade off entre a ordem da operação em platôs de bauxita / Marcus Vinicius Barros de Simoni. - 2018.

20f.: il.: color; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minas e mineração. 2. Planejamento estratégico. 3. Processo decisório. 4. Bauxita. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.013

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



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

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 10 dias do mês de dezembro de 2018, às 14h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO EM MINA DE BAUXITA – TRAD OFF ENTRE A ORDEM DE OPERAÇÃO EM PLATÔS DE BAUXITA”**, pelo aluno **Marcus Vinícius Barros De Simoni**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (orientador)**, **Prof. Dr. José Margarida da Silva** e **Engº de Minas Pedro Henrique Neuppmann**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela *aprovação* do candidato, com a nota *9,5* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

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

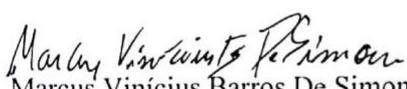
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 10 de dezembro de 2018.


Prof. Dr. Hernani Mota de Lima
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. Dr. José Margarida da Silva
Membro da Comissão Avaliadora


Engº de Minas Pedro Henrique Neuppmann
Membro da Comissão Avaliadora


Marcus Vinícius Barros De Simoni


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

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e meu irmão pela motivação, carinho, paciência e apoio incondicional.

A Luiza pela ajuda nas horas difíceis e pelos bons momentos durante toda a faculdade.

AGRADECIMENTOS

Aos meus professores pelos ensinamentos na área acadêmica e pessoal.
Aos meus colegas da República Gambiarra, pelas horas de estudo e diversão
juntos.

RESUMO

A mineração é considerada uma atividade essencial para a sociedade visto que possibilita uma revolução dos meios de transporte, uma evolução da construção civil, melhorias na área da saúde etc. No Brasil, a indústria de mineração representa, historicamente, uma das mais relevantes atividades econômicas, gerando milhares de empregos diretos e indiretos, a exemplo da bauxita. O Brasil possui uma das dez maiores reservas do mundo, desse bem mineral, sendo o terceiro maior produtor. Os dados apresentados no trabalho comprovam a importância da lavra de bauxita para a economia do país e a relevância deste trabalho. O sucesso de uma empresa de mineração está diretamente ligado ao planejamento estratégico de longo prazo. Ele tem o papel de determinar as melhores opções de desenvolvimento de uma mina além de estudar a sequência ótima a ser adotada pela operação de mina na lavra do minério. Este trabalho tem o objetivo de solucionar um trade-off entre dois platôs de bauxita e mostra dados que evidenciam a melhor opção para o negócio. O estudo seguiu as etapas de otimização e operacionalização de cava, sequenciamento de mina e construção de cenários de lavra operacionais e 'Best Case'.

Palavras-chave: Planejamento de longo prazo, Mineração, Bauxita, Trade-off, Sequenciamento, Otimização.

ABSTRACT

Mining is an essential activity for society, as it has enabled a revolution in transportation systems, the progress of civil construction, improvements in health areas, etc. In Brazil, the mining industry has historically been one of the most important economic activities, creating thousands of direct and indirect jobs as the example of bauxite ore. Brazil has one of the ten largest reserves in the world and is among the three largest producers of this mineral. It confirms the importance of bauxite mining for the country's economy and the relevance of this paper. The success of a mining company is deeply connected to long-term strategic planning. It has the role of determining the best development options for a mine and studying the optimum sequence to mine the ore. This paper aims to solve a trade-off between two bauxite plateaus, presents data that indicates the best option for the business. This study followed the stages of pit optimization and operationalization, mine sequencing and construction of operating scenarios and 'Best Case'.

Keywords: Long-term mine planning, Mining, Bauxite, Trade-off, Sequencing, Optimization.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Localização das principais reservas de alumínio, ouro, cobre, ferro, manganês, nióbio, níquel e estanho.	18
Figura 2 - Tratores D11 utilizados no decapeamento em mina de bauxita.	23
Figura 3 - Operações unitárias na lavra em tiras.	24
Figura 4 - Amostragem aleatória simples.	27
Figura 5 - Amostragem aleatória estratificada.	27
Figura 6 - Amostragem aleatória sistemática.	28
Figura 7 - Modelo de blocos conceitual.	31
Figura 8 - Limite otimizado superposto ao modelo de blocos	32
Figura 9 - Técnica dos cones flutuantes para determinação da cava ótima.	33
Figura 10 - Página inicial de acesso ao Minesight 3D.	36
Figura 11 - MSEP - Ferramenta utilizada para determinação da cava ótima.	37
Figura 12 - Platô A - Mina de bauxita no Pará.	42
Figura 13 - Platô B - Mina de bauxita no Pará.	42
Figura 14 - Cenário do melhor caso considerando a escala de produção 1.	43
Figura 15 - Cenário operacional considerando a escala de produção 1.	44
Figura 16 - Cenário de melhor caso considerando a escala de produção 2.	45
Figura 17 - Cenário operacional considerando a escala de produção 2.	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Reserva e produção mundial.....	19
Tabela 2 - Produção anual bruta de bauxita (ROM)	19
Tabela 3 - Produção beneficiada - 2015: Substâncias e unidades da Federação ...	20
Tabela 4 - Produção comercializada de bauxita - 2015: Substâncias e unidades da Federação.....	20
Tabela 5 - Porte e modalidade de lavra das minas.....	20
Tabela 6 - Porte das usinas – 2015.....	21
Tabela 7 - Principais empresas produtoras – 2015.	21
Tabela 8 - Valor das exportações - Principais substâncias metálicas – 2015.	21
Tabela 9 - Compensação financeira pela exploração mineral – 2015.	21
Tabela 10 - Outorgas de títulos minerários – 2015.....	22

Lista de abreviaturas e siglas

FCD – Fluxo de Caixa descontado;

LG - Lerchs-Grossman;

LOM – *Life of Mine*;

VPL - Valor Presente Líquido;

PR - Período de Retorno;

ROM – *Run of Mine*;

WACC - Custo Médio Ponderado de Capital.

Sumário

1	Introdução.....	12
2	Objetivos.....	14
2.1	Objetivos Gerais.....	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	Justificativa e relevância	15
4	Revisão Bibliográfica.....	16
4.1.1	Bauxita.....	16
4.1.2	Formação de bauxita no Brasil	17
4.1.3	Oferta mundial e posicionamento do Brasil no mercado	18
4.1.4	Lavra em tiras.....	22
4.2	Planejamento de mina	24
4.2.1	Geoestatística	25
4.2.2	Métodos de determinação de uma cava	30
5	Metodologia	34
6	Desenvolvimento.....	35
6.1	Fatores considerados no projeto e no sequenciamento.....	35
6.1.1	Função benefício.....	35
6.1.2	Sequenciamento de mina	37
6.1.3	Capex, Opex e Período de Retorno	39
6.1.4	Maximização de VPL e Fluxo de Caixa.....	40
7	Resultados.....	42
8	Conclusão.....	48
9	Referências Bibliográficas	49

1 Introdução

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (2016), pode-se definir a mineração como “a extração de minerais existentes nas rochas e/ou no solo”. No Brasil, a mineração existe desde a época em que o país era uma colônia portuguesa, que exploraram grande parcela do território brasileiro em busca de ouro e outros materiais. Este é um dos fatos que levou a atividade mineira a se tornar um dos mais importantes setores da economia nacional (CERIBELI e AGUIAR, 2015).

A partir dos seus produtos, a mineração viabilizou uma série de revoluções na maneira em que o homem vive. Um exemplo disto é a revolução industrial e a revolução dos meios de transporte. Estes fenômenos proporcionaram melhor qualidade de vida ao homem, subsidiaram produtos essenciais ao dia a dia e promoveram a globalização de serviços. Isto evidencia a existência de uma relação direta entre o aumento do índice de desenvolvimento humano (IDH) e o consumo de bens minerais, indicando que a mineração é indispensável para a civilização (CERIBELI e AGUIAR, 2015).

Quando consideradas apenas as atividades que exploram minerais, pode-se subdividir a mineração nas atividades de lavra e beneficiamento de minérios. A primeira caracteriza-se pelas operações diretas de exploração do minério e a segunda objetiva a alteração de sua granulometria, composição, teor, entre outras características à fim de adequá-los às especificações do mercado consumidor. Ao final das etapas de lavra e tratamento, o produto gerado normalmente representa uma fração do volume de material que foi efetivamente extraído do ROM (“run of mine”). Isto significa que resíduos são gerados durante o processo e que há a necessidade de dispor de forma adequada este material, que a princípio não possui valor econômico. Este material é denominado rejeito de mineração. (FERREIRA, 2016).

Uma das etapas mais importantes para o sucesso de um empreendimento mineiro é o planejamento estratégico de lavra. Silva (2008), define esta etapa da mineração

como aquela que irá determinar qual o melhor projeto a ser desenvolvido além de definir a sequência ótima de frentes a serem lavradas pela operação de mina. Enquanto isso, Peroni (2002) explica que o objetivo do planejamento estratégico de lavra é garantir informações suficientes para que um engenheiro de minas decida o potencial de lavar um depósito mineral, a partir de dados estimados do mesmo. Este trabalho tem foco no planejamento de longo prazo de uma mina de bauxita, utilizando técnicas e softwares reconhecidos pela academia e pelo mercado.

2 Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

Pretende-se através deste trabalho, analisar as variáveis que envolvem a tomada da melhor decisão de uma empresa de mineração entre dois platôs de bauxita disponíveis. Esta análise terá foco nos benefícios trazidos pelo planejamento de longo prazo e a construção de cenários de sequenciamento que permitam a maximização do Valor Presente Líquido (VPL) do projeto.

2.2 Objetivos específicos

Para o alcance do objetivo geral, os objetivos específicos a serem seguidos incluem:

- Distinguir as diferenças entre planejamento de curto, médio e longo prazo, assim como destacar a importância da geoestatística e dos softwares de planejamento existentes atualmente. O foco será no software Minesight;
- Analisar as consequências da tomada de decisão do platô de bauxita a ser escolhido e investigar os principais fatores que a influenciam;
- Construir cenários de produção e realizar o sequenciamento da mina;
- Definir a ordem de lavra dos platôs disponíveis pela empresa e justificar a tomada de decisão.

3 Justificativa e relevância

O Brasil é um país cujo desenvolvimento econômico está historicamente atrelado à indústria mineral. De acordo com Ceribeli e Aguiar (2015), a mineração figura entre uma das indústrias que mais trazem investimentos para o Brasil, com números na faixa de 15 bilhões de dólares anuais. A ordem de grandeza destes investimentos, somados à quantidade de empregos diretos e indiretos gerados na mineração, confirmam a relevância de estudos que visam contribuir com o setor.

Em um mundo onde a mineração apresenta desafios cada vez maiores e cenários com crescentes níveis de complexidade, o planejamento estratégico de longo prazo vem sendo alvo de investimentos por parte das mineradoras e de maior atenção do meio acadêmico. De acordo com Dimitrakopoulos (2018), o planejamento de mina é o mais exigente, confuso e importante aspecto técnico de empreendimentos mineiros, da engenharia de minas e da indústria mineral. Somados aos fatores enumerados, cita-se ainda a relevância da lavra de bauxita no mundo que, de acordo com Santana (2014), apresenta reservas conhecidas de 25.6 bilhões de toneladas no mundo.

A mineração enfrenta cenários cada vez mais desafiadores, devido à complexidade da lavra de corpos minerais, volatilidade do mercado, etc. Sua matéria prima são recursos não renováveis, evidenciando a importância de realizar um planejamento estratégico efetivo, que alcance os melhores resultados e garanta a viabilidade da mina. Este trabalho tem o objetivo de apresentar conceitos essenciais na área de planejamento de lavra e descrever os métodos utilizados na tomada de decisão em um trade-off entre platôs de bauxita. Além disso, busca fomentar novas tecnologias, discutir soluções propostas e promover o aprendizado na área de planejamento de longo prazo.

4 Revisão Bibliográfica

4.1.1 Bauxita

Bauxita é a palavra utilizada para denominar um dos minerais-minério de alumínio. É um material heterogêneo, normalmente constituído por óxidos de ferro e titânio, hidróxidos de ferro, argilominerais, minerais de sílica e o hidróxido de alumínio (BIGARELLA *et al.*, 2007, *apud* OLIVEIRA, 2011).

De acordo com Oliveira (2011), o nome 'bauxita' tem suas raízes ligadas ao local onde foi primeiramente encontrada, a região de Les Baux, que fica localizada no sul da França. Esta descoberta é atribuída a Berthier, em 1821, data anterior ao conhecimento do próprio elemento químico do alumínio, que foi isolado em 1825 (OLIVEIRA, 2011). A partir daí, aumentaram-se as percepções de que o metal poderia ter aplicação em diversas áreas.

Mártires (2001) explica que para que o alumínio seja obtido em escala industrial, o seu minério (bauxita) deve passar pelos processos de moagem e de adição de solução de soda cáustica, dando origem a uma pasta. Esta pasta sofre um processo de aquecimento sob pressão e recebe a adição de nova carga de soda cáustica, dissolvendo-se em uma solução que posteriormente será sedimentada e, por fim, filtrada, para que as impurezas sejam eliminadas. As operações descritas anteriormente são conhecidas pelo nome de processo Bayer, que se trata de um processamento químico.

O processo Bayer é realizado em refinarias, nas quais a bauxita se transforma em alumina calcinada, que será utilizada nas fases posteriores, no processo eletrolítico. Por fim, a alumina será precipitada através de uma reação química chamada cristalização por semente. A alumina é então lavada e aquecida para que ocorra a sua secagem para a produção do óxido de alumínio com alto grau de pureza, que é chamado de alumina (MÁRTIRES, 2001).

No caso em que a alumina não é o produto de uma refinaria, este pó branco formado por óxido de alumínio será utilizado na produção do alumínio que, após sofrer o processo de redução por carbono em altas temperaturas, será transformado em alumínio metálico (MÁRTIRES, 2001). Este processo eletrolítico, que ocorre a partir da passagem de uma corrente elétrica, é conhecido como Hall-Hérault. Trata-se de uma homenagem aos dois pesquisadores, Charles Martin Hall e Paul Louis Toussaint Heroult, que descobriram este processo na mesma época (MÁRTIRES, 2001).

4.1.2 Formação de bauxita no Brasil

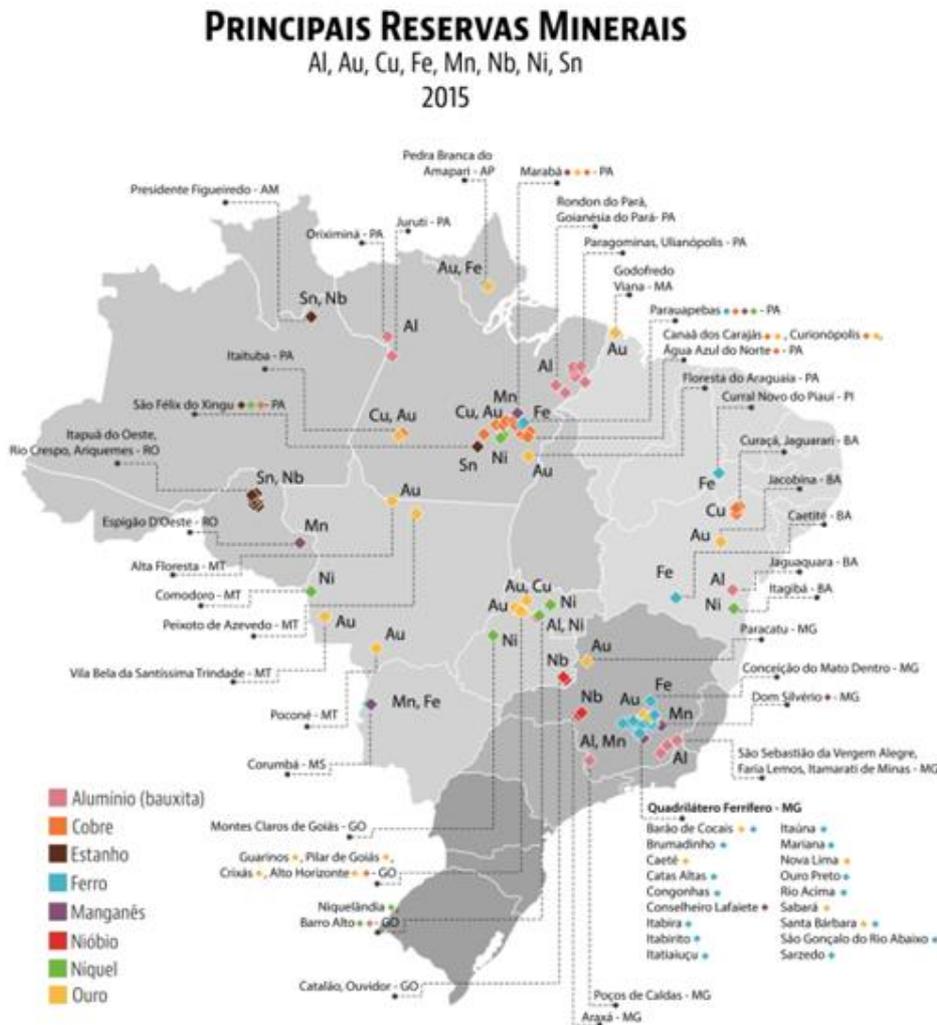
De acordo com Oliveira (2001), o aumento do grau de conhecimento sobre as bauxitas formadas no Brasil, bem como o histórico de descobertas, mostra que este minério teve origem laterítica. Isto significa que elas foram formadas por alterações hidrolíticas, em climas quentes e úmidos.

Mártires (2001), resume que a bauxita pode ser dividida em duas categorias: bauxita de grau metalúrgico e a bauxita de grau refratário. A primeira apresenta fração mínima de 55% de Al_2O_3 , máxima de 7% de SiO_2 reativa, 8% de Fe_2O_3 e 4% de TiO_2 , enquanto a segunda apresenta as seguintes especificações em base calcinada: Parcela mínima de 85% (em peso) de Al_2O_3 , máxima de 7% de SiO_2 reativa, máxima de 3,75% de Fe_2O_3 e máxima de 3,75% de TiO_2 com densidade relativa de 3,1. Estima-se que 95% da bauxita brasileira é do tipo metalúrgica e 5% refratária (MÁRTIRES, 2001).

Em sua maioria, os depósitos de bauxita situados no território brasileiro são formados em platôs (CARVALHO, 1997, apud, OLIVEIRA, 2011). “Foram gerados in situ, [...] em condições tropicais úmidas, durante o Cenozóico. Ocupam amplas superfícies aplainadas ou onduladas, na forma de antigas superfícies de erosão expostas a intemperismo laterítico.” (OLIVEIRA, 2001)

A Figura 1 mostra a localização das principais reservas minerais no Brasil, incluindo as reservas de bauxita:

Figura 1 - Localização das principais reservas de alumínio, ouro, cobre, ferro, manganês, nióbio, níquel e estanho.



Retirado de: (Pinheiro, 2016)

4.1.3 Oferta mundial e posicionamento do Brasil no mercado

A maior parte das reservas de bauxita no mundo localizam-se em regiões tropicais e subtropicais (MÁRTIRES, 2001). De acordo com Santana (2014), as reservas de bauxita conhecidas no mundo são da ordem de 25.6 bilhões de toneladas (dados do ano de 2013). Dentre os países com maiores reservas, destacam-se a Guiné e a Austrália, com aproximadamente 7 e 6 bilhões de toneladas, respectivamente.

A produção mundial de bauxita no ano de 2013 foi de 257 milhões de toneladas. Os países que tiveram a maior produção foram a Austrália (77 milhões de toneladas), o

Chile (47 milhões de toneladas) e finalmente o Brasil (32,8 milhões de toneladas) (SANTANA, 2014). A Tabela 1 detalha as reservas mundiais em 2013, assim como a evolução da produção entre os anos de 2012 e 2013.

Tabela 1 - Reserva e produção mundial

Discriminação	Reservas ⁽¹⁾⁽²⁾ (10 ⁶ t)	Produção (10 ³ t)		
		Países	2012 (r)	2013 (p)
Brasil	714	33.260	32.867	12,7
Austrália	6.000	76.300	77.000	29,9
Chile	830	47.000	47.000	18,2
Indonésia	1.000	29.000	30.000	11,6
Índia	540	19.000	19.000	7,4
Guiné	7.400	17.800	17.000	6,6
Jamaica	2.000	9.340	9.500	3,7
Rússia	200	5.720	5.200	2,0
Cazaquistão	160	5.170	5.100	2,0
Outros países	6.850	14.830	15.250	5,9
TOTAL	25.694	257.420	257.917	100,0

Retirado de: (Santana, 2014)

4.1.3.1 Economia da bauxita no Brasil

Trazendo o contexto para o Brasil e detalhando o mercado de bauxita nacional, Pinheiro (2016) mostra que a classe dos minerais metálicos foi responsável por 76% do valor total da produção mineral. Destacam-se o alumínio, cobre, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel e ouro, que juntos representam 98,5% do valor da produção da classe dos metálicos. A produção anual bruta de bauxita (ROM), de acordo com Pinheiro (2016), é quantificada pela Tabela 2:

Tabela 2 - Produção anual bruta de bauxita (ROM)

Substância	Quantidade (ROM)		Contido		Teor Médio		
		t		t		%	Al ₂ O ₃
Alumínio (bauxita)	50.105.016	t	23.591.682	t	47,08	%	Al₂O₃
Pará	45.190.364	t	21.622.680	t	47,85	%	Al ₂ O ₃
Minas Gerais	3.546.508	t	1.322.758	t	37,30	%	Al ₂ O ₃
São Paulo	826.913	t	345.511	t	41,78	%	Al ₂ O ₃
Golás	532.231	t	296.683	t	55,74	%	Al ₂ O ₃
Santa Catarina	9.000	t	4.050	t	45,00	%	Al ₂ O ₃

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

O Estado do Pará se destaca com uma produção muito acima dos outros estados brasileiros. A Tabela 3 explicita os valores após o beneficiamento da bauxita.

Tabela 3 - Produção beneficiada - 2015: Substâncias e unidades da Federação

Substância	Quantidade		Contido		Teor Médio		
Alumínio (bauxita)	35.715.432	t	17.631.991	t	49,37	%	Al₂O₃
Pará	33.240.406	t	16.475.789	t	49,57	%	Al ₂ O ₃
Minas Gerais	1.732.392	t	758.151	t	43,76	%	Al ₂ O ₃
Goiás	527.102	t	305.192	t	57,90	%	Al ₂ O ₃
São Paulo	215.532	t	92.859	t	43,08	%	Al ₂ O ₃

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

A Tabela 4 destaca a produção comercializada de bauxita, no estado bruto e após o seu beneficiamento:

Tabela 4 - Produção comercializada de bauxita - 2015: Substâncias e unidades da Federação

Substância	BRUTA		BENEFICIADA		VALOR TOTAL (R\$)		
	Quantidade	Valor (R\$)	Quantidade	Valor (R\$)			
BRASIL		397.290.616		67.103.652.248	67.500.942.863		
Alumínio (bauxita)	935.984	t	31.507.231	35.709.506	t	3.500.399.263	3.531.906.494
Pará			33.372.721	t	3.346.976.798	3.346.976.798	
Minas Gerais	911.695	t	30.929.319	1.633.808	t	113.648.332	144.577.651
Goiás	15.289	t	397.912	487.445	t	25.572.828	25.970.740
São Paulo			215.532	t	14.201.305	14.201.305	
Santa Catarina	9.000	t	180.000			180.000	

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

A Tabela 5 aborda o porte e a modalidade de lavra das minas de bauxita no Brasil.

Tabela 5 - Porte e modalidade de lavra das minas.

Substância	Grandes			Médias			Pequenas			Subtotal			TOTAL
	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	
BRASIL	64	-	3	49	2	17	49	-	5	162	2	25	189
Alumínio (bauxita)	4	-	-	7	-	-	13	-	-	24	-	-	24

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

Segundo a Tabela 6, o país apresenta 3 usinas de grande porte, e um total de 11 usinas que beneficiam a bauxita.

Tabela 6 - Porte das usinas – 2015.

Substância	Grandes	Médias	Pequenas	TOTAL
BRASIL	44	32	18	94
Alumínio (bauxita)	3	5	3	11

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

A Tabela 7 mostra as principais empresas produtoras de bauxita no Brasil no ano de 2015, com destaque para a Mineração Rio Norte SA e para a Mineração Paragominas SA.

Tabela 7 - Principais empresas produtoras – 2015.

Empresa	UF	Participação (%) ⁽¹⁾
Alumínio (bauxita)		
Mineração Rio do Norte S.A.	PA	47,38
Mineração Paragominas S. A.	PA	33,19
Alcoa World Alumina Brasil Ltda.	PA	14,18
Companhia Brasileira de Alumínio	MG	3,13
MINERADORA SANTO EXPEDITO Ltda.	GO	0,72
Hindalco do Brasil Indústria e Comércio de Alumina Ltda.	MG	0,33

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

Pela

Tabela 8, nota-se que o alumínio corresponde a 13% da massa total de exportações do Brasil no ano de 2015.

Tabela 8 - Valor das exportações - Principais substâncias metálicas – 2015.

Substâncias	Tipo de produto				Total Geral ⁽¹⁾
	Bens primários	Semimanufaturados	Manufaturados	Compostos químicos	
Total ⁽¹⁾	16.627.242.458	8.569.261.514	411.732.009	60.151.282	25.668.387.263
Alumínio	270.718.106	3.093.284.215	-	-	3.364.002.321

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

A

Tabela 9 mostra a participação da mineração de bauxita na arrecadação da CFEM em 2015.

Tabela 9 - Compensação financeira pela exploração mineral – 2015.

Substância	CFEM arrecadada (R\$)	Participação (%) ⁽²⁾
Total	1.149.437.730	
Alumínio (bauxita)	89.401.138	7,78

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

Enquanto isso, a Tabela 10 indica a outorga de títulos minerários de bauxita no Brasil

Tabela 10 - Outorgas de títulos minerários – 2015.

Substância	Autorização de Pesquisa	Concessão de Lavra	Permissão de Lavra Garimpeira
Total	7.469	34	123
Alumínio (bauxita)	248	7	-

Retirado de: (Pinheiro, 2016)

4.1.4 Lavra em tiras

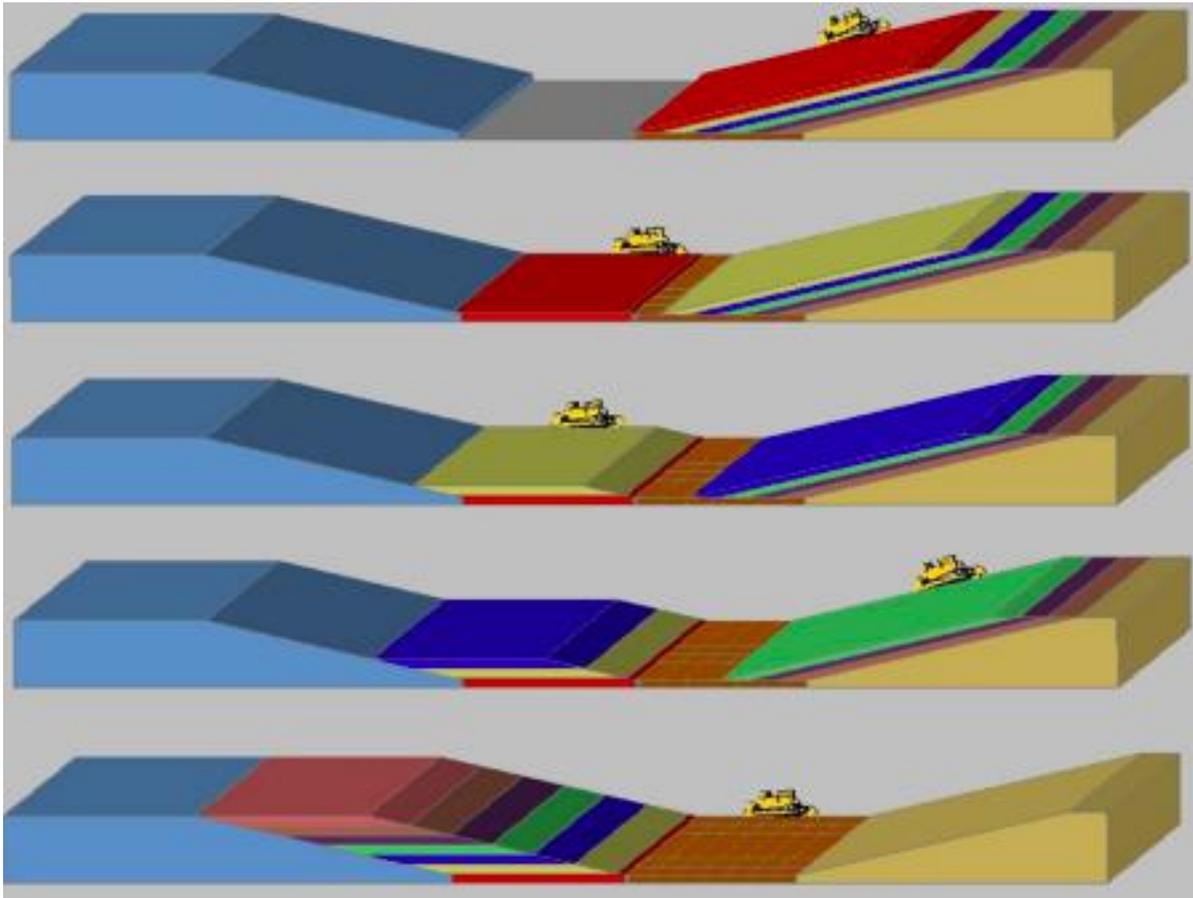
De acordo com Curi (2017), os principais métodos de lavra a céu aberto são a lavra por bancadas, a lavra em tiras e lavra de pedreiras. A lavra *Open Cast* ou *Strip Mining*, é o termo em inglês para a lavra em tiras, sendo o principal método utilizado nas lavras de carvão nos EUA e no continente europeu (CURI, 2017). Além disso, este método é amplamente empregado em minas de bauxita espalhadas pelo mundo.

Curi (2017, p. 75) explica que:

O método de lavra em tiras é mais aplicado em depósitos tabulares ou com camadas horizontais com pouca espessura de capeamento. Como característica, propicia grande escala de produção, proporcionando até menor custo operacional e maior produtividade do que a lavra por bancadas em certas circunstâncias.

Existe, porém, uma grande diferença quando estes dois métodos são comparados, que é o fato de não haver a necessidade de transportar o capeamento para pilhas de estéril na lavra em tiras (com exceção do material extraído pelo “box cut”). Ao contrário disto, o estéril é lançado nas tiras adjacentes, que foram previamente lavradas (CURI, 2017). A Figura 2 mostra o decapeamento sendo realizado por tratores D11, que posicionam o estéril (capeamento) em tiras previamente lavradas..

Figura 2 - Tratores D11 utilizados no decapeamento em mina de bauxita.



Retirado de: (Abreu, 2017)

Abreu (2017), destaca também que as escavações podem ser realizadas por draglines, escavadeiras, bucket-wheel, carregadeiras e scrapers.

As operações de lavra normalmente necessárias à lavra em tiras são: supressão vegetal, decapeamento, desmonte mecânico ou por explosivos, escavação, carregamento, transporte e recuperação das áreas degradadas pela extração do minério (GATTI e BARROS, 2003, apud, SILVA, 2006). A Figura 3 abaixo ilustra estas operações:

Figura 3 - Operações unitárias na lavra em tiras.



Retirado de: (Abreu, 2017)

De acordo com HARTMAN e MUTMANSKY, 2002, apud, ABREU, 2017:

As operações auxiliares incluem a reabilitação ambiental da área, estabilidade dos taludes, construção e manutenção de acessos para os caminhões, manutenção mecânica, drenagem e bombeamento do pit, comunicação, distribuição de energia, controle de poeira, saúde e segurança.

4.2 Planejamento de mina

Almeida (2017), explica que o planejamento de mina pode ser distinguido em 3 tipos, de acordo com os seus níveis hierárquicos:

- Planejamento de Curto Prazo – Operacional
- Planejamento de Médio Prazo – Tático
- Planejamento de Longo Prazo – Estratégico

O planejamento de longo prazo, que é o foco deste trabalho, é definido como: “[...] à forma por meio da qual uma empresa pretende aplicar uma determinada estratégia para atingir os objetivos propostos.” (ALMEIDA, 2017, p. 24)

De acordo com Thorley, 2012, apud, Almeida, 2017, os trabalhos referentes ao planejamento estratégico são iniciados nos estudos de pré-viabilidade e são mantidos durante a vida útil do projeto de mineração, com o objetivo de maximizar o VPL do empreendimento. Responsabiliza-se também por estudar o tempo de vida útil do projeto a partir da construção de planos (anuais a quinquenais), que são desenvolvidos abrangendo toda a vida útil da mina.

Enquanto isso, Almeida (2017) explica que o objetivo do planejamento de médio prazo se responsabiliza pela otimização de determinadas áreas da empresa e não a sua totalidade. Isso significa que essa área do planejamento decompõe os objetivos, estratégias e políticas que foram determinadas no modelo estratégico. Além disso, é responsável por estudar maneiras de utilizar os recursos disponíveis de uma maneira eficaz para a conclusão dos objetivos da empresa, seguindo as estratégias decididas e respeitando as suas políticas. Inclui planos trimestrais, semestrais e anuais.

Finalmente, Thorley, 2012, apud, Almeida, 2017 definem:

[...] o planejamento de curto prazo tem o objetivo de garantir a demanda da usina de beneficiamento em massa, qualidade ou teor de alimentação, obedecendo às premissas do plano de longo prazo. O planejamento de curto prazo compreende estágios progressivos que englobam planos anuais, trimestrais, mensais, semanais e diários. À medida que estes estágios evoluem, maiores níveis de certeza são exigidos com relação ao cronograma de manutenção e disponibilidade de equipamentos, demanda da usina, avanços de lavra nos bancos, avanço de depósito e garantia da disponibilidade e flexibilidade de acessos aos bancos de lavra.

4.2.1 Geoestatística

A Geoestatística é uma ramificação da estatística que tem suas origens na indústria mineira no início da década de 1950 e foi criada com o intuito de auxiliar a estimativa de reservas minerais (ARROYO ORTIZ, 2008). A partir de observações amostras de natureza quantitativa ou qualitativa, a geoestatística procura inferir propriedades de fenômenos espaciais desconhecidos que representam a população

das quais as amostras foram extraídas.” (YAMAMOTO & LANDIM, 2013, apud, SOUZA, 2016).

Alternativamente, Arroyo Ortiz (2008), define que “O objetivo de um estudo geoestatístico de uma determinada variável é realizar a sua caracterização espacial, podendo ir até a determinação da incerteza associada nos processos de inferência ou estimativa envolvidos.”

De acordo com Souza (2016), a finalidade ao se estudar uma variável pode compreender desde a determinação de incertezas que estão associadas ao seu processo de inferência ou estimativa até a realização de sua caracterização espacial.

Arroyo Ortiz (2008) explica que uma análise geoestatística pode envolver 3 etapas:

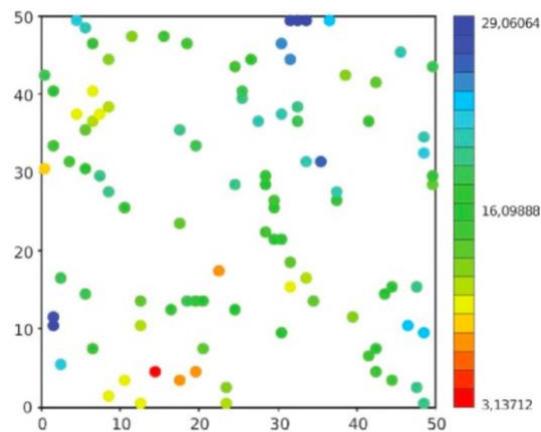
- Análise: tem o objetivo de descrever a variabilidade espacial do fenômeno que está sendo estudado.
- Inferência: procura estimar os valores de uma variável distribuída no espaço em locais que não fizeram parte da amostragem. Normalmente é chamada de Krigagem.
- Simulação: é a construção de “[...] realizações equiprováveis ou igualmente representativas do fenômeno em estudo.”

O fenômeno espacial, que também é chamado de população, “é o conjunto de todos os valores possíveis da variável de interesse, que define a distribuição e variabilidades espaciais dessa variável dentro de um dado domínio em 2D ou 3D.” (YAMAMOTO & LANDIM, 2013). Souza (2016) afirma que a geoestatística difere-se de outros métodos de inferência que se baseiam em pontos amostrais, por conseguir extrair o melhor do banco de dados utilizados e ao mesmo tempo minimizar os erros de estimativa. Outra vantagem deste método é a possibilidade de se calcular a incerteza associada à estimativa.

De acordo com Yamamoto & Landim (2013), a amostra representa um subconjunto de valores da população. Caso a amostra seja representativa, ela deve

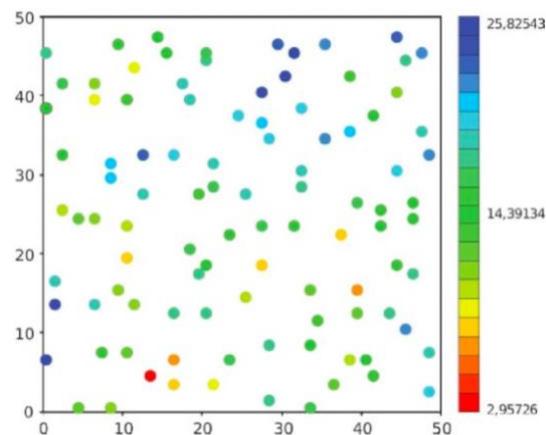
reproduzir “[...] a distribuição e a variabilidade espaciais tanto em tamanho, isto é, número de pontos de dados, como em termo de distribuição dos pontos no domínio a ser estudado”. Deve realizar-se um planejamento para que seja feita a amostragem. Este planejamento pode definir a coleta das unidades de amostragem de 3 diferentes formas: aleatória simples, aleatória estratificada e aleatória sistemática. A Figura 4, a Figura 5 e a Figura 6 ilustram estas diferentes formas de coleta de amostragem, respectivamente.

Figura 4 - Amostragem aleatória simples.



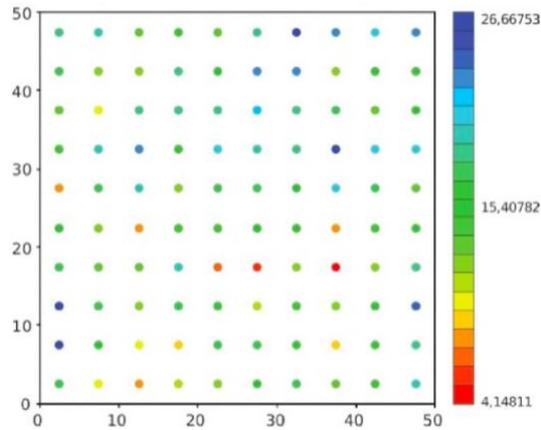
Retirado de: (Yamamoto & Landim, 2013)

Figura 5 - Amostragem aleatória estratificada.



Retirado de: (Yamamoto & Landim, 2013)

Figura 6 - Amostragem aleatória sistemática.



Retirado de: (Yamamoto & Landim, 2013)

4.2.1.1 Krigagem

Este trabalho apresentará detalhes sobre a krigagem ordinária, que foi o método geoestatístico utilizado na estimativa do depósito de bauxita ao qual este estudo se refere.

A krigagem é um estimador geoestatístico introduzido por Matheron, e pode ser definido como “uma estimativa de um atributo (teor de minério), em um volume ou suporte através da ponderação de todas as amostras disponíveis onde os pesos são obtidos com a restrição de que a somatória dos mesmos seja igual a um e a variância do erro de estimativa seja mínima” (ARROYO ORTIZ, 2008). A Krigagem é, em sua origem, um estimador linear. Existem variações desta técnica, porém as técnicas básicas de Krigagem são: Krigagem simples e Krigagem ordinária (ARROYO ORTIZ, 2008).

Na krigagem ordinária, determina-se um valor de uma amostra em uma certa posição x_0 utilizando os n dados vizinhos $Z(x_i)$ por meio de uma combinação linear empregando os pesos ou ponderadores λ_i , como mostrado na equação abaixo:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x_0) z(x_i) \quad [1]$$

Lisboa (2018) explica que o conjunto de amostras que são utilizadas em uma estimativa, são chamadas de vizinhança de estimativa. Arroyo Ortiz (2008) esclarece que da mesma forma que na krigagem simples, na krigagem ordinária busca-se minimizar a variância do erro de estimativa, igualando a somatório dos pesos igual a um (condição de não enviesamento). Esta condição gerará um sistema de equações que será resolvido a partir de um multiplicador de *Lagrange* (μ). Este procedimento irá gerar $(n+1)$ equações, com $(n+1)$ incógnitas, onde n representam o número de ponderadores. Sendo assim, o sistema descrito (sistema da krigagem) poderá ser definido a partir da covariância ou semi-variograma, como mostrado na equação 2:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j(x_0) C(x_i - x_j) - \mu(x_0) = C(x_i - x_0) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad [2]$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j(x_0) = 1 \quad [3]$$

Arroyo Ortiz (2008) define ainda que a variância da krigagem pode ser expressa por:

$$\sigma_{k0}^2(x_0) = C(0) + \mu(x_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i(x_0) C(x_i - x_0) \quad [4]$$

Lisboa (2018) explica que a variância do erro de estimativa é uma maneira de medir a adequação de um cenário a ser utilizado em uma certa estimativa. Arroyo Ortiz (2008) completa que a krigagem é uma ferramenta geoestatística utilizada devido ao seu melhor cálculo da estimativa a partir da minimização da variância do erro de estimativa. Além disso, apresenta caráter não tendencioso (ARROYO ORTIZ, 2008). As estimativas feitas por meio da krigagem estão associadas aos melhores estimadores não enviesados. São não enviesados porque a média do erro de estimativa é zero e linear, já que se trata de uma combinação linear de amostras vizinhas. (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989, apud, ARROYO ORTIZ, 2008). É melhor porque a determinação dos fatores de ponderação ocorre de modo que a variância da estimativa seja a menor possível (ISAAKS E SRIVASTAVA, 1989, apud, ARROYO ORTIZ, 2008).

4.2.2 Métodos de determinação de uma cava

A determinação da cava final de um projeto depende de uma série de fatores econômicos, geotécnicos e geométricos e representa um desafio aos engenheiros de minas. De acordo com Do Carmo (2001), os limites da cava final devem ser estabelecidos na fase inicial do planejamento de lavra. Isto possibilita a redefinição dos limites da cava de acordo com a mudança de contextos econômicos, tecnológicos e ambientais. Estas mudanças devem ser avaliadas de maneira constante para que o máximo valor presente líquido possa ser alcançado.

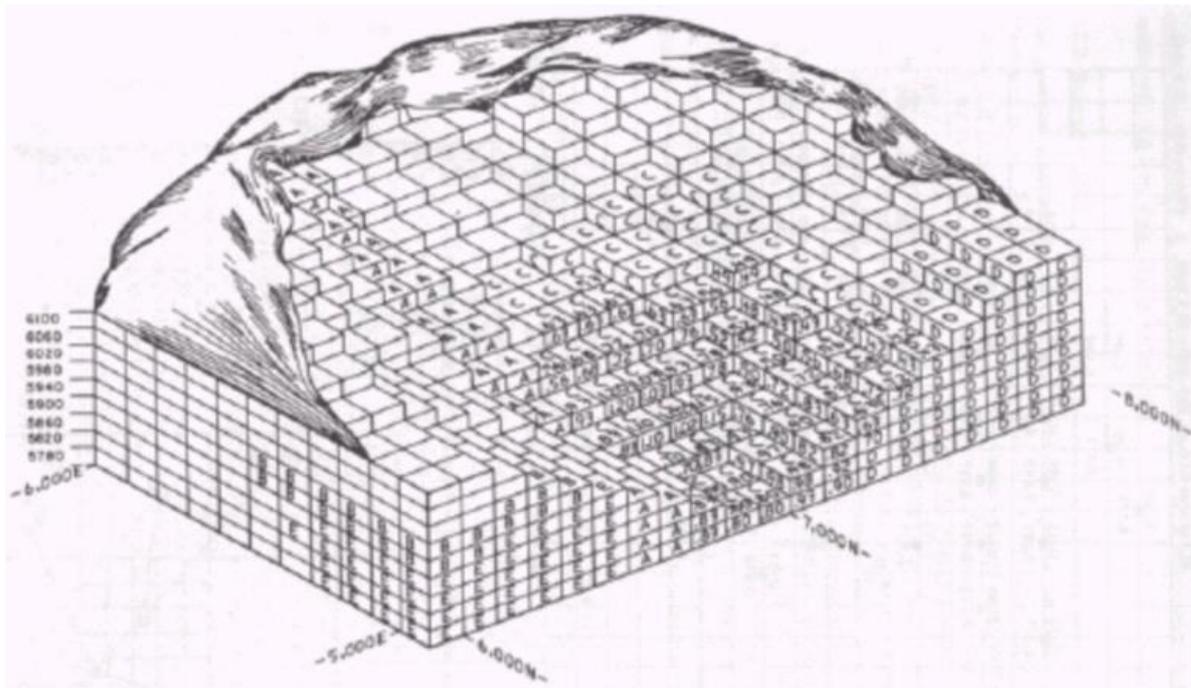
De acordo com Silva (2008), a otimização de cavas finais tem sido uma das áreas mais ativas nos últimos 40 anos, incentivando a área de pesquisa operacional e a criação de algoritmos. Na maioria das vezes, estes algoritmos utilizam o critério de maximização de VPL das cavas projetadas, incorporando as restrições apresentadas pelos projetos (SILVA, 2008).

De acordo com Poniewierski (2017), antes do desenvolvimento de métodos computacionais, engenheiros de minas utilizavam métodos de interpretação manuais, utilizando desenhos e seções até o design da cava final. Hoje em dia, as técnicas utilizadas para determinação da cava final são computacionais e incluem o algoritmo de Lerchs e Grossman, o método dos cones flutuantes e o Pseudoflow (variação do algoritmo de Lerchs-Grossman).

4.2.2.1 Algoritmo de Lerchs-Grossman

O primeiro algoritmo especificamente voltado à determinação de cavas finais surgiu em 1965. Lerchs e Grossman utilizaram a programação dinâmica e um algoritmo de otimização bidimensional de cavas para realizar a discretização de uma jazida em blocos tecnológicos e promover um tratamento algébrico (NORONHA e GRIPP, 2001, apud, SILVA, 2008). A Figura 7 abaixo ilustra um modelo de blocos conceitual.

Figura 7 - Modelo de blocos conceitual.



Retirado de: (Peroni, 2002)

O método trabalha a partir de um modelo de blocos, criado segundo um modelo geológico, e progressivamente constrói matrizes de blocos relacionados que devem, ou não, ser lavrados. A matriz resultante define uma superfície de cava final, que possui o maior valor econômico possível, sujeito a restrições como ângulos de taludes gerais para a cava. Esta superfície inclui todo bloco que deve ser lavrado, considerando o estéril a ser retirado, de modo a torná-lo acessível. Ele também desconsidera todo bloco que não deve ser lavrado. Estes blocos são dispostos segundo um valor econômico total positivo, consistindo no valor do produto recuperável, diminuído dos custos de lavra e beneficiamento. Blocos de estéril e de ar têm valores negativos e zero, respectivamente. Os objetivos típicos são: maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) ou a Taxa Interna de Retorno (TIR). (WHITTLE, 1990)

Considerando a concepção de otimização de cava existente nos dias atuais, uma série de algoritmos foram criados com este objetivo. Entretanto, aqueles que possuem maiores utilizações e são mais difundidos são o algoritmo descrito neste

item (Lerchs-Grossman) e a técnica dos cones flutuantes, que será apresentada no item 4.2.2.2. (PERONI, 2012).

A Figura 8 mostra os limites de uma cava final em 2D, criada a partir da utilização do algoritmo de Lerchs-Grossman.

Figura 8 - Limite otimizado superposto ao modelo de blocos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
①																				
①				-4	-4	8	12	12	0	-4	-4	-4	-4	-4						
②				-4	0	12	12	8	-4	-4	-4	-4								
③					-4	8	12	12	0	-4										
④						0	12	12	8	-4										
⑤							8	12	12											
⑥								12												
⑦																				
⑧																				
⑨	Cum. Sum.			-4	-12	-8	24	80	136	148	132	120	112	108						

Retirado de: (Peroni, 2002)

4.2.2.2 Cones Flutuantes

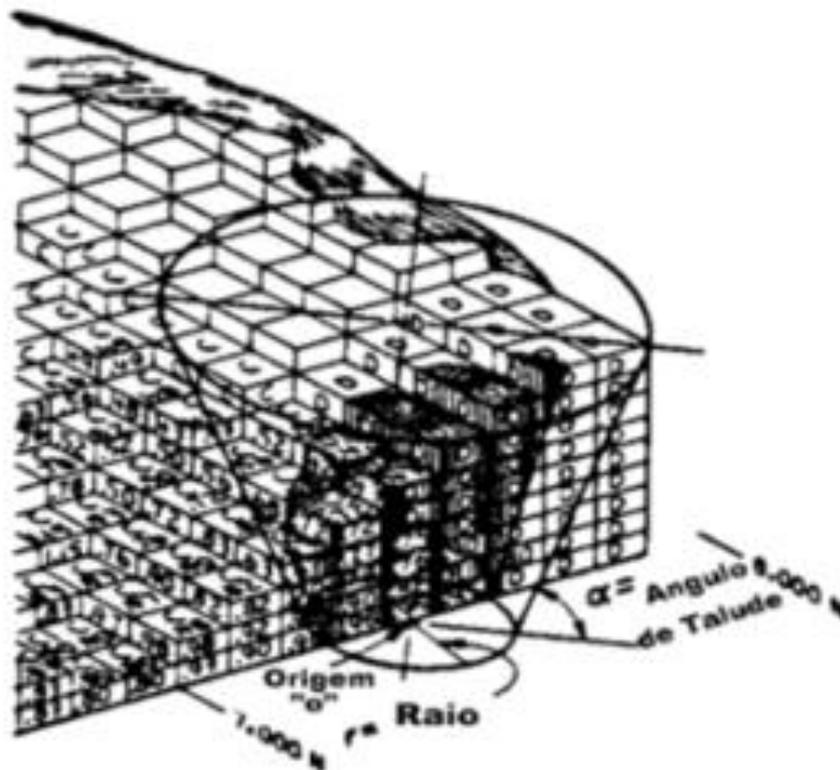
A técnica dos cones flutuantes, juntamente com o algoritmo de Lerchs-Grossman, são os algoritmos mais populares e utilizados atualmente. De acordo com Peroni (2012), este método “[...]considera se o material que estiver contido dentro do cone (construído por taludes respeitando as restrições físicas e geomecânicas locais) contém uma quantidade de minério que proporcione um retorno financeiro, dessa maneira o cone considerado será extraído. O processo se repete até que não existam mais cones economicamente mineráveis.”

Vários são os algoritmos que utilizam desta técnica, porém, segundo Peroni (2012), os algoritmos baseados neste tipo de abordagem podem não resultar em uma resposta ótima. De acordo com Do Carmo (2001), “[...]o método dos cones móveis positivos pode falhar no projeto de cavas ótimas verdadeiras dependendo da direção utilizada na procura de blocos de valor econômico positivo.” Isto também é válido em situações onde os blocos de minério são procurados no sentido do topo para a base, no qual o método pode não garantir o resultado de uma cava otimizada (DO CARMO, 2001).

Embora possam não gerar respostas ótimas, os algoritmos baseados no método dos cones flutuantes podem gerar resultados de interpretação rápida e intuitiva (PERONI, 2012). Ainda, existem algoritmos que tentam corrigir as falhas do método, como o algoritmo de Korobov. De acordo com Do Carmo (2001), este possui o objetivo de melhorar o método dos cones flutuantes “[...] considerando cones com um bloco de minério como seu bloco básico. A ideia é que um bloco de minério gera lucro que paga os custos de remoção dos seus blocos sobrejacentes. Assim, o algoritmo considera um bloco de minério e os blocos sobrepostos que seriam abandonados. Isto acaba diminuindo o “peso” do bloco de minério e aumentando o “peso” dos blocos que seriam excluídos pela mesma quantia. A todos os cones que possuem um bloco básico é incluído um “peso” positivo ao término do algoritmo na cava final.”

A Figura 9 ilustra a técnica dos cones flutuantes em um modelo de blocos.

Figura 9 - Técnica dos cones flutuantes para determinação da cava ótima.



Retirado de: (Carmo, 2001)

4.2.2.3 Pseudoflow

De acordo com Poniewierski (2017), o pseudoflow é uma variação do algoritmo Lerchs-Grossman. Porém, ele possui uma melhor eficiência computacional, tendo sido desenvolvido cerca de 35 anos após o algoritmo original de Lerchs-Grossman (1965). Atualmente existem ao menos 3 incorporações comerciais deste algoritmo, incluindo os softwares da Deswik e Minesight.

Após o desenvolvimento do algoritmo de Lerchs-Grossman, o desenvolvimento de algoritmos de fluxo de rede continuou e hoje em dia, os algoritmos considerados mais eficientes são os algoritmos Pseudoflow desenvolvidos pelo time do professor Dorit Hochbaum na Universidade da Califórnia (PONIEWIERSKI, 2017). Poniewierski (2017) explica ainda que o Pseudoflow deu nova força à otimização de cava baseado em Lerchs-Grossman, resolvendo problemas em uma velocidade de 2 a 50 vezes mais rápida.

5 Metodologia

Este capítulo traz a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, que inclui as seguintes etapas:

- Introdução aos conceitos de mineração, com foco no planejamento de longo prazo;
- Síntese do método geoestatístico utilizado na estimativa de recursos e reservas da mina: a krigagem ordinária;
- Descrição de algoritmos utilizados na indústria mineral para a determinação de cava ótima, dando destaque ao Pseudoflow.
- Definição de parâmetros econômicos importantes para a realização de um projeto mineiro e do sequenciamento de mina;
- Construção de cenários que comprovam, por meio de avaliações econômicas, qual o melhor platô a ser lavrado primeiro.

6 Desenvolvimento

6.1 Fatores considerados no projeto e no sequenciamento

Diversos são os fatores a serem considerados na realização de projetos de engenharia. Este capítulo será dedicado ao entendimento, definição e detalhamento dos fatores que foram utilizados no desenvolvimento do planejamento estratégico de mina de longo prazo, cujo objetivo era a resolução de um trade off entre platôs de bauxita.

6.1.1 Função benefício

A função benefício é parte essencial no planejamento de mina. De acordo com Assis, 2016, apud, Changanane, 2017, a função benefício se trata de uma expressão matemática que é capaz de abranger todas as variáveis envolvidas no projeto mineiro em questão, transformando-as em valores. Estes valores serão atribuídos a cada bloco do modelo de blocos utilizado e serão parte essencial nas próximas etapas do projeto e até mesmo na determinação da viabilidade ou não da lavra do minério em certas partes da mina. Isso foi assunto no item 4.2.2, que explica os métodos de determinação de cavas. De forma mais simples, a função benefício é o que determinará o valor econômico que cada bloco de estéril e minério tem. Este valor é a soma das receitas arrecadas, subtraída da soma dos custos envolvidos no processo (CARLI, 2013, apud, CHANGANANE, 2017), na equação (5):

$$\text{Benefício} = \text{Receita} - \text{Custos} \quad [5]$$

Existem diferentes formas de introduzir uma função nos softwares de planejamento de minas. O software utilizado no trabalho foi o MS3D da Minesight, que possibilita a inserção da função benefício a partir de scripts na linguagem Python. Estes scripts podem ser inseridos através de uma função no MSCompass ou através do Model Calculation Tool, que são ferramentas pertencentes ao módulo de MS3D.

A Figura 10 ilustra a página inicial do software MS3D:

Figura 10 - Página inicial de acesso ao Minesight 3D.



Retirado de: Acervo Pessoal

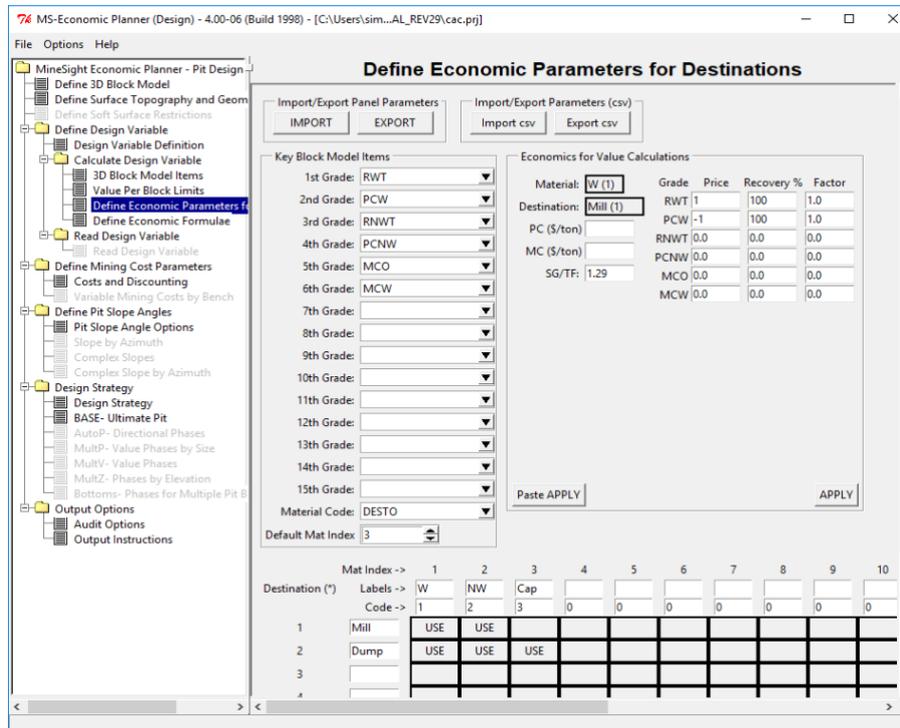
Após a atribuição da função benefício aos blocos do modelo de blocos, pode fazer-se uma série de manipulações e estudos através do Minesight. Por exemplo:

- Quais blocos apresentam valor positivo?
- Quais blocos têm densidade superior a um determinado valor?
- Quais blocos apresentam recuperação superior a um determinado valor?

O próximo passo é a determinação da cava que representaria o maior valor de VPL, ou seja, a cava ótima. Neste caso, utiliza-se o Minesight Economic Planner, que pode ser acessado através do MS3D. A geração da cava final pode ser feita de duas maneiras: a partir da leitura da variável que representa o benefício do bloco, ou através da utilização de diversas variáveis que chegarão ao valor do benefício do bloco, por exemplo: Custo de supressão vegetal, custo de decapeamento, custo de transporte do minério, teores, custo de processamento, dentre outros.

Na Figura 11 é mostrada a interface do MSEP, ferramenta utilizada para a determinação da cava ótima:

Figura 11 - MSEP - Ferramenta utilizada para determinação da cava ótima.



Além de variáveis econômicas, pode-se também determinar ângulos máximos de talude, além da estratégia de design da cava ótima (Lerchs-Grossman, Pseudoflow e Cones flutuantes estão disponíveis).

Após a determinação da cava ótima, sua geometria é analisada e podem ser feitas modificações para torná-la operacional. Essas modificações referem-se principalmente à necessidade de abertura de box cut e tamanho de tiras. A cava operacional tem um VPL menor do que a cava ótima, justamente por fazer alterações que visam sua otimização.

6.1.2 Sequenciamento de mina

O sequenciamento de lavra pode ser definido como uma simulação da sequência ótima de remoção dos blocos (blocos do modelo de blocos que tiveram um valor econômico atribuído pela função benefício) para analisar os resultados econômicos e operacionais acumulados em determinados períodos (ALMEIDA, 2017). No caso deste estudo, foram determinados que os períodos seriam anuais (365 dias). O

sequenciamento possibilita a simulação e estudos de metas do empreendimento mineiro e suas consequências no fluxo de caixa da empresa (ALMEIDA, 2017).

A Hexagon Mining possui um módulo específico para o sequenciamento de lavra chamado Minesight Schedule Optimizer (MSSO). Este software foi utilizado para a realização de diversos cenários. Estes cenários variavam: taxa de produção anual, relação entre produtos e qualidades, operacionalização de cava, sentido de lavra, número de frentes abertas por ano, entre outros. O objetivo era estudar os efeitos que cada cenário produzia no fluxo de caixa do empreendimento.

De acordo com Almeida (2017), a finalidade do planejamento de mina é, em geral, produzir um sequenciamento ótimo para a mina, de acordo com o objetivo adotado pela empresa, e que geralmente é a maximização de VPL. O MSSO permite a escolha de dois diferentes objetivos do sequenciamento: a diminuição da Relação Estéril/Minério e a maximização do VPL. Todos os cenários desenvolvidos utilizaram a função que maximiza o VPL. Almeida (2017) ainda explica que os sequenciamentos de lavra levam em consideração alguns limitantes como:

- Ângulos geotécnicos – definem a precedência de lavra entre os blocos;
- Limitantes de lavra – Resultantes da disponibilidade de equipamentos e licenças; Aspectos de segurança dos operadores de equipamentos;
- Limitantes de processo – Limite de minério que pode ser processado pela usina (planta de lavagem no caso deste estudo);
- Limitantes de Mercado – Quantidade máxima de minério que pode ser absorvida pelo mercado.

Todos estes obstáculos requerem a utilizações do software MSSO, além da experiência dos profissionais de engenharia de minas que vão buscar o melhor sequenciamento de lavra para atender aos objetivos da companhia. Como as variáveis presentes nos sequenciamentos são muitas e apresentam oscilações com frequência, o engenheiro de planejamento trabalha com uma série de cenários durante o ano.

6.1.3 Capex, Opex e Período de Retorno

Existem terminologias econômicas que são comumente utilizadas em projetos de engenharia, entre elas:

Capex: O termo significa *capital expenditure* e representa os valores a serem investidos por uma empresa para o início das atividades de um projeto ou da lavra de uma cava, por exemplo. É comum também o termo *Capex Sustaining*, que representa o investimento a ser feito periodicamente para manter o funcionamento das operações. Em operações terceirizadas, é comum que parte do Capex seja transformado em Opex. Por exemplo, a compra de equipamentos de um laboratório que seria considerado Capex, vai ser transformado em Opex do contrato de uma empresa terceirizada que fornecerá os serviços de análises das amostras.

Opex: O termo significa *operational expense*, ou seja, são os gastos operacionais da mina em funcionamento. São exemplos: Energia elétrica, água, combustível, mão de obra, contratos de empresas terceirizadas, etc.

Período de retorno: De acordo com Almeida (2017), o período de retorno ou *payback*, é o tempo que se leva até que o retorno dos investimentos feitos em um projeto seja alcançado. É a partir deste índice que se analisa a viabilidade de projetos. É necessário, entretanto, fazer uma análise detalhada do tempo de recuperação do investimento, pois um período de retorno menor não significa necessariamente que este seja mais rentável comparado a outro projeto com período de retorno mais curto. Defende-se também que o período de retorno não é um bom indicador econômico quando é aplicado isoladamente, uma vez que não considera o valor do dinheiro no tempo em fluxos de caixa e nem permite avaliar a rentabilidade de um investimento (SILVA, 2009, apud, ALMEIDA, 2017). Souza, 1995, apud Almeida, 2017 resume que o *payback* é um indicador estratégico de investimentos feitos por empresas e não um método de avaliação dos mesmos.

Define ainda que os critérios de aceitação de projetos são:

- $PR > \text{limite do investidor}$ – Projeto não aceito;

- $PR < \text{limite do investidor}$ – Projeto aceito.

6.1.4 Maximização de VPL e Fluxo de Caixa

De acordo com Almeida (2017), Valor Presente Líquido (VPL) ou Valor Atual Líquido (VAL), é “a soma algébrica de todas as entradas e saídas de caixa (pagamentos e recebimentos), cujos valores são atualizados pela taxa de desconto ou TMA (Taxa Mínima de Atratividade) da empresa”. A maximização de VPL (Valor Presente Líquido), tem o objetivo de buscar o melhor resultado de fluxo de caixa do negócio mineiro (de maneira operacional) por meio do valor adotado “a partir do valor econômico de cada bloco e suas restrições de massa, teores, etc, dentro de vários períodos. (ASSIS, 2016, apud, CHANGANANE, 2017).

De acordo com Almeida (2017), o fluxo de caixa é “a ferramenta que permite identificar a capacidade de um empreendimento produzir rendimentos suficientes para suportar as suas responsabilidades e obrigações financeiras além de gerar lucro.” Este instrumento permite ainda o melhor planejamento de recursos disponíveis (financeiros) através da quantificação de entradas e saídas de caixa que um projeto ou investimento representará ao longo do tempo.

Barbosa, 2005, *apud*, Almeida, 2017, explicam que os conceitos de “dinheiro no tempo” e “fluxo de caixa” são de extrema importância na avaliação econômica de projetos e que o método de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) é uma excelente ferramenta para avaliar investimentos. O FCD é o que quantifica as saídas e entradas de fluxo de caixa em um período de tempo determinado e “permite prever a agregação de valor de um projeto ao longo do tempo e os riscos a ele associados, o que garante a eficiência na tomada de decisão” (ALMEIDA, 2017).

A ferramenta utilizada para a geração de fluxos de caixa foi o Minesight Schedule Optimizer (MSSO), que é uma ferramenta robusta de sequenciamento de mina da Hexagon Mining. Ela permite a determinação da taxa de desconto anual que será adotada no projeto (14% no projeto e questão dos platôs de bauxita). De acordo com Almeida (2017), a taxa de desconto que leva os valores do fluxo de caixa para o presente é o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC). Souza, *apud* Ross,

Westerfield e Jordan (2000), explicam que o WACC é o custo de capital total da empresa, que é o retorno determinado pela empresa sobre os seus ativos para que o valor de suas ações seja mantido. Ele pode ser calculado a partir da equação (6):

$$\text{WACC} = [(E / V) \times \text{RE}] + [(D / V) \times \text{RD} \times (1 - \text{TC})] \quad [6]$$

Onde:

E: Valor de mercado do capital próprio da empresa;

D: Valor de mercado do capital de terceiros da empresa;

V: Valor de mercado do capital de terceiros e da empresa ($V = D + E$);

RE: Custo de capital próprio;

RD: Custo de capital de terceiros;

TC: Alíquota do imposto de renda.

Os itens presentes no fluxo de caixa do MSSO são os seguintes:

- Receita;
- Receita Total;
- Custos fixos;
- Custos de mina;
- Custos de processamento;
- Reembolso;
- Custo de Capital;
- Custo G&A;
- Outros Custos;
- Fluxo de Caixa Líquido;
- Taxa de Desconto;
- Valor Presente Líquido;
- Valor Presente Líquido Acumulado.

O Valor Presente Acumulado foi item essencial para alcançar os resultados que permitiram a tomada de decisão do trade-off entre platôs de bauxita.

7 Resultados

Neste capítulo, será discutida a melhor opção em uma mina de bauxita considerando a situação econômica de abertura entre dois platôs e os fatores que envolvem essa escolha. Além disso, serão feitas análises e comparações dos impactos econômicos a curto e médio prazo e a importância de um planejamento de mina eficiente para garantia da viabilidade econômica da mina. As figuras abaixo mostram as cavas operacionais dos platôs A em preto e B em azul.

Figura 12 - Platô A - Mina de bauxita no Pará.

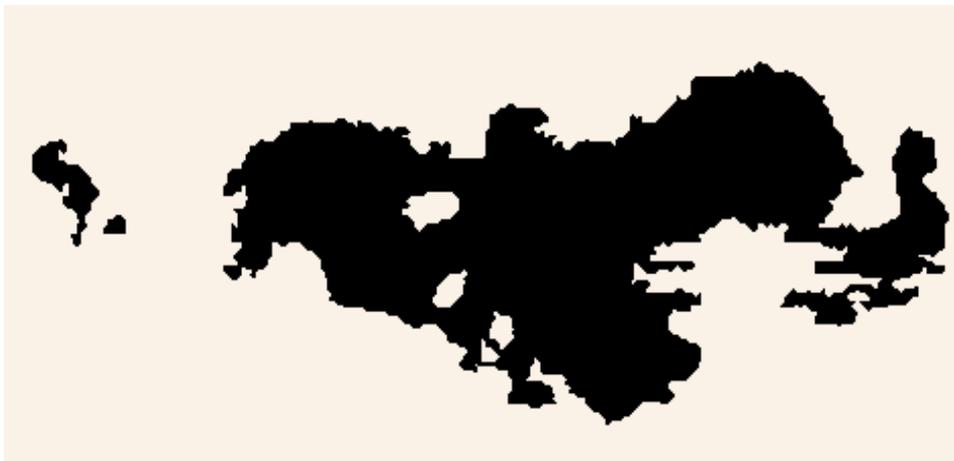
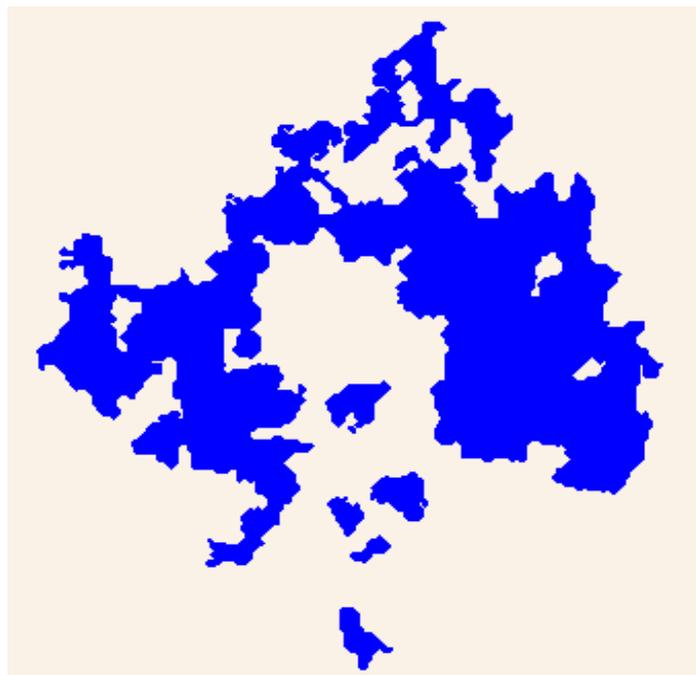
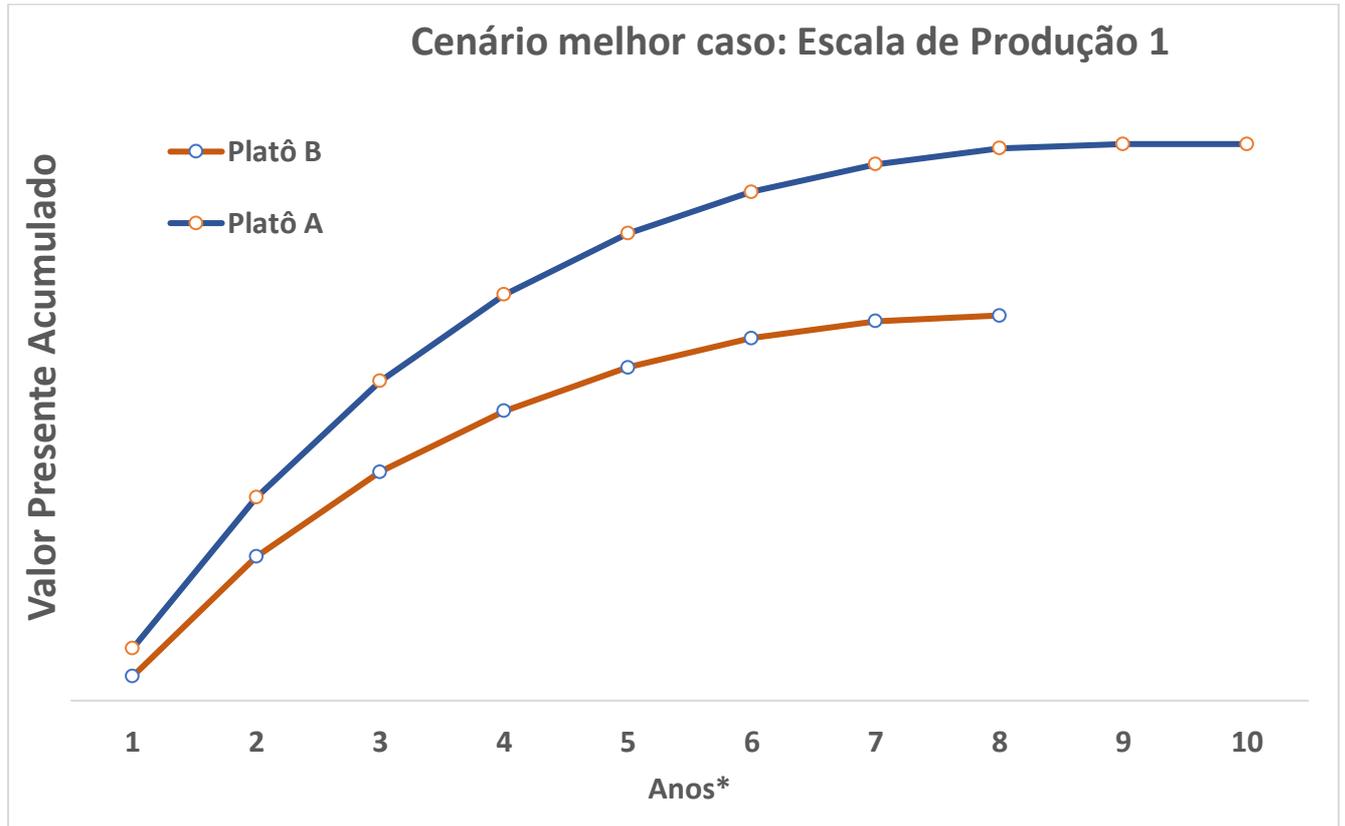


Figura 13 - Platô B - Mina de bauxita no Pará.



Estas cavas, conforme explicado, foram desenvolvidas no software MS3D. Os gráficos abaixo mostram o Valor Presente Acumulado de cenários operacionais e cenários *Best Case* considerando diferentes escalas de produção anuais. Eles foram criados a partir do fluxo de caixa que é gerado pelo software MSSO.

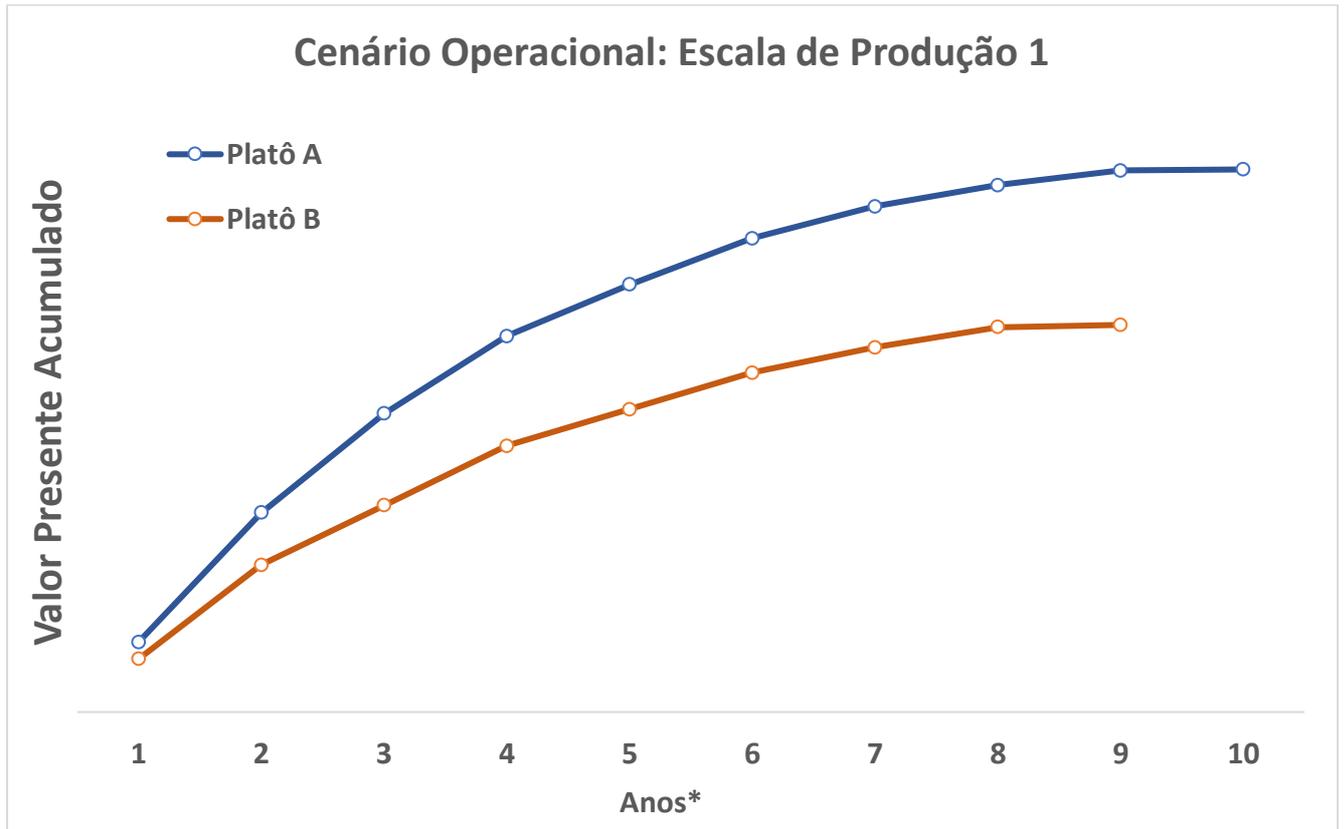
Figura 14 - Cenário do melhor caso considerando a escala de produção 1.



*Taxa de desconto: 14%; *Dados ocultados; Cenários não operacionais;

O cenário `Best Case` é aquele em o sequenciamento somente limita a produção anual, ou seja, não existe nenhum tipo de técnica que promove a operacionalização da lavra e conseqüentemente é considerado um cenário improvável de ser realizado.

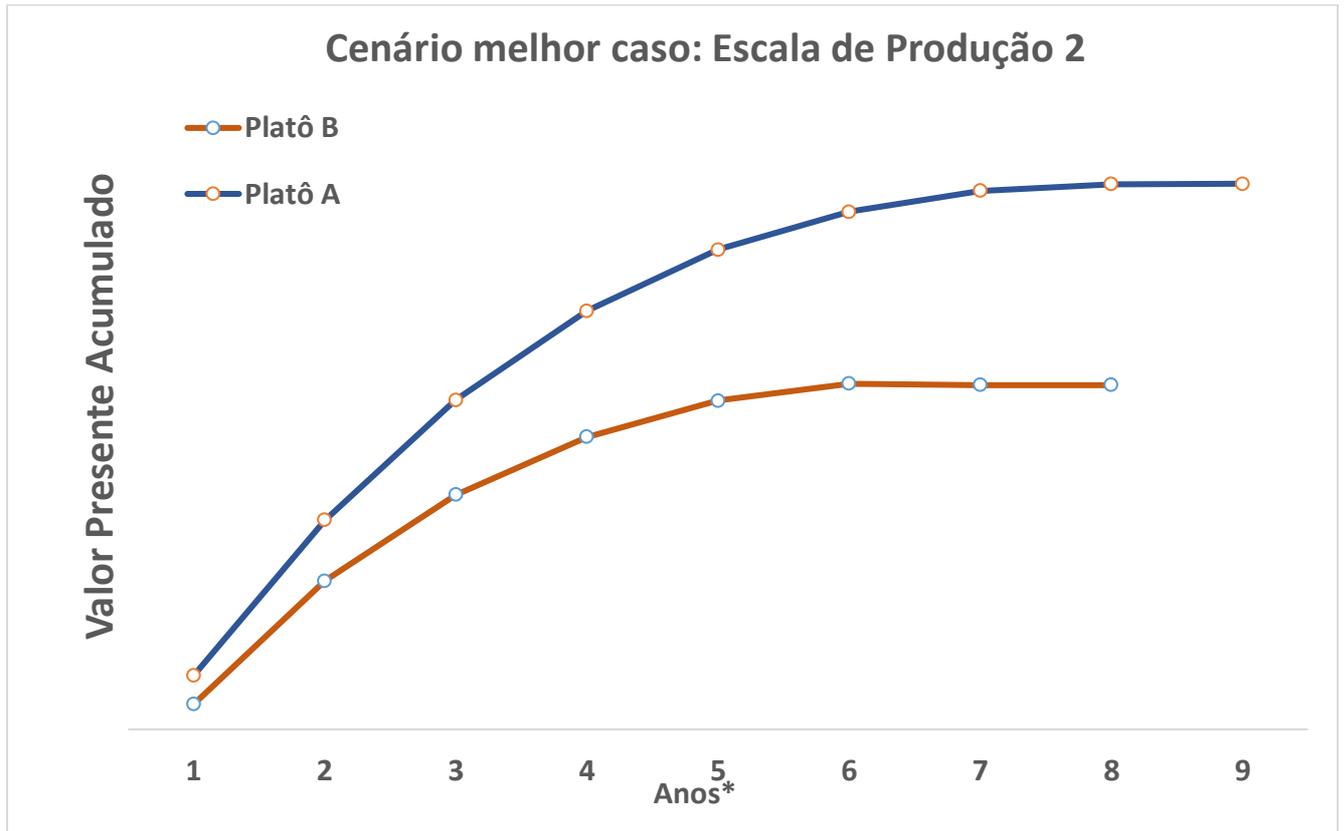
Figura 15 - Cenário operacional considerando a escala de produção 1.



*Taxa de desconto: 14%; *Dados ocultados; Cenários operacionais;

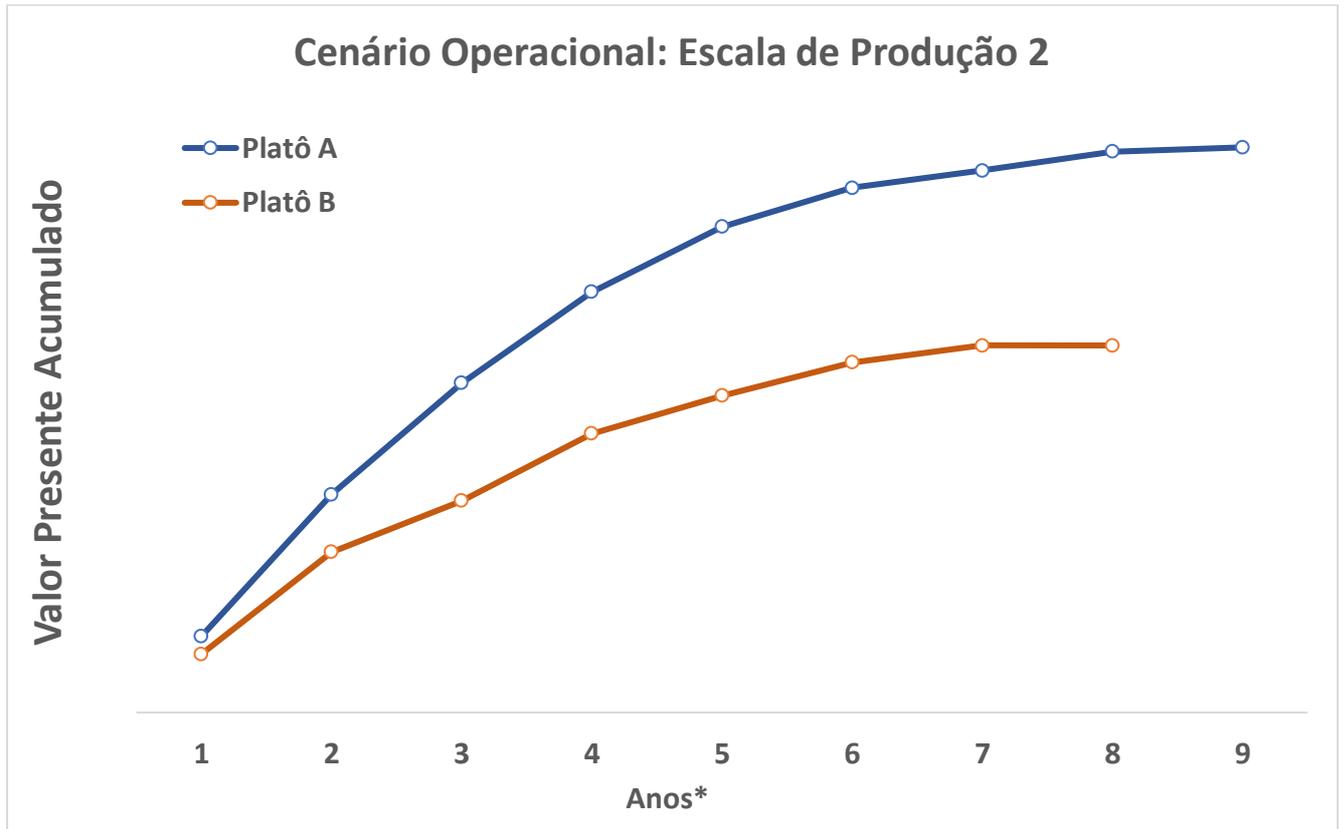
Enquanto isso, os cenários operacionais promovem a lavra de uma maneira viável à operação de mina promovendo, entretanto, uma penalização no VPL anual e acumulado.

Figura 16 - Cenário de melhor caso considerando a escala de produção 2.



*Taxa de desconto: 14%; *Dados ocultados; Cenários não operacionais;

Figura 17 - Cenário operacional considerando a escala de produção 2.



*Taxa de desconto: 14%; *Dados ocultados; Cenários operacionais;

Existe uma série de cenários que podem ser construídos alterando os objetivos, alterando premissas como por exemplo:

- Menor relação estéril minério;
- Maximização de valor presente líquido;
- Estacionarização de teores;
- Estacionarização de Distância média de transporte;
- Estacionarização de volume de estéril removida por ano;
- Controle do número de `Box Cut` a serem abertos anualmente;
- Variação de taxa de produção de diferentes qualidades de produto.

É necessária a análise de cenários construídos para que uma decisão seja tomada. GUTIERREZ, 1999, *apud*, ALMEIDA, 2017, afirma que é importante que haja a disponibilidade de informações e conhecimentos para suportar as tomadas de decisões, mas ressalva que geralmente estas informações se encontram dispersas. Destaca, no entanto, que o trabalho em grupo pode mostrar diferentes pontos de

vista, perspectivas e análises, aumentando as chances de construção de diálogos construtivos, criando diferentes propostas e argumentos. Este tipo de cenário possibilita a validação das melhores propostas.

A partir da análise dos gráficos que representam o valor presente acumulado dos platôs de bauxita, percebe-se que nos cenários '*Best Case*' e operacionais, o platô A gera maiores valores, independentemente da escala de produção adotada. De acordo com as estratégias adotadas na empresa e levando em consideração todos os parâmetros econômicos que foram definidos no item 5.1.3, o platô A representa a melhor opção e foi o escolhido no trade-off.

8 Conclusão

O planejamento de longo prazo, também conhecido como planejamento estratégico está presente desde o início de um projeto de engenharia, estudando sua viabilidade. Durante a execução do projeto, tem a função de simular cenários que maximizem o VPL do negócio e promover estudos que suportem decisões estratégicas a serem tomadas no futuro. O presente trabalho teve seu foco nos cenários desenvolvidos em dois platôs de bauxita. Estes cenários forneceram informações relativas ao VPL que seria gerado por cada um destes platôs. Tais informações auxiliaram à tomada de decisão estratégica da empresa, solucionando o trade-off que existia entre o platô A e B.

Primeiramente, foram introduzidos conceitos utilizados na mineração de bauxita, detalhando as reservas deste minério no Brasil e no mundo. Explicou-se a lavra em tiras, que é o método de lavra adotado na mina estudada e é o mais comum em minas de bauxita. Detalharam-se as técnicas utilizadas na estimativa de reservas de bauxita, que utilizou o método geoestatístico da krigagem e os algoritmos usados na construção de cavas otimizadas (Lerchs-Grossman, cones flutuantes e Pseudoflow).

Foram citados o passo a passo seguido para operacionalização de cava, além dos softwares utilizados para a elaboração da cava ótima (MS3D) e sequenciamento de mina (MSSO). Por fim, o estudo mostrou a avaliação econômica de 4 cenários produzidos a partir do sequenciamento de mina. Foram feitos cenários operacionais e não operacionais (Best Case), variando a escala de produção de bauxita anual.

Os resultados destes cenários provaram que o platô A, independentemente da escala de produção de minério, é a alternativa que apresenta maior valor presente líquido acumulado no tempo. De acordo com a estratégia adotada pela empresa, o platô que apresenta maior valor presente líquido é aquele que terá o investimento para começar a sua lavra efetuado primeiro.

9 Referências Bibliográficas

ABREU, Gabriela Fonseca. **Estudo da produtividade de tratores D11T CD no método de lavras por tiras variando os ângulos do pit em uma mina de bauxita**, 2017.

ALMEIDA, Wendel Eduardo de. **Uma análise da importância do plano de aproveitamento econômico no processo de tomada de decisão na mineração**, 2017.

AUGUSTO, Raimundo; MÁRTIRES, Corrêa. **Informe Mineral Regional: Norte-Amazônia 2007-2008**.

ARROYO ORTIZ, Carlos Enrique. **Uma utilização de simulação geoestatística no tratamento de incertezas no planejamento de mina**, 2008.

CAMPOS, Pedro Henrique Alves. **Um comparativo de metodologias no planejamento de lavra: sequenciamento direto de blocos vs. planejamento tradicional**, 2017.

CHANGANANE, Arsénio Paulo. **Estudo dos parâmetros envolvidos na determinação da função benefício na mineração**, 2017.

CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. Oficina de Textos, 2017.

DO CARMO, Frederico Augusto Rosa. **Metodologia para planejamento de cavas finais a minas a céu aberto otimizadas**, 2001.

LISBOA, Mayara da Costa. **Impacto da incorporação da variável densidade na estimativa de reservas minerais de ferro: mina de Brucutu**, 2018.

MÁRTIRES, Raimundo Augusto Corrêa. **Balanço Mineral Brasileiro**. DNPM, 2001

SANTANA, Andre Luiz. Sumário Mineral 2014: Departamento Nacional de Produção Mineral. **Ministério das Minas e Energia. Brasília**, p. 28, 2014.

OLIVEIRA, Fábio Soares de. **A bauxita de Barro Alto (GO): gênese e evolução mineralógica, micromorfológica e geoquímica**, 2011.

PERONI, Rodrigo de Lemos. **Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico**, 2002.

PINHEIRO, W. F.; FERREIRA FILHO, O. B.; NEVES, C. A. R. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. **DNPM: Brasília, Brasil**, 2016.

PONIEWIERSKI, Julian. **PSEUDOFLOW EXPLAINED**. Disponível em: < <https://www.deswik.com/pt-br/news/pseudoflow-explained/>>. Acesso em: 05 Nov. 2018.

SILVA, Nelson Camurugi Senhorinho. **Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para a obtenção de resultados operacionais**, 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, Rondinelli de Sousa. **Aplicação de tecnologia wireless para controle de qualidade do planejamento de lavra incorporando a incerteza geológica**, 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, Rafael Alvarenga de. **Análise da influência da incerteza geológica no planejamento de lavra**, 2016. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto

Certifico que o aluno Marcus Vinícius Barros De Simoni, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado “PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO EM MINA DE BAUXITA – TRADE OFF ENTRE A ORDEM DA OPERAÇÃO EM PLATÔS DE BAUXITA”, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Orientador